



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ÇEŞİTLİ PARAMETRELERİN BETONUN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE VE
KOROZYON DAVRANIŞINA ETKİSİNİN
İSTATİSTİKSEL YÖNTEMLER
KULLANILARAK ARAŞTIRILMASI**

Kemal URAY

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Kemal URAY tarafından hazırlanan “Çeşitli Parametrelerin Betonun Mekanik Özelliklerine ve Korozyon Davranışına Etkisinin İstatistiksel Yöntemler Kullanılarak Araştırılması” adlı tez çalışması 29/05/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Hasan Hüsnü KORKMAZ

.....

Danışman

Prof. Dr. Hicran AÇIKEL

.....

Üye

Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN

.....

Üye

Doç. Dr. Arife AKIN

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ali Serdar ECEMİŞ

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Şerife Yurdagül KUMCU
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 221419004 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Kemal URAY

Tarih:

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ÇEŞİTLİ PARAMETRELERİN BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE VE KOROZYON DAVRANIŞINA ETKİSİNİN İSTATİSTİKSEL YÖNTEMLER KULLANILARAK ARAŞTIRILMASI

Kemal URAY

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Hicran AÇIKEL

2024, 326 Sayfa

Jüri

Prof.Dr. Hicran AÇIKEL

Prof. Dr. Hasan Hüsnü KORKMAZ

Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN

Doç. Dr. Arife AKIN

Dr. Öğr. Üyesi Ali Serdar ECEMİŞ

Günümüzde küresel ısınma, çimento endüstrisinin karbon ayak izi ve sera gazı emisyonlarıyla doğrudan ilişkilendirilen önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Çimento üretimi, hammaddelerin kalsinasyonu ve yakıtın yanması gibi süreçlerde büyük miktarda sera gazı salınımına neden olmaktadır. Bu nedenle, çimento endüstrisiyle ilişkilendirilen sera gazı emisyonlarını azaltmak için daha sürdürülebilir üretim yöntemleri ve alternatif malzemelerin kullanımı gibi stratejilerin benimsenmesi, küresel ısınma ile mücadelede kritik öneme sahiptir. Korozyon hasarı, betonarmade malzeme kaybına yol açarak yapısal bütünlüğü zayıflatan ve yapıların dayanıklılığını azaltan en önemli kimyasal hasar türüdür. Bu durum, deprem durumunda yapıların performansını olumsuz yönde etkileyerek yapısal hasarın boyutunu artırmaktadır. Ayrıca, korozyonun neden olduğu donatı kaybı, yapısal elemanların gevrek kırılmalarına veya aşırı deforme olmalarına yol açmakta, bu da deprem sonrası can ve mal kayıplarını artırmaktadır. Bu nedenle, betonarme yapıların dayanıklılığı ve uzun süreli performansı için korozyonun önlenmesi ve kontrol edilmesi kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada çimento yerine; belirli oranlarda silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ikame edilerek üretilen sürdürülebilir çevreci betonun, mekanik ve korozyon özelliklerini kapsayan deney sonuçları kullanılarak Taguchi, Yüzey Tepki ve Gri İlişkisel analiz istatistik tabanlı yöntemler ile parametrik etki araştırılmıştır. Üç farklı yapay puzolanın kullanıldığı bu çalışmada beton reolojisinin dayanım ve dayanıklılık üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla süper akışkanlaştırıcı katkı yüzdesi de parametre olarak seçilmiştir. Buna göre kullanılan 4 farklı parametrenin 3 seviyesi için Taguchi L9 ortogonal dizi seçilerek 9 farklı karışım üretilmiştir. Üretilen bu karışımlarda silis dumanı (SD) ikame oranları %3-6-9, yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül (UK) ikame oranları %10-15-20 ve süper akışkanlaştırıcı (SA) kullanım oranı %1.25-1.50-1.75 olarak belirlenmiştir. İçeriğinde puzolanların bulunduğu karışımların dayanım ve dayanıklılık özellikleri, içerisinde mineral katkı bulunmayan 300 kg/m³ Portland çimentolu referans beton serisi ile karşılaştırılmıştır. Diğer yandan betonarme yapılarda yaygın olarak kullanılan korozyon inhibitörlerinden biri olan kalsiyum nitritin, beton dayanım ve dayanıklılık özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre beton karışımlarında istatistik yöntemlerin kullanımının hızlı ve güvenilir sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Ayrıca beton üretiminde kullanılan mineral katkıların, betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: İstatistiksel Deney Tasarımı, Korozyon, Optimum Karışım, Silis Dumanı, Uçucu Kül, Granüle Yüksek Fırın Cürufu, Taguchi Metodu

ABSTRACT

Ph.D THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF VARIOUS PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES AND CORROSION BEHAVIOR OF CONCRETE USING STATISTICAL METHODS

Kemal URAY

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN CIVIL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Hicran AÇIKEL

2024, 326 Pages

Jury

**Prof.Dr. Hicran AÇIKEL
Prof. Dr. Hasan Hüsnü KORKMAZ
Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN
Assoc.Prof.Dr. Arife AKIN
Asst.Prof.Dr. Ali Serdar ECEMİŞ**

Today, global warming emerges as an important problem that is directly associated with the carbon footprint and greenhouse gas emissions of the cement industry. Cement production leads to substantial greenhouse gas emissions during processes such as raw material calcination and fuel combustion. Therefore, adopting strategies such as sustainable production methods and the use of alternative materials to reduce greenhouse gas emissions associated with the cement industry is of critical importance in combating global warming. Corrosion damage is the most important type of chemical damage that causes material loss in reinforced concrete, weakening structural integrity and reducing the durability of structures. This situation negatively affects the performance of structures in the event of an earthquake and increases the extent of structural damage. Moreover, corrosion-induced loss of reinforcement can lead to brittle fractures or excessive deformations of structural elements, further exacerbating casualties and property losses after earthquakes. Hence, prevention and control of corrosion are crucial for the durability and long-term performance of reinforced concrete structures. In this study, instead of cement; Using test results covering the mechanical and corrosion properties of sustainable environmentally friendly concrete produced by substituting certain amounts of silica fume, fly ash and blast furnace slag, the parametric effect was investigated with Taguchi, Surface Response and Gray Relational analysis statistical-based methods. In this study, in which three different artificial pozzolans were used, the percentage of superplasticizer additive was chosen as a parameter in order to determine the effect of concrete rheology on strength and durability. Accordingly, a Taguchi L9 orthogonal array was selected for 9 different mixtures considering 4 different parameters at 3 levels. In these mixtures, substitution rates of silica fume ranged from 3% to 9%, while those of blast furnace slag and fly ash ranged from 10% to 20%, and superplasticizer dosage ranged from 1.25% to 1.75%. The strength and durability properties of mixtures containing pozzolans were compared with a reference concrete series containing 300 kg/m³ of Portland cement without mineral admixtures. Additionally, the effect of calcium nitrite, a commonly used corrosion inhibitor in reinforced concrete structures, on concrete strength and durability properties was investigated. The results demonstrate that the use of statistical methods in concrete mix designs yields rapid and reliable results. Furthermore, it was observed that mineral admixtures used in concrete production improve the strength and durability properties of concrete.

Keywords: Corrosion, Fly Ash, Granulated Blast Furnace Slag, Optimum Mixture, Silica Fume, Statistical Experimental Design, Taguchi Method

ÖNSÖZ

Doktora eğitimim süresince değerli bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim, tez çalışmamın tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, beni her daim cesaretlendiren, yoluma ışık tutan, hangi konuda ihtiyacım olsa arkamda olan başta değerli danışman hocam Prof. Dr. Hicran AÇIKEL'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca yardımcı danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KOÇER'e teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, tez izleme komitesinde bulunan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Hasan Hüsnü KORKMAZ ve Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN'a teşekkürlerimi sunarım. Diğer yandan çok kıymetli bilgilerini benden esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Özer SEVİM'e teşekkürü borç bilirim. Deneysel çalışmalar sırasında laboratuvar imkanlarından yararlanmamı sağlayan kıymetli hocam Prof. Dr. Mehmet Faik SEVİMLİ'ye teşekkür ederim. Deney çalışmalarım ve malzeme temini noktasında yardımları için değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Kâmil AKIN'a ve Arş. Gör. Abdullah MÜSEVİTOĞLU'na, ayrıca deneyler ve karışımların hazırlanması sırasında yardımları için değerli dostlarım Mehmet Hilmi TUTUMLU'ya, İsmail NAZLI'ya, Mustafa DEMİR'e, Gökhan YÜCEL'e ve laboratuvar sorumlusu, kardeşim Rıza ELVAN'a teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarda kullanılan deney ekipmanlarının alınmasında 221419004 nolu projeyle verdikleri maddi destekten dolayı NEÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkürü borç bilirim. Deneysel çalışmalarda kullanılan yüksek fırın cürufunun teminini sağlayan Korkmaz Beton A.Ş.'ye ve yine deneysel çalışmalarda kullanılan korozyon inhibitörünü temin eden LYKSOR Yapı Kimyasalları San. ve Tic. A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak enerji kaynağım, motivasyonuma muazzam katkı sağlayan oğlum Tarık Mirza URAY'a, doktora eğitimim boyunca manevi ve elinden geldiği ölçüde yardımını esirgemeyen, yanımda olup yolumu aydınlatan, kıymetli eşim, yol arkadaşım Dr. Esra URAY'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Doğduğum günden itibaren fedakârca benimle ilgilenen, elinden gelen hiçbir imkânı benden esirgemeyen, dualarını her daim hissettiğim annem Keziban URAY'a, hayatımdaki ilk öğretmenim olan, her ne derdim olsa hem tecrübesi hem de maddi manevi destekleriyle yanımda olan, eğitimim ve yetişmemde çok büyük emeği geçen babam İsmail URAY'a, ve diğer tüm sevdiklerime teşekkürü bir borç bilirim.

Kemal URAY
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Önemi, Amacı ve Kapsamı.....	1
1.2. Betonarmede Donatı Korozyonu	5
1.2.1. Korozyon mekanizması	7
1.2.2. Betonarme donatısının korozyonuna etki eden faktörler.....	9
1.2.3. Bazı korozyon koruma yöntemleri	17
1.2.4. Betonarmede korozyon ölçüm yöntemleri.....	19
1.2.5. Betonarmede bağ dayanımı ve korozyonun bağ dayanımına etkisi	21
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	22
2.1.Taguchi Yöntemi Kullanılarak Yapılan Çalışmalar	22
2.2. Mineral Katkı Kullanılarak Yapılan Çalışmalar	32
2.3. Korozyon ve Bağ Dayanımı Çalışmaları	38
3. MATERYAL ve YÖNTEM	50
3.1. Materyal.....	50
3.1.1. Çimento.....	50
3.1.2. Karışım suyu	52
3.1.3. Agrega.....	52
3.1.4. Donatı.....	54
3.1.5. Silis dumanı (SD).....	54
3.1.6. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GYFC).....	56
3.1.7. Uçucu kül (UK)	58
3.1.8. Kalsiyum nitrit ve sodyum klorür tuzu	60
3.1.9. Süper akışkanlaştırıcı	60
3.2. Yöntem.....	61
3.2.1. İstatistik yöntemler ve deney tasarımı (DoE)	61
3.2.2. Donatı ve korozyon numunesi hazırlama metodolojisi	72
3.2.3. Beton karışımı hazırlama metodolojisi	74
3.2.4. Numune özellikleri, kür süresi ve koşulları	75
3.2.5. Betonun iç yapısı ve özellikleri	76
3.2.6. Taze beton kıvamının belirlenmesi.....	80
3.2.7. Basınç dayanımı.....	81
3.2.8. Ultra ses geçiş hızı (UPV) deneyi.....	81

3.2.9. Eğilme dayanımı	82
3.2.10. Yarmada çekme dayanımı	83
3.2.11. Su emme yüzdesi	84
3.2.12. Hızlandırılmış korozyon deneyi.....	84
3.2.13. Pullout deneyi	88
3.2.14. Ağırlık kaybı yüzdesinin belirlenmesi.....	89
4. DENEY SONUÇLARI	90
4.1. Taze Beton Kıvamının Belirlenmesi.....	90
4.2. Basınç Dayanımı.....	92
4.2.1. 14 günlük basınç dayanımı	92
4.2.2. 28 günlük basınç dayanımı	94
4.2.3. 56 günlük basınç dayanımı	96
4.3. Ultra Ses Geçiş Hızı (UPV) Deneyi	99
4.4. Eğilme Dayanımı	100
4.4.1. 14 günlük eğilme dayanımı.....	101
4.4.2. 28 günlük eğilme dayanımı.....	102
4.4.3. 56 günlük eğilme dayanımı.....	104
4.5. Yarmada Çekme Dayanımı.....	105
4.5.1. 14 günlük yarmada çekme dayanımı	106
4.5.2. 28 günlük yarmada çekme dayanımı	107
4.5.2. 56 günlük yarmada çekme dayanımı	108
4.6. Su Emme Yüzdesi.....	110
4.7. Hızlandırılmış Korozyon Deneyi.....	112
4.8. Pullout Testi	122
4.9. Ağırlık Kaybı Yüzdesinin Belirlenmesi	134
4.10. SEM-EDX Analizi	139
4.10.1. 28 ve 56 günlük bazı serilerde SEM görüntüleri	139
4.10.2. 28 ve 56 günlük bazı serilerde EDX analizi	146
5. İSTATİSTİK ANALİZ SONUÇLARI.....	153
5.1. Taze Beton Kıvamı	154
5.2. Basınç Dayanımı.....	157
5.2.1. 14 günlük basınç dayanımı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi	157
5.2.2. 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi	161
5.2.3. 56 günlük basınç dayanımı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi	164
5.3. Ultra ses Geçiş Hızı (UPV).....	170
5.3.1. 28 günlük ultra ses geçiş hızı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi	170
5.3.2. 56 günlük ultra ses geçiş hızı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi	173
5.4. Eğilme Dayanımı	175
5.4.1. 14 günlük eğilmede çekme dayanımı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi	175
5.4.2. 28 günlük eğilmede çekme dayanımı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi	178

5.4.3. 56 günlük eğilmede çekme dayanımı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi	182
5.5. Yarmada Çekme Dayanımı.....	184
5.5.1. 14 günlük yarmada çekme dayanımı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi	185
5.5.2. 28 günlük yarmada çekme dayanımı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi	187
5.5.3. 56 günlük yarmada çekme dayanımı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi	189
5.6. Su Emme Yüzdesi.....	192
5.6.1. 28 günlük su emme yüzdesi deney sonuçlarının değerlendirilmesi	192
5.6.2. 56 günlük su emme yüzdesi deney sonuçlarının değerlendirilmesi	194
5.7. Hızlandırılmış Korozyon Deneyi.....	196
5.7.1. K2 durumunda çekilen korozyon akımı sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi	196
5.7.2. K4 durumunda çekilen korozyon akımı sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi	199
5.7.3. K6 durumunda çekilen korozyon akımı sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi	201
5.8. Pullout Testi.....	204
5.8.1. Maksimum aderans gerilmesi (τ_u) deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi	204
5.8.2. Toplam tüketilen enerji (TTE).....	214
5.9. Ağırlık Kaybı Yüzdesi	223
5.9.1. K2 durumunda gerçek ağırlık kaybı yüzdesinin istatistik açıdan değerlendirilmesi	224
5.9.2. K4 durumunda gerçek ağırlık kaybı yüzdesinin istatistik açıdan değerlendirilmesi	226
5.9.3. K6 durumunda gerçek ağırlık kaybı yüzdesinin istatistik açıdan değerlendirilmesi	228
5.10. Bazı Kriterler İçin Regresyon Denklemine Elde Edilmesi.....	231
5.10.1. Basınç dayanımı regresyon denkleminin elde edilmesi.....	232
5.10.2. Eğilmede çekme dayanımı regresyon denkleminin elde edilmesi.....	234
5.10.3. Yarmada çekme dayanımı regresyon denkleminin elde edilmesi	237
5.10.4. Maksimum bağ dayanımı regresyon denkleminin elde edilmesi.....	241
5.10.5. Toplam tüketilen enerji için regresyon denkleminin elde edilmesi.....	244
5.11. Gri İlişkisel Analiz ve Entropi ile Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV).....	246
5.11.1. Dayanım kriterleri için GİA yapılarak optimum serinin seçilmesi.....	247
5.11.2. Dayanıklılık kriterleri için GİA yapılarak optimum serinin seçilmesi	253

6. DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRMALI İNCELENMESİ VE GENEL DEĞERLENDİRME

260

6.1. Ortogonal Dizi Serilerinde Basınç Dayanımı-Çökme (Slump) İlişkisi	260
6.2. Basınç Dayanımı – Ultra ses Geçiş Hızı İlişkisi.....	261
6.3. Basınç Dayanımı – Yarmada Çekme Dayanımı İlişkisi	264
6.4. Basınç Dayanımı – Eğilmede Çekme Dayanımı İlişkisi	266
6.5. Yarmada Çekme Dayanımı – Eğilmede Çekme Dayanımı İlişkisi	269
6.6. Korozyon Özelliklerinin Basınç Dayanımı ve Su Emme Yüzdesi ile İlişkisi ...	271
6.6. Gravimetrik ve Elektrokimyasal Kütle Kaybı İlişkisi	273
6.7. Bağ Dayanımı ve Gravimetrik Kütle Kaybı İlişkisi	274

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	276
7.1. Sonuçlar	277
7.2. Öneriler	286
8. KAYNAKLAR	288
EKLER	306



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	Su Emme Oranı Deneyi Etüv Kuru Ağırlık
B	Su Emme Oranı Suya Doygun Ağırlık
CL	Gerçek Ağırlık (Gravimetrik) Kaybı Yüzdesi
d	Silindir Numune Çapı
d ₁ ve d ₂	Silindir Numune En Kesit Boyutları
Δ_{min}	Mutlak Değer Matrisinin En Büyük Değeri
Δ_{maks}	Mutlak Değer Matrisinin En Küçük Değeri
$\Delta_{oi(j)}$	Mutlak Değer Matrisinde j. Serinin Değeri
ds	Toplam Deney Sayısı ve Donatı Çapı
F	Beton Eğilmede Çekme Kırılma Yüğü
G ₀	Donatı İlk Ağırlığı
G ₁	Korozyon Sonrası Donatı Ağırlığı
HNO ₃ +3HCL	Kral Suyu Çözeltisi
I	Amper Cinsinden Çekilen Ortalama Akım
L	Mesnet Silindirler Arası Mesafe ve Silindir Numune Boyu
l	Donatı Bağlı Boy Uzunluğu
min _{xi}	Hedef Performans Kriterinin En Küçük Değeri
maks _{xi}	Hedef Performans Kriterinin En Küçük Değeri
n	Deney Tekrar Sayısı
NaCl	Sodyum Klorür Tuzu
p	Parametre Sayısı
P _k	Beton Yarmada Çekme Kırılma Yüğü
P _u	Maksimum Çekme Kuvveti
R ²	Determinasyon Katsayısı
s	Parametre Seviye Sayısı
t	Saniye Cinsinden Uygulanan Akım Süresi
xi(j)	İlgili Serinin Performans Değeri
Y ₀	İstenilen Hedef Değeri
Y _i	i. Deneyin Performans Değeri
δ	Özgöl Ağırlık
η	Ortalama S/N Değeri
η_{ij}	Her Bir Parametre ve Seviye için Ortalama S/N Değeri
η_{pi}	Her Bir Parametre için Ortalama S/N Değeri
$\sigma_{eç}$	Betonun Eğilmede Çekme Gerilmesi
$\sigma_{yç}$	Betonun Yarmada Çekme Gerilmesi
τ_u	Maksimum Aderans Gerilmesi
Y _{0i(j)}	Seri Gri İlişki Katsayısı

Kısaltmalar

a/b	Agrega / Bağlayıcı Oranı
a/ç	Agrega / Çimento Oranı
ACI	American Concrete Institute (Amerikan Beton Enstitüsü)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
b/a	Bağlayıcı / Agregası Oranı
BD	Basınç Dayanımı
c/D	Paspayı / Donatı çapı
Ca(NO) ₂	Kalsiyum Nitrit
CaCO ₃	Kalsiyum Karbonat
CaO	Kalsiyum Oksit
CH	Kalsiyum Hidroksit (Portlandit)
CSH	Kalsiyum Silikat Hidrat
ÇKKV	Çok Kriterli Karar Verme
DCI	Kalsiyum Nitrit Korozyon İnhibitörü
DKY	Doygun Kuru Yüzey
DoE	İstatistiksel Deney Tasarımı
EC	Euro Codes (Avrupa Tüzük ve Yönetmelikleri)
ED	Eğilmede Çekme Dayanımı
EDX	Enerji Dağılım X Işını Spektrometrisi
GİA	Gri İlişkisel Analiz
GİD	Gri İlişki Derecesi
GYFC	Granüle Yüksek Fırın Cürufu
KS	Kür Süresi
PÇ	Portland Çimentosu
s/b	Su / Bağlayıcı Oranı
s/ç	Su / Çimento Oranı
S/N	Sinyal / Gürültü Oranı
SA	Süper Akışkanlaştırıcı
SD	Silis Dumanı
SEM	Elektron Mikroskop Görüntüleme
TTE	Toplam Tüketilen Enerji
UK	Uçucu kül
UPV	Ultra Ses Geçiş Hızı
XRD	X-Işını Difraksiyon Spektroskopisi
YTM	Yüzey Tepki Metodu

1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasında, sürdürülebilir çevreci betonun, mekanik ve korozyon özelliklerini kapsayan deney sonuçları kullanılarak Taguchi, Yüzey Tepki ve Gri İlişkisel analiz istatistik tabanlı yöntemler ile parametrik etki ve optimum karışım bileşenleri araştırılmıştır. Çimento yerine; sanayi atığı olan silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu mineral katkıları belirli oranlarda ikame edilerek beton numuneler üretilmiştir. Ayrıca çalışmada, beton reolojisinin dayanım ve dayanıklılık üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla üç farklı puzolanla birlikte süper akışkanlaştırıcı katkı yüzdesi de parametre olarak seçilmiştir.

1.1. Tezin Önemi, Amacı ve Kapsamı

Günümüz dünyasında özellikle küresel ısınmayla mücadele ettiğimiz bu koşullarda çimento üretiminden kaynaklı atmosfere salınan sera gazlarını azaltmak, çevresel sürdürülebilirlik açısından çok önemlidir. Çimentonun, inşaat mühendisliğinin çeşitli alanlarında, özellikle beton üretiminde yaygın olarak kullanılması, küresel ölçekte karbon dioksit emisyonlarının yaklaşık %7'sine sebep olmakta ve oluşturduğu karbon ayak izi nedeniyle çevresel kaygıları artırmaktadır. Bu amaçla bilim insanları ve mühendisler, yapısal bütünlüğü ve maliyet etkinliğini koruyan, zararlı çevresel etkiyi en aza indiren alternatif yaklaşımları araştırmaktadır. Buna göre yapılan çalışmalarda; sanayi atığı olarak elde edilen uçucu kül, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu gibi puzolan (mineral katkı) kullanımı ile çimentoya olan ihtiyaç azaltılmış ve dolayısıyla çimento üretimiyle ilişkili zararlı çevresel etkinin düşürülmesinin mümkün olduğunu gösteren umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuç, karbon emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olmakla birlikte, maliyet tasarrufuna ve atık malzemelerin geri dönüştürülmesini sağlamaktadır. Çimentoya olan bağımlılığı azaltan ve betonun dayanım ve dayanıklılığını arttıran uçucu kül, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu gibi atık malzemelerin, beton üretiminde kullanılıp ekonomiye kazandırılmasının önemi ön plana çıkmaktadır. Bahsedilen mineral katkılar; kendi başlarına bağlayıcı özelliklerinin olmaması ya da çok az olması sebebiyle çimentoyla birlikte kullanılıp çimentonun hidratasyon ürünleri ile reaksiyona girerek bağlayıcı özellik kazanmaktadırlar.

Beton ve donatının birlikte kullanılmasıyla meydana gelen betonarme yapılar ekonomik ömürleri boyunca fiziksel ve agresif çevre koşullarından kaynaklı birçok etkiye

maruz kalabilmektedir. Özellikle nemli ve tuzlu ortamda bulunan betonarme yapının, ekonomik ömrünü azaltan en önemli kimyasal bozulma olarak tanımlanan korozyonun olumsuz etkisi; denizel ortamın olduğu kıyı şehirlerinde ve kışın dondan dolayı tuzlama yapılan üstgeçit köprülerinde yaygın olarak görülebilmektedir. Korozyon mekanizması sonucunda betonarme yapılarda donatı etrafındaki pasif tabaka özelliğini kaybederek donatıda paslanmalar meydana gelmektedir. Donatıda meydana gelen bu paslanmalardan kaynaklı hacim artışları betonun çekme gerilmesini aşarak çatlaklara sebep olmakta ve betonarme yapının durabilitesini olumsuz etkilemektedir. Donatı korozyonunu önlemenin kolay, ekonomik ve en etkili yolu betonun geçirimsizliğini azaltıp donatının pasif tabakasının bozulmasını engellemektir. Agresif ortam koşullarının sebep olduğu korozyon, yapının ekonomik ömrünü azaltmakta ve belirli dönemlerde bakım ve onarım çalışmalarını zorunlu hale gerektirmektedir. Bu sebeple, beton üretiminde çimentodan daha ince taneli puzolanlar kullanılarak geçirimsizliğin azaltılması, betonarme elemanların saldırgan ortam koşullarına dayanıklılık göstermesini sağlamaktadır.

Tez kapsamında yapılan ve Bölüm 2’ de detaylı olarak verilen literatür araştırması sonuçlarına göre, endüstriyel atık malzemelerin (mineral katkı) beton karışımlarda kullanımının ekonomiye, çevresel sürdürülebilirliğe ve betonun dayanım, durabilite özelliklerine katkı sağlayabileceği görülmüştür. Korozyon hasarına maruz kalan yapılarda onarım, zor ve maliyetli olmaktadır. Hizmet ömrü boyunca korozyon ortamına maruz kalma potansiyeli bulunan yapıların yapım aşamasında, uygun beton karışım tasarımı ile korozyon hasarına bağlı onarımlardan kaynaklanacak ekonomik kayıpların önüne geçilebilmektedir. Korozyon hasarına bağlı olarak betonarme elemanlarda oluşan donatı ve beton arasındaki aderans kaybı, ülkemizin depremselliği göz önünde bulundurulduğunda çok önemli olmaktadır.

Bu tez çalışmasının özgünlüğü, literatürde eksik durumda olan korozyon ve bağ dayanımına yönelik istatistikî deneysel tasarım çalışmalarının yapılması ve literatür açığının kapatılmaya çalışılmasıdır. Buna göre tez kapsamında, farklı içerikteki betonların mekanik özelliklerinin incelenmesine ilave olarak betonun korozyon davranışı ve bağ dayanımı değişimi araştırılmıştır.

Betonun dayanım özellikleri kapsamında; basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, bağ dayanımı (pullout) ve ultra ses geçiş hızı değeri dikkate alınırken dayanıklılık özellikleri olarak su emme yüzdesi, çekilen korozyon akımı miktarı ve ağırlık kaybı yüzdesi (korozyon oranı) deneyleri yapılmıştır. Yukarıda bahsedilen

beton dayanım ve dayanıklılık deneyleri, istatistiksel değerlendirmede performans kriteri (hedef deney değeri) olarak seçilmiştir.

Birçok parametrenin bir araya getirilmesi ile elde edilen beton karışımında, bileşenlerin mekanik ve korozyon özelliklerine etkisinin araştırılması deney sayısını, dolayısıyla araştırma maliyetlerini ve harcanan zamanı arttırmaktadır. Bu sebeple çalışmada parametrik etkinin hızlı ve etkin bir şekilde belirlenmesi için istatistiksel bir yöntem olan Taguchi metodu kullanılmıştır. Araştırma maliyeti ve zaman açısından kazanç sağlayan Taguchi metodunun kullanılması ile deneysel çalışmalarda daha çok parametrenin hedef deneylere etkisi araştırılmış ve parametre optimizasyonu yapılmıştır.

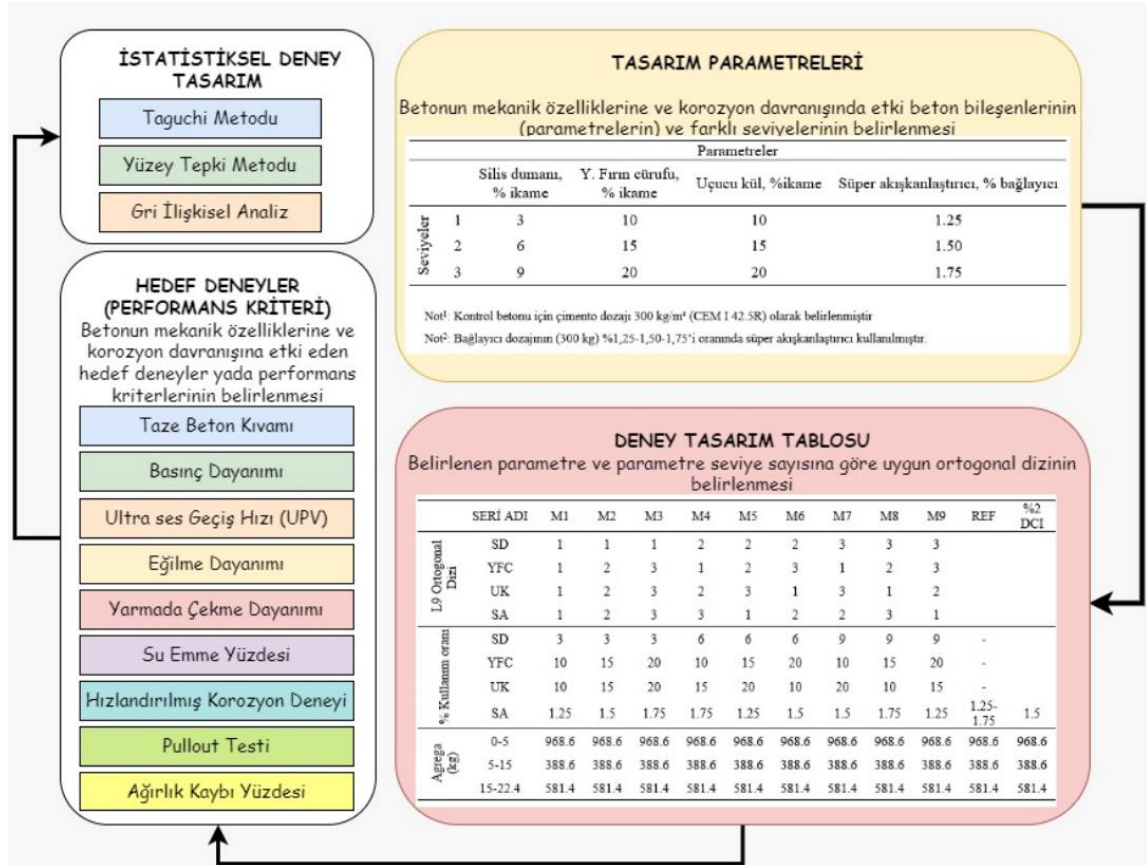
Tez alışması kapsamında parametreler belirlenirken istatistiki deneysel çalışma literatüründe olmayan parametreler bir araya getirilmeye çalışılmıştır. Üretilen beton karışım içeriğinde farklı değerlerde kullanılan parametreler, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve süper akışkanlaştırıcı olarak dikkate alınmıştır.

Değişen beton karışım içeriklerine göre üretilen beton numunelerinin mekanik özellikleri ve korozyon davranışının istatistiksel deney tasarımı yöntemleri ile incelenmesi bu tez çalışmasının başlıca amacıdır. Tez alışması kapsamında diğer amaçlar aşağıda listelenmiştir;

- Taguchi L9 ortogonal deney tasarımı kullanılarak üretilen 9 farklı karışım içeriğine sahip beton numuneleri arasından, performans kriterleri üzerinde en etkili parametrenin, varyans analizi ile araştırılması,
- Performans kriterlerinin en yüksek olduğu optimum karışımın 9 farklı karışım içeriğine sahip beton numuneleri arasından belirlenmesi,
- Kriterlerin birbiri ile ilişkisinin irdelenmesi;
- Optimum karışım içeriğine göre gerçekleştirilen performans kriterlerinin doğrulama deneyleri ile Taguchi Yöntemi kullanılarak tahmin edilen hedef deney değerlerinin karşılaştırılması,
- Performans kriterleri dikkate alınarak Taguchi Yöntemi ile elde edilen istatistik analiz sonuçlarının Yüzey Tepki Metodu kullanılarak birlikte değerlendirmesi,
- Az sayıda deney verisi ile Yüzey Tepki Metodu kullanılarak kuadratik regresyon analizi tabanlı matematik modeller geliştirilmesi,
- Birçok dayanım ve dayanıklılık kriterinin ele alındığı tez çalışmasında dayanım ve dayanıklılık için ayrı ayrı olmak üzere genele hitap eden optimum karışım

kombinasyonunun belirlenmesinde çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinden olan Gri İlişkisel Analiz yönteminin uygulanmasıdır.

Tez çalışması kapsamında farklı parametrelerin betonun mekanik özelliklerine ve korozyon davranışına etkisinin istatistiksel yaklaşım kullanılarak araştırılmasında dikkate alınan deneylerin ve analizlerin özet gösterimi Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Deneyler ve istatistik analizler için akış diyagramı

İlk olarak seçilen farklı karışım bileşenlerine göre, detayları 3.Bölüm’ de verilen Taguchi L9 karışım deney tasarım tabloları oluşturulmuş ve farklı içeriklerde üretilen beton numunelere aynı bölümde verilen hedef deneyler uygulanmıştır. Elde edilen deney sonuçları 4.Bölüm’ de ve deney sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen istatistik analiz sonuçları 5.Bölüm’ de verilmiştir. Son olarak, 6.Bölüm’ de elde edilen tüm karşılaştırılmalı sonuçlar verilirken tez çalışması kapsamında elde edilen deney sonuçları ve istatistik analiz sonuçlarının genel değerlendirilmesi 7.Bölüm’ de yapılmıştır.

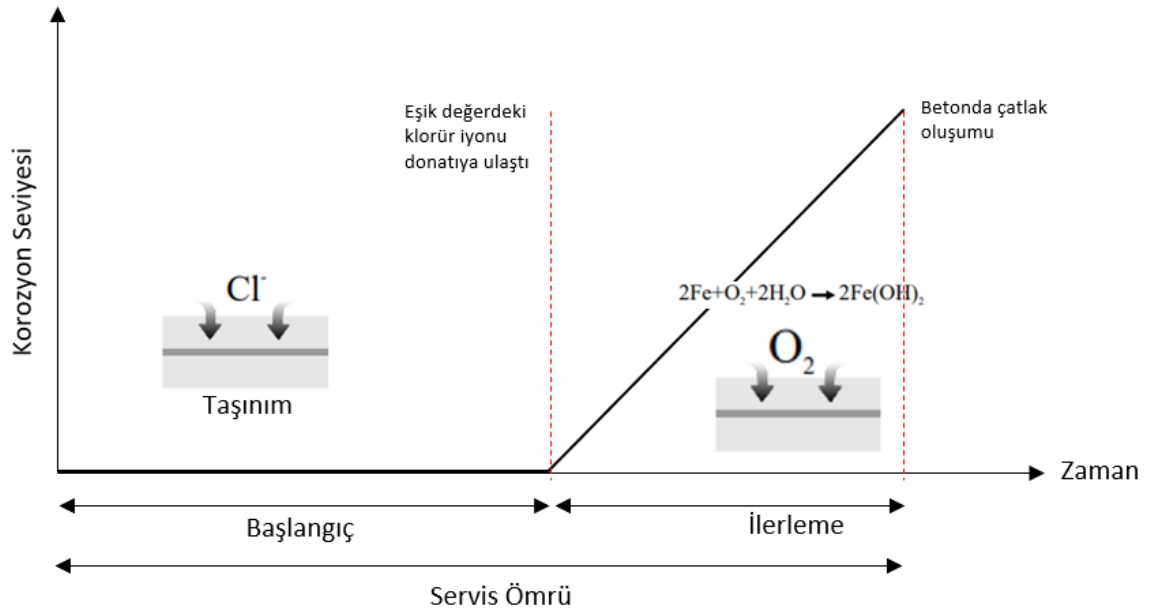
1.2. Betonarmede Donatı Korozyonu

Betonarme, yüksek basınç dayanımına sahip beton ile çelik donatının çekme dayanımının birleşimiyle mükemmel mekanik özelliklere sahip iki malzemenin uyumunu temsil eder. Ancak, bu yapıların uzun ömürlü olabilmesi, donatı korozyonunun etkili bir şekilde önlenmesi veya kontrol altına alınması ile doğrudan ilişkilidir. Betonarme yapılarda donatı çeliği üzerindeki korozyon, yapısal dayanıklılığı ciddi şekilde etkileyebilen önemli bir sorundur (Verma vd., 2014). Bu süreç, genellikle çevresel etkenlerin, özellikle su, tuz ve sülfat gibi agresif maddelerin donatıya nüfuz etmesi sonucunda başlamaktadır. Portland çimentosunun hidratasyon süreci, başlangıçta CaO , CaSO_4 hemihidrat veya dihidrat, alkali ve alüminat fazları gibi maddelerin çözünmesini içermektedir. Bunun ardından, ana bileşenler C_3S ve C_2S ile serbest su arasındaki reaksiyonlar gerçekleşmektedir. Reaksiyonlar sonucu CSH (kalsiyum silikat hidrat), CH (kalsiyum hidroksit), etrenjit ve diğer küçük bileşenler oluşmaktadır. Betonun gözenek çözeltisi, kalsiyum hidroksit ile birlikte az miktarda Na_2O ve K_2O 'nun varlığı nedeniyle 12–14 arasında bir pH değerine sahiptir (Mehta ve Paulo, 1986). Beton, sağlamış olduğu bu yüksek alkali ortam özelliği sayesinde donatının üzerinde bulunan pasif film tabakasının kararlılığını korumaktadır. Pasif tabaka kararlılığını koruduğu müddetçe donatıda korozyon oluşamayacak veya ilerleyemeyecektir. Fakat, donatıyı korozyondan koruyan eşik değer olarak tanımlanan pasif tabaka, donatıya nüfuz eden su, tuz ve oksijenle bozularak koruyucu özelliğini kaybedebilmektedir. Pasif tabakada meydana gelebilecek bu bozulma korozyonunun oluşmasını kolaylaştırabileceği gibi reaksiyonları da önemli ölçüde hızlandırabilmektedir (Boğa, 2005). Donatı üzerinde bulunan beton örtü tabakası (pas payı), O_2 , CO_2 gibi çeşitli gazların ve SO_3 , Cl^- gibi zararlı iyonların donatıya nüfuzunu engelleyerek veya geciktirerek koruma sağlamaktadır. Sağlanan bu korumanın etkinliği örtü tabakasının nitelikleriyle yakından ilişkilidir. Tabakanın kalınlığı ve geçirimsizliği agresif ajanların donatıya ulaşımını zorlaştırmaktadır (Boğa, 2010).

Yetersiz biçimde teşkil edilen pas payı tabakası neticesinde beton içerisinde bulunan boşluklara CO_2 nüfuz ederek boşluk çözeltilerinde çözünecek ve hidratasyon reaksiyonları sonucu ortamda bulunan Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonat (CaCO_3) oluşacaktır. Reaksiyon neticesinde betonun pH değeri 9'a kadar düşmekte bu da betonun sağlamış olduğu alkali ortam özelliğini bozmaktadır. Betonda karbonatlaşmanın oluşması için ortamda belli miktar nemin varlığı şarttır. Nem, reaksiyonun oluşması için katalizör görevi üstlenmektedir (Gönen ve Yazıcıoğlu, 2004). Betonda karbonatlaşma

derinliği betonun geçirimsizliği ile yakından ilişkili olmakla birlikte, en yüksek karbonatlaşma bağıl nemin %50-70 aralığında meydana gelmektedir (Ramachandran ve Feldman, 1996). Betonarme donatısındaki pasif tabakayı bozan diğer neden klorür iyonlarının donatıya nüfuz etmesidir. Donatı korozyonu üzerinde karışmada bulunan ve betona sonradan nüfuz eden klorürlerin etkileri farklıdır. Başlangıçta karışmada bulunan klorür iyonlarının bir kısmı, çimentonun hidratasyonu sırasında çimentonun karma oksitlerinden trikalsiyum alüminat (C_3A) ile reaksiyona girerek suda çözünmeyen bir bileşik olan Friedel tuzunu ($3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.nH_2O$) oluşturur. Bu sayede, klorür iyonlarının bir kısmı betona bağlanır. Bağlı klorürün, pasifliği bozucu bir etkisi bulunmamaktadır. Beton içinde çözülmüş durumda bulunan klorür iyonları, donatının korozyon sürecine etki eden faktörler arasında en önemli olanıdır (Doğan, 2009).

Şekil 1.2’de verilen başlangıç döneminin uzunluğu klorürün penetrasyon hızına ve donatının pasifliğini ortadan kaldıracak klorür iyonu konsantrasyonuna (eşik değer) bağlıdır. Diğer yandan klorür ile ilgili durumlara ilave olarak betonun geçirimsizlik özellikleri iyon taşınımında doğrudan etkili olduğundan önem teşkil etmektedir. İlerleme aşamasında ise klor iyonlarının nüfuz ettiği donatı yüzeyine, oksijenin de ulaşmasıyla korozyon seviyesinde önemli oranda artışlar meydana gelmektedir. İlerleme aşamasında eğrinin eğimi, donatıya ulaşan oksijen, ortam sıcaklığı ve bağıl nem ile değişmektedir (Perez, 1999).



Şekil 1.2. Klorür kaynaklı korozyonda servis ömrü konsepti (Perez, 1999)

1.2.1. Korozyon mekanizması

Korozyon, bir metalin yüzeyindeki oksidasyon reaksiyonları sonucu meydana gelen elektrokimyasal bir aşınma sürecidir. Bu genellikle metalin su, hava veya diğer çevresel faktörlerle etkileşime girmesiyle gerçekleşir. Betondaki donatı çeliğinin korozyonu, bir anot ve bir katodun varlığını gerektiren elektrokimyasal bir işlemdir. Korozyonun meydana gelmesi için, elektronların hareket etmesi, anot ve katodun (donatı) bulunması ve iyonların hareket etmesi için de bir elektrolit iletken (beton gözenek çözeltisi) ile devrenin tamamlanması gerekmektedir. Korozyon süreci, herhangi bir düzensizlik nedeniyle potansiyelde bir fark oluştuğunda başlamaktadır. Bu potansiyel fark, donatı çeliği yüzeyi boyunca önemli değişiklikler olduğunda veya çelik/beton arayüzü boyunca gözenek çözeltisinde mevcut iyonların (O, Cl⁻ vb.) konsantrasyonunda farklılıklar olduğunda meydana gelmektedir. Oluşan bu potansiyel farktan dolayı demir, anotta Denklem 1.1'e göre oksitlenmektedir (Boğa, 2005; Perez, 1999).



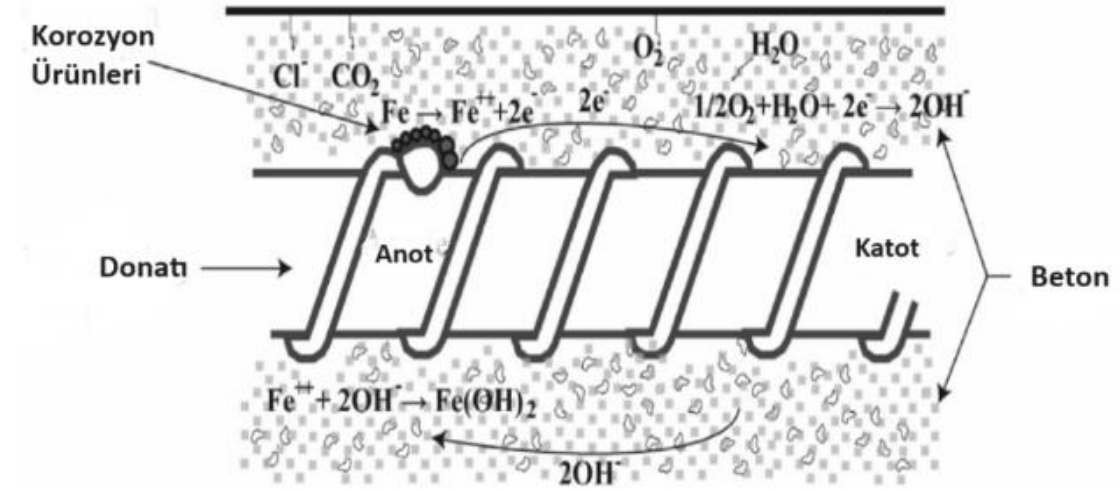
Oksidasyon reaksiyonu sonucu salınan elektronlar donatı boyunca katoda doğru hareket ederken demir iyonları beton gözenek çözeltisinde çözülür. Katot reaksiyonları elektronların kazanıldığı, donatı üzerinde herhangi bir noktada oluşur. Gözenek çözeltisinin alkali olduğu ve havaya erişimin olduğu normal betonarme yapılarda, çözünmüş oksijenin Denklem 1.2'ye göre indirgenmesi ana katodik reaksiyondur (Gulikers, 1996; Mohammed vd., 1989).



Denklem 1.2'de katot yarı hücre reaksiyonunun gerçekleşmesi için çelik yüzeyinde yeterli nem ve oksijenin bulunmasına ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Katotta salınan hidroksil iyonları, bir elektrik alanının etkisi altında anoda doğru ilerler ve burada çözünmüş demir iyonları ile birleşerek Denklem 1.3'te verilen Fe(OH)₂ (demir hidroksit) oluştururlar.

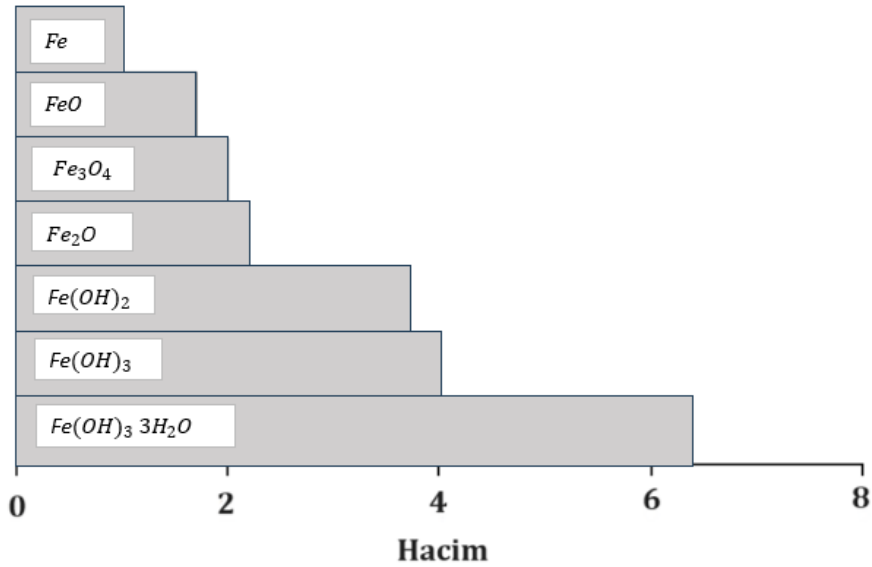


Betonarme donatısında oluşan korozyon mekanizması Şekil 1.3'te gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Betonarme donatısında korozyon hücresi oluşum mekanizması (W. Feng vd., 2021)

Anodik bölgelerde yeterli oksijen varlığında, demir hidroksit diğer korozyon ürünlerine de dönüşebilmektedir. Demir iyonlarının daha yüksek oksidasyon durumlarına dönüşümüne hacim artışı da eşlik etmektedir. Bahsedilen şartın sağlanması durumunda oluşan korozyon ürünleri ve hacimleri Şekil 1.4'te verilmiştir.



Şekil 1.4. Çeşitli korozyon ürünlerinin demire göre bağıl hacmi (Boğa, 2010; Perez, 1999)

Oksidasyon seviyesine bağlı olarak betonarme donatısında Şekil 1.4'te verildiği gibi ilk hacmin yaklaşık altı katı kadar bir hacimsel artış meydana gelmektedir. Hacimdeki bu artış, donatı çevresindeki betonda çekme gerilmeleri oluşturmakta ve buna

bağlı olarak betonun çekme dayanımının aşılması durumunda beton örtünün çatlamasına ve dökülmesine neden olmaktadır. Oluşan bu çatlaklardan zararlı maddelerin donatıya ulaşımı kolaylaşarak ve korozyon süreci daha da hızlanmaktadır. En son aşamada ise beton-donatı arayüzündeki bağ tamamen kaybolarak aderans ortadan kalkmaktadır (Baradan vd., 2015).

1.2.2. Betonarme donatısının korozyonuna etki eden faktörler

Beton içerisinde gömülü halde bulunan donatının korozyonunu etkileyen en önemli parametre betonun boşluk yapısı ve geçirimsizliğidir. Diğer yandan ortamın sıcaklık ve nemi, agresif ortam koşullarından kaynaklı gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar betonun dayanıklılığını etkileyerek donatı korozyonuna sebep olmaktadır. Bu bölümde betonarmede donatı korozyonuna etki eden önemli parametrelerin detayları verilmiştir.

1.2.2.1. Betonun geçirimsizliği

Hidratasyon reaksiyonu gerçekleşen Portland çimentosunun gözenek yapısının gelişimi betonun dayanım ve dayanıklılık davranışının temelini teşkil etmektedir (Beaudoin ve Marchand, 2000). Boşluk oranı ve yapısı, özellikle yabancı agresif çözeltilerin beton içinde hasar oluşturabilme hızını belirleyen betonun performansını doğrudan etkileyen bir faktördür. Betonun boşluk yapısı, çeşitli agresif maddelerin nüfuz etme hızını kontrol ederek betonun dayanıklılığını belirleyen önemli bir parametredir. Betonun geçirgenliği, sıvı veya gazların kütle içine ne kadar hızlı girebileceğini belirler ve bu özellikler, betonun dayanıklılığını doğrudan etkilemektedir (Doğan, 2008). Betonun içinde yer alan, 50 nm' dan büyük kapiler boşluklar makro boşluk olarak nitelendirilirken; 50 nm' dan küçük boşluklar mikro boşluk olarak nitelendirilir. Betonda büyük boşlukların olması hem dayanımı hem de geçirimsizliği olumsuz etkilemektedir. Beton bünyesinde oluşan mikro boşluklar daha çok kuruma büzülmesi ile ilişkilendirilmektedir (Boğa, 2010). Betonun geçirimsizliği ile su emme yüzdesi arasında önemli bir ilişki söz konusudur. Betonun emeceği su miktarı, betonun bünyesinde bulunan toplam boşluk hacmi ile ilgilidir. Boşluk hacmi ise su/çimento (s/ç) oranına, kullanılan agrega dağılımına, kür koşulları ve süresine, çeşitli kimyasal ve mineral katkı (puzolan) kullanımına ve yapı elemanının boyutu vb. etkenlere bağlıdır. Beton üretiminde su/bağlayıcı oranı (s/b) arttıkça çimento hamurunun içerisinde daha çok boşluk yapısı meydana gelmektedir. Hidratasyonun başında kapiler boşlukların neredeyse tamamı birbiriyle bağlantılıdır. Ancak ilerleyen zamanlarda, hidratasyonun gelişimiyle birlikte bu

boşlukların bağlantıları sınırlı hale gelmektedir. Beton üretiminde su geçirimsizliği daha düşük olan kayaç yapısına sahip agrega kullanmak ve maksimum agrega çapını azaltmak geçirimsizliği düşürmektedir. Bu durum, iri agrega tanelerinin altında daha fazla boşluk oluşmasıyla açıklanabilmektedir. Betona uygulanan su kürü hidratasyonu önemli ölçüde etkileyip CSH jellerinin oluşumuna sağladığı katkıdan dolayı betonun geçirimsizliğini azaltmaktadır. Betonda uygun oranlarda kullanılan silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu vb. puzolanlar, çok ince taneli yapıya sahip olduklarından betonun geçirimsizliğini önemli oranda azaltmaktadır. Diğer yandan kullanılan bu malzemeler, çimentonun hidratasyonu sonucunda meydana gelen kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek CSH jeli miktarının artmasına katkı sağlamaktadır. Kalsiyum hidroksit su eriyen bir ürün olduğundan betonun dayanım ve dayanıklılığını olumsuz etkilemektedir. Ayrıca betonun geçirimsizliği su azaltıcı kimyasal katkıları ve hava sürükleyici kimyasal katkıların uygun miktarda kullanımı sayesinde azaltılabilmektedir (Erdoğan, 2003).

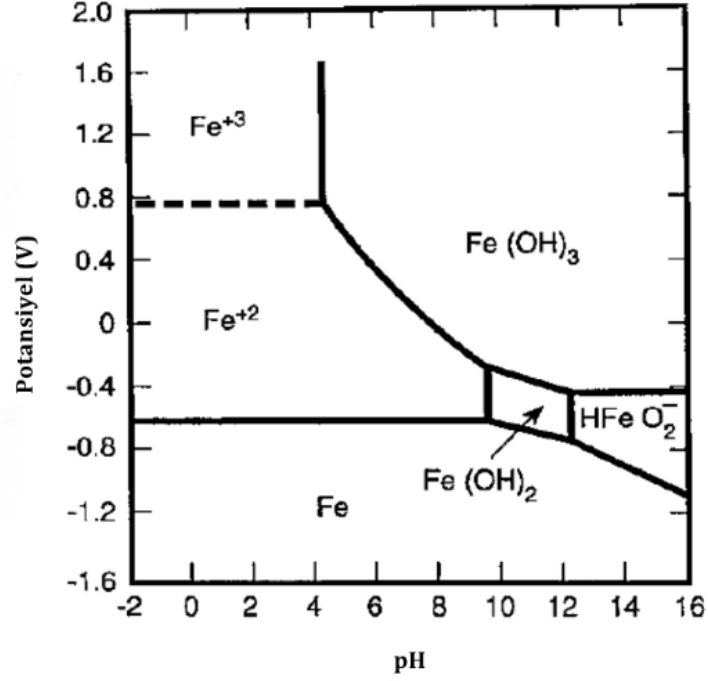
1.2.2.2. pH etkisi

Genel olarak beton, gömülü donatı çeliğinin korozyonuna karşı yüksek derecede koruma sağlar. Çimentonun hidratasyonu tarafından sağlanan sertleşmiş çimento matrisinin gözeneklerindeki yüksek alkali ortam ($\text{pH} = 10.0 - 13.0$), çeliği pasif durumda tutmaya yarayan demir üzerinde bir tabaka oluşturarak (Fe_2O_3) korozyon hızını önemli ölçüde düşürmektedir. Korozyon olgularına termodinamiğin uygulanmasının en iyi gösterimlerinden biri, potansiyel-pH diyagramları veya Pourbaix diyagramları tarafından sağlanmaktadır. Demir için pH-potansiyel diyagramının bir örneği Şekil 1.5'te verilmiştir.

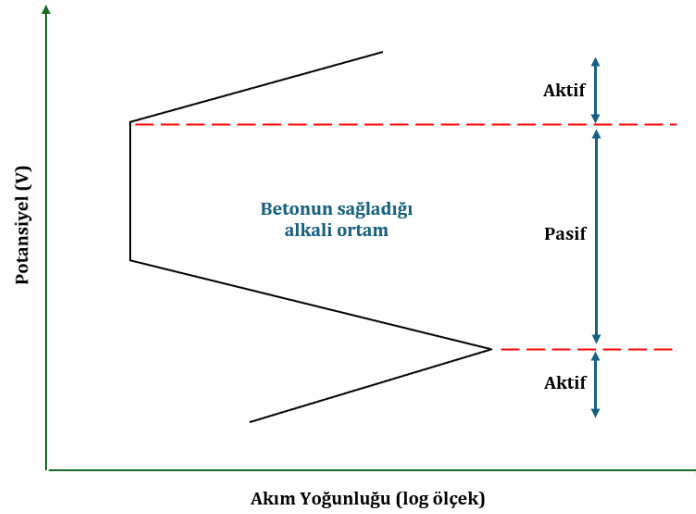
Diyagramdaki her çizgi, iki tür arasındaki denge koşullarını tanımlamaktadır. Bu denge koşullarının sınırları Fe ve $\text{Fe}(\text{OH})_2$ veya Fe^{++} ve $\text{Fe}(\text{OH})_3$ olarak verilmiştir. Bu diyagramın başlıca uygulamaları; korozyon reaksiyonlarının rastgele yöneliminin tahmin edilmesi, korozyon ürünlerinin bileşiminin tahmin edilmesi ve çevre değişikçe korozyonun meydana gelme olasılığının tahmin edilmesidir.

Donatı çeliği, beton ortamında ($\text{pH} = 10-13$) pasif bir oksit filmi, $\text{Fe}(\text{OH})_2$, oluşturmak üzere oksitlenmektedir (Şekil 1.5). Bu oksit filmi, pH değeri 9' un altına düştüğünde Fe^{++} iyonuna dönüşmektedir (Gu vd., 2000).

Betonun alkali özelliğinden dolayı donatıya sağlamış olduğu pasiflik, korozyonu azaltma konusunda betonarme yapılara eşsiz bir özellik sunmaktadır. Şekil 1.6'da demirin alkali ortamda pasifleşme davranışı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Fe-H₂O (nem) sistemi için basitleştirilmiş bir potansiyel-pH diyagramı (Pourbaix)



Şekil 1.6. Demirin alkali ortamdaki pasifleşme davranışının şematik çizimi

Diyagram, aktif, pasif ve yeniden aktif olmak üzere üç bölgeye ayrılabilir. Beton ortamındaki donatı çeliği, yüksek alkalilik nedeniyle pasif bölgede bulunur (pasivite ayrıca Pourbaix diyagramında (Şekil 1.5) gösterilmiştir). Bu pasifleştirici film, γ -Fe₂O₃ ve Fe₃O₄ bileşiklerinden oluşan, 10-100 Å kalınlığında karma bir oksittir. Bu tabaka gömülü donatıyı daha fazla korozyondan korumaktadır. Bu bölgedeki donatı korozyon hızı yaklaşık olarak 0.1 µm/yıl'dır, ki bu hızda oluşan korozyon çoğu betonarme yapı için önemsiz kabul edilmektedir. Betona gömülü halde bulunan donatının pasivitesi, betona

klorid iyonlarının nüfuzu durumunda bozulabilmektedir. Diğer yandan atmosferdeki karbon dioksit ile beton arasındaki reaksiyonlar nedeniyle betonda pH değerinin azalması da pasiviteyi olumsuz etkileyebilmektedir (Gu vd., 2000).

1.2.2.3. Atmosfere bağlı koşullar

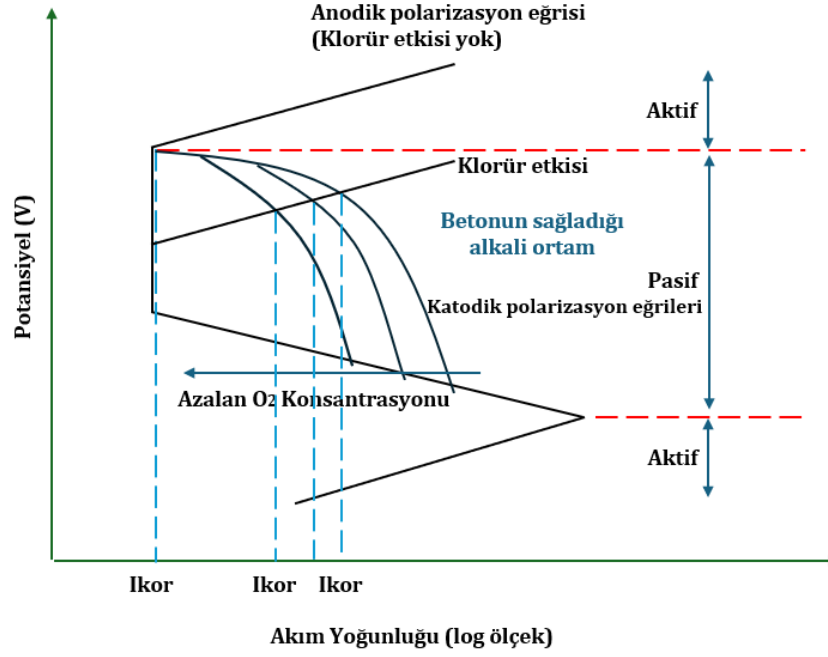
Laboratuvar koşullarında yapılan deneylerin büyük çoğunluğunda sıcaklık ve bağıl nem koşulları kontrol altında tutulmaktadır. Ancak, gerçek dış ortam koşullarında, gece - gündüz döngüsü ve mevsim değişikliklerine bağlı olarak sıcaklık ve nem dalgalanmaları söz konusu olmaktadır. Doğal koşullardan kaynaklı bu değişimler betonun bağıl nemini ve donatı çeliğinin korozyon hızını etkilemektedir. Korozyonun oluşumunda nem etkisi net olarak ortaya konulmuş olmakla birlikte, sıcaklık dalgalanmalarının etkisi kesin olarak belirlenememiştir. Dış ortamın bağıl nem artışı korozyon derecesini arttırmaktadır (Andrade vd., 2002; Yiğiter, 2008). Denizel ortamda bulunan yüksek nem seviyeleri, klorür penetrasyonunu hızlandırırken donatı çeliğinin yüzeyindeki pasif film tabakası buna bağlı olarak kısa sürede bozulmaktadır. Bağıl nemin çok düşük olduğu kuru sayılabilecek koşullarda, betonun elektrolit direnci oldukça yüksek olduğu için korozyon hızı genellikle düşüktür. Benzer olarak, yapının suya batık kısımlarında oksijen difüzyonu çok yavaş gerçekleşeceğinden donatı yüzeyinde korozyon hızı düşük olmaktadır (Boğa, 2010).

1.2.2.4. Oksijen difüzyonu

Korozyonun başlarında katodik reaksiyon için gereken oksijen, betonda bulunan kaynaklardan çekilmektedir. Ancak başlangıçtaki bu kaynak hızla tükenmekte, korozyonun devam etmesi için oksijenin çevresel ortamdan çekilmesi gerekmektedir.

Şekil 1.7’de klorür iyonları etkisinde azalan O₂ konsantrasyonlarında katodik polarizasyon eğrilerinin, anodik polarizasyon eğrilerini kestiği farklı durumlar söz konusudur. Bu durumların oluşmasında; diğer geçirimsizliklerde olduğu gibi betonun boşluk yapısı önemli rol oynarken s/ç oranı bunu önemli ölçüde etkilemektedir.

Oksijenin difüzyonunda donatıyı kaplayan net beton örtü kalınlığı, dış ortamda bulunan oksijen konsantrasyonu, özellikle suda çözünen oksijen miktarı ve betonun neme doygunluk derecesi gibi faktörler etkilidir. Buna göre gömülü donatı bölgesinde klorür iyonları varlığında ve azalan O₂ konsantrasyonlarında korozyon hızı (I_{kor}) azalmaktadır (Şekil 1.7).



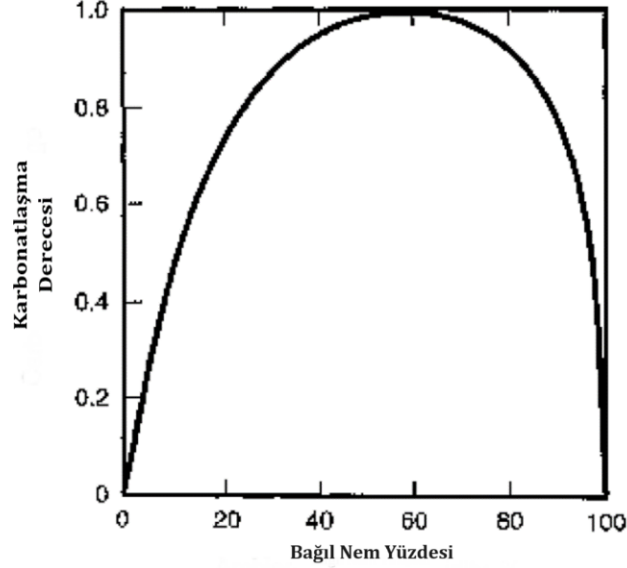
Şekil 1.7. Azalan oksijen konsantrasyonunun korozyon hızı üzerindeki etkisi alkali ortamdaki pasifleşme davranışının şematik çizimi (Doğan, 2008; Gu vd., 2000)

1.2.2.5. Karbonatlaşma

Betonarmada kimyasal koruma, betonun sahip olduğu alkali özellikle sağlanırken fiziksel koruma ise agresif ortam koşullarının beton bünyesine nüfuzunun engellenmesiyle sağlanmaktadır. Yetersiz beton örtüsü kalındığında, geçirimsizliğin fazla ve dayanıklılığın kötü olduğu bir beton eleman içerisindeki çelik donatı agresif ortam koşullarında kısa sürede korozyona uğrayabilmektedir. Çünkü, bu şekilde üretilmiş bir yapı elemanında klorür iyonları, asit içeren sıvılar ve karbonatlaşma cephesi donatıya kolay bir şekilde nüfuz edebilmektedir (Baradan vd., 2015). Karbonatlaşma, havadaki karbon dioksit gazının (CO_2) (%0.03) hidratasyona uğramış Portland çimento hamurunun gözenek çözeltisindeki ürünlerle ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reaksiyona girerek kalsiyum karbonat (CaCO_3) oluşumunu ifade etmektedir. Şekil 1.8’de gösterildiği gibi, betonda karbonatlaşmanın oluşabilmesi için ortamın tamamen kuru veya betonun suya batık olmaması gerekmektedir. Karbonatlaşma, maksimum %50-70 arasındaki bağıl nem yüzdelğinde oluşmakla birlikte reaksiyonunun gelişebilmesi için ortamda belirli bir bağıl nem içeriğinin olması gereklidir.

Karbonatlaşma reaksiyonu beton için doğrudan zararlı olmamakla birlikte betonun pH derecesini düşürerek nüfuz derinliğine bağlı olarak beton içerisindeki donatı korozyonunu kolaylaştırmaktadır. Başka bir ifade ile karbonatlaşma; betonun yüksek alkali özelliğinin bozulmasına yol açmaktadır. Karbonatlaşma reaksiyonları genellikle

betonun dış yüzeyinden başlayarak içeriye doğru 2.5-3.0 cm'lik bölgede etkili olmaktadır. Bu nedenle yeterli örtü tabakasına sahip ve geçirimsizliği düşük, nitelikli bir betonda karbonatlaşmaya bağlı korozyon tehlikesi çok önemli olmamaktadır (Boğa, 2005; Erdoğan, 2003).

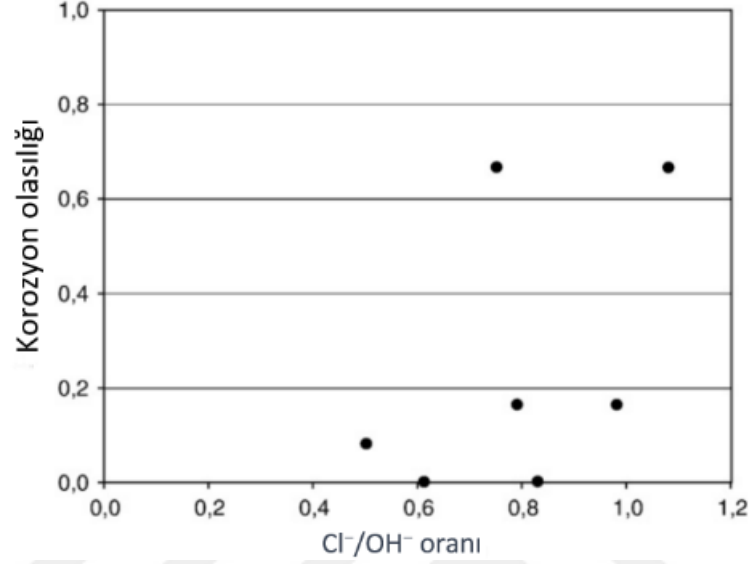


Şekil 1.8. Bağıl nem ve karbonatlaşma derecesi ilişkisi (Gu vd., 2000)

1.2.2.6. Klorür iyonu

Klorür iyonları genellikle denizel ortamda yoğun olarak bulunur ve betonarme donatısının korozyonu için en zararlı madde olarak değerlendirilir. Bu iyonlar donatı üzerindeki pasif tabakanın bozulmasına sebep olmaktadır (Yiğiter, 2008). Hidroksit iyonlarının klorür kaynaklı korozyona karşı inhibitör etkisi, klorür eşiği değerlerini etkileyen önemli bir faktör olarak bilinmektedir. Kritik klor iyonu eşiğinin Cl^-/OH^- oranları olarak sunulma önerisi, sadece hidroksit iyonlarının varlığına bağlanan inhibe edici etki nedeniyle anlamlı olmaktadır. Bu durumda, genellikle pH arttıkça Cl^-/OH^- oranlarının sabit kalarak yaklaşık olarak lineer bir ilişkinin olduğu deneysel olarak gösterilmiştir. Meydana gelen bu artış hidroksit iyonlarının inhibitör olarak davrandığını açıklamakta ve kritik klorür iyonlarının sebep olacağı korozyonda dengeleyici olduğunu göstermektedir (Gouda, 1970). Bu, aynı zamanda OH^- iyonlarının inhibe edici etkisinin pH arttıkça arttığı anlamına gelmektedir (Angst vd., 2009). Diğer yandan olasılık hesaplarına dayanarak kritik bir Cl^-/OH^- oranı 0.6 olarak önerilmiştir (Hausmann, 1967). Hausmann tarafından önerilen ve Şekil 1.9'da verilen bu kritik değer net bir eşikten ziyade daha çok bir alt sınır olduğu görülmektedir (Angst vd., 2009). Şekil 1.9'a göre

genel anlamda, Cl^-/OH^- oranı arttıkça korozyon ihtimalinin de arttığı görülmektedir. Ancak burada; beton içerisinde gömülü olan donatı yüzeyi çevresinde yeterli oranda çözünmüş O_2 'nin bulunması gerektiği unutulmamalıdır (Thangavel ve Rengaswamy, 1998).



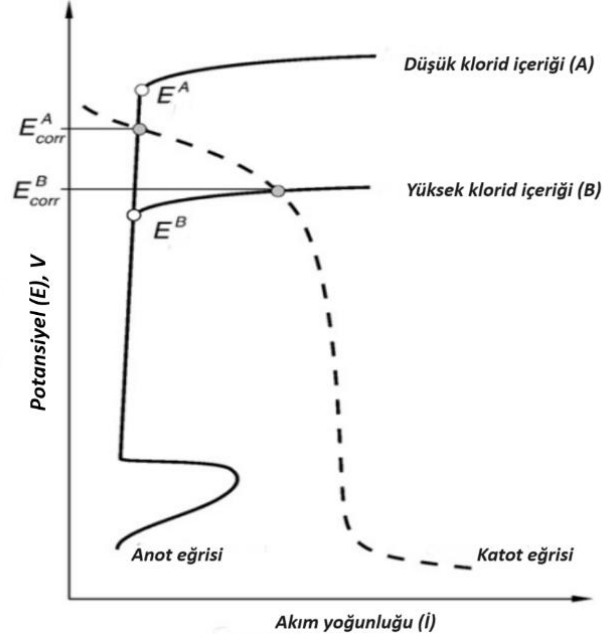
Şekil 1.9. Hausmann'ın deney sonuçlarına göre, korozyon olasılığı ile Cl^-/OH^- oranı arasındaki ilişki (Angst vd., 2009; Hausmann, 1967)

Klorür iyonlarının anodik polarizasyon eğrisi üzerindeki etkisi Şekil 1.10'da gösterilmiştir. Yüksek klorür iyon konsantrasyonu, anot eğrisinin pasif bölge olarak tanımlanan plato kısmını kısaltmaktadır. Bu durumda; yüksek klorür iyonları sebebiyle anot ve katot eğrileri daha yüksek bir akım yoğunluğu değerinde kesişmekte ve bu da korozyon ihtimalinin artması anlamına gelmektedir (Angst vd., 2009; Feng vd., 2021; Li vd., 2020).

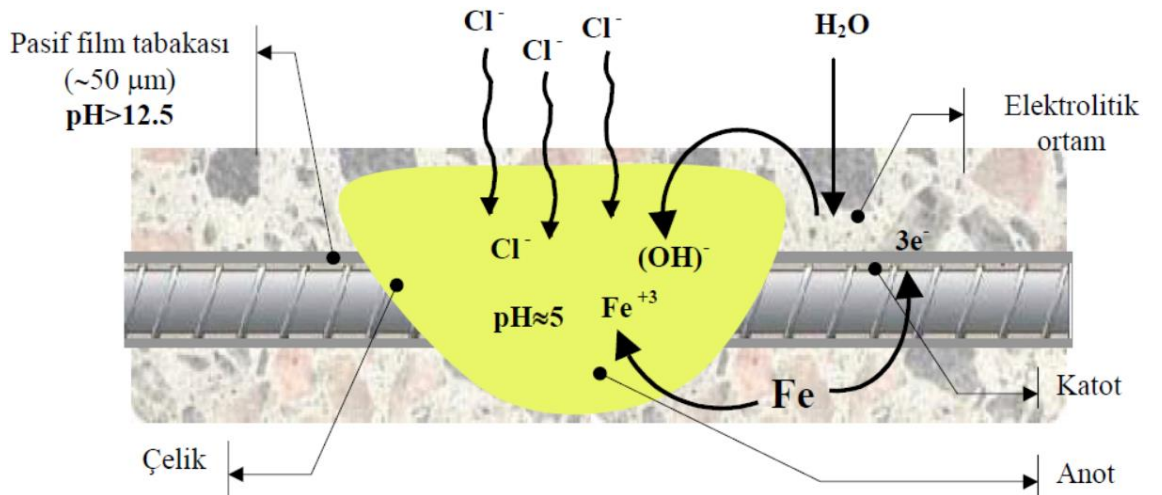
Klorür iyonlarının elektro kimyasal korozyon mekanizmasında, ortamın elektrolit özelliğini artırarak anot-katot arasında iyon akışını kolaylaştırmaktadır. Diğer yandan klorür iyonları asit karakterli olduklarından ortamın pH değerini düşürmektedirler. Donatı tarafından klorür iyonları, O_2 ve $(\text{OH})^-$ iyonlarına nazaran çok daha kolay absorbe edilmektedir. Klorür iyonlarının sebep olduğu korozyonun şematik gösterimi Şekil 1.11'de verilmiştir (Boğa, 2010; Doğan, 2008; Yiğiter, 2008).

Donatıya bağlanma noktasında agresif davranan klorür iyonları anodik reaksiyonların daha hızlı ve kolay oluşmasına sebep olmaktadır. Ortamda çözünmüş halde yoğun olarak bulunan Fe^{++} ve $(\text{OH})^-$ iyonları ile reaksiyonlar sonucunda klorür

iyonları sürekli olarak açığa çıkmakta ve buna bağlı olarak donatıda korozyon sürekli devam etmektedir. Bu süreklilik hali Denklem 1.4 ve 1.5'te verilmiştir.



Şekil 1.10. Klorür iyonlarının anodik polarizasyon eğrisi üzerindeki etkisi (Angst vd., 2009; Li vd., 2020)



Şekil 1.11. Donatıda klorür iyonlarının sebep olduğu korozyon (Yiğiter, 2008)

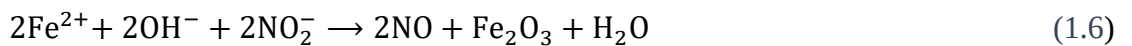
1.2.3. Bazı korozyon koruma yöntemleri

Betonarmede donatı korozyonunu önlemek için ekonomik ve kurulum sistemi gerektirmeyen bazı temel önlemler alınabilmektedir. En yaygın yöntemlerden biri, pratik, maliyet etkin ve yeterli korozyon direnci sunan korozyon inhibitörlerinin kullanılmasıdır (Fei vd., 2015; Topçu ve Uzunömeroğlu, 2020). Uygulama açısından kolay ve maliyetsiz olan diğer yöntem ise; beton örtüsünün uygun kalınlıkta ve kompakt yapıda olmasıdır. Bu dayanıklı yapı; silis dumanı, uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu gibi puzolanların kullanımıyla sağlanabilmektedir. Bu malzemeler özellikle klorür kontamine ortamlarda iyonların taşınma direncini artırarak korozyona karşı dayanıklılığı artırmaktadır (Ding vd., 2009). Bu bölümde tez kapsamında korozyon dayanıklılığı noktasında değerlendirilmesi yapılan kalsiyum nitrit korozyon inhibitörü ve mineral katkıların etkisi detaylandırılmıştır.

1.2.3.1. Kalsiyum nitrit korozyon inhibitörü (DCI)

Kalsiyum nitrit ($\text{Ca}(\text{NO})_2$), betonarme yapılarda çelik donatının korozyona karşı korunmasında kullanılan etkili bir korozyon inhibitörüdür. Bu kimyasal bileşik, betonarmede özellikle klorür iyonlarına maruz kalındığında oluşan çelik korozyonunu önleme yeteneğiyle bilinir. Kalsiyum nitrit, beton içindeki klorür iyonları ile reaksiyona girerek çelik yüzeyinde bir pasivasyon tabakası oluşturmaktadır. Bu tabaka, çelik donatının korozyona maruz kaldığı koşullarda, özellikle tuzlu ortamlarda, korozyonu önleyerek yapısal bütünlüğü artırmaktadır. Kalsiyum nitritin (DCI) korozyon inhibitörü olarak kullanılmasının avantajlarından biri de betonun içindeki serbest klorür iyonlarını bağlayarak çözeltiden uzaklaştırmasıdır. Bu, çelik donatının uzun ömürlü ve dayanıklı kalmasına katkıda bulunur. Ayrıca, kalsiyum nitritin kullanımı, betonun geçirgenliğini azaltabilmekte ve çelik yüzeyinin pasivasyonunu artırabilmektedir (Al-Amoudi vd., 2003; Gaidis, 2004).

Kalsiyum nitrit, anodik korozyon inhibitörü olmakla birlikte betona karıştırma esnasında çeşitli oranlarda katılmaktadır. DCI beton karışımına ilave edildiğinde donatı yüzeyindeki demir iyonları, nitrit iyonları ile oksitlenerek donatı yüzeyinde koruyucu γ - FeOOH tabakası oluşturmaktadır. Kalsiyum nitrit kaynaklı donatı yüzeyinde oluşan pasif tabakanın denklemleri, Denklem 1.6 ve Denklem 1.7’de verilmiştir (Gaidis, 2004).





Yukarda verilen reaksiyon denklemlerinde, nitrit iyonları donatı yüzeyine klorür iyonlarından daha hızlı ulaşmaktadır. Ancak bu reaksiyonların oluşarak korozyonun inhibe edilebilmesi için ortamda nitrit iyonları yeteri kadar bulunmak zorundadır. Bazı çalışmalar, yetersiz nitrit içeriğinin, erken aşamalarda klorür kaynaklı korozyonu hızlandırabileceğini öne sürmüştür, düşük nitrit konsantrasyonlarıyla ilişkilendirilen potansiyel riski vurgulamıştır (Cao vd., 2015). Ayrıca yapılan bir çalışma, betondaki düşük çimento içeriği ile artan nitrit dozu kullanımının korozyon süresini uzatmadığını, hatta klorür penetresini hızlandırdığını göstererek, düşük nitrit konsantrasyonlarının korozyon hızları üzerinde potansiyel olumsuz bir etkisi olabileceğini ortaya koymuştur (Ann ve Buenfeld, 2015).

Hafif çelik elemanların korozyon davranışı üzerine yapılan bir başka çalışmada nitritin nötr ve alkali koşullarda hafif çelik korozyonunu engellediğini, ancak asidik ortamlarda korozyonu hızlandırdığı bulunmuştur (Mutafa vd., 1997). Song vd. (2019), yaptıkları çalışmada; betonda yüksek klorür iyon konsantrasyonları, çelik korozyonunu daha ciddi bir hale getirdiğini belirtmiştir. Çalışmada, nitritin donatı korozyonu üzerindeki inhibe edici etkisinin her zaman belirgin olmadığı ve bazen $(\text{NO}_2^-)/(\text{Cl}^-)$ kritik değeri beton içinde 0.4'ten düşük olduğunda makro hücre korozyonunu hızlandırabileceği bildirilmiştir. Ancak, $(\text{NO}_2^-)/(\text{Cl}^-)$ oranı 0.8 olduğunda, çukurcuk korozyonu büyük ölçüde ortadan kalksa da çelik çubuk korozyonunun tamamen engellenmesi için yetersiz olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar $(\text{NO}_2^-)/(\text{Cl}^-)$ oranı 1.2'yi aştığında çelik çubuk korozyonunun tamamen bastırılabilirliğini belirtmişlerdir (Song vd., 2019).

1.2.3.2. Mineral katkı kullanılması

Mineral katkılar, betonun özelliklerini iyileştirmek veya özel uygulamalara uygun hale getirmek için beton karışımlarına eklenen malzemelerdir. Bu katkılar, betonun dayanıklılığını, işlenebilirliğini, çatlak direncini ve diğer özelliklerini iyileştirmektedir. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi endüstri atığı malzemelerin, Portland çimentosunun kısmi bir şekilde yerine kullanılarak betona geri dönüştürülebileceği gösterilmiştir (Gao vd., 2021). Betonda Portland çimentosu yerine %60 oranına kadar uçucu kül ikame edilmesi durumunda; basınç dayanımı ikame artışına göre sürekli azalırken, geçirimli boşluk yapısı uçucu kül ikamesi ile azalmaktadır (Gao vd., 2021). Uçucu kül taneleri çimento taneciklerinden daha küçük yapıda olduğundan beton

karışımlarına eklenmesi, betonun klorür iyon geçirimsizliğini ve korozyon dayanımını arttırmaktadır. Diğer yandan uçucu kül, çimentonun hidrasyon ürünlerinden olan portlandit ile reaksiyona girerek ikincil CSH jellerini oluşturup mikroyapıyı iyileştirmektedir (Dave vd., 2021).

Betonlarda kullanılan diğer bir mineral katkı türü ise granüle yüksek fırın cürufudur. Demir çelik endüstrisinin atık ürünü olan cüruf, betonda kullanılmak üzere temin edilmeden önce çimentoya yakın tane çapında olacak şekilde çok ince taneli öğütülmektedir. Yüksek fırın cürufu en çok kalsiyum oksit (CaO) içeriğine sahip yapay puzolandır. Bu özelliğinden dolayı kendi başına az da olsa bağlayıcılık özelliğine sahiptir. İnce taneli olarak öğütülmüş cüruf kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek ikincil CSH jellerini oluşturmaktadır. Betonda Portland çimentosu yerine %80 oranına kadar yapılan granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) ikamelerinde, %40 ikame oranına kadar 28 günlük basınç dayanımı önemli miktarda olmamakla birlikte azalmıştır. Ancak cüruf ikame oranı artışlarında klorid geçirimsizliği, su emme yüzdesi ve su emme değerleri sürekli olarak azalmıştır. Sadece Portland çimentosundan oluşan betonlar sabit voltaj altında yaklaşık olarak 100. saatte korozyon kaynaklı ürünler dolayısıyla çatlarken, %60 ikame oranında cüruf içeren beton yaklaşık 150. saatte çatlamıştır.

Cüruf polimerizasyona sağladığı katkı ve fiziksel yapıdaki kompaktlığı artırdığından dolayı korozyon performansını iyileştirmiştir (Güneyisi ve Gesoğlu, 2008). Beton üretiminde kullanılan diğer bir yapay puzolan; silis dumanı, silika füme veya mikro silika isimleriyle bilinen çimentodan yaklaşık 70-80 kat daha ince tanecik yapısına sahip malzemedir. Silis dumanı da diğer puzolanlarda olduğu gibi birtakım kimyasal reaksiyonlar sonucu ikincil CSH jellerini oluşturmaktadır. Silis dumanı yüksek oranda klorür iyonu bağlama kapasitesinden ve arayüzlerde oluşturduğu filler etkisinden dolayı donatıda oluşacak korozyonu sınırlandırmaktadır.

Çeşitli hava içeriğine sahip betonlarda %10 silis dumanı ikamesi polarizasyon eğrilerinin potansiyelini artırmıştır. Aynı zamanda silis dumanının %10 kullanımında korozyon oranı önemli ölçüde azalmıştır. Betonun elektrik direnci %10 oranında silis dumanı kullanılarak yaklaşık 3-4 kat artmıştır. Bu da silis dumanı kullanımının korozyon performansını artırdığını göstermektedir (Ghanei vd., 2018).

1.2.4. Betonarmede korozyon ölçüm yöntemleri

Betonarmede korozyon bilgisi elde edebilmek için gözle muayene, ağırlık kaybı, yarı hücre potansiyeli, lineer polarizasyon, hızlandırılmış korozyon ve elektrokimyasal

empedans gibi birçok ölçüm ve değerlendirme yöntemi vardır. Ancak tez kapsamında ağırlık kaybı ve hızlandırılmış korozyon yöntemi uygulandığından bu iki yöntemin ayrıntıları aşağıda verilmiştir.

1.2.4.1. Ağırlık kaybı yöntemi

Korozyon kaynaklı ağırlık kaybı (gravimetrik) ölçümü, çeşitli malzemelerin korozyon hızını değerlendirmek için uygulanan bir tekniktir. Birçok çalışma, farklı ortamlarda farklı malzemelerin korozyon hızını değerlendirmek için ağırlık kaybı ölçümlerini kullanmıştır. Belirli bir süre boyunca agresif ortama maruz bırakılan donatılı beton numunelerin ağırlık değişimlerinin ölçülmesine dayanan bir yöntemdir (Smart vd., 2017; Wu vd., 2019). Bu yöntemde, betonarmede kullanılacak donatıların ilk ağırlıkları tartılarak kaydedilir. İlk ağırlıkları alınıp korozyona uğratılan donatıların yüzeyleri fiziksel veya kimyasal yöntemlerle temizlendikten sonra ikinci ağırlıkları alınarak korozyon kaynaklı kütle kaybı bulunmaktadır. Korozyon kaynaklı ağırlık kayıpları belirlenmeden önce, donatı hassas bir şekilde temizlenmelidir. Özellikle düşük korozyon seviyelerinde sonuçların doğruluğu için bu çok önemlidir. Bu yöntem tahribatlı bir yöntem olduğundan yalnızca laboratuvar koşullarında uygulanabilmektedir. Mevcut yapılarda donatıyı elde etmek yapı elemanına zarar vereceğinden bu yöntemin uygulanması genellikle mümkün olmamaktadır (Boğa, 2010; Doğan, 2008; Yiğiter, 2008).

1.2.4.2. Hızlandırılmış korozyon yöntemi

Hızlandırılmış korozyon yöntemi, yapısal malzemelerin korozyon performansının incelenmesinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, malzemelerin gerçek dünya koşullarına uzun süreli maruz kalma etkilerini hızlandırarak laboratuvar ortamında kısa sürede korozyon değerlendirmesine imkân sağlamaktadır. Özellikle betonarme donatıların ve katkılı betonların korozyon performansının incelenmesinde, hızlandırılmış korozyon yöntemleri kullanılarak yapılan çalışmalar bulunmaktadır (Eken, 2021; Yalciner vd., 2018; Yalciner ve Kumbasaroglu, 2019). Bu çalışmalarda, donatıların gerçek korozyon oranları ve dağılımlarının belirlenmesi için hızlandırılmış korozyon yöntemlerinin etkili olduğu gözlemlenmiştir (Yalciner vd., 2018). Ayrıca, hızlandırılmış korozyon deney yöntemlerinin, betonarme kirişlerin paslanma süreçlerinin incelenmesinde de kullanıldığı belirtilmektedir (Yalciner ve Kumbasaroglu, 2019). Bu testler, malzemelerin dayanıklılığını, korozyon direncini ve mekanik özelliklerini

değerlendirmek için önemli bir araçtır (Azad vd., 2015). Özellikle, hızlandırılmış korozyon testleri, korozyonda gerçek dünya koşullarını simüle ettiği için; malzemelerin korozyona karşı dayanıklılığını belirlemek için yaygın olarak kullanılan yöntemler arasındadır (Feng vd., 2014; Ouglova vd., 2008).

1.2.5. Betonarmede bağ dayanımı ve korozyonun bağ dayanımına etkisi

Betonarme yapıların dayanıklılığı ve performansında kritik rol oynayan faktörlerden biri de donatı ile beton arasındaki bağ dayanımıdır. Bağ dayanımı, donatının beton ile temas ettiği bölgedeki ayrılma direncini ifade eder (Verma ve Misra, 2015). Diğer bir ifade ile bağ dayanımı; donatıyı çevreleyen betona göre donatının, eksen yönünde kaymaya karşı koyduğu dirençtir. Çeşitli faktörler, özellikle korozyon, beton dayanımı, donatı çapı, bağlı boy uzunluğu ve beton örtü kalınlığı, bağ dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir (Wang vd., 2022). Beton ve donatı arasında bağ dayanımını (aderans) belirlemek için çekip çıkarma adı altında; eksenel çekip çıkarma, eksantrik çekip çıkarma, çift yönlü çekip çıkarma ve mesnet teşkilli çekip çıkarma deneyleri uygulanmaktadır. Ancak bunlardan en yaygın ve basit olanı eksenel çekip çıkarma (pullout) deneyidir. Bu deney türünde kullanılan donatı nervürsüz ve bağlı boy uzunluğu yetersiz ise göçme modu sıyrılma şeklinde olmaktadır. Donatı biçimi, nervürlü ve kenetlenme boyu yetersiz ise göçme modu genellikle yarıлма şeklinde olmaktadır (Boğa, 2005).

Donatı-beton ara yüzündeki kayma direnci (aderans); sürtünme, yapışma ve mekanik kilitlenme olmak üzere üç mekanizmadan oluşmaktadır. Korozyon ürünleri, yüzeyin pürüzlülüğünü ve topografisini değiştirerek sürtünme özelliklerini etkileyebilmektedir. Artan pürüzlülük veya korozyon ürünlerinin varlığı, malzemelerin özelliklerine ve korozyon ürünlerinin özelliklerine bağlı olarak sürtünmeyi artırabilmektedir. Diğer yandan korozyonun neden olduğu yüzey kimyasındaki değişiklikler, malzemeler arasındaki yapışmayı etkileyerek bağ dayanımını artırabilmektedir. Bazı durumlarda, korozyonun neden olduğu yüzey pürüzlülüğündeki değişiklikler, mekanik kilitlenmeyi artırabilmekte, ancak bu durum korozyon ürünlerinin özelliklerine bağlı olmaktadır. Yukarıda sayılan durumların düşük korozyon seviyelerinde oluşabileceği unutulmamalıdır. Yüksek seviyelerde oluşan korozyon, aderans dayanımını tamamen ortadan kaldırabilmektedir (Jiang vd., 2018; Mangat ve Elgarf, 1999).

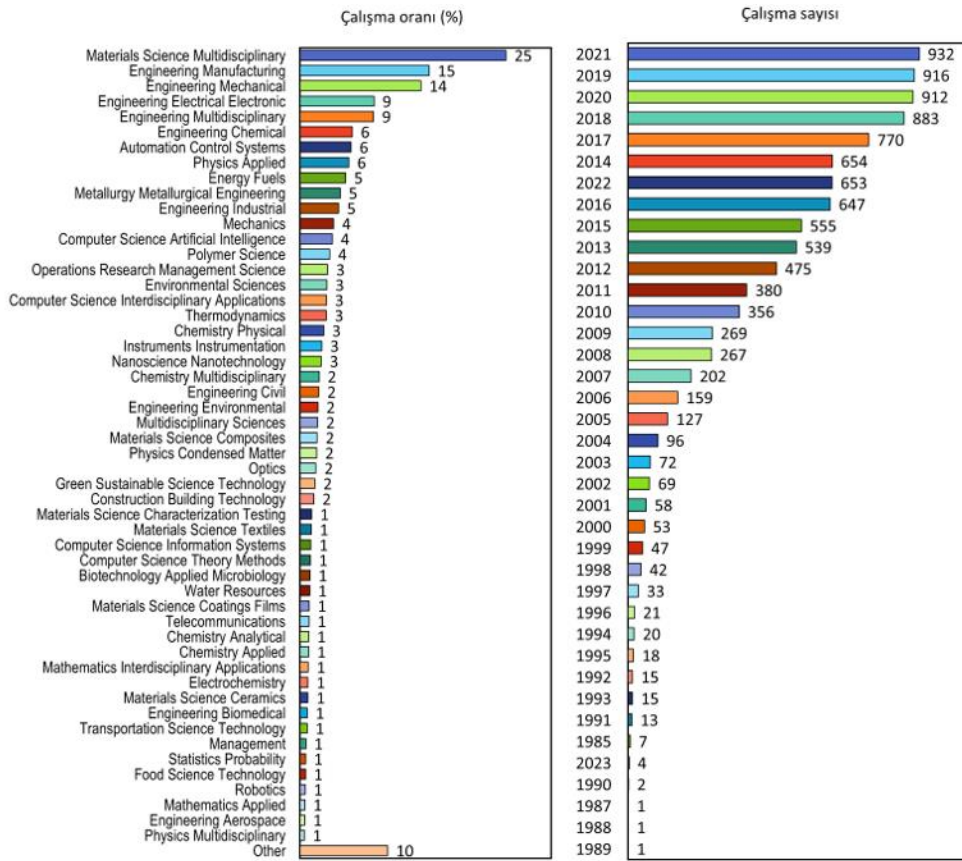
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu tez çalışması kapsamında mineral katkılı ve kalsiyum nitrit ilaveli betonların mekanik özellikleri ve korozyon davranışı Taguchi metodu kullanılarak incelendiğinden, literatür araştırması Taguchi metodu kullanılarak gerçekleştirilen akademik çalışmalar, mineral katkıların kullanıldığı çalışmalar ve korozyon-bağ dayanımı davranışının incelendiği akademik çalışmalarla sınırlı tutulmuştur.

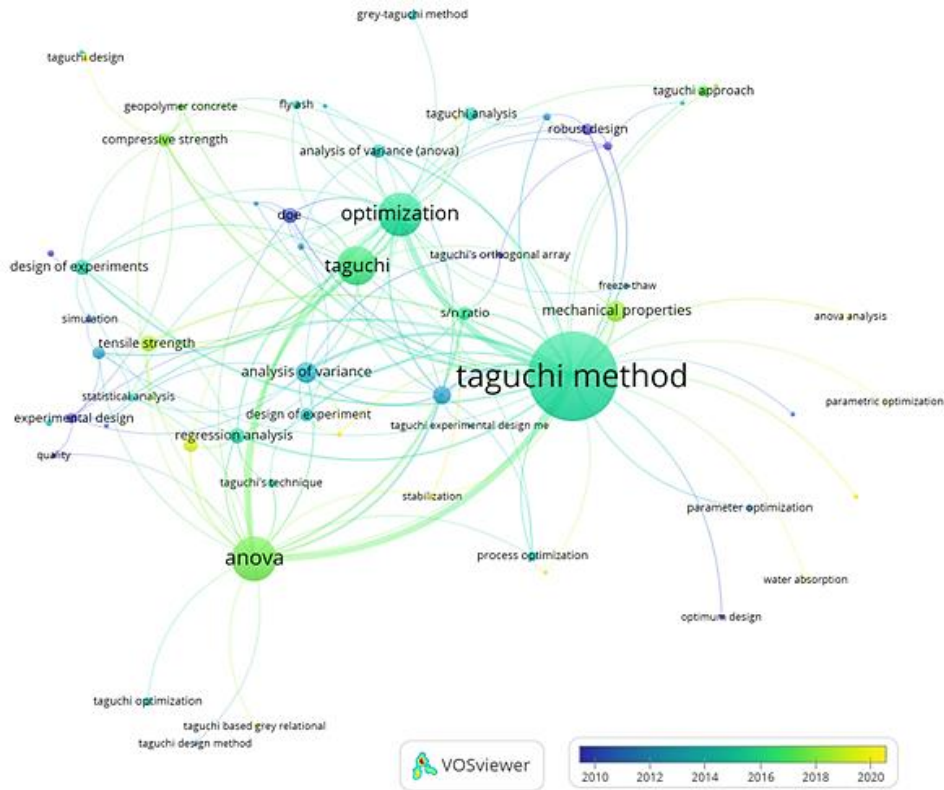
2.1.Taguchi Yöntemi Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

Taguchi metodu (1986), inşaat mühendisliği deneysel çalışmalarında popülerliğini giderek artırmakta olan bir yöntemdir. Metot sayesinde deneysel çalışmalar hızlı ve ekonomik olmaktadır. “*Taguchi Method*” anahtar kelimesi kullanılarak Web of Science veri tabanında gerçekleştirilen arama sonucunda farklı alanlarda toplamda 10.284 adet makale, bildiri, literatür özeti, kitap bölümü vb. akademik çalışma bulunmuştur (WOS-1, 2023). Bu çalışmaların %76’sını makaleler ve %22’sini bildiriler oluşturmaktadır. Çalışmaların alanlarına göre yüzdeleri ve yıllara göre sayısını gösteren grafikler Şekil 2.1’ de verilmiştir. Şekil 2.1’e göre, özellikle 2010’dan sonra yöntem kullanılarak yapılan çalışmaların sayısında artış meydana gelmiştir. Diğer yandan yöntem; en çok malzeme bilimi, üretim endüstrisi ve mekanik mühendisliği alanlarında kaliteyi iyileştirmek amacıyla kullanılmıştır.

Web of Science veri tabanında 2010-2020 tarihleri arasında listelenen tüm literatür çalışmaları yapı malzemesi ile ilişkili olan alanlara göre filtrelendiğinde elde edilen 2.704 (WOS-2, 2023) çalışmanın ortogonal dizi, Taguchi metodu, deney tasarımı, parametre optimizasyonu, uçucu kül, varyans analizi, parametre optimizasyonu, basınç dayanımı gibi anahtar kelimelerinin en az 3’ünün kesişimi ile elde edilen ilişki ağ görseli Şekil 2.2’ de verilmiştir. Verilen Taguchi metodunun ilişki ağ grafiği incelendiği zaman yöntemin son on yılda yaygın olarak yapı malzemesi alanında kullanıldığı görülmektedir (Uray vd., 2023). Yapılan literatür taramaları, Taguchi Metodu gibi istatistiksel temelli deney tasarım yöntemlerinin özellikle yapı malzemesi çalışmalarında öne çıktığını ve araştırmacılar tarafından yaygın bir şekilde benimsendiğini göstermektedir (Uray vd., 2024). Yöntemin az sayıda deney ile birden fazla parametrenin etkisinin güvenilir bir doğruluk aralığında tahmin edilmesine olanak sağlaması ve sınırlı kaynaklarla hızlı ve güvenilir sonuçlara ulaşması açısından etkili olduğu görülmüştür.



Şekil 2.1. Web of Science veri tabanında çalışma alanlarına ve yıllara göre literatür tarama sonuçları



Şekil 2.2. Taguchi metodu ile yapılan yapı malzemesi çalışmaları ilişki ağı

Uysal (2012) yaptığı çalışmada; sürenin, çimento tipinin, çimento dozajının, süper akışkanlaştırıcı katkı tipinin ve mineral katkıların yüksek dayanımlı betonlar için basınç dayanımına etkisini deneysel ve istatistiksel olarak araştırmıştır. Yapılan çalışmada normal portland çimentosu ve beyaz çimento olmak üzere iki farklı çimento tipi ve polikarboksil ve modifiye polikarboksil olmak üzere iki farklı süper akışkanlaştırıcı katkı parametre olarak kullanılmıştır. Ayrıca karışımlarda silis dumanı (SD) ve uçucu kül (UK) olmak üzere iki farklı mineral katkı kullanılmıştır. Buna göre çalışmadan; mineral katkı olarak UK ve SD katkılı yüksek dayanımlı betona ilave edilmesi 28 ve 90 günlük yaşlarda betonun basınç dayanımını olumlu etkilemiştir. Taguchi yöntemi kullanılarak yapılan istatistik değerlendirmede en etkili parametreler sırasıyla zaman, dozaj, mineral katkı, akışkanlaştırıcı tipi ve çimento türü olarak belirlenmiştir.

Kate ve arkadaşları (2021) yaptıkları çalışmada; sürdürülebilir yüksek dayanımlı betonların yüksek oranda UK kullanarak, çelik fiberli ve fibersiz olarak Taguchi ve multi regresyon yöntemiyle parametrelerin betonun mekanik özelliklerine etkisini belirleyip, aynı zamanda parametre optimizasyonunu yapmışlardır. Çalışmada betonun mekanik özelliklerini ve parametrelerin etki yüzdelerini belirlemek için Taguchi L16 ortogonal dizi kullanılmıştır. Buna göre çalışmada genel anlamda eğilme ve basınç dayanımı için çimento miktarı %30 azaltılıp, yerine UK ikame edilerek daha çevreci bir beton tasarımı yapılmıştır.

Warda ve arkadaşları (2020), yüksek dayanımlı betonlarda Taguchi metodu kullanarak optimum karışım oranlarını belirlemeye çalışmışlardır. Araştırmacılar, SD, çelik fiber, süper akışkanlaştırıcı, maksimum agrega çapı, s/ç oranı ve UK parametre olarak belirlemiş, belirlenen bu parametreler için 3 farklı seviye kullanarak Taguchi L27 ortogonal diziye göre karışım tasarımlarını yapmışlardır. Buna göre; basınç, eğilme ve çekme dayanımları için en etkili parametreler sırasıyla; çelik fiber, UK ve su-çimento oranı olmuştur. UK ikamesinin %20 seviyesi tüm yaşlarda basınç dayanımını olumsuz etkilemiştir. SD ikamesi ise basınç ve eğilme dayanımında genel anlamda düşük etkili bir parametre olmuştur.

Sevinç ve arkadaşları (2017), barit, kolemanit, bazaltik pomza ve granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) içeren betonların mühendislik özelliklerini Taguchi yaklaşımı kullanarak araştırmışlardır. Araştırmacılar parametre olarak pomza, barit, GYFC ve kolemanit kullanmış, bu parametrelerin 4 farklı seviyesini ele alarak Taguchi L16 ortogonal diziye göre karışım içeriğini belirlemişlerdir. Buna göre barit, puzolanik olarak aktif olmadığından, ikame oranı arttıkça tüm dayanımları olumsuz etkilemiştir. Diğer

yandan betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerinde en etkili parametreler sırasıyla GYFC ve kolemanit olmuştur.

Hınıslıoğlu ve Bayrak (2007) yaptığı çalışmada; geçirimli betonlarda SD ve UK ikamesinin erken yaş eğilme dayanıma etkisini Taguchi metodu kullanılarak araştırmıştır. Deneysel çalışmada 4 parametre ve her parametrede 4 seviye olacak şekilde L16 ortogonal dizi kullanılmıştır. Buna göre çalışmada; SD, UK, agrega gradasyon tipi ve s/ç oranı parametre olarak belirlenmiştir. UK ün %5'ten fazla ikame oranında erken yaş eğilme dayanımı olumsuz etkilenmiştir. Diğer yandan SD'nin artan oranda ikamesi matraste mikro boyutta büzülme çatlakları oluşturduğundan erken yaş eğilme dayanımında ikame oranı artışına bağlı olarak olumsuz anlamda en etkili parametre olmuştur.

Uysal ve arkadaşları (2019), betonda UK kullanımının betonun durabilite özelliklerine etkisini Taguchi yaklaşımı ve varyans analizi kullanarak araştırmışlardır. Buna göre; çimento dozajı, UK ve kür süresi olmak üzere 3 farklı parametre ve bu 3 parametrenin 3 farklı seviyesi seçilmiş, L9 ortogonal diziye göre 9 farklı karışım üretilmiştir. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; kılcal su emme ve klorid iyonu geçirimliliğinde en önemli parametre çimento dozajı iken donma-çözünmeden kaynaklı kütle ve eğilme dayanımı kayıplarında en etkili parametre UK olmuştur.

Sabarish ve Paul (2020), yaptıkları çalışmada Taguchi L9 ortogonal diziye uygun beton üretiminde kullandıkları parametrelerin optimizasyonunu yapmışlardır. Buna göre kullanılan parametreler; s/b oranı, UK, nehir kumu ve sisal fiber (yöresel bitki) olmuştur. Nehir kumu ince agrega yerine farklı oranlarda ikame edilirken UK çimento yerine ikame edilmiştir. Buna göre çalışmada; basınç dayanımını maksimum yapan UK ikame oranı %20, nehir kumu oranı %35 ve sisal fiber oranı %2 olarak bulunmuştur.

Sahoo ve arkadaşları (2016), yapmış oldukları çalışmada karbonatlaşmış UK ve normal UK ikamesinin agresif ortam koşullarında (asit, sülfat ve klorür) betonun durabilite özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Buna göre; 28 gün normal suda kür edilmiş numunelerde karbonatlaşmış UK ikamesi durumunda klorid saldırısı hariç asit ve sülfat saldırılarında dayanım artarken, kontrol betonu ve normal UK ikamesi durumunda ise tüm agresif ortam koşullarında dayanım azalmaktadır. Benzer durum 56, 90 ve 180 günlük kür koşullarında da meydana gelmiştir. Diğer yandan en fazla dayanım kaybı UK ikamesi içermeyen kontrol betonlarında oluşmuştur. Dayanım kayıpları kontrol betonu ve normal UK içeren betonlarda agresif ortam koşuluna maruziyet süresi ile artarken karbonatlaşmış UK ikameli betonlarda agresif ortam koşulu maruziyet süresinin artışı

basınç dayanımı azalışını olumlu yönde etkilemiş hatta dayanımı arttırmıştır (asit ve sülfat etkisinde). Agresif ortamlara maruziyet kütle kaybı açısından değerlendirildiğinde; karbonatlaşmış UK ve normal UK katkılı betonlarda kütle kaybı çok az ve birbirine yakın olurken, kontrol betonunda ise farklı kür sürelerinde etki yaklaşık ve sırasıyla en fazla asit, sülfat ve klorid maruziyetinde olmuştur

Tang ve arkadaşları (2022), çalışmalarında hafif agregası kullanarak fiber donatılı geçirimsiz betonların optimum karışım içeriklerini ve mühendislik özelliklerini Taguchi yaklaşımı kullanarak belirlemişlerdir. Buna göre çalışmada; hafif agreganın tane çapı, ince agregası içeriği, karışım matrisi tipi ve agregası/bağlayıcı oranı (a/b) parametre olarak seçilmiştir. Karışımın matrisi içeriği ise farklı oranlarda SD, ultra ince silis tozu, fiber donatı ve süper akışkanlaştırıcı miktarlarından oluşmaktadır. Seçilen bu 4 parametrenin 3 seviyesi kullanılarak (3^4), Taguchi L9 ortogonal diziye göre karışım tasarımları yapılmıştır. Daha sonra elde edilen geçirimsiz betonlar için 28 günlük numunelerde basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri yapılmış, parametrelerin bu hedef deneyler için etkileri belirlenmiştir. Elde edilen araştırma sonuçlarına göre hafif agregalı geçirimsiz betonun basınç dayanımında en etkili parametre ince agregası içeriği olmuştur. Eğilme dayanımı ve çekme dayanımında da ince agregası içeriği etkili bir parametre olarak belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada; SD, ultra ince silis tozu ve fiber donatının uygun miktarda kullanımının hafif agregası kullanılarak üretilmiş geçirimsiz betonların mühendislik özelliklerini iyileştirmede önemli olduğu belirtilmiştir.

Karthik ve Mohan (2021), tarafından yapılan çalışmada; UK, GYFC ve SD kullanılarak Taguchi metodu ile geopolimer betonun optimum dizayn karakteristikleri araştırılmıştır. Araştırmacılar bu malzemeleri yüksek oranda alümin ve silis içerdiklerinden dolayı betonda kullanmışlardır. Bu çalışmada geopolimer betonun istenilen dayanım kriterine erişmesi için karışım içeriklerinin optimizasyonunda Taguchi yaklaşımı kullanılmıştır. Buna göre bağlayıcı içeriği (SD, GYFC, UK), süper akışkanlaştırıcı oranı, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı ve molarite parametre olarak belirlenmiş ve bu parametrelerin 4 seviyesi ele alınmıştır. Optimum seviyelerini belirlemek ve her faktörün basınç dayanımındaki etkisini tespit etmek amacıyla Taguchi L16 ortogonal dizi kullanılmıştır. Çalışmada maksimum basınç dayanımında optimum parametre seviyeleri; UK ve GYFC için %45, SD için %10, süper akışkanlaştırıcıda %1.5, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı için 1.5 ve molarite için 12 olarak belirlenmiştir.

Raj ve arkadaşları (2021), atık ürün olarak mineral katkıların betonda kullanımının çevreye sağladıkları yararlılardan yola çıkarak bir çalışma yapmışlardır. Buna

göre çalışmada; kür sıcaklığı, kür süresi, dinlenme süresi, alkali aktivatör solüsyon oranı, UK ikame oranı, NaOH molaritesi parametrelerinin basınç dayanımına etkisi araştırılmıştır. Kullanılan bu parametrelerinin etki oranları varyans analizi yapılarak belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre geopolimer betonun basınç dayanımında %77.44 oranla en etkili parametre çimento dozajı olmuştur. Diğer yandan en büyük basınç dayanımını veren optimum tasarım; %20 çimento dozajı, 14M NaOH, 60 °C kür sıcaklığı, 36 saat kür süresi, 48 saat dinlenme süresi, %2.5 alkali solüsyon oranı ve UK ikame oranının %30 olduğu durumda elde edilmiştir.

Tanyıldızı (2021), polimer emdirilmiş betonda; Taguchi metodunu kullanıp, varyans analizleri yaparak, farklı polipropilen fiber içeriğinin betonun mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Çalışma deneysel ve istatistiksel incelemeyi temel almıştır. Çalışmada çimento dozajı (300, 350, 400 kg/m³), polipropilen fiber oranı (%0, %1, %2) ve kür süresi (3, 7, 28 gün) parametre olarak belirlenmiş ve Taguchi L9 (3³) ortogonal dizi kullanılmıştır. Numuneler belirtilen sürelerde kür edildikten sonra 105 °C 'de kurutulmuş, sonrasında numunelere 24 saat boyunca atmosferik koşullar altında polimer emdirilmiştir. Polimer emdirilen numuneler 60°C'de 6 saat boyunca kurutulmuştur. Son olarak numunelere basınç dayanımı ve ultra ses geçiş hızı testi yapılmıştır. Taguchi ve varyans analizine göre ultra ses geçiş hızı ve beton basınç dayanımı deneylerinde maksimum tasarım sonuçları 28 günlük kür, %1 polipropilen fiber ve 400 kg/m³ çimento dozajında elde edilmiştir.

Ramasamy ve arkadaşları (2020), yüksek dayanımlı beton üretiminde optimum tasarım parametre seviyelerini belirlemek için Taguchi metodunu kullanmışlardır. Buna göre çalışmada seçilen parametreler bağlayıcı/agrega oranı (b/a), s/b oranı ve süper akışkanlaştırıcı miktarı olmuştur. b/a oranı için (0.32, 0.36, 0.45 ve 0.45), s/b oranı için (0.3, 0.27, 0.28 ve 0.22) ve süper akışkanlaştırıcı için (6, 6.9, 7.1 ve 7.7 kg/m³) olmak üzere 4 seviye belirlenmiştir. Belirlenen bu parametre ve seviyeleri Taguchi L9 ortogonal diziye yerleştirilerek 9 farklı karışım elde edilmiştir. Buna göre 100x100x100 mm³ boyutlu numuneler 3, 7 ve 28 gün kür havuzunda bekletildikten sonra basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Sonuç olarak en yüksek basınç dayanımı s/b oranının 0.27, süper akışkanlaştırıcı miktarının 6 kg/m³ ve b/a oranının 0.45 olduğu durumda gerçekleşmiştir.

De Side ve arkadaşları (2020), betonun mühendislik özelliklerini optimize etmek için çimento yerine ikame edilecek SD içeriğini Taguchi metodu kullanılarak belirlemeye çalışmıştır. Buna göre SD miktarı, kum miktarı ve çimento miktarı parametre olarak belirlenmiş ve parametreler için 3 seviye seçilmiştir. Parametre ve seviyelerine göre

harcın karışım özelliklerini belirlemede L9 ortogonal dizi kullanılmıştır. Ortogonal diziye uygun olarak elde edilen harçların basınç dayanımını belirlemek için 50x50x50 mm³ küp numuneler üretilmiştir. Buna göre, harcın basınç dayanımında en etkili parametre çimento miktarı olurken kum ve SD' nin etkisi birbirine yakın olarak belirlenmiştir. Ayrıca SD içeren karışımların geçirimsizlikleri referans harca göre yaklaşık %40 daha az olmuştur.

Jafari ve arkadaşları (2018), polimer betonun mekanik davranışını tahribatlı ve tahribatsız testler yaparak araştırmışlardır. Araştırmacılar tarafından 3 farklı polimer oranı (epoksi reçinesi) içeren (%10, %12, %14) ve 2 farklı çapta kaba agregadan oluşan (4.75-9.5 mm ve 9.5-19 mm) karışımlar üretilmiştir. Karışımlardan elde edilen numuneler 3 farklı deney ortamı sıcaklığında (-15 °C, 25 °C ve 65 °C) test edilmiştir. Araştırmacılar, Taguchi metodu ve varyans analizi (ANOVA) kullanarak değişken polimer oranlarının, farklı kaba agrega çapının ve sıcaklığın; basınç dayanımına, eğilme dayanımına ve yarmada çekme dayanımına olan etkisini belirleyerek parametre optimizasyonu yapmıştır. Numunelerde boşluk ve porozite oranını belirlemek için tahribatsız yöntemlerden, elektriksel direnç ve ultra ses geçiş hızı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca polimer betonun mikro yapısal durumunu incelemek için; agrega polimer ara yüzü bağ görüntüleri ve boşluk yapıları, elektron mikroskopuyla (SEM) taranmıştır. Araştırma sonuçlarına göre deney ortamı sıcaklığının 25 °C'den -15 °C'ye düşürülmesi polimer betonun mekanik özelliklerinde iyileşmelere sebep olurken; sıcaklığın 25 °C'den 65 °C'ye çıkarılması polimer betonun mekanik özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Araştırmada yapılan tahribatsız test sonuçlarına göre iri agrega çapının ve polimer oranının artışı betonun boşluk yapısını iyileştirmiştir. Taguchi metoduna göre elde edilen optimum tasarım, polimer içeriğinin %14, agrega tane büyüklüğünün 9.5-19 mm ve test sıcaklığının -15 °C olduğu durum olarak belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada, polimer betonun mekanik özelliklerini tahmin etmek için çeşitli matematik modeller önerilmiştir.

Sabarish ve Parvati (2021), eğilme dayanımı ve su emme yüzdesi açısından karışımlarda kullanılan parametrelerin optimizasyonunu; Taguchi yöntemi, varyans analizi ve gri ilişkisel analiz yöntemlerini kullanarak yapmıştır. Çalışmada, aşırı malzeme kullanımı ve zaman kaybının önüne geçmek için istatistiksel bir yaklaşım olan Taguchi metodu kullanılmıştır. Her parametrenin etkisini, minimum kaynak ve zaman kullanarak optimum şekilde belirlemek için L9 ortogonal diziye uygun numuneler üretilmiştir. Yöntemde, en etkili parametreleri belirlemek için sinyal/gürültü oranlarını (S/N) kullanılmıştır. Ayrıca çalışmada, Taguchi yöntemiyle optimize edilmiş sonuçlar gri ilişkisel analiz kullanılarak çapraz olarak da değerlendirilmiştir. Buna göre eğilme

dayanımı ve su emme yüzdesi için optimum parametre seviyeleri s/ç oranının 0.45, UK ikamesinin %20, nehir kumu oranının %35 ve sisal fiber oranının %2 olduğu durum olarak belirlenmiştir.

Lee ve Shin (2019a) yaptıkları çalışmada; GYFC ve UK katkılı geopolimer betonların basınç dayanımı ve çekme dayanımlarını Taguchi metodu kullanarak regresyon analizleri ile tahmin etmişlerdir. Parametrelerin kür sıcaklığı, GYFC/bağlayıcı, a/b, alkali solüsyon/bağlayıcı, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı ve NaOH konsantrasyonu seçildiği çalışmada, bu parametrelerin 3 farklı seviyesi ele alınmıştır. GYFC, çimento ağırlığının 0.20-0.30-0.50 oranlarında ikame edilecek şekilde 3 farklı seviyede seçilmiştir. Çalışmada toplam 180 adet silindir numune üretilmiş ve bunların 108 adedi basınç dayanımı testinde (100 mmx200 mm), 72 adedi silindir yarma testinde (150 mmx300 mm) kullanılmıştır. Silindir yarma deneyi 28 ve 90 günlük numunelere uygulanırken, basınç dayanımı deneyi 1, 28 ve 90 günlük numunelere uygulanmıştır. $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ molar oranı 12'den fazla olan karışımlarda slump değeri 15 cm'in üzerinde çıkarken bu oran 12'nin altına düştüğünde slump değerinde keskin düşüşler olmuştur. İşlenebilirlik açısından $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ molar oranı etkin bir parametre olarak belirlenmiştir. Basınç dayanımı ve yarma dayanımı açısından 1 günlük numunelerden 28 günlük numunelere geçişte dayanım artışı bariz iken, 28 günlük numunelerden 90 günlük numunelere geçişte bu artış belirgin olmamakla birlikte birbirine yakın değerler almıştır. Diğer yandan varyans analizlerine göre tüm kür sürelerindeki basınç dayanımında en etkili parametre yaklaşık %50'lik oranla kür sıcaklığı olurken, ikinci etkili parametre yaklaşık %40'lık etkiyle GYFC/bağlayıcı oranı olmuştur. Diğer tüm parametrelerin etkisi %10'luk sınır içinde kalmıştır.

Dave ve arkadaşları (2021), Taguchi metodu kullanarak farklı ortam koşullarında kürlenmiş aktif alkali kompozit betonun, taze beton ve dayanım özellikleri için karışım tasarım optimizasyonunu yapmışlardır. Buna göre çalışmada GYFC nun yüksek oranda kullanımının erken polarizasyon sebebi ile büzülme çatlaklarına sebep olabileceği, bu sebeple GYFC kullanım oranlarında aşırıya kaçılmaması gerektiği belirtilmiştir. Çalışmada optimum karışım içeriğini belirlemek için Taguchi yaklaşımı benimsenmiş ve L9 ortogonal dizi kullanılmıştır. Buna göre tasarımlarda kullanılan parametreler; bağlayıcı içeriği, akışkanlaştırıcı yüzdesi, aktivatör oranı ve molar içerik olarak belirlenmiştir. Araştırma sonuçları taze betonda işlenebilirlik açısından değerlendirildiğinde; GYFC, yüksek kalsiyum içeriğinden dolayı işlenebilirliği olumsuz etkilemiştir. Çalışmada işlenebilirlik (slump) için performans karakteristiği olarak en

büyük en iyi yaklaşımı benimsenmiştir. İşlenebilirlik açısından en etkili parametre bağlayıcı içeriği ve ikinci en etkili parametre süper akışkanlaştırıcı dozajı olmuştur. Yüksek oranda GYFC kullanımı büzülme çatlağı oluşturduğundan basınç dayanımı açısından olumsuz durum meydana gelmiştir. Çalışmada, yapılan istatistik analizler neticesinde optimum GYFC içeriği %35 olarak belirlenmiştir. Basınç dayanımı açısından da en etkili parametre bağlayıcı içeriği olmuştur. Geçirimsizlik açısından sonuçlar değerlendirildiğinde en etkili parametre bağlayıcı içeriği olurken ikinci en etkili parametre molar içerik olmuştur. Asit saldırılarına karşı dayanıklılık konusunda yapılan değerlendirmede en etkili parametre alkali solüsyonun molar içeriği olurken ikinci en etkili parametre bağlayıcı içeriği olmuştur. Korozyon etkisi açısından çalışma bulguları değerlendirildiğinde; sonuçlar, en etkili parametrenin alkali solüsyonun molar içeriği, ikinci en etkili parametrenin ise bağlayıcı içeriğinin olduğunu göstermiştir. Diğer yandan, donatıda oluşan korozyon kaynaklı en yüksek kütle kaybı, B2 bağlayıcı içeriğinde, süper akışkanlaştırıcı oranının %1.5 olduğu, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının 3 ve molar içeriğin 10 olduğu durumda meydana gelmiştir.

Alighardashi ve arkadaşları (2019), geçirimli betonların nano silika ve ince agrega kullanarak istenilen mühendislik özelliklerine göre optimum karışım tasarımını Taguchi metodu kullanarak belirlemiştir. Karışım tasarımında s/ç oranı, agrega/çimento oranı (a/ç), nano silika yüzdesi ve ince agrega yüzdesi parametre olarak belirlenmiş ve bu parametrelerin 3 seviyesi göz önünde bulundurulmuştur. Buna göre betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini belirlemek için basınç dayanımı, yoğunluk, geçirimsizlik ve beton boşluk oranı deneyleri yapılmıştır. Taguchi metodu uygulanarak elde edilen optimum tasarım sonuçlarına; s/ç oranının 0.26, a/ç oranının 5 nano silika içeriğinin %6 ve ince agrega içeriğinin %20 olduğu karışımda ulaşılmıştır. Buna göre basınç dayanımında en etkili parametre nano silika olurken ikinci en etkili parametre ince agrega olmuştur. Boşluk içeriği, geçirimsizlik ve yoğunlukta en etkili parametreler sırasıyla ince agrega ve nano silika olmuştur.

Gao ve arkadaşları (2021), yaptıkları çalışmada; çeşitli parametrelerin çevre dostu bazalt elyaf takviyeli betonun özelliklerine etkisini araştırmıştır. Çalışmada, çevre dostu bir beton tasarlamak amacıyla Portland çimentosu yerine %60'a kadar UK ikamesi, ince agrega yerine ise %100'e kadar geri dönüştürülmüş cam kullanılmıştır. Beton karışımlarının dayanımlarını artırmak için kıyılmış bazalt elyafı ve atık cam farklı oranlarda kullanılmıştır. Bu parametrelerin beton performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek ve karışımların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve optimizasyonu

için Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre; UK ikamesi arttıkça işlenebilirlik artarken atık cam ve kıyılmış bazalt fiber kullanımı işlenebilirliği azaltmıştır. Diğer yandan betonun hava içeriği genel anlamda UK kullanımı ile azalırken atık cam ve kıyılmış bazalt fiber kullanımında betonun hava içeriği artmıştır. UK ün artan ikame oranları basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımını sürekli azaltırken, atık cam ve kıyılmış bazalt fiber kullanımı basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımında çok etkili olmamıştır. Ayrıca betona UK ikamesi betonun boşluk yapısını iyileştirerek daha kompakt bir beton elde edilmesini sağlamıştır.

Olivia ve Nikraz (2012), yaptıkları çalışmada; UK içeren geopolimer beton karışımların optimizasyonunu ve optimum karışımlardan üretilen betonun mekanik özellikleri ve dayanıklılığını Taguchi yöntemi kullanarak araştırmıştır. Agregada içeriği, alkali çözelti/UK oranı, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı ve kür yöntemleri parametre olarak dikkate alınmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre geopolimer beton 28 günde 55 MPa dayanıma ulaşmıştır. Geopolimer betonlar; kontrol karışımından daha yüksek eğilme dayanımı göstermiş, aynı zamanda daha az kuruma büzülmesi oluşmuştur. Ancak, elastisite modülünde kontrol numunesinden yaklaşık %15-30 arasında daha az değerler elde edilmiştir. Donma çözülme döngüsünde UK bulunan numunelerde kütle kaybı, normal Portland çimentosu içeren numunelerden daha fazla olmuştur. Yarı hücre potansiyel ölçümlerinde geopolimer karışımlardan elde edilen numuneler korozyona daha yatkın görünmesine rağmen ilk çatlaklar normal betona göre 3.86-5.70 kat daha fazla hızlandırılmış korozyon süresinde oluşmuştur. Son olarak, araştırma sonuçlarına göre geopolimer betonun mekanik özellikleri normal beton ile kıyaslandığında deniz suyu ortam koşullarında geopolimer beton, durabilite açısından daha üstün özellikler sergilemiştir.

Sharifi ve arkadaşları (2020), yaptıkları çalışmada; birçok parametreyi bünyesinde barındıran beton tasarımlarında kaliteyi iyileştirme ve zaman tasarrufu sağlamak amacıyla Taguchi yöntemini kullanmıştır. Çalışmada, kendiliğinden yerleşen yüksek dayanımlı betonlarda çimento miktarı, s/ç oranı, iri/ince agregada oranı, akışkanlaştırıcı miktarı, UK ve karıştırma süresi olmak üzere birçok parametre kullanılmıştır. Buna göre, optimum parametre içeriğini belirlemek ve parametre etki seviyelerini tespit etmek amacıyla varyans (ANOVA) analizi yapılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre; s/ç oranı, çimento miktarı ve karıştırma süresi beton karışım tasarımında en önemli parametreler olmuştur. Ayrıca çalışmada çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan en iyi-en kötü

metodu kullanılarak geleneksel Taguchi yöntemi ile yapılan optimizasyon işleminin iyileştirilmesi sağlanmaya çalışılmış ve değerlendirmesi yapılmıştır.

Joshaghani ve arkadaşları (2015) yaptıkları çalışmada; Taguchi yöntemi ile geçirimli betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini optimize etmişlerdir. Buna göre çalışmada; agreg a çapı, s/ç oranı ve ç/a oranı parametre seçilerek L9 ortogonal dizi kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; geçirimli betonun dayanıklılığının toplam boşluk oranına bağlı olduğu belirlenmiştir. Kullanılan agreganın boyutu arttıkça basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımları azalırken boşluk miktarı artmıştır. Dayanımların geçirimlilikle ters orantılı bir değişim sergilediği belirlenmiştir. Basınç dayanımında en etkili parametre çimento/agrega içeriği olurken, eğilme ve çekme dayanımlarında agreg a boyutu olmuştur.

Chatterjee ve Das (2013), kendiliğinden yerleşen harcın göreceli akış indeksi üzerinde toz malzemelerin (ince agreg a, UK ve mikro silis) ve süper akışkanlaştırıcı dozajının etkisini belirlemek için Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Buna göre ince malzemenin kullanıldığı kendiliğinden yerleşen beton karışımlarında süper akışkanlaştırıcı etkisi son derece önemli olmuştur. Ancak yüksek oranda akışkanlaştırıcı kullanımı ayrışmaya sebep olduğundan %2.5'tan daha fazla oranda kullanımı araştırmacıların değerlendirmelerine göre önerilmemektedir. Diğer yandan istenen akış davranışının sağlanması için (mikro silika+UK)/ince agreg a oranının %55 ile sınırlandırılması gerektiği vurgulanmıştır.

2.2. Mineral Katkı Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

Bilim ve Atış (2011), yaptıkları çalışmada GYFC içeren harçların aşınma ve mukavemet özelliklerini araştırmıştır. Buna göre; ıslak ve kuru olarak kürlenmiş numuneler farklı s/b oranlarında ve farklı oranlarda GYFC ikameleri ile hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin aşınma dirençleri, eğilme ve basınç mukavemetleri araştırılmıştır. Her s/b oranı için (0.30, 0.40 ve 0.50) çimento ağırlığınca GYFC ikame oranları %0, %20, %40, %60 ve %80 olarak belirlenmiştir. Karışımların özellikle düşük s/b oranı içerenlerine işlenebilirliği arttırmak için süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı malzemeleri ilave edilmiştir. Buna göre hazırlanan karışımlardan 40x40x160 mm boyutlarında numuneler üretilmiş ve 7, 28, 90 ve 180 günlük kür sürelerinde numunelerin Los Angeles aşınma yüzdeleri ve basınç dayanım değerleri ölçülmüştür. Çalışma sonuçlarına göre kür koşulları, GYFC içeren numuneleri kontrol numunesine göre daha

fazla etkilemiştir. Diğer yandan 180 gün kür edilmiş numunelerde en yüksek basınç dayanımı %40 GYFC ikamesinde elde edilmiştir. S/b oranının 0.50 olduğu numunelerde GYFC' nin çoğu kullanım oranlarında ve kür sürelerinin hemen hemen hepsinde beton basınç dayanımı, şahit numuneden daha az olmakla birlikte sadece %20 GYFC ikamesi durumunda ve 90 günlük kür süresinde şahit numuneden biraz fazla çıkmıştır.

Boran ve arkadaşları (2020), GYFC ilave edilmiş harçların mühendislik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada, harç numunelerinde standart kum yerine %10, %20 ve %30 oranında GYFC kullanılmıştır. Numunelerin basınç ve eğilme dayanım özellikleri deneylerle belirlenmiştir. Ayrıca numunelerin dayanıklılık özelliklerini araştırmak amacıyla elektriksel direnç ve donma çözülme deneyleri yapılmıştır. Buna göre tüm deney serilerinde en iyi sonuçlar %30 GYFC ikame oranında elde edilmiştir.

Saraya (2014) tarafından yapılan çalışmada; doğal puzolan olarak %20 bazaltın Portland çimentosu ile ikame edilmesinin, SD, GYFC ve kireçtaşı ile karşılaştırıldığında harmanlanmış çimentonun fiziko-kimyasal özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, referans numune ile çimento ağırlığının %20' si kadar SD, GYFC, bazalt ve kireçtaşı ikame edilerek hazırlanan numunelerin testi yapılarak karşılaştırılmıştır. 360 güne kadar kür sürelerinde yoğunluk, basınç dayanımı, toplam boşluk içeriği deneyleri yapılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre bazaltlı karışımlar erken kür süresinde SD ve GYFC na göre düşük dayanım gösterirken ilerleyen kür sürelerinde bazaltlı karışımların dayanımları artmıştır. Ayrıca çalışmada öğütülmüş bazaltın puzolanik aktivitesinin düşük olduğundan dolayı dayanımların düşük çıktığı belirtilmiştir. Ancak bazaltın, beton karışımlarında dolgu malzemesi olarak kullanıldığında dayanıklılık için iyi sonuçların elde edilebileceği vurgulanmıştır.

Yeau ve Kim (2005), tarafından yapılan çalışmada GYFC, ASTM Tip 1 ve ASTM Tip 5 çimento kullanımının korozyon dayanımına etkisi incelenmiştir. Buna göre hazırlanan karışımlara %25, %40 ve %55 oranlarında GYFC ikame edilmiştir. Karışımlardan hazırlanan numuneler 7, 14, 28, 56 gün kürlendikten sonra hedeflenen deneylere tabi tutulmuştur. Buna göre numuneler üzerine; hızlı klorid geçirimlilik deneyi, hızlandırılmış klorid iyon difüzyon testi, hızlandırılmış korozyon testi ve son olarak yarı hücre potansiyel testi numunelerdeki korozyon ihtimalini ve durumunu yansıtmaları için uygulanmıştır. Test sonuçlarına göre geçirimlilik katsayısı, Tip 1 çimentolu numunelerde, Tip 5 çimentolu numunelere göre daha düşük çıkmıştır. Tüm karışımlarda, GYFC içerenlerin difüzyon katsayısı daha düşük değer almıştır. Ayrıca korozyon ihtimali Tip 5 çimento içeren numunelerde, Tip 1 çimento içeren numunelere göre daha az çıkmıştır.

Diğer yandan yüksek oranda GYFC içeren Tip 1 çimentolu numunelerin korozyon dayanımı, yüksek oranda GYFC içeren Tip 5 çimentolu numunelerden daha yüksek olmuştur. En iyi korozyon dayanımı %40 GYFC ikameli ve Tip 1 çimentolu numunelerde gerçekleşmiştir.

Ramezaniapour ve Malhotra (1995), GYFC, SD ve UK içeren betonların farklı kür koşullarında boşluk yapısı, basınç dayanımı ve klorid iyonu penetrasyon özelliklerini araştırmıştır. Buna göre çalışmada; çimento yerine, %25, %50 oranında GYFC ikamesi, %25 ve %58 oranında UK ikamesi ve son olarak da çimento yerine %10 oranında SD ikamesi ile sabit 0.50 s/b oranlı karışımlardan numuneler üretilmiştir. UK ün işlenebilirliği artırmasından dolayı; UK ikamesinin %58 olduğu durumda s/b oranı azaltılarak 0.35 olarak alınmış ve buna göre numuneler üretilmiştir. Tüm kür koşullarında ve tüm yaşlarda (1, 3, 7, 28, 180 gün) %10 SD içeren numunelerde basınç dayanımı, kontrol numunesi ve diğer numunelerden daha yüksek çıkmıştır. Beton gözenek içeriği açısından deney sonuçları değerlendirildiğinde, normal kür koşullarında en çok gözeneklilik UK içeren numunelerde olmuştur. GYFC ve SD içeren numuneler beton gözenek durumu açısından iyi performans sergilemişlerdir. Son olarak klorid iyon penetrasyon performansı açısından en iyi numuneler yüksek oranda UK (%58) ve %10 SD içeren numuneler olmuştur.

Atiş ve arkadaşları (2005), ıslak (%100 bağıl nem) ve kuru (%65 bağıl nem) kür koşullarında SD kullanımının betonun basınç dayanımına etkisini araştırmıştır. Buna göre; 4 farklı s/ç oranında, 3 farklı çimento dozajında ve 3 farklı SD içeriğinde (%10, %15, %20 ikame) numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin bir bölümü %65 bağıl nemde, bir bölümü de %100 bağıl nemde 28 gün boyunca kürlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; kuru kür koşulları SD içeren numuneleri normal çimento içeren numunelerden daha çok etkilemiştir. s/ç oranının yüksek olması tüm numunelerde özellikle kuru kür koşulu durumu için hassas olmaktadır. Kuru kür koşullarında SD içeriğinin artışı dayanımı olumsuz etkilemiştir.

Mazloom ve arkadaşları (2004), yüksek dayanımlı betonların mekanik özelliklerine SD ikamesinin etkisini araştırmıştır. Buna göre; çalışmada s/b oranı 0.35 alınarak bağlayıcı miktarı 500 kg/m³'te sabit tutulmuştur. SD ikame oranları %6, %10 ve %15 olarak alınmıştır. Çalışma sonuçları incelendiğinde, SD ikamesinin artmasıyla, yeterli işlenebilirliğin sağlanması için süper akışkanlaştırıcı içeriğinin artırılması gerekmiştir. SD içeriğinin değişimi 90 günlük kür süresinden sonra basınç dayanımında önemli artışlara sebep olmamıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; basınç

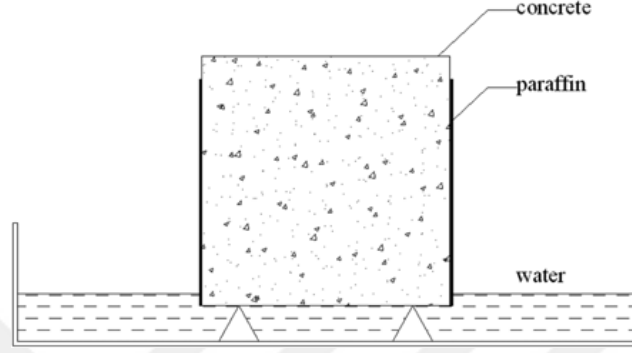
dayanımı elastisite modülü ilişkisi ACI 209-92’da verilen yöntem ile benzer çıkmıştır. SD toplam büzülmede etkili olmamış, ancak yüksek dayanımlı betonun SD içeriğinin artması kuruma büzülmesini azaltmıştır. SD içeriğinin artışı toplam sünme miktarında azalma meydana getirmiştir. SD genel anlamda beton boşluk oranını azalttığından betonun geçirimsizliği de azalmıştır. Çalışmada, ilginç bir şekilde 400 günlük kuru kür koşulunda SD’li numunelerin kontrol betonuna göre basınç dayanımı artarken ıslak kürlemede SD, basınç dayanımına önemli bir etkide bulunmamıştır.

Sarıdemir (2013) yaptığı çalışmada; yüksek dayanımlı betonlarda SD ve öğütülmüş pomza kullanımının betonun elastisite modülü ve basınç dayanımına etkisini araştırmıştır. Buna göre çalışmada, sabit s/b oranı için farklı oranlarda SD (%5, %10, %15, %20, %25) ikamesi ve yine aynı oranlarda öğütülmüş pomza ikamesi yapılmıştır. Tüm numunelerde benzer işlenebilirlik elde etmek için farklı oranlarda süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Her beton karışımında sekant elastisite modülü ve basınç dayanımı, 28 gün küre tabi tutulan 150x300 mm silindir numunelerin test edilmesiyle belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; yüksek dayanımlı betonlarda özellikle SD ikamesinin %15 olduğu durumda beton özelliklerinde önemli iyileşmeler sağlanmıştır.

Mohamed ve Najm (2017) yapmış oldukları çalışmada kendiliğinden yerleşen betonun, taze ve sertleşmiş beton özelliklerine farklı oranlarda SD, GYFC ve UK ikamesinin etkisini araştırmıştır. Buna göre; UK ikame oranlarını %10, %15, %20, %25, %30 ve %40 olarak belirlerken SD ikamesini %5, %10, %15 ve %20 ve GYFC ikamesini %10, %25, %35, %45, %50, %60, %70 ve %80 olarak belirlemişlerdir. Bu şekilde hazırlanan karışımların 3, 7 ve 28 günlük kür sürelerinde basınç dayanımları ölçülmüştür. Çalışmada, UK ikamesi arttığında taze beton daha akışkan olurken betonda ayrışma meydana gelmemiştir. UK ikamesinin %20 olduğu durum hariç diğer ikame oranlarında 28 günlük kür süresinde beton basınç dayanımı kontrol numunesi ile kıyaslandığında dayanımda azalmalar meydana gelmiştir. SD ikamesinin her oranında basınç dayanımı kontrol numunesinden daha fazla çıkmıştır. Ancak 28 günlük kür süresinde en fazla basınç dayanımı %15 SD ikamesi durumunda gerçekleşmiştir. GYFC ikame durumunda ise 28 günlük kür süresinde en yüksek basınç dayanımı %35 GYFC ikame oranında gerçekleşmiştir.

Türk ve arkadaşları (2013), kendiliğinden yerleşen betonlarda SD ve UK ikamesinin betonun basınç dayanımı, su emme oranı ve karbonatlaşma derinliğine etkisini araştırmıştır. Buna göre karışımlar hazırlanırken %25, %30, %35 ve %40

oranlarında UK ikamesi ve %5, %10, %15 ve %20 SD ikamesi göz önünde bulundurulmuştur. Her seriden iki tekrarlı numune olmak üzere üretim yapılmış sonuçların ortalaması alınarak geleneksel betonla karşılaştırılmıştır. Üretilen 150 mm'lik küp numunelere 3, 7, 28 ve 130 günlük kür sürelerinde basınç dayanım testi uygulanmıştır. Su emme testi için 100 mm'lik küp numuneler Şekil 2.3' teki düzeneğe göre test edilmiştir.



Şekil 2.3. Su emme deney düzeneği (Turk vd., 2013)

Buna göre numunelerin 5, 10, 30, 60, 240 ve 1440. dakikalarda su emme ölçeği ile su emme değerleri ölçülmüştür. Referans betona göre; SD içeren numunelerin tamamında su emme düşük olmuştur. Ancak, kendiliğinden yerleşen betonlarda en az su emme değeri %15 SD içeriğinde olmuştur. Elde edilen diğer sonuçlara göre; 3 günlük kür süresi hariç, SD'nin tüm oranlarında ve diğer kür sürelerinde kendiliğinden yerleşen betonun basınç dayanımı kontrol numunesinden daha fazla elde edilmiştir. 130 günlük kür süresinde en yüksek basınç dayanımı %40 UK içeriğinde gerçekleşmiştir. Karbonatlaşma derinliği açısından deney sonuçları incelendiğinde, en fazla karbonatlaşma derinliği geleneksel betonda olurken en az karbonatlaşma derinliği yalnız Portland çimentosu ile hazırlanmış kendiliğinden yerleşen betonlarda olmuştur. Ayrıca karbonatlaşma derinliği açısından; SD ikamesi ile hazırlanan numuneler UK ikamesi ile hazırlanan numunelerden daha iyi performans sergilemişlerdir.

Guo ve arkadaşları (2020) yaptıkları çalışmada; geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak üretilmiş kendiliğinden yerleşen betonda SD, GYFC ve UK kullanımının etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada bağlayıcı çeşidi olarak ikili, üçlü ve dörtlü bağlayıcı türlerini içeren toplam 23 adet karışım üretilmiştir. Buna göre üretilen betonların mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin değerlendirmesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; betonda geri dönüştürülmüş agrega kullanımının artması basınç ve yarmada çekme dayanımını olumsuz etkilemiştir. UK ün %50-75 oranlarında kullanımı basınç

dayanımını azaltmıştır. Geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen %20 UK, %20 GYFC ve %10 SD içeren karışım veya %30 UK, %30 GYFC ve %15 SD içeren karışım normal agrega ile üretilen betonla yakın basınç dayanım değeri göstermiştir. Puzolanların 3'lü kullanımı betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir.

Güleryüz ve arkadaşları (2020); hava sürükleyici katkılı harçlarda SD ve UK ün harç karışımlarının taze ve bazı sertleşmiş dayanım özelliklerine etkisini araştırmıştır. Buna göre CEM I 42.5R tipi çimento, polikarboksil esaslı akışkanlaştırıcı katkı, hava sürükleyici katkı, SD ve UK kullanılarak çeşitli kombinasyonlarda harç numuneler üretilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; hava sürükleyici katkılı harçlarda mineral katkı kullanımı harçların işlenebilirliğini arttırmıştır. Mineral katkılı harçlar erken yaşlarda referans harçtan daha düşük basınç dayanımı sergilemiştir. Ancak, 90 gün kür süresinin sonunda mineral katkılı betonlar referans betonun basınç dayanımının üzerine çıkmıştır. Mineral katkıların kullanımı ile 90 gün kür süresinin sonunda su emme değerleri referans betondan daha az olmuştur. Donma-çözülme çevrimlerinin sonunda en iyi performans SD ve UK ün birlikte içeren harç karışımından elde edilmiştir.

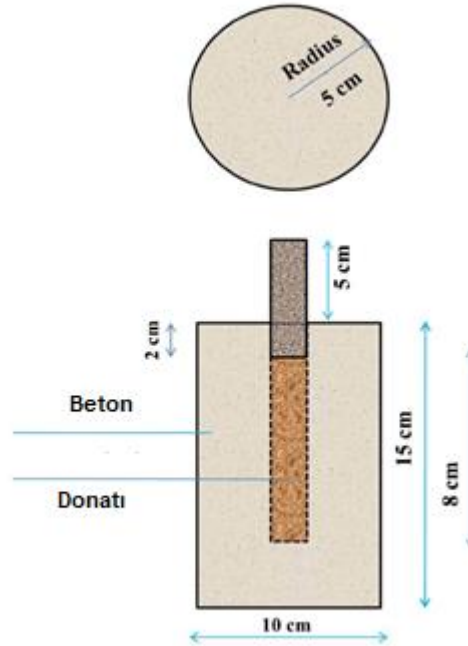
Ostrowski ve arkadaşları (2020), atık mineral katkı (UK ve GYFC) kullanarak üretilen düşük klinker içerikli Portland çimentolarından üretilmiş betonların reolojik ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Buna göre; klinker içeriği azaldığından dolayı üretim kaynaklı CO₂ emisyonu düşerek daha çevreci bir beton üretilebilecektir. Mineral katkıların kullanılmasıyla emisyondaki bu azalış 1/3 mertebelerine kadar olmaktadır. Çalışmada klinker yerine UK kullanımı betonun reolojik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Diğer yandan klinker yerine GYFC ve UK ün kullanımı bağlayıcı içeriğinin su talebini azalttığından betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini büyük oranda iyileştirmiştir. Araştırmacılar düşük klinker içerikli, çevreci ve yüksek dayanımlı betonun üretilebileceğini vurgulamıştır.

Khokhar ve arkadaşları (2010), beton karışımlarında yüksek mineral katkı kullanılabilirliğini araştırmıştır. Buna göre sera gazı salınımı kaynaklı çevresel zararları minimize etmek amacıyla çimento yerine yüksek oranlarda (%25-50-75) GYFC ve UK ikamesi yapmışlardır. Yüksek oranlarda mineral katkı ikamesi (%50-75) işlenebilirliğin kontrolü için yeni nesil akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları zorunlu kılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre GYFC un %25 ikame oranı, erken yaşlarda (2 ve 7 gün) referans betonun basınç dayanımına en yakın sonucu vermiştir. 28 günlük kür süresinde %25 GYFC ikame oranlı betonun dayanımı, referans betonun basınç dayanımıyla yaklaşık aynı olmuştur.

Diğer yandan UK ün tüm ikame oranlarında basınç dayanımı, referans betonun basınç dayanımından yaklaşık %20-30 oranında daha az olmuştur.

2.3. Korozyon ve Bağ Dayanımı Çalışmaları

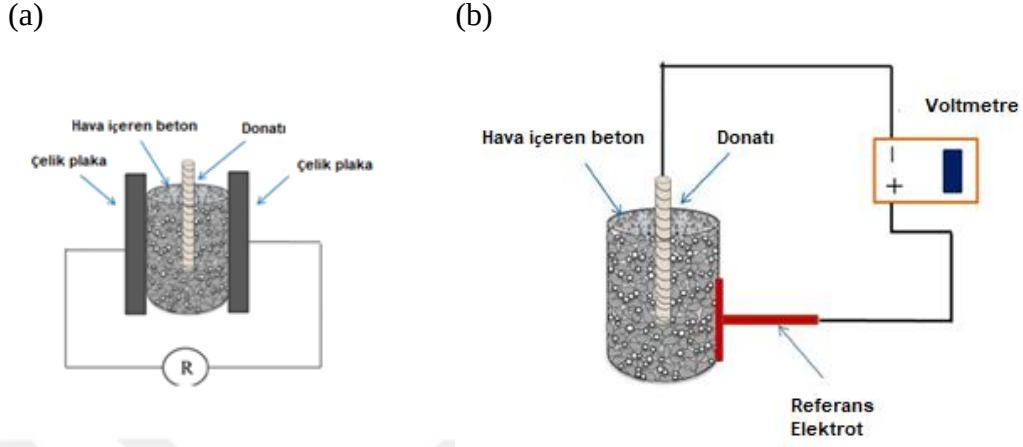
Ghanei ve arkadaşları (2018), yapmış oldukları çalışmada betonarmede korozyon davranışı açısından beton hava içeriğinin ve SD'nin optimum miktarlarını belirlemeye çalışmışlardır. Çalışmada ağırlıkça hava içeriği % 0, 0.7, 1.4, 2.1, 2.9 ve 3.6 olan betonlar üretilmiş ve üretilen betonların yarısında SD %0 diğer yarısında da %10 oranında olacak şekilde çimento miktarı yerine ikame edilmiştir. SD içeren karışımlarda işlenebilirliği sağlamak amacıyla değişik miktarlarda süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Üretilen karışımlar 100 mm çapında ve 150 mm yüksekliğindeki silindir kalıplara dökülmüş ve silindirlerin tam merkezinde olacak şekilde ϕ 14'lük donatı beton içerisine yerleştirilmiştir. Silindir numune ve donatının konumunu gösteren durum Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Çalışmada üretilen korozyon numunesi detayları (Ghanei vd., 2018)

Üretilen bu numuneler 28 gün kür havuzunda bırakılmıştır. Kürden çıkarılan numuneler 2 hafta boyunca %3.5 NaCl içeren solüsyona konulmuş ve sonrasında 2 hafta boyunca da kuru kürde bırakılmıştır. Daha sonra numuneler üzerinde elektriksel direnç

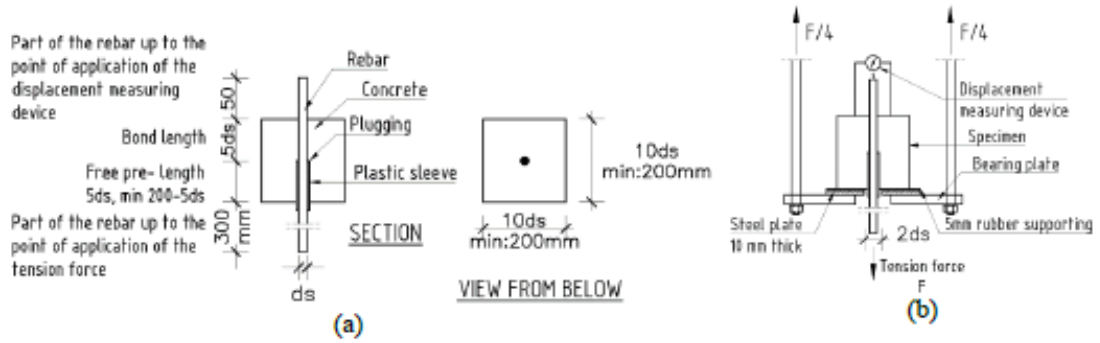
ölçümü ve yarı hücre potansiyel ölçüm deneyleri yapılarak donatı korozyon oranı belirlenmiştir. Şekil 2.5'te çalışmada kullanılan deney düzenekleri verilmiştir.



Şekil 2.5. Elektriksel direnç (a) ve yarı hücre potansiyel (b) deney düzenekleri (Ghanei vd., 2018)

Karışım serilerine uygulanan bu deney yöntemlerinden elde edilen sonuçlar Taguchi yöntemi ve tam faktöriyel yaklaşımlarla değerlendirilmiş olup en etkili ve optimum parametreler belirlenmeye çalışılmıştır. Buna göre yüksek hava içeriğinin olduğu numunelerde yarı hücre potansiyel deneyinde korozyon olasılığının arttığı, %10 SD ikamesinin ise korozyon olasılığını azalttığı belirlenmiştir. Elektriksel direnç açısından deney sonuçları değerlendirildiğinde SD ikamesinin puzolanik aktivite ile ekstra CSH jeli oluşturduğundan betonun geçirimsizliğini azalttığı ve buna bağlı olarak betonun elektriksel direncini arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Sadeghi ve Sharma (2019) yaptıkları çalışmada; pullout testinin nasıl yapılacağını literatürde yapılmış çalışmalara ve çalışmaların kullanmış olduğu standartlara göre incelemiştir. Buna göre araştırmacılar, pullout testleri için “*The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*”(RILEM) tavsiyelerini ve ASTM 234-91a standardını incelemişlerdir. RILEM’in tavsiyesine göre küp numunenin bir ayırıtı kullanılan donatı çapının 16 katından ve 200 mm’den az olmamalıdır. Ayrıca donatı çubuğunun betona gömülü uzunluğu, donatı çapının 5 katından az olmamalıdır. RILEM’in tavsiye prosedürü ve numune ölçüleri Şekil 2.6’da verilmiştir. RILEM’e göre beton içerisinde bağlı boy uzunluğu kadar serbest boy bırakılmalıdır.



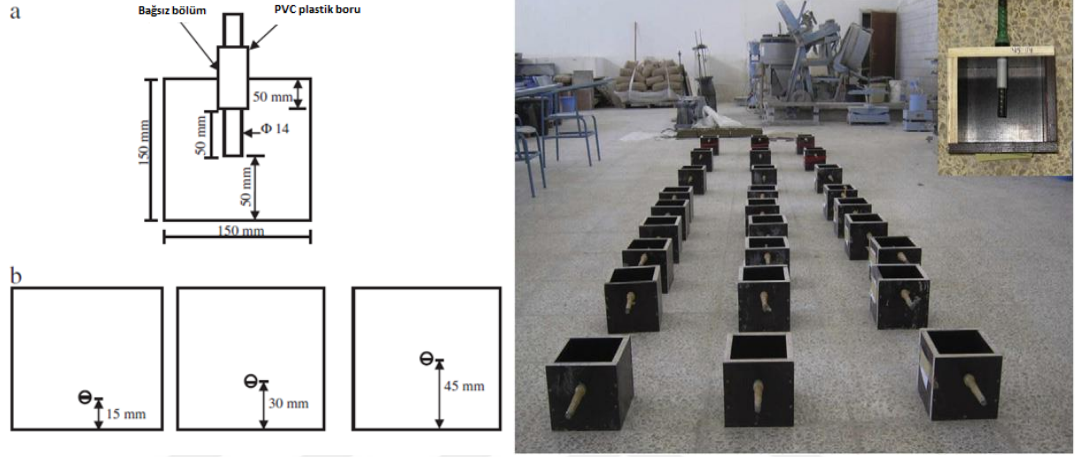
Şekil 2.6. RILEM tarafından önerilen numune ölçüleri (Sadeghi ve Sharma, 2019)

ASTM C234-91a standardında ise herhangi bir serbest boy (bağısız) önerilmemektedir. Standartta göre dikey test prosedürü için numune ölçüleri $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ olmalıdır. Bu standarda göre, yer değiştirmeler çubuğun yüklü ucundan ölçülmektedir. Çubuğun serbest boyundaki uzama, bağ kaymasını hesaplamak için ölçülen yer değiştirmeden çıkarılmaktadır. Şekil 2.7’de Sadeghi ve Sharma tarafından literatürde daha önce yapılmış pullout test numunelerinin özellikleri verilmiştir.

Araştırmacılar	Numune ölçüsü (mm)	Donatı konumu	Min. Paspayı (mm)	Bağlı boy (mm)	Donatı çapı d_s (mm)	Enine donatı
Sudki et al. [9]	$150 \times 150 \times 200$	Köşe	15, 30 and 60	150 ($15d_s$)	10	Yok
Fang et al. [10]	$140 \times 140 \times 180$	Merkez	-	80 ($4d_s$)	20	2 adet
Chung et al. [11]	$150 \times 150 \times 200$	Merkez	-	39 ($3d_s$)	13	Yok
Yalciner et al. [12]	$150 \times 150 \times 150$	Merkez	15, 30 and 45	50 ($3.57d_s$)	14	Yok
Zhou et al. [13]	$200 \times 200 \times 200$	Merkez	-	80 ($5d_s$)	16	2 adet
Wang et al. [14]	$150 \times 150 \times 150$	Köşe	15, 25 and 35	84 ($6d_s$)	14	1 adet
Tondolo F. [15]	$120 \times 120 \times 120$	Merkez	-	60 ($5d_s$)	12	2 adet
Yang et al. [16]	$150 \times 150 \times 150$	Merkez	-	100 ($5d_s$)	20	Yok
Lei et al. [17]	$150 \times 150 \times 150$	Merkez	-	90 ($4.5d_s$)	20	Yok
Ma et al. [18]	$150 \times 150 \times 150$	Kenar	30	100 ($5d_s$)	20	Yok
Farhan et al. [19]	$160 \times 160 \times 160$	Merkez	-	80 ($5d_s$)	16	Yok
Sudki et al. [9]	$150 \times 150 \times 200$	Köşe	15,30 and 60	150 ($15d_s$)	10	CFRP sargı

Şekil 2.7. Literatürde uygulanmış pullout testi için deney numunesi özellikleri (Sadeghi ve Sharma, 2019)

Yalçiner ve arkadaşları (2012), donatı ve beton arasındaki aderans dayanımını; pas payı, beton dayanımı ve korozyon seviyesinin bir fonksiyonu olarak göstermek amacıyla deneysel bir çalışma yapmıştır. Çalışma kapsamında araştırmacılar, farklı c/D (c : paspayı; D : donatı çapı) oranlarında (1.071, 2.143 ve 3.214) ve farklı dayanımlara sahip beton numuneler üretmişlerdir. Deneylerde kullanılan numunelerin türleri ve numune kalıpları ise Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8. Araştırmada kullanılan deney numune çeşitleri (Yalciner vd., 2012)

Beton basınç dayanımı, deneysel çalışmada bir parametre olarak değerlendirilmiştir. Araştırmacılar; parametreleri belirledikten sonra numuneleri üretmiş, üretilen numuneler 28 gün kür havuzunda bekletildikten sonra hızlandırılmış korozyon deneyine geçilmiştir. Buna göre; farklı korozyon seviyelerinin aderans dayanımına etkilerini incelemişlerdir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar incelendiğinde; c/D oranının artışı ile belirli bir seviyedeki korozyon oranına ulaşmada, beton dayanım sınıfının etkisi azalmıştır. Diğer bir ifade ile korozyon akımı etkisinde, pas payı arttıkça beton dayanımının etkinliği azalmıştır. Ayrıca çalışmada korozyona uğramamış numunelerde düşük pas payı değerlerindeki aderans dayanımında, beton basınç dayanımının etkisi daha fazla iken yüksek pas payı değerlerinde bu etki azalmıştır. Aynı zamanda korozyona uğramamış numunelerde beton basınç dayanımından bağımsız, pas payının artışı aderans dayanımını artırmıştır. Ayrıca araştırmacılar c/D oranının 3.2’den fazla olması durumunun bağ dayanımında kayda değer bir artışa sebep olmadığını belirtmişlerdir. Çalışmadan elde edilen diğer önemli bir sonuç ise s/φ oranının 0.75, pas payının 15 mm olduğu numunelerde %4 korozyon seviyesine kadar aderans dayanımının arttığı, yine aynı s/φ oranında pas payının 30 ve 45 mm olduğu numunelerde yaklaşık %2 korozyon

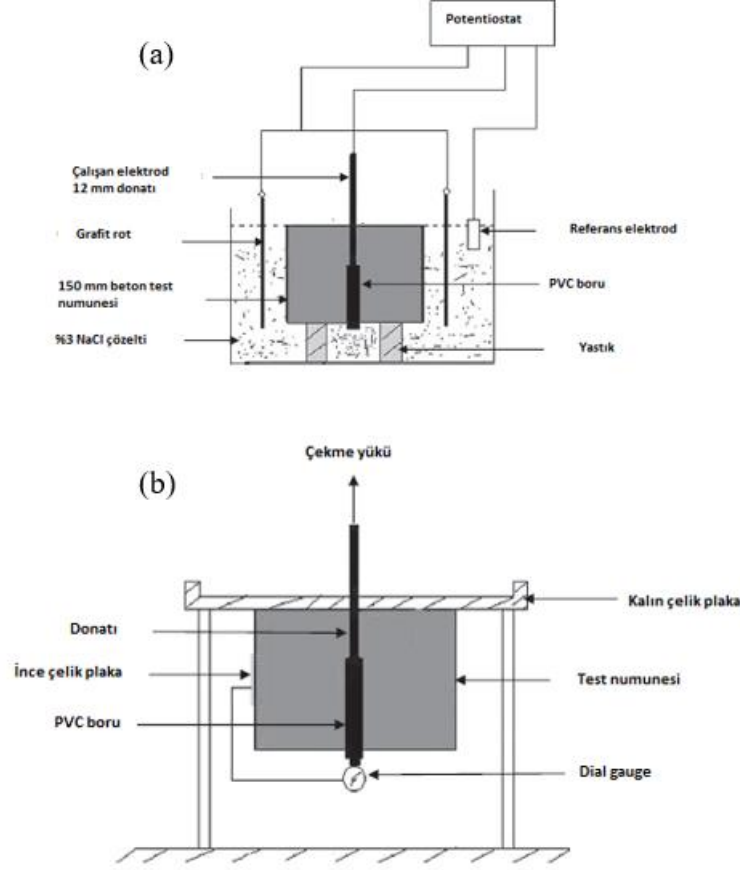
seviyesine kadar aderans dayanımının arttığı belirlenmiştir. s/ç oranının 0.40 olduğu numunelerde ise tüm c/D oranlarında yaklaşık %2 korozyon seviyesine kadar aderans dayanımlarında artışlar gözlemlenmiştir. Aynı korozyon seviyeleri için yüksek dayanımlı betonlardaki bağ dayanımı azalışı tüm c/D oranlarında düşük dayanımlı betonlardan daha fazla olmuştur. Bağ dayanımındaki bu azalış %2.66 korozyon seviyesi ve pas payının 45 mm olduğu numunelerde, yüksek dayanımlı betonlarda yaklaşık %73 olurken düşük dayanımlı betonlarda ise yaklaşık %23 olmuştur. Ayrıca yapılan çalışmada araştırmacılar; korozyon seviyelerine, beton basınç dayanımına ve c/D oranına bağlı olarak korozyona uğramış numuneler için bağ dayanımını veren matematik modeller geliştirmişlerdir.

Abdulrahman ve Mohammad (2012), farklı korozyon inhibitörlerinin betonarmede kullanılan donatı çeliği için korozyona, beton için ise basınç dayanımına etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar, beton karışımını laboratuvar ortamında hazırlarken harcın içerisine çimento ağırlığının %2'si oranında $\text{Ca}(\text{NO})_2$ (kalsiyum nitrit), $\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$ (etanolamin) ve *B. arundinacea* (Hint Bambusu) korozyon inhibitörü katmışlardır. 100x100x100 mm³ boyutunda üretilen küp numuneler 24 saat kalıpta kaldıktan sonra çıkarılarak 28°C' de suda kürlenmiş ve 7, 28, 90 ve 180. günlerde beton basınç deneyine tabi tutulmuştur. Buna göre betonda, %2 çimento ağırlığı oranında korozyon inhibitörü kullanılması, kullanılan inhibitörün türünden bağımsız olarak basınç dayanımı üzerinde olumlu bir etki göstermiştir. İnhibitörlü numuneler inhibitör türünden bağımsız olarak 7 ve 28 günlük yaşlarda kontrol numunesinden yaklaşık %50 daha fazla basınç dayanım sonucu vermiştir. Korozyon performansı açısından en iyi sonuç Hint bambusu esaslı korozyon inhibitöründen elde edilmiştir.

Abosrra ve arkadaşları (2011), farklı basınç dayanımına sahip betonlarda donatı korozyonunu ve bağ dayanımına etkisini araştırmışlardır. Buna göre; basınç dayanımları 20, 30 ve 46 MPa olan 150 mm'lik küp numuneleri 28 gün kürede bıraktıktan sonra, numunelere 1, 7 ve 15 gün boyunca %3'lük NaCl çözeltisinde batık durumdayken hızlandırılmış korozyon deneyi gereği 0.4 amper akım uygulamışlardır. Belirtilen sürelerin sonunda numuneler, pullout deneyine tabi tutulmuştur. Çalışmada kullanılan hızlandırılmış korozyon deney düzeneği Şekil 2.9a'da pullout test düzeneği Şekil 2.9b'de verilmiştir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; yüksek dayanımlı (46 MPa) betonda oluşan korozyon oranı 20 MPa ve 30 MPa dayanımlı betonlardan büyük oranda daha az olmuştur. Bir günlük hızlandırılmış korozyona tabi tutulan numunelerde, tüm basınç dayanımlarında aderans artışları meydana gelmiştir. Ancak, düşük korozyon süresinde en

fazla bağ dayanım artışı düşük dayanımlı (20 MPa) betonda olmuştur. 7 ve 15 gün süre ile hızlandırılmış korozyona tabi tutulan numunelerde ise korozyona bağlı aderans kaybı yüksek olmuştur. 7 ve 15 günlük korozyon sürelerinde en iyi bağ dayanım performansını 46 MPa'lık basınç dayanımına sahip numuneler göstermiştir.

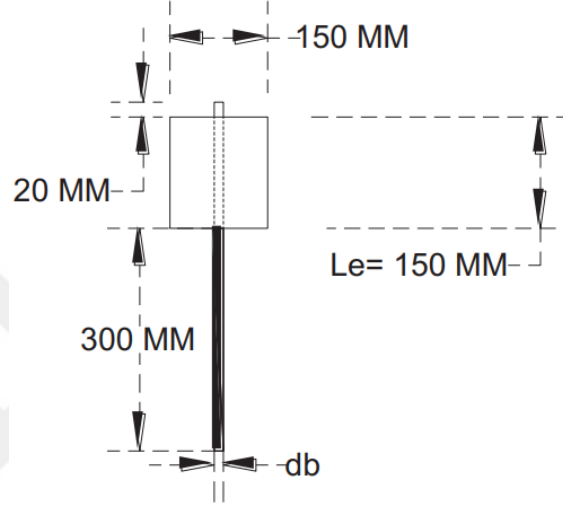


Şekil 2.9. Hızlandırılmış korozyon ve pullout deney düzeneği (Abosrra vd., 2011)

Al-Shannag ve Charif (2017) yaptıkları çalışmada, doğal hafif agregalarla üretilmiş betonların bağ dayanımı davranışlarını incelemişlerdir. Buna göre; pullout deneyleri yapmak üzere 30 adet 150x150x150 mm³ küp şeklinde lolipop numune üretilmiştir. Üretilen numune ölçüleri Şekil 2.10'da verilmiştir.

Şekil 2.10'da verilen ölçülerde hazırlanan numuneler iki farklı beton dayanım sınıfında (34 MPa ve 48 MPa) ve 5 farklı donatı çapı (12, 14, 16, 20 ve 25 mm) kullanılarak üretilmiş ve numunelerin bağ dayanımları ölçülmüştür. Daha sonra araştırmacılar numunelerden elde ettikleri deneysel pullout bağ dayanımı sonuçlarını ACI 318-08 ve EC-2'de verilen tasarım bağ dayanımları ile karşılaştırmışlardır. Deneysel sonuçlardan elde edilen aderans dayanımları özellikle küçük çaplı donatılarda;

yönetmeliklerin vermiş olduğu değerlerden daha yüksek çıkmıştır. Büyük çaplı donatılarda ise bağ dayanımı, yönetmeliklerin verdiği sonuçlarla hemen hemen örtüşmektedir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; bağ dayanımı, betonun basınç dayanımı arttıkça artarken donatı çapı arttıkça azalmıştır. Diğer yandan çalışmada; normal betonlara uygulanan yönetmelik bağ dayanımı formüllerinin hafif betonlarda da uygulanabileceği gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Pullout testi için hazırlanan numune ölçüleri (Al-Shannag ve Charif, 2017)

Tittarelli ve arkadaşları (2013), içerisinde ince agregası bulunmayan geçirimsiz betonların korozyon davranışlarını araştırmışlardır. Buna göre çalışmada; farklı s/ç, agregası/çimento oranlarında ve %1 su azaltıcı katkı kullanımı ile farklı dayanımlara sahip 3 seri karışım üretilmiştir. Karışımlardan elde edilen numuneler üzerinde birim ağırlık, beton boşluk miktarı ve beton basınç dayanımının (28 günlük) belirlenmesi için deneyler yapılmıştır. Daha sonra numunelerdeki karbonatlaşma oranı görüntü işleme yöntemi ile tespit edilmiştir. Araştırmacılar korozyon test numunelerini 10 mm çapında; normal donatı, çinko kaplı donatı ve 0.4 s/ç oranında grout kaplı donatı kullanarak üretmişlerdir. Üretimi yapılan numuneler Şekil 2.11’de verilmiştir. 28 gün standart kürde kalan numuneler daha sonra karbonatlaşma için 3 ay boyunca CO₂ ortamına maruz bırakılmıştır.

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; normal donatıda korozyonu betonun dayanımı ve geçirimsizliği önemli oranda etkilemiştir. Diğer yandan donatının kaplı olması durumunda; beton dayanım sınıfı ve geçirimsizlik korozyon oranını önemli ölçüde değiştirmemiştir. Buna sebep olarak kaplamanın pasif tabakayı yeterli oranda koruduğu

gösterilmiştir. Ayrıca normal donatıda meydana gelen korozyon oranı, kaplamalı olan donatılardan çok daha fazla olmuştur. Yapılan çalışmada en iyi korozyon performansını çinko kaplı (galvanizli) donatı göstermiştir.

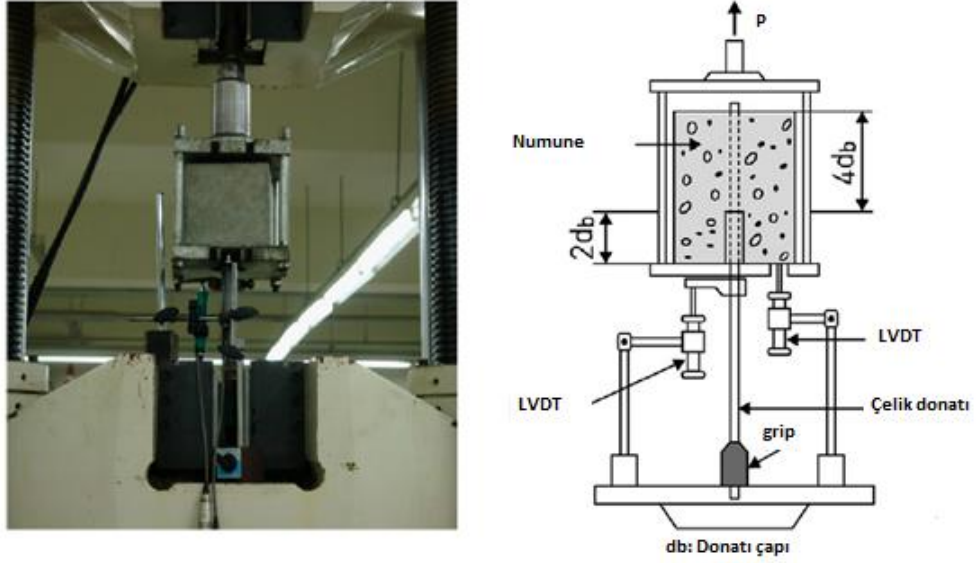


Şekil 2.11. İnce agregasız farklı kaplama tiplerinde üretilen numuneler (Tittarelli vd., 2013)

Choi ve arkadaşları (2014), tarafından yapılan çalışmada; donatı, farklı korozyon yöntemleriyle korozyona uğrattılıp donatı ve beton arasındaki bağ davranışı ilişkisi araştırılmıştır. Buna göre araştırmacılar öncelikle salt donatıyı hızlandırılmış korozyona uğrattıp daha sonra s/ç oranı 0.40 ve 0.60 olan küp numunelere yerleştirerek pullout testi gerçekleştirmişlerdir (Metod A). Sonrasında, s/ç oranı 0.40 ve 0.60 olan karışımlardan ürettikleri küp numunelere (150x150x150 mm³) donatıları yerleştirilmiş ve %3'lük NaCl çözeltisi içerisinde %10 seviyesine kadar hızlandırılmış korozyon işlemi uygulayıp bu numuneleri de pullout testine tabi tutmuşlardır (Metod B). Son olarak araştırmacılar, doğal yünden oluşmuş korozyonda bağ davranışını araştırmak için taze betonun içerisine kattıkları klorür ile lolipop beton numuneleri üretmişler; numuneleri 2 yıl boyunca atmosfere açık halde bekletip korozyona uğramış donatının bağ davranışını araştırmışlardır (Metod C). Pullout testi deney düzeneği Şekil 2.12'de verilmiştir.

Araştırmadan elde edilen sonuçlara göre; metot A'da s/ç oranının yüksek olduğu düşük dayanımlı betonlarda, bağ dayanımı s/ç oranının düşük olduğu yüksek dayanımlı betonlara göre %5 korozyon seviyesine kadar yaklaşık %25 daha az çıkmıştır. %7 ve %10'luk korozyon seviyelerinde ise beton basınç dayanımından bağımsız olarak aderans kuvvetleri hemen hemen aynı çıkmıştır. Diğer yandan %10'luk korozyon seviyesinde, bağ dayanımının kaybolduğu ana kadar donatıdaki kayma deplasman değeri daha fazla olmuştur. Ayrıca metot A'da %5 korozyon seviyesine kadar bağ dayanımında artış görülmüştür. Metot B'de ise %1.5 korozyon seviyesine kadar bağ dayanımındaki artışlar her iki s/ç oranında da görülmüştür. Ancak bu metotta s/ç oranının 0.60 olduğu betonda

%1.5’luk korozyon seviyesinden sonra bağ dayanımı kaybı dramatik olmuştur. Bu metotta en fazla aderans dayanımı 0.40 s/ç oranlı betonlarda %1.1’lik korozyon seviyesinde olurken 0.60 s/ç oranlı betonlarda en fazla aderans dayanımı %1.3 korozyon seviyesinde olmuştur. Metot C’de pullout deneyi sonrasında donatı yüzeyinde oluşan korozyon alanları ile bağ dayanımı ilişkilerini değerlendirmişlerdir. Buna göre düşük s/b oranında donatı pas yüzey alanı daha az olurken yüksek s/b oranında donatı pas yüzey alanı daha fazla olmuştur. Metot C’de sadece donatı korozyon yüzey alanı kullanılarak bağ dayanımı ilişkisinin irdelenmesinin doğru sonuçlar vermeyebileceği vurgulanmıştır.



Şekil 2.12. Araştırmada kullanılan pullout testi deney düzeneği (Choi vd., 2014)

Jiang ve arkadaşları (2018), literatürde daha önce yapılan korozyon çalışmalarından elde ettikleri bağ dayanımı verilerini kullanarak regresyon analizleri ile matematik model geliştirmişlerdir. Buna göre çalışmada, Wu ve Zhao (2013) tarafından verilen farklı korozyon seviyeleri için geliştirilen bağ dayanımı - yer değiştirme ilişkisinde elde edilen matematik modeli modifiye etmişlerdir. Korozyona uğramış numunelerde geliştirdikleri bağ dayanımı matematik modelini; enine donatı olması durumuna, c/D oranına, beton basınç dayanımına ve korozyon seviyesine göre ifade etmişlerdir. Modelin etkinliğini çeşitli regresyon ve istatistiksel analizlerle desteklemişlerdir. Buna göre; deneysel olarak belirlenmiş bağ dayanımlarını, analitik olarak tahmin etmeye çalışmışlardır. Çalışmada kullanılan, literatürde verilmiş matematiksel bağ dayanımı modelleri Şekil 2.13’te verilmiştir. Şekil 2.13’te verilen R_t

ifadesi herhangi bir korozyon yüzdesindeki maksimum aderans gerilmesinin, korozyonsuz durumdaki aderans gerilmesine oranını göstermektedir.

Reference	Model	R^2	IAE
Lee et al. [30]	$R_\tau = e^{-5.61\eta}$	0.349	0.263
Cabrera [17]	$R_\tau = 1 - 5.6\eta$	0.326	0.272
Stanish et al. [31]	$R_\tau = 1 - 3.5\eta$	0.310	0.271
Yuan et al. [29]	$R_\tau = 1 - (10.544 - 1.586c/d_b)\eta$	0.342	0.282
Auyeung et al. [19]	$R_\tau = e^{-32.51\eta}$	0.334	0.443
Chung et al. [32]	$R_\tau = 0.0159\eta^{-1.06} \leq 1.0$	0.395	0.293
Chung et al. [21]	$R_\tau = 0.116\eta^{-0.55} \leq 1.0$	0.396	0.253
Bhargava et al. [33]	$R_\tau = \begin{cases} e^{-19.8(\eta-1.5\%)} & \text{for flexural tests} \\ e^{-11.7(\eta-1.5\%)} & \text{for pull-out tests} \end{cases}$	0.364 0.370	0.330 0.280
Kivell [34]	$R_\tau = e^{-7.6(\eta-2.4\%)} \leq 1.0$	0.360	0.286
Lin and Zhao [27]	$R_\tau = \begin{cases} 1 & \eta \leq 1.5\% \\ e^{-\delta(\eta-1.5\%)} & \eta > 1.5\% \end{cases}$ where $\delta = \frac{13.28-0.57c/d_b}{43.54A_{st}/d_b s_{st} n_d + 1}$	0.456	0.229

Şekil 2.13. Çalışmada kullanılan literatür bağ dayanım tahmin modelleri (Jiang vd., 2018)

Araştırmacıların elde ettikleri modelde regresyon katsayısı, $R^2=0.410$ ve rölatif hata oranı $IAE=0.243$ olarak bulunmuş ve geliştirilen modelin Şekil 2.13'te verilen modellerin çoğundan daha iyi olduğu gösterilmiştir.

Yavuz ve arkadaşları (2019), korozyon inhibitörü kullanımının (%1) betonun korozyon dayanımına ve donatı aderansına etkisi araştırmıştır. Çalışmada s/ç oranı 0.60 sabit tutularak C30 dayanım sınıfında betonlar üretilmiştir. Üretilen lolipop numunelerde 16 mm çaplı nervürlü S420a donatı kullanılmıştır. Diğer yandan çalışmada kalsiyum nitrit içerikli (DCI) likit korozyon önleyici inhibitör kullanılmıştır. Üretilen numunelerde betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini belirlemek için yarı hücre potansiyeli ve çekip çıkarma (pullout) deneyleri yapılmıştır. Buna göre üretilen deney numuneleri 150x150x150 mm küp lolipop numunelerdir. Loliopop numunelere 7, 28, 90 ve 180 günlük kür sürelerinde, yukarda bahsi geçen deneyler uygulanmıştır. Özellikle 180 günlük numunelerde aderans dayanımı inhibitörlü numunelerde inhibitörsüz olanlara nazaran yaklaşık %33 daha fazla olmuştur. Ayrıca yarı hücre potansiyeli deney sonuçlarına göre numune yaşı arttıkça korozyon ihtimali azalmakla birlikte inhibitörlü numunelerde korozyon belirgin değilken inhibitörsüz numunelerde korozyon ihtimali artmıştır.

Aydın ve Çizmecioğlu (2013), tarafından yapılan çalışmada betonarme yapılarda korozyon inhibitörü kullanımının korozyon direncine nominal faydası literatür bilgileri

taranarak derlenmiştir. Çalışmada daha çok değinilen inhibitör, bileşim olarak %30 kalsiyum nitrit, %70 su içeren korozyon inhibitörüdür. Çalışmadan elde edilen sonuca göre; inhibitörler donatının etrafında bir kaplama tabakası (pasif) oluşturup özellikle agresif klorür iyonlarını bağladıklarından dolayı korozyon direncini önemli derecede arttırmaktadırlar. Korozyon inhibitörleri betonarme elemanlarda korozyon etkisini en aza indirebilmek amacıyla; donatı kaplama, mineral katkı kullanımı gibi yöntemlerle kombine edilebilmektedir.

Tommaselli ve arkadaşları (2009), tarafından yapılan çalışmada; doymuş kalsiyum hidroksit çözeltisi içerisine asit ortamını temsil edecek şekilde sülfürik asit ve nitrik asit ilave edilmiştir. Bu agresif ortam koşulları maruziyetinde toplam solüsyon kütlelerinin farklı oranlarında sodyum nitrit ve sodyum molibdat korozyon inhibitörü olarak kullanılmıştır. Buna göre kullanılan yoğunluğa bağlı olarak her iki inhibitör de korozyon önlemede önemli etki göstermiştir. Düşük yoğunlukta (toplam çözelti içeriğinin %1.3) sodyum molibdat, sodyum nitritten daha iyi performans göstermiştir. Ancak yüksek yoğunlukta (%4) kullanılan inhibitörlerin etkisi birbirleriyle kıyaslandığında inhibisyon etkinlikleri yakın değerler almıştır.

Muralidharan ve arkadaşları (2004), donatı korozyonunu önlemede kullanılan hidroksit, sitrat ve stanat gibi kompleks inhibitif iyonların korozyona etkisini; ağırlık kaybı ölçümü, elektrokimyasal empedans ölçümü ve potansiyelin zamana bağlı değişim ölçümlerini yaparak araştırmışlardır. Çalışmada; sadece portland puzolonik çimentodan elde edilen karışım numunelerinde 10.000 ppm klorid içeriğinde donatıdaki pasif tabaka hızlı bir şekilde özelliğini yitirmiştir. Ancak içerisinde çimento ağırlığının %1'i oranında hidroksit, sitrat ve stanat gibi kompleks inhibitif iyonların bulunduğu karışım numunelerinde 30.000 ppm klorid içeriğinde bile donatı üzerindeki pasif tabaka özelliğini kaybetmemiştir. Buna göre portland puzolonik çimento ile hidroksit, sitrat ve stanat gibi korozyon inhibitörlerinin kullanımı çelik donatının korozyonunu engellemede oldukça etkili olmuştur.

Ihekwa ve arkadaşları (1996), elektrokimyasal yöntemlerle klorid iyonu içeriğinin betona gömülü donatı çeliğinin bağ dayanımına etkisini araştırmıştır. Buna göre; çimento ağırlığının %1.7 ve %3 oranında NaCl karışım suyuna ilave edilerek 150 mm'lik küp numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 8 hafta boyunca 1 ve 3 amperlik akımlarda hızlandırılmış korozyon deneyine tabi tutulmuştur. Daha sonra numunelere pullout testi uygulanmıştır. Düşük klor içeriğindeki numunelerde aynı akım miktarında erişilen pullout test yükü daha fazla olurken 3 amperlik akım yoğunluğunda,

farklı klor içeriğindeki numunelerin pullout test yükleri birbirine yakın çıkmıştır. Artan akım miktarı ile donatı etrafında oluşan sodyum ve klor iyonu miktarında artışlar meydana gelmiştir. Araştırma sonuçlarına göre ilginç bir şekilde düşük klor içeriğinde bağ dayanım kaybı daha fazla olmuştur.

Zhou ve arkadaşları (2020) tarafından yapılan çalışmada, UK kullanımının bağ dayanımına olan etkisi araştırılmıştır. Buna göre çalışmada; korozyon etkisini yansıtmak amacıyla hızlandırılmış korozyon deneyi uygulanmıştır. Bağ davranışına etki edebileceği düşünülen 3 önemli faktör göz önüne alınmıştır. Bu faktörler; UK içeriği, etriye ve korozyon derecesidir. Bağ davranışı, bağ dayanımı-sıyrılma eğrileri ile ifade edilmeye çalışılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre %2.1'den daha az korozyon seviyesi bağ dayanımında artışa sebep olmuştur. Çalışmada, %15 UK kullanımında bağ dayanımı en yüksek değerine ulaşmıştır. Etriye kullanımı korozyonun düşük seviyelerinde bağ dayanımını arttırmıştır. Ancak yüksek seviyedeki korozyon oranlarında etriye kullanımı, bağ dayanımında önemli bir etkide bulunmamıştır.

Literatürde farklı parametreler kullanılarak bu parametrelerin betonun mekanik özelliklerine etkisinin araştırıldığı birçok çalışma vardır. Bu çalışmalar daha çok tam faktöriyel yöntem kullanılarak her bir parametrenin değişiminin sonuca olan etkisinin değerlendirildiği çalışmalardır. İstatistik deney tasarımıyla yola çıkılarak yapılan çalışmaların sayısında, son yıllarda artış olmasına rağmen bu sayının halen yetersiz olduğu değerlendirilmektedir. Literatürde yapılan çalışmaların çoğunda; beton ve betonarmenin korozyon özelliklerinin değerlendirilmesinde gerçek korozyon davranışını yansıtmada yetersiz kalan, ancak hızlandırılmış korozyon yöntemi ve gerçek atmosfer koşullarında korozyona uğratılma ile birlikte uygulandığında değerlendirmenin yapılabileceği hızlı klorür geçirimsizliği yöntemi, betonun elektriksel direncinin ölçülmesi, yarı hücre potansiyel ölçüm yöntemi ve lineer polarizasyon yöntemi gibi birçok yöntem tek başına uygulanmıştır. Kapsamlı halde yapılan literatür taramasına göre gerçekleştirilen bu çalışmaların hiçbirinde istatistik yöntemlerle mineral katkıların birlikte kullanımının olduğu ve farklı mineral katkıların birlikte kullanımları sayesinde eksik yönlerinin tolere edilebileceğinin vurgulandığı çalışmaya rastlanılmamıştır. Diğer yandan birçok parametrenin göz önüne alınıp istatistik yöntemler kullanılarak hızlandırılmış korozyon deneyi ile donatılı betonun korozyon davranışının değerlendirildiği bir çalışmaya tez kapsamında yapılan literatür araştırmasında rastlanılmamıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

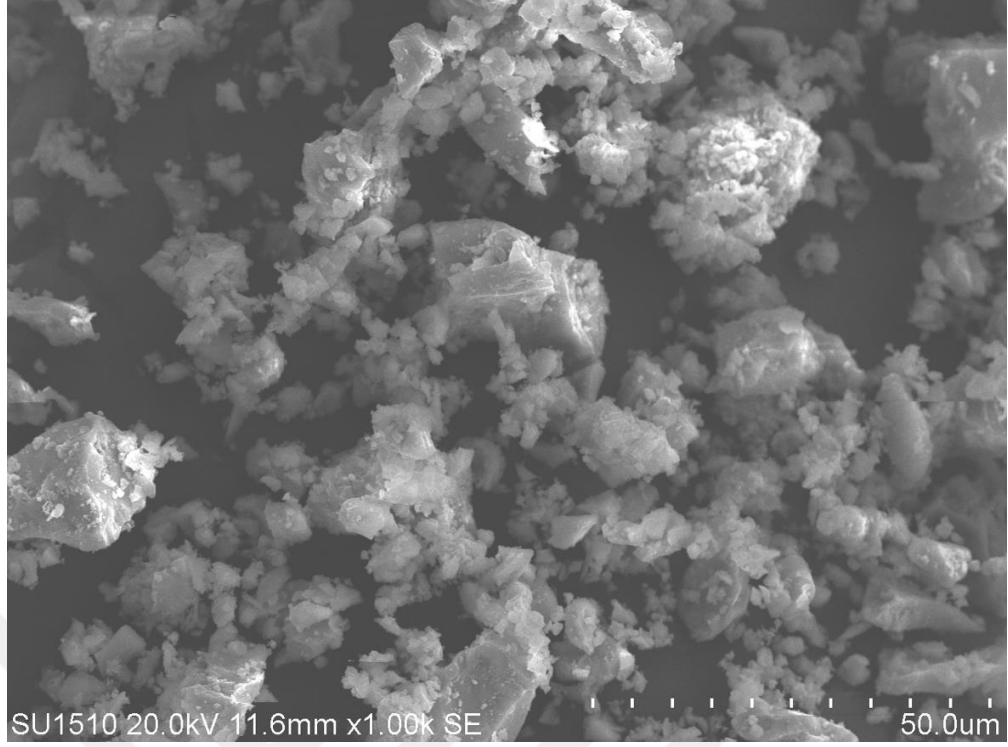
Tez çalışması kapsamında silis dumanı, granüle yüksek fırın cürufu (GYFC), uçucu kül (UK), süper akışkanlaştırıcı (SA) ve kalsiyum nitrit ($\text{Ca}(\text{NO})_2$) gibi malzemelerin betonun mekanik özelliklerine ve korozyon davranışına etkisi araştırılmıştır. Deneylerin yürütülmesi aşamasında kullanılan bu malzemelerin teknik özellikleri bu bölümde verilmiştir. Şekil 3.1’de deneylerde kullanılan kimyasal katkıları ve bağlayıcı malzemelere ait görsel sunulmuştur.



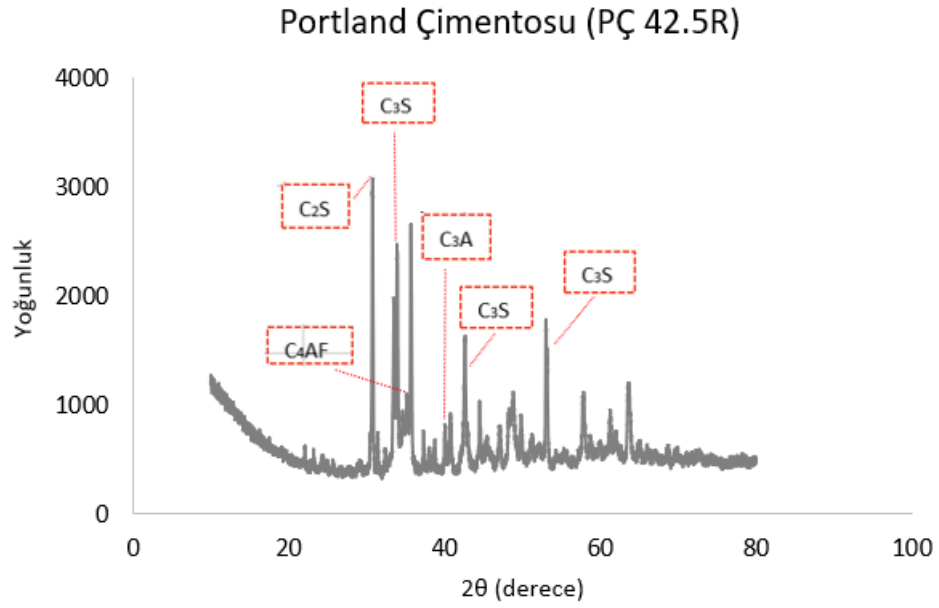
Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan kimyasal katkıları ve bağlayıcı malzemeler

3.1.1. Çimento

Tez kapsamında yapılan deneylerde Konya Çimento Fabrikası’ndan temin edilmiş (TS EN 197/1, 2002) standardına uygun CEM I 42.5R Portland çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Puzolanlarla çalışıldığından dolayı hızlı dayanım kazanan (R grubu) Portland çimentosu seçilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan çimentonun taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü ve X-Işını difraksiyon spektroskopisi (XRD) analizine ait görseller sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’te, kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan Portland çimentosunun SEM görüntüsü



Şekil 3.3. Deneylerde kullanılan portland çimentosunun XRD analizi

Portland çimentosunun mineralojik özelliklerini değerlendirmek için yapılan XRD analizinde ana bileşenlerin C_2S , C_3S , C_3A ve C_4AF olduğu tespit edilmiştir. Tekrarlı fazların analizinde belirgin pik değerlerin olmasından dolayı PÇ’de kristal fazların yoğun olarak bulunduğu görülmüştür (Şahin ve Koçak, 2022).

Tablo 3.1. Deneylerde kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal içerik, %	CEM I 42.5 R
SiO ₂	19.31
Al ₂ O ₃	5.17
Fe ₂ O ₃	2.51
CaO	62.93
MgO	2.08
Na ₂ O	0.26
K ₂ O	0.58
SO ₃	3.36
S	-
Cl ⁻	0.01
Kızdırma kaybı	1.98
Serbest kireç	1.9
Fiziksel özellik	
Özgül yüzey cm ² /gr	3415
Özgül ağırlık gr/cm ³	3.15

3.1.2. Karışım suyu

Tez kapsamında kullanılan karışım suyu Konya ili şebeke suyudur. Beton üretimlerinde kullanılan şebeke suyunun kimyasal analizi Tablo 3.2’de verilmiştir. Buna göre analiz parametre değerlerinin (TS EN 1008, 2003) standardı karma suyu sınır değerlerine uyduğu görülmüştür.

Tablo 3.2. Karışımlarda kullanılan Konya şebeke suyu kimyasal analizi (Tofan, 2008)

Parametre	Parametre değeri
pH	7.37 mg/l
(SO ₄) ⁻	44.74 mg/l
Cl ⁻	22.27 mg/l
Ca ⁺	71.0 mg/l
Mg ⁺	21.82 mg/l

3.1.3. Agregası

Deneylerde kullanılan agregası Konya Yapıtaş firmasının taş ocağından temin edilmiştir. Şekil 3.4’te agregası deneylerinin uygulanışı gösterilmiştir. Karışımlarda kullanılan agregalar üzerinde yapılan deneyler (TS 706 EN 12620+A1, 2009) ve (TS 3526, 1980) standartlarına uygun olarak yapılmıştır.

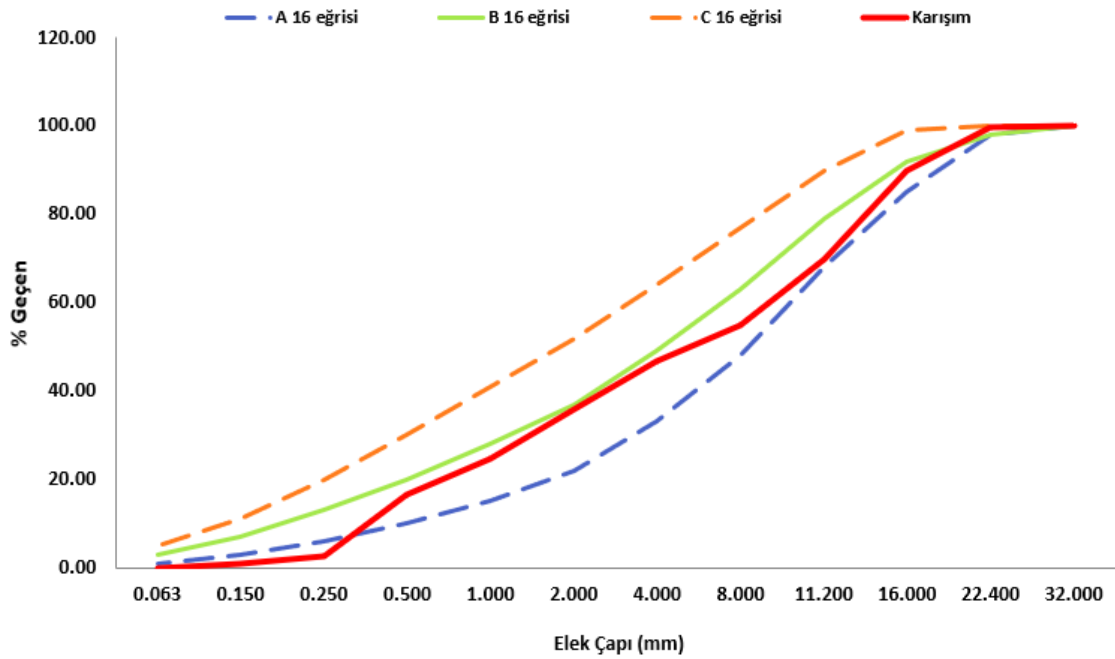
Karışımlarda kullanılan iri agregasının en büyük tane çapı 22.4 mm’dir. Buna göre karışım granülometrisi elde edilirken ince agregası %50, kırmataş I %20 ve kırmataş II %30 oranında kullanılmıştır. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri ve granülometri eğrileri sırasıyla Tablo 3.3 ve Şekil 3.5’te verilmiştir. Karışımın granülometri eğrisi A16 ve B16 eğrileri arasında olduğundan beton karışımında kullanılması uygundur.



Şekil 3.4. Agreganın su emme/birim ağırlık tayini ve granülometri deneylerinin yapılması

Tablo 3.3. Karışımlarda kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

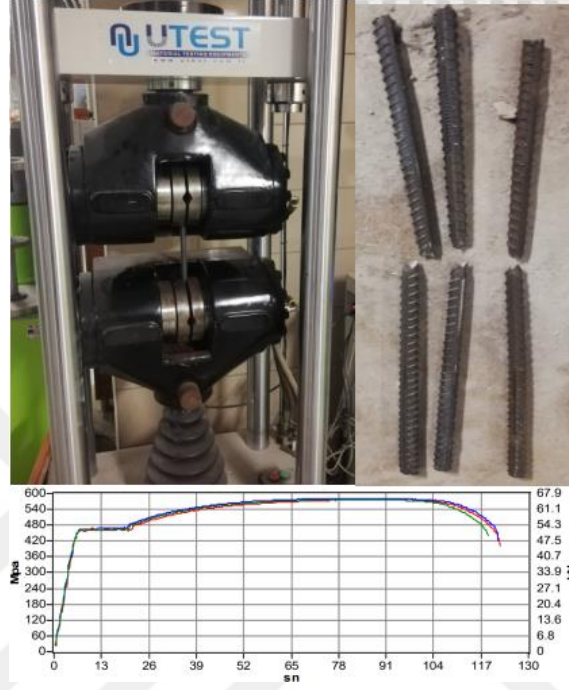
Fiziksel özellik	0-5 mm Agregası (İnce)	7-15 mm Agregası (Kırmataş I)	15-22.4 mm Agregası (Kırmataş II)
DKY özgül ağırlık (δ_{DKY}) (gr/cm ³)	2.58	2.69	2.70
Su emme oranı (%)	4.0	0.53	0.48



Şekil 3.5. Karışımın granülometri eğrisi

3.1.4. Donatı

Korozyon ve pullout deneylerinde kullanılan B420C sınıflı, 12 mm çaplı nervürlü donatıların (TS 708, 2016)'ya ve (TBDY, 2018)'e uygun çelik çekme deney görselleri Şekil 3.6'da, deney sonuçları ise Tablo 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.6. Donatı çekme deneyinin uygulanması

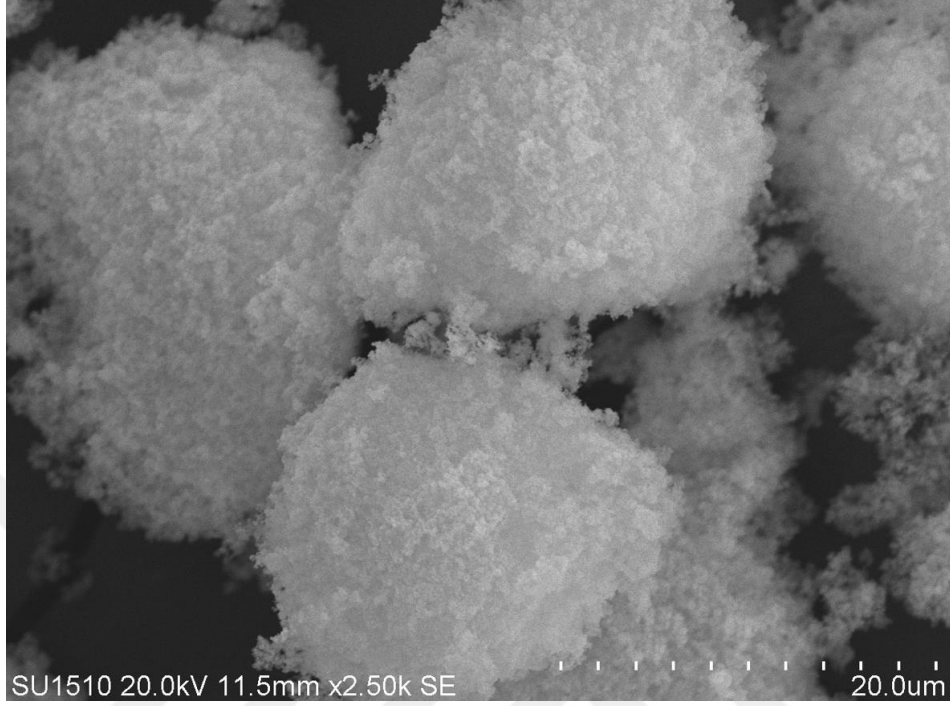
Tablo 3.4. Korozyon ve pullout deneyinde kullanılacak donatının çekme deney sonuçları

Anma çapı (mm)	Kütle (kg/m)	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Çekme/Akma
12	0.882	458	576	1.26
12	0.887	463	582	1.26
12	0.889	464	578	1.25

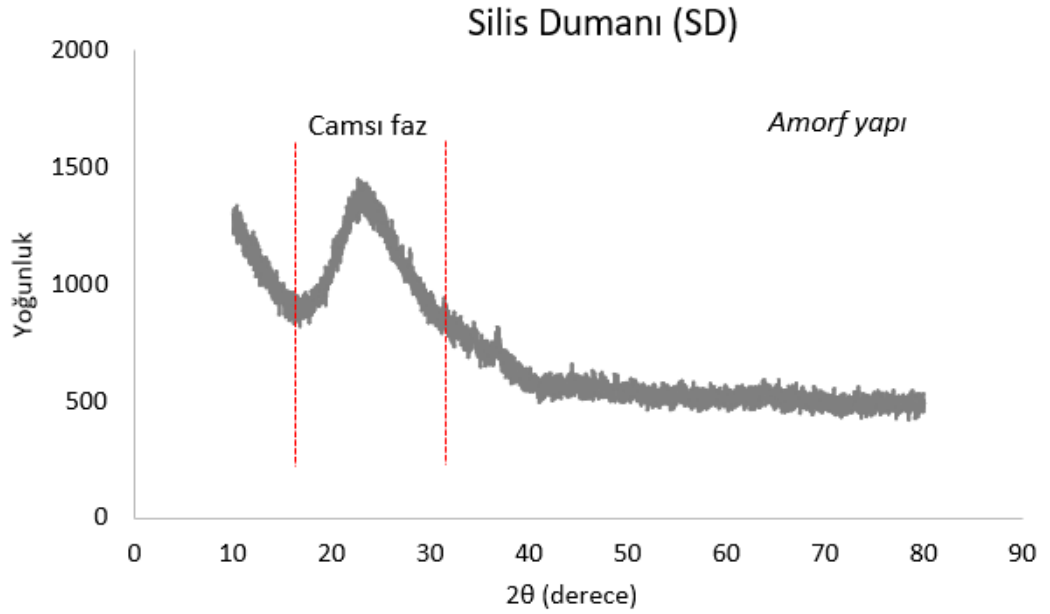
3.1.5. Silis dumanı (SD)

Silis dumanı, silikon metalinin veya silikon içeren metal alaşımlarının üretimi sırasında ortaya çıkan gazın hızla soğutulularak yoğunlaştırılmasıyla oluşan malzemedir. Buna göre silis dumanının içerisindeki silisyum dioksit içeriği %85 ile %98 arasında değişmektedir. Silis dumanı, amorf bir yapıya sahip çok ince partiküllerden oluşan bir puzolandır (Erdoğan, 2003). Silis dumanının çimento yerine %5-6 ikame oranlarında kullanılması işlenebilirlik açısından herhangi bir tedbir gerektirmezken bu oranların üstünde çalışılması halinde çok ince tanecik yapısına sahip olduğundan dolayı ilave önlemler alınmalıdır (Uzbaş, 2019). Buna göre tez çalışması kapsamında kullanılan silis

dumanının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü ve X-Işını difraksiyon spektroskopisi (XRD) analizine ait görseller sırasıyla Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Deneylerde kullanılan silis dumanının SEM görüntüsü



Şekil 3.8. Deneylerde kullanılan silis dumanının XRD analizi

Silis dumanının XRD ile yapılan incelemesinde; inceleme açısının yaklaşık 20-30 derece aralığındaki bölgenin kuvars mineralleri açısından zengin bölge olduğu

belirlenmiştir. Diğer yandan silis dumanının XRD analizinde keskin piklerin oluşmamasından dolayı amorf yapıda olduğu söylenebilir (Paşa, 2018; Yeğinobalı, 2011). Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan silis dumanı Dost Kimya şirketinden temin edilmiştir. Kullanılan silis dumanının kimyasal ve fiziksel içeriği Tablo 3.5'te verilmiştir.

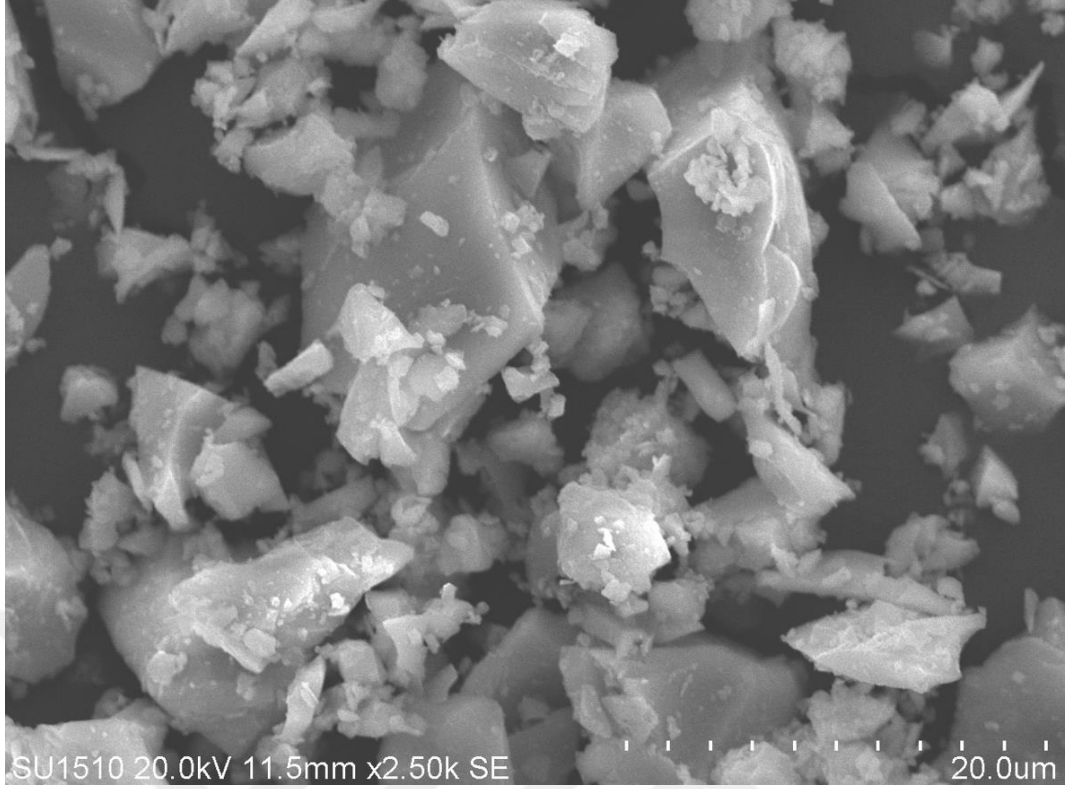
Tablo 3.5. Deneylerde kullanılan silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal içerik, %	Silis dumanı (SD)
SiO ₂	96.1
Al ₂ O ₃	0.29
Fe ₂ O ₃	0.58
CaO	0.27
MgO	0.25
Na ₂ O	0.02
K ₂ O	0.48
SO ₃	-
S	0.2
Cl ⁻	-
Kızdırma Kaybı	1.81
Serbest Kireç	-
Fiziksel özellik	
Özgül yüzey (cm ² /gr)	233600
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2.20

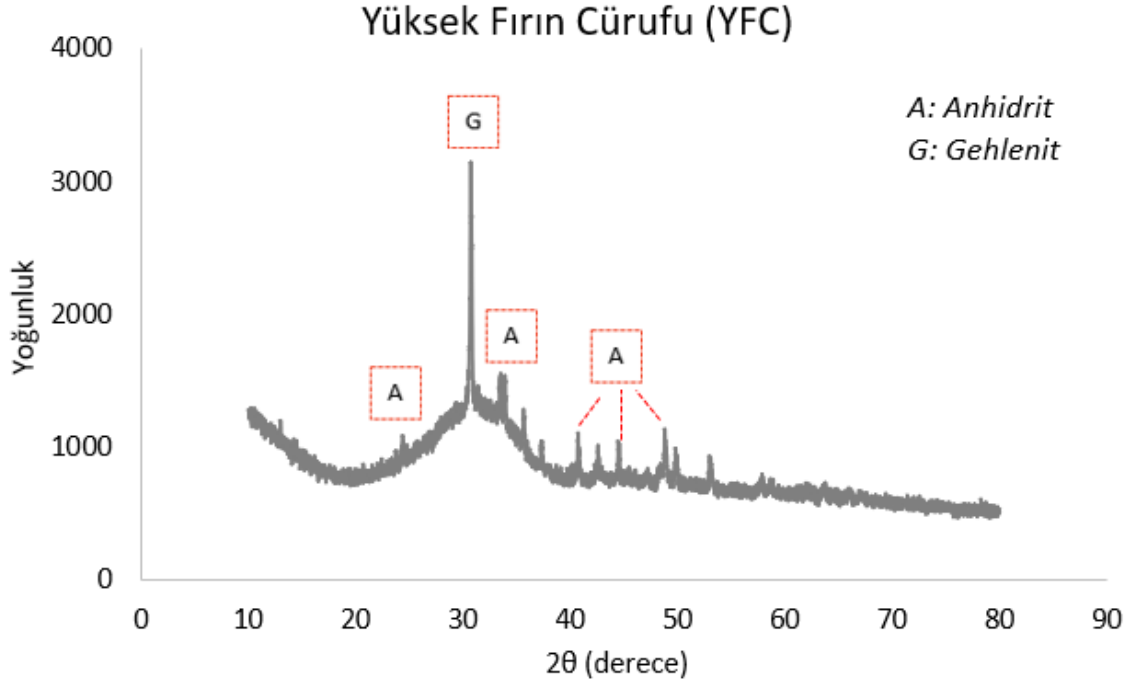
3.1.6. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GYFC)

Granüle yüksek fırın cürufu, demir-çelik fabrikalarında pik demir üretimi sırasında ortaya çıkan ve endüstriyel atık olarak kabul edilen bir mineral katkı malzemesidir. Cürufun beton karışımlarında bağlayıcı olarak kullanılabilmesi için soğutulması ve ince öğütülmesi gerekmektedir. Cüruf, uygulanan soğutma tekniğine bağlı olarak değişik yapısal özellikler göstermekte, genel olarak hızlı soğutma işlemine tabi tutulmaktadır. Eriyik halde bulunan cürufun hızlı soğutulması, cürufa hem granüle hem de amorf (camsı) yapı özelliği kazandırmaktadır. Yüksek fırın cürufu silis ve alümin içerdiği ayrıca amorf yapıya sahip olduğu için, ince öğütüldüğünde puzolanik özellik göstermektedir (Tokyay, 2014). Cüruf, içerdiği CaO' dan dolayı çok az da olsa kendi başına bağlayıcılık özelliğine sahiptir.

Buna göre tez çalışması kapsamında kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufunun SEM görüntüsü ve XRD analizine ait görseller sırasıyla Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da verilmiştir. Yüksek fırın cürufunun mineralojik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan XRD analizinde 25-35 derece aralığında camsı fazların yoğun olarak bulunduğu görülmüştür.



Şekil 3.9. Deneylerde kullanılan yüksek fırın cürufunun SEM görüntüsü



Şekil 3.10. Deneylerde kullanılan yüksek fırın cürufunun XRD analizi

Camsı faz, yüksek fırın cürufunun hidratasyon özelliklerini belirleyen en önemli parametredir. Her zaman doğru olmamakla birlikte camsı faz bölgesinin büyüklüğü ile

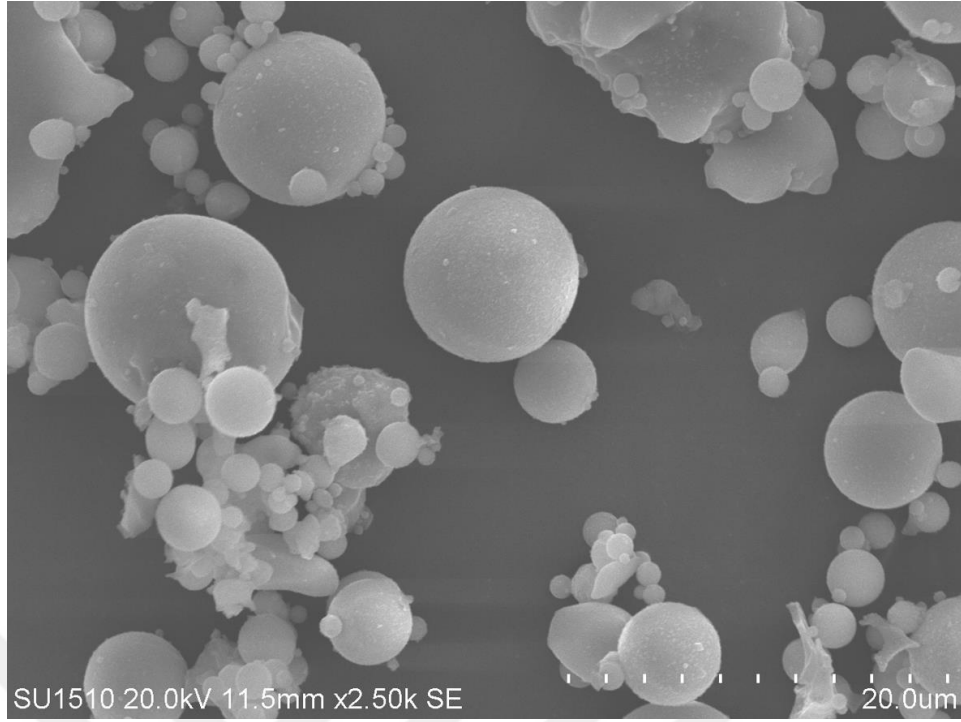
dayanım arasında doğrusal bir ilişkinin olabileceği belirtilmiştir (Şahin ve Koçak, 2022). GYFC'nin XRD analizinde belirlenen anhidrit ve gehlenit minerallerinin, daha çok CaO içeriğinin mineralojik yapı üzerindeki etkisi sonucunda oluştuğu söylenilebilir (Aydın ve Pehlivanlı, 2016). Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan yüksek fırın cürufu Konya Korkmaz Beton şirketinden temin edilmiştir. Kullanılan yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6. Deneylerde kullanılan yüksek fırın cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri

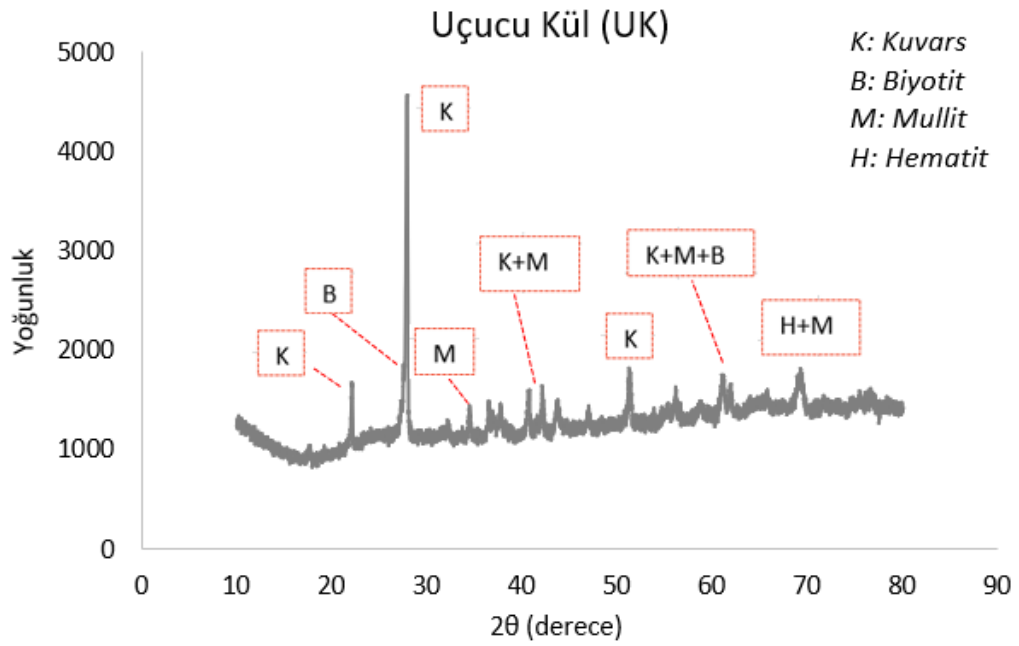
Kimyasal içerik, %	Yüksek fırın cürufu (YFC)
SiO ₂	37.86
Al ₂ O ₃	12.04
Fe ₂ O ₃	2.44
CaO	30.19
MgO	8.72
Na ₂ O	0.03
K ₂ O	0.82
SO ₃	0.75
S	0.39
Cl ⁻	0.0044
Kızdırma kaybı	1.05
Serbest kireç	
Fiziksel özellik	
Özgül yüzey (cm ² /gr)	4520
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2.89

3.1.7. Uçucu kül (UK)

Uçucu kül (UK), termik enerji santrallerinde kullanılan pulverize taşkömürü ve linyitin yanması sırasında ortaya çıkan çok ince taneli atık malzemedir. Uçucu küller, santrallerin toz toplama filtreleri aracılığıyla toplanıp depolanmasıyla elde edilmektedir. En yaygın kullanılan puzolanik malzemedir. İçeriğinde yüksek oranda silis barındırmaktadır. Uçucu küller F ve C sınıfı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (ASTM C618-22, 2023; TS EN 197/1, 2002). F sınıfı uçucu küllerin içeriğindeki CaO; %10'dan daha düşük miktarda olduğundan düşük kireçli uçucu kül olarak bilinmektedir. C sınıfı uçucu küller ise %10'dan daha fazla CaO barındırdığından yüksek kireçli uçucu kül olarak adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller sadece puzolanik özellik gösterirken C sınıfı uçucu küller hem puzolanik hemde hidrolik özellik göstermektedir (Bilici vd., 2022). Buna göre tez kapsamında Çatalağzı Termik Santrali uçucu külü kullanılmıştır. Kullanılan uçucu kül düşük miktarda CaO içerdiğinden dolayı F sınıfı uçucu kül grubuna girmektedir.



Şekil 3.11. Deneylerde kullanılan uçucu külün SEM görüntüsü



Şekil 3.12. Deneylerde uçucu külün XRD analizi

Uçucu küle ait SEM görüntüsü ve XRD analizi görselleri sırasıyla Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de verilmiştir. Uçucu külün mineralojik yapısını belirlemek için yapılan XRD analizinde camsı faz, 20-30 derece arasında (tümsek bölgesi) maksimum değerini almıştır. Bu aralıkta kuvars pikinin maksimumda olması amorf yapılu camsı fazın silis

temelli bir karakter gösterdiğinin işaretidir (Dorum vd., 2013). Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.7. Deneylerde kullanılan uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal içerik, %	Uçucu kül (UK)
SiO ₂	58.58
Al ₂ O ₃	23.4
Fe ₂ O ₃	6.97
CaO	1.55
MgO	2.77
Na ₂ O	0.46
K ₂ O	4.12
SO ₃	0.45
S	
Cl ⁻	0.032
Kızdırma kaybı	0.2
Serbest kireç	0.1
Fiziksel özellik	
Özgül yüzey (cm ² /gr)	2713
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	1.84

3.1.8. Kalsiyum nitrit ve sodyum klorür tuzu

Deneysel çalışmalarda LYKSOR Kimya şirketinin ticari ürünü olan kalsiyum nitrit (DCI) esaslı korozyon inhibitörü kullanılmıştır. DCI su bazlı ve likit özellikte, anodik bir korozyon önleyici olarak kullanılmaktadır. LYKSOR Kimya şirketinin beyan ettiği ürün analiz içeriği Tablo 3.8’de verilmiştir. Hızlandırılmış korozyon deneylerinde numunelerin korozyon performanslarının belirlenmesinde elektrolit ortamı sağlama için sanayi tipi sodyum klorür tuzu (NaCl) kullanılmıştır.

Tablo 3.8. Kalsiyum nitrit (DCI) kimyasal katkı malzemesinin özellikleri (LYKSOR Kimya beyanları)

Özellik	Test Yöntemi	Sonuçlar	İlgili Standart
Renk	Görsel	Sarımsı	TS EN 934-1
Bağıl yoğunluk (20 °C’de kg/l)	ISO 758	1.513	TS EN 934-1
Katı madde (%)	EN 480-8	65.18	TS EN 934-1
pH	ISO 4316	6.53	TS EN 934-1
Suda çözünür klorür (%)	EN 480-10	Max. 0.10	TS EN 934-1

3.1.9. Süper akışkanlaştırıcı

Deneysel çalışmalarda SİKA firmasının ürünü olan melamin sülfonat esaslı Sikament FFN ticari ismiyle bilinen süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı malzemesi kullanılmıştır. Kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkıya ait özellikler Tablo 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.9. Süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı malzemesinin özellikleri (SİKA beyanları)

Özellik	Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi
Görünüm, renk	Homojen, kahverengi sıvı
Kimyasal yapı	Melamin sülfonat polimer esaslı sıvı
Yoğunluk (20 °C kg/l)	1.15-1.19
pH değeri	7-11
Klorür iyon içeriği	Klorür içermez
Alkali miktarı (%Na ₂ O eşdeğeri)	<7

3.2. Yöntem

Tez çalışması kapsamında, betonun mekanik ve korozyon davranışı özelliklerine çeşitli parametrelerin etkisi laboratuvar koşullarında araştırılmıştır. Bağlayıcı malzeme olarak çimento, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanılmıştır. Puzolanların kullanıldığı çalışmada; süper akışkanlaştırıcı katkının betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisi de araştırılmıştır. Silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve süper akışkanlaştırıcıdan oluşan 4 farklı parametre ile bu parametrelerin 3 farklı seviyede etkisinin belirlenmesi ve parametre optimizasyonunun yapılması için Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Taguchi yöntemi ile belirlenen optimum karışım içeriğinde numuneler üretilerek her bir hedef performans kriteri için doğrulama deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları kullanılarak yüzey tepki metodu ile çoklu regresyon analizleri yapıp çeşitli kriterler için regresyon eşitliği elde edilmiştir. Birçok performans deneyinin yapıldığı tez çalışmasında hem dayanım hem de dayanıklılık kriterleri için çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılarak optimum seri belirlenmiştir. Diğer yandan tez çalışmasında kalsiyum nitrit korozyon inhibitörünün betonun, dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca tez kapsamında üretilen bazı sertleşmiş beton içeriklerinden numuneler alınarak SEM-EDX analizleri ile mikroyapı değerlendirmesi yapılmıştır.

3.2.1. İstatistik yöntemler ve deney tasarımı (DoE)

3.2.1.1. Taguchi metodu

Japon bilim insanı Genichi Taguchi tarafından 1950'li yılların başlarında geliştirilen Taguchi yöntemi, geleneksel deney tasarımına bir alternatif olarak ortaya çıkan ve araştırma maliyetini azaltıp zaman ve enerjiden tasarruf sağlayarak kaliteyi artırmayı hedefleyen bir yöntemdir (Taguchi vd., 1989; Taguchi ve Phadke, 1986). Geleneksel deney tasarımı tam faktöriyel bir yöntem olarak bilinmektedir. Bu nedenle, “s” farklı parametre seviyesinde “p” sayıda parametrenin hedef değer üzerindeki etkisinin araştırılacağı bir deneysel çalışmada, her seferinde bir parametre için değişiklik yapılarak

toplamda s^p sayıda kombinasyon için deneylerin yapılması gerekmektedir. Tam faktöriyel tasarım; çok fazla zaman alan, iş gücü ve maliyeti de beraberinde getiren bir prosestir. Taguchi yöntemi, Latin kareleri serisine dayanan bir ortogonal dizi kullanarak deney sayısını minimize etmeye odaklanmaktadır. Bu ortogonal diziler, faktörler arasındaki etkileşimleri değerlendirmek için optimize edilmiş bir deney düzenini temsil eder. Dolayısıyla, kesirli faktöriyel denemeleri kullanan Taguchi yöntemi, bir deneysel planlamada daha az deneyle maksimum bilgiyi elde etmeyi amaçlar (Chong vd., 2021). Örneğin, dört seviyeli beş parametrenin tasarıma etkisini belirlemek için tam faktöriyel tasarım kullanıldığında, analiz sayısı $4^5 = 1024$ olmaktadır. Ancak, Taguchi yönteminde parametre ve seviyelerine uygun L16 ortogonal dizi kullanılıp sadece 16 farklı tasarım yapılarak parametre ve seviyelerinin hedef kritere olan etkisi belirlenebilmektedir. Bu, 1024 tasarım kombinasyonunu temsil eden parametrelerin etkisinin ve optimum parametre seviyelerinin istatistiksel olarak elde edilebildiği anlamına gelmektedir. Taguchi Metodu, daha az deneyle maksimum bilgi elde etmeyi hedefleyen bir yaklaşım sunmaktadır. Belirlenen probleme uygun ortogonal dizi seçiminde, öncelikle faktörlerin toplam serbestlik derecesine bakılmaktadır. Toplam serbestlik derecesi dizilerden hangisine uygunluk sağlıyorsa o ortogonal dizi tercih edilmelidir. Örneğin 4 parametre (p) ve her parametrenin 3 seviyesinden (s) oluşan bir tasarımda; serbestlik derecesi $(s-1)*p$ yani 8 olmaktadır. Toplam serbestlik derecesi en fazla, seçilecek olan dizinin deneme sayısından bir eksik olabilmektedir (Caniyılmaz ve Kutay, 2013). Buna göre serbestlik derecesinin 8 olduğu durum için seçilebilecek uygun ortogonal dizi en az L9 ortogonal dizi olacaktır. 4 parametre ve 3 seviyeden oluşan bir tasarımda L9 ortogonal dizide her parametrenin 1 seviyesi 3 defa test edilerek bu şekilde yapılan tekrarlar ile istatistiksel deney tasarımının doğruluğu iyileştirilmektedir (Uray, 2020). Taguchi tarafından önerilen deney tasarımında parametre sayısı ve parametre seviyesine göre dikkate alınan ortogonal dizi için seçimin nasıl yapılacağı Tablo 3.10' da verilmiştir. Burada, ds , toplam deney sayısını, p , kullanılan parametre sayısını, s , her bir parametrenin seviyesini ve L , ortogonal diziyi göstermektedir.

Tablo 3.10. Parametre sayısı ve seviyesine göre ortogonal dizi seçim tablosu

Ld	L4	L4	L8	L8	L9	L9	L9	L18	L16	L16	L16	L16	L25	L25	L25
ds	4	4	8	8	9	9	9	18	16	16	16	16	25	25	25
p	2	2	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4
s	2	3	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5

Metodun uygulanmasında performans kriteri olarak Sinyal/Gürültü (S/N) oranları kullanılmaktadır. Burada sinyal faktörü olarak tanımlanan S, sistemin kalite değerini ifade ederken, N değeri ise sistemin sonucunu olumsuz etkileyen ve deney tasarımına katılmayan faktörleri ifade eden gürültüye karşılık gelmektedir (Serencam ve Uçurum, 2019). Deneylerde istenilen hedef durum için performans karakteristiklerinin bir ifadesi olan S/N oranı değerleri; en küçük-en iyi, hedef değer-en iyi veya en büyük-en iyi durumlarına göre belirlenmekte olup sırasıyla Denklem 3.1, Denklem 3.2 ve Denklem 3.3 ile verilmiştir (Box, 1988; Warda vd., 2020). Buna göre tez çalışması kapsamında basınç, eğilme, çekme, ultra ses geçiş hızı, pullout (aderans) deneylerinde en büyük-en iyi performans karakteristiği uygulanırken su emme yüzdesi, hızlandırılmış korozyon deneyi çekilen akım ve ağırlık kaybı yüzdesi deneylerinde performans karakteristiği olarak en küçük-en iyi uygulanmıştır.

$$S/N = -10\log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{ds} Y_i^2\right) \quad (3.1)$$

$$S/N = 10\log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{ds} (Y_i - Y_o)^2\right) \quad (3.2)$$

$$S/N = -10\log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{ds} \frac{1}{Y_i^2}\right) \quad (3.3)$$

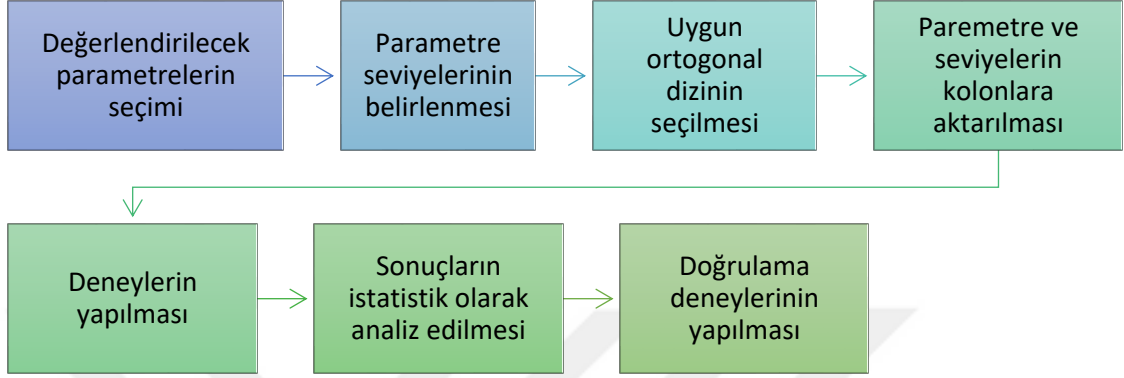
Denklemlerde, S/N oranı istatistiksel performansı, n deney tekrarı sayısını, Y_i , i. deneyin performans değerini ve Y_o istenilen hedef değeri göstermektedir. Seçilen hedef performans kriteri için denklemler kullanılarak S/N oranları belirlenmektedir. Bu değerler kullanılarak her bir parametre ve seviye için ortalama S/N değeri (η_{ij}) Denklem 3.4 ile hesaplanmaktadır (Uray, 2014; Uray vd., 2022).

$$\eta_{ij} = \frac{(S/N)_{ij}}{s} \quad (i = 1, \dots, p; j = 1, \dots, s) \quad (3.4)$$

Taguchi metodunda, deney tasarımında dikkate alınan her bir parametre için maksimum veya minimum değere sahip ortalama S/N değeri (η_{pi}) kullanılarak optimum hedef değer tahmin edilebilmektedir (Eşme, 2009; Kivak, 2014; Savaşkan vd., 2010; Uray vd., 2022). Tüm S/N değerlerinin ortalaması (η) kullanılarak tahmin edilen hedef değer (η_{tahmin}) Denklem 3.5 ile belirlenmektedir.

$$\eta_{tahmin} = \eta + \sum_{i=1}^s (\eta_{pi} - \eta) \quad (3.5)$$

Şekil 3.13'te Taguchi yöntemi uygulama adımları verilmiştir.

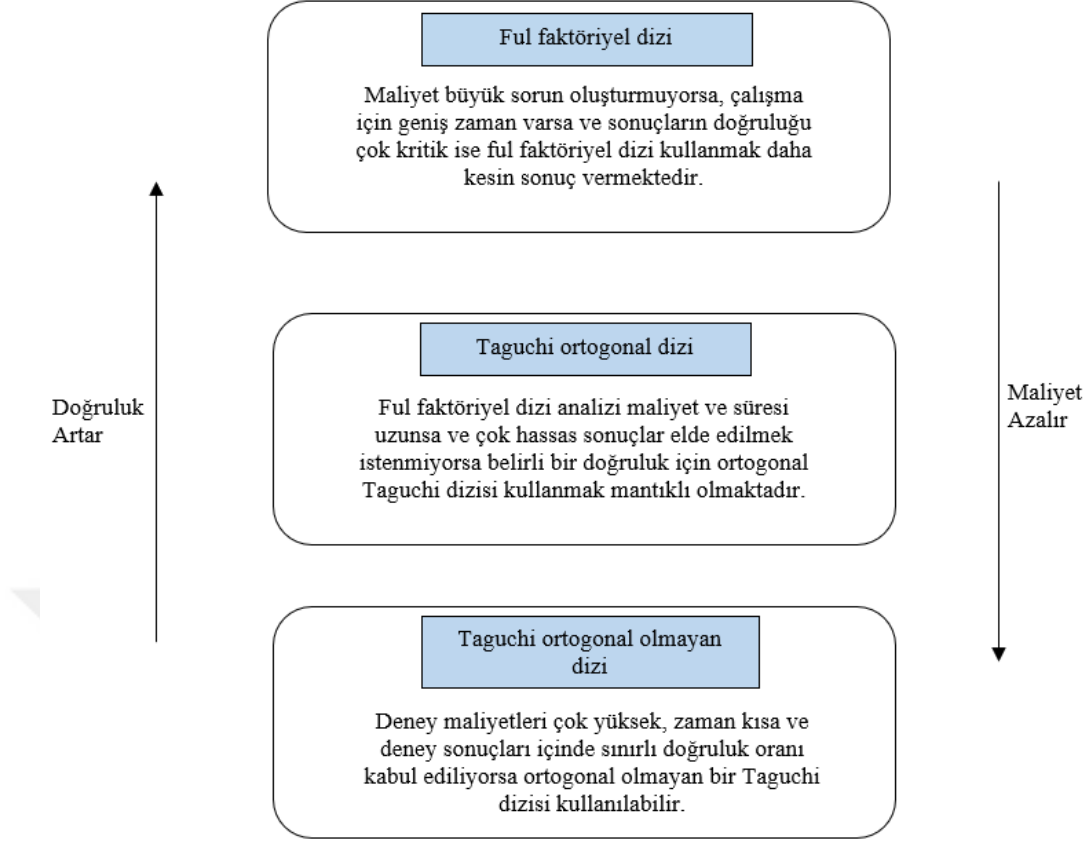


Şekil 3.13. Deney tasarımı (DoE) Taguchi yöntemi aşamaları

Buna göre yöntem; probleme etkisinin olacağı düşünülen parametrelerin belirlenmesinden sonra altı adımdan oluşmaktadır. Deneysel tasarımın (DoE) 4. adımı olan deneylerin uygulanması aşaması en önemli adımdır. Buna göre bu adımda, tüm deneyler için gürültüyü direkt olarak etkileyecek belirsizlikler mümkün olan en iyi şekilde sınırlandırılmalıdır. Örneğin; beton karışımlarının üretildiği ortam sıcaklığı tüm serilerde yakın olmalı, karışımların homojenliğinin sağlanması için yeterli ve standart bir prosedür uygulanmalı ve yerleştirme, bakım vb. aşamalarda tüm seriler için bir standart mutlaka yakalanmalıdır.

Deneysel test serileri; maliyet, zaman ve deney sonuçlarında gerekli doğruluğun sağlanmasında optimizasyon amacıyla hedeflenen koşullar için seçilmektedir. Şekil 3.14'te deneysel tasarım yönteminin nasıl seçilmesi gerektiğine dair bir hiyerarşi verilmiştir.

Şekil 3.14'te verilen hiyerarşiye göre; eğer deneysel çalışmada istenen sonuçlar, yüksek doğruluk hatta kesinlik gerektiriyor ise tam faktöriyel dizi kullanarak deneylerin yapılması daha doğru olacaktır. Ancak bu, birçok parametre ve seviye içeren çalışmalarda hem çok maliyetli hem de zaman gerektiren bir yöntemdir. Bunun yerine Taguchi ortogonal dizi kullanılarak hazırlanan deney tasarımı, hem tatmin edici bir doğruluk sağlayacak, hem de zaman ve maliyetten büyük oranda kazanç elde edilmesine yarayacaktır.



Şekil 3.14. Deneyisel tasarım yönteminin seçimine dair hiyerarşi

Buna göre tez çalışması kapsamında 4 parametre ve her parametrenin 3 seviyesinin bulunduğu toplam 81 kombinasyonu içeren tam faktöriyel durum, Taguchi yöntemi kullanılarak Tablo 3.10'da verilen parametre ve seviye sayısına uygun olarak 9 kombinasyona (L9) indirgenip parametrik etki değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan parametre ve seviyeleri literatüre uygun olarak belirlenmiştir (Guo vd., 2020; Kate vd., 2021; Mohamed ve Najm, 2017; Saraya, 2014; Teimortashlu vd., 2018; Uysal, 2012). Tez çalışması kapsamında karışımlarda kullanılan parametre ve seviyeleri Tablo 3.11'de, parametrelerin ve seviyelerinin kolonlara atandığı 1 m³ karışımda bulunan tüm malzeme miktarları Tablo 3.12'de verilmiştir. Üretimi yapılan tüm karışım serilerinde toplam bağlayıcı miktarı 300 kg/m³ olarak sabit tutulmuştur.

Deneyisel çalışmalarda, Tablo 3.12'de verilen M1-M9 arası kodlanan karışımlar L9 ortogonal diziye göre elde edilmiş karışımları göstermektedir. REF kodlu karışım, içerisinde hiçbir puzolanın olmadığı sadece 300 doz Portland çimentosundan oluşan referans karışımı, %2 DCI kodlu karışım ise referans karışımdan farklı olarak tek bir süper akışkanlaştırıcı oranı (%1.5) kullanılarak üretilmiş %2 kalsiyum nitrit içeren seriyi

ifade etmektedir. REF kodlu karışım içeriğinde; süper akışkanlaştırıcı katkı oranının hedef performans deneylerine etkisinin belirlenebilmesi amacıyla süper akışkanlaştırıcı seviyesi %1.25-1.50-1.75 olacak şekilde üretim gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre referans karışım açısından süper akışkanlaştırıcı etkisi değerlendirildikten sonra tek bir süper akışkanlaştırıcı dozu (1.50) ile %2 DCI kodlu seri üretilerek kalsiyum nitritin hedef performans kriterlerine olan etkisi referans ve L9 ortogonal dizi serileri ile kıyaslanmıştır.

Tablo 3.11. L9 ortogonal dizi için kullanılan parametre ve seviyeler

Parametreler	SD (% ikame)	YFC (% ikame)	UK (% ikame)	SA (% bağlayıcı)
Seviyeler	1	3	10	10
	2	6	15	15
	3	9	20	20

Not¹: Kontrol betonu için çimento dozajı 300 kg/m³ (CEM I 42.5R) olarak belirlenmiştir

Not²: Bağlayıcı dozajının (300 kg) %1.25-1.50-1.75'i oranında süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Tablo 3.12. Taguchi L9 deney tasarım tablosu (1 m³ karışım için)

	SERİ ADI	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	REF	%2 DCI
L9 Ortogonal Dizi	SD	1	1	1	2	2	2	3	3	3		
	YFC	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
	UK	1	2	3	2	3	1	3	1	2		
	SA	1	2	3	3	1	2	2	3	1		
% Kullanım oranı	SD	3	3	3	6	6	6	9	9	9	-	
	YFC	10	15	20	10	15	20	10	15	20	-	
	UK	10	15	20	15	20	10	20	10	15	-	
	SA	1.25	1.5	1.75	1.75	1.25	1.5	1.5	1.75	1.25	1.25- 1.75	1.5
Agrega (kg)	0-5	968.6	968.6	968.6	968.6	968.6	968.6	968.6	968.6	968.6	968.6	968.6
	5-15	388.6	388.6	388.6	388.6	388.6	388.6	388.6	388.6	388.6	388.6	388.6
	15-22.4	581.4	581.4	581.4	581.4	581.4	581.4	581.4	581.4	581.4	581.4	581.4
Karışım bileşenleri (kg)	SD	9	9	9	18	18	18	27	27	27	-	-
	YFC	30	45	60	30	45	60	30	45	60	-	-
	UK	30	45	60	45	60	30	60	30	45	-	-
	SA	3.77	4.51	5.26	5.26	3.77	4.51	4.51	5.26	3.77	3.77- 5.26	4.51
	DCI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.0
	Çimento	231	201	171	207	177	192	183	198	168	300	300
	Su	172.3	171.4	170.9	170.9	172.3	171.4	171.4	170.9	172.3	170.9- 172.3	165.4

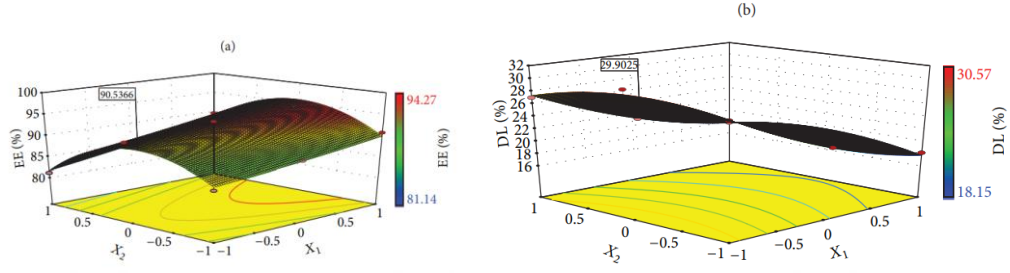
3.2.1.2. Yüzey tepki metodu (Response surface methodology)

Yüzey tepki metodu (YTM), deney tasarımı süreci ve ürün kalitesinin geliştirilmesinde kullanılan istatistik tabanlı bir yöntemdir (Başar vd., 2020). Bu metod, prosesin parametreleri ile kalite karakteristikleri arasındaki bağlantıyı araştırma, modelleme ve en uygun parametre seviyelerini belirleme konularında başarıyla kullanılmaktadır. Aynı zamanda deneysel tasarımın bir avantajı olarak az sayıda deneysel girişim yapılarak regresyon eşitliği elde etmeyi sağlamaktadır (Chelladurai vd., 2021). Yüzey tepki metodu (YTM), deney tasarımı kullanarak elde edilen az sayıdaki gözlemlenebilir değerle, tepki değişkeninin yeterli ve güvenilir bir şekilde ölçülmesini sağlayan matematiksel bir model oluşturmayı içermektedir. Bu yöntem, elde edilen verilere en iyi uyumu sağlamak amacıyla geliştirilen bir matematik model aracılığıyla optimum parametre seviyelerinde tahminde bulunulmasını sağlamaktadır (Chehreghani vd., 2017). Yüzey tepki metodu 'nda, genellikle doğrusal, kuadratik ve kübik vb. matematiksel modeller kullanılmaktadır. Bu modeller, çeşitli faktörlerin ve bunların etkileşimlerinin yanıt değişkeni üzerindeki etkilerini analiz etmek ve sürecin optimize edilmesi için kullanılmaktadır. Doğrusal model, bağımsız değişkenlerin etkilerini doğrusal bir şekilde ifade etmektedir. Kuadratik model, doğrusal olmayan ilişkileri ve etkileşimleri ele alarak daha karmaşık bir yapı sunmaktadır. Kübik model ise daha yüksek düzeyde etkileşimleri ve karmaşıklıkları modellemek için kullanılır. En genel haliyle kuadratik modelin denklemi Denklem 3.6'daki gibi ifade edilebilir.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.6)$$

Bu denklemde $x_1, x_2, \dots, x_n$ bağımsız değişkenleri, y bağımlı değişkeni, $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij} (i = 1, 2, \dots, n), \beta_{jj} (i = 1, 2, \dots, n ; j = 1, 2, \dots, n)$ bilinmeyen model parametrelerini ve ε rastgele hata terimini ifade etmektedir (Başar vd., 2020). YTM ile birçok deney tasarımı yapılabilmektedir. Fakat, YTM için özel olarak geliştirilmiş ve deney sayısını önemli ölçüde azaltan Box-Behnken ve Merkezi Kompozit deney tasarımları gibi tasarımlar yaygın olarak kullanılmaktadır (Yoon, 2007). Tez çalışması kapsamında parametre ve seviyelerine uygun olarak deney veri sayısına göre Box-Behnken ve Merkezi Kompozit deney tasarımları çoklu regresyon eşitliği elde etmek amacıyla kullanılmıştır. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki, 2 boyutlu veya 3 boyutlu yüzey tepki grafiği oluşturularak daha da açıklığa kavuşturulabilmektedir. Buna

göre ilaç bağlama verimliliğinin (EE) ve ilaç yükleme yüzdesi (DL)'nin bağımlı değişken olduğu çalışmada X_1 ve X_2 bağımsız değişkenlerine göre bağımlı değişkende meydana gelen değişimler Şekil 3.15'te yüzey tepki grafiklerinde verilmiştir. EE yüzdesini en üst seviyeye çıkaran bağımsız değişken değerleri sırasıyla [$x_1:1$; $x_2:0$] olarak belirlenmiştir (Sahu vd., 2014).



Şekil 3.15. Farklı bağımlı değişkenlere bağımsız değişkenlerin etkisini gösteren 3 boyutlu tepki yüzey grafikleri (Sahu vd., 2014)

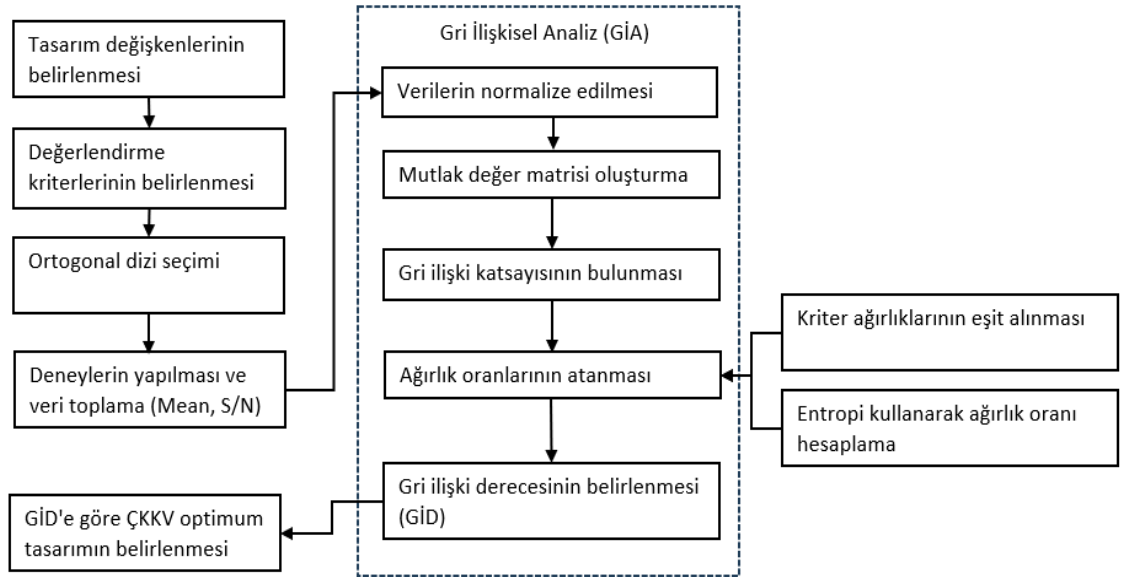
Yüzey tepki metodu; Taguchi metodundan farklı olarak, göz önünde bulundurulan parametre seviyelerinin ara değerleri için de tahmin sonucu verebilmektedir. Taguchi yönteminde elde edilen regresyon eşitliği her parametrenin her seviyesi için bir regresyon katsayısı vermekte, buna bağlı olarak çok karmaşık bir regresyon eşitliği elde edilmektedir. Taguchi yöntemi, parametre seviyelerinin ara değerleri için herhangi bir tahmin sonucu verememektedir. Yüzey tepki metodu kullanılarak elde edilen regresyon denklemi daha sade bir denklem olmaktadır.

3.2.1.3. Gri ilişkisel analiz yöntemi (GİA)

Gri İlişkisel Analiz (GİA), belirsizlik içeren durumları değerlendirmek ve analiz etmek amacıyla gri sistem teorisine dayalı bir metodoloji olarak bilinir. Bu analiz yöntemi, özellikle belirsiz bilgi ve eksik veri durumlarında kullanılan etkili bir araçtır.

Gri sistem teorisi, siyah-beyaz (kesin) ve gri (belirsiz) bilgileri entegre ederek, belirsizliği azaltmaya ve analizi iyileştirmeye yönelik bir çerçeve sunmaktadır. Gri sayılar, bu teori içinde temel bir bileşeni oluşturur. Gri sayılar, kesin (belli olan) bir değer ile belirsizlik (kesikli değer) arasındaki ilişkiyi temsil eder. Gri sistemler teorisi ilk olarak Profesör Deng Ju-long tarafından 1982 yılında literatüre katılmıştır. GİD, farklı performans deneylerinde çoklu karar verme sürecinin tanımlanarak seçimin belirlenmesine imkân sağlamaktadır. Gri ilişkisel analizde ilk olarak, tüm performans kriterlerini karşılaştırılabilir bir seriye dönüştürerek karar vermenin başlangıcı yapılır.

GİA yönteminde çok kriterli performans ölçümü için performans optimizasyonu tek bir gri ilişkisel derece optimizasyonuna dönüştürülmektedir. Karar noktalarının optimal seviyesi, en yüksek gri ilişkisel derecesinde oluşmaktadır. GİA ile incelenen karar noktalarının optimal kombinasyonu tahmin edilebilmektedir (Yıldırım vd., 2021). Buna göre Taguchi tabanlı GİA adımları Şekil 3.16'da verilmiştir. Giriş verileri; GİA uygulanacak performans deney sonuçlarına göre seçilen parametreler göz önünde bulundurularak oluşturulmuş veri matrisidir. Tez kapsamında giriş verisi olarak Taguchi analizleri sonucu elde edilen S/N oranları kullanılmıştır. GİA yönteminde giriş verileri farklı birim ve değerlerde olacağından matriste bulunan değerler, birim ve ölçüm miktarlarından bağımsız hale getirilmelidir. Bu işleme normalizasyon işlemi denilmektedir. Normalizasyon işleminden sonra matristeki değerler 0-1 arasına indirgenir (Bektaş ve Tuna, 2013). Normalizasyon aşamasında hesaplar, “en büyük en iyi” ve “en küçük en iyi” kriterleri göz önünde bulundurularak sırasıyla Denklem 3.7 ve 3.8’e göre yapılmaktadır.



Şekil 3.16. Çok kriterli karar vermede (ÇKKV) Taguchi tabanlı GİA-Entropi metodunun çerçevesi

$$xi^* = \frac{xi(j) - \min_{xi(j)}}{\max_{xi(j)} - \min_{xi(j)}} \quad (3.7)$$

$$xi^* = \frac{\max_{xi(j)} - xi(j)}{\max_{xi(j)} - \min_{xi(j)}} \quad (3.8)$$

Burada; $\chi_i(j)$ ilgili serinin performans değerini, $\min_{\chi_i}$ ve $\max_{\chi_i}$ tüm seriler içinde hedef performans kriterinin en küçük ve en büyük değerini ifade etmektedir. Bu aşamada bulunan normalizasyon değerleri birim ve büyüklükten arındırılmış 0-1 arasında sonuç alan değerlerdir. Mutlak değer matrisi bulunan normalizasyon değerleri için her serinin maksimum normalizasyon değeri olan 1 değerine uzaklığı ifade etmektedir. Gri ilişki katsayısı Denklem 3.9'a göre hesaplanmaktadır.

$$Y0_{i(j)} = \frac{\Delta_{min} + \xi \Delta_{maks}}{\Delta_{oi(j)} + \xi \Delta_{maks}} \quad (3.9)$$

Burada; $Y0_{i(j)}$ serinin gri ilişki katsayısını, Δ_{min} ve Δ_{maks} , mutlak değer matrisinin en küçük ve en büyük değerini (0-1 arasında), $\Delta_{oi(j)}$ mutlak değer matrisinde j. serinin değerini, ξ değeri ise 0 ile 1 arasında olan, literatürde genellikle 0.5 olarak alınan katsayıyı ifade etmektedir (Karataş, 2022; Yang ve Chiang, 2013). Gri ilişkisel katsayıların hesaplanmasıyla oluşturulan matristen hareketle ilişkisel dereceler belirlenir. Analiz sonucunda her bir alternatif için gri ilişkisel katsayı ve gri ilişki dereceleri tanımlanır (Yıldırım vd., 2021). Elde edilen gri ilişki katsayıları ilgili kriterin ağırlığı ile çarpılıp, her bir alternatif için toplandığında gri ilişki derecesi elde edilir. Kriterler eşit önem düzeyine sahip ise Denklem 3.10 kullanılarak gri ilişki derecesi (GİD) hesaplanmaktadır.

$$\chi_{0i} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Y0_{i(j)} \quad , \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.10)$$

Burada; χ_{0i} gri ilişki derecesini m göz önünde bulundurulan kriter sayısını göstermektedir. Ancak, kriterlerin eşit önem düzeyine sahip olmadığı birçok durum söz konusu olmaktadır. Bu yüzden kriterlerin ağırlık düzeyleri hesaplanmalı ve bu değerlere göre gri ilişki derecesi (GİD) belirlenmelidir. Alternatifler içinde en yüksek gri ilişkisel dereceye sahip olan seri karar noktası olmakla birlikte, seçilmesi gereken alternatifi belirtmektedir (Kuo vd., 2008).

3.2.1.4. Entropi

Entropi yöntemi, karar verme süreçlerinde ve çok kriterli karar problemlerinde kullanılan bir yöntem olup, bilgi teorisine dayanmaktadır. Bu yöntemin temelinde, bir sistemdeki belirsizlik veya düzensizlik miktarını ölçen entropi kavramı bulunur. İlk olarak bilgi teorisi alanında Shannon tarafından tanıtılmıştır. Claude Shannon, 1948

yılında "A Mathematical Theory of Communication" adlı makalesinde, bir iletişim sistemindeki belirsizlik miktarını ölçmek için entropi kavramını tanımlamıştır. Entropi, bir sistemin düzensizlik veya belirsizlik derecesini ifade eden bir ölçüdür. Daha yüksek entropi, daha fazla belirsizlik anlamına gelmektedir (Karaatlı, 2016). Entropi, çok kriterli karar verme problemlerinde kriterlerin ağırlıklarını belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, her bir kriterin belirli bir kategorideki bilgi miktarını ölçerek, her bir kriterin önem derecesini belirlemeye çalışır (Koyuncu, 2013). Yöntemde kullanılan adımlar aşağıda verilmiştir.

Adım 1: Kriterler arasındaki farklılıkları ortadan kaldırmak için Denklem 3.11’de verilen normalizasyon işlemi yapılır.

$$P = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}}; \forall j \text{ } a_{ij}: j. \text{ kriterde } i. \text{ alternatifin değeri} ; p_{ij}: \text{Normalize değer ölçeği} \quad (3.11)$$

Adım 2: Denklem 3.12’de verilen E_j entropi değeri hesaplanır.

$$E_j = \left(\frac{-1}{\ln(m)} \right) \sum_{i=1}^m \{P_{ij} \ln P_{ij}\} ; \forall j \text{ } m: \text{Deney seri sayısı} \quad (3.12)$$

Adım 3: Farklılığın derecesi olarak Denklem 3.13’te verilen d_j belirsizliği hesaplanır.

$$d_j = 1 - E_j ; \forall j \quad (3.13)$$

Adım 4: Denklem 3.14’e göre j kriterinin önem derecesi olarak w_j ağırlıkları hesaplanır.

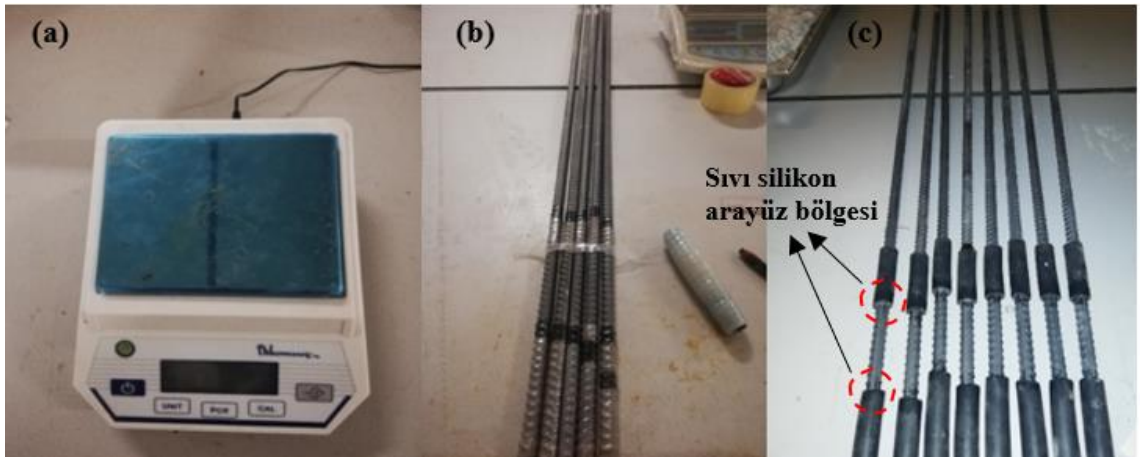
$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^n d_j} ; \forall j \quad (3.14)$$

Tez çalışması kapsamında Taguchi yöntemi, seçilen her bir parametre ve seviyesinin hedef performans kriteri için etkisinin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Diğer yandan YTM kullanılarak bazı performans kriterleri için çoklu regresyon denklemleri elde edilmiştir. Aynı zamanda YTM kullanılarak parametre ve seviyelerinin farklı performans kriterleri için yüzey tepki grafikleri elde edilmiştir. Tepki grafiklerinden elde edilen

optimum parametre seviyeleri, Taguchi yöntemi kullanılarak elde edilen S/N grafikleri ile optimum parametre seviyeleri açısından birlikte değerlendirilmiştir. Tez çalışması kapsamında birçok performans kriteri için parametre optimizasyonu yapılmıştır. Taguchi metodu ve YTM kullanılarak tek yanıtli optimizasyon yapılabilmekte, yanıt (kriter) sayısı birden fazla olduğunda çoklu kriter optimizasyonu yapılamamaktadır. Bu nedenle, çok kriterli optimizasyon problemlerini (ÇKKV) çözmek için Taguchi yaklaşımıyla birleştirilmiş Gri İlişkisel Analiz (GİA) uygulanmıştır. Tez çalışmasında; kriterlerin ağırlık oranları atanamadığından objektif kriter ağırlıklandırmaya olanak sağlayan entropi yöntemi kullanılmıştır. GİD belirlenirken hem eşit ağırlık hem de entropi ilkesi benimsenerek ağırlık değişimlerinin optimum seri seçimine etkisi irdelenmiştir.

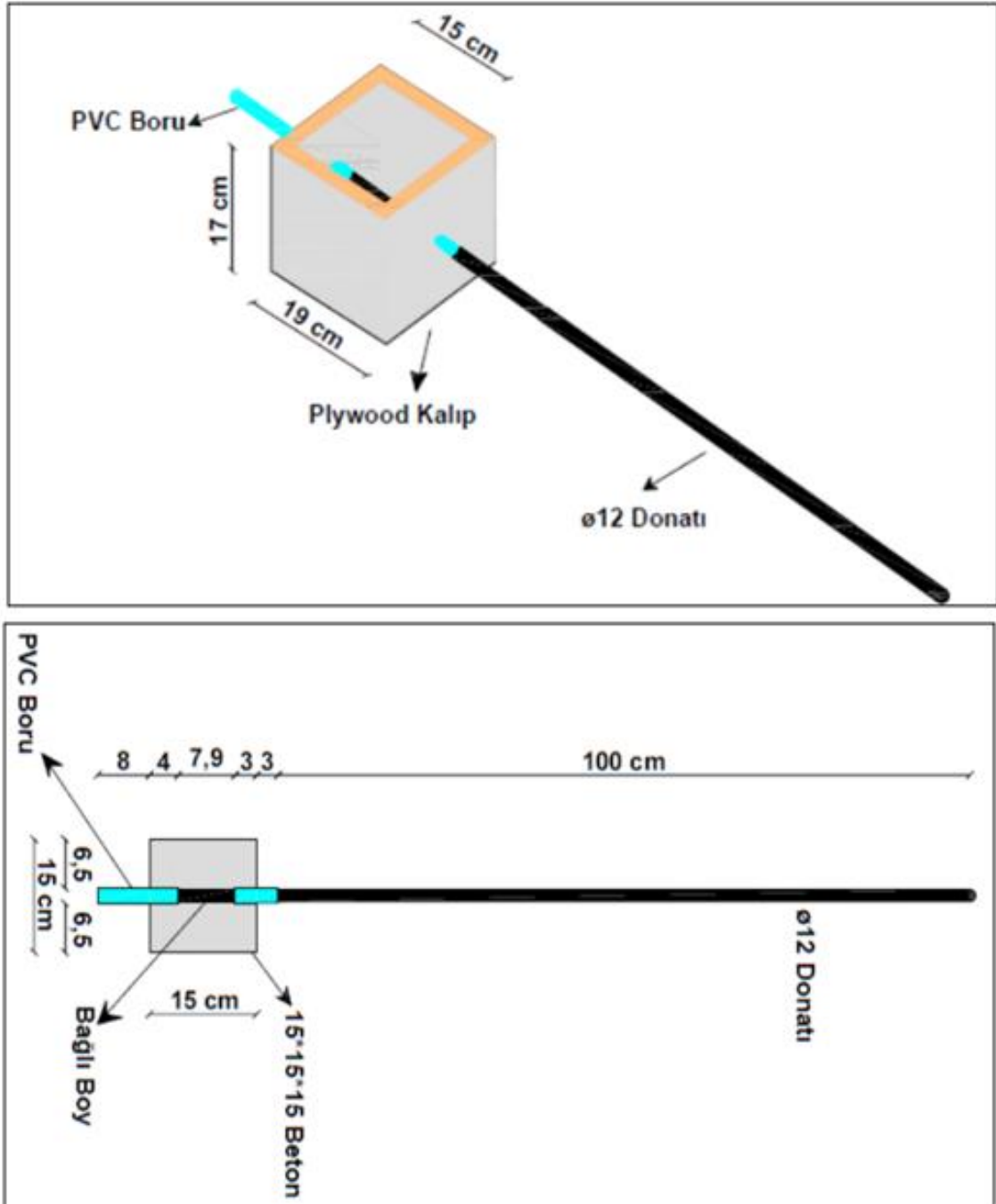
3.2.2. Donatı ve korozyon numunesi hazırlama metodolojisi

Korozyon numunelerinin üretiminde ilk adımı donatıların hazırlanması oluşturmaktadır. Buna göre; yaklaşık 120 cm boyunda kesilmiş, $\phi 12$ mm çaplı donatıların yüzeyleri toz ve kirden temizlendikten sonra hassas terazi kullanılarak ilk ağırlıkları kaydedilmiştir. Ağırlıkları kaydedilen donatıların korozyona uğramaması gereken, beton dışındaki kısımları ve serbest boy bölgeleri yalıtılmıştır. Bu bölgeler, ilk olarak esnek silikon parafilm bant ile sarılmış sonrasında sarılı bölgelerin üzerine PVC borular geçirilerek çift kat korozyon tedbiri alınmıştır. Ayrıca PVC boru donatı arayüzü sıkılabılır silikon ile doldurulmuştur. Buna göre tartımlarda kullanılan hassas terazi ve donatı hazırlama aşamalarında yapılmış işlemler Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17. Donatıların hazırlanması; (a) Kullanılan hassas terazi, (b) Korozyonu ve aderansı istenmeyen donatı kısımlarının sarılması, (c) Tamamlanmış donatılar

Hazırlanan numunelerin detayları ve kalıp içerisine yerleşimi Şekil 3.18’de verilmiştir. Buna göre, tüm numunelerde aynı olacak şekilde bağlı boy uzunluğu 7.9 cm ($6.58 d_s$: donatı çapı), pull out deneyi esnasında donatıda sıyrılma ve akma hareketinin izleneceği alt bölümün uzunluğu ise 8 cm, üst bölümün uzunluğu yaklaşık 100 cm olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 3.18. Korozyon numunelerinin genel gösterimi

3.2.3. Beton karışımı hazırlama metodolojisi

Agrega deneyleri tamamlanıp uygun karışım oranları belirlendikten sonra Tablo 3.12’de verilen karışım içeriklerinin hazırlanması aşamasına geçilmiştir. Buna göre karışımlar hazırlanırken mikser yüzeyinin kuruluğu ve bundan dolayı oluşabilecek karışım suyu kayıplarının önüne geçebilmek için mikser yüzeyi ıslatılmış içerisindeki fazla su döküldükten sonra karışımlar hazırlanmaya başlanmıştır. Hazırlanan tüm karışımlarda uygulanan metodoloji şu şekildedir;

- Karıştırıcıya ilk olarak 15-22.4 ve 7-15 mm çaplı kırmataş agreganın tamamı atılmış ve 1 dakika kuru olarak karıştırılmıştır.
- Daha sonra 0-5 mm malzeme karıştırıcıya atılıp yaklaşık 1 dakika daha kuru karıştırılmaya devam edilmiştir. Bu aşamadan sonra karışım suyunun yaklaşık 1/5’i karıştırıcıya ilave edilmiş ve 1 dakikada bu şekilde karıştırılmıştır.
- Tüm agregaya karıştırıcıya girdikten sonra bağlayıcılardan, ilk önce çimento karışıma ilave edilmiş, çimentonun karışıma girmesiyle birlikte karışım suyunun geri kalan kısmıyla toplam su ağırlığının %4’ü oranındaki NaCl karışıma ilave edilerek (bu durum sadece korozyon numunelerinin üretiminde korozyonu hızlandırmak maksatlı uygulanmış, mekanik özelliklerin değerlendirildiği deneylerde karışıma tuz katılmamıştır) 1 dakika boyunca karıştırma işlemine devam edilmiştir.
- Bu sürenin sonunda diğer bağlayıcılardan sırasıyla silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu karışıma ilave edilmiş 2 dakika boyunca karıştırıldıktan sonra süper akışkanlaştırıcı karışıma eklenmiş, akışkanlaştırıcının homojen dağılması için 3 dakika da bu şekilde karıştırma işlemine devam edilmiştir.
- Ayrı ayrı olmak üzere; mekanik özelliklerin belirlendiği her seri için 70 dm³, korozyon ve aderans numunelerinden (lollipop) oluşan her bir seri için 35 dm³ karışım üretilmiştir.
- Karışımlar oluşturulduktan sonra kalıplara alınarak sıkışmanın sağlanabilmesi için laboratuvar tipi vibratör kullanılmış, segregasyonu engellemek için uygulama süresine dikkat edilmiştir.
- Sıkıştırma ve yüzey düzeltme işlemi tamamlanan numuneler gölge ortamda 24-48 saat arasında bekletildikten sonra kalıptan çıkarılarak kür havuzuna konulmuştur.

Şekil 3.19’da kalıplara yerleştirilen karışımlar gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Hazırlanan karışımların kalıplara yerleştirilmesi

3.2.4. Numune özellikleri, kür süresi ve koşulları

Tez çalışması kapsamında üretilen karışımlardan Tablo 3.13'te ölçüleri verilen numuneler elde edilmiştir. Üretilen numuneler Tablo 3.13'te verilen süreler boyunca 20 ± 2 °C sıcaklıktaki kür havuzunda, deneyin uygulanacağı tarihe kadar Şekil 3.20'de verildiği gibi bekletilmiş sonrasında numunelere Tablo 3.13'te verilen performans deneyleri yapılmıştır.

Tablo 3.13. Numune özellikleri ve numunelere uygulanan deneyler

Özellik	Basınç dayanımı	Eğilmede çekme dayanımı	Yarmada çekme dayanımı	Ultra ses geçiş hızı (UPV)	Su emme yüzdesi	Hız. korozyon deneyi	Pullout testi	Ağ. kaybı yüzdesi
Kür süresi	14 28 56							
Numune ölçüleri	10x10x10 cm küp	10x10x40 cm prizma	d:10; L:20 cm silindir	10x10x10 cm küp	10x10x40 cm prizma	15x15x15 cm lolipop	15x15x15 cm lolipop	Φ12 donatı
Üretilen her seri için tekrarlı deney sayısı	3	3	3	3	3	2	2	2

Buna göre 14, 28 ve 56 günlük kür süresi için basınç, eğilme ve çekme dayanımı deneyleri, 28 ve 56 günlük kür süresinde ultra ses geçiş hızı (UPV) ve su emme yüzdesi deneyleri, sadece 28 günlük kür süresinde de hızlandırılmış korozyon, pullout ve ağırlık kaybı deneyleri yapılmıştır. Donatının ağırlık kaybı yüzdesi; lolipop numunelerin hızlandırılmış korozyon deneyine tabi tutulup, pullout yapıldıktan sonra açığa çıkan donatılarının asitle (kral suyu) temizlenmesiyle belirlenmiştir. Uygulanan her bir performans kriterinde, her yaş için deney tekrar sayıları Tablo 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.20. Numunelere kür işlemi uygulanması

3.2.5. Betonun iç yapısı ve özellikleri

Tez çalışması kapsamında; 28 ve 56 gün kürde kalmış bazı serilerin mikroyapısal özelliklerinin değerlendirilmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmış ve enerji dağılım X ışını spektrometrisi (EDX) analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda elde edilen sonuçların değerlendirilmesi için faydalanılan teorik bilgiye ait literatür çalışmaları bu bölümde verilmiştir.

3.2.5.1. SEM görüntüleme ve EDX analizi

Taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDX) sertleşmiş betonun bağlayıcı malzeme hamur bölgesinde X ışınları kullanarak bağlayıcı malzemelerin hidratasyonu sonucu oluşmuş bileşik faz yapılarının görüntülenmesi ve CSH jeli içerisinde bulunan elementlerin analizinde kullanılmaktadır (Uzbaş, 2019).

SEM, numune ve elektron ışını arasındaki etkileşimden gelen sinyalleri ölçmektedir. Numunelerden geçen taramalı elektron ışını, yüzey görünümünü, parçacık boyutunu, şeklini ve kırılma yüzeyini araştırmak için kullanılmaktadır. Ayrıca paladyum-altın alaşımından kaplanmış iletken yüzeyde; faz dağılımını ve elementel bileşimi belirlemeye yaramaktadır. X ışınları kullanılarak yapılan mikro analiz, temel haritalama ve kantitatif nokta-alan kimyasal analizi de sağlamaktadır (Uzbaş ve Aydın, 2019).

Taramalı elektron mikroskobuyla numunelerden görüntü elde edebilmek için numunelerin iletken olması gerekmektedir. Numunenin iletken olmaması durumunda; negatif yük, elektrondan gelen ışını iten bir yüzey oluşmasına sebep olmaktadır. Bu

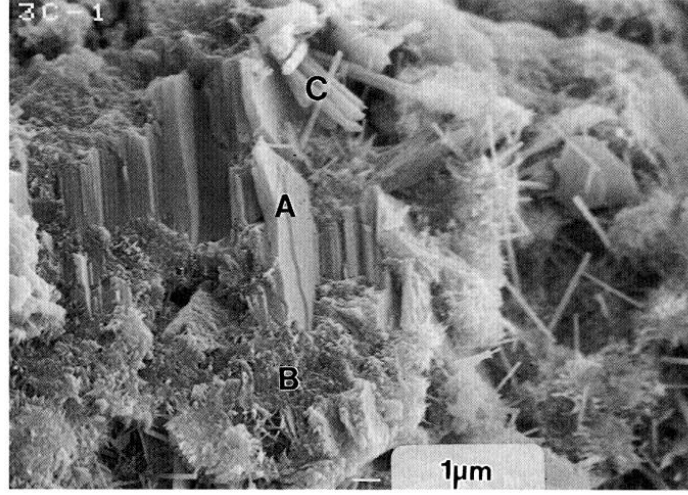
durumun oluşması görüntünün kötü alınmasına ya da hiç elde edilememesine sebep olmaktadır. Bunun önüne geçebilmek için iletken olmayan beton numunelerde numune yüzeyi ince bir film tabakasıyla kaplanmaktadır. Genellikle kaplamada kullanılan malzemeler; krom, altın, gümüş ve paladyum karışımından oluşan alaşımlardır (Winter, 2012).

SEM görüntüsü alınırken beton numuneler yeterince kuru olmalıdır. Aksi halde numunede bulunan nem, mikroskopta yüksek vakum altında buharlaşmaya başlayacaktır. SEM kolonunda vakumun bozulması elektron ışının verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Numunelerin kurutulmasında doğal ortam kurutması tercih edilmelidir. Yüksek sıcaklıklarda yapılan kurutmalarda numunede termal çatlakların oluşabileceği unutulmamalıdır (Gu vd., 2000; Ray vd., 2001). EDX analizlerinde numunenin ışık emme ve numune içerisinde bulunan elementlerin atom numaralarını tanımlamaya yarayan yazılım söz konusudur. Kantitatif analiz, X ışını emme durumuna göre yapılmaktadır (Ray vd., 2001).

Betonda mikro yapı terimi, temel olarak çimento ve agregaya su eklendiğinde oluşan, gelişen yapıyı ifade etmektedir. Mikro yapı incelemesi; betonun bazı özelliklerinin nasıl geliştiğinin tespitinde, kullanılan malzemelerin mikro ölçekte betonda yapmış olduğu değişikliklerin gözlenmesi ve belirlenmesinde kullanılmaktadır. Betonun mekanik özellikleri, çoğu zaman mikro yapısıyla ilişkili olmaktadır. Optik mikroskoplarla bu yapıların incelenip, belirlenmesi imkânsız olmakta, ancak SEM'in sağladığı yüksek çözünürlük sayesinde, EDX kullanımıyla birlikte anlık mikro analize imkân sağlanmaktadır (Sarkar vd., 1999).

Genellikle betonun mikro yapısal analizinde, hidrate çimento hamuru ve agregahamur ara yüz bölgesi incelenmektedir (Ray vd., 2001). Hidratasyona uğramış, s/ç oranı 0.5-0.55 olan normal çimento hamurunun SEM incelemesinde hidratasyon ürünlerinin %50-60'lık kısmını katı hacimli kalsiyum silikat hidrateler (CSH) oluşturmaktadır. Hidrate olmuş çimento hamurunda, diğer önemli içerik ise hamurun %20-25'lik kısmını oluşturan kalsiyum hidroksit (CH) olmaktadır. Çimento hamurunun geri kalan kısmında ise etrenjit (AFt), monosulfat (AFm) ve hidrate olmamış çimento taneleri bulunmaktadır. Hidrate olmamış çimento tane miktarı s/ç oranına ve çimentonun ince öğütülmesine bağlı olarak değişmektedir (Ray vd., 2001).

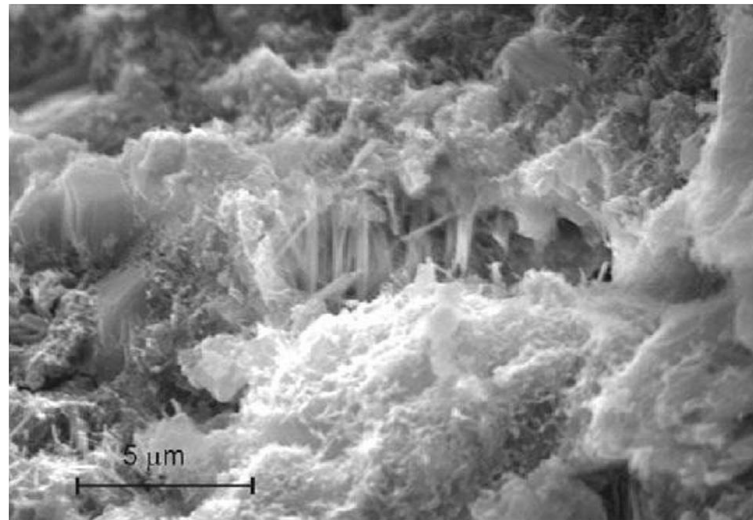
Hidrate olmuş 0.55 s/ç oranına sahip çimento hamurunda bazı fazların SEM görüntüsü Şekil 3.21'de verilmiştir.



Şekil 3.21. S/ç oranı 0.55 olan normal betonda hidrate çimento hamurunun SEM görüntüsü A: CH, B: C-S-H ve C: AFt (Sarkar vd., 1999)

Kalsiyum silikat hidrate (CSH) Fazı

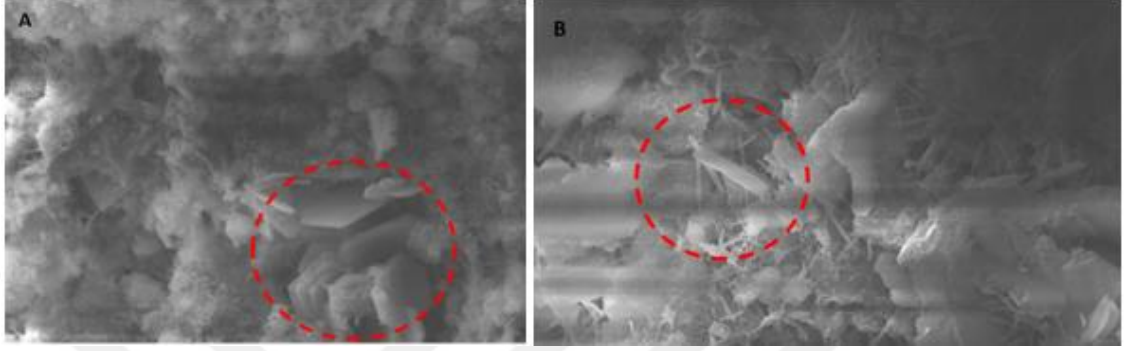
CSH fazı betonun dayanım özelliklerini etkileyen en önemli fazdır. Hidratasyon ürünü olan CSH'lar Van der Waals bağ kuvvetleriyle dayanımı etkileyen en önemli yapılardır. Taramalı elektron mikroskobu, CSH faz bileşiminde bulunan kimyasalları ve yapısal morfolojiyi karakterize etmede son derece etkili olmaktadır. Taramalı elektron mikroskobu ile normal sıcaklıkta üretilen çimento hamurunda yapılan incelemelerde CSH jellerinin iğnemsî tanelerden ve düzensiz dağılım gösteren bir ağ yapısından oluştuğu görülmüştür. Betonda CSH fazının mikro analizi Ca/Si oranı, s/ç oranı ve mineral katkı kullanımı gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir (Sarkar vd., 1999). Hidrate olmuş çimento hamuruna ait SEM görüntüsü Şekil 3.22'de verilmiştir.



Şekil 3.22. Hidrate olmuş çimento hamurunda CSH'ın SEM görüntüsü (Paul vd., 2018)

Kalsiyum hidroksit (CH) Kristal Yapılar

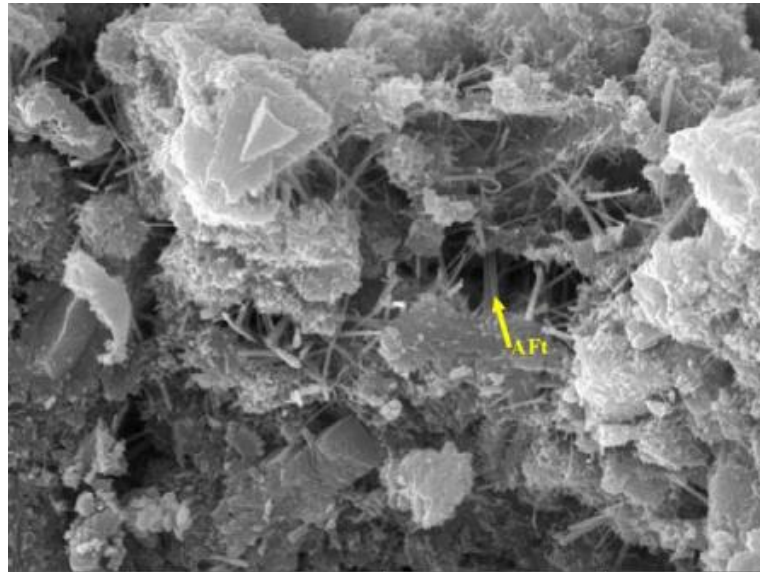
Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerinde kalsiyum hidroksit (CH) kristal yapıları, masif halde, büyük ince uzun, ince tabakalı farklı boyutlarda, altıgen prizma formunda ve ince yayılmış bloklu kristal kütleler halinde bulunabilmektedir. Buna göre farklı formlardaki CH kristal yapılar Şekil 3.23'te verilmiştir.



Şekil 3.23. Hidrate olmuş çimento hamurunda kalsiyum hidroksit (CH) SEM görüntüsü A: Tabakalı CH, B: İnce uzun CH (Yenginar, 2020)

Kalsiyum Sülfoalüminat Hidrate Fazı (AFt ve AFm)

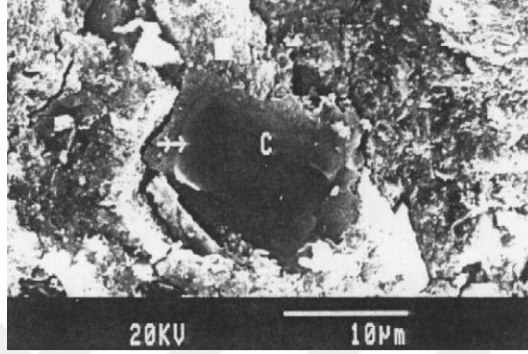
Taramalı elektron mikroskobunda, kalsiyum sülfoalüminat hidratlar iki farklı morfolojide görülebilmektedir. Buna göre etrenjit fazı (AFt) erken hidratasyon döneminde iğne yapılı kristallerden oluşmaktadır. Monosülfat fazı (AFm) ise düzensiz altıgen yassı plakalı olarak kendini göstermektedir. Buna göre hidrate olmuş çimento hamurunda oluşmuş AFt yapılar Şekil 3.24'te verilmiştir.



Şekil 3.24. Hidrate olmuş çimento hamurunda etrenjit (AFt) iğneleri (Qin vd., 2019)

Hidrate Olmayan Çimento Partikülleri

Karışım suyunun lokal olarak ulaşamadığı alanlarda çimento taneciklerinin bazılarında hidratasyon reaksiyonları başlayamamaktadır. Hidrate olamayan çimento partikülleri taramalı elektron mikroskobunda yüksek enerjili ikincil elektron görüntüsü ve geri saçılan elektron görüntüsü ile karakterize olmaktadır (Kırgız, 2011). Taramalı elektron mikroskobu altında hidrate olmamış çimento partiküllerinin görüntüsü Şekil 3.25'te verilmiştir.



Şekil 3.25. Hidrate olmamış çimento taneleri (C) (Kırgız, 2011)

Hidrate olmamış çimento taneleri karışım suyunun önemli bir kısmını yutma eğilimi göstermektedir. Su/bağlayıcı oranının bölgesel olarak değişiklik göstermesinden dolayı bu alanlarda heterojen boşluk yapıları oluşmaktadır. Hidrate olmayan çimento tanelerinin boşluk yapılarında tespiti için taramalı elektron mikroskobunun kullanımı son derece etkili olmaktadır (Sarkar vd., 1999).

Hidrate Çimento Hamur Boşlukları

Hidrate olmuş çimento hamurundaki boşluklar iki farklı şekilde karakterize edilebilir. Birinci tür boşluklar hidrate olmamış çimento taneleri arasındaki boşluklardır. Ancak bu boşluklar hidrate CSH jeli arasındaki boşluklarda da görülebilmektedir. Bu tür boşluk yapıların belirlenmesinde SEM etkili olmaktadır. İkinci tür boşluklar ise CSH jeli içerisinde bulunan boşluk yapıları olmakla birlikte bunlar SEM’de görüntülemek için çok küçük boşluk yapılarıdır (Uzbaş, 2019).

3.2.6. Taze beton kıvamının belirlenmesi

Tez çalışması kapsamında, üretimi yapılan tüm serilerde mineral katkıların ve kalsiyum nitritin taze betonun kıvamına olan etkisinin belirlenmesi için (TS EN 12350-2, 2019) standardına uygun slump deneyleri yapılmıştır.

3.2.7. Basınç dayanımı

Basınç dayanım deneyi 10x10x10 cm boyutlu küp numuneler üzerinde (TS EN 12390-3, 2019) standardına uygun olarak yapılmıştır. Tablo 3.13'te verilen yaşlara ulaşan numuneler 3000 kN yükleme kapasitesine sahip otomatik kontrollü preste deneye tabi tutulmuştur. Pürüzsüz yüzeylerinden pres tablası arasına yerleştirilen numuneler 0.6 MPa/s'lik sabit hızla yüklenerek kırılma anındaki yükler belirlenmiştir. Kırılma yükünün numune yüzey alanına bölünmesi ile basınç dayanımı bulunmuştur. Deneyler her serinin 3 tekrarlı numunesi üzerinde yapılmıştır. Şekil 3.26'da basınç dayanım testinin uygulanışı verilmiştir.



Şekil 3.26. Numune üzerinde basınç dayanım testinin uygulanışı

3.2.8. Ultra ses geçiş hızı (UPV) deneyi

Ultrases geçiş hızı (UPV), sertleşmiş betonda dayanımı belirlemeye yarayan hasarsız bir ölçüm yöntemidir (Al- jaber ve Ali, 2014). Deneyde ses dalgalarının üretildiği bir verici ve dalgaların beton içerisinde hareket ettikten sonra ulaştığı bir alıcı vardır. Burada ses dalgalarının geçiş hızı ölçülerek, betonun dayanımı belirlenmeye çalışılmaktadır (Zebarı, 2017). Genel itibariyle yüksek dayanımlı betonların, yüksek yoğunluğa sahip oldukları kabul edilmektedir (Jones ve Gatfield, 1955). Ancak ultra ses geçiş hızı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi genellemek mümkün olmamaktadır (Demirboğa vd., 2004). Çünkü; beton karışımına giren birçok parametre ultra ses geçiş hızı üzerinde etkili olmaktadır. Genel geçer bir tahmin, ancak deney yapılan her bir beton türünde kalibrasyon eğrileriyle çalışılarak mümkün olabilmektedir (Madandoust vd., 2010). Ultra ses geçiş hızı yapılan numunelerde; geçiş hızı durumuna göre beton kalite ölçütü Tablo 3.14'e göre belirlenmiştir.

Tablo 3.14. Beton kalitesinin ultrases dalga hızına (upv) göre sınıflandırılması (IS 13311-1, 1992)

UPV (km/sn)	Beton kalitesi
>4,5	Çok iyi
3,5-4,5	İyi
3,0-3,5	Orta
<3,0	Kötü (Şüpheli)

Tez çalışmasında; ultra ses geçiş hızı deneyi 28 ve 56 günlük 10x10x10 cm küp numunelere (TS EN 12504-4, 2021) standardına uygun olarak yapılmıştır. Numuneler direk ölçüm tipinde deneye tabi tutulmuştur. Deneyler her seride bulunan 3 adet basınç numunesine, basınç dayanımı testine uğratılmadan önce uygulanmıştır. Deney sonuçlarında varyasyon katsayısı düşük olduğundan deney sonuçlarının ortalaması alınarak istatistiksel analizler yapılmıştır. Deneylere başlamadan önce cihazın kalibrasyonu yapılmıştır. Numune üzerinde, alıcı ve vericilerin temas ettikleri yüzeyler serbest parçacıklardan temizlenmiştir. Yüzey temizliği yapıldıktan sonra, alıcı ve verici problar üzerine beton numunesi ile prob arasındaki bağın kesintisiz sağlanması amacıyla ultrason jeli sıkılmıştır. Daha sonra problar birbirlerine hizalı olarak bakacak şekilde numuneye sabitlenerek deneyler yapılmıştır. Şekil 3.27’de deneyin uygulanmasına ait görsel verilmiştir.

**Şekil 3.27.** Numunelere ultra ses geçiş hızı deneyi yapılması

3.2.9. Eğilme dayanımı

Betonun eğilmede çekme dayanımının belirlenmesi için numuneler 14, 28 ve 56 gün kür süresi sonunda (TS EN 12390-5, 2019) standardına uygun olarak üç nokta eğilme dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Buna göre her karışım serisinden, her kür süresi için

3'er adet 100x100x400 mm prizmatik numune üzerinde deneyler yapılmıştır. Pürüzsüz yüzeylerinden mesnet üzerine yerleştirilen numuneler 0.05 MPa/s'lik sabit hızla yüklenerek kırılma anındaki yükler belirlenmiştir. Yükler belirlendikten sonra numunede oluşan çekme gerilmesi Denklem 3.15'e göre hesaplanmıştır. Deneyin uygulanaşına ait görsel Şekil 3.28'de verilmiştir.

$$\sigma_{e\check{c}} = \frac{3FL}{2d_1d_2^2} \quad (3.15)$$

Bu denklemde $\sigma_{e\check{c}}$ (MPa) betonun eğilmede çekme gerilmesini, F (N) kırılma yükünü, d_1 ve d_2 (mm) numune en kesit boyutlarını, L ise (mm) mesnet silindirleri arasındaki mesafeyi ifade etmektedir.



Şekil 3.28. Numunelere eğilme dayanımı deneyi yapılması

3.2.10. Yarmada çekme dayanımı

Betonun çekme dayanımının belirlenmesi için numuneler 14, 28 ve 56 gün kür süresi sonunda (TS EN 12390-6, 2010) standardına uygun olarak yarmada çekme dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Buna göre her karışım serisinden, her kür süresi için 3'er adet boyutları d:100 mm L: 200 mm olan silindir numune üzerinde deneyler yapılmıştır. Pres tablaları arasına, boyuna uzatılan numuneler 0.05 MPa/s'lik sabit hızla yüklenerek kırılma anındaki yükler belirlenmiştir. Yükler belirlendikten sonra numunede oluşan çekme gerilmesi Denklem 3.16'ya göre hesaplanmıştır. Deneyin uygulanaşına ait görsel Şekil 3.29'da verilmiştir.

$$\sigma_{y\zeta} = \frac{2P_k}{\pi dL} \quad (3.16)$$

Bu denklemde $\sigma_{y\zeta}$ (MPa) betonun yarmada çekme gerilmesini, P_k (N) kırılma yükünü, d (mm) numune çapını ve L (mm) numune boyunu ifade etmektedir.



Şekil 3.29. Numunelere yarmada çekme dayanımı deneyi yapılması

3.2.11. Su emme yüzdesi

Tez kapsamında su emme yüzdesi deneyleri (ASTM C642-21, 2021) standardına uygun olarak 28 ve 56 günlük prizmatik numunelere uygulanmıştır. Buna göre; etüv kurusu ağırlıkları belirlenmiş numuneler, su içinde 24 saat bekletilip yüzeyleri kurutulduktan sonra tartılmış ve numunelerin su emme oranları belirlenmiştir. Her seri için 3 tekrarlı numunede deneyler yapılarak ortalamaları alınmıştır. Deney sonuçlarının varyasyon katsayıları düşük olduğundan istatistik analizler üç deney sonucunun ortalaması alınarak yapılmıştır. Buna göre numunelerin su emme yüzdeleri Denklem 3.17 kullanılarak hesaplanmıştır. Bu denklemde A numunenin etüv kurusu ağırlığını, B ise numunenin 24 saat suya doymuş ağırlığını ifade etmektedir.

$$\text{Su emme (\%)} = [(B - A)/A] \times 100 \quad (3.17)$$

3.2.12. Hızlandırılmış korozyon deneyi

Tez çalışmasında; korozyonu hızlandırmak için daha önce birçok çalışmada kullanılan (Almusallam vd., 1996; Fang vd., 2004) hızlandırılmış korozyon teknikleri uygulanmıştır. Üretilen lolipop numuneler 28 gün kürde kaldıktan sonra içerisinde %5

NaCl çözeltisi bulunan PVC tanklara konularak DC güç kaynağından sabit 20 V potansiyele maruz bırakılmıştır. Buna göre uygulanacak sabit voltajın süresi, içerisinde hiçbir mineral katkının bulunmadığı referans numuneler üzerinden geçen akımların ortalaması alınarak Denklem 3.18’de verilen Faraday denklemine göre belirlenmiştir.

$$\text{Ağırlık Kaybı (gr)} = \frac{t(\text{sn}) \times I(\text{A}) \times 55.847 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)}{2 \times 96487 \text{ (coulomb)}} \quad (3.18)$$

Burada; t uygulanan akımın saniye cinsinden süresini, I amper cinsinden çekilen ortalama akımı, 55.847 g/mol demirin atomik ağırlığını, 2 demirin değerliğini ve 96487 Faraday sabitini göstermektedir. Sabit voltajla yapılan hızlandırılmış korozyon deneylerinde akım değişkenlik göstereceğinden dolayı, akım verilerinin sürekli olarak kaydedilmesi gerekmektedir. Buna göre tez kapsamında akımların zamana göre değişimini sürekli olarak kaydedecek bir veri kayıt cihazı geliştirilmiştir. Akımlar veri kayıt cihazına 20 sn’de bir olacak sıklıkta kaydedilmiş ve akım ortalamaları bulunarak uygulanacak süre, seçilen korozyon seviyelerine göre tespit edilmiştir. Tez çalışması kapsamında; seçilen korozyon seviyeleri referans betonu çatlatan (~%7) korozyon seviyesinin altında kalacak şekilde %2, %4 ve %6 olarak belirlenmiştir. Bu üç farklı korozyon oranına göre yapılan deneylere ait isimlendirme ve korozyon deney detayları Tablo 3.15’ te verilmiştir.

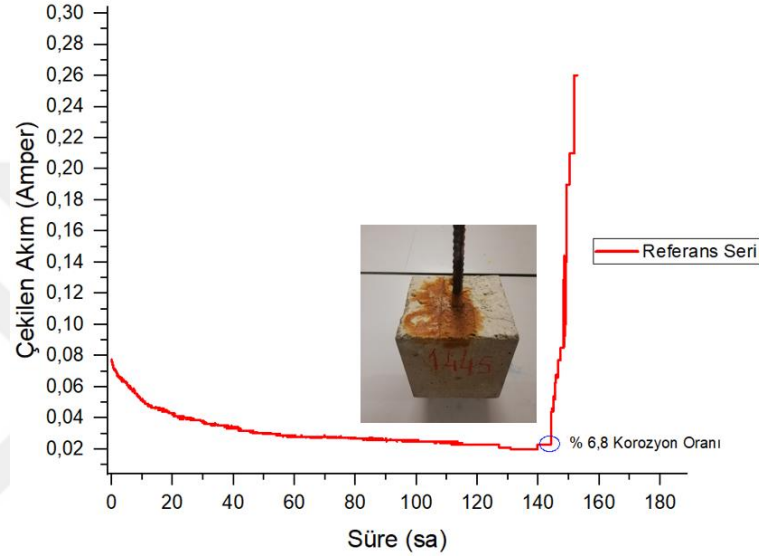
Tablo 3.15. Farklı korozyon oranları için kodlama ve deney detayları

Kod	Hedeflenen korozyon oranı (%)	Korozyon süresi (sa)	Uygulanan sabit voltaj
K0	0	0	0
K2	2	27	20
K4	4	64	20
K6	6	122	20

Buna göre referans betonu çatlatan akım süresi ön deneyler sonucunda belirlenmiş ve akım-zaman grafiği Şekil 3.30’da verilmiştir.

İki adet referans karışım içeriğinden oluşan deney numunesine 20 V sabit potansiyel uygulanarak tekrar edilmiş deney sonuçlarına göre Şekil 3.30’da gösterildiği üzere 144 saatin sonunda çekilen akım değeri artmaya başlamış ve betonun bu süreden sonra çatladığı kabul edilmiştir. Bu süre zarfında çekilen ortalama akım değeri yaklaşık 0.032 amper olarak belirlenmiştir. Üç farklı korozyon seviyesinde çalışma yapılmasındaki temel amaç; farklı korozyon seviyelerinde, korozyonun bağ dayanımı

üzerindeki etkisini belirlemeye çalışmaktır. Referans beton için belirlenen bu korozyon seviyelerinde Faraday denklemi kullanılarak tespit edilen süreler L9 ortogonal dizide bulunan tüm karışımlar ve içerisinde %2 kalsiyum nitrit (DCI) bulunan seri için uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre serilerin korozyon davranışlarının karşılaştırması yapılmıştır. Buna göre çekilen ortalama korozyon akımı ve gerçek ağırlık kaybı değerleri için istatistiksel analizler yapıp optimum karışım içerikleri tespit edilmiştir.

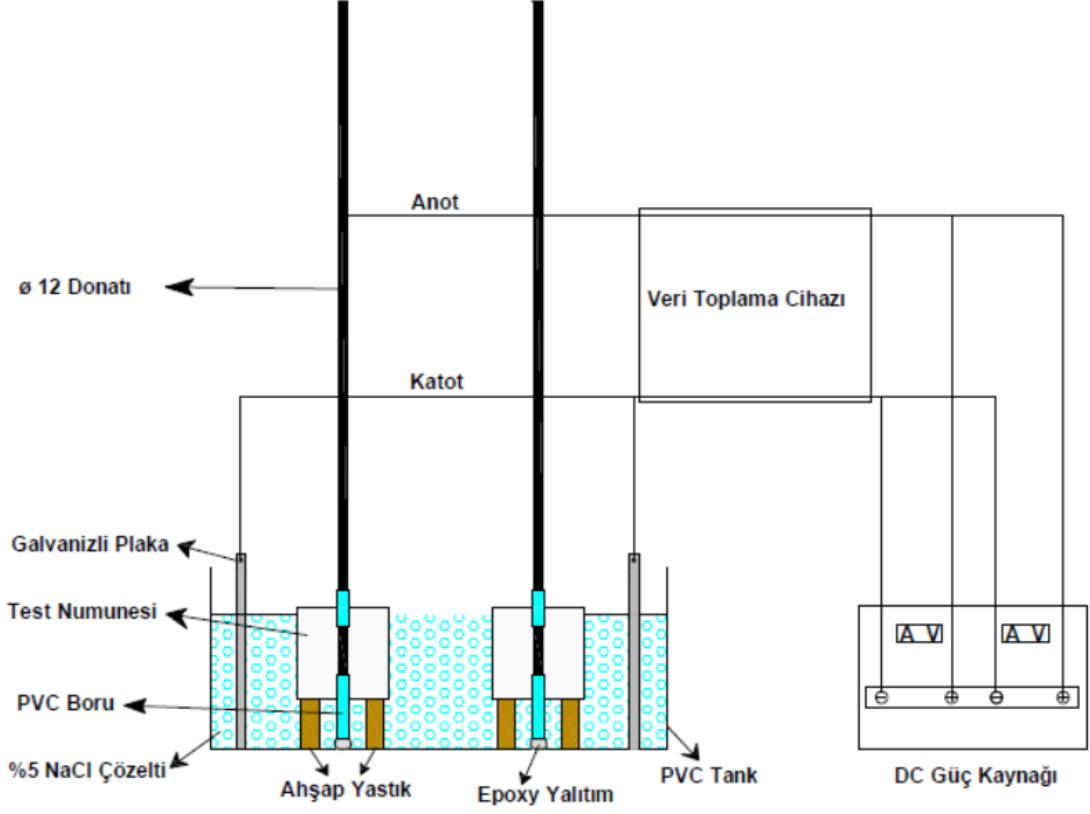


Şekil 3.30. Referans betonu Faraday denklemine göre çatlatan akım süresi

Hızlandırılmış korozyon deney düzeneğinin şematik gösterimi ve deneyin uygulanışı sırasıyla Şekil 3.31-3.32'de verilmiştir. Düzenekte verilen güç kaynağı, akım ve voltajın sınırlandırılmasına imkân sağlayan doğru akım kaynağıdır. Deney düzeneğinde donatılar anot görevi görürken korozyona karşı dayanıklı galvanizli plakalar katot olarak çalışmaktadır. İyon akışının sağlanması için elektrolit olarak %5 NaCl çözeltisi kullanılmıştır. Korozyondan korunması gereken bölümler PVC boru ve epoksi malzemesi ile yalıtılmıştır. Sistemden geçen akım 20 sn'lik periyotlarla veri kaydedici tarafından sürekli kaydedilmiş ve bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Hızlandırılmış korozyon deneyleri her serinin iki tekrarlı numunesine uygulanmıştır. Bu sebeple istatistiksel analizlerde varyasyon katsayısı göz önünde bulundurulmamış iki tekrarlı deney sonucunun ortalaması alınarak istatistik analizler yapılmıştır.

Buna göre her bir seri, referans betonun %2 korozyon seviyesine göre 27 saat (K2), %4 korozyon seviyesine göre 64 saat (K4) ve %6 korozyon seviyesine göre 122

saat (K6) devrede bağı tutulmuş, akım çekme karakteristikleri belirlenmiştir. Deneyler her serinin 2 tekrarlı numunesi üzerinde yapılarak çekilen akım değerlerinin ortalaması alınmıştır.



Şekil 3.31. Hızlandırılmış korozyon deney düzeneği



Şekil 3.32. Hızlandırılmış korozyon deneyinin uygulanması

3.2.13. Pullout deneyi

Tez çalışması kapsamında uygulanan pullout deneylerinde puzolanların aderans kuvvetine olan etkisi ve aderansı maksimum veren optimum puzolan içeriğinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Diğer yandan farklı korozyon oranlarının aderans kuvvetine olan etkisi de belirlenmeye çalışılmıştır. Deneyler, üretilen her farklı karışım içeriğinin 2 tekrarlı numunesine uygulanmıştır. Bu sebeple istatistik değerlendirmelerde varyasyon katsayısı göz önünde bulundurulmamıştır. Buna göre pullout deney düzeneğinin şematik gösterimi ve deneyin uygulanışı sırasıyla Şekil 3.33-3.34'te verilmiştir.

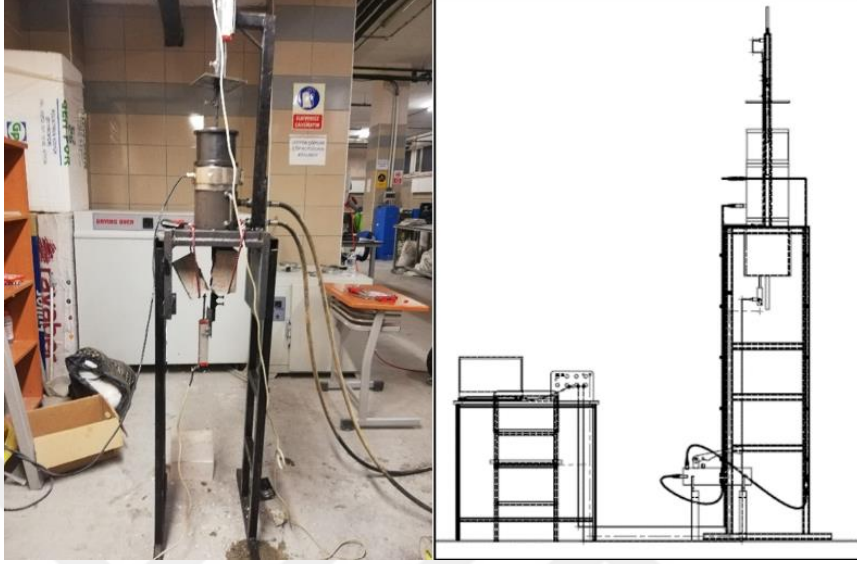


Şekil 3.33. Pullout deney düzeneği

İçerisinde donatı olan 15x15x15 cm ölçülerdeki lolipop numuneler korozyonsuz (K0), 27 s (K2), 64 s (K4) ve 122 s (K6) durumlarında hızlandırılmış korozyona tabi tutulduktan sonra Şekil 3.34'teki düzeneğe göre numunelere yukarı yönlü çekme işlemi uygulanmıştır. Deney esnasında yüklemeler manuel hidrolik el pompası ile yapılmıştır. Donatı, yükleme sırasında konik segman aracılığıyla tutturulmuş ve yükleme noktasındaki kayma hareketi engellenmiştir.

Pullout esnasında uygulanan kuvvet (kN) değerleri ve donatıda meydana gelen alt ve üst deplasmanlar mm cinsinden data logger cihazıyla kaydedilmiştir. Donatıda

meydana gelen alt ve üst deplasmanlar kapasitesi 100 mm olan potansiyometrik lineer cetveller kullanılarak ölçülmüştür. Bu işlemler hazırlanan tüm lolipop numuneler için tekrarlanmıştır.



Şekil 3.34. Pullout deneyinin uygulanması

3.2.14. Ağırlık kaybı yüzdesinin belirlenmesi

Hızlandırılmış korozyon deneyine tabi tutulan ve pullout uygulanan korozyon numunelerinin tamamının donatıları pullout deneyi sonrasında kral suyu olarak adlandırılan ($\text{HNO}_3 + 3\text{HCL}$) asit çözeltisinde bekletilerek temizlenmiş ve hassas terazide tartılarak korozyon sonrası ağırlıkları bulunmuştur. Buna göre temizlik işlemi, donatının beton içerisinde kalan 7.9 cm'lik korozyona uğrayan bağlı boy bölgesinde yapılmıştır. Gerçek ağırlık (gravimetrik) kaybı yüzdesi Denklem 3.19'a göre hesaplanmıştır.

$$CL (\%) = \frac{G_0 - G_1}{G_0} \times 100 \quad (3.19)$$

Burada G_0 ; donatının ilk ağırlığını, G_1 ise korozyona uğratıldıktan sonra bağlı boyun temizlenerek tartıldığı, donatının son ağırlığını göstermektedir. Buna göre hesaplamalar her serinin iki tekrarlı numunesi üzerinde yapılmıştır. Bu sebeple varyasyon katsayısı göz önünde bulundurulmamış her serinin iki tekrarlı numunesinin ortalaması alınarak istatistik analizler yapılmıştır.

4. DENEY SONUÇLARI

Silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, süper akışkanlaştırıcı ve kalsiyum nitrit korozyon inhibitörü kullanımının beton özelliklerine ve beton içerisindeki donatının korozyon performansına etkisinin araştırıldığı bu çalışmada; elde edilen deney sonuçları ve değerlendirmesi bu bölümde verilmiştir.

4.1. Taze Beton Kıvamının Belirlenmesi

Üretimi yapılan tüm karışımlara, (TS EN 12350-2, 2019) standardına uygun olarak işlenebilirlik ölçütü olarak yaygın kullanılan çökme (slump) testi uygulanmıştır. Buna göre deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.1 ve Şekil 4.1’de verilmiştir.

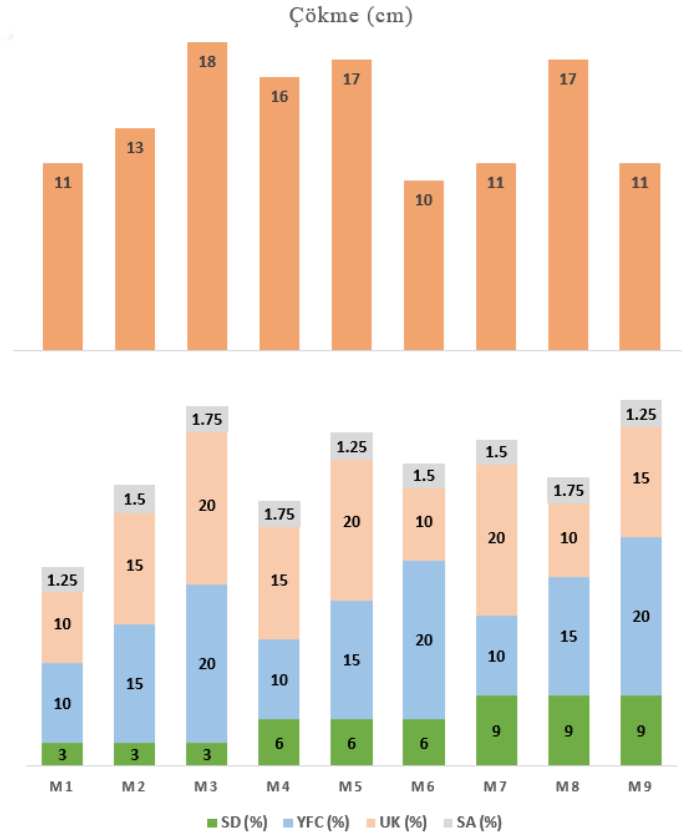
Tablo 4.1. Serilerin çökme (slump) deney sonuçları

Seri	Çökme (slump) değerleri (cm)
M1	11
M2	13
M3	18
M4	16
M5	17
M6	10
M7	11
M8	17
M9	11
REF 1.25 SA	7
REF 1.50 SA	9
REF 1.75 SA	11
%2 DCI	16
Slump doğrulama	19
14 G doğrulama	9 (Ç) -10 (B ve E)
28 G doğrulama	11 (B ve Ç)-12 (E1)- 14 (E2)
56 G doğrulama	11 (B1 ve E)-12 (B2-Ç)
YFC TEK 28 OPT BAS (%39)	12
YFC TEK 56 OPT BAS (%44)	13
UK TEK 28 OPT BAS (%39)	16
UK TEK 56 OPT BAS (%44)	18

Ç: Yarmada çekme optimum; B: Basınç optimum; E: Eğilmede çekme optimum

İşlenebilirlik deney sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde puzolan ikamesinin işlenebilirlik üzerinde olumlu etkisinin olduğu söylenebilir (Amer vd., 2021; Mohamed ve Najm, 2017). Özellikle uçucu kül ikame oranının %15-20 olduğu serilerde ve yüksek fırın cürufu ikame oranının %15 olduğu serilerde elde edilen çökme değerleri yüksek olmuştur. Parametrik etki istatistik değerlendirmede detaylı olarak verilecektir. Doğrulama adı altında Tablo 4.1’de verilen seriler performans kriterlerinin Taguchi

istatistik analizleri sonucu bulunan optimum karışım içeriklerinin isimlendirmelerini göstermektedir. YFC TEK ve UK TEK isimli kodlamalar ise 28 ve 56 günlük basınç dayanımlarında Taguchi yöntemi ile bulunan optimum toplam puzolan içeriği yerine tekli puzolan kullanımının kriterler üzerindeki etkisinin araştırılması için üretilmiştir. Optimum seviyelerde silis dumanının tekli kullanımı inceliğine bağlı olarak yüksek ikame oranlarında mümkün olmamış ve bu seviyede karışım elde edilememiştir. Tüm serilerde süper akışkanlaştırıcı dozajının %1.75 olduğu durumda çökme değeri de yüksek olmuştur. “REF kodlu” referans betonlarda; süper akışkanlaştırıcı kullanım oranının %1.25’ten %1.75’e yükseltilmesi çökme değerini yaklaşık %57 oranında artırmıştır. Kalsiyum nitrit kullanılarak üretilen karışımda, çökme değeri aynı miktarda süper akışkanlaştırıcı içeren referans betondan daha fazla olmuştur (Lopez-Calvo vd., 2012). Uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun tekli kullanımları (UK ve YFC TEK) aynı miktarda süper akışkanlaştırıcı katkı içeren referans betondan (%1.5 SA) daha yüksek bir çökme değeri elde edilmesini sağlamıştır. Diğer yandan Tablo 4.1’e göre uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun tekli kullanımlarında, kullanım oranının artması çökme değerini artırmıştır (Nagaratnam vd., 2016; Özbay vd., 2016).



Şekil 4.1. Farklı karışım içeriğindeki serilerin çökme değerleri

4.2. Basınç Dayanımı

Tez çalışması kapsamında üretilen tüm seriler; 14, 28 ve 56 gün kür süresi sonunda (TS EN 12390-3, 2019) standardına uygun olarak basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Buna göre her karışım serisinden, her kür süresi için 3'er adet 100x100x100 mm küp numune üzerinde deneyler yapılmıştır. Numunelere 14 günlük kür süresi uygulanmasının sebebi özellikle puzolan oranının fazla olduğu serilerde erken yaş dayanımının gelişmemesi ve kalıp alma sürelerindeki gecikmeden dolayıdır. Önceki çalışmalarda da puzolanlarla yapılan deneylerde 14 günlük kür süresi uygulanmıştır (Teimortashlu vd., 2018). Tüm kür yaşlarında basınç dayanım deneyine tabi tutulan üç numunenin varyasyon katsayısı (%COV) (ASTM C109/C109M-20, 2020) standardına göre hesaplanmış, buna göre %8.7'den daha yüksek varyasyon katsayısı elde edilen deney sonuçlarında, yüksek varyasyona sebep olan tekrarlı deney sonucu ortalamaya dahil edilmeyerek yeni ortalamalar bulunmuştur. Deneylerden elde edilen sonuçlar ve deney tekrarlarının varyasyon katsayıları Tablo 4.2, 4.3 ve 4.4'te verilmiştir.

4.2.1. 14 günlük basınç dayanımı

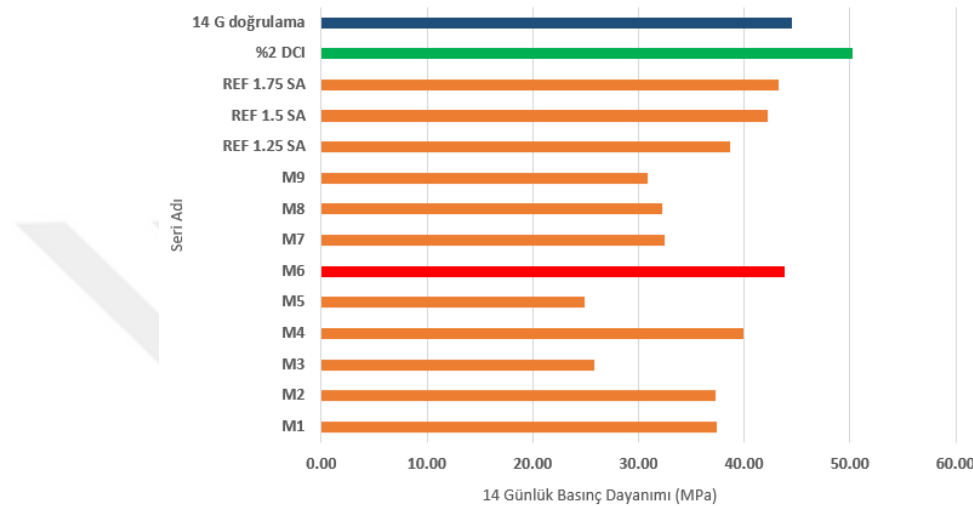
Tüm beton karışımlarından elde edilen küp numunelerin 14 günlük kür süresi sonunda elde edilen basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 4.2'de ve Şekil 4.2 'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Serilerin 14 günlük basınç dayanımı sonuçları

Seri	Basınç dayanımı (MPa)				Ort.	Varyans	Ss	Cov %	Yeni ort.
M1	42.98	35.90	33.36	37.41	24.85	4.99	13.33	34.63	
M2	39.46	35.72	36.53	37.24	3.87	1.97	5.28	37.24	
M3	25.85	25.85	25.83	25.84	0.00	0.01	0.04	25.84	
M4	37.06	44.37	38.22	39.88	15.43	3.93	9.85	37.64	
M5	26.14	26.04	22.34	24.84	4.69	2.17	8.72	26.09	
M6	45.01	47.38	39.21	43.87	17.67	4.20	9.58	46.20	
M7	31.15	34.30	31.88	32.44	2.72	1.65	5.08	32.44	
M8	38.09	29.59	29.11	32.26	25.52	5.05	15.66	29.35	
M9	35.16	26.59	30.67	30.81	18.38	4.29	13.91	32.92	
REF 1.25 SA	37.81	37.65	40.38	38.61	2.35	1.53	3.97	38.61	
REF 1.50 SA	41.26	41.10	44.37	42.24	3.40	1.84	4.36	42.24	
REF 1.75 SA	41.95	45.03	42.60	43.19	2.64	1.62	3.76	43.19	
%2 DCI	51.57	47.88	51.10	50.18	4.03	2.01	4.00	50.18	
14 G doğrulama	44.97	44.73	43.79	44.50	0.39	0.62	1.40	44.50	

Buna göre serilerden %6 SD, %20 YFC ve %10 UK içeren M6 serisi 14 günlük basınç dayanım sonuçlarına göre puzolanlı serilerden maksimum dayanımın elde edildiği

seri olmuş ve 14 gün gibi erken sayılacak bir yaşta referans betonların ulaştığı dayanıma ulaşmıştır. Diğer yandan %65 oranında katı madde içeriğine sahip kalsiyum nitrit (DCI) çözeltilisini %2 oranında barındıran seri, tüm serilerin içerisinde basınç dayanımı açısından en fazla dayanımın elde edildiği seri olmuştur. Bu anlamlı artış literatürdeki (Al-Amoudi vd., 2003; Berke vd., 1993; Lopez-Calvo vd., 2012) çalışmalarla benzerlik göstermektedir.



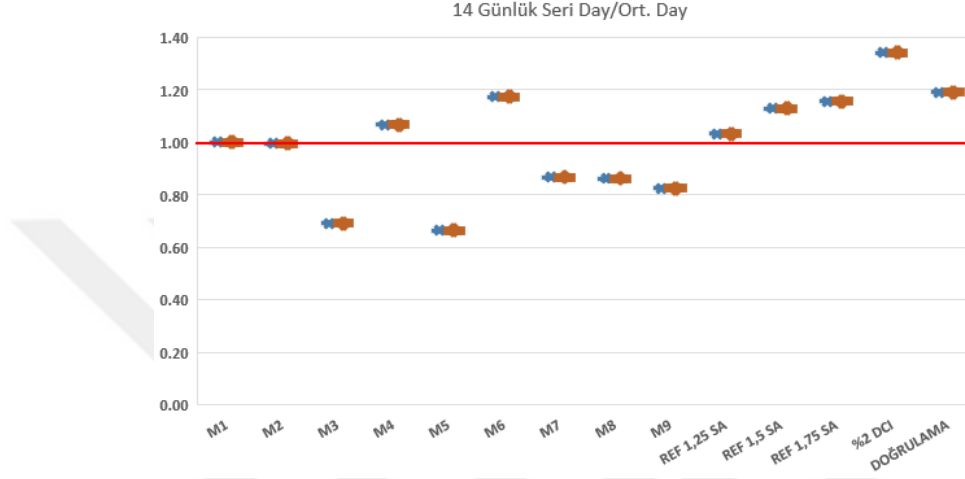
Şekil 4.2. Serilerin 14 günlük ortalama basınç dayanımları

Tablo 4.2’de verilen % 6 silis dumanı, %10 yüksek fırın cürufu ve %10 uçucu kül ve %1.5 süper akışkanlaştırıcı içeren 14 G doğrulama kodlu seri; Taguchi istatistik analizleri sonucu bulunan optimum karışım içeriğinde üretilen numuneyi temsil etmektedir. Referans beton için süper akışkanlaştırıcı dozajının seçilen oranlarda değişimi, 14 günlük basınç dayanımını anlamlı ölçüde etkilememiştir. 14 G doğrulama kodlu seri L9 ortogonal dizi ve referans seriler arasında basınç dayanımının en yüksek elde edildiği seri olmuş referans betonların ortalama basınç dayanımlarından yaklaşık %5 oranında daha fazla dayanım elde edilmiştir.

Şekil 4.3 ’te serilerin 14 günlük basınç dayanımı ortalamalarına göre rölatif seri performansları verilmiştir.

Her bir serinin basınç dayanımının, tüm serilerin ortalamasından elde edilen basınç dayanımına oranlanmasıyla rölatif seri performansları elde edilmiştir. 14 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre; puzolan oranının fazla olduğu M3, M5, M7 ve M9 serilerinde, diğer serilere göre daha düşük basınç dayanımı elde edilmiştir. Buna sebep olarak yüksek ikame oranına bağlı çimento miktarındaki azalma ve puzolonik

reaksiyonların erken yaşlarda istenilen ölçüde gelişemediği gösterilebilir. Diğer yandan bu serilerin ortak özellikleri uçucu kül ikame oranlarının fazla olmasıdır. Uçucu kül; çimentodan daha ince tanecik yapısına sahip olduğundan çimento tanecikleri arasındaki suyu absorbe ederek hidrasyonu yavaşlatabilmekte, aynı zamanda puzolonik reaksiyonların yavaş ilerlemesine bağlı olarak erken yaş dayanımını olumsuz etkileyen bir puzolandır (Lopez-Calvo vd., 2012; Reou ve Ann, 2008).



Şekil 4.3. 14 günlük ortalama basınç dayanım sonuçlarına göre rölatif seri performansları

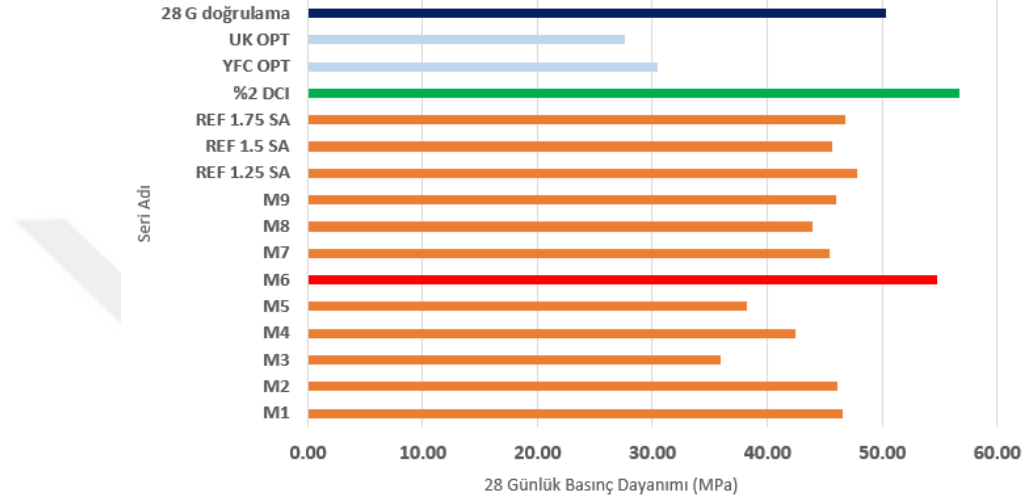
4.2.2. 28 günlük basınç dayanımı

Beton numunelerin 28 günlük kür süresi sonunda basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 4.4' te ve Tablo 4.3' te verilmiştir.

Tablo 4.3. Serilerin 28 günlük basınç dayanımı sonuçları

Seri	Basınç dayanımı (MPa)			Ort	Varyans	Ss	Cov %	Yeni ort
M1	48.4	42.82	48.45	46.56	10.47	3.24	6.95	46.56
M2	44.69	45.75	47.91	46.12	2.69	1.64	3.56	46.12
M3	36.07	35.64	35.98	35.90	0.05	0.23	0.63	35.90
M4	40.82	40.95	45.44	42.40	6.92	2.63	6.20	42.40
M5	37.67	37.03	40.08	38.26	2.59	1.61	4.20	38.26
M6	52.12	55.04	57.32	54.83	6.79	2.61	4.75	54.83
M7	42.78	43.66	49.81	45.42	14.67	3.83	8.43	45.42
M8	47.33	42.35	42	43.89	8.89	2.98	6.79	43.89
M9	43.42	49.29	45.2	45.97	9.06	3.01	6.55	45.97
REF 1.25 SA	48.12	45.98	49.44	47.85	3.05	1.75	3.65	47.85
REF 1.50 SA	47.60	46.24	43.28	45.71	4.88	2.21	4.83	45.71
REF 1.75 SA	43.51	50.82	45.98	46.77	13.83	3.72	7.95	46.77
%2 DCI	53.64	59.29	57.13	56.69	8.13	2.85	5.03	56.69
28 G doğrulama	48.14	52.8	50.12	50.35	5.47	2.34	4.64	50.35
YFC OPT TEK 28	32.48	30.37	28.47	30.44	4.02	2.01	6.59	30.44
UK OPT TEK 28	27.94	26.88	28.12	27.65	0.45	0.67	2.42	27.65

Buna göre serilerin 28 günlük dayanımları Şekil 4.2’de verilen 14 günlük basınç dayanımlarına göre değerlendirildiğinde referans serilerde yaşa bağlı dayanım artışı sınırlı kalırken, puzolanlı serilerde yaşa bağlı dayanım artışı daha yüksek oranda gerçekleşmiştir. Bu durum puzolanik reaksiyonların kür süresi ile hızla devam ettiğinin göstergesidir. Kalsiyum nitrit (%2 DCI) çözeltisi içeren karışım, 28 günlük basınç dayanımında da en iyi performansı göstermiştir.

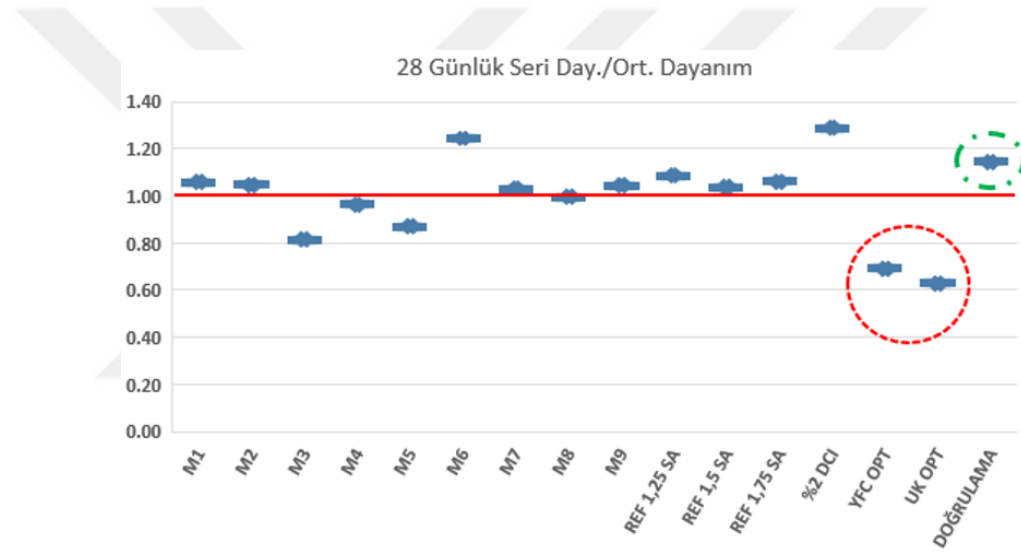


Şekil 4.4. Serilerin 28 günlük ortalama basınç dayanımları

Puzolanların tekli kullanımları ile üçlü kullanımları arasındaki farkı araştırmak amacı ile Taguchi yöntemi kullanılarak belirlenen optimum seviyelerde her puzolanın tek olarak ikame edildiği durum için YFC OPT. TEK ve UK OPT. TEK kodlu karışımlar hazırlanmıştır. Ancak; silis dumanı, çimentodan yaklaşık olarak 70-90 kat daha küçük taneciklerden oluşan bir puzolan olduğundan deneylerde kullanılan parametre seviyelerinde karışım elde etmek mümkün olmamıştır (s/b oranı ve süper akışkanlaştırıcı sınırlı). %39 UK, %1.5 SA ve %39 YFC, %1.5 SA kullanılarak üretilen tek puzolanlı karışımların basınç dayanımı performansları, belirgin bir şekilde üçlü puzolan kullanılarak üretilen karışımlardan daha düşük çıkmıştır (Guo vd., 2020; Teimortashlu vd., 2018). Bu durum, puzolanların eksik yanlarının birbirini tarafından tolere edildiği şeklinde açıklanabilir. Bu, mikroyapının incelendiği puzolanların tekli kullanıldıkları Şekil 4.37-4.38-4.43 ve 4.44’te verilen SEM görüntülerinden ve üçlü kullanımları olan Şekil 4.39-4.41-4.45 ve 4.47’deki SEM görüntülerinden de anlaşılmaktadır. Puzolanların üçlü kullanımında daha homojen ve kompakt SEM görüntüleri elde edilmiştir.

%6 silis dumanı, %20 yüksek fırın cürufu ve %10 uçucu kül içeren M6 serisi 28 günlük basınç dayanımında en yüksek sonucun elde edildiği puzolanlı seri olmuştur. M6 serisi 28 günlük basınç dayanımında referans seriden yaklaşık %19 oranında daha fazla bir basınç dayanımına ulaşmıştır. Taguchi yöntemi kullanılarak optimum seviyelerin belirlendiği; %9 silis dumanı, %20 yüksek fırın cürufu ve %10 uçucu kül içeren 28 G doğrulama kodlu seri, referans serilerin ortalamasının yaklaşık %10 üzerinde bir basınç dayanımına erişmiştir.

28 günlük basınç dayanımına göre Şekil 4.5 incelendiğinde, özellikle UK ikame oranının %20 olduğu M3 ve M5 serileri basınç dayanımı açısından daha kötü bir performans göstermişlerdir. Diğer yandan 28 günlük kür süresinde birçok serinin basınç dayanımında referans serilerin basınç dayanımlarına yakın sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.5. 28 günlük ortalama basınç dayanım sonuçlarına göre seri performansları

4.2.3. 56 günlük basınç dayanımı

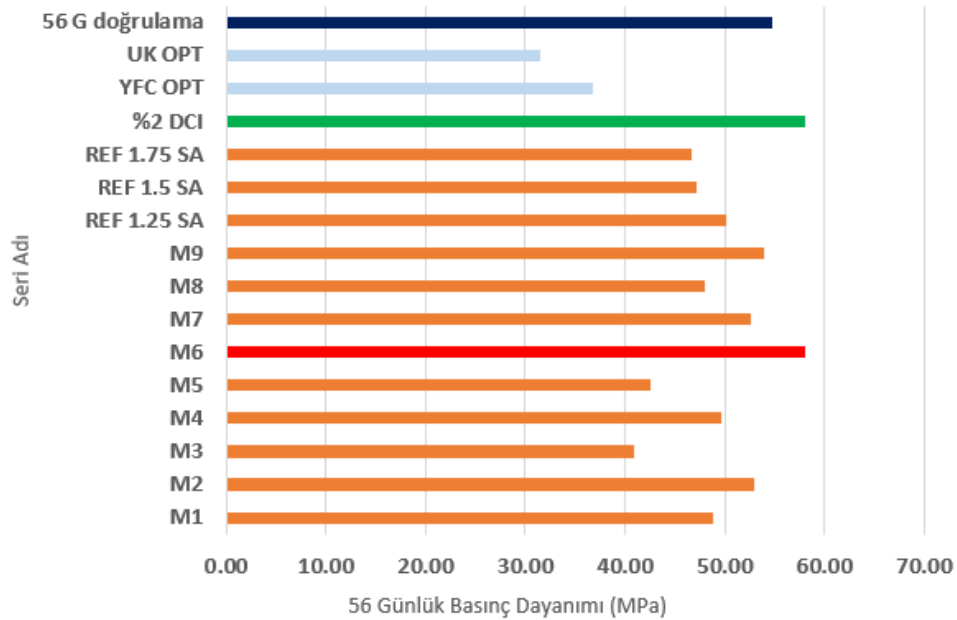
Beton numunelerin 56 günlük kür süresi sonunda basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 4.6' da ve Tablo 4.4' te verilmiştir.

Buna göre serilerin 56 günlük dayanımları Şekil 4.4 'te verilen 28 günlük basınç dayanımlarına göre değerlendirildiğinde; referans serilerde kür süresine bağlı dayanım artışı hemen hemen durmuştur. Ancak, puzolanlı serilerde yaşa bağlı dayanım artışı yüksek oranda devam etmektedir. Bu durum puzolanik reaksiyonların kür ile birlikte sürdüğünün göstergesidir. Kalsiyum nitrit (%2 DCI) çözültisi içeren karışımda 28/56 günlük basınç dayanım artışı sınırlı kalmış ancak bu seri basınç dayanımında yüksek performans göstermiştir. Tüm seriler içerisinde M6 serisi 56 günlük kür süresinde en

yüksek basınç dayanımının elde edildiği seri olmuştur. %44 UK , %1.5 SA ve %44 YFC, %1.5 SA kullanılarak üretilen tek puzolanlı karışımların basınç dayanımı değerleri belirgin bir şekilde üçlü puzolan kullanılarak üretilen karışımlardan daha düşük çıkmıştır (Guo vd., 2020; Teimortashlu vd., 2018). Bu durum, puzolanların eksik yanlarının birbiri tarafından tolere edildiği şeklinde açıklanabilir.

Tablo 4.4. Serilerin 56 günlük basınç dayanımları

Seri	Basınç Dayanımı (MPa)			Ort	Varyans	Ss	Cov %	Yeni Ort
M1	45.33	49.51	51.46	48.77	9.81	3.13	6.42	48.77
M2	56.15	49.38	53.12	52.88	11.50	3.39	6.41	52.88
M3	41.37	41.57	39.68	40.87	1.08	1.04	2.54	40.87
M4	48.65	60.92	50.56	53.38	43.59	6.60	12.37	49.61
M5	43.77	43.93	39.96	42.55	5.05	2.25	5.28	42.55
M6	61.07	59.88	53.48	58.14	16.66	4.08	7.02	58.14
M7	49.14	55.90	52.82	52.62	11.45	3.38	6.43	52.62
M8	44.77	46.77	52.36	47.97	15.48	3.93	8.20	47.97
M9	54.48	53.28	53.98	53.91	0.36	0.60	1.12	53.91
REF 1.25 SA	50.94	47.85	51.43	50.07	3.77	1.94	3.88	47.85
REF 1.50 SA	49.49	43.81	48.38	47.23	9.06	3.01	6.37	45.71
REF 1.75 SA	49.47	51.08	39.68	46.74	38.07	6.17	13.20	46.77
%2 DCI	59.00	56.82	58.12	57.98	1.20	1.10	1.89	57.98
56 G doğ. düzeltme	54.27	55.57	54.57	54.80	0.46	0.68	1.24	54.80
56 G doğ. standart	44.93	52.27	44.80	47.33	18.28	4.28	9.03	47.33
YFC OPT TEK 56	40.06	34.81	35.53	36.80	8.10	2.85	7.73	36.80
UK OPT TEK 56	32.57	31.09	31.04	31.57	0.76	0.87	2.75	31.57

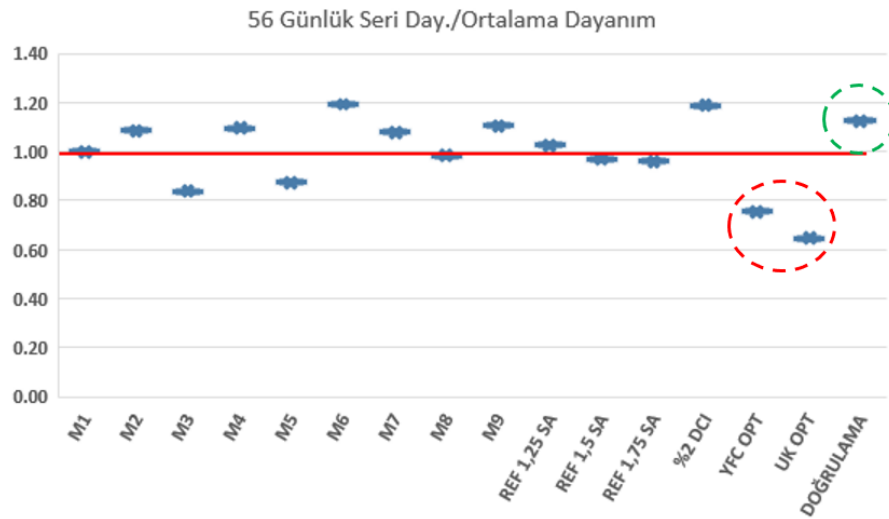


Şekil 4.6. Serilerin 56 günlük ortalama basınç dayanımları

Taguchi yöntemi kullanılarak optimum seviyelerin belirlendiği; %9 silis dumanı, %20 yüksek fırın cürufu ve %15 uçucu kül içeren 56 G doğrulama kodlu seri, referans

serilerin ortalamasının yaklaşık %10 üzerinde bir basınç dayanımına erişmiştir. 56 günlük basınç dayanımı deney tekrarlarında, yüksek varyans değerleri elde edildiğinden iki farklı durumda ortalamalar değişmiş ve Taguchi istatistik analizleri her iki durum için de yapılmıştır. Buna göre optimum seviyelerin değişmesi halinde doğrulama deneyleri iki durumda da yapılarak yüksek basınç dayanımının elde edildiği durum optimum durum olarak göz önünde bulundurulmuştur.

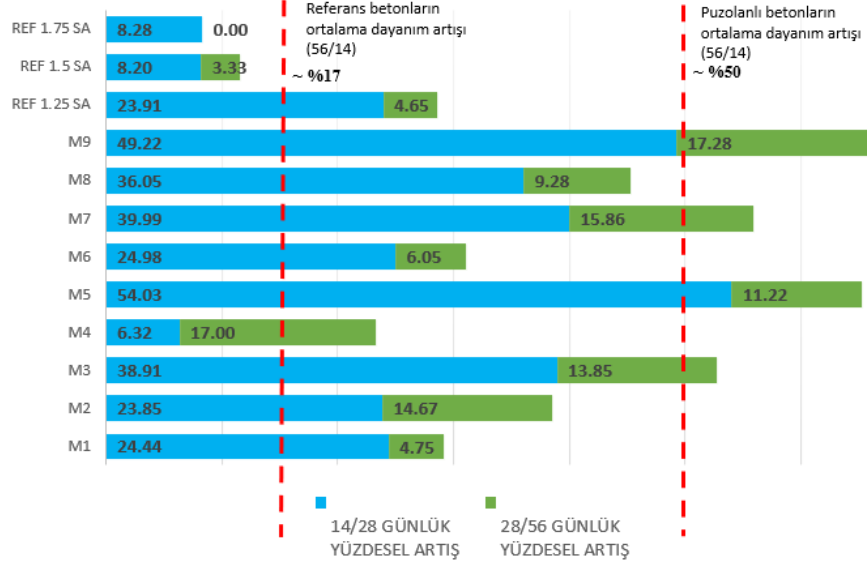
Şekil 4.7 incelendiğinde 56 günlük nihai basınç dayanımında özellikle 14 ve 28 günlük basınç dayanımlarına paralel olarak dayanımı düşük olan puzolanlı seriler (M3, M5) nihai kür süresinde de yeterli dayanım gelişimini gösterememiştir. Diğer yandan 56 günlük kür süresinde M3 ve M5 serileri hariç tüm seriler referans betonun basınç dayanımını yakalamış veya geçmiştir. Basınç dayanımı açısından en kötü performans YFC ve UK' nın tekli puzolan olarak kullanıldığı serilerde elde edilmiştir.



Şekil 4.7. 56 günlük ortalama basınç dayanım sonuçlarına göre seri performansları

Serilerin basınç dayanımı gelişimi Şekil 4.8 'e göre incelendiğinde kür süresinin 14 günden 56 güne çıktığı durumda; en fazla oransal dayanım artışı puzolan oranının fazla olduğu M3, M5, M7 ve M9 serilerinde gerçekleşmiştir.

Puzolanların değişik oranlarda kullanıldığı Taguchi L9 ortogonal dizi serilerinde 14 günden 56 güne basınç dayanım artış oranları ortalama %50 seviyesinde elde edilirken referans serilerde bu ortalama artış %17 olmuştur. Buna sebep olarak sadece bağlayıcı malzeme olarak çimentodan oluşan serilerin hidrasyonunu erken tamamlayarak dayanımın kısa sürede kazanılması gösterilebilir.



Şekil 4.8. Puzolanlı ve referans serilerin kür süresine bağlı dayanım artış oranları

4.3. Ultra Ses Geçiş Hızı (UPV) Deneyi

Tez çalışması kapsamında yapılan ultra ses deneyleri sonucunda beton numunelerin ultra ses dalga hızları ortalama olarak 4.79 km/s – 5.43 km/s arasında bulunmuştur. Kür sürelerine ve beton serilerine göre elde edilmiş ultra ses geçiş hızları Tablo 4.5’te verilmiştir.

Beton kalitesi açısından sonuçlar Tablo 3.14’e göre değerlendirildiğinde serilerdeki tüm betonların çok iyi sınıfta olduğu belirlenmiştir. Buna göre; genel olarak kür süresi artışıyla serilerin basınç dayanımı ve ultra ses geçiş hızları artmıştır. Ancak, basınç dayanımları referans serilere yakın ve daha düşük olan puzolanlı serilerin ultra ses geçiş hızlarının referans betonlardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu duruma; çimentodan daha ince taneli olan puzolanların boşlukları doldurarak daha kompakt bir beton elde edilmesini sağlaması ve puzolanik reaksiyon sonucu ikincil CSH jellerinin oluşmasının sebep olduğu düşünülmektedir (Atabey vd., 2020; Savva, 2001).

28 günlük puzolanlı serilerin ortalama basınç dayanımları 44.37 MPa, ortalama UPV geçiş hızları ise 5.08 km/s olarak bulunmuştur. Diğer yandan 28 günlük referans betonların ortalama basınç dayanımları 46.77 MPa, ortalama UPV geçiş hızları ise 5.02 km/s olmuştur. 28 günlük dayanımlarda referans serilerin ortalama basınç dayanım değerleri puzolanlı serilerden daha fazla iken; UPV geçiş hızları puzolanlı serilerden daha düşük değerler almıştır. Burada ince taneli puzolanların boşlukları doldurarak daha kompakt bir beton yapısı oluşturması etkili olmuştur. 56 günlük puzolanlı serilerin

ortalama basınç dayanımı 50.12 MPa, ortalama UPV geçiş hızları ise 5.19 km/s olmuştur. Diğer yandan 56 günlük referans betonların ortalama basınç dayanımları 48 MPa, ortalama UPV hızları ise 5 km/s olarak bulunmuştur. Tablo 4.5'te verilen 28 ve 56 günlük doğrulama kodlu serilerde sırasıyla optimum parametre seviyeleri SD %9, YFC % 20 ve UK % 10 ve SD %9, YFC % 20 ve UK % 15 olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.5. Serilerin iki farklı kür süresi için tahribatlı/tahribatsız deney sonuçları

	Seri Adı	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	UPV (km/s)			Ortalama UPV (km/s)
28 Günlük tahribatlı/tahribatsız deney sonuçları	M1	46.56	5.050	5.050	5.210	5.10
	M2	46.12	5.210	5.050	5.050	5.10
	M3	35.90	4.785	4.785	4.785	4.79
	M4	42.40	4.902	4.785	5.190	4.96
	M5	38.26	4.785	4.785	4.785	4.79
	M6	54.83	5.545	5.545	5.190	5.43
	M7	45.42	5.190	5.190	5.190	5.19
	M8	43.89	5.050	5.050	5.210	5.10
	M9	45.97	5.190	5.190	5.210	5.20
	REF 1.25 SA	47.85	4.902	5.050	5.050	5.02
	REF 1.50 SA	45.71	5.050	5.050	4.902	5.02
	REF 1.75 SA	46.77	4.902	5.050	5.050	5.02
	%2 DCI	56.69	5.250	5.250	5.250	5.25
	28 G doğrulama	50.35	5.295	5.545	5.210	5.35
56 Günlük tahribatlı/tahribatsız deney sonuçları	M1	48.77	5.190	5.190	5.190	5.19
	M2	52.88	5.295	5.210	5.210	5.25
	M3	40.87	4.902	5.050	4.785	4.92
	M4	53.38	5.295	5.210	5.210	5.25
	M5	42.55	4.785	5.190	4.902	4.96
	M6	58.14	5.545	5.190	5.545	5.43
	M7	52.62	5.210	5.295	5.210	5.25
	M8	47.97	5.190	5.190	5.190	5.19
	M9	53.91	5.295	5.210	5.545	5.35
	REF 1.25 SA	50.07	5.050	5.050	5.210	5.10
	REF 1.50 SA	47.23	5.050	5.050	5.210	5.10
	REF 1.75 SA	46.74	4.902	5.050	5.050	5.02
	%2 DCI	57.98	5.250	5.250	5.250	5.25
	56 G doğrulama	54.80	5.545	5.545	5.190	5.43

4.4. Eğilme Dayanımı

Tez çalışması kapsamında üretilen tüm seriler; 14, 28 ve 56 gün kür süresi sonunda TS 12390-5 standardına uygun olarak eğilme dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Buna göre her karışım serisinden, farklı kür süreleri için 3'er adet

100x100x400 mm prizmatik numune üzerinde deneyler yapılmıştır. Numunelere 14 günlük kür süresi uygulanmasının sebebi özellikle puzolan oranının fazla olduğu serilerde erken yaş dayanımının gelişmemesi ve kalıp alma sürelerindeki gecikme olmuştur. Önceki çalışmalarda da puzolanlarla yapılan deneylerde 14 günlük kür süresi uygulanmıştır (Teimortashlu vd., 2018). Tüm kür yaşlarında eğilme dayanımı deneyine tabi tutulan üç numunenin varyasyon katsayısı (%COV) (ASTM C109/C109M-20, 2020) standardına göre hesaplanmış, buna göre yüksek varyasyon katsayısı elde edilen deney sonuçlarında, yüksek varyasyona sebep olan tekrarlı deney sonucu ortalamaya dahil edilmeyerek yeni ortalamalar bulunmuştur. Bulunan bu yeni ortalamalar ve varyasyon katsayısının göz önünde bulundurulmadığı ortalama deney sonuçlarına göre Taguchi istatistik analizleri yapılmış ve parametre optimizasyonu, oluşan bu iki durum için değerlendirilmiştir. Yapılan istatistik analizlerde doğrulama deney içerikleri iki farklı durum için değişiklik göstermişse hangi içerik hedef performans kriteri için daha iyi bir sonuç veriyorsa optimum karışım içeriği o kabul edilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar ve deney tekrarlarının varyasyon katsayıları Tablo 4.6-4.8 arasında verilmiştir.

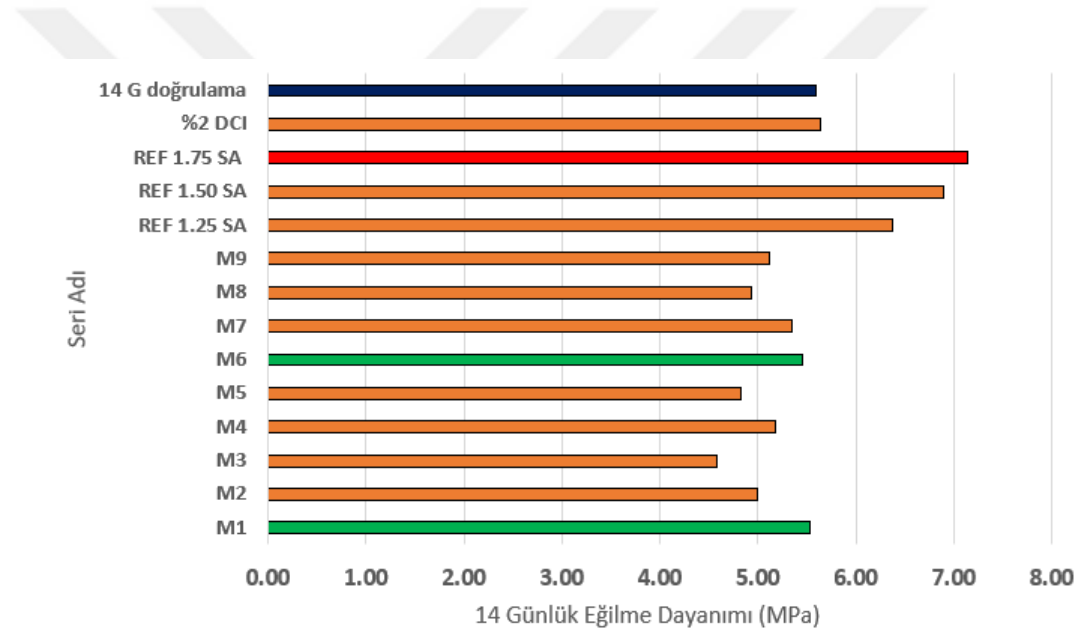
4.4.1. 14 günlük eğilme dayanımı

Tablo 4.6’ da ve Şekil 4.9’ da üretimi yapılan tüm serilerin 14 günlük kür süresi sonunda elde edilen eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.6. Serilerin 14 günlük eğilmede çekme dayanımı sonuçları

Seri	Eğilme dayanımı (MPa)			Ort	Varyans	Ss	Cov%	Yeni ort
M1	5.45	5.13	6.03	5.54	0.21	0.46	8.24	5.54
M2	4.86	4.95	5.18	5.00	0.03	0.17	3.30	5.00
M3	4.55	4.59	4.60	4.58	0.00	0.03	0.58	4.58
M4	4.95	5.27	5.31	5.18	0.04	0.20	3.81	5.18
M5	4.64	4.86	5.00	4.83	0.03	0.18	3.75	4.83
M6	5.31	5.40	5.67	5.46	0.04	0.19	3.43	5.46
M7	5.67	5.09	5.27	5.34	0.09	0.30	5.56	5.34
M8	4.73	4.95	5.13	4.94	0.04	0.20	4.06	4.94
M9	4.91	5.40	5.04	5.12	0.06	0.25	4.96	5.12
REF 1.25 SA	6.48	6.12	6.53	6.38	0.05	0.22	3.51	6.38
REF 1.50 SA	7.07	6.80	6.80	6.89	0.02	0.16	2.26	6.89
REF 1.75 SA	6.84	6.89	7.70	7.14	0.23	0.48	6.76	7.14
%2 DCI	5.63	5.31	5.99	5.64	0.12	0.34	6.03	5.64
14 G doğrulama	5.67	5.49	5.63	5.60	0.01	0.09	1.69	5.60

Buna göre L9 ortogonal diziye ait; %6 SD, %20 YFC ve %10 UK içeren M6 serisi ve %3 SD, %10 YFC ve %10 UK içeren M1 serisi 14 günlük eğilmede çekme dayanımı sonuçlarına göre puzolanlı serilerden maksimum dayanımın elde edildiği seriler olmuştur. Diğer yandan tüm seriler içerisinde referans betonların eğilmede çekme dayanımları yüksek değerler almıştır. Buna sebep olarak, puzolanların erken yaşlarda dayanım üzerindeki etkisi gösterilebilir. Referans serilerde süper akışkanlaştırıcı miktarının artması; işlenebilirlik ve yerleşme özelliklerini iyileştirdiğinden dayanımları olumlu yönde etkilemiştir. 14 günlük kür süresinde yapılan eğilme dayanım deneylerinde, deney tekrarlarının varyasyon katsayıları düşük olduğundan ortalamalar değişmemiş istatistik analizlerde verileceği üzere tek bir durum için Taguchi analizleri yapılmıştır. Tablo 4.6' da verilen doğrulama kodlu seri %6 SD, %10 YFC ve %10 UK içermektedir.



Şekil 4.9. Serilerin 14 günlük ortalama eğilmede çekme dayanımları

4.4.2. 28 günlük eğilme dayanımı

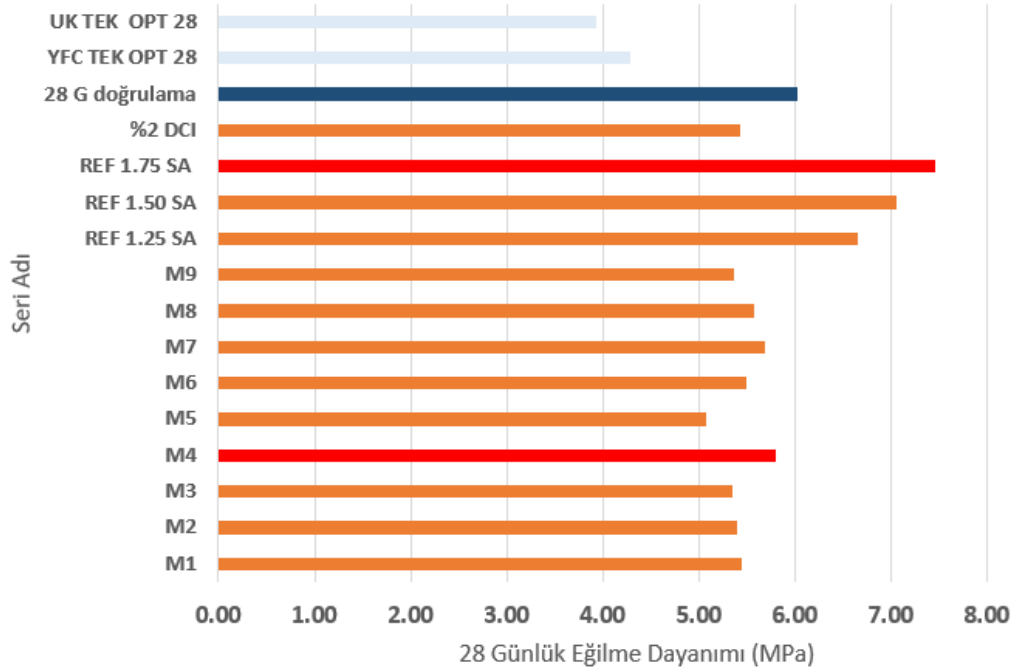
Tablo 4.7 ve Şekil 4.10' da üretimi yapılan tüm serilerin 28 günlük kür süresi sonunda elde edilen eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları verilmiştir.

Buna göre L9 ortogonal diziye ait; %6 SD, %10 YFC ve %15 UK içeren M4 serisi 28 günlük eğilmede çekme dayanımı sonuçlarına göre puzolanlı serilerden maksimum dayanımın elde edildiği seri olmuştur. Diğer yandan 28 günlük kür süresinde, tüm seriler içerisinde referans betonların eğilmede çekme dayanımları yüksek değerler almıştır. Puzolanların optimum seviyelerde tekli kullanımlarından, basınç dayanımında olduğu

gibi 28 günlük eğilme dayanımında da 3'lü kullanımlarına göre daha kötü sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4.7. Serilerin 28 günlük eğilmede çekme dayanım sonuçları

Seri	Eğilme dayanımı			Ort	Varyans	Ss	Cov%	Yeni ort
M1	5.58	5.40	5.34	5.44	0.02	0.12	2.30	5.44
M2	5.76	5.13	5.31	5.40	0.11	0.32	6.01	5.40
M3	5.22	5.49	5.36	5.36	0.02	0.14	2.52	5.36
M4	5.90	5.72	5.76	5.79	0.01	0.09	1.63	5.79
M5	4.64	5.36	5.22	5.07	0.15	0.38	7.52	5.07
M6	5.49	5.36	5.63	5.49	0.02	0.14	2.46	5.49
M7	5.85	5.45	5.76	5.69	0.04	0.21	3.69	5.69
M8	4.68	6.21	5.81	5.57	0.63	0.79	14.25	6.01
M9	5.31	5.90	4.86	5.36	0.27	0.52	9.74	5.60
REF 1.25 SA	6.71	6.26	6.98	6.65	0.13	0.36	5.47	6.65
REF 1.50 SA	6.62	7.34	7.20	7.05	0.15	0.38	5.41	7.05
REF 1.75 SA	7.20	7.70	7.47	7.46	0.06	0.25	3.36	7.46
%2 DCI	5.67	5.45	5.18	5.43	0.06	0.25	4.52	5.43
28 G doğrulama düzeltilmiş	6.39	5.99	5.67	6.02	0.14	0.38	6.42	6.02
28 G doğrulama standart	5.90	6.01	5.85	5.92	0.01	0.08	1.38	5.92
YFC TEK OPT 28	4.01	4.28	4.59	4.29	0.04	0.20	4.67	4.29
UK TEK OPT 28	3.96	3.92	3.92	3.93	0.00	0.02	0.54	3.93



Şekil 4.10. Serilerin 28 günlük ortalama eğilmede çekme dayanımları

Ancak tekli kullanılan puzolanlardan; yüksek fırın cürufu içeren numunelerin eğilme dayanımları, uçucu kül içeren tekli numunelerden daha yüksek olmuştur. Referans

serilerde süper akışkanlaştırıcı miktarının artması; işlenebilirlik ve yerleşme özelliklerini iyileştirdiğinden dolayı dayanımları olumlu yönde etkilemiştir. Doğrulama kodlu seri %9 SD, %10 YFC ve % 10 UK içeren Taguchi yöntemi tarafından belirlenen optimum içeriğe sahip seridir. YFC ve UK TEK kodlu seriler doğrulama kodlu serinin optimum toplam puzolan içeriğine sahiptir. Optimum karışım içeriğine sahip doğrulama kodlu seri; en yüksek dayanımına sahip L9 ortogonal dizi serisinden (M4) yaklaşık %8 daha fazla dayanım gösterirken TEK kodlu serilerden yaklaşık %50 daha fazla dayanım göstermiştir.

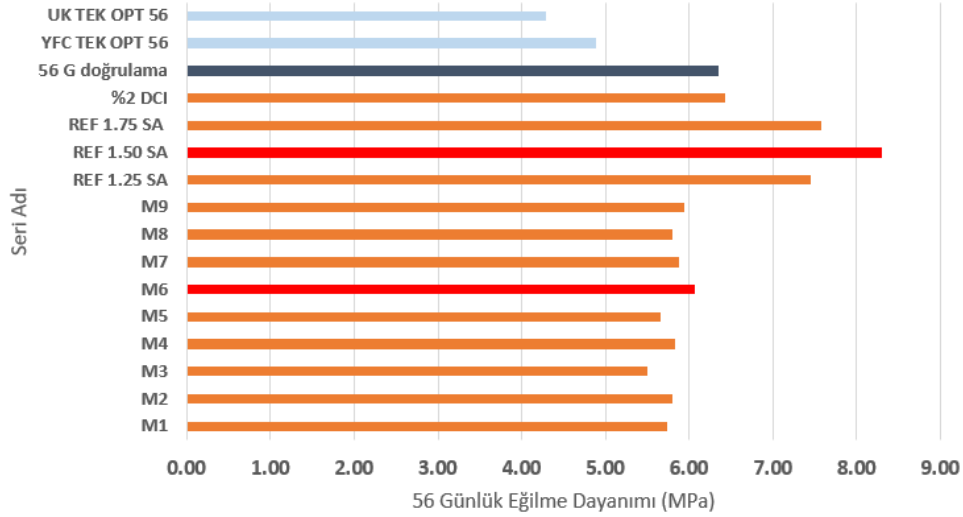
4.4.3. 56 günlük eğilme dayanımı

Tablo 4.8 ve Şekil 4.11’de üretimi yapılan tüm serilerin 56 günlük kür süresi sonunda elde edilen eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları verilmiştir.

Buna göre L9 ortogonal diziyne ait; %6 SD, %20 YFC ve %10 UK içeren M6 serisi 56 günlük eğilmede çekme dayanımı sonuçlarına göre puzolanlı serilerden maksimum dayanımın elde edildiği seri olmuştur. Diğer yandan tüm seriler içerisinde referans betonların eğilmede çekme dayanımları yüksek değerler almıştır. Puzolanların optimum seviyelerde tekli kullanımları, 28 günlük eğilme dayanımında olduğu gibi 56 günlük eğilme dayanımında da 3’lü kullanımlarına göre daha düşük sonuçlar vermiştir. Ancak tekli kullanılan puzolanlardan; yüksek fırın cürufu içeren numunelerin eğilme dayanımları, uçucu kül içeren tekli numunelerden daha yüksek olmuştur. Referans serilerde süper akışkanlaştırıcı miktarının artması; işlenebilirlik ve yerleşme özelliklerini iyileştirdiğinden dayanımları olumlu yönde etkilemiştir. Doğrulama kodlu seri %9 SD, %20 YFC ve %10 UK içeren seridir. Buna göre doğrulama kodlu serinin dayanımı, M6 serisinden %5 oranında daha fazla olurken TEK kodlu serilerden yaklaşık olarak %30 daha fazla olmuştur. Eğilme dayanımı deney sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde tüm yaşlarda eğilme dayanımı; referans betonlardan daha düşük çıkmıştır. Özellikle silis dumanı gibi çimentodan daha ince tanecik yapısına sahip puzolanların kullanılması betonda büzülme rötresine bağlı olarak mikro çatlakların oluşumuna neden olmuş olabilir (Hınıslıoğlu ve Bayrak, 2007; Toutanji ve Bayasi, 1999). Eğilme numunelerinin en fazla hacme sahip olan numuneler olduğu düşünüldüğünde bu durumun daha belirgin oluşması beklenebilir. Oluşabilecek bu çatlakların, eğilme mukavemeti üzerinde basınç mukavemetinden daha belirgin etkiye sahip olması numunede oluşan gerilme türü ile ilgilidir.

Tablo 4.8. Serilerin 56 günlük eğilmede çekme dayanımı sonuçları

Seri	Eğilme dayanımı (MPa)			Ort	Varyans	Ss	Cov%	Yeni ort
M1	5.82	5.70	5.67	5.73	0.01	0.08	1.39	5.73
M2	5.76	5.63	5.99	5.79	0.03	0.18	3.15	5.79
M3	5.45	5.54	5.5	5.50	0.00	0.05	0.82	5.50
M4	6.09	5.86	5.53	5.83	0.08	0.28	4.83	5.83
M5	5.81	5.76	5.40	5.66	0.05	0.22	3.95	5.66
M6	6.00	6.14	6.04	6.06	0.01	0.07	1.19	6.06
M7	5.81	5.76	6.08	5.88	0.03	0.17	2.93	5.88
M8	5.92	5.58	5.90	5.80	0.04	0.19	3.29	5.80
M9	5.88	6.06	5.88	5.94	0.01	0.10	1.75	5.94
REF 1.25 SA	7.42	7.31	7.36	7.36	0.03	0.17	2.26	7.36
REF 1.50 SA	8.10	8.28	8.51	8.30	0.04	0.21	2.48	8.30
REF 1.75 SA	7.88	7.25	7.61	7.58	0.10	0.32	4.17	7.46
%2 DCI	6.44	6.44	6.39	6.40	0.00	0.00	0.40	6.40
56 G doğrulama	6.57	6.35	6.12	6.35	0.10	0.20	3.50	6.35
YFC TEK OPT 56	4.95	4.82	5.90	5.22	0.30	0.60	11.30	4.89
UK TEK OPT 56	5.09	4.50	4.05	4.55	0.30	0.50	11.50	4.28

**Şekil 4.11.** Serilerin 56 günlük ortalama eğilmede çekme dayanımları

4.5. Yarmada Çekme Dayanımı

Tez çalışması kapsamında; hazırlanan karışımlardan elde edilen numuneler 14, 28 ve 56 gün kür süresi sonunda (TS EN 12390-6, 2010) standardına uygun olarak yarmada çekme deneyine tabi tutulmuştur. Buna göre her karışım serisinden, farklı kür süreleri için 3'er adet $d100 \times l200$ mm boyutundaki silindir numune üzerinde deneyler yapılmıştır. Numunelere 14 günlük kür süresi uygulanmasının sebebi özellikle puzolan oranının fazla olduğu serilerde erken yaş dayanımının gelişmemesi ve kalıp alma sürelerindeki gecikme gösterilebilir. Önceki çalışmalarda da puzolanlarla yapılan deneylerde 14 günlük kür süresi uygulanmıştır (Teimortashlu vd., 2018). Tüm kür yaşlarında çekme dayanım

deneyine tabi tutulan üç numunenin varyasyon katsayısı (%COV) (ASTM C109/C109M-20, 2020) standardına göre hesaplanmış, buna göre %8.7'den daha yüksek varyasyon katsayısı elde edilen deney sonuçlarında, yüksek varyasyona sebep olan tekrarlı deney ortalamaya dahil edilmeyerek yeni ortalamalar bulunmuştur. Deneylerden elde edilen sonuçlar ve deney tekrarlarının varyasyon katsayıları Tablo 4.9-4.11 arasında verilmiştir.

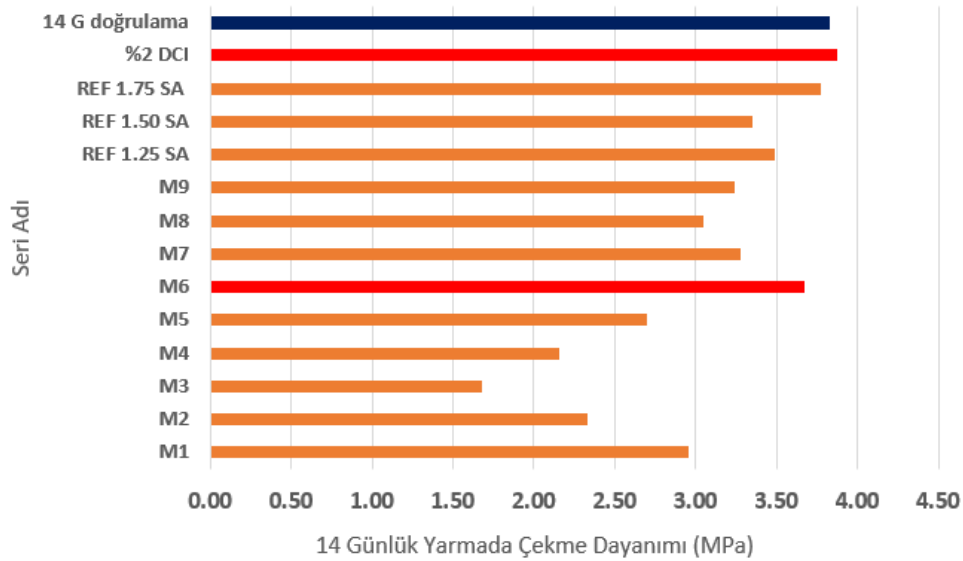
4.5.1. 14 günlük yarmada çekme dayanımı

Tablo 4.9 ve Şekil 4.12' de üretimi yapılan tüm serilerin 14 günlük kür süresi sonunda elde edilen yarmada çekme dayanımı deney sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.9. Serilerin 14 günlük yarmada çekme dayanımı sonuçları

Seri	Çekme dayanımı (MPa)			Ort	Varyans	Ss	Cov%	Yeni ort
M1	3.14	2.94	2.78	2.95	0.03	0.18	6.11	2.95
M2	2.47	2.36	2.17	2.33	0.02	0.15	6.50	2.33
M3	1.81	1.58	1.64	1.68	0.01	0.12	7.12	1.68
M4	2.13	2.25	2.09	2.16	0.01	0.08	3.86	2.16
M5	2.65	2.70	2.74	2.70	0.00	0.05	1.67	2.70
M6	3.48	3.72	3.82	3.67	0.03	0.17	4.76	3.67
M7	3.19	3.41	3.23	3.28	0.01	0.12	3.58	3.28
M8	3.03	3.18	2.93	3.05	0.02	0.13	4.13	3.05
M9	3.13	3.39	3.20	3.24	0.02	0.13	4.15	3.24
REF 1.25 SA	3.50	3.48	3.49	3.49	0.00	0.01	0.29	3.49
REF 1.50 SA	3.66	3.21	3.19	3.35	0.06	0.24	7.14	3.35
REF 1.75 SA	3.57	3.92	3.83	3.77	0.03	0.18	4.70	3.77
%2 DCI	3.65	3.88	4.09	3.87	0.02	0.16	4.08	3.87
14 G doğrulama	3.87	3.85	3.76	3.83	0.00	0.03	0.91	3.83

Buna göre L9 ortogonal diziye ait; %6 SD, %20 YFC ve %10 UK içeren M6 serisi 14 günlük yarmada çekme dayanımı sonuçlarına göre puzolanlı serilerden maksimum dayanımın elde edildiği seri olmuştur. Diğer seriler içerisinde referans betonların yarmada çekme dayanımları yüksek değerler almıştır. Puzolanlı serilerin çoğunda referans betonların dayanımından daha az değer elde edilmiştir. Buna sebep olarak erken yaşlarda puzolanların dayanım üzerindeki etkisi gösterilebilir. Ayrıca kalsiyum nitrit (DCI) içeren karışımın 14 günlük çekme dayanımı tüm seriler içinde en yüksek çekme dayanımının elde edildiği seri olmuştur. Basınç dayanımında olduğu gibi yarmada çekme dayanımında da erken yaşlarda kalsiyum nitrit dayanımı artırmıştır. Doğrulama kodlu seri %9 SD, %10 YFC ve %10 UK içeren seridir. Buna göre doğrulama kodlu seri, M6 serisinden yaklaşık %5 ve en fazla dayanımın elde edildiği referans seriden yaklaşık %10 daha fazla çekme dayanımı göstermiştir.



Şekil 4.12. Serilerin 14 günlük ortalama yarmada çekme dayanımları

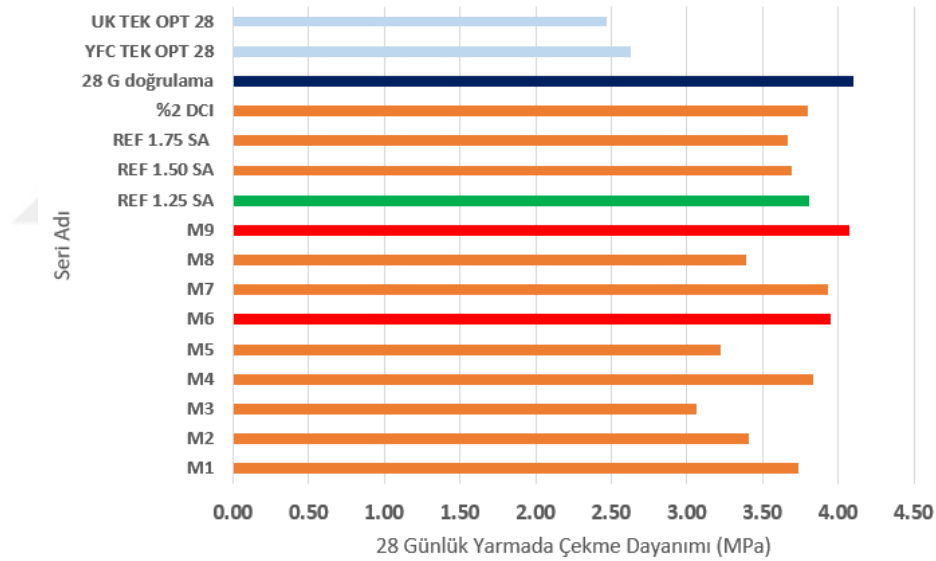
4.5.2. 28 günlük yarmada çekme dayanımı

Tablo 4.10 ve Şekil 4.13 'te üretimi yapılan tüm serilerin 28 günlük kür süresi sonunda elde edilen yarmada çekme dayanımı deney sonuçları verilmiştir.

Buna göre L9 ortogonal diziye ait; %9 SD, %20 YFC ve %15 UK içeren M9 serisi ve %6 SD, %20 YFC ve %10 UK içeren M6 serisi 28 günlük yarmada çekme dayanımı sonuçlarına göre puzolanlı serilerden en yüksek dayanımın elde edildiği seriler olmuştur. Puzolanlı serilerin çoğu yarmada çekme dayanımı açısından referans serileri yakalamıştır. Basınç ve eğilmede çekme dayanımında olduğu gibi puzolanların tekli kullanımları, üçlü kullanımlarına göre daha düşük yarmada çekme dayanımı göstermiştir. Buna göre doğrulama kodlu seri Taguchi optimizasyon analizlerine göre %9 SD, %10 YFC ve %15 UK içeren seridir. TEK kodlu seriler de doğrulama kodlu serinin toplam puzolan içeriği oranında puzolan içermektedir. Doğrulama kodlu seri yüksek dayanımın elde edildiği M6 serisinden yaklaşık %4 daha fazla dayanım gösterirken TEK kodlu serilerden yaklaşık olarak %60 oranında daha fazla dayanım göstermiştir. Taguchi yöntemi kullanılarak belirlenen optimum toplam puzolan içeriğinde YFC'nin tekli kullanımı basınç ve eğilme dayanımlarında olduğu gibi yarmada çekme dayanımında da UK'nın tekli kullanımından daha yüksek dayanım vermiştir. Referans serilerde farklı süper akışkanlaştırıcı miktarı kullanımı yarmada çekme dayanımını önemli ölçüde etkilememiştir. %2 oranında kalsiyum nitrit (DCI) içeren serinin 28 günlük yarmada çekme dayanımı referans betonların dayanımına yakın olmuştur.

Tablo 4.10. Serilerin 28 günlük yarmada çekme dayanımı sonuçları

Seri	Çekme Dayanımı (MPa)			Ort	Varyans	Ss	Cov%	Yeni Ort
M1	3.76	3.92	3.54	3.74	0.04	0.19	5.10	3.74
M2	3.51	3.61	3.12	3.41	0.07	0.26	7.59	3.41
M3	3.25	3.12	2.83	3.07	0.05	0.22	7.01	3.07
M4	4.01	3.72	3.77	3.83	0.02	0.16	4.04	3.83
M5	3.22	3.35	3.11	3.23	0.01	0.12	3.72	3.23
M6	3.96	4.13	3.76	3.95	0.03	0.19	4.69	3.95
M7	3.92	3.97	3.90	3.93	0.00	0.04	0.92	3.93
M8	3.49	3.30	3.39	3.39	0.01	0.10	2.80	3.39
M9	3.98	4.29	3.95	4.07	0.04	0.19	4.62	4.07
REF 1.25 SA	3.81	3.85	3.77	3.81	0.00	0.03	0.74	3.81
REF 1.50 SA	3.55	3.81	3.73	3.70	0.02	0.13	3.55	3.70
REF 1.75 SA	3.72	3.76	3.52	3.67	0.01	0.08	2.07	3.67
%2 DCI	3.70	4.18	3.51	3.80	0.08	0.28	7.36	3.80
28 G doğrulama	4.10	4.32	3.88	4.10	0.02	0.16	3.79	4.10
YFC TEK OPT 28	2.66	2.66	2.56	2.63	0.00	0.03	1.14	2.63
UK TEK OPT 28	2.31	2.60	2.51	2.47	0.02	0.15	5.90	2.47

**Şekil 4.13.** Serilerin 28 günlük ortalama yarmada çekme dayanımları

4.5.2. 56 günlük yarmada çekme dayanımı

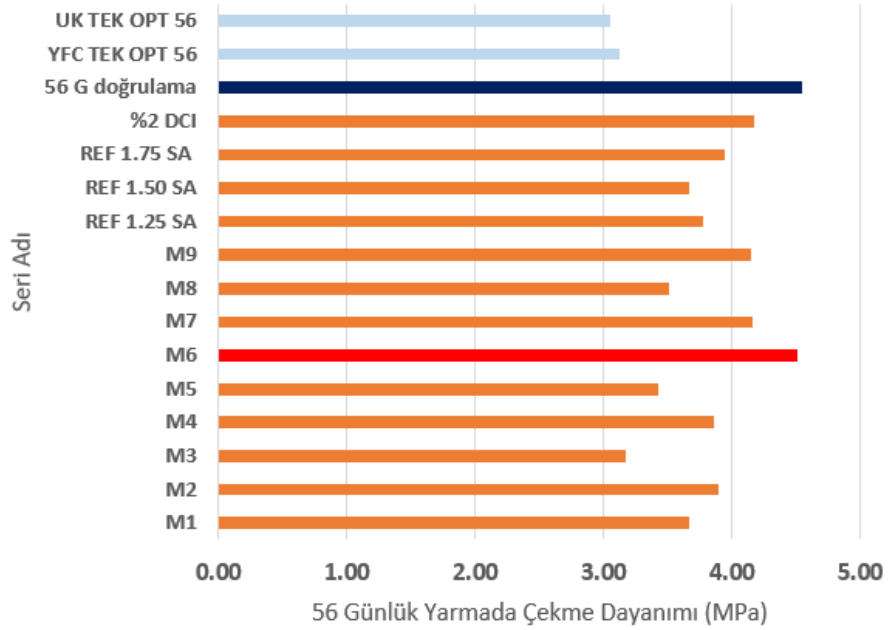
Tablo 4.11 ve Şekil 4.14' te üretimi yapılan tüm serilerin 56 günlük kür süresi sonunda elde edilen yarmada çekme dayanımı deney sonuçları verilmiştir.

Buna göre L9 ortogonal diziye ait; %6 SD, %20 YFC ve %10 UK içeren M6 serisi 56 günlük yarmada çekme dayanımı sonuçlarına göre puzolanlı serilerden maksimum dayanımın elde edildiği seri olmuştur. Basınç ve eğilmede çekme dayanımında olduğu gibi puzolanların tekli kullanımları, üçlü kullanımlarına göre daha düşük yarmada çekme dayanımı göstermiştir. Puzolanlı serilerin çoğu, 56 günlük yarmada çekme dayanımında

referans serilerin dayanım değerlerinin üstüne çıkmıştır. Referans seride süper akışkanlaştırıcı oranı çekme dayanımında anlamlı bir değişikliğe sebep olmamıştır. Doğrulama kodlu seri Taguchi istatistik analizlerine göre belirlenmiş %9 SD, %20 YFC ve %15 UK içeren seridir. Buna göre doğrulama kodlu seri, M6 serisi ile hemen hemen aynı dayanımı gösterirken TEK kodlu serilerden yaklaşık olarak %50 oranında daha fazla dayanım göstermiştir.

Tablo 4.11. Serilerin 56 Günlük Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçları

Seri	Çekme dayanımı (MPa)			Ort	Varyans	Ss	Cov%	Yeni ort
M1	3.51	3.64	3.85	3.67	0.03	0.17	4.68	3.67
M2	3.59	4.24	3.85	3.89	0.11	0.33	8.40	3.89
M3	3.24	3.21	3.07	3.17	0.01	0.09	2.86	3.17
M4	3.72	4.06	3.81	3.86	0.03	0.18	4.56	3.86
M5	3.52	3.6	3.16	3.43	0.05	0.23	6.84	3.43
M6	4.61	4.71	4.2	4.51	0.07	0.27	6.00	4.51
M7	4.04	4.48	3.97	4.16	0.08	0.28	6.64	4.16
M8	3.51	3.67	3.34	3.51	0.03	0.17	4.71	3.51
M9	4.29	4.15	4.01	4.15	0.02	0.14	3.37	4.15
REF 1.25 SA	3.54	3.98	3.81	3.78	0.05	0.22	5.84	3.78
REF 1.50 SA	3.69	3.49	3.82	3.67	0.02	0.13	3.44	3.67
REF 1.75 SA	3.87	4.05	3.92	3.95	0.01	0.09	2.31	3.95
%2 DCI	4.02	4.31	4.2	4.18	0.02	0.15	3.48	4.18
56 G doğrulama	4.34	4.66	4.64	4.55	0.03	0.17	3.67	4.55
YFC TEK OPT 56	2.91	3.23	3.22	3.12	0.03	0.17	5.37	3.12
UK TEK OPT 56	2.61	3.3	3.25	3.05	0.13	0.36	11.73	3.05



Şekil 4.14. Serilerin 56 günlük ortalama yarmada çekme dayanımları

4.6. Su Emme Yüzdesi

Su emme yüzdesi deneyleri 28 ve 56 günlük prizmatik numunelere uygulanmıştır. Buna göre önceden etüv kurusu ağırlıkları belirlenmiş numuneler, su içinde bekletilip yüzeyleri kurutulduktan sonra tartılmış daha sonra bulunan suya doygun ağırlıktan kuru ağırlık çıkartılıp sonuç kuru ağırlığa bölünerek numunelerin su emme yüzdeleri belirlenmiştir (ASTM C642-21, 2021; Uysal ve Yılmaz, 2012). Su emme yüzdesi deneyi her seri için 3 numuneye uygulanarak deney sonuçlarının ortalaması alınmıştır. Serilerin 28 ve 56 günlük kür süresi sonunda su emme oranları sırasıyla Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’ da ve su emme oranı deney sonuçları sırasıyla Tablo 4.12 ve Tablo 4.13’ te verilmiştir.

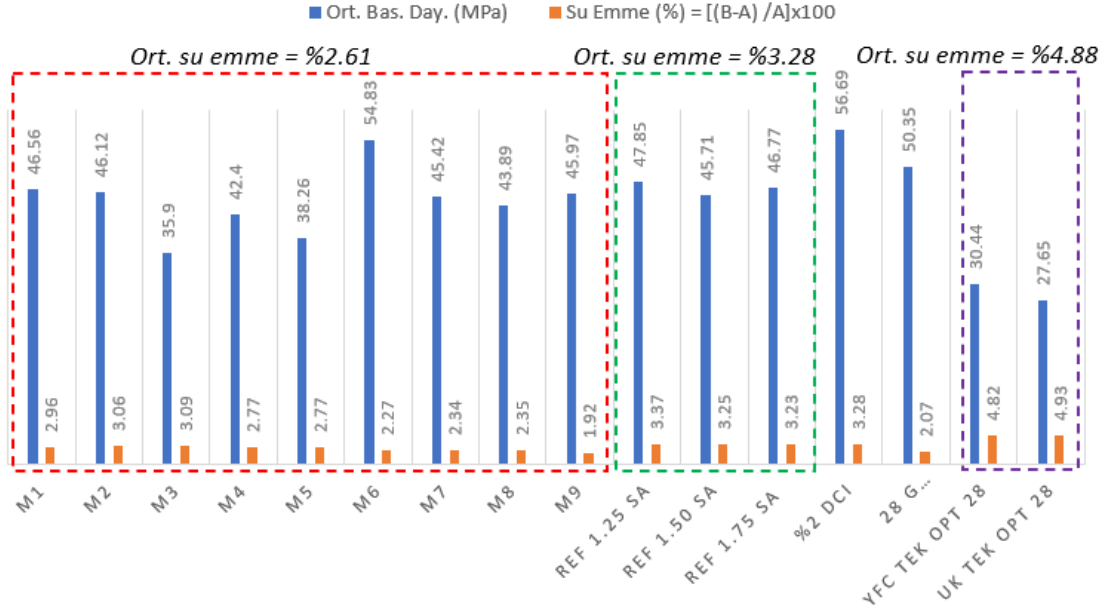
Tablo 4.12. Serilerin 28 günlük su emme yüzdesi değerleri

Seri	Ort. bas. day. (MPa)	Su emme (%) = [(B-A) / A]x100			Ort
M1	46.56	2.98	3.00	2.90	2.96
M2	46.12	3.10	2.98	3.10	3.06
M3	35.90	3.05	3.10	3.12	3.09
M4	42.40	2.68	2.84	2.79	2.77
M5	38.26	2.70	2.86	2.75	2.77
M6	54.83	2.20	2.36	2.25	2.27
M7	45.42	2.26	2.42	2.34	2.34
M8	43.89	2.29	2.44	2.32	2.35
M9	45.97	1.84	2.00	1.92	1.92
REF 1.25 SA	47.85	3.28	3.51	3.32	3.37
REF 1.50 SA	45.71	3.11	3.23	3.41	3.25
REF 1.75 SA	46.77	3.14	3.31	3.24	3.23
%2 DCI	56.69	3.19	3.26	3.39	3.28
28 G doğrulama	50.35	2.01	2.11	2.09	2.07
YFC TEK OPT 28	30.44	4.70	4.84	4.92	4.82
UK TEK OPT 28	27.65	4.90	4.94	4.95	4.93

28 günlük su emme oranı değerlerine göre puzolan ikameli serilerin genel ortalama su emme yüzdeleri referans serilerden yaklaşık %20 oranında daha az olmuştur. Puzolanların sağladığı filler etkisi daha kompakt beton elde edilmesini sağlamıştır. Diğer yandan puzolanlı serilerden su emme oranının en az olduğu seri %9 SD, %20 YFC ve %15 oranında UK içeren ve toplam puzolan ikame oranı en fazla olan M9 serisi olmuştur. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun su emme yüzdesi açısından tekli olarak toplam %39 (%9 SD, %20 YFC, %10 UK) oranında kullanıldığı optimum durumda, betonların su emme yüzdeleri yüksek değerler almıştır. Puzolanların 3’lü kullanımlarının önemi su emme yüzdesinde de ortaya çıkmıştır.

Tablo 4.13. Serilerin 56 günlük su emme yüzdesi değerleri

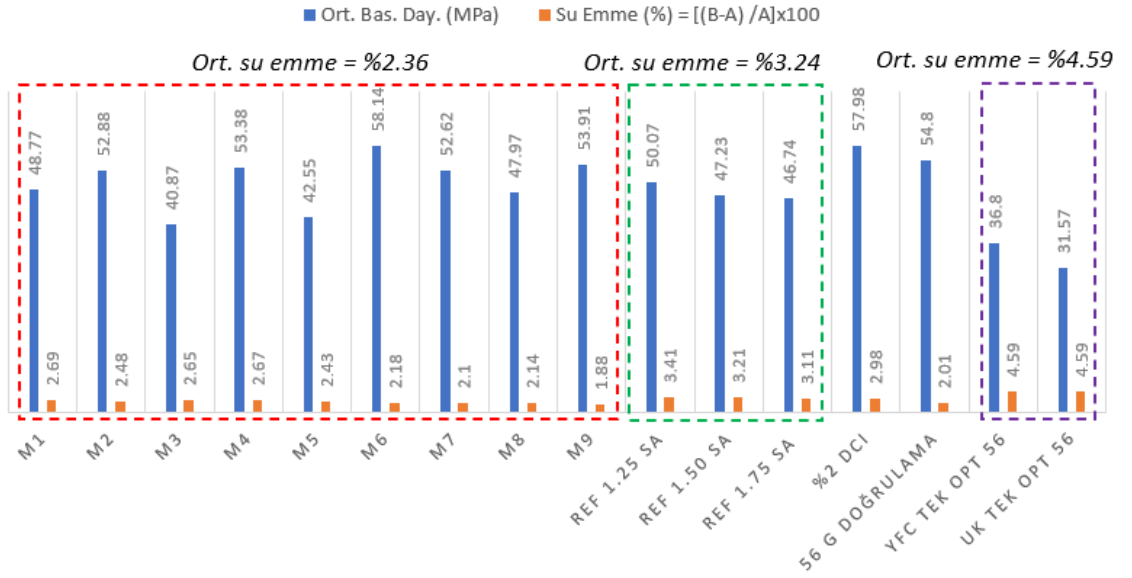
Seri	Ort. bas. day. (MPa)	Su emme (%) = [(B-A) / A]x100			Ort
M1	48.77	2.54	2.74	2.79	2.69
M2	52.88	2.45	2.53	2.46	2.48
M3	40.87	2.58	2.66	2.71	2.65
M4	53.38	2.64	2.76	2.61	2.67
M5	42.55	2.39	2.52	2.38	2.43
M6	58.14	2.11	2.23	2.20	2.18
M7	52.62	2.02	2.12	2.16	2.10
M8	47.97	2.09	2.13	2.20	2.14
M9	53.91	1.79	1.86	1.99	1.88
REF 1.25 SA	50.07	3.28	3.51	3.32	3.41
REF 1.50 SA	47.23	3.11	3.23	3.41	3.21
REF 1.75 SA	46.74	3.14	3.31	3.24	3.11
%2 DCI	57.98	3.19	3.26	3.39	2.98
28 G doğrulama	54.80	2.01	2.11	2.09	2.01
YFC TEK OPT 28	36.80	4.70	4.84	4.92	4.59
UK TEK OPT 28	31.57	4.90	4.94	4.95	4.59

**Şekil 4.15.** 28 günlük serilerin su emme oranları

56 günlük su emme oranı değerlerine göre puzolan ikameli serilerin genel ortalama su emme yüzdeleri referans serilerden yaklaşık %27 oranında daha az olmuştur. Puzolanlar filler etkisi sayesinde daha kompakt beton elde edilmesini sağlamıştır.

28 günlük deney sonuçlarına göre bu oranın artması puzolanik reaksiyonların devam etmesine bağlı olarak geçirimsizliğin azalmasına bağlanabilir. Referans serilerde 56 günlük kür süresinde su emme yüzdesi 28 günlük kür süresine göre ortalama %1.22

azalırken L9 ortogonal dizi serilerinde bu azalma %9.6 olmuştur. Bu durum; referans beton için reaksiyonların büyük ölçüde tamamlandığının ancak puzolanlı serilerde reaksiyonların devam ederek betonda dayanıklılık açısından iyileşmenin devam ettiğinin göstergesidir. Diğer yandan 28 günlük sonuçlarda olduğu gibi puzolanlı serilerden su emme oranının en az olduğu seri %9 SD, %20 YFC ve %15 oranında UK içeren ve toplam puzolan ikame oranı en fazla olan M9 serisi olmuştur. UK ve YFC nin su emme yüzdesi açısından toplam %44 (%9 SD, %20 YFC ve %15 UK) oranında tekli olarak kullanıldığı optimum durumda, betonların su emme yüzdeleri yüksek değerler almıştır. Puzolanların 3'lü kullanımlarının önemi su emme yüzdesinde de ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.16. 56 günlük serilerin su emme oranları

4.7. Hızlandırılmış Korozyon Deneyi

Sadece Portland çimentosundan oluşan betonlarda, tezde kullanılan süper akışkanlaştırıcı miktarının betonun mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemediği deneylerle belirlendiğinden hızlandırılmış korozyon deneylerinde sadece %1.25 süper akışkanlaştırıcı içeren referans beton deneylere tabi tutulmuştur. Akışkanlaştırıcı dozajının %1.25 seçilmesinin sebebi referans betonlar içerisinde 28 günlük basınç dayanımının en fazla elde edildiği durum olmasıdır. Korozyon deneyleri, tez kapsamında puzolanların etkinliklerinin 28 günde görülmesinden dolayı ve standartlara göre betonda 28 günlük dayanımın nihai dayanım olarak kullanılmasından dolayı 28 günlük donatılı numunelere uygulanmıştır.

Referans betonun ortalama akım çekme miktarlarına göre belirlenen süreler, tüm serilere uygulanmış serilerin akım çekme karakteristiklerine göre elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler bu bölümde verilmiştir. Buna göre referans beton 27 saat süre sonunda Faraday denklemine göre %2 korozyon seviyesine (K2), 64 saat süre sonunda %4 korozyon seviyesine (K4) ve 122 saat sonunda %6 korozyon seviyesine (K6) ulaşmıştır. 27 saat boyunca 20 V sabit voltaj (K2) altında serilerin çekmiş oldukları akımlar Tablo 4.14 ve Şekil 4.17’de verilmiştir.

Tablo 4.14. K2 durumu uygulanan seriler tarafından çekilen akımlar

Seri Adı	Deney tekrarında çekilen ortalama akım (Amper)	Çekilen ortalama akım (Amper)	Çekilen ortalama akım (miliAmper)
REF	0.05200 0.04990	0.0510	51.0
%2 DCI	0.05200 0.04760	0.0498	49.8
M1	0.01580 0.01520	0.0155	15.5
M2	0.01490 0.01100	0.0130	13.0
M3	0.01240 0.01200	0.0120	12.0
M4	0.00700 0.00760	0.0073	7.30
M5	0.00878 0.01085	0.0098	9.80
M6	0.00673 0.00718	0.00696	6.96
M7	0.00555 0.00558	0.0056	5.60
M8	0.00399 0.00413	0.0040	4.00
M9	0.00601 0.00562	0.0058	5.80
Ort. Çek. Ak.	0.00600	0.0066	6.6
Doğ.	0.00720		
Ort. % Ağ.	0.00670	0.0067	6.7
Kay. Doğ.	0.00670		
Mak.Aderans	0.00700	0.0070	7.0
(τ_u) Doğ.	0.00700		
TTE Doğ.	0.00800	0.0077	7.7
	0.00740		

28 gün kürde bekletildikten sonra havuzdan çıkarılan lolipop numunelere Faraday denklemine göre referans betonun %2 kütle kaybına tekabül eden 27 saatlik korozyon süresi (K2) uygulanmıştır. Buna göre her serinin 2 adet lolipop numunesi deney tekrarı olması açısından deneye tabi tutulmuş ve ortalama çekilen akım değerleri alınmıştır.

Şekil 4.17’ye göre içerisinde puzolan bulunan serilerin akım çekme değerleri referans seri ve %2 kalsiyum nitrit (DCI) bulunan seriye nazaran büyük ölçüde düşük

çıkıştır. Özellikle silis dumanının %9 oranında ikame edildiği M7, M8 ve M9 serilerinde çekilen ortalama akım değeri diğer tüm serilerden daha az olmuştur. Bu seriler ortalama olarak, referans betonun yaklaşık %10'u kadar akım çekmişlerdir. Bölüm 5'te verilen Taguchi analizleri sonucunda elde edilen optimum parametre seviyelerinde üretilen doğrulama deneylerinde de referans betonun yaklaşık %13'ü kadar akım çekme miktarına ulaşılmıştır.



Şekil 4.17. K2 durumu uygulanan serilerin ortalama çekilen akım değerleri

28 gün kürde bekletildikten sonra havuzdan çıkarılan lolipop numunelere Faraday denklemine göre referans betonun %4 kütle kaybına tekabül eden 64 saatlik korozyon süresi (K4) uygulanmıştır. Buna göre her serinin 2 adet lolipop numunesi deney tekrarı olması açısından deneye tabi tutulmuş ve ortalama akım değerleri alınmıştır.

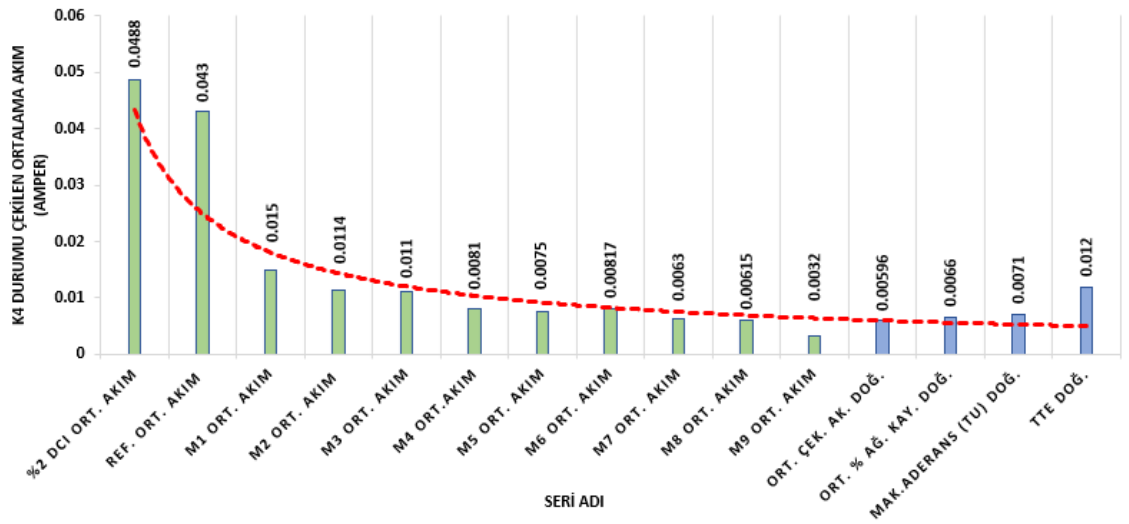
64 saat 20 V sabit voltaj (K4) altında serilerin çekmiş oldukları akımlar Tablo 4.15 ve Şekil 4.18'de verilmiştir. Buna göre K2 durumuna benzer şekilde; içerisinde puzolan bulunan serilerin akım çekme değerleri referans seri ve %2 kalsiyum nitrit (DCI) bulunan seriye nazaran önemli ölçüde düşük çıkmıştır. Özellikle silis dumanının %9 oranında ikame edildiği M7, M8 ve M9 serilerinde çekilen ortalama akım değeri diğer tüm serilerden daha az olmuştur. Bu seriler ortalama olarak, referans betonun yaklaşık %12'si kadar akım çekmişlerdir.

K4 durumunda %2 DCI kodlu serinin çekmiş olduğu ortalama akım değeri referans seriyi geçmiştir. Bu durumun muhtemel sebebi ilerleyen kısımlarda açıklanmıştır. Taguchi analizleri sonucunda elde edilen optimum parametre seviyelerinde

üretilem doğruılama deneylerinde de referans betonun yaklaşık %15'i kadar akım çekme miktarına ulaşlmıştır.

Tablo 4.15. K4 durumu uygulanan serilerin ortalama akım çekme miktarları

Seri Adı	Deney tekrarında çekilen ortalama akım (Amper)	Çekilen ortalama akım (Amper)	Çekilen ortalama akım (miliAmper)
REF	0.04340 0.04220	0.0430	43.0
%2 DCI	0.04580 0.05180	0.0488	48.8
M1	0.01510 0.01480	0.0150	15.0
M2	0.01196 0.01086	0.0114	11.4
M3	0.01130 0.01100	0.0110	11.0
M4	0.00807 0.00810	0.0081	8.10
M5	0.00826 0.00672	0.0075	7.50
M6	0.00782 0.00851	0.00817	8.17
M7	0.00660 0.00600	0.00630	6.30
M8	0.00646 0.00584	0.00615	6.15
M9	0.00300 0.00330	0.00320	3.20
Ort. Çek. Ak. Doğ.	0.00600 0.00590	0.00596	5.96
Ort. % Ağ. Kay. Doğ.	0.00660 0.00650	0.0066	6.60
Mak.Aderans (τ_u) Doğ.	0.00720 0.00700	0.0071	7.10
TTE Doğ.	0.01200 0.01200	0.0120	12.0



Şekil 4.18. K4 durumu uygulanan serilerin ortalama çekilen akım değerleri

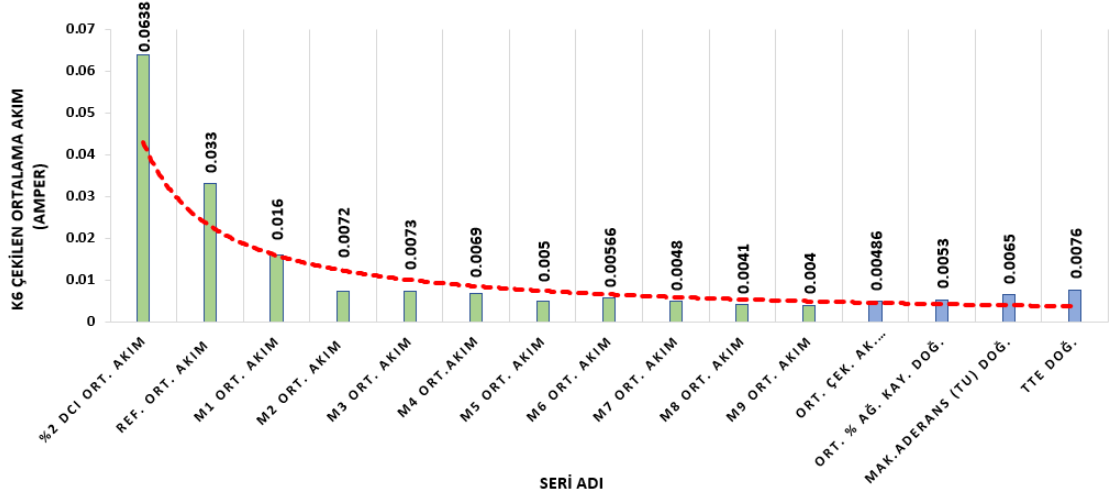
28 gün kürde bekletildikten sonra havuzdan çıkarılan lolipop numunelere Faraday denklemine göre referans betonun %6 kütle kaybına tekabül eden 122 saatlik korozyon süresi uygulanmıştır. Buna göre her serinin 2 adet lolipop numunesi deney tekrarı olması açısından deneye tabi tutulmuş ve ortalama akım değerleri alınmıştır. 122 saat ve 20 V sabit voltaj (K6) altında serilerin çekmiş oldukları akımlar Tablo 4.16 ve Şekil 4.19'da verilmiştir.

Tablo 4.16. K6 durumu uygulanan serilerin ortalama akım çekme miktarları

Seri Adı	Deney tekrarında çekilen ortalama akım (Amper)	Çekilen ortalama akım (Amper)	Çekilen ortalama akım (miliAmper)
REF	0.03340 0.03290	0.0330	33.0
%2 DCI	0.06010 0.06750	0.0638	63.8
M1	0.01630 0.01650	0.0160	16.0
M2	0.00705 0.00734	0.0072	7.20
M3	0.00607 0.00643	0.0063	6.30
M4	0.00700 0.00687	0.0069	6.90
M5	0.00484 0.00518	0.0050	5.00
M6	0.00612 0.00520	0.00566	5.66
M7	0.00439 0.00520	0.00480	4.80
M8	0.00433 0.00387	0.00410	4.10
M9	0.00360 0.00400	0.00380	3.80
Ort. Çek. Ak. Doğ.	0.00500 0.00500	0.00486	4.86
Ort. % Ağ. Kay. Doğ.	0.00550 0.00500	0.00530	5.3
Mak.Aderans (τ_u) Doğ.	0.00700 0.00600	0.00650	6.5
TTE Doğ.	0.00770 0.00750	0.00760	7.6

Buna göre; içerisinde puzolan bulunan serilerin akım çekme değerleri referans seri ve %2 kalsiyum nitrit (DCI) bulunan seriye nazaran önemli ölçüde düşük çıkmıştır. Özellikle silis dumanının %9 oranında ikame edildiği M7, M8 ve M9 serilerinde çekilen ortalama akım değeri diğer tüm serilerden daha azdır. Bu seriler ortalama olarak, referans betonun yaklaşık %13'ü kadar akım çekmişlerdir. İçerisinde %2 oranında kalsiyum nitrit içeren karışımın akım çekme miktarı diğer tüm serilerin önemli ölçüde üstüne çıkmıştır. Bu durumun muhtemel nedeni ilerleyen kısımlarda açıklanmıştır. Taguchi analizleri

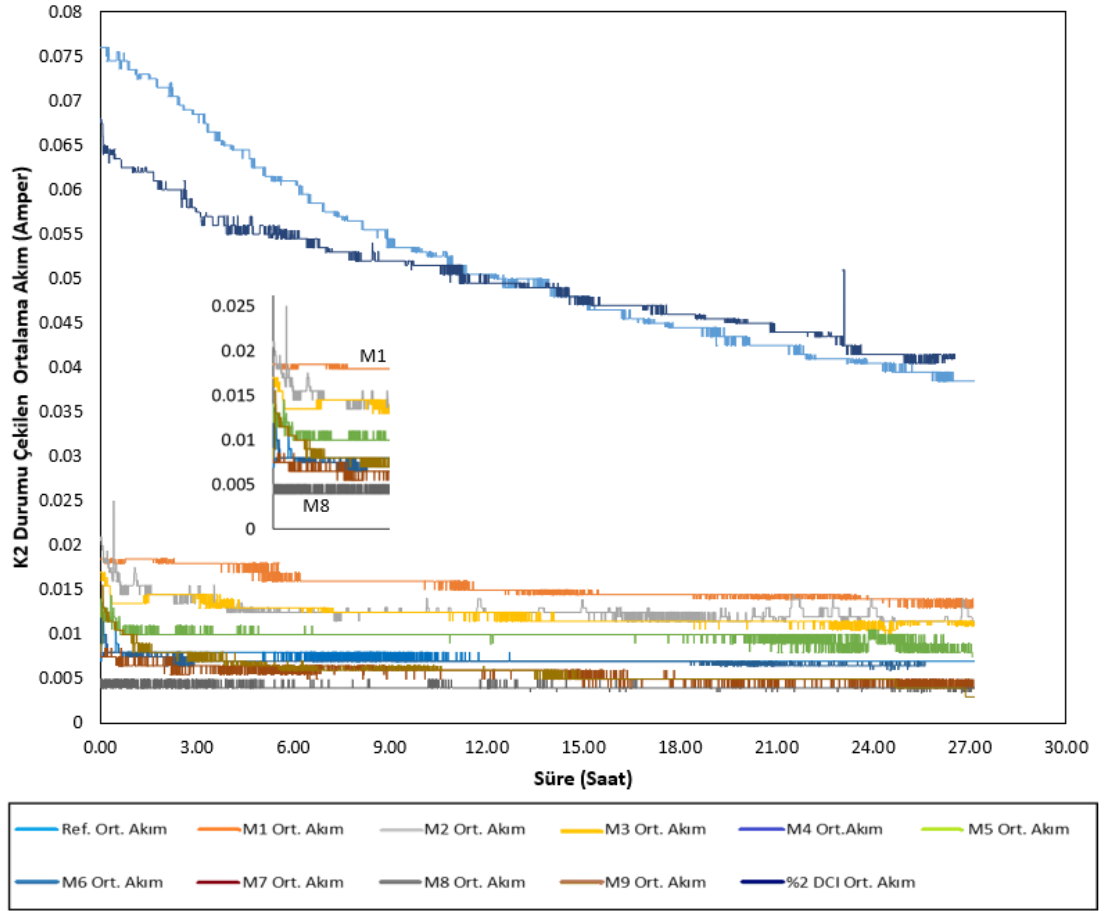
sonucunda elde edilen optimum parametre seviyelerinde üretilen doğrulama deneylerinde de referans betonun yaklaşık %17'si kadar akım çekme miktarına ulaşılmıştır.



Şekil 4.19. K6 durumu uygulanan serilerin çektikleri ortalama akım değerleri

Sabit 20 V potansiyel altında K2, K4 ve K6 durumları için hızlandırılmış korozyon deneyi uygulanan doğrulama serileri dahil tamamının zamana bağlı çekmiş oldukları akımlar Şekil 4.20-4.25 arasında verilmiştir. Buna göre; içerisinde kalsiyum nitrit bulunan seri hariç, tüm serilerin başlangıç korozyon akım değerleri zamana bağlı olarak azalmıştır. %2 DCI kodlu seride bu azalış, 50. saate kadar sürmüştür. Bu noktadan sonra çekilen akım değeri hızlı bir şekilde artmıştır. Hızlandırılmış korozyon deneylerinde gözlemlenen akımın zamanla düşmesi, metal donatı yüzeyinde oluşan bir pasivasyon tabakasının varlığına bağlanabilir. Bu pasivasyon tabakası, metalin çözelti ile reaksiyona girmesi sonucunda meydana gelmekte ve metalin korozyona karşı direncini artırarak akımın azalmasına sebep olmaktadır. Diğer yandan korozyon süreci sırasında, metalin çözelti ile reaksiyona girmesiyle çeşitli korozyon ürünleri oluşmakta, bu ürünler metal yüzeyinde birikerek zaman içinde tabakalaşmaktadır. Oluşan bu tabaka, metalin çevresiyle reaksiyona girmesini engelleyerek bariyer görevi görmektedir. Bu birikim, aynı zamanda metalin yüzey alanını azaltarak direnci daha fazla olan bir tabakayla akımın düşmesine neden olmaktadır. Ancak belirli bir noktada; beton örtü, pasın hacminin donatıdan daha fazla olmasından dolayı çatlamaktadır. Buna bağlı olarak NaCl elektrolit, donatıya direkt nüfuz etmekte ve akımda ani artışlar meydana gelerek donatıda korozyon hızı artmaktadır. Toplam puzolan ikame oranının en az (%23) olduğu M1 serisi tüm durumlarda (K2, K4 ve K6) diğer puzolanlı serilerden daha fazla akım çekmiştir. Bu

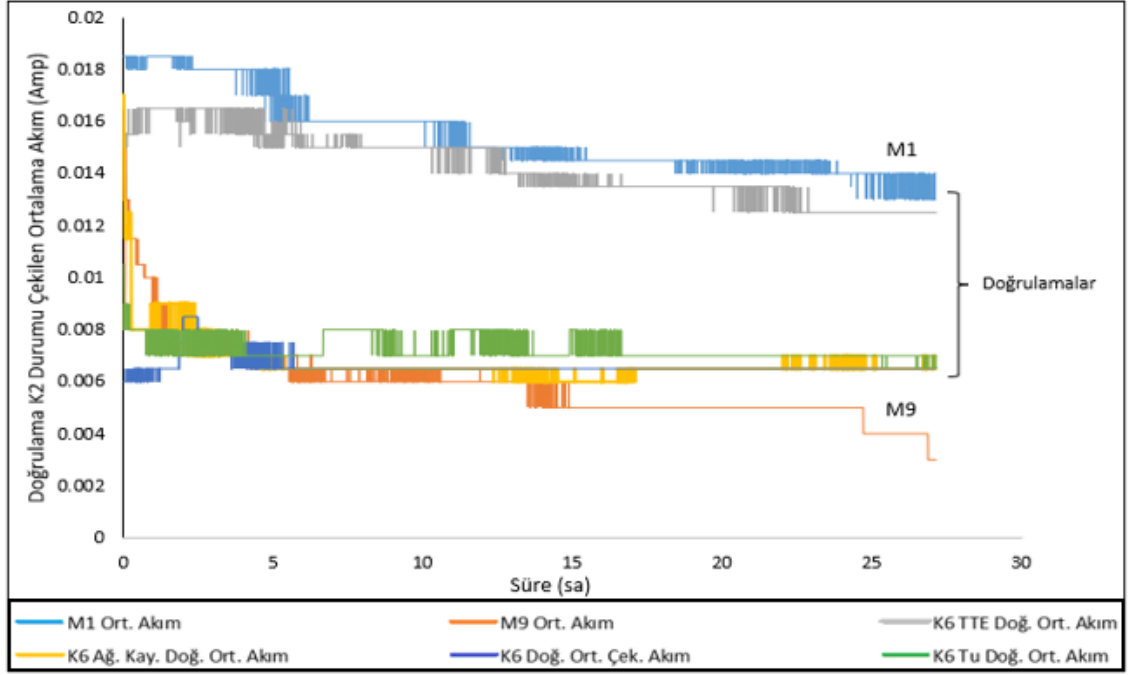
duruma, diğer puzolanlı serilerle birlikte değerlendirildiğinde, karışımlarda kullanılan puzolan ikame oranının düşük olmasının sebep olduğu düşünülmektedir. Diğer yandan silis dumanı ikame oranının %9 olduğu M7, M8 ve M9 serilerinde çekilen ortalama akım değerleri tüm seriler içinde en az değerleri almıştır. Silis dumanı ince tanecik yapısından ve puzolanik aktivitesinden dolayı geçirimsizliği azaltmış buna bağlı olarak da çekilen akımlar azalmıştır. Taguchi yöntemi kullanılarak yapılan parametre optimizasyonu sonucunda yapılan doğrulama deneyleri, akım çekme yönüyle L9 ortogonal dizi serilerinin en fazla akım çeken (M1) ve en az akım çeken (M8, M9) serileri arasında yer almıştır. Bu sonuç referans beton ve %2 DCI kodlu serinin akım çekme karakteristikleri ile birlikte değerlendirildiğinde kabul edilebilir bir sonuç olarak değerlendirilmiştir.



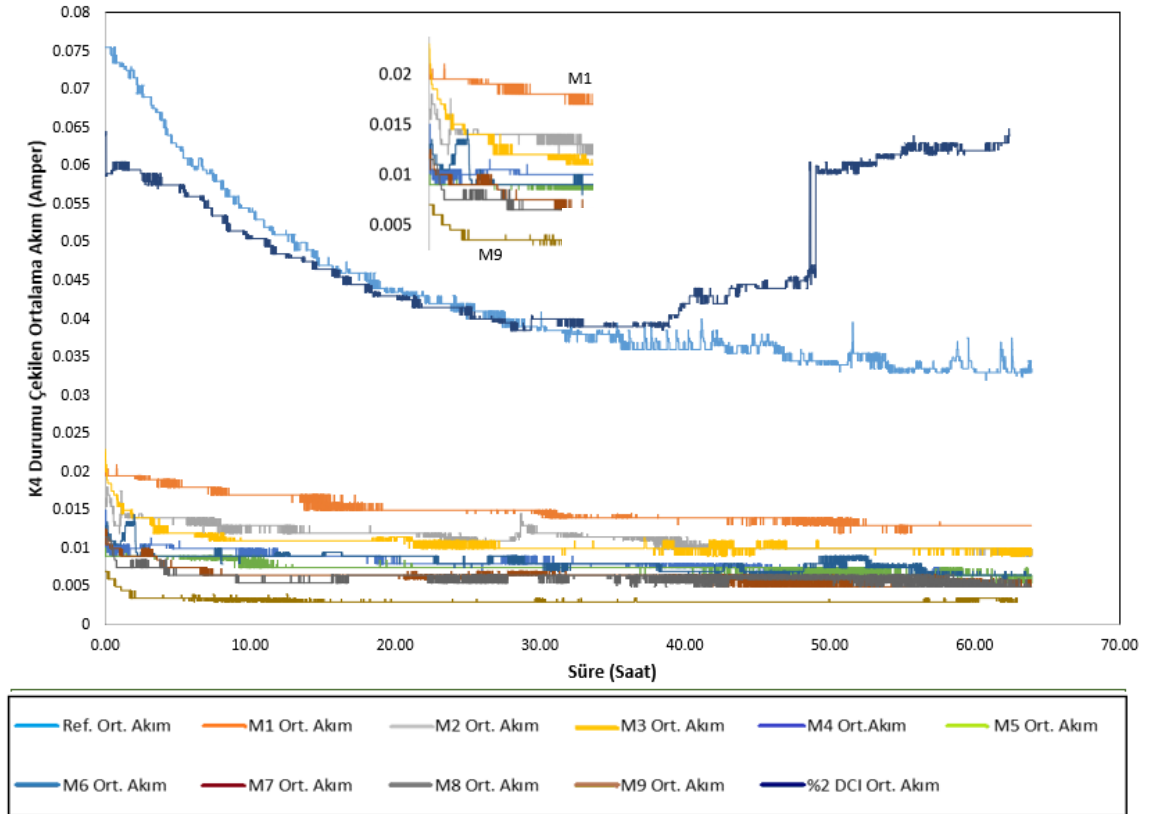
Şekil 4.20. K2 durumunda serilerin zamana bağlı çektiği ortalama akım

Kalsiyum nitrit, metal yüzeylerin korozyonunu önlemek veya en aza indirmek için kullanılan bir tür anodik korozyon inhibitörüdür. Korozyon, metal yüzeylerin oksidasyonu veya kimyasal bozunma süreci olarak tanımlanmaktadır. Kalsiyum nitritin,

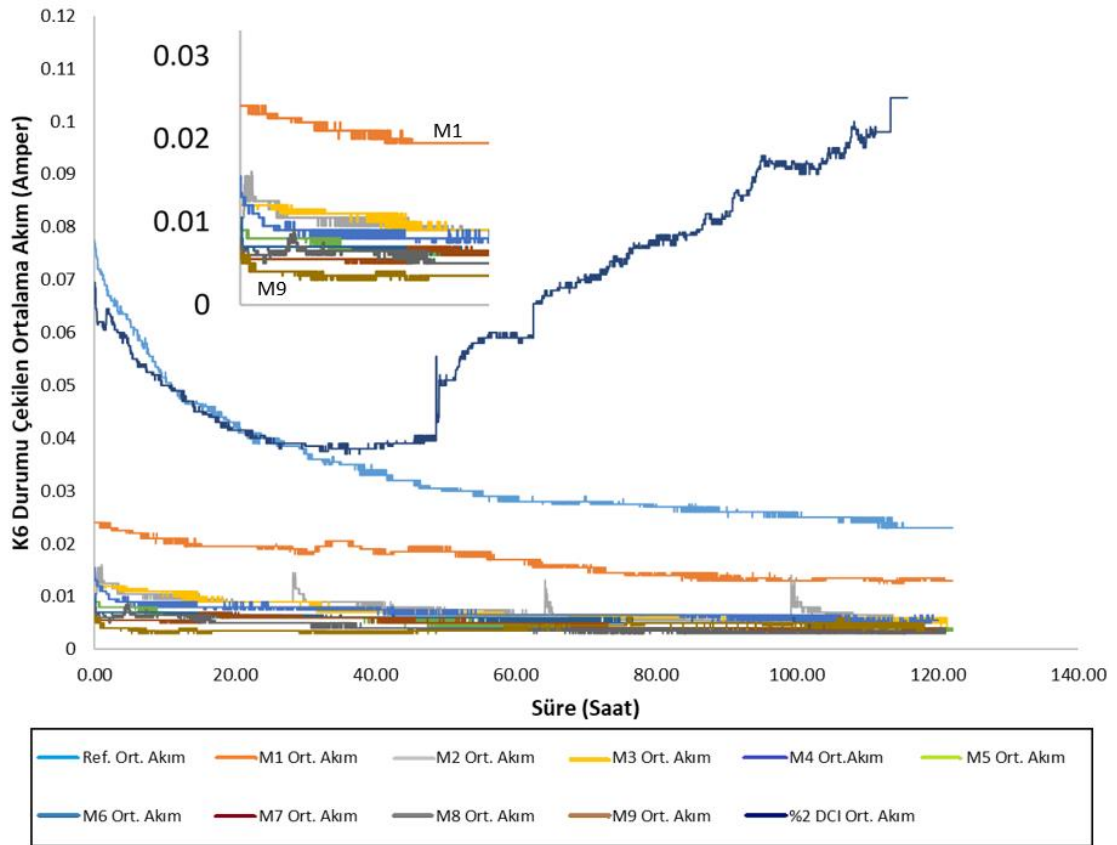
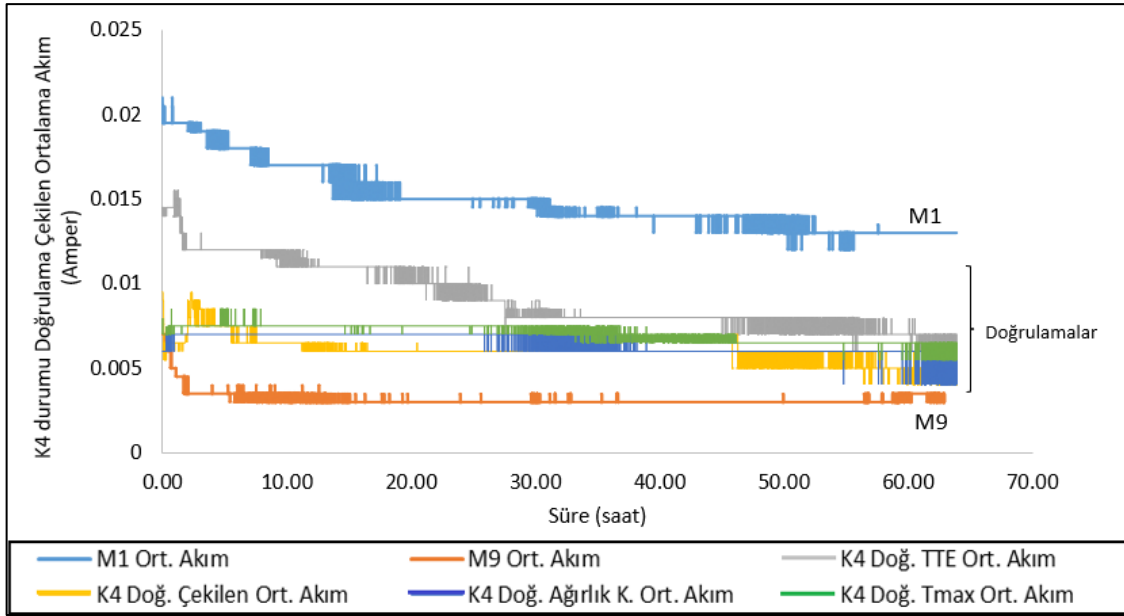
korozyonu inhibe edici özelliği birçok çalışmada gösterilmiştir (Gaidis, 2004; Montes vd., 2006; Trepanier vd., 2001).



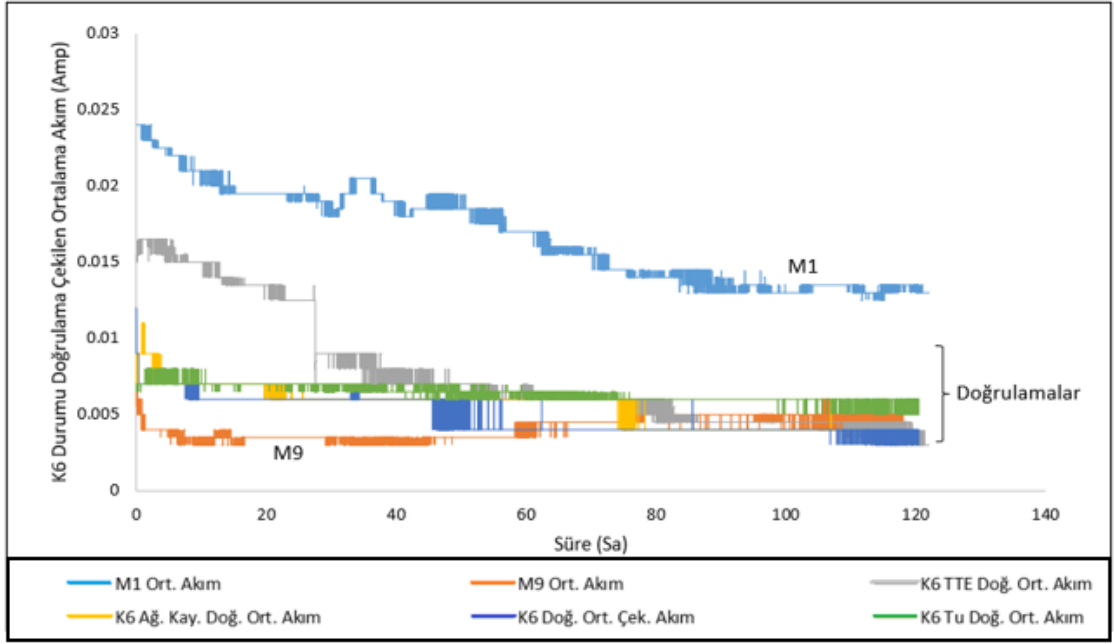
Şekil 4.21. K2 durumunda doğrulama deneylerinin akım zaman grafikleri



Şekil 4.22. K4 durumunda serilerin zamana bağlı çektikleri ortalama akım



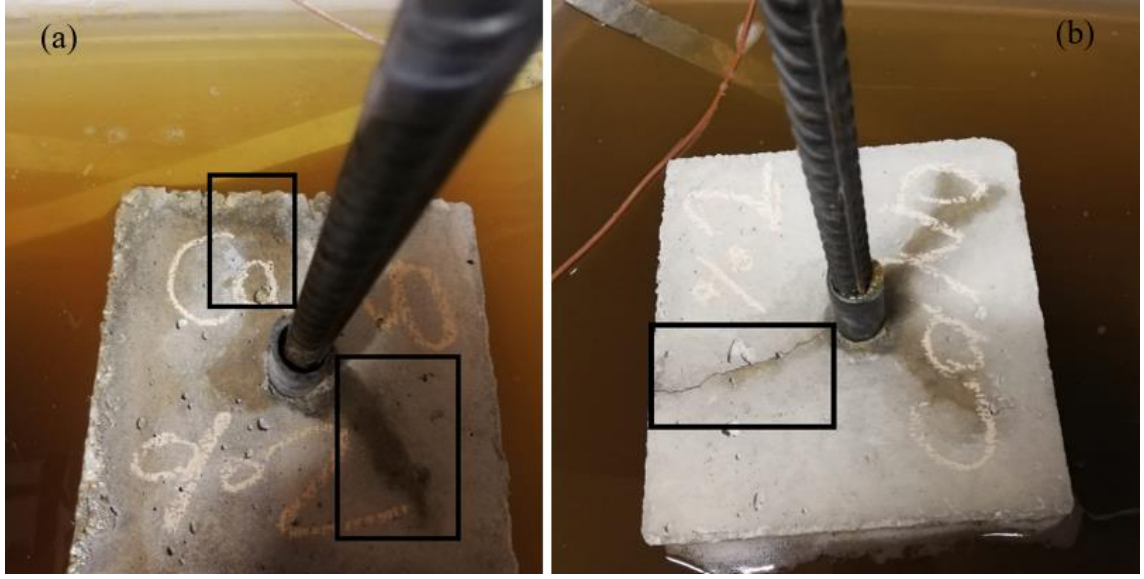
Ancak bazı çalışmalara göre, düşük nitrit iyon konsantrasyonlarının korozyon üzerindeki etkisi karmaşık bir olgudur.



Şekil 4.25. K6 durumunda doğrulama deneylerinin akım zaman grafikleri

Birtakım çalışmalar, yetersiz nitrit içeriğinin, erken aşamalarda klorür kaynaklı korozyonu hızlandırabileceğini öne sürmüş, düşük nitrit konsantrasyonlarıyla ilişkilendirilen potansiyel riski vurgulamıştır (Cao vd., 2015). Ayrıca yapılan bir çalışma, betondaki düşük çimento içeriği ile artan nitrit dozu kullanımının korozyon süresini uzatmadığını, ancak klorür penetresini hızlandığını göstererek, düşük nitrit konsantrasyonlarının korozyon hızları üzerinde potansiyel olumsuz bir etkisi olabileceğini ortaya koymuştur (Ann ve Buenfeld, 2015). Hafif çelik korozyon davranışı üzerine yapılan bir çalışmada, nitritin nötr ve alkali koşullarda hafif çelik korozyonunu engellediğini, ancak asidik ortamlarda korozyonu hızlandığı gösterilmiştir (Mutafa vd., 1997). Song vd., yaptıkları çalışmada; betonda yüksek klorür iyon konsantrasyonları, çelik korozyonunu daha ciddi bir hale getirdiğini belirtmiştir. Çalışmada nitritin donatı korozyonu üzerindeki inhibe edici etkisinin her zaman belirgin olmadığı ve bazen $(NO_2^-)/(Cl^-)$ kritik değerinin beton içinde 0.4' ten düşük olduğunda makro hücre korozyonunu hızlandırabileceği bildirilmiştir. Ancak, $(NO_2^-)/(Cl^-)$ oranı 0.8' de, çukurcuk korozyonu büyük ölçüde ortadan kalksa da çelik çubuk korozyonunun tamamen engellenmesi için yetersiz olduğu belirtilmiştir. $(NO_2^-)/(Cl^-)$ oranı 1.2' yi aştığında çelik çubuk korozyonunun tamamen bastırılabilceğini belirtmişlerdir (Song vd., 2019). Buna göre; tez çalışmasında korozyonu hızlandırmak için karışım suyuna tuz katılmasıyla birlikte beton içerisinde bulunan NO_2^- iyonlarının yetersiz kaldığı buna bağlı olarak da korozyonun hızlanmış olabileceği düşünülmektedir. Yapılan hızlandırılmış korozyon

deneyi gözlemlerinde referans seri dahil hiçbir seri deney esnasında çatlamazken içerisinde kalsiyum nitrit korozyon inhibitörü bulunan (%2 DCI) korozyon numuneleri yaklaşık olarak 50. saatin sonunda korozyon kaynaklı hasara uğramıştır. K4 durumundaki %2 DCI kodlu numunelerde çatlak genişliği yaklaşık olarak 200μ iken, K6 durumunda çatlak genişliği yaklaşık 300μ olarak belirlenmiştir. Oluşan çatlaklar, numune üzerinde donatı üst ekseninden donatı alt eksenine kadar uzanmıştır. Şekil 4.26'da %2 DCI kodlu numunelerde deney esnasında korozyona bağlı oluşan çatlakların görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.26. K4 durumunda (a) ve K6 durumunda (b) %2 kalsiyum nitrit içeren numunelerde oluşan çatlaklar

4.8. Pullout Testi

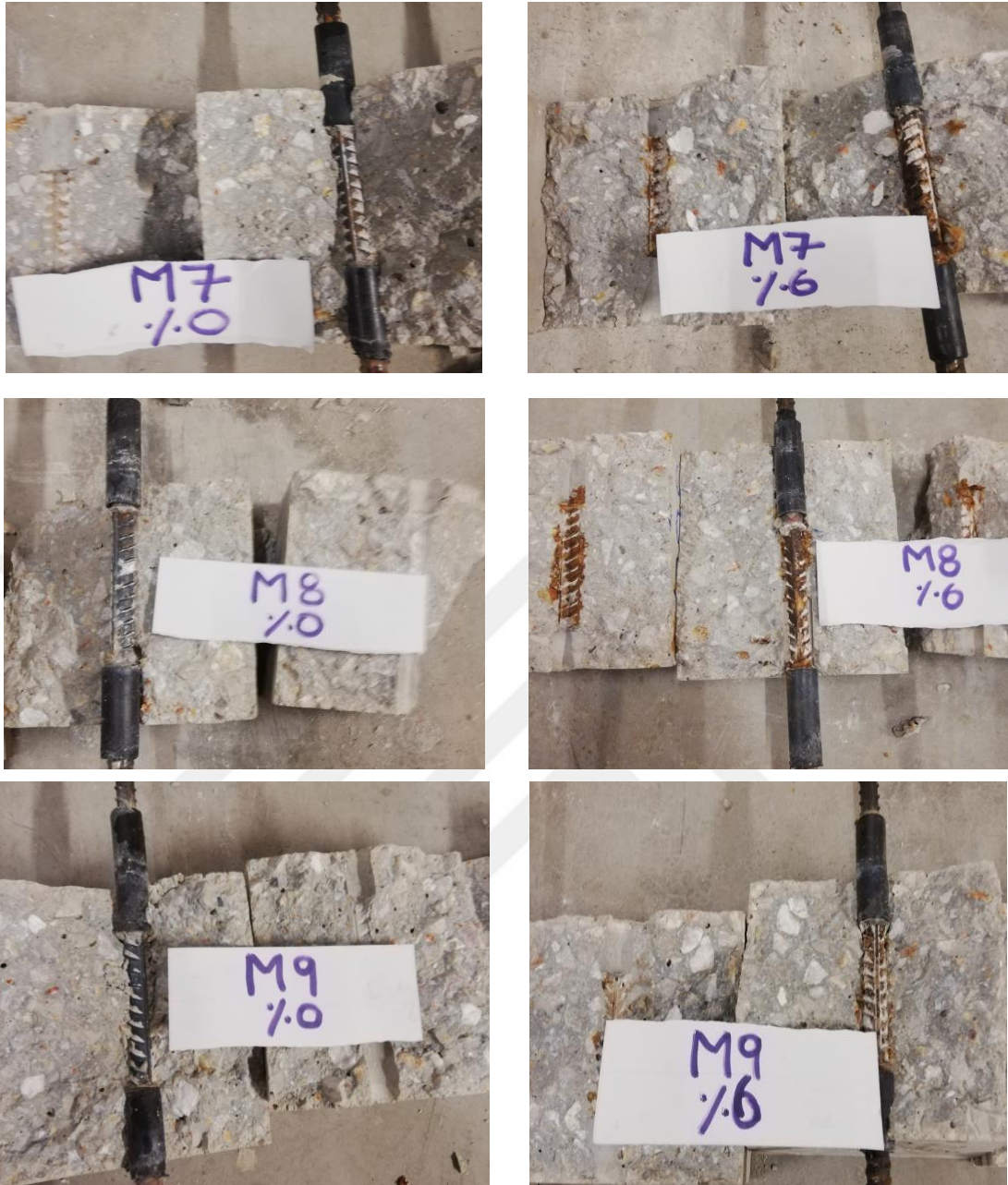
Farklı durumlar için hızlandırılmış korozyon deneyine tabi tutulan ve hiç korozyona uğratılmayan beton numunelere aderans (pullout) deneyi uygulanmıştır. Deneyin uygulandığı tüm numunelerde bağlı boy 7.9 cm'dir. Deneyler uygulanırken hidrolik el krikosunda yüklemeler, mümkün olduğunca nizami ve tek elden yapılmıştır. Ek 1'de yapılan tüm çekip çıkarma (pullout) deneylerinin yük deplasman eğrileri verilmiştir. Buna göre τ_u ve TTE enerji miktarı bulunurken tekrarlı iki deney sonucunun ortalaması alınarak seri performans değerleri elde edilmiştir. Pullout deneyi sonrasında K0 ve K6 durumu için elde edilen görseller Şekil 4.27-4.30 arasında verilmiştir. K6 durumunda pullout deneyi sonrasında donatılarda oluşmuş korozyon belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Diğer yandan; çekip çıkarma (pullout) deneyi uygulanan numunelerin hemen hemen hepsinde kırılma biçimi yarılma şeklinde olmuştur.



Şekil 4.27. REF, %2 DCI, M1 ve M2 serilerinin K0 ve K6 durumlarında pullout deneyi sonrası görselleri



Şekil 4.28. M3, M4, M5 ve M6 serilerinin K0 ve K6 durumlarında pullout deney sonrası görselleri



Şekil 4.29. M7, M8 ve M9 serilerinin K0 ve K6 durumlarında pullout deney sonrası görselleri

Şekil 4.31’de verilen deney sonuçlarına göre maksimum aderans kuvvetlerinden bulunan aderans gerilmeleri Denklem 4.1’ e göre hesaplanarak verilmiştir.

$$\tau_u = \frac{P_u}{\pi x d x l} \quad (4.1)$$

Burada τ_u , maksimum aderans kuvveti için elde edilen aderans gerilmesini, P_u , deneyde ulaşılan maksimum çekme kuvvetini, d kullanılan donatının çapını ve l bağlı

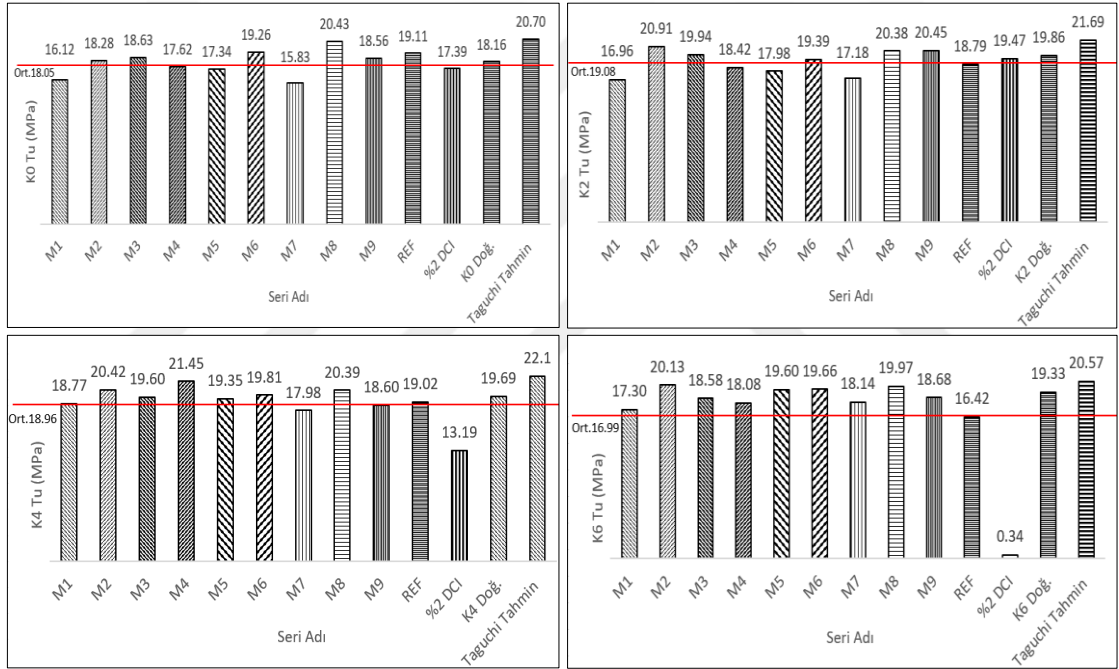
boyun uzunluğunu göstermektedir. Deneye tabi tutulan seriler için farklı ağırlık kaybı yüzdeleri için çizilmiş aderans gerilmesi grafikleri Şekil 4.32’de verilmiştir.



Şekil 4.30. M8 ve doğrulama serilerinin K0 ve K6 durumlarında pullout deney sonrası görselleri

Maksimum bağ dayanımları K0 durumu için incelendiğinde; puzolanlı serilerden M8 serisi 20.43 MPa ile en yüksek bağ dayanımının elde edildiği seri olurken 15.83 MPa ile en az bağ dayanımının elde edildiği seri M7 serisi olmuştur. M6 ve M8 serileri referans betonun maksimum bağ dayanım değerini geçmiştir. K0 durumunda doğrulama serisinden, seri ortalamalarının üzerinde bir dayanım elde edilmiştir. Doğrulama serisinden elde edilen bu dayanım referans betondan yaklaşık %5 oranında daha az olmuştur. K2 durumu için; puzolanlı serilerden M2 serisi en yüksek bağ dayanımının elde edildiği seri olurken en az bağ dayanımının elde edildiği seri M1 serisi olmuştur. K2 durumunda, puzolanlı serilerin çoğu referans betonun bağ dayanımının üzerine çıkmıştır. K2 durumunda doğrulama serisinden, seri ortalamalarının üzerinde bir dayanım elde edilmiştir. Doğrulama serisinden elde edilen bu dayanım referans betondan yaklaşık %5 oranında daha fazla olmuştur. K4 durumunda, genel anlamda puzolanlı serilerin tamamında referans betonun aderans dayanımına yakın sonuçlar elde edilmiştir. %2 DCI serisi için K4 durumunda bağ dayanımı yaklaşık %30 oranında azalmış ve en kötü

performans bu seride elde edilmiştir. K4 durumunda doğrulama serisinden, seri ortalamalarının üzerinde bir dayanım elde edilmiştir. Doğrulama serisinden elde edilen bu dayanım referans betondan yaklaşık %3 oranında daha fazla olmuştur. K6 durumu için; puzolanlı serilerin tamamında, daha az akım çektiklerinden ve buna bağlı olarak, düşük miktarda korozyona uğradıklarından dolayı referans seriden daha fazla aderans dayanımı elde edilmiştir. %2 DCI içeren seride K6 durumunda, hızlandırılmış korozyon deneyi esnasında beton çatladığından bağ dayanım değeri dramatik bir şekilde düşmüş ve 0.34 MPa dayanım değeri elde edilmiştir. K6 durumunda doğrulama serisinden, seri ortalamalarının üzerinde bir dayanım elde edilmiştir. Doğrulama serisinden elde edilen bu dayanım referans betondan yaklaşık %17 oranında daha fazla olmuştur.

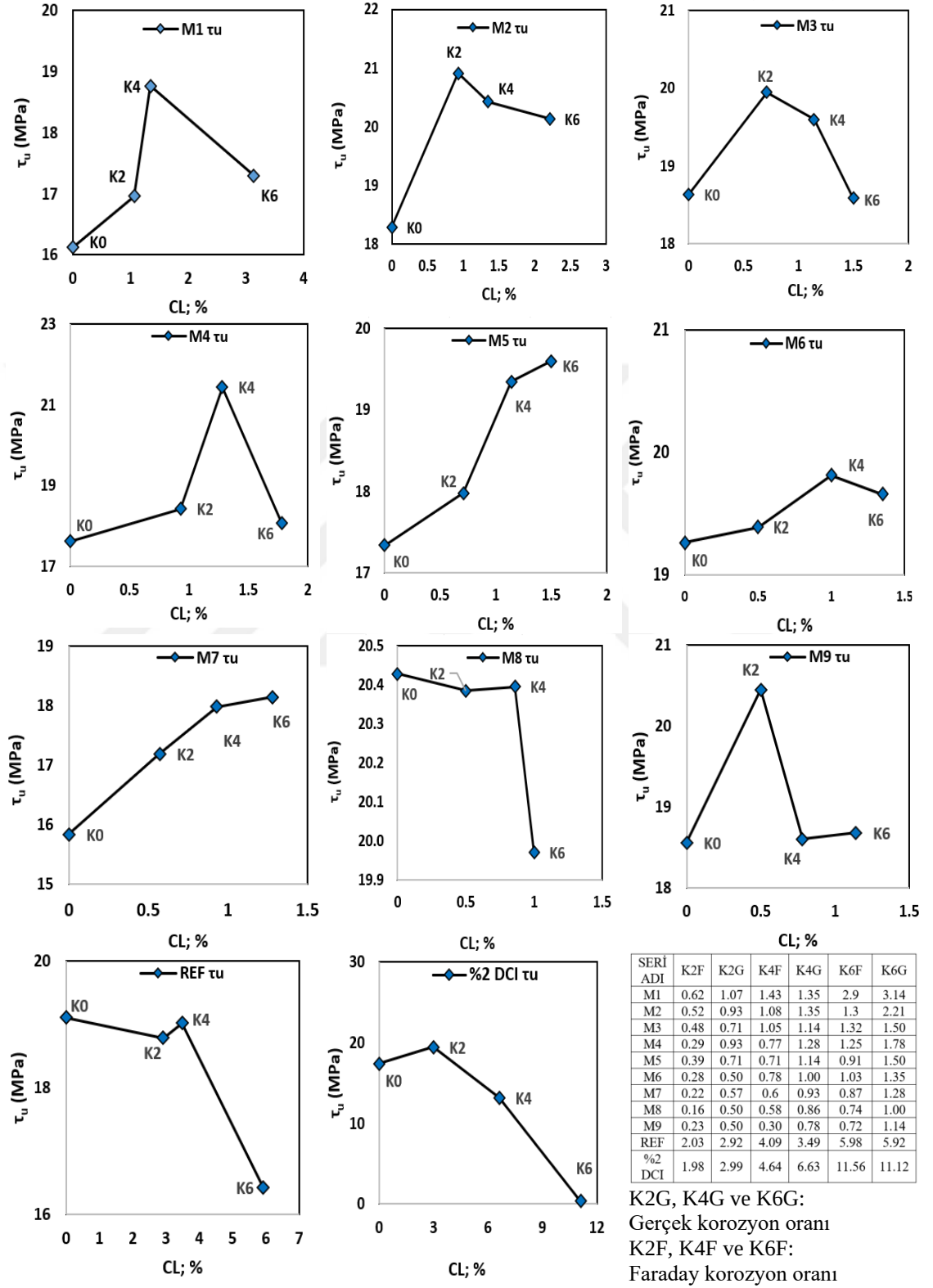


Şekil 4.31. K0, K2, K4 ve K6 durumları için seri bazlı ortalama maksimum bağ dayanımları

Beton ve donatı arasındaki bağ dayanımının gerçek korozyon oranı (% CL) ile değişimi her seri için Şekil 4.32'ye göre, rölatif olarak değişimi ise Şekil 4.33'e göre değerlendirildiğinde; puzolanlı serilerde genel olarak %1.8'e kadar olan korozyon oranlarında aderans dayanımı artmış, korozyonun %3 seviyesine kadar da dayanım korozyonsuz durumun (K0) altına inmemiştir.

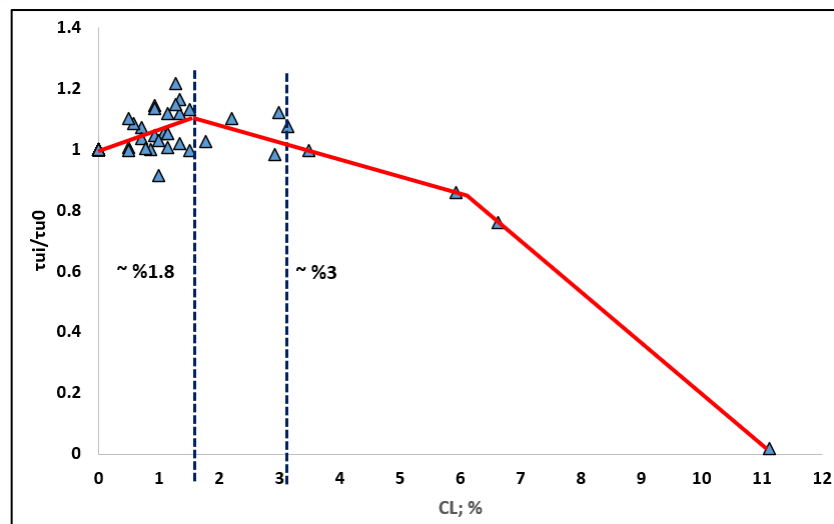
İçerisinde puzolan bulunmayan REF ve %2 DCI kodlu serilerde %3.5 korozyon seviyesine kadar bağ dayanımı rölatif olarak 1 seviyesindedir. REF ve %2 DCI kodlu seride yaklaşık %6 korozyon seviyesinde bağ dayanımı sırasıyla %15 ve %24 oranında

azalmıştır. %2 DCI serisi için korozyon oranı %11.12 olduğunda neredeyse bağ dayanımı elde edilememiştir.



Şekil 4.32. Maksimum bağ dayanımlarının gerçek korozyon oranlarına (CL) göre değişimi

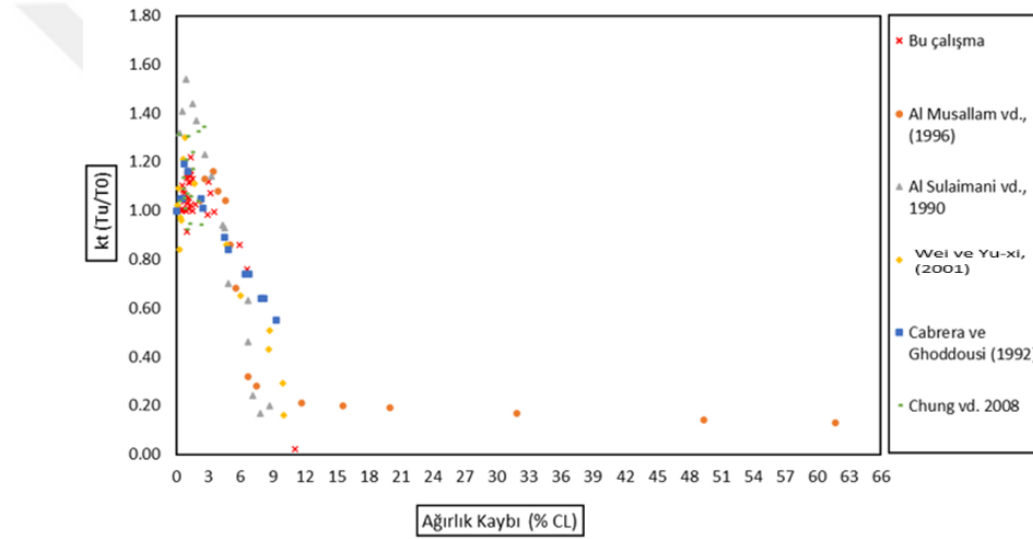
Şekil 4.33'te verilen rölatif bağ dayanımı değişimlerine göre %1.8'in altındaki korozyon oranlarında bağ dayanımı yaklaşık %10 oranında artmıştır. Şekil 4.33' te verilen grafikte τ_{ui} i. serinin farklı korozyon durumlarındaki bağ dayanımını, τ_{u0} ise her serinin korozyonsuz durumunun bağ dayanımını ifade etmektedir. Bu sonuçlar daha önce yapılan (Abosrra vd., 2011; Al-Sulaimani vd., 1990; Chung vd., 2008; Fang vd., 2004; Fu ve Chung, 1997; Tondolo, 2015) çalışmalarla benzerlik göstermiştir. Donatı-beton ara yüzündeki kayma direnci (aderans) üç mekanizmadan oluşmaktadır. Bunlar; sürtünme, yapışma ve mekanik kilitlenmedir. Korozyon ürünleri, yüzeyin pürüzlülüğünü ve topografisini değiştirerek sürtünme özelliklerini etkilemektedir. Artan pürüzlülük veya korozyon ürünlerinin varlığı, malzeme ve korozyon ürünlerinin özelliklerine bağlı olarak sürtünmeyi artırabilmektedir. Diğer yandan korozyonun neden olduğu yüzey kimyasındaki değişiklikler, malzemeler arasındaki yapışmayı etkileyerek bağ dayanımını artırabilmektedir. Bazı durumlarda, korozyonun neden olduğu yüzey pürüzlülüğündeki değişiklikler, mekanik kilitlenmeyi artırabilmekte ancak bu durum korozyon ürünlerinin özelliklerine bağlı olmaktadır. Yukarıda sayılan durumların düşük korozyon seviyelerinde oluşabileceği unutulmamalıdır. Yüksek oranlarda oluşan korozyon, aderans dayanımını tamamıyla ortadan kaldırmaktadır (Jiang vd., 2018).



Şekil 4.33. Tüm serilerde rölatif bağ dayanımı korozyon oranı (% CL) değişimi

Literatürde daha önce yapılan çalışmalar rölatif bağ dayanımı açısından Şekil 4.34' e göre incelendiğinde; Al Musallam ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmaya göre bağ dayanımı %4 korozyon seviyesine kadar artış göstermiştir (Almusallam vd., 1996). Al Sulaimani ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise %3.25 korozyon

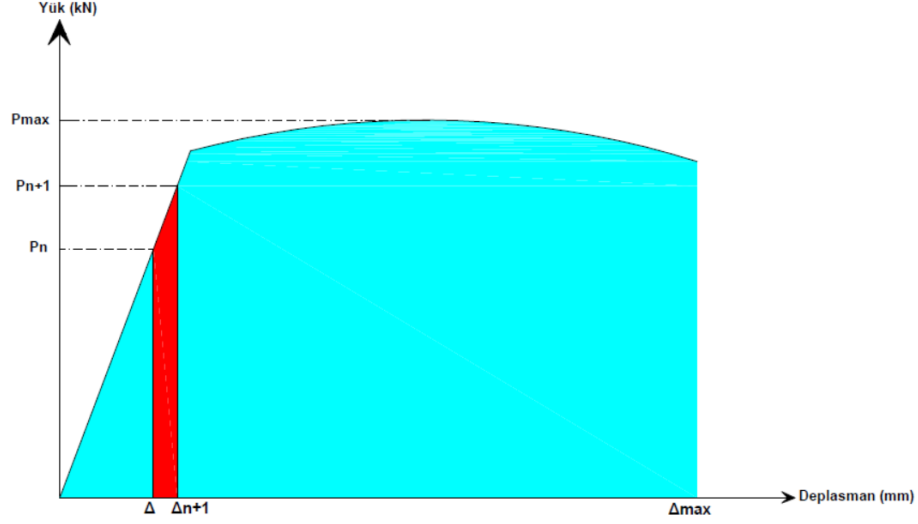
seviyesine kadar bağ dayanımında artışlar olmuştur (Al-Sulaimani vd., 1990). Wei-liang ve Yu-xi (2001) tarafından yapılan çalışmaya göre bağ dayanımı %1.6 korozyon seviyesine kadar artmıştır. Cabrera ve Ghoddousi tarafından yapılan çalışmada %2.5 korozyon oranına kadar bağ dayanımının artışı gösterilmiştir (Cabrera ve Ghoddousi, 1992). Yapılan tez çalışmasında literatürde yapılan çalışmalara benzer sonuçlar elde edilerek %3'e kadar korozyon seviyelerinde bağ dayanımı değişimi rölatif olarak 1'in üzerinde olmuştur. Al Musallam'ın deneylerinde, yüksek korozyon seviyelerinde bağ dayanımı elde etmesinin sebebi betonun çatlamamış olmasındandır. Oysa bu çalışmada, içerisinde %2 DCI bulunan seride yaklaşık %11 korozyon oranında beton çatlamış ve bunun sonucunda bağ dayanımı ortadan kaybolmuştur.



Şekil 4.34. Bu çalışma ve daha önceki çalışmaların sonuçlarının karşılaştırılması

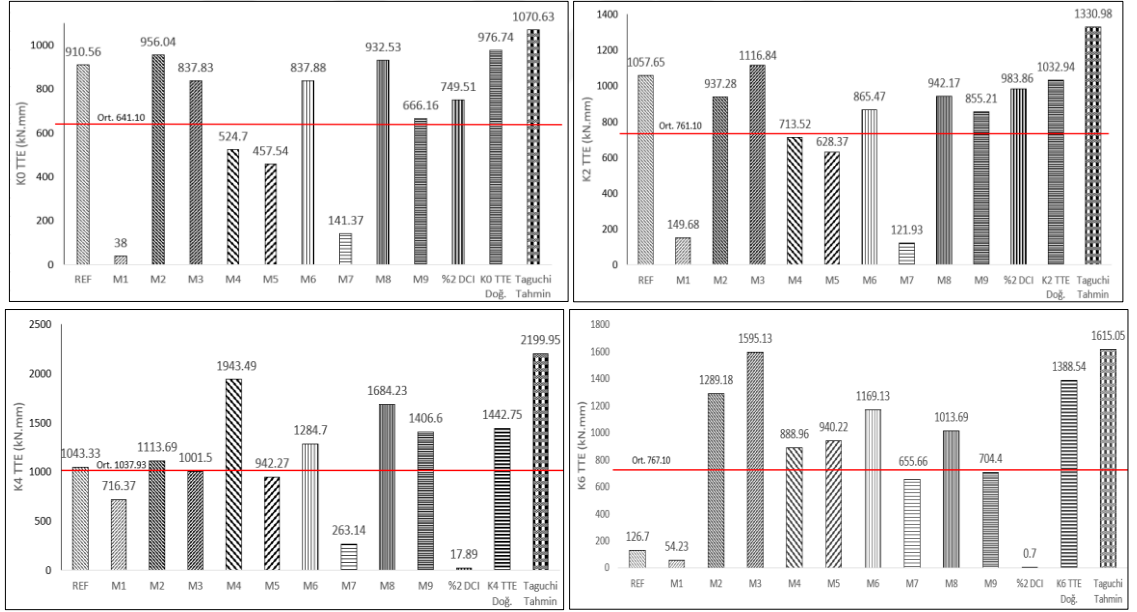
Pullout deney sonuçlarından elde edilen Ek 1'de verilen yük deplasman eğrilerinin altında kalan alanın (TTE) bulunmasında kullanılan birim alan modeli Şekil 4.35'te verilmiştir. Pullout deney sonuçlarından elde edilen yük deplasman eğrilerinin altındaki alan bulunarak toplam tüketilen enerji miktarlarının değerlendirilmesi yapılmıştır. Yük deplasman eğrileri altında kalan alanlar birim alanlara ayrılarak Denklem 4.2'ye göre eğri altındaki toplam alan değeri bulunmuştur. Burada; P_n ve P_{n+1} ardışık yük adımlarını, $\Delta n + 1$ ve Δn ardışık deplasman adımlarını göstermektedir.

$$TTE = \sum \left(\frac{P_n + P_{n+1}}{2} \right) x (\Delta n + 1 - \Delta n) \quad (4.2)$$



Şekil 4.35. Toplam tüketilen enerji değerinin bulunmasında kullanılan birim alan modeli

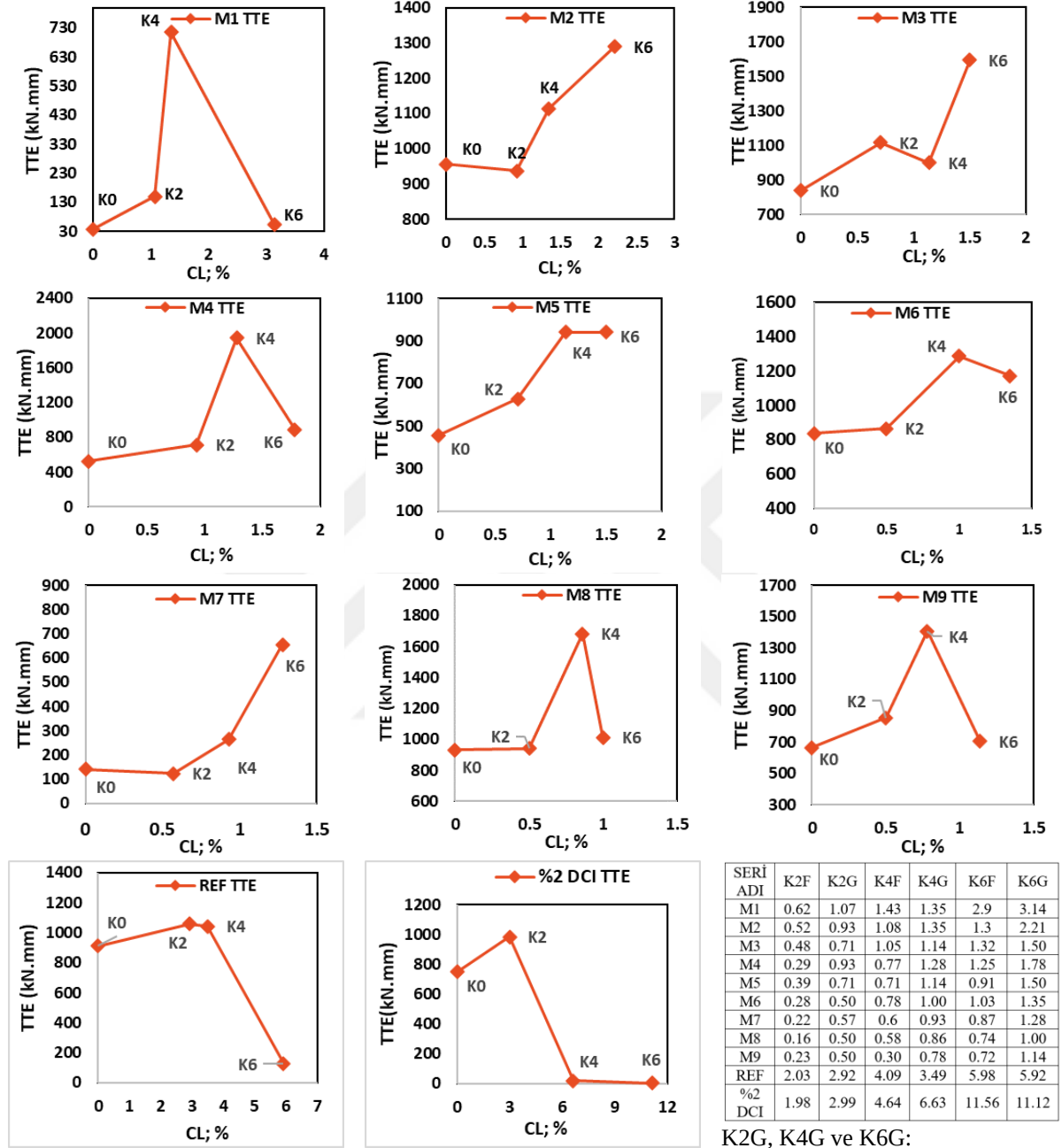
Buna göre; serilerin farklı korozyon oranları için tükettikleri toplam enerjiler Şekil 4.36’da verilmiştir.



Şekil 4.36. K0, K2, K4 ve K6 durumlarında seri bazlı ortalama toplam tüketilen enerjiler (TTE)

Seri bazlı, korozyon oranına göre tüketilen enerjilerin değişimi Şekil 4.37’de verilmiştir. Ayrıca serilere uygulanan pullout deney karakteristikleri Tablo 4.17’de verilmiştir. Pullout deney sonuçlarından elde edilen toplam tüketilen enerji (TTE) miktarları Şekil 4.36’ ya göre değerlendirildiğinde; K0 durumunda, puzolanlı serilerden

M2 ve M8 serilerinde referans serinin süneklik değerinden daha fazla sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.37. Ortalama TTE gerçek korozyon oranlarına göre değişimi

K0 durumunda en kötü performans M1 serisinden elde edilmiştir. K2 durumunda, TTE miktarı M2 ve M7 serisi hariç tüm serilerde K0 durumuna göre artış göstermiştir. K2 durumunda, puzolanlı serilerden en iyi performans M3 serisinde elde edilmiştir.

Tablo 4.17. Serilerde oluşan korozyon seviyeleri ve pullout deney karakteristikleri

Korozyon Durumu	Seri Adı	Pu Ort. (kN)	τ_u Ort. (MPa)	TTE Ort. (kN.mm)	CL; %	Kırılma Şekli
K0 durumu	M1	48.00	16.12	38.00	0	Yarılma
	M2	54.45	18.28	956.04	0	Sıyrılma+Yarılma
	M3	55.49	18.63	837.83	0	Yarılma
	M4	52.47	17.92	524.70	0	Yarılma
	M5	51.63	17.34	457.54	0	Yarılma
	M6	57.37	19.26	837.88	0	Sıyrılma+Yarılma
	M7	47.15	15.83	141.37	0	Yarılma
	M8	60.84	20.43	932.53	0	Yarılma
	M9	55.28	18.56	666.16	0	Yarılma
	REF	56.91	19.11	910.56	0	Sıyrılma
	%2 DCI	51.79	17.39	749.51	0	Yarılma
	τ_u Doğ.	54.07	18.16	884.45	0	Yarılma
	TTE Doğ.	61.47	20.63	976.74	0	Yarılma
K2 durumu	M1	50.50	16.96	149.68	1.07	Yarılma
	M2	62.27	20.91	937.28	0.93	Yarılma
	M3	60.40	19.94	1116.84	0.71	Sıyrılma
	M4	54.87	18.42	713.52	0.93	Yarılma
	M5	53.55	17.98	628.37	0.71	Sıyrılma
	M6	57.75	19.39	865.47	0.50	Sıyrılma
	M7	51.18	17.18	121.93	0.57	Yarılma
	M8	60.71	20.38	942.17	0.50	Yarılma
	M9	58.45	20.45	855.21	0.50	Yarılma
	REF	55.94	18.78	1057.65	2.92	Sıyrılma
	%2 DCI	57.99	19.47	983.86	2.99	Yarılma
	τ_u Doğ.	59.16	19.86	846.55	0.81	Yarılma
	TTE Doğ.	60.91	20.45	1032.94	0.94	Yarılma
K4 durumu	M1	55.90	18.77	716.37	1.35	Yarılma
	M2	60.82	20.42	1113.69	1.35	Yarılma
	M3	58.36	19.60	1001.50	1.14	Yarılma
	M4	63.87	21.45	1943.49	1.28	Yarılma
	M5	57.63	19.35	942.27	1.14	Yarılma
	M6	59.01	19.81	1284.70	1.00	Yarılma
	M7	53.55	17.98	263.14	0.93	Yarılma
	M8	60.74	20.39	1684.23	0.86	Yarılma
	M9	55.40	18.60	1406.60	0.78	Yarılma
	REF	56.65	19.02	1043.33	3.49	Yarılma
	%2 DCI	39.29	13.19	17.89	6.63	Yarılma
	τ_u Doğ.	58.65	19.69	811.56	1.38	Yarılma
	TTE Doğ.	56.79	19.07	1442.75	1.31	Yarılma
K6 durumu	M1	51.53	17.30	54.23	3.14	Yarılma
	M2	59.96	20.13	1289.18	2.21	Yarılma
	M3	55.35	18.58	1595.13	1.50	Yarılma
	M4	53.86	18.08	888.96	1.78	Yarılma
	M5	58.37	19.60	940.22	1.50	Yarılma
	M6	58.55	19.66	1169.13	1.35	Yarılma
	M7	54.03	18.14	655.66	1.28	Yarılma
	M8	55.61	18.67	1013.69	1.00	Yarılma
	M9	55.63	18.68	704.4	1.14	Yarılma
	REF	48.90	16.42	126.7	5.92	Yarılma
	%2 DCI	1.01	0.34	0.7	11.12	Yarılma
	τ_u Doğ.	57.57	19.33	860.52	1.81	Yarılma
	TTE Doğ.	64.16	21.54	1388.54	1.67	Yarılma

K4 durumunda; M2, M4, M6, M8 ve M9 serileri referans betondan daha fazla enerji tüketmiştir. K4 durumunda, %2 DCI serisinde toplam tüketilen enerji miktarı dramatik bir azalış göstermiştir. Sabit voltaj uygulama süresinin en fazla olduğu K6 durumunda M1 serisi hariç puzolanlı serilerin tamamı referans seriden daha fazla enerji tüketmiştir. Buna göre uzun süre korozyon akımına maruziyet durumunda puzolanlı serilerin bağ dayanımı, içerisinde sadece Portland çimentosu bulunan referans betondan çok daha iyi performans göstermiştir. Şekil 4.37’de serilerin farklı korozyon seviyelerinde tüketmiş oldukları toplam enerji miktarları verilmiştir. Buna göre değerlendirildiğinde; %3 korozyon seviyesine kadar toplam tüketilen enerji miktarlarında artışlar meydana gelmiştir. %6 korozyon seviyesinde toplam enerji tüketimleri büyük ölçüde azalmıştır.

4.9. Ağırlık Kaybı Yüzdesinin Belirlenmesi

Farklı korozyon durumları için hızlandırılmış korozyon deneyi uygulanan numuneler, deney tamamlandıktan sonra aderans dayanımının belirlenmesi için pullout deneyine tabi tutulmuştur. Buna göre K2, K4 ve K6 durumları için, Şekil 4.38-4.40 arasında verilen donatılar kral suyu çözeltisi ile temizlenip korozyon kaynaklı ağırlık kayıpları belirlenerek sonuçlar sırasıyla Tablo 4.18-4.20 arasında verilmiştir.



Şekil 4.38. M1-M6 arası serilerin pullout deneyi sonrası donatı görselleri



Şekil 4.39. M7-M9, REF ve %2 DCI kodlu serilerin pullout deneyi sonrası donatı görselleri



Şekil 4.40. Doğrulama kodlu serilerin pullout deneyi sonrası donatı görselleri

Tablo 4.18. K2 durumunda serilerde oluşan gerçek ağırlık kaybı yüzdesi

Seri Adı	Deney tekrarında gerçek ağırlık kaybı (%)	Ortalama gerçek ağırlık kaybı (%)
REF	2.85 2.99	2.92
%2 DCI	2.99 2.99	2.99
M1	1.14 1.00	1.07
M2	0.71 1.14	0.93
M3	0.71 0.71	0.71
M4	1.14 0.71	0.93
M5	0.71 0.71	0.71
M6	0.57 0.43	0.50
M7	0.57 0.57	0.57
M8	0.43 0.57	0.50
M9	0.43 0.57	0.50
Ort. % Ağ. Kay. Doğ.	0.54 0.44	0.49
τ u Doğ. % Ağ. Kay.	0.90 0.71	0.81
TTE Doğ. % Ağ. Kay.	0.95 0.93	0.94

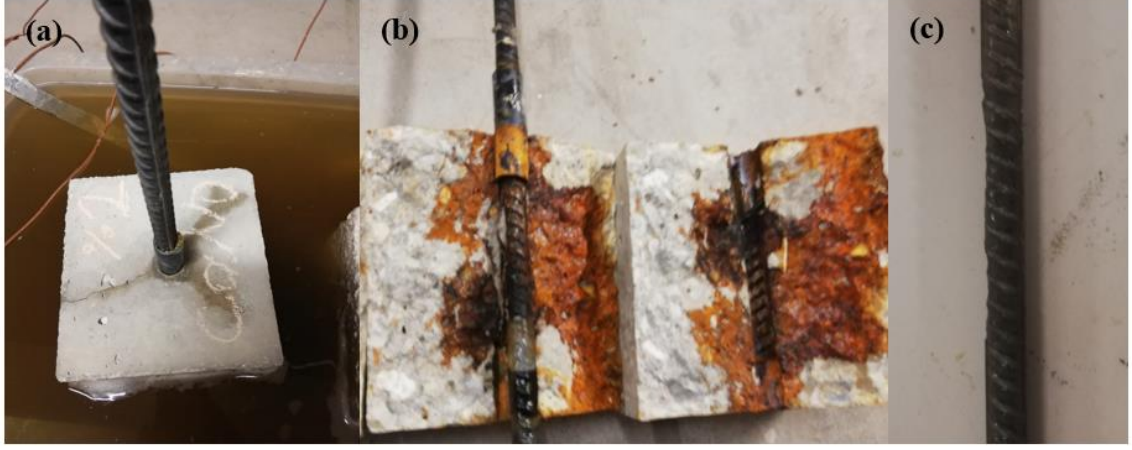
Tablo 4.19. K4 durumunda serilerde oluşan gerçek ağırlık kaybı yüzdesi

Seri Adı	Deney tekrarında gerçek ağırlık kaybı (%)	Ortalama gerçek ağırlık kaybı (%)
REF	3.42 3.56	3.49
%2 DCI	6.41 6.84	6.63
M1	1.43 1.28	1.35
M2	1.43 1.28	1.35
M3	1.14 1.14	1.14
M4	1.43 1.14	1.28
M5	1.00 1.28	1.14
M6	1.14 0.86	1.00
M7	1.00 0.86	0.93
M8	1.00 0.71	0.86
M9	0.71 0.86	0.78
Ort. % Ağ. Kay. Doğ.	0.87 0.97	0.92
τ u Doğ. % Ağ. Kay.	1.25 1.50	1.38
TTE Doğ. % Ağ. Kay.	1.29 1.32	1.31

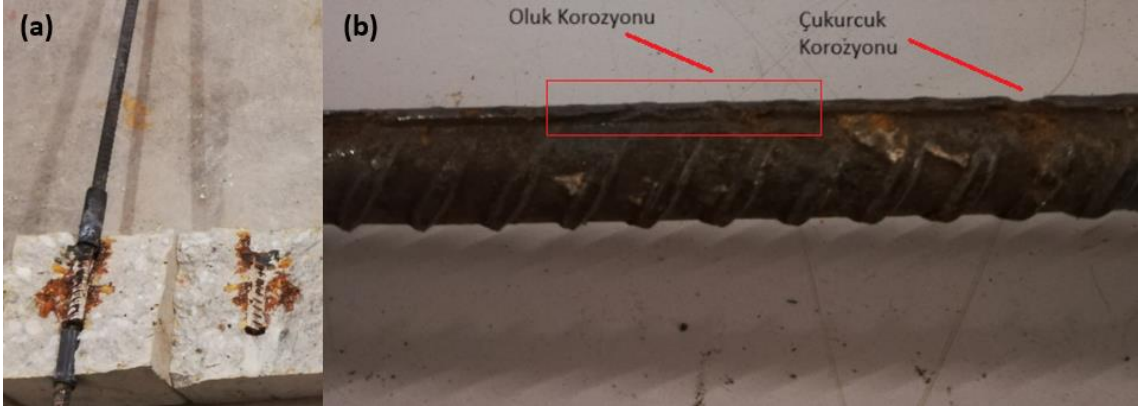
Tablo 4.20. K6 durumunda serilerde oluşan gerçek ağırlık kaybı

Seri Adı	Deney tekrarında gerçek ağırlık kaybı (%)	Ortalama gerçek ağırlık kaybı (%)
REF	5.70 6.13	5.92
%2 DCI	11.69 10.55	11.12
M1	3.42 2.85	3.14
M2	2.14 2.28	2.21
M3	1.43 1.57	1.50
M4	2.00 1.57	1.78
M5	1.43 1.57	1.50
M6	1.28 1.43	1.35
M7	1.43 1.14	1.28
M8	1.14 0.86	1.00
M9	1.28 1.00	1.14
Ort. % Ağ. Kay. Doğ.	1.11 1.21	1.16
tu Doğ.. % Ağ. Kay.	1.90 1.72	1.81
TTE Doğ. % Ağ. Kay.	1.63 1.71	1.67

Çekilen ortalama korozyon akımlarında en iyi performansı, içerisinde silis dumanı ikame oranının %9 olduğu M7, M8 ve M9 serileri göstermiştir. Benzer bir durum gerçek ağırlık kaybı yüzdesi için de söz konusudur. Buna göre silis dumanı geçirimsizliği artırarak, donatıya nüfuz edecek olan Cl^- iyonlarının geçişini sınırlandırmış ve korozyon mekanizmasının oluşumunu önemli ölçüde engellemiştir. Diğer yandan puzolanlı serilerin tamamı referans betona göre korozyon kaynaklı kütle kaybında daha iyi performans göstermiştir. Puzolanların boşluk yapısını doldurarak daha kompakt bir yapı oluşturmaları bunun en büyük sebebidir. İçerisinde kalsiyum nitrit bulunan karışım, Şekil 4.22 ve 4.24'te verilen akım zaman grafiklerine göre değerlendirildiğinde, yüksek miktarda akım çekmiştir. Buna paralel olarak %2 DCI kodlu seride yüksek oranda ağırlık kaybı elde edilmiştir. %2 DCI ve REF kodlu serilerde K6 durumu için korozyon görselleri sırasıyla Şekil 4.41 ve Şekil 4.42'de verilmiştir.



Şekil 4.41. K6 durumunda %2 DCI kodlu seride korozyon (a) hızlandırılmış korozyon deneyi sırasında betonun çatlaması (b) pullout sonrası beton iç yüzünde oluşmuş yoğun korozyon ürünleri (c) kral suyu ile temizliği yapılmış donatıda kesit kaybı



Şekil 4.42. K6 durumunda REF kodlu seride korozyon (a) pullout sonrası beton iç yüzünde oluşan korozyon ürünleri (b) kral suyu ile temizliği yapılmış donatıda kesit kaybı

Şekil 4.41 incelendiğinde; K6 durumunda içinde kalsiyum nitrit bulunan seri hızlandırılmış korozyon deneyinin yaklaşık 50. saatinde çatlamış ve buna bağlı olarak dramatik bir şekilde korozyona uğramıştır. Hızlandırılmış korozyon deneylerinin hiçbirinde böyle bir durum oluşmamıştır. Bu, literatürde vurgulanan $[NO_2^-/Cl^-]$ oranının sınırlı kalmasıyla, kalsiyum nitritin korozyonu hızlandırabileceği durumuyla örtüşmektedir. Donatıda korozyon kaynaklı oluşan kesit kaybı bariz bir şekilde ortaya çıkmıştır. Şekil 4.42 incelendiğinde; referans seride K6 durumunda oluşan korozyon ürünleri puzolanlı serilerin hepsinden daha fazla olmuştur. Buna göre; korozyon ürünleri beton içerisine yayılmış ancak beton çatlamamıştır. Donatıda bağlı boy bölgesince uzanan oluk korozyonu ve birkaç noktada oluşmuş çukurcuk korozyonu meydana gelmiştir.

4.10. SEM-EDX Analizi

Tez çalışması kapsamında seçilen bazı numunelere 28 ve 56 günlük kür uygulandıktan sonra SEM görüntüleri alınıp, EDX analizleri yapılarak numunelerin mikroyapısal özellikleri değerlendirilmiştir. Mikroyapı analizleri deneysel sonuçların desteklenmesi amacıyla yapılmıştır. Görüntüleme ve analizler basınç numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Belirtilen kür sürelerinin sonunda; numuneler, hidrasyonun durması için 105 °C’de 2 gün boyunca bekletilmiştir. Basınç numunelerinden elde edilen SEM-EDX analizi yapılacak parçalar, basınç numunesinin merkezinden alınan bağlayıcı hamuru içeren parçalardır. Buna göre analiz için hazırlanan numuneler Şekil 4.43’te verilmiştir. Görüntüleme ve analizler; %2 DCI, UK TEK, YFC TEK, doğrulama, referans ve M6 serilerinin hamur bölgesi üzerinde 28 ve 56 günlük kür sürelerinde uygulanmıştır. Buna göre; elde edilen görüntü ve analizler için yapılan değerlendirmeler bu bölümde verilmiştir.



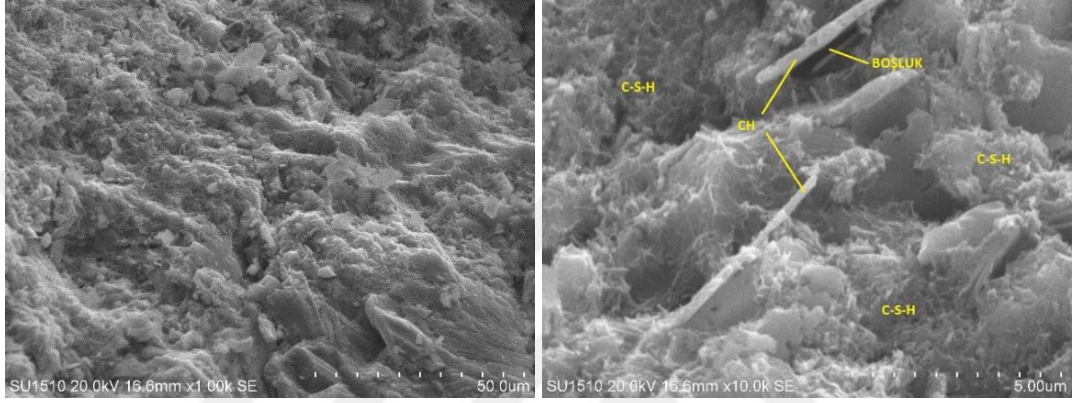
Şekil 4.43. SEM-EDX analizi için hazırlanan numuneler

4.10.1. 28 ve 56 günlük bazı serilerde SEM görüntüleri

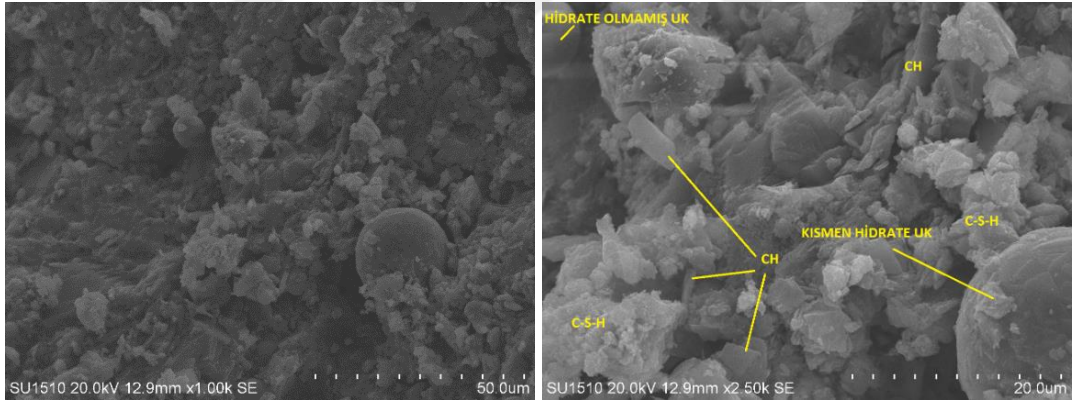
Şekil 4.44’ te %2 oranında kalsiyum nitrit (DCI) içeren karışımın farklı büyütme ölçeklerinde 28 günlük SEM görüntüsü verilmiştir. Buna göre SEM görüntüleri incelendiğinde; yoğun olarak CSH fazlarına ve az miktarda CH yapılarına rastlanılmıştır. Fazlar arasında boşluk miktarları az da olsa göze çarpmaktadır.

Şekil 4.45’te Taguchi yöntemi kullanılarak basınç dayanımı için belirlenmiş optimum pozolan toplam içeriği kadar sadece uçucu kül (UK) katılarak hazırlanmış karışımın farklı büyütme ölçeklerinde 28 günlük SEM görüntüleri verilmiştir. Buna göre SEM

görüntüleri incelendiğinde; CSH fazlarına, hidrate olmamış ve kısmen hidrate olmuş uçucu kül partiküllerine ve yoğunluğu Şekil 4.44'ten daha fazla olan CH yapılarına rastlanmıştır. Fazlar arası boşluk yapılarının, Şekil 4.44 ile kıyaslandığında daha fazla olması dikkat çekmektedir. SEM görüntülerinde CH yapılarının ve hidrate olmamış uçucu kül partiküllerinin bulunması puzolanik reaksiyonların tamamlanmadığını göstermektedir. Yukarıda bahsedilen durumlar, bu seride görülen 28 günlük basınç dayanımı düşüklüğünü mikroyapısal olarak açıklamaktadır.



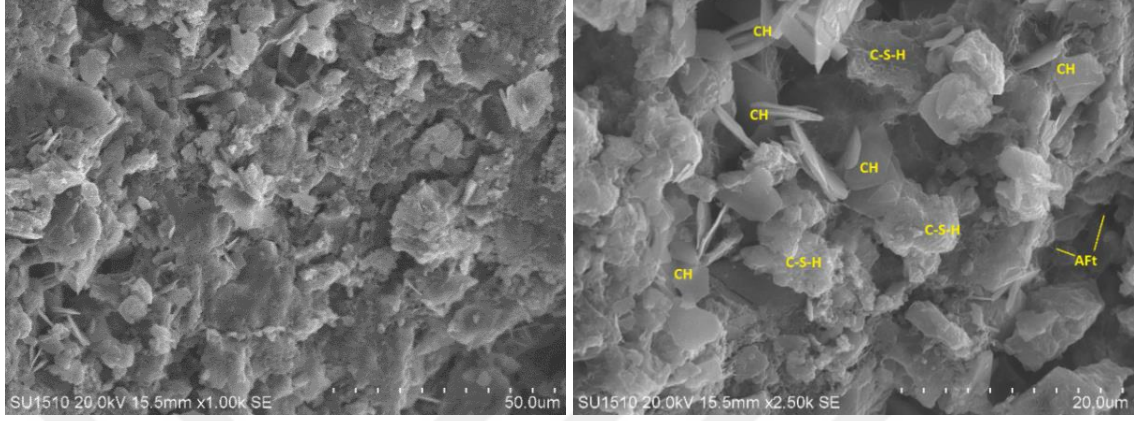
Şekil 4.44. %2 DCI kodlu karışımın 28 günlük SEM görüntüsü



Şekil 4.45. UK TEK kodlu karışımın 28 günlük SEM görüntüsü

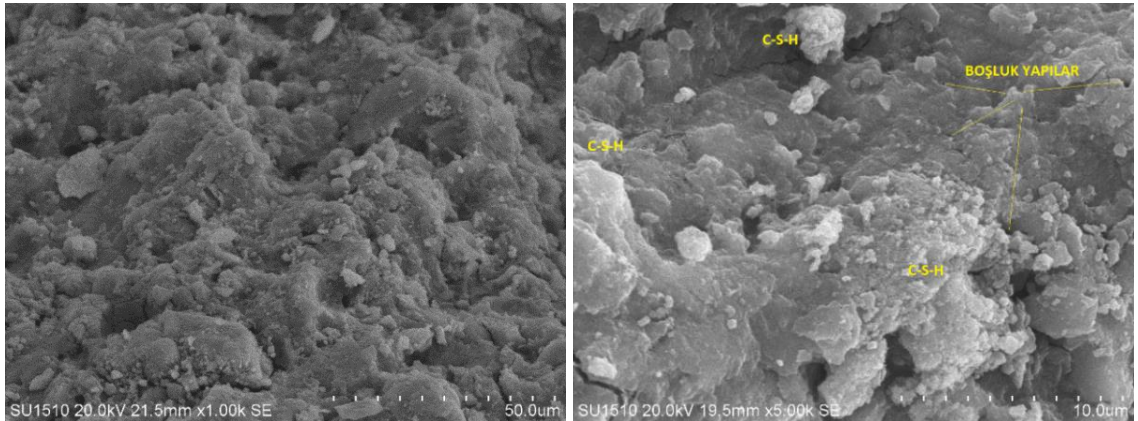
Şekil 4.46'da Taguchi yöntemi kullanılarak basınç dayanımı için belirlenmiş optimum puzolan toplam içeriği kadar sadece granüle yüksek fırın cürufu (YFC) katılarak hazırlanmış karışımın farklı büyütme ölçeklerinde 28 günlük SEM görüntüleri verilmiştir. Buna göre SEM görüntüleri incelendiğinde; CSH faz yapılarına, yoğun olarak tabakalı vaziyette CH yapılarına ve bazı boşluklarda da az miktarda etrenjit (Aft) çubuklarına rastlanmıştır. Fazlar arası boşluk yapılarının UK TEK karışımına benzer olarak, Şekil 4.44'e göre daha fazla olduğu görülmektedir. Görüntülerde CH yapılarının fazla olması

puzolanik reaksiyonların devam ettiğinin göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Yukarıda bahsedilen durumlar, bu seride görülen 28 günlük basınç dayanımı düşüklüğünü mikroyapısal olarak açıklamaktadır.



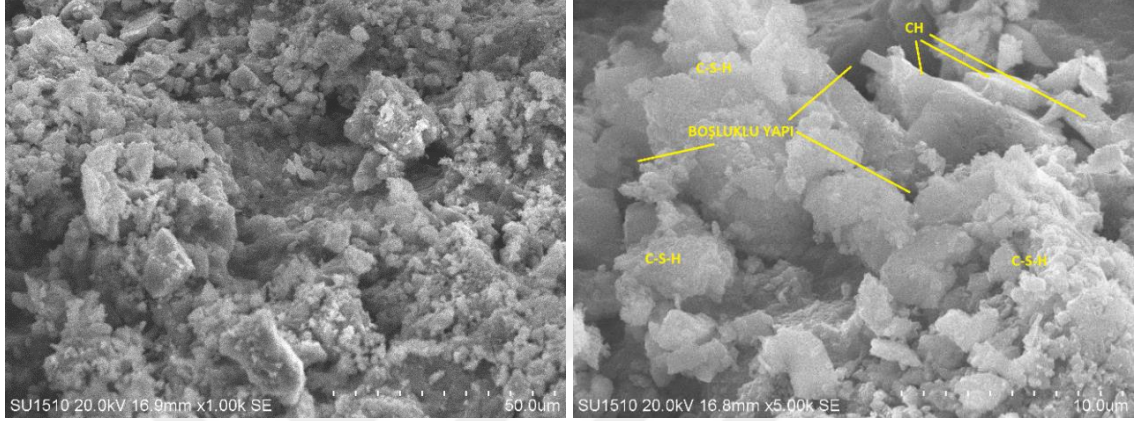
Şekil 4.46. YFC TEK kodlu karışımın 28 günlük SEM görüntüsü

Şekil 4.47’de Taguchi yöntemi kullanılarak belirlenmiş optimum karışım içeriğine göre hazırlanmış doğrulama karışımının farklı büyütme oranlarında 28 günlük SEM görüntüleri verilmiştir. Buna göre SEM görüntüleri incelendiğinde; CSH faz yapılarının yoğunluğu ve faz yapıları arasında az miktarda boşluklu yapı bulunması dikkat çekmektedir. Doğrulama karışımından elde edilen 28 günlük SEM görüntüleri, diğer puzolanlı görüntülerle ve Şekil 4.48’de verilen referans betonun görüntüsüyle kıyaslandığında daha kompakt bir yapının olduğu görülmektedir. Doğrulama serisinde 28 günlük kür süresinde elde edilen SEM görüntüleri daha geçirimsiz, yüksek dayanımlı bir betonun elde edildiğini mikroyapısal olarak desteklemektedir.



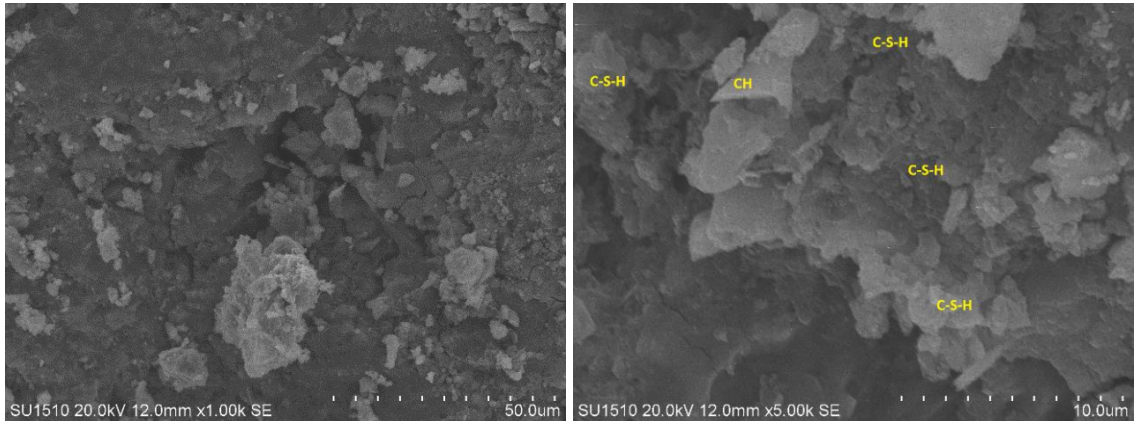
Şekil 4.47. 28 G doğrulama kodlu karışımın SEM görüntüsü

Şekil 4.48’de farklı süper akışkanlaştırıcı oranlarında en yüksek basınç dayanımının elde edildiği referans karışımın farklı büyütme oranlarında 28 günlük SEM görüntüleri verilmiştir. Buna göre SEM görüntüleri incelendiğinde yoğun miktarda CSH fazlarına ve masif görüntü sergileyen CH yapılarına rastlanılmıştır. Diğer yandan fazlar arasında boşluklu yapılar da tespit edilmiştir.



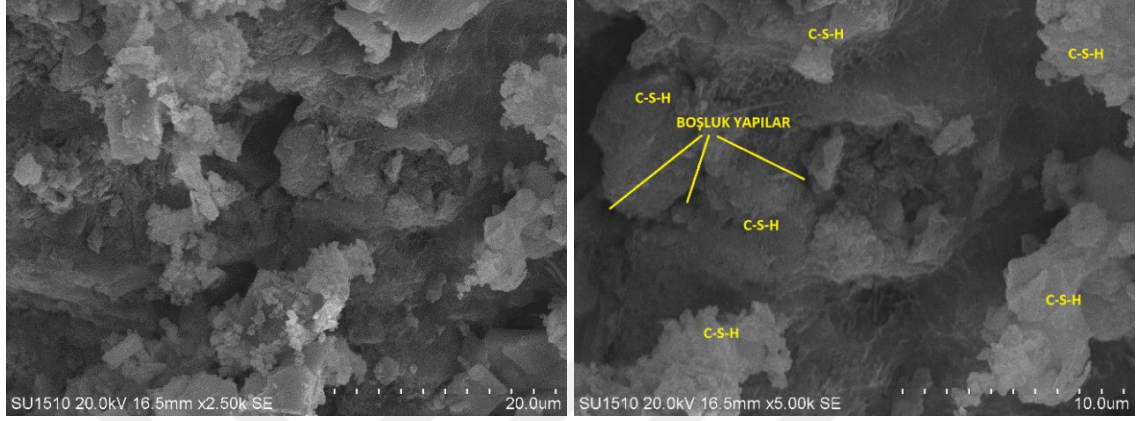
Şekil 4.48. REF 1.25 SA kodlu karışımın 28 günlük SEM görüntüsü

Şekil 4.49’da Taguchi L9 ortogonal dizi tablosuna göre hazırlanmış 28 günlük kür süresinde en yüksek basınç dayanımının elde edildiği M6 kodlu serinin farklı büyütme oranlarında 28 günlük SEM görüntüleri verilmiştir. Buna göre SEM görüntüleri incelendiğinde, yoğun CSH yapıları dikkat çekmekle birlikte az miktarda CH yapıları da gözlenmiştir. Faz yapıları arasında boşluk miktarı sınırlı olarak değerlendirilmiştir. 28 günlük kür süresinde karışımlardan alınan görüntüler genel olarak değerlendirildiğinde en sıkı yapının M6 ve doğrulama serilerinden elde edildiği görülmektedir.



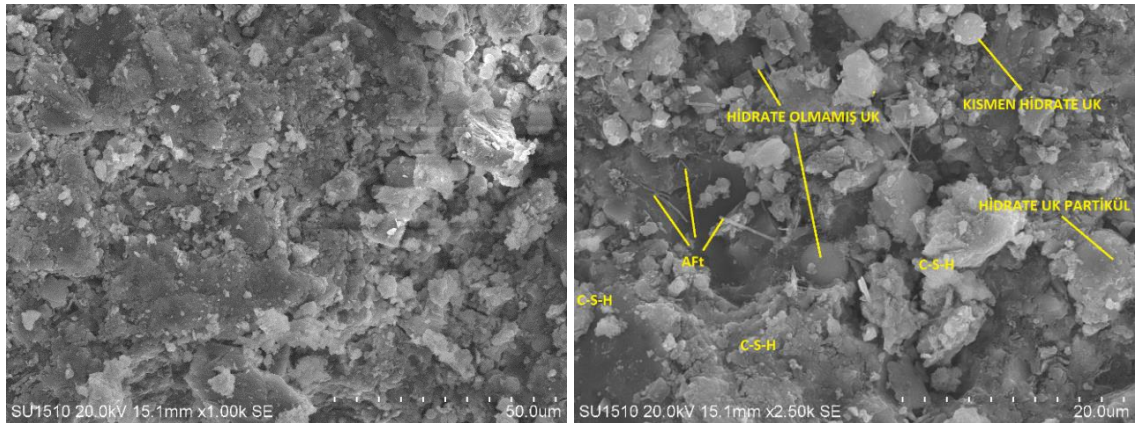
Şekil 4.49. M6 kodlu karışımın 28 günlük SEM görüntüsü

Şekil 4.50’ de %2 oranında kalsiyum nitrit (DCI) içeren serinin farklı büyütme ölçeklerinde 56 günlük SEM görüntüsü verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde yoğun olarak C-S-H fazlarına rastlanmıştır. Aynı karışımın 28 günlük SEM görüntüsü Şekil 4.44 ile kıyaslandığında, 56 günlük numunede CH yapılara rastlanmamıştır.



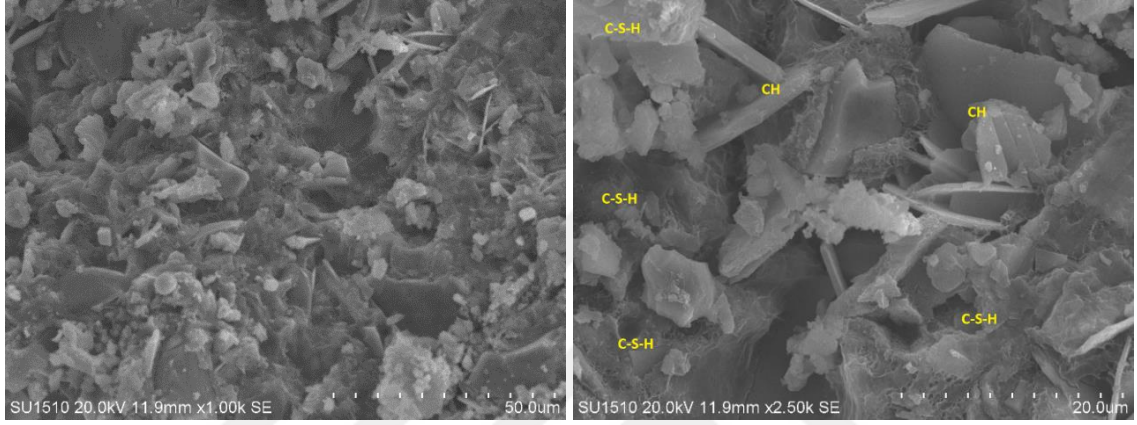
Şekil 4.50. %2 DCI kodlu karışımın 56 günlük SEM görüntüsü

Şekil 4.51’de basınç dayanımı için Taguchi yöntemi ile belirlenmiş optimum puzolan toplam içeriği kadar sadece uçucu kül (UK) katılarak hazırlanmış karışımın farklı büyütme ölçeklerinde 56 günlük SEM görüntüleri verilmiştir. Buna göre SEM görüntüleri incelendiğinde hidrate olmuş, kısmen hidrate olmuş ve olmamış uçucu kül partiküllerine, CSH fazına ve incelenen kesitte sınırlı ölçekte etrenjite (AFt) rastlanmıştır. Daha yüksek oranda uçucu kül içermesine rağmen, 28 günlük SEM görüntüsü Şekil 4.45 ile karşılaştırıldığında CSH fazlarının yoğunlaştığı, uçucu kül partiküllerinin hidratasyonunun arttığı ve puzolonik reaksiyon sonucu CH yapılarının azaldığı, hatta incelenen kesitte rastlanmadığı görülmüştür.



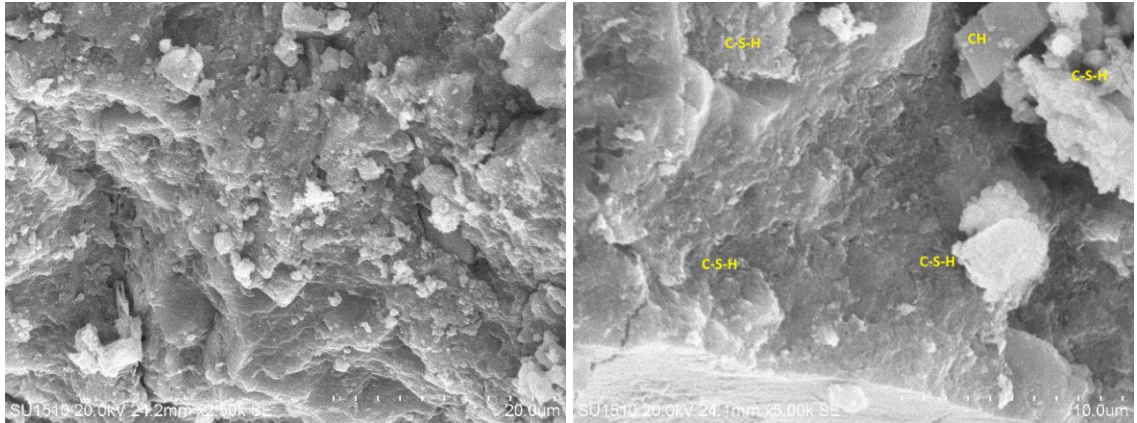
Şekil 4.51. UK TEK kodlu karışımın 56 günlük SEM görüntüsü

Şekil 4.52’de basınç dayanımı için Taguchi yöntemi ile belirlenmiş optimum puzolan toplam içeriği kadar sadece granüle yüksek fırın cürufu (YFC) katılarak hazırlanmış karışımın farklı büyütme ölçeklerinde 56 günlük SEM görüntüleri verilmiştir. Buna göre SEM görüntüleri incelendiğinde CSH faz yapılarının, Şekil 4.46 ile kıyaslandığında YFC oranı fazla olmasına rağmen benzer şekilde oluştuğu görülmüştür. Aynı zamanda CH yapılar CSH jel fazı içerisinde gömülü olarak görüntülenmiştir. İlerleyen yaşlarla etrenjit yapılarına da incelenen kesitte rastlanmamıştır.



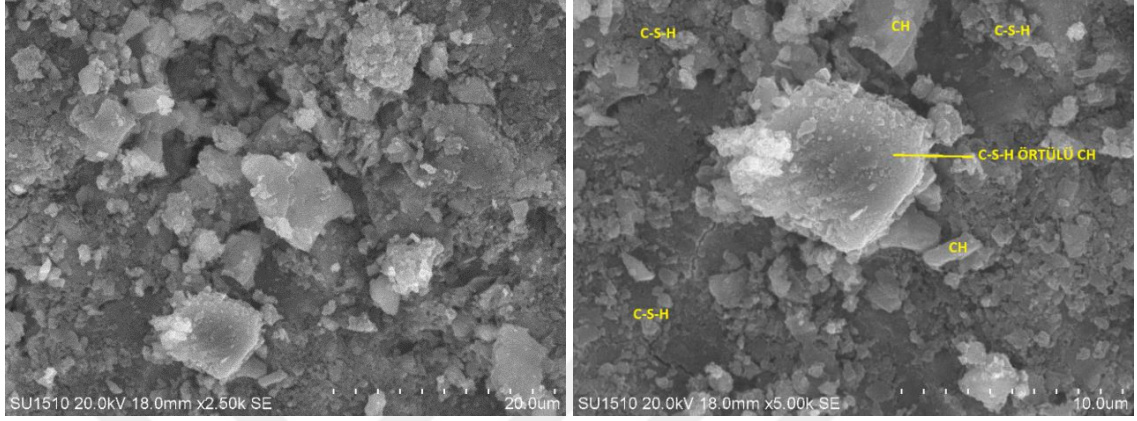
Şekil 4.52. YFC TEK kodlu karışımın 56 günlük SEM görüntüsü

Şekil 4.53’te Taguchi yöntemi ile 56 günlük basınç dayanımı için belirlenmiş optimum karışım içeriğine göre hazırlanmış doğrulama karışımının farklı büyütme oranlarında 56 günlük SEM görüntüleri verilmiştir. Buna göre SEM görüntüleri incelendiğinde; CSH faz yapıları yoğun olarak bulunmakta ve incelenen kesitte çok az miktarda CH yapıları görünmektedir. Şekil 4.54’te verilen 56 günlük referans beton ile karşılaştırma yapıldığında daha homojen ve yoğun CSH fazları dikkat çekmektedir.



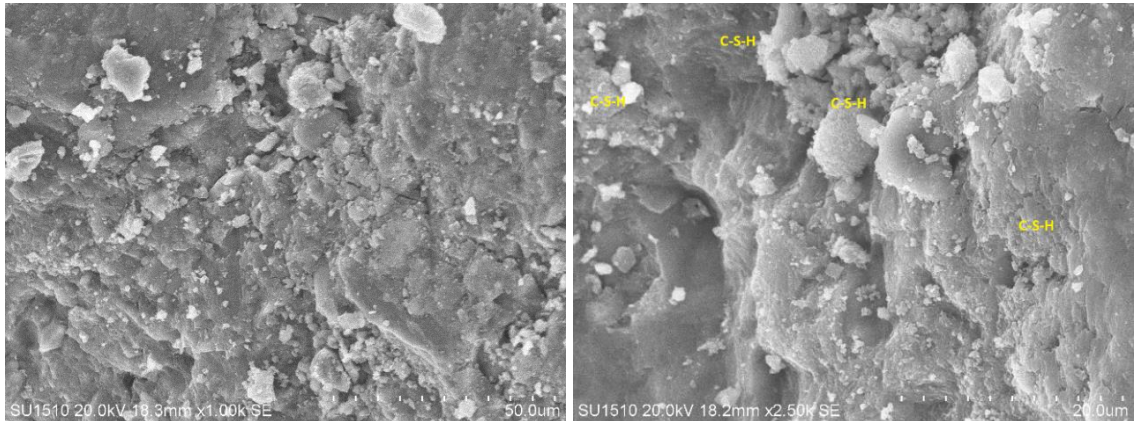
Şekil 4.53. 56 G doğrulama kodlu karışımın SEM görüntüsü

Şekil 4.54'te farklı süper akışkanlaştırıcı oranlarında en yüksek basınç dayanımını veren referans karışımın farklı büyütme oranlarında 56 günlük SEM görüntüleri verilmiştir. Buna göre SEM görüntüleri incelendiğinde yoğun miktarda CSH fazlarına ve kesitte bazı noktalarda CSH jelleri ile örtülü CH yapılarına rastlanılmıştır.



Şekil 4.54. REF 1.25 SA kodlu karışımın 56 günlük SEM görüntüsü

Şekil 4.55'te Taguchi L9 ortogonal dizi tablosuna göre hazırlanmış 56 günlük kür süresinde en yüksek basınç dayanımını veren M6 kodlu serinin farklı büyütme oranlarında 56 günlük SEM görüntüleri verilmiştir. Buna göre SEM görüntüleri incelendiğinde; yoğun CSH yapıları dikkat çekmektedir. Şekil 4.53'te verilen 56 G doğrulama kodlu karışıma benzer olarak CSH yapıları homojen ve yoğundur. Aynı karışımın 28 günlük SEM görüntüleri ile karşılaştırma yapıldığında CH yapılarına rastlanamamıştır. Bunda puzolanik reaksiyonlarla CH'nin tüketilmesinin etkili olduğu düşünülmektedir.



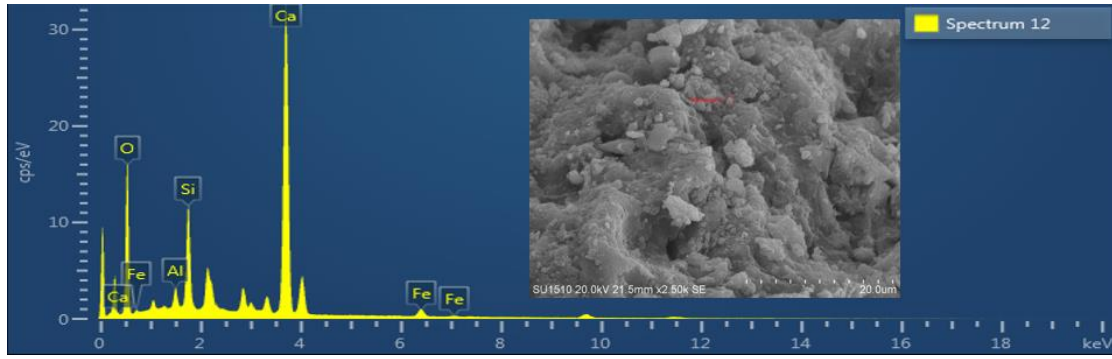
Şekil 4.55. M6 kodlu karışımın 56 günlük SEM görüntüsü

4.10.2. 28 ve 56 günlük bazı serilerde EDX analizi

SEM görüntüsü alınan numuneler üzerinde noktasal EDX analizleri yapılmıştır. Buna göre spektrumlardan elde edilen pikler Şekil 4.56-4.67 arasında ve elementlerin atomik oranları Tablo 4.21-4.32 arasında verilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalara göre C-S-H fazında kalsiyum/silis (Ca/Si) oranı 2'den küçük olurken, CH fazında bu oran 2'den büyük elde edilmiştir (Gmira vd., 2002; Kunther vd., 2017; Lothenbach vd., 2011; Nasir Amin vd., 2022). Bu sebeple görüntüler üzerinde seçilen noktaların CH fazlarına denk geldiği düşünülmektedir.

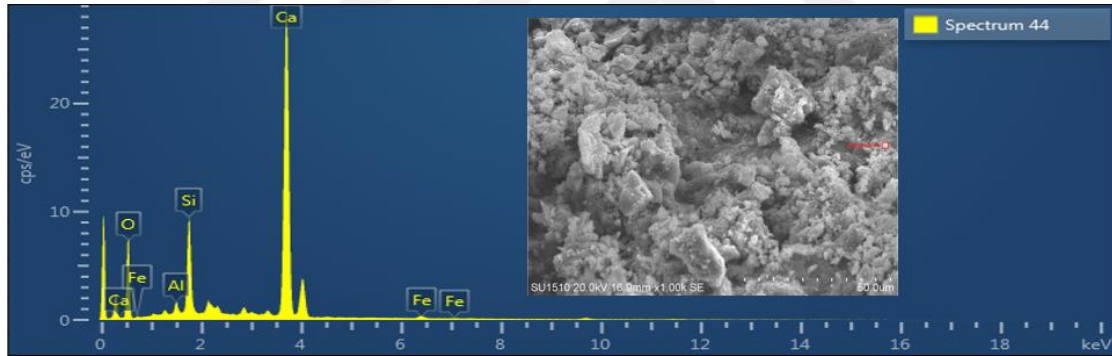
Yapılan analizlerde tüm serilerde kür süresine bağlı olarak Ca/Si oranında azalma meydana gelmiştir. Bu durum, mikroyapısal analizde zamana bağlı olarak kalsiyum tüketimi ile açıklanabilir. Genel olarak kalsiyum tüketimi puzolanlı serilerde daha fazla olmuştur. Puzolanik reaksiyonlarla ortamdaki kalsiyum kaynaklarındaki tüketimin artması buna sebep olarak gösterilebilir. Ayrıca dayanımlar arasındaki farklılıkları Ca/Si oranındaki değişim sınırlı olarak açıklayabilmektedir. Genellikle faz yapılarındaki düşük Ca/Si oranı basınç dayanımı açısından olumlu etki göstermektedir (Kunther vd., 2017). Ancak, beton heterojen bir malzeme olduğundan seçilen farklı noktalarda spektrum piklerinin değişebileceği unutulmamalıdır. Tablo 4.21-Tablo 4.32 arasında görüntü alınan serilerin noktasal EDX analiz sonuçları verilmiştir. Buna göre EDX analizleri değerlendirildiğinde; numunelerin 28 günlük örneklerinde Ca/Si oranı, 56 günlük örneklerinden daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuç kür süresi artışıyla birlikte serilerde oluşan basınç dayanımı artışıyla ilişkilendirilmiştir. Diğer yandan her iki kür süresinde de dayanımın en düşük olduğu YFC TEK ve UK TEK serilerinde Ca/Si oranı en yüksek değerleri almıştır. Referans ve kalsiyum nitrit içeren seride kür süresine bağlı olarak Ca/Si oranı azalması sınırlı olurken genel olarak puzolan içeren serilerde bu azalma yüksek olmuştur. Bu durum basınç dayanım sonuçlarına uyumlu olarak sadece Portland çimentosu içeren karışımların 28 günlük kür süresinde hemen hemen nihai dayanıma eriştiği yönünde değerlendirilmiştir. Ancak; puzolanlı serilerde, puzolanik reaksiyonlara bağlı olarak Ca tüketimi devam ettiğinden Ca/Si oranındaki azalma kür süresi artışında daha yüksek olmuştur. Bu durum; puzolanlı serilerin 56 gün kür süresi sonunda yüksek dayanım artış oranına ulaşmasıyla ilişkilendirilmiştir. İki farklı kür süresinde de yüksek dayanıma sahip serilerin Ca/Si oranları, dayanımı düşük serilerden daha düşük çıkmıştır.



Şekil 4.56. 28 G doğrulama kodlu karışımın EDX spektrumu

Tablo 4.21. 28 G doğrulama kodlu karışımın EDX analizi

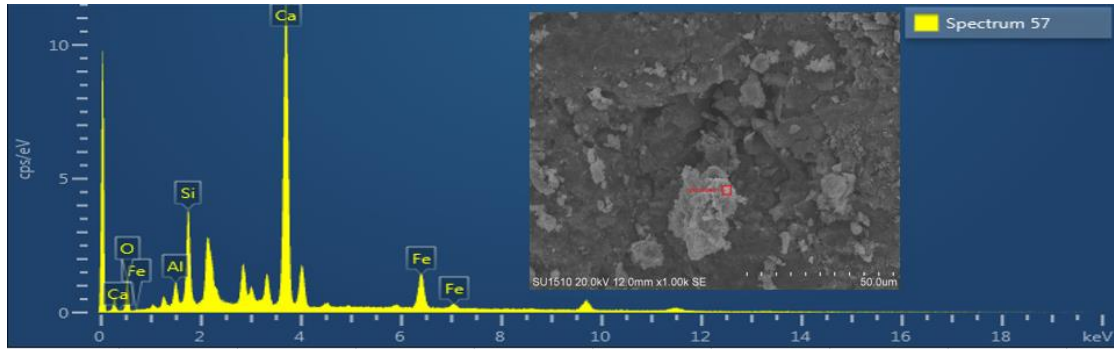
Spektrum			
Element	Seri Tipi	Atomik Oran (%)	Ca/Si Oranı
O	K serisi	64.46	3.51
Ca	K serisi	10.27	
Fe	K serisi	0.50	
C	K serisi	21.29	
Al	K serisi	0.67	
Si	K serisi	2.92	
Toplam		100	



Şekil 4.57. REF 1.25 SA kodlu karışımın 28 günlük EDX spektrumu

Tablo 4.22. REF 1.25 SA kodlu karışımın 28 günlük EDX analizi

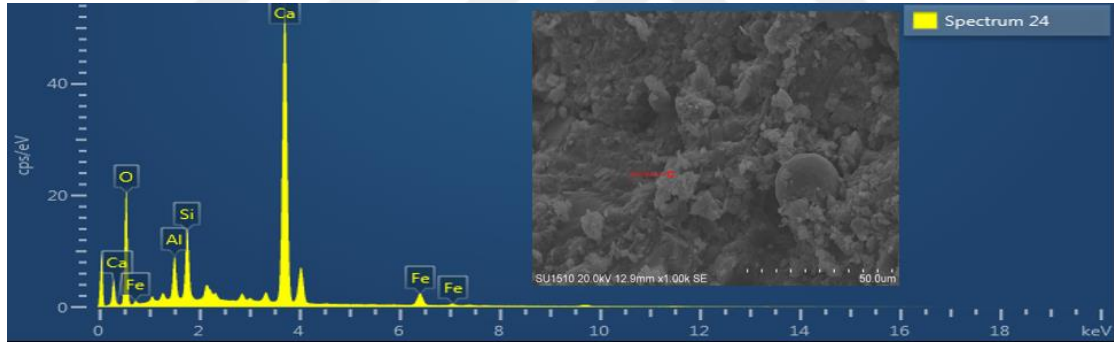
Spektrum			
Element	Seri Tipi	Atomik Oran (%)	Ca/Si Oranı
C	K serisi	20.71	3.94
O	K serisi	60.17	
Al	K serisi	0.56	
Si	K serisi	3.71	
Ca	K serisi	14.62	
Fe	K serisi	0.23	
Toplam		100	



Şekil 4.58. M6 kodlu karışımın 28 günlük EDX spektrumu

Tablo 4.23. M6 kodlu karışımın 28 günlük EDX analizi

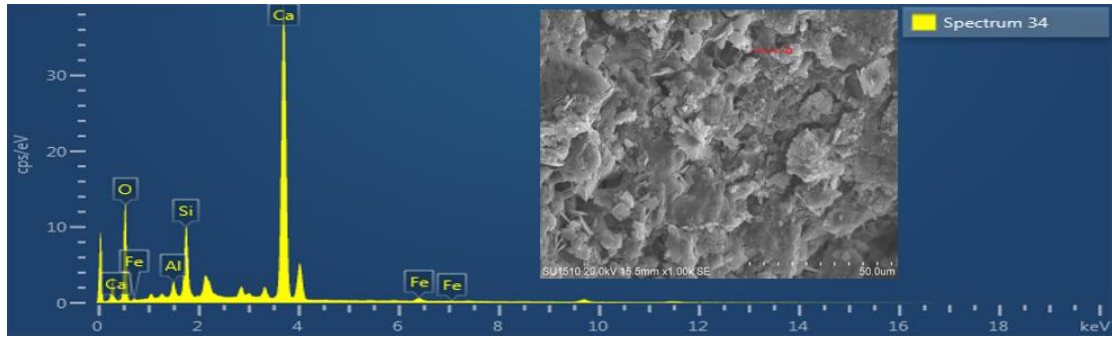
Spektrum			
Element	Seri Tipi	Atomik Oran (%)	Ca/Si Oranı
O	K serisi	43.40	3.59
Ca	K serisi	21.32	
Fe	K serisi	4.92	
C	K serisi	23.01	
Al	K serisi	1.72	
Si	K serisi	5.94	
Toplam		100	



Şekil 4.59. UK TEK 28 kodlu karışımın 28 günlük EDX spektrumu

Tablo 4.24. UK TEK 28 kodlu karışımın 28 günlük EDX analizi

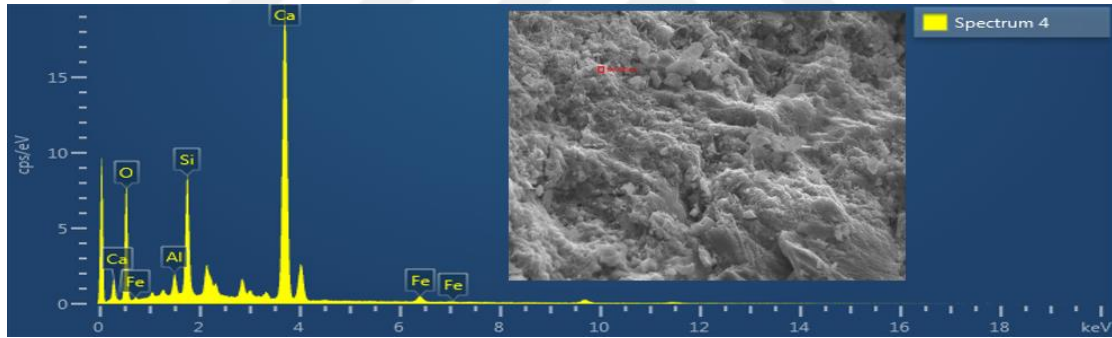
Spektrum			
Element	Seri Tipi	Atomik Oran (%)	Ca/Si Oranı
C	K serisi	18.27	5.04
O	K serisi	64.22	
Al	K serisi	1.82	
Si	K serisi	2.43	
Ca	K serisi	12.26	
Fe	K serisi	1.00	
Toplam		100.00	



Şekil 4.60. YFC TEK 28 G kodlu karışımın 28 günlük EDX spektrumu

Tablo 4.25. YFC TEK 28 G kodlu karışımın 28 günlük EDX analizi

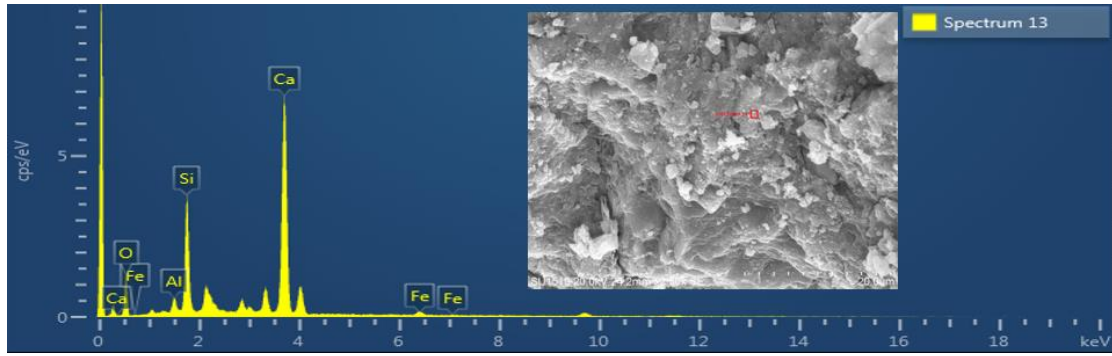
Spektrum			
Element	Seri Tipi	Atomik Oran (%)	Ca/Si Oranı
C	K serisi	18.14	5.00
O	K serisi	64.64	
Al	K serisi	0.72	
Si	K serisi	2.70	
Ca	K serisi	13.52	
Fe	K serisi	0.28	
Toplam		100.00	



Şekil 4.61. %2 DCI kodlu karışımın 28 günlük EDX spektrumu

Tablo 4.26. %2 DCI kodlu karışımın 28 günlük EDX analizi

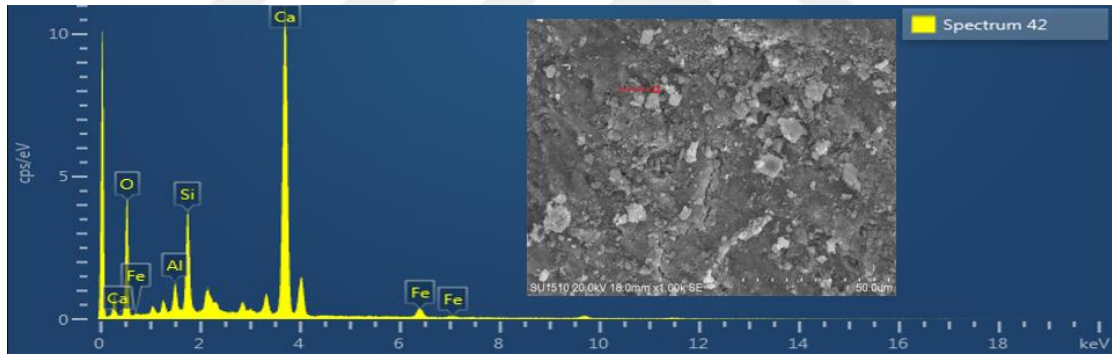
Spektrum			
Element	Seri Tipi	Atomik Oran (%)	Ca/Si Oranı
O	K serisi	65.68	3.00
Al	K serisi	0.91	
Si	K serisi	4.12	
C	K serisi	16.45	
Fe	K serisi	0.45	
Ca	K serisi	12.39	
Toplam		100.00	



Şekil 4.62. 56 G doğrulama kodlu karışımın 56 günlük EDX spektrumu

Tablo 4.27. 56 G doğrulama kodlu karışımın 56 günlük EDX analizi

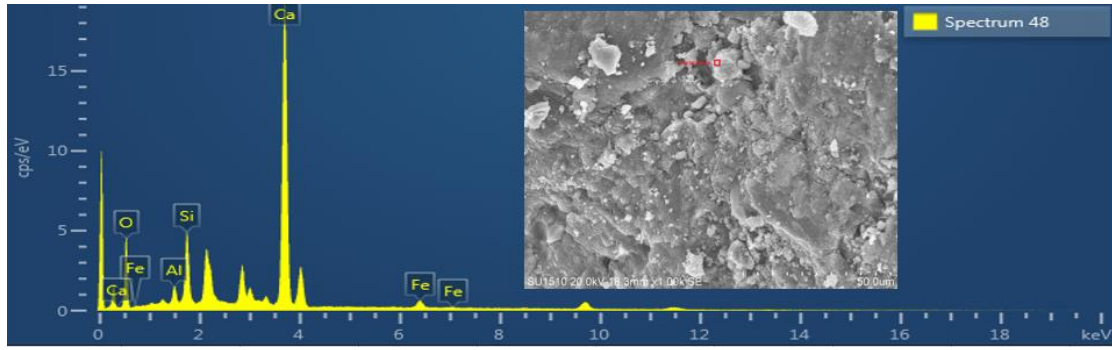
Spektrum			
Element	Seri Tipi	Atomik Oran (%)	Ca/Si Oranı
O	K serisi	55.56	2.33
Al	K serisi	1.09	
Si	K serisi	7.26	
Ca	K serisi	16.93	
Fe	K serisi	0.54	
C	K serisi	18.62	
Toplam		100.00	



Şekil 4.63. REF 1.25 SA kodlu karışımın 56 günlük EDX spektrumu

Tablo 4.28. REF 1.25 SA kodlu karışımın 56 günlük EDX analizi

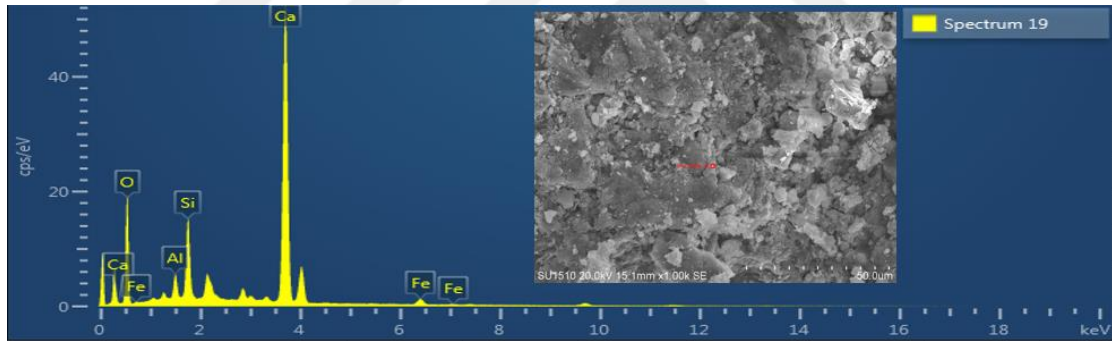
Spektrum			
Element	Seri Tipi	Atomik Oran (%)	Ca/Si Oranı
O	K serisi	65.18	3.66
Al	K serisi	1.17	
Si	K serisi	3.42	
Ca	K serisi	12.51	
Fe	K serisi	0.73	
C	K serisi	16.99	
Toplam		100.00	



Şekil 4.64. M6 kodlu karışımın 56 günlük EDX spektrumu

Tablo 4.29. M6 kodlu karışımın 56 günlük EDX analizi

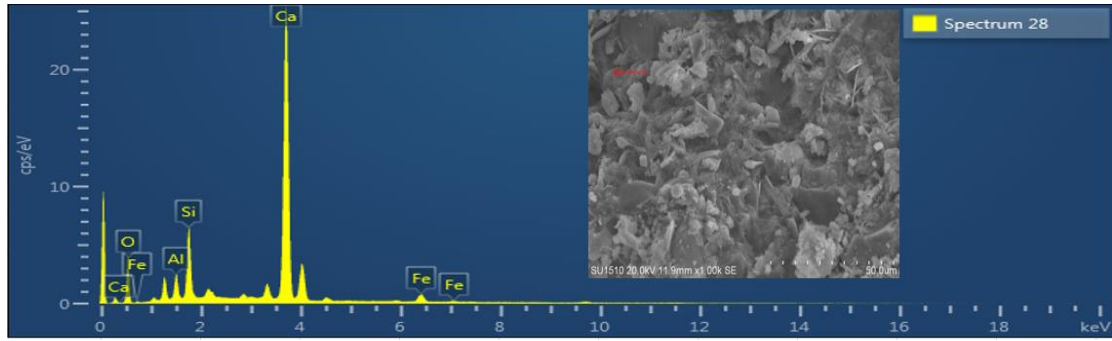
Spektrum			
Element	Seri Tipi	Atomik Oran (%)	Ca/Si Oranı
O	K serisi	59.09	3.04
Si	K serisi	4.6	
Ca	K serisi	14.00	
Al	K serisi	0.95	
Fe	K serisi	0.72	
C	K serisi	20.64	
Toplam		100.00	



Şekil 4.65. UK TEK kodlu karışımın 56 günlük EDX spektrumu

Tablo 4.30. UK TEK kodlu karışımın 56 günlük EDX analizi

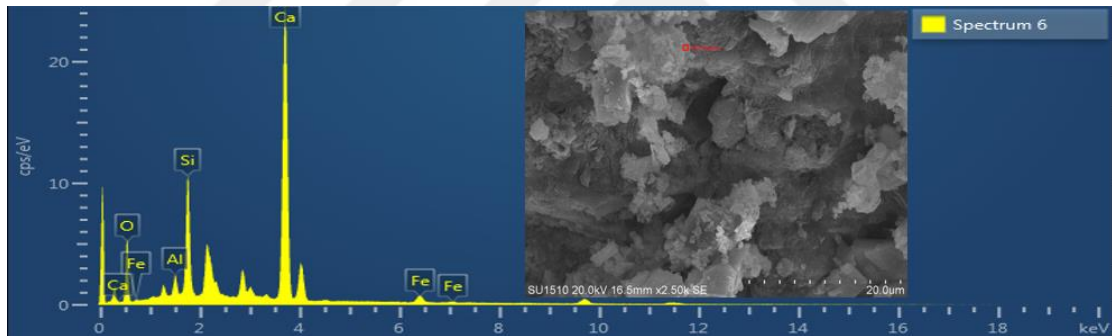
Spektrum			
Element	Seri Tipi	Atomik Oran (%)	Ca/Si Oranı
C	K serisi	24.15	4.53
O	K serisi	60.17	
Al	K serisi	0.98	
Si	K serisi	2.58	
Ca	K serisi	11.68	
Fe	K serisi	0.45	
Toplam		100.00	



Şekil 4.66. YFC TEK kodlu karışımın 56 günlük EDX spektrumu

Tablo 4.31. YFC TEK kodlu karışımın 56 günlük EDX analizi

Spektrum			
Element	Seri Tipi	Atomik Oran (%)	Ca/Si Oranı
O	K serisi	61.53	4.89
Al	K serisi	1.94	
Si	K serisi	4.46	
Ca	K serisi	21.83	
Fe	K serisi	1.14	
C	K serisi	9.11	
Toplam		100.00	



Şekil 4.67. %2 DCI kodlu karışımın 56 günlük EDX spektrumu

Tablo 4.32. %2 DCI kodlu karışımın 56 günlük EDX analizi

Spektrum			
Element	Seri ti	Atomik Oran (%)	Ca/Si Oranı
O	K serisi	58.11	2.98
Ca	K serisi	16.53	
Fe	K serisi	0.77	
C	K serisi	17.78	
Si	K serisi	5.53	
Al	K serisi	1.18	
Toplam		100.00	

5. İSTATİSTİK ANALİZ SONUÇLARI

Tez çalışması kapsamında; ilgili performans deneyleri için yapılan Taguchi istatistik analizleri, hedef değer üzerinde parametrik etkinin belirlenmesi ve parametrelerin optimum seviyelerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Elde edilen performans deneylerinin her biri için ayrı olarak uygulanan yöntemde S/N, varyans ve optimizasyon analizler yapılmıştır. Varyans analizinin sonuç değerlerinden olan P Değeri ve F Değeri'nin hesaplanamaması tasarımın doygun olması ile ilgili olup DF toplam 8 olduğundan, hata satırına herhangi bir serbestlik derecesi kalmamıştır (Ofiaz, 2023; Uray vd., 2022).

Bazı performans deneylerinde regresyon eşitliği çıkarmak ve parametrik etkiyi Taguchi yöntemi ile birlikte yorumlamak için Yüzey Tepki Metodu (YTM) (Response Surface Methodology)' na ait sonuç ve değerlendirmeler bu bölümde verilmiştir. Buna göre deney sonuçları kullanılarak yapılan istatistik analizlerle parametrik etki incelenmiş, doğrulama deneyleri ile Taguchi yönteminin tahmin noktasındaki tutarlılık performansı ortaya konulmaya çalışılmıştır. YTM yukarıda bahsedildiği gibi esas olarak regresyon eşitliği elde etmek amacıyla kullanılmıştır. Ancak istatistik deney tasarım yöntemlerinden olan YTM; tez çalışmasında, Taguchi yöntemi ile birlikte değerlendirme maksadıyla, tüm kriterlerde parametre optimizasyonu için de kullanılmıştır.

Kontur grafikleri ile gösterilen YTM optimum parametre seviye sonuçları Taguchi yöntemi ile bulunan optimum parametre değerleri ile kıyaslaması yapılmıştır. Serilerdeki deney tekrarlarında (basınç, eğilme ve çekme) varyasyon katsayısı yüksek çıkması durumunda (ASTM C109/C109M-20, 2020' a göre %8.70'den fazla) yüksek varyasyona sebep olan deney sonucu ortalamaya dahil edilmeyerek yeni ortalama hesaplanmıştır. Buna göre, istatistiksel analizler tekrarlanarak parametrik etki yeniden incelenmiş bu durum düzeltilmiş durum olarak isimlendirilmiştir. Varyasyon katsayısı (COV) göz önünde bulundurulmadan direkt 3 deney tekrarının ortalamasının değerlendirildiği durum standart durum olarak isimlendirilmiştir. Yüksek varyasyonun elde edildiği kriterler için Taguchi analizlerine göre optimum parametre seviyelerinin değişmesi halinde, iki durum için de ayrı ayrı doğrulama karışımı üretilmiş yüksek deney sonucunun elde edildiği durum optimum koşul olarak kabul edilmiştir.

Gri İlişkisel Analiz (GİA), çoklu kriterlerin değerlendirilmesi ve optimizasyonu için kullanılan bir analiz yöntemidir. Bu yöntem, kriterlerin belirli bir performans ölçütüne olan etkilerini değerlendirmek ve en iyi kombinasyonu belirlemek amacıyla

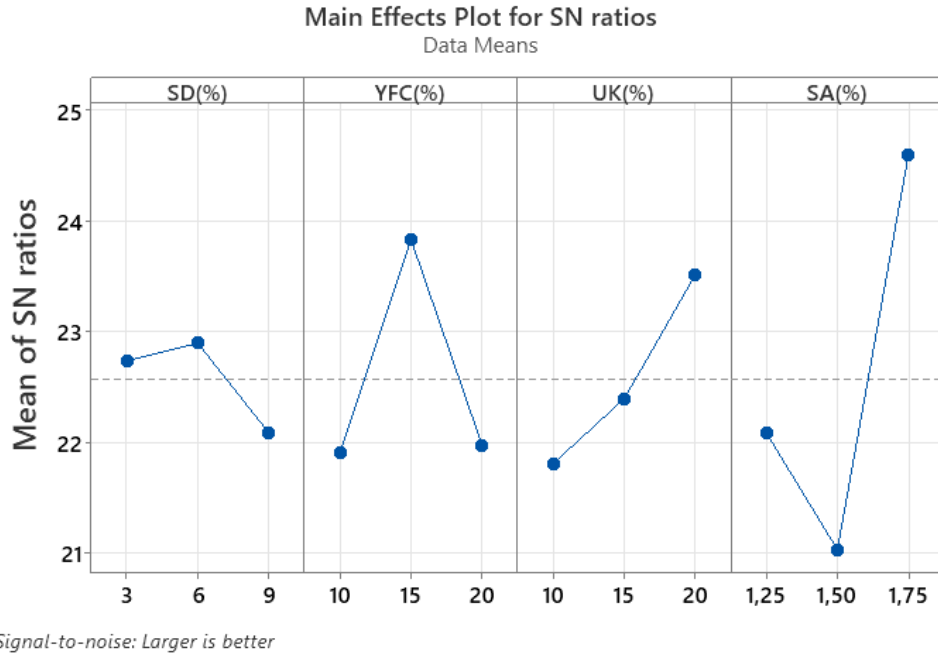
kullanılmaktadır. Buna göre birçok kriterin yer aldığı tez çalışmasında ele alınan kriterlere göre en uygun alternatifin belirlenmesi için gri ilişkisel analiz yöntemi tercih edilmiştir. Diğer yandan çok kriterli karar verme yöntemlerinde, kriter ağırlıklarının objektif bir biçimde belirlenmesi amacıyla entropi yöntemi kullanılarak kriterler farklı olarak ağırlıklandırılmıştır.

5.1. Taze Beton Kıvamı

Kullanılan parametrelerin betonda işlenebilirlik özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla Taguchi istatistik analizleri, en büyük en iyi performans kriteri göz önünde bulundurularak yapılmıştır. İşlenebilirlik deney sonuçlarının Taguchi analizleri Şekil 5.1 ve Tablo 5.1-5.2’de verilmiştir. Deney sonuçları kullanılarak YTM’ ye göre istatistik analizler yapılmış olup elde edilen kontur grafikleri Şekil 5.2’de verilmiştir.

İşlenebilirlik deney sonuçları istatistik açıdan Şekil 5.1 ve 5.2’ye göre değerlendirildiğinde; Taguchi metodu ile elde edilen S/N grafiği ve YTM ile elde edilen kontur grafiklerinden parametrelerin elverişli ve elverişsiz durumları için benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Silis dumanın (SD) %3 ve %6 oranında kullanılması işlenebilirlik açısından önemli bir değişikliğe sebep olmazken (Yeğinobalı, 2011) SD’nin %9 oranında kullanımı işlenebilirliği olumsuz etkilemiştir (Hınıslıoğlu ve Bayrak, 2007; Teimortashlu vd., 2018). Bunun sebebi, silis dumanının blaine yüzey alanının çimentodan yaklaşık 70 kat daha yüksek olmasıdır. Yüksek fırın cürufunun (YFC) işlenebilirlik açısından optimum seviyesi %15 olarak bulunmuştur. Yüksek fırın cürufu yoğunluk olarak (2.89 g/cm^3) çimentodan daha düşük bir yoğunluğa sahip olduğundan betonda kullanımı hamur hacminde artış meydana getirmekte buna bağlı olarak betonun çökme değeri belirli bir seviyeye kadar artmaktadır. Ancak özgül yüzey alanı ($4520 \text{ cm}^2/\text{gr}$) değeri çimentodan daha fazla olduğundan %15’ten daha fazla ikame değerinde sabit su miktarından dolayı çökme değerinde azalmaya sebep olduğu düşünülmektedir. Uçucu kül (UK) ikame oranı artışı işlenebilirliği artırmıştır (Dave vd., 2021; Gao vd., 2021; Kate vd., 2021). UK’nın tane yapısı küre şekilli olup, suyla birlikte tanecikler arasında sürtünme azalmakta ve buna bağlı olarak taze betonun akışkanlığı artmaktadır. Süper akışkanlaştırıcının (SA) %1.75 oranında kullanılması işlenebilirlik açıdan en iyi seviyedir. İşlenebilirlik açısından en etkili parametreler sırasıyla SA, YFC, UK ve SD olmuştur. Tüm bunlar birlikte değerlendirildiğinde, optimum parametre seviyeleri SD, YFC, UK ve SA için sırasıyla %6, %15, %20 ve %1.75 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.1. Karışımların çökme (slump) değerleri için elde edilen S/N grafiği

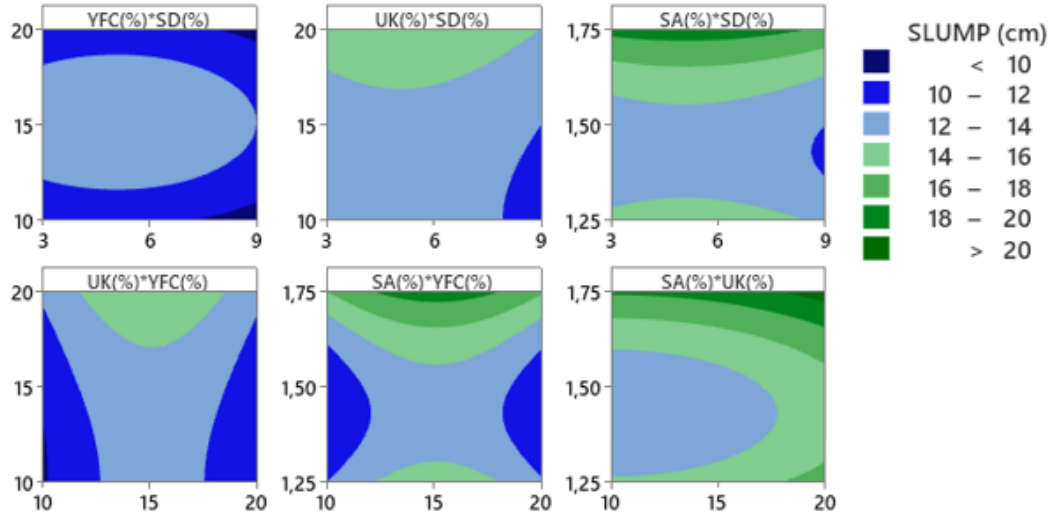
Tablo 5.1. Çökme (slump) değerleri için S/N oran tablosu

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	22.74	21.91	21.81	22.09
2	22.90	23.83	22.40	21.04
3	22.09	21.98	23.51	24.60
Delta	0.81	1.92	1.70	3.56
Sıralama	4	2	3	1

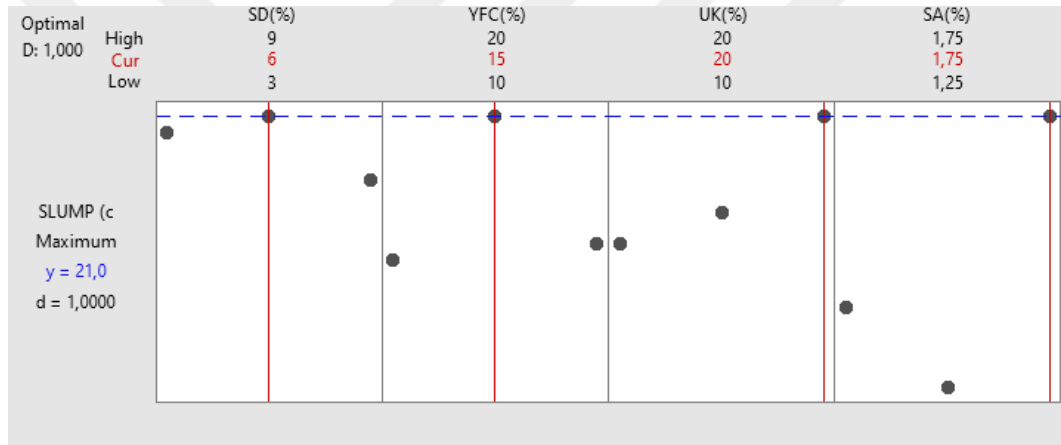
Tablo 5.2. Çökme (slump) değerleri için varyans analizi

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	2.889	3.54%	2.889	1.444	*	*
YFC(%)	2	16.222	19.89%	16.222	8.111	*	*
UK(%)	2	11.556	14.17%	11.556	5.778	*	*
SA(%)	2	50.889	62.40%	50.889	25.444	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	81.556	100.00%				

Taguchi yöntemi kullanılarak optimum seviyelerde tahmin edilen çökme (slump) değeri Şekil 5.3'te verildiği üzere 21 cm olarak belirlenmiştir. Buna göre optimum parametre seviyelerinde yapılan doğrulama deneyinde beton karışımının çökme değeri 19 cm olarak bulunmuştur. Çökme için rölatif hata oranı Şekil 5.4'te verildiği gibi %10.53 olmuştur.

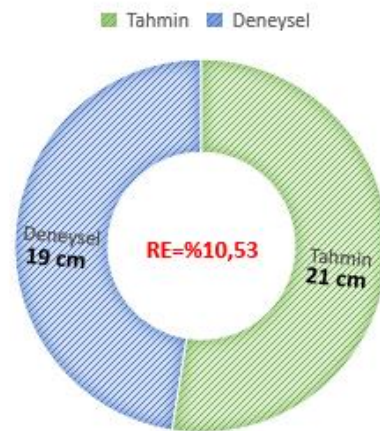


Şekil 5.2. YTM'ye göre elde edilmiş kontur grafikleri



Şekil 5.3. Taguchi analizi sonuçlarına göre optimum tasarım için tahmini çökme değeri

ÇÖKME (SLUMP) TAHMİN/DENEYSEL



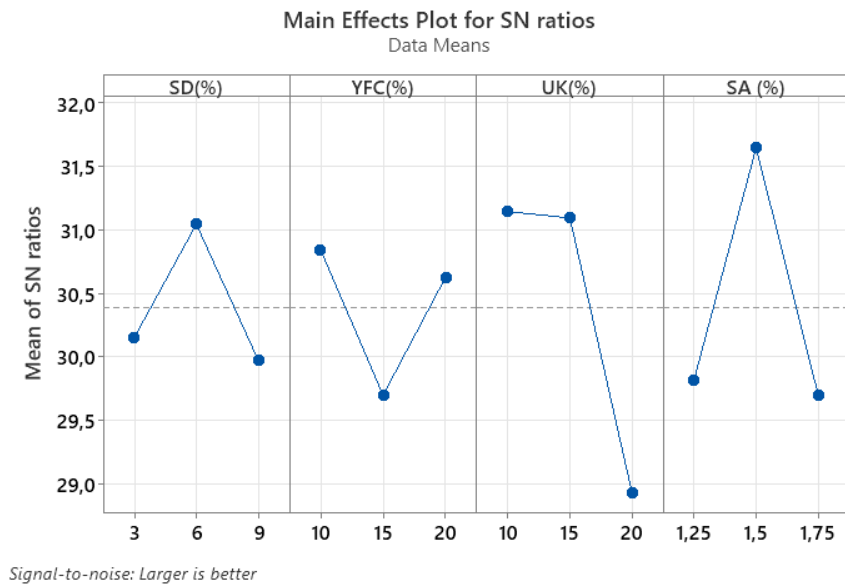
Şekil 5.4. Çökme (slump) için rölatif hata oranı

5.2. Basınç Dayanımı

Tez çalışması kapsamında kullanılan parametrelerin; betonun basınç dayanımına etkisini belirlemek amacıyla Taguchi istatistik analizleri, en büyük -en iyi performans kriteri göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Basınç dayanımı deney sonuçlarının Taguchi analizleri ve YTM kontur grafikleri Şekil 5.5-5.21 ve Tablo 5.3-5.12 arasında verilmiştir.

5.2.1. 14 günlük basınç dayanımı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi

Tablo 4.2’de verilen 14 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre L9 ortogonal dizi serilerinin birçoğunda COV yüksek çıkmıştır. Her iki durum için gerçekleştirilen istatistik analiz sonuçları olarak her parametrenin her seviyesindeki S/N değerlerinin ortalaması olan ortalama S/N, S/N oran değerleri, varyans analiz sonuçları ve optimum parametre değerleri istatistik analiz sonuçları olarak elde edilmiştir. Buna göre sonuçlar düzeltilmiş durum için Şekil 5.5, Tablo 5.3 ve Tablo 5.4’te, standart durum için Şekil 5.6, Tablo 5.5 ve Tablo 5.6’da verilmiştir.



Şekil 5.5. 14 günlük düzeltilmiş basınç dayanımı sonuçları için Taguchi S/N grafiği

Tablo 5.3. 14 günlük düzeltilmiş basınç dayanımı sonuçları için S/N oranı tablosu

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA (%)
1	30.15	30.84	31.14	29.82
2	31.04	29.70	31.09	31.64
3	29.97	30.63	28.93	29.70
Delta	1.07	1.14	2.21	1.94
Sıralama	4	3	1	2

Tablo 5.4. 14 günlük düzeltilmiş basınç dayanımı için varyans analizi

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi (%)	Adj SS	Varyans	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	43.31	13.30%	43.31	21.65	*	*
YFC(%)	2	32.85	10.09%	32.85	16.43	*	*
UK(%)	2	135.50	41.61%	135.50	67.75	*	*
SA (%)	2	114.02	35.01%	114.02	57.01	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	325.68	100.00%				

**Şekil 5.6.** 14 günlük ortalama standart basınç dayanımı için ortalama S/N grafiği**Tablo 5.5.** 14 günlük ortalama standart basınç dayanımı için S/N oranı tablosu

Seviye	SD (%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	30.38	31.23	31.49	29.71
2	30.92	29.83	31.07	31.49
3	30.06	30.29	28.79	30.15
Delta	0.86	1.40	2.70	1.78
Sıralama	4	3	1	2

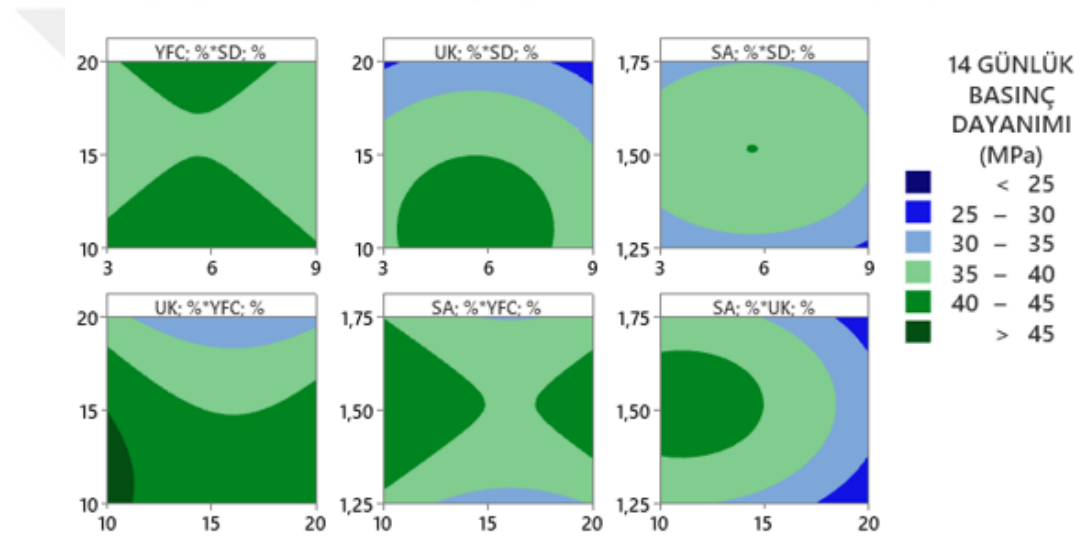
Tablo 5.6. 14 günlük ortalama standart basınç dayanımı için varyans analizi

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi (%)	Adj SS	Varyans	F Değeri	P Değeri
SD (%)	2	29.04	9.08%	29.04	14.52	*	*
YFC(%)	2	40.04	12.52%	40.04	20.02	*	*
UK(%)	2	174.64	54.58%	174.64	87.32	*	*
SA(%)	2	76.22	23.82%	76.22	38.11	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	319.95	100.00%				

14 günlük düzeltilmiş basınç dayanımı sonuçları açısından Taguchi istatistiksel analizleri Şekil 5.5'te verilen S/N grafiğine göre değerlendirildiğinde; SD için %6, YFC

için %10, UK için %10 ve SA için de %1.5 seviyesinin optimum seviye olduğu belirlenmiştir. 14 günlük düzeltilmiş basınç dayanımı varyans analizi sonuçlarına göre en etkili parametreler sırasıyla UK ve SA olmuştur.

14 günlük ortalama standart basınç dayanımı sonuçları açısından Taguchi istatistiksel analizleri Şekil 5.6'da verilen S/N grafiğine göre değerlendirildiğinde; varyasyon katsayısının gözetildiği düzeltilmiş deney sonuçlarının kullanıldığı duruma benzer sonuçlar elde edilmiş ve parametrelerin optimum seviyeleri aynı kalmıştır. 14 günlük standart ortalama basınç dayanımında Tablo 5.6'da verilen varyans analizi sonuçlarına göre en etkili parametreler sırasıyla UK ve SA olmuştur. Deney sonuçları kullanılarak YTM ile elde edilen kontur grafikleri Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7. YTM'ye göre elde edilmiş kontur grafikleri

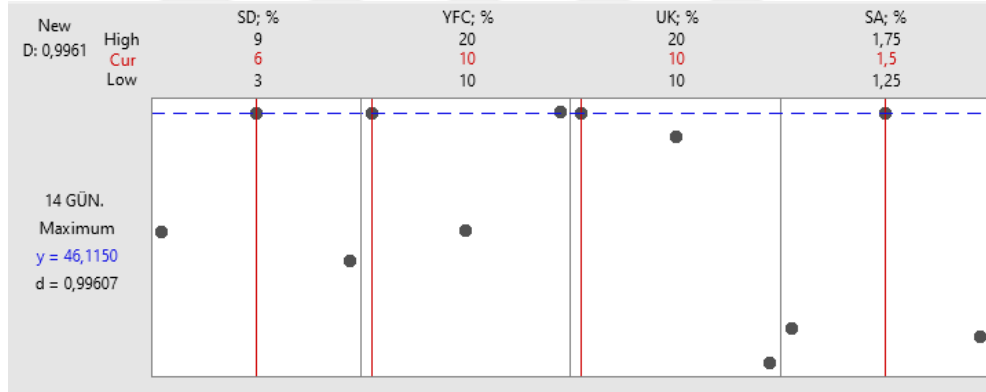
Şekil 5.7'ye göre parametrelerin 14 günlük basınç dayanımına etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %6, YFC için optimum seviyenin %10 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. SD için 14 günlük basınç dayanımı açısından %9 oranındaki ikame oranının %3'lük ikame oranından daha olumsuz sonuçlar doğurduğu görülmüştür. Buna sebep olarak erken yaşlarda dayanımın sınırlı gelişmesi gösterilebilir. Ancak SD nin , YFC den farklı olarak ikinci seviyesinde optimum değerin elde edilmesi SD nin puzolanik aktivitesinin yüksek oluşu ile ilişkilendirilebilir. YFC açısından ise en olumsuz seviye YFC' nin 2. seviyesi olan %15 ikame oranı olmuştur.

SD/UK' nın 14 günlük basınç dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %6, UK için optimum seviyenin %10 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. Kontur grafiğine göre SD' deki parametrik değişim S/N

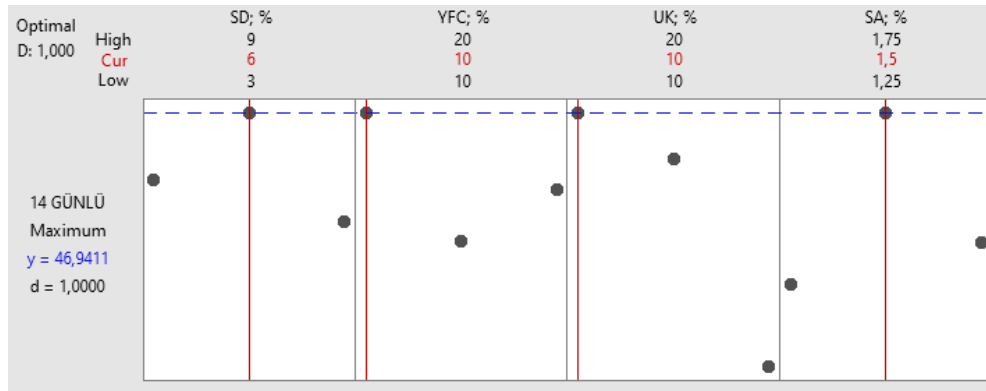
grafikleri ve varyans analizine paralel olarak fazla etkili olmazken, UK' daki durum farklıdır. Buna göre UK' daki seviye değişimleri özellikle %15 seviyesinden sonra basınç dayanımı açısından olumsuzluk teşkil etmiştir. Puzolanik aktivitesindeki yavaşlıktan dolayı uçucu kül erken yaş dayanımını olumsuz etkilemektedir (Türk, 2012; Türk vd., 2013).

UK/YFC' nin 14 günlük basınç dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde YFC ve UK için optimum seviyenin %10 olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. Kontur grafiğine göre baskın parametrenin UK olduğu görülmüştür. Özellikle UK' nın %20 ikame oranı 14 günlük basınç dayanımında önemli derecede olumsuz etki göstermiştir. UK' nın erken yaş dayanımında olumsuz etkisinin olduğu daha önceki çalışmalarda da gösterilmiştir (Dave vd., 2021; Kate vd., 2021; Raj vd., 2021). 14 günlük basınç dayanımında süper akışkanlaştırıcı için optimum seviye %1.5 olarak belirlenmiştir.

Taguchi yöntemi kullanılarak iki farklı durumda, optimum seviyelerde tahmin edilen 14 günlük basınç dayanım değeri Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da verilmiştir.



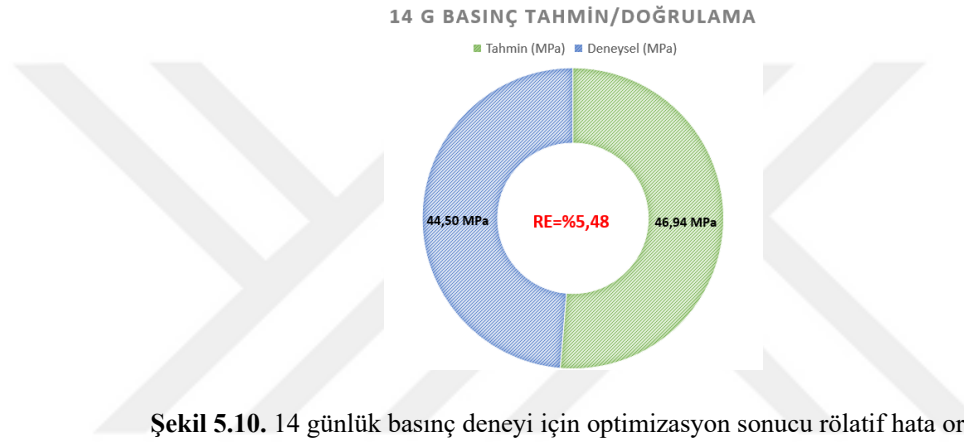
Şekil 5.8. 14 günlük düzeltilmiş basınç dayanımına göre optimum tasarım için Taguchi tahmin değerleri



Şekil 5.9. 14 günlük ortalama standart basınç dayanımına göre optimum tasarım için Taguchi tahmin değerleri

COV göz önünde bulundurulduğu durumda, Şekil 5.8’de verilen Taguchi tahmin değeri 46.11 MPa olurken; standart ortalama değerlere göre yapılan Taguchi tahmin değeri ise Şekil 5.9’da 46.94 MPa olarak verilmiştir. İki durumda da parametre seviyeleri aynı olduğundan, tahminlerin sonucu da birbirine yakın çıkmıştır.

14 günlük basınç dayanımı için optimum seviyelerde (%6 SD, %10 YFC, %10 UK ve %1.5 SA) Taguchi yöntemi ile tahmin edilen basınç dayanım değeri ile optimum seviyelerde üretilen doğrulama deney sonuçları kıyaslandığında yöntem tarafından tahmin edilen değer, doğrulama deney sonucu ile elde edilen değerle yakın çıkmış ve Şekil 5.10’da verildiği gibi rölatif hata %5.48 (standart durumda) olmuştur.

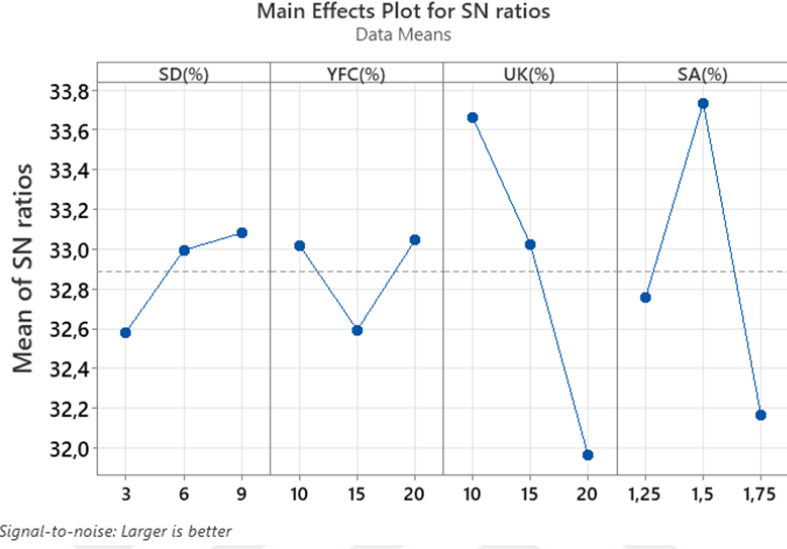


5.2.2. 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi

Serilerin 28 günlük basınç dayanımı için yapılan istatistik analiz sonuçları bu bölümde verilmiştir. Tablo 4.3’ te verilen deney tekrarı durumu için hesaplanmış COV düşük olduğundan 28 günlük basınç dayanımında düzeltilmiş değerler kullanılmamış ortalama standart basınç dayanımları için istatistik analizler yapılmıştır. Her parametrenin her seviyesindeki S/N değerlerinin ortalaması olan ortalama S/N grafiği Şekil 5.11, S/N oran değerleri Tablo 5.7 ve varyans analiz sonuçları Tablo 5.8’ de verilmiştir.

28 günlük ortalama standart basınç dayanımı sonuçları açısından Taguchi istatistiksel analizleri Şekil 5.11’de verilen S/N grafiğine göre değerlendirildiğinde; optimum parametre seviyeleri SD %9, YFC %20, UK %10 ve SA için %1.5 olarak belirlenmiştir. 28 günlük sonuçlar, 14 günlük optimum sonuçlarla kıyaslandığında optimum karışım için puzolan ikame oranı %26’dan %39’a çıkmıştır. Bu durum YFC’ nin polimerizasyona olan katkısı ve SD’ nin yüksek puzolanik aktivitesi ile açıklanabilir (Atış vd., 2005; Boran vd., 2020). Tablo 5.8’de verilen 28 günlük standart ortalama basınç

dayanımı varyans analizi sonuçlarına göre en etkili parametreler sırasıyla UK, SA, SD ve YFC olarak belirlenmiştir. Şekil 5.12’de YTM kullanılarak elde edilen kontur grafiğinde gösterilen optimum parametre seviyeleri Şekil 5.11’de verilen S/N grafiği ile örtüşmektedir.



Şekil 5.11. 28 günlük ortalama standart basınç dayanımı için ortalama S/N grafiği

Tablo 5.7. 28 günlük ortalama standart basınç dayanımı için S/N oranı tablosu

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	32.58	33.02	33.66	32.75
2	32.99	32.59	33.02	33.73
3	33.08	33.04	31.97	32.17
Delta	0.50	0.45	1.70	1.57
Sıralama	3	4	1	2

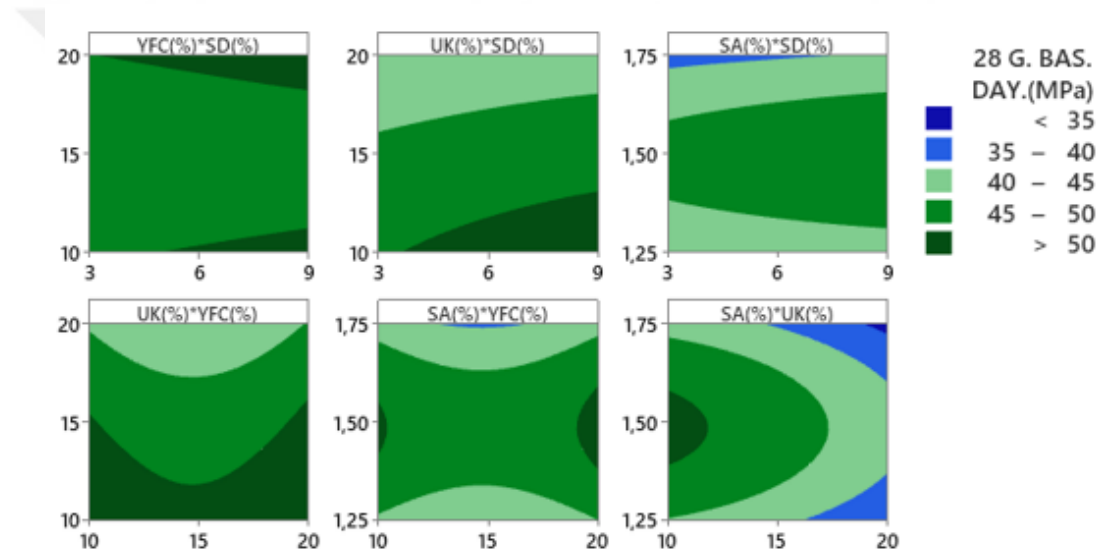
Tablo 5.8. 28 günlük ortalama standart basınç dayanımı için varyans analizi

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	10.32	5.40%	10.32	5.159	*	*
YFC(%)	2	12.63	4.41%	12.63	6.316	*	*
UK(%)	2	111.03	47.45%	111.03	55.514	*	*
SA(%)	2	100.02	42.74%	100.02	50.010	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	234.00	100.00%				

YTM ile elde edilen kontur grafiklerinin verildiği Şekil 5.12’ ye göre SD/YFC’ nin 28 günlük basınç dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde; SD için optimum seviyenin %9, YFC için optimum seviyenin %20 ikame oranı olduğu kontur

grafiklerinden anlaşılmaktadır. SD için 28 günlük basınç dayanımı açısından optimum seviye olan %9 ikame oranının 14 günlük sonuçlardaki %6'nın yerini alması pozolanik reaksiyonlarla dayanım artışına ve silis dumanının pozolanik aktivitesine bağlanabilir. En olumsuz durum, YFC' nin 2. seviyesi olan %15 ikame oranında gerçekleşmiştir.

SD/UK' nin 28 günlük basınç dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde, SD için optimum seviyenin %9, UK için optimum seviyenin %10 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. Kontur grafiğine göre SD' deki parametrik değişim S/N grafikleri ve varyans analizine paralel olarak fazla etkili olmazken, UK' da ki durum farklıdır. Buna göre UK' da ki ikame oranının artışı 14 günlükteki etkiye benzer olarak basınç dayanımı açısından olumsuzluk teşkil etmiştir.



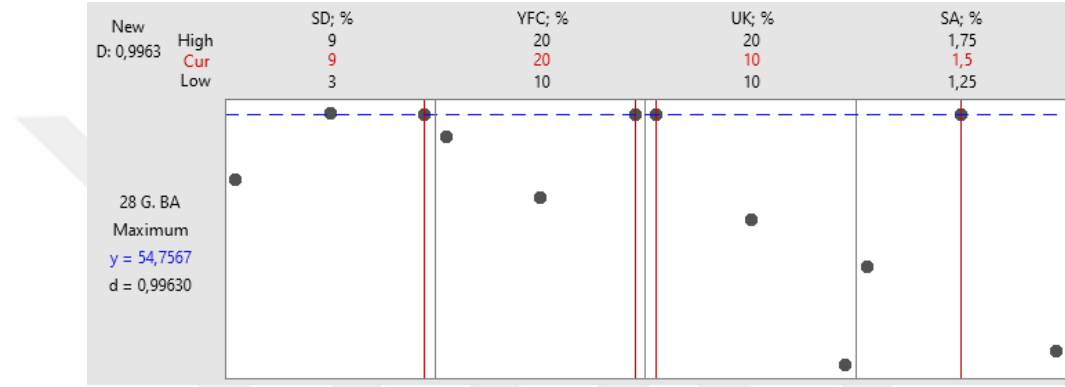
Şekil 5.12. YTM'ye göre elde edilmiş kontur grafikleri

UK/YFC' nin 28 günlük basınç dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde YFC için optimum seviyenin %20, UK için optimum seviyenin %10 olduğu yüzey grafiklerinden anlaşılmaktadır. Kontur grafiklerine göre baskın parametrenin UK olduğu görülmektedir. Buna sebep olarak UK' nın pozolanik özelliğindeki yavaşlık gösterilebilir. 28 günlük basınç dayanımında süper akışkanlaştırıcı için optimum oran %1.5 olarak elde edilmiştir. 28 günlük basınç dayanımında süper akışkanlaştırıcı oranının %1.75, uçucu kül oranının %20 olması basınç dayanımını önemli ölçüde düşürmüştür.

Yöntem tarafından optimum seviyelerde tahmin edilen 28 günlük basınç dayanım değeri Şekil 5.13'e göre yaklaşık 54.76 MPa olarak bulunmuştur. Optimum parametre seviyelerinde (SD %9, YFC %20, UK %10 ve SA %1.5) basınç dayanımını maksimum

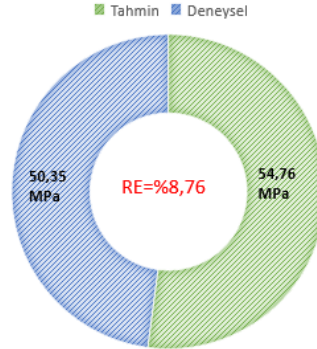
veren durum için yöntem tarafından tahmin edilen basınç dayanım değeri Şekil 5.13.'te verildiği üzere 54.76 MPa olarak bulunmuştur. Optimum seviyelerde üretimi yapılan doğrulama karışımı 28 gün kürde bekletilip basınç dayanım deneyi yapıldıktan sonra elde edilen dayanım 50.35 MPa olarak bulunmuştur.

28 günlük basınç dayanımı için optimum seviyelerde Taguchi yöntemi kullanılarak tahmin edilen basınç dayanım değeri ile optimum seviyelerde üretilen doğrulama deney sonucundan elde edilen basınç dayanımı arasındaki rölatif hata Şekil 5.14'te verildiği gibi %8.76 olmuştur.



Şekil 5.13. 28 günlük ortalama standart basınç dayanımına göre optimum tasarım için Taguchi tahmin değeri

28 GÜNLÜK BASINÇ DAY. TAHMİN/DOĞRULAMA

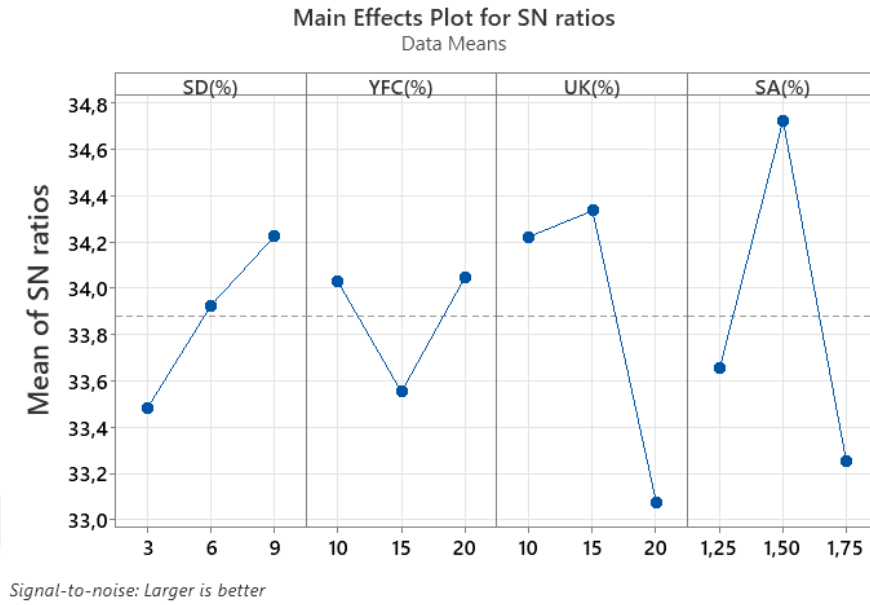


Şekil 5.14. 28 günlük basınç deneyi için optimizasyon sonucu elde edilen rölatif hata oranı

5.2.3. 56 günlük basınç dayanımı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi

Tablo 4.4' te verilen deney tekrarı durumu için hesaplanmış COV değerleri M4 serisinde yüksek olduğundan 56 günlük basınç dayanımında hem düzeltilmiş değerler hem de ortalama standart basınç dayanım değerleri için istatistik analizler yapılmıştır.

Buna göre sonuçlar; düzeltilmiş durum için Şekil 5.15, Tablo 5.9 ve Tablo 5.10’da, standart durum için Şekil 5.16, Tablo 5.11 ve Tablo 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5.15. 56 günlük düzeltilmiş basınç dayanımı için ortalama S/N grafiği

Tablo 5.9. 56 günlük düzeltilmiş basınç dayanımı için S/N oranı tablosu

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	33.49	34.03	34.22	33.66
2	33.93	33.55	34.34	34.73
3	34.23	34.05	33.08	33.25
Delta	0.74	0.50	1.26	1.47
Sıralama	3	4	2	1

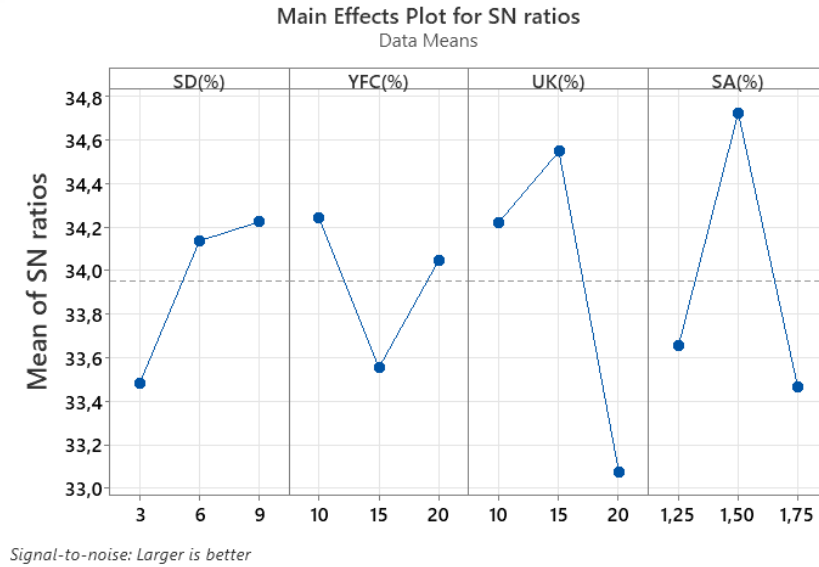
Tablo 5.10. 56 günlük düzeltilmiş basınç dayanımı için varyans analizi tablosu

Parametre	DF	Seq SS	Katkı Yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	24.63	10.24%	24.63	12.316	*	*
YFC(%)	2	16.90	7.02%	16.90	8.449	*	*
UK(%)	2	85.75	35.65%	85.75	42.877	*	*
SA(%)	2	113.27	47.09%	113.27	56.635	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	240.55	100.00%				

56 günlük düzeltilmiş basınç dayanımı sonuçları açısından Taguchi istatistiksel analizleri Şekil 5.15’ te verilen ortalama S/N grafiğine göre değerlendirildiğinde; optimum parametre seviyeleri SD %9, YFC %20, UK %15 ve SA için %1.5 olarak belirlenmiştir. 28 günlük optimum sonuçlarla kıyaslandığında, optimum karışım için toplam puzolan ikame oranı %39’dan %44’e çıkmıştır. Bu durum; puzolanik

reaksiyonların devamlılığına bağlanarak kürde kalınan süre zarfında dayanım artışından kaynaklanmıştır. Tablo 5.9 ve Tablo 5.10 'da verilen 56 günlük düzeltilmiş basınç dayanımı S/N oranı ve varyans analizi sonuçlarına göre en etkili parametreler daha önceki yaşlarda olduğu gibi UK ve SA olarak belirlenmiştir.

56 günlük ortalama standart basınç dayanımı sonuçları açısından Taguchi istatistiksel analizleri Şekil 5.16'da verilen S/N grafiğine göre değerlendirildiğinde; varyasyon katsayısının gözetildiği düzeltilmiş deney sonuçlarının kullanıldığı durumdan farklı sonuçlar elde edilmiştir. Varyasyon katsayısının gözetildiği düzeltilmiş ortalama basınç dayanımı istatistiksel analizinde, optimum parametre seviyeleri SD için %9, YFC için %20, UK için %15 ve SA için %1.5 olarak belirlenmiştir. Varyasyon katsayısının gözetilmediği standart ortalama basınç dayanımı istatistik analizinde optimum parametre seviyeleri SD için %9, YFC için %10, UK için %15 ve SA için %1.5 olmuştur. Buna göre UK ilk defa 56 günlük kür süresinde ikinci seviyesi olan %15 seviyesinde optimum değerini almıştır. UK' nın bağlayıcılık anlamında etkinliğinin artması kür süresinin artmasıyla mümkün olmuştur. Diğer yandan doğrulama deneyinde her iki optimum durum için de karışımlar oluşturulmuş maksimum basınç dayanımının elde edildiği durum optimum koşul olarak seçilmiştir.



Şekil 5.16. 56 günlük ortalama standart basınç dayanımı için ortalama S/N grafiği

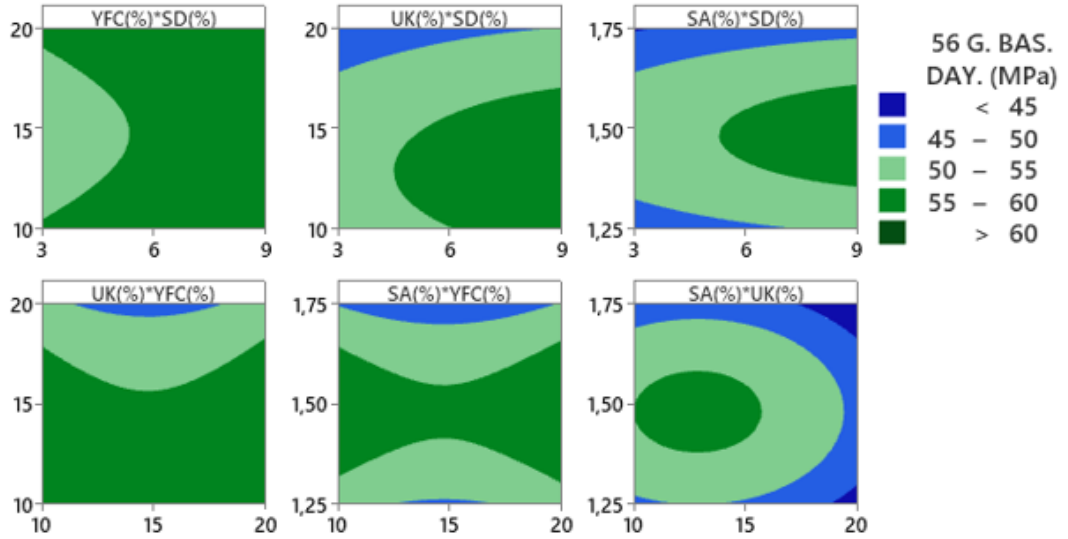
Tablo 5.11 ve Tablo 5.12'de verilen S/N oranı ve varyans analizi sonuçlarına göre en etkili parametreler sırasıyla UK ve SA olarak belirlenmiştir. UK ve SA' nın son seviyelerinde kullanımları dayanımı önemli ölçüde olumsuz etkilemiştir.

Tablo 5.11. 56 günlük ortalama standart basınç dayanımı için ortalama S/N tablosu

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	33.49	34.24	34.22	33.66
2	34.14	33.55	34.55	34.73
3	34.23	34.05	33.08	33.46
Delta	0.74	0.69	1.47	1.26
Sıralama	3	4	1	2

Tablo 5.12. 56 günlük ortalama standart basınç dayanımı için varyans analizi

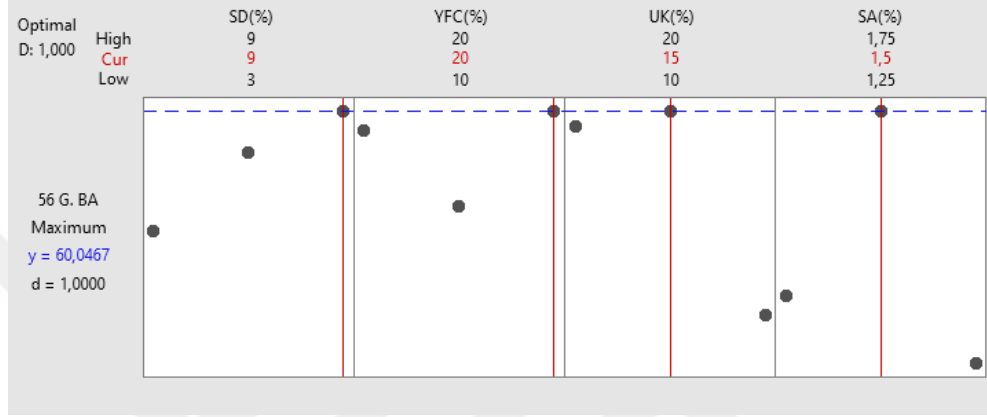
Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	30.78	12.19%	30.78	15.39	*	*
YFC(%)	2	24.80	9.82%	24.80	12.40	*	*
UK(%)	2	107.19	42.46%	107.19	53.60	*	*
SA(%)	2	89.71	35.53%	89.71	44.86	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	252.48	100.00%				

**Şekil 5.17.** YTM'ye göre elde edilmiş kontur grafikleri

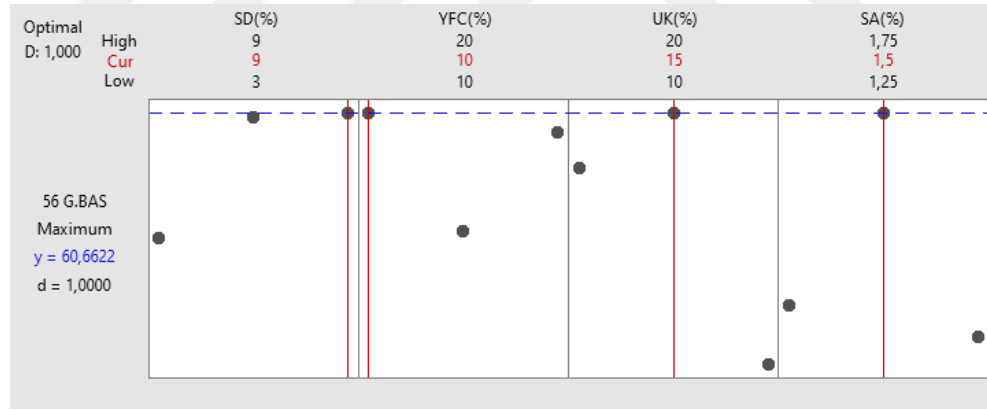
Şekil 5.17'ye göre SD/YFC'nin 56 günlük basınç dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde silis dumanı için optimum seviyenin %9, YFC için optimum seviyenin %20 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. YFC açısından seviyelerin basınç dayanımına etkisi 28 günlükteki etkilere benzer sonuçlar göstermiştir. Tüm kür sürelerinde en olumsuz durum YFC'nin 2. Seviyesi olan %15 ikame oranında gerçekleşmiştir. UK' nın 56 günlük basınç dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde optimum seviyenin %15 ikame oranı olduğu yüzey grafiklerinden anlaşılmaktadır. Kontur grafiklerine göre UK'deki parametrik değişim S/N grafiklerine paralel olarak,

ikame oranı %10'dan %15'e çıktığında pozitif etki gösterirken %15'ten %20'ye çıktığında basınç dayanımını olumsuz etkilemektedir.

56 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre Tablo 4.4'te verilen M4 serisinde COV yüksek çıktığından düzeltilmiş ve standart durum için iki ayrı tahmin ve doğrulama deneyi yapılmıştır. Buna göre, iki farklı durum için optimum parametre seviyelerinde yöntemin tahmin ettiği değerler Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da verilmiştir.



Şekil 5.18. 56 günlük düzeltilmiş basınç dayanımına göre optimum tasarım için Taguchi tahmin değerleri



Şekil 5.19. 56 günlük ortalama standart basınç dayanımına göre optimum tasarım için Taguchi tahmin değerleri

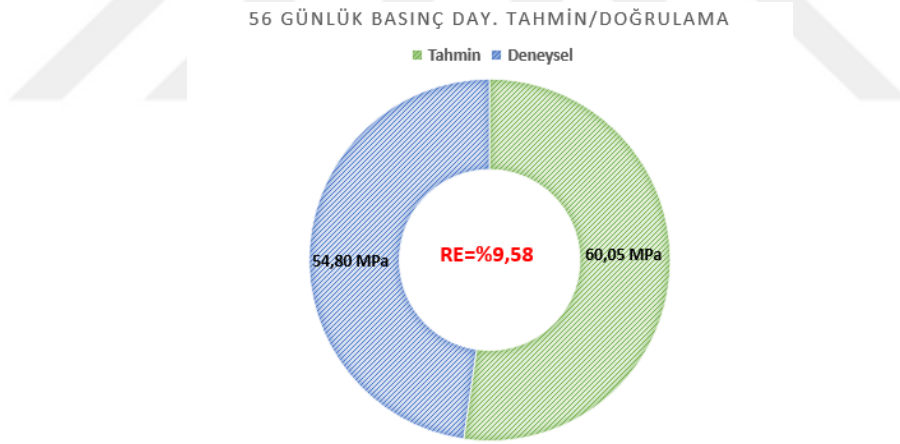
Düzeltilmiş ortalama deney sonuçlarına göre optimum parametre seviyelerinde (SD %9, YFC %20, UK %15 ve SA %1.5) yöntem kullanılarak tahmin edilen basınç dayanım değeri 60.05 MPa olarak bulunmuştur. Standart ortalama deney sonuçlarına göre optimum parametre seviyelerinde (SD %9, YFC %10, UK %15 ve SA %1.5) yöntem kullanılarak tahmin edilen basınç dayanım değeri 60.66 MPa olarak bulunmuştur.

56 günlük ortalama basınç dayanımı tahmininde her iki durum için değişen tek parametre YFC'dir. Buna göre YFC'nin parametrik etki oranının düşük olduğu Tablo

5.10 ve Tablo 5.12 'de verilen varyans analizi sonuçlarından görülmektedir. YFC ikame oranının %10'dan %20'ye çıkmasının, yöntemin tahminini bundan dolayı önemli ölçüde etkilemediği düşünülmektedir.

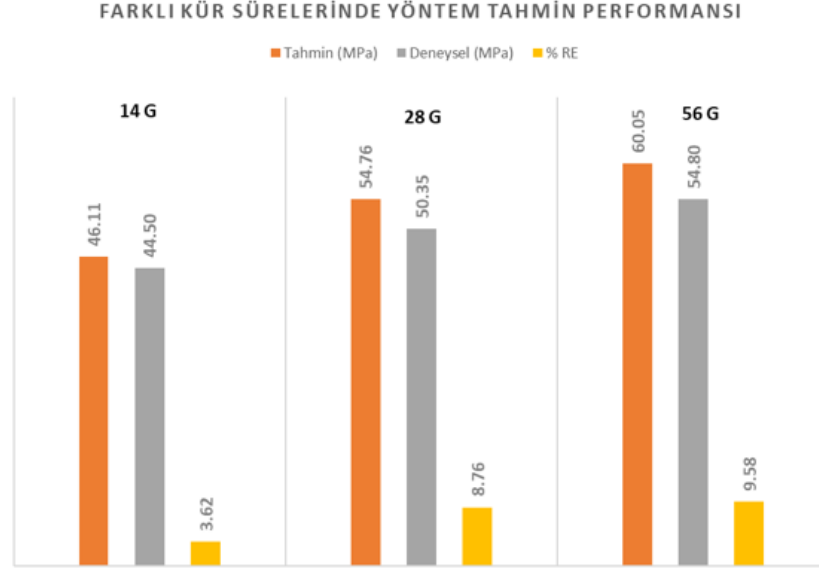
56 günlük basınç dayanımı için düzeltilmiş ve standart durum optimum seviyelerde Taguchi yöntemi ile tahmin edilen basınç dayanım değerleri sırasıyla 60.05 ve 60.66 MPa olarak bulunmuştur. Buna göre yöntem kullanılarak bulunan parametre seviyeleri için iki ayrı karışım üretilerek doğrulama deneyleri yapılmıştır. Düzeltilmiş ve standart durumlar için yapılan doğrulama deneylerinin 56 günlük basınç dayanımları sırasıyla 54.80 ve 47.33 MPa olarak bulunmuştur. Düzeltilmiş deney verileri kullanılarak bulunan parametre seviyelerinde basınç dayanımı daha yüksek değer aldığı için optimum koşul olarak kabul edilmiştir.

Şekil 5.20'de %9.58 olarak verilen rölatif hata, düzeltilmiş deney sonuçları kullanılarak yapılan optimum parametre seviyelerindeki doğrulama deney sonucundan elde edilmiştir. Buna göre 56 günlük basınç dayanımı için parametrelerin kabul edilen optimum değerleri %9 SD, %20 YFC, %15 UK ve %1.5 SA olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.20. 56 günlük basınç deneyi için optimizasyon sonucu rölatif hata oranı

Şekil 5.21'de farklı kür süreleri için yöntem kullanılarak tahmin edilen ve doğrulama deneylerinde bulunan basınç dayanımları arasındaki rölatif hata oranları verilmiştir. Buna göre üç farklı kür süresi için rölatif hata oranları %10'un altında bulunmuştur. Basınç dayanımı için makul kabul edilebilecek bu hata oranları yöntemin etkinliği göstermektedir.



Şekil 5.21. Farklı kür sürelerinde basınç dayanımı için optimizasyon sonucu rölatif hata oranı

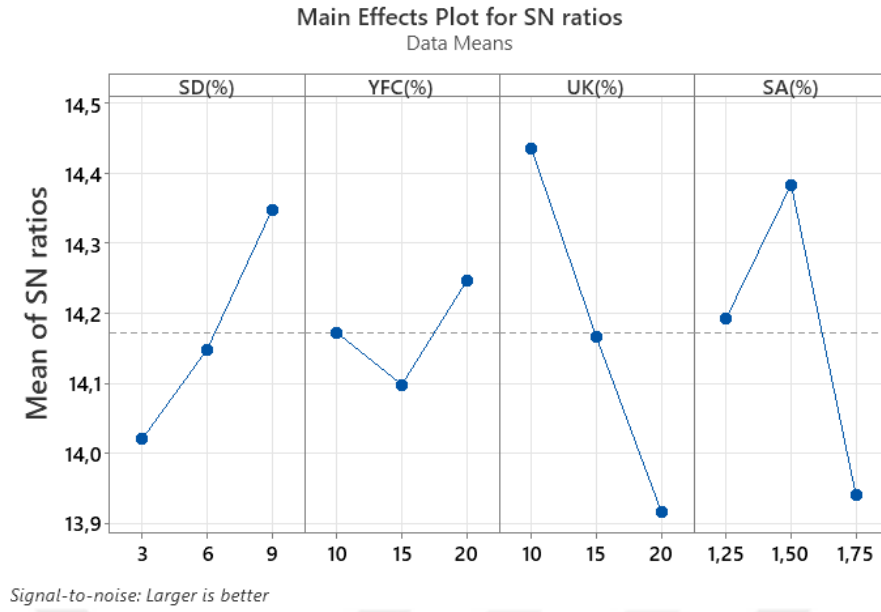
5.3. Ultra ses Geçiş Hızı (UPV)

Kullanılan parametrelerin betonda ses geçiş hızına etkisini belirlemek amacıyla Taguchi istatistik analizleri, en büyük en iyi performans kriteri göz önünde bulundurularak yapılmıştır.

5.3.1. 28 günlük ultra ses geçiş hızı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi

28 gün boyunca standart kürde kalan küp numuneler havuzdan çıkarılıp, numune kuruduktan sonra, basınç dayanımına tabi tutulmadan önce tahribatsız bir test olan ultra ses geçiş hızı deneyi yapılmıştır. Her parametrenin her seviyesindeki S/N değerlerinin ortalaması olan ortalama S/N grafiği Şekil 5.22, S/N oran değerleri Tablo 5.13 ve varyans analiz sonuçları Tablo 5.14’ te verilmiştir.

28 günlük ultra ses verileri Şekil 5.22’de verilen S/N grafiğine göre değerlendirildiğinde parametrelerin optimum seviyeleri SD %9, YFC %20, UK %10 ve SA %1.5 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, Şekil 5.11’de verilen 28 günlük basınç dayanımı istatistik analizinden elde edilen optimum sonuçlar ile örtüşmektedir. Ancak; SD çok ince taneli bir puzolan olup boşlukları doldurmasından dolayı parametrik etkisi 28 günlük basınç dayanımından daha yüksek olmuştur. SD nin yüksek ikame oranları betonda boşlukları doldurmakta, bu nedenle ses dalgaları kompakt betonlarda daha hızlı yayılmaktadır.



Şekil 5.22. 28 günlük ultra ses geçiş hızı ortalama S/N grafikleri

Tablo 5.13. 28 günlük ultra ses geçiş hızı S/N değerleri

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	14.02	14.17	14.43	14.19
2	14.15	14.10	14.17	14.38
3	14.35	14.25	13.92	13.94
Delta	0.33	0.15	0.52	0.44
Sıralama	3	4	1	2

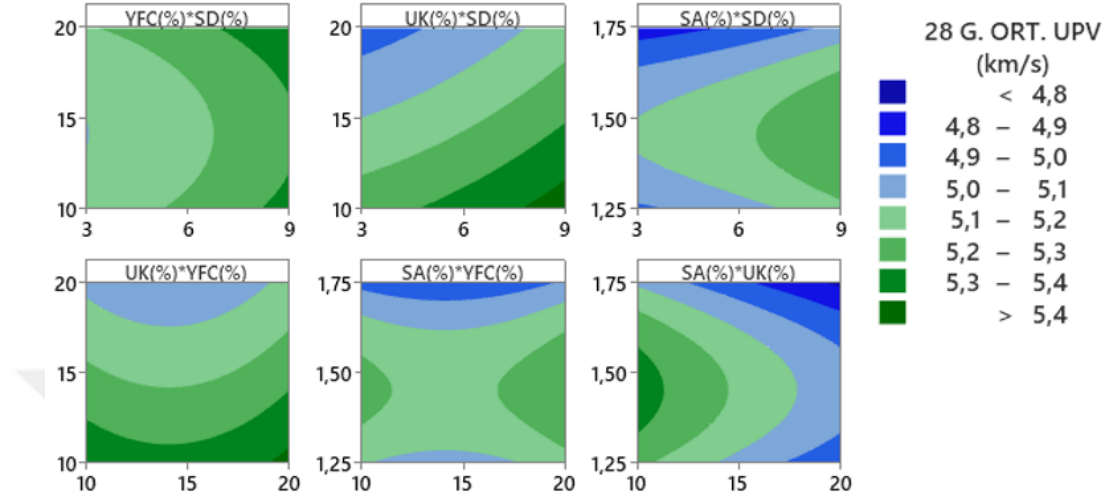
Tablo 5.14. 28 günlük ultra ses geçiş hızı varyans analizi

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	0.05482	17.80%	0.05482	0.027411	*	*
YFC(%)	2	0.01309	4.25%	0.01309	0.006544	*	*
UK(%)	2	0.13816	44.85%	0.13816	0.069078	*	*
SA(%)	2	0.10196	33.10%	0.10196	0.050978	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	0.30802	100.00%				

Şekil 5.23'e göre SD/YFC'nin 28 günlük ultra ses geçiş hızına parametrik etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %9, YFC için optimum seviyenin %20 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. Ultra ses geçiş hızı açısından SD nin ikame oranı artışı YFC den daha etkili olmuştur. SD nin çok ince tanecikli olup betonun kompasitesini iyileştirmesi buna sebep olarak gösterilebilir.

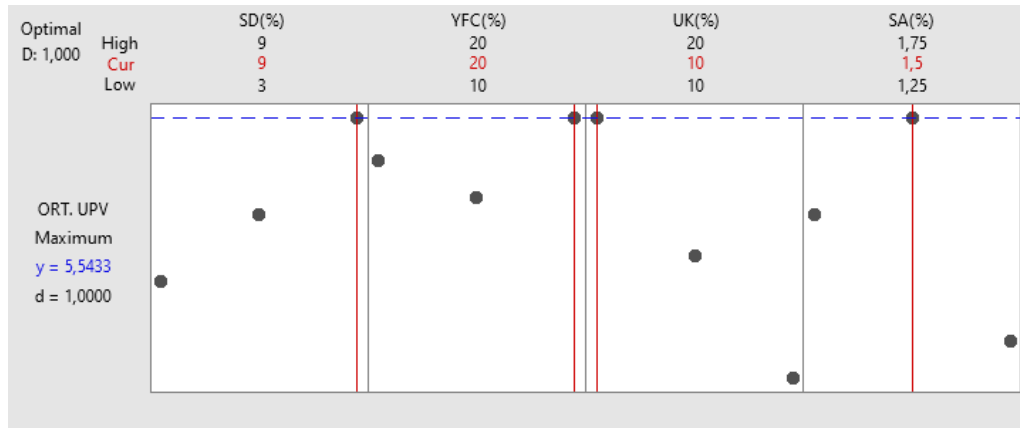
Şekil 5.23'e göre uçucu külün 28 günlük ultra ses geçiş hızına parametrik etkisi incelendiğinde optimum seviyenin %10 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. UK' daki ikame oranı artışı ultra ses geçiş hızında önemli derecede

olumsuz etki göstermiştir. Çimento yerine ikame edilen UK' daki yavaş dayanım kazanım özelliği Şekil 4.37' de verildiği gibi mikro yapısal doluluğu olumsuz etkileyerek ses geçiş hızını düşürmektedir.



Şekil 5.23. YTM'ye göre elde edilmiş kontur grafikleri

Taguchi yöntemi kullanılarak optimum seviyelerde yapılan istatistik analizde ultra ses geçiş hızı tahmini değeri Şekil 5.24'te verildiği üzere 5.54 km/sn olarak bulunmuştur.

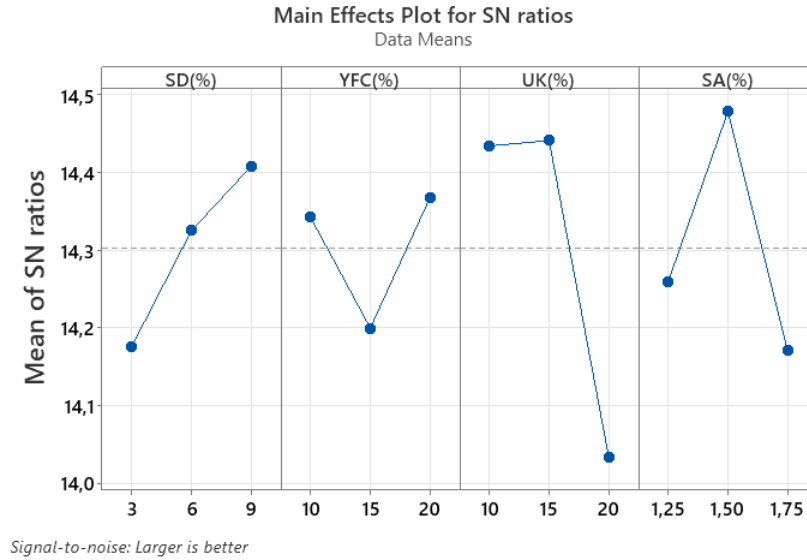


Şekil 5.24. 28 günlük ortalama ultra ses geçiş hızına göre optimum tasarım için Taguchi tahmin değerleri

Optimum parametre seviyelerinde yapılan doğrulama deneyinden elde edilen sonuç ise 5.35 km/sn olmuştur. Buna göre tahmin edilen değer ve doğrulama deneyi arasındaki rölatif hata %3.55 olarak bulunmuştur.

5.3.2. 56 günlük ultra ses geçiş hızı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi

56 gün boyunca standart kürde kalan küp numuneler havuzdan çıkarılıp, kuruduktan sonra basınç dayanımına tabi tutulmadan önce tahribatsız bir test olan ultra ses geçiş hızı deneyi yapılmıştır. Buna göre elde edilen istatistik analiz sonuçları Şekil 5.25 ile Tablo 5.15 ve 5.16’da verilmiştir.



Şekil 5.25. 56 günlük ultra ses geçiş hızı ortalama S/N grafikleri

Tablo 5.15. 56 günlük ultra ses geçiş hızı S/N değerleri

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	14.18	14.34	14.43	14.26
2	14.33	14.20	14.44	14.48
3	14.41	14.37	14.03	14.17
Delta	0.23	0.17	0.41	0.31
Sıralama	3	4	1	2

Tablo 5.16. 56 günlük ultra ses geçiş hızı varyans analizi

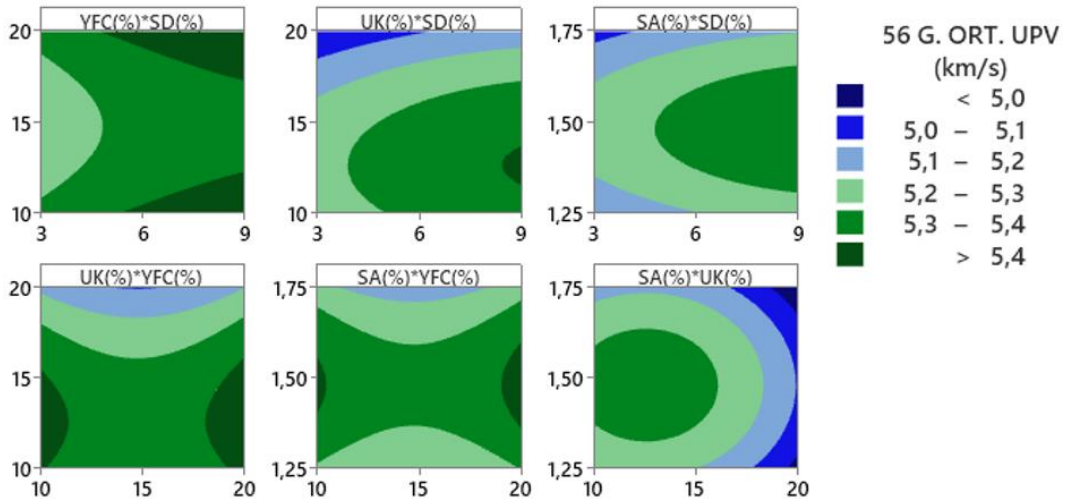
Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	0.02896	13.53%	0.02896	0.014478	*	*
YFC(%)	2	0.01802	8.42%	0.01802	0.009011	*	*
UK(%)	2	0.11362	53.11%	0.11362	0.056811	*	*
SA(%)	2	0.05336	24.94%	0.05336	0.026678	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	0.21396	100.00%				

56 günlük ultra ses verileri ortalama Şekil 5.25’te verilen S/N grafiğine göre değerlendirildiğinde; parametrelerin optimum seviyeleri SD %9, YFC %20, UK %15 ve SA %1.5 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar Şekil 5.15’te verilen 56 günlük düzeltilmiş

basınç dayanımı optimum sonuçları ile örtüşmektedir. Ancak; SD çok ince taneli bir puzolan olup boşlukları doldurmasından dolayı parametrik etkisi 56 günlük basınç dayanımından daha yüksek olmuştur. SD nin yüksek ikame oranları betonda boşlukları doldurmakta, bu nedenle ses dalgaları kompakt betonlarda daha hızlı yayılmaktadır.

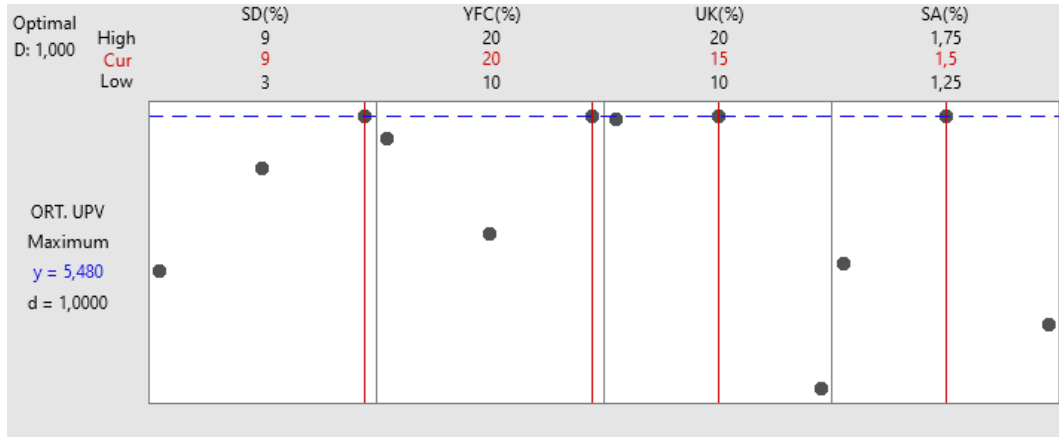
Şekil 5.26'ya göre SD/YFC'nin 56 günlük ultra ses geçiş hızına parametrik etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %9, YFC için optimum seviyenin %20 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. Ultra ses geçiş hızı açısından SD nin ikame oranı artışı YFC den daha etkili olmuştur. SD nin çok ince tanecikli olup betonun kompasitesini iyileştirmesi buna sebep olarak gösterilebilir.

Şekil 5.26'ya göre UK nın 56 günlük ultra ses geçiş hızına parametrik etkisi incelendiğinde optimum seviyenin %15 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. UK'daki ikame oranının %20 olması ultra ses geçiş hızında önemli derecede olumsuz etki göstermiştir. Çimento yerine ikame edilen yüksek orandaki UK, yavaş dayanım kazanım özelliği sebebiyle Şekil 4.43'te verildiği gibi mikro yapısal doluluğu olumsuz etkileyerek ses geçiş hızını düşürmüştür.



Şekil 5.26. YTM'ye göre elde edilmiş kontur grafikleri

Taguchi yöntemi kullanılarak optimum seviyelerde yapılan istatistik analizde ultra ses geçiş hızı tahmini değeri 5.48 km/sn olarak bulunmuştur (Şekil 5.27). Optimum parametre seviyeleri kullanılarak yapılan doğrulama deneyinden elde edilen sonuç ise 5.43 km/sn olmuştur. Buna göre tahmin edilen değer ve doğrulama deneyi arasındaki rölatif hata yaklaşık %1 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.27. 56 günlük ortalama ultra ses geçiş hızına göre optimum tasarım için Taguchi tahmin değerleri

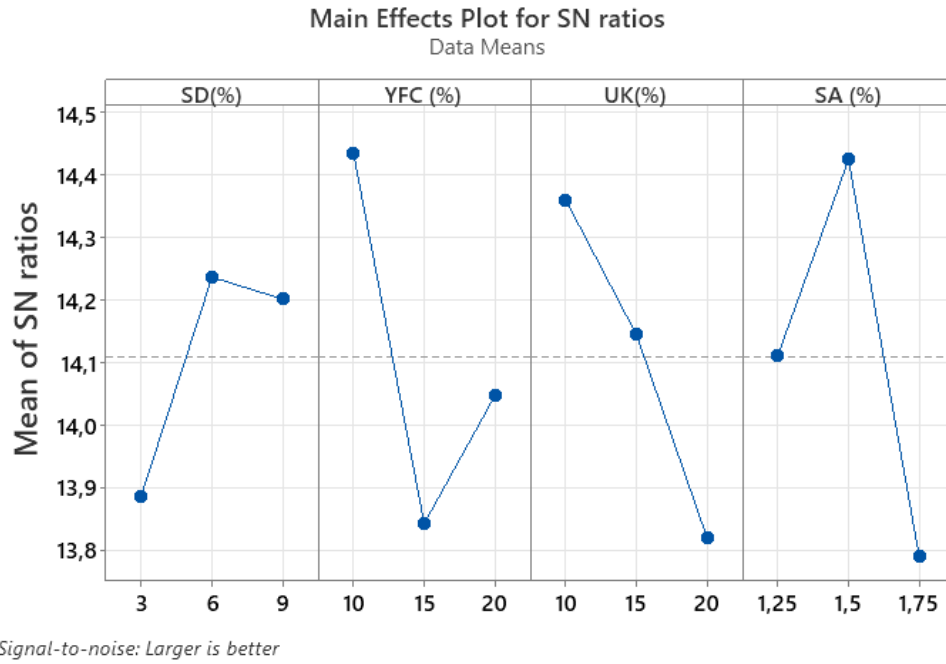
5.4. Eğilme Dayanımı

Eğilmede çekme dayanımı deneyi 100x100x400 mm prizmatik numunelere 3 farklı kür süresinde uygulanmıştır. Eğilmede çekme dayanımında istatistik analizler yapılırken deney tekrarlarından elde edilen varyasyon katsayısı değerleri göz önünde bulundurulmuştur. Taguchi analizlerinde performans karakteristiği olarak en büyük en iyi kriteri kullanılmıştır.

5.4.1. 14 günlük eğilmede çekme dayanımı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi

Tablo 4.6' ya göre deney tekrarlarının varyasyon katsayıları düşük olduğundan standart ortalama deney verileri kullanılarak istatistik analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre SD hariç diğer puzolanların birinci seviyelerinde optimum sonuçlar elde edilmiştir. Bunda, SD nin puzolanik aktivitesinin etkili olduğu düşünülmektedir. Parametrelerin optimum seviyeleri, ortalama S/N oranları ve varyans analizi sırasıyla Şekil 5.28 ve Tablo 5.17-5.18'de verilmiştir. Buna göre 14 günlük eğilme dayanımı için parametrelerin optimum seviyeleri SD %6, YFC %10, UK %10 ve SA %1.5 olarak belirlenmiştir. 14 günlük eğilmede çekme dayanımı optimum parametre seviyeleri ile 14 günlük basınç dayanımı optimum parametre seviyeleri örtüşmektedir.

Şekil 5.29'a göre SD/YFC'nin 14 günlük eğilme dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde silis dumanı için optimum seviyenin %6, YFC için optimum seviyenin %10 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. YFC den farklı olarak ikinci seviyesinde (%6) optimum değer elde edilmesi silis dumanının puzolanik aktivitesinin yüksek oluşu ile ilişkilendirilebilir. 14 günlük eğilme dayanımında YFC'nin %15 ikame oranı, en olumsuz seviyesi olmuştur.



Şekil 5.28. 14 günlük standart ortalama eğilmede çekme dayanımı için ortalama S/N grafiği

Tablo 5.17. 14 günlük standart ortalama eğilmede çekme dayanımı için ortalama S/N tablosu

Seviye	SD(%)	YFC (%)	UK(%)	SA (%)
1	13.89	14.44	14.36	14.11
2	14.24	13.84	14.14	14.42
3	14.20	14.05	13.82	13.79
Delta	0.35	0.59	0.54	0.64
Sıralama	4	2	3	1

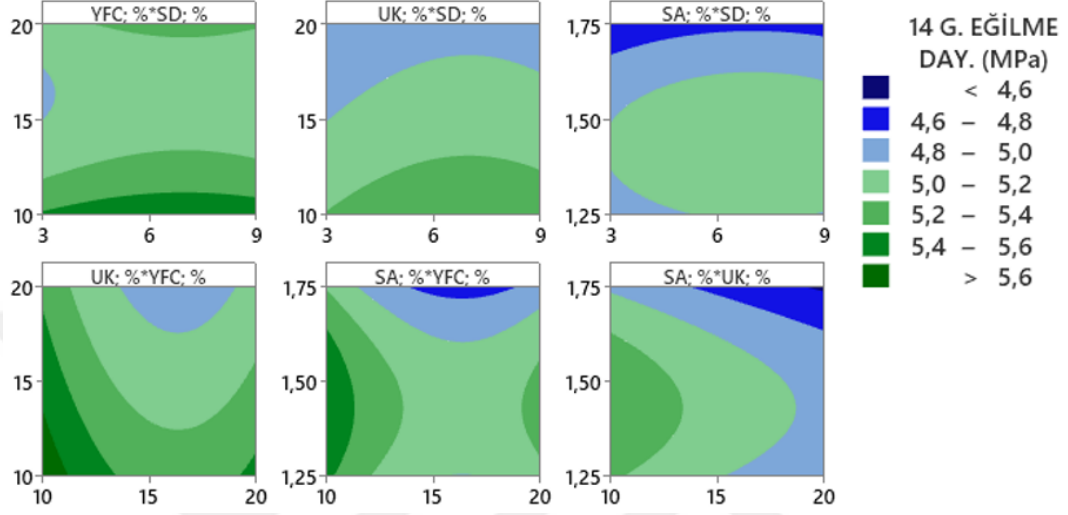
Tablo 5.18. 14 günlük standart ortalama eğilmede çekme dayanımı için varyans analizi

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	0.07225	11.91%	0.07225	0.03613	*	*
YFC (%)	2	0.18528	30.53%	0.18528	0.09264	*	*
UK(%)	2	0.14519	23.92%	0.14519	0.07259	*	*
SA (%)	2	0.20413	33.64%	0.20413	0.10206	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	0.60685	100.00%				

SD/UK'nın 14 günlük eğilme dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %6, UK için optimum seviyenin %10 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. Kontur grafiğine göre SD'deki parametrik değişim Şekil 5.28 ve Tablo 5.18'de verilen S/N grafikleri ve varyans analizine paralel olarak fazla etkili olmazken, UK'daki durum farklıdır. Buna göre UK'daki ikame oranı artışları 14 günlük eğilme dayanımı açısından olumsuzluk teşkil etmiştir.

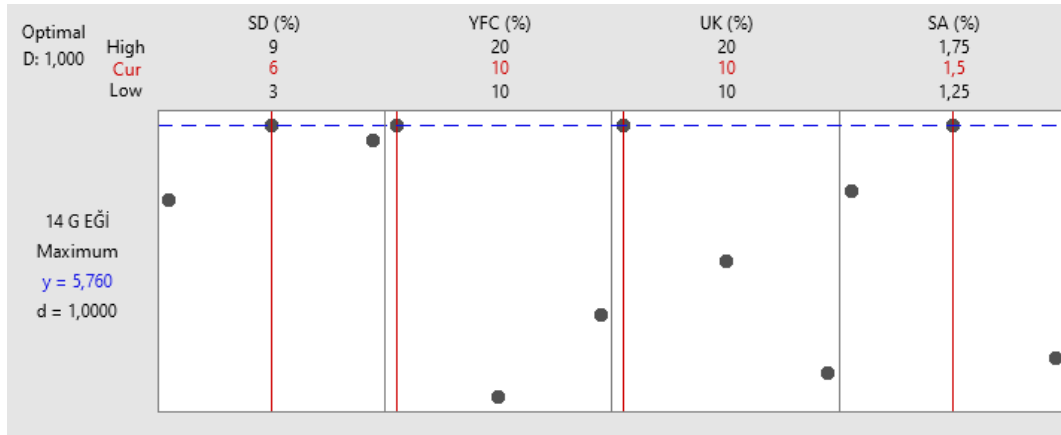
UK/YFC'nin 14 günlük eğilme dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde YFC için optimum seviyenin %10, UK için optimum seviyenin %10 olduğu kontur grafiğinden

anlaşılmaktadır. Ortalama S/N grafiği, varyans analizi ve kontur grafiğine göre baskın parametrenin YFC olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle YFC'nin %15 ve UK'nın %20 ikame oranı 14 günlük eğilme dayanımında önemli oranda olumsuz etki göstermiştir. Bu, erken yaşlarda yüksek oranda puzolan ikamesinin olumsuzluğunu göstermektedir.



Şekil 5.29. YTM'ye göre elde edilmiş kontur grafikleri

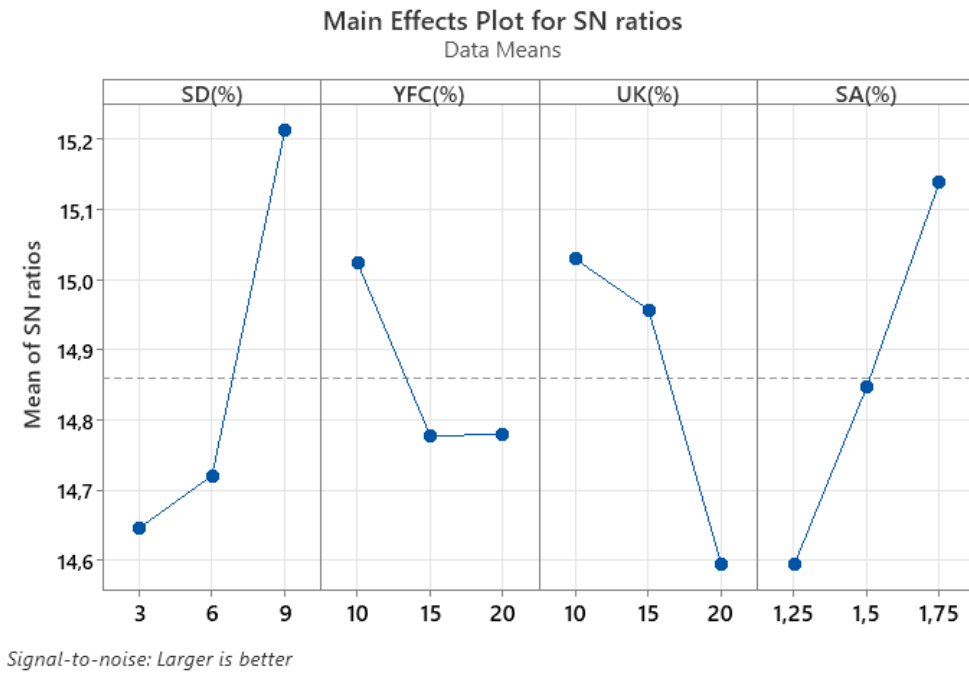
Şekil 5.30'da verilen optimum parametre seviyelerinde 14 günlük eğilmede çekme dayanımını maksimum veren durum için yöntem tarafından tahmin edilen eğilme dayanım değeri 5.76 MPa olarak bulunmuştur. Buna göre optimum parametre seviyeleri olan %6 SD, %10 YFC, %10 UK ve %1.5 SA oranlarında beton üretilerek yapılan doğrulama deneyinde elde edilen eğilme dayanımı 5.60 MPa olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre rölatif hata yaklaşık %3 olmuştur.



Şekil 5.30. 14 günlük eğilmede çekme dayanımı için Taguchi analizi sonuçlarına göre optimum tasarım tahmin değerleri

5.4.2. 28 günlük eğilmede çekme dayanımı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi

Tablo 4.7’de 28 günlük eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları verilmiştir. Buna göre varyasyon katsayısının yüksek olduğu M8 ve M9 serilerinde düzeltilmiş ortalama eğilme dayanım değerleri hesaplanmıştır. İstatistik analizler hem düzeltilmiş hem de standart ortalama deney verilerine göre yapılmıştır. 28 günlük düzeltilmiş ortalama eğilme dayanımı sonuçları açısından Taguchi istatistiksel analizleri Şekil 5.31’de verilen ortalama S/N grafiğine ve Tablo 5.19-5.20’ye göre değerlendirildiğinde; en etkili parametreler sırasıyla SD, SA, UK ve YFC olarak belirlenmiştir. COV’ a göre 28 günlük ortalama eğilme dayanımında düzeltmelerin yapıldığı durumda, optimum tasarım için belirlenen parametre seviyeleri SD için %9, YFC için %10, UK için %10 ve SA için %1.75 olmuştur.



Şekil 5.31. 28 günlük düzeltilmiş eğilme dayanımı için ortalama S/N grafiği

Tablo 5.19. 28 günlük düzeltilmiş eğilme dayanımı için ortalama S/N değerleri

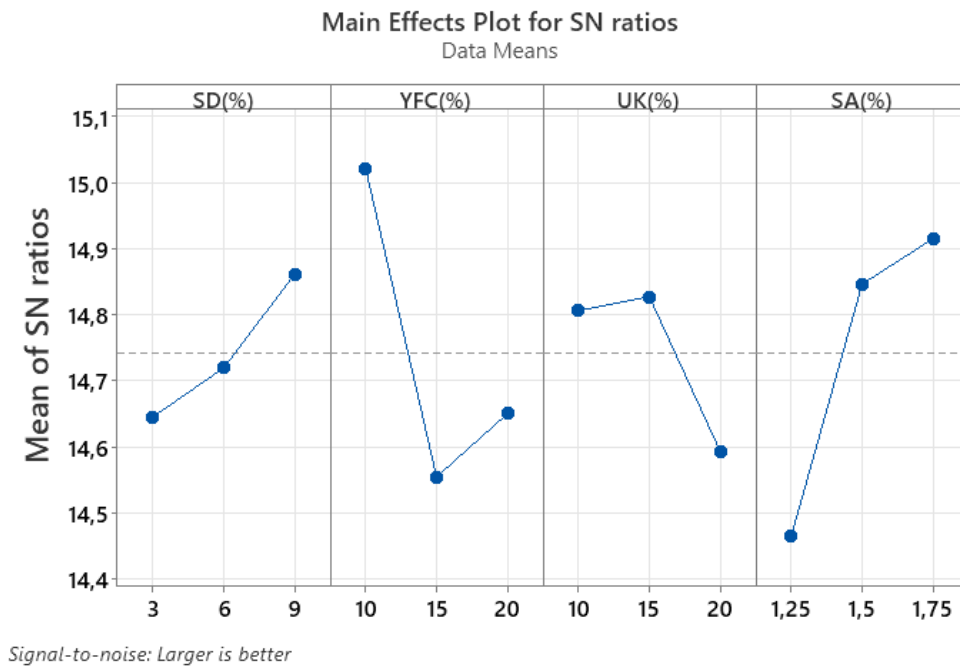
Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	14.65	15.02	15.03	14.59
2	14.72	14.78	14.96	14.85
3	15.21	14.78	14.59	15.14
Delta	0.57	0.25	0.44	0.54
Sıralama	1	4	3	2

Tablo 5.20. 28 günlük düzeltilmiş eğilme dayanımı için varyans analizi

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	0.23489	39.59%	0.23489	0.11745	*	*
YFC(%)	2	0.04585	7.73%	0.04585	0.02293	*	*
UK(%)	2	0.12931	21.79%	0.12931	0.06465	*	*
SA(%)	2	0.18330	30.89%	0.18330	0.09165	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	0.59335	100.00%				

28 günlük standart ortalama eğilme dayanımı sonuçları açısından Taguchi istatistiksel analizleri sırasıyla Şekil 5.32 ve Tablo 5.21-5.22’de verilen ortalama S/N grafiği, S/N oranı tablosu ve varyans analizine göre değerlendirildiğinde; en etkili parametreler sırasıyla YFC, SA, UK ve SD olarak belirlenmiştir. Varyasyon katsayısının göz önüne alınmadığı standart 28 günlük ortalama eğilme dayanımında optimum tasarım için belirlenen parametre seviyeleri SD için %9, YFC için %10, UK için %15 ve SA için %1.75 olmuştur. İki durum için parametrelerin optimum seviyeleri farklı olarak elde edildiğinden, iki durumun optimum parametre seviyelerinde karışımlar üretilerek doğrulama deneyleri yapılmış ve eğilme dayanımının yüksek olduğu durumdaki parametre seviyeleri optimum olarak kabul edilmiştir.

Doğrulama deneyleri sonucunda düzeltilmiş durumun parametre seviyeleri optimum kabul edildiğinden Şekil 5.33’te verilen kontur grafikleri bu durum için elde edilmiştir.

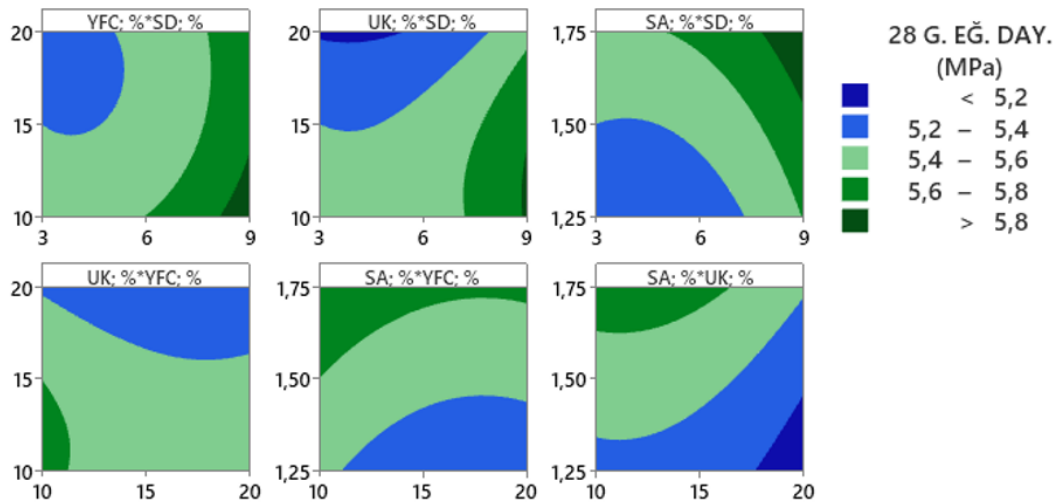
**Şekil 5.32.** 28 günlük standart eğilme dayanımı için ortalama S/N grafiği

Tablo 5.21. 28 günlük standart eğilme dayanımı için ortalama S/N değerleri

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	14.65	15.02	14.81	14.47
2	14.72	14.56	14.83	14.85
3	14.86	14.65	14.59	14.92
Delta	0.22	0.47	0.23	0.45
Sıralama	4	1	3	2

Tablo 5.22. 28 günlük standart eğilme dayanımı için varyans analizi

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	0.02889	8.26%	0.02889	0.01445	*	*
YFC(%)	2	0.14567	41.65%	0.14567	0.07283	*	*
UK(%)	2	0.03747	10.71%	0.03747	0.01873	*	*
SA(%)	2	0.13774	39.38%	0.13774	0.06887	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	0.34977	100.00%				

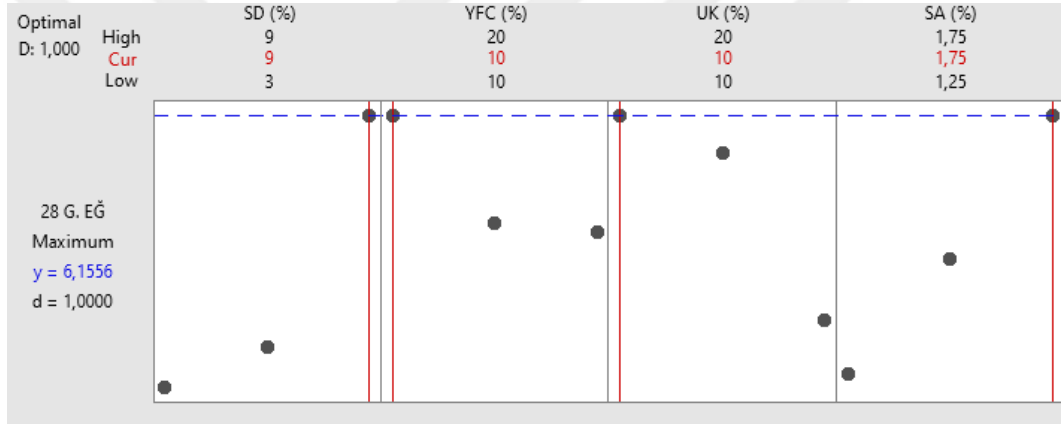
**Şekil 5.33.** YTM'ye göre optimum durumdan elde edilmiş kontur grafikleri

Şekil 5.33'e göre SD/YFC' nin 28 günlük eğilme dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde silis dumanı için optimum seviyenin %9, yüksek fırın cürufu için optimum seviyenin %10 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. YFC açısından en olumsuz seviye YFC'nin üçüncü seviyesi olan %20 ikame oranında gerçekleşmiştir. Şekil 5.33'e göre SD/UK' ün 28 günlük eğilme dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %9, UK için optimum seviyenin %10 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. Kontur grafiğine göre SD'deki parametrik değişim sırasıyla Şekil 5.31-Tablo 5.20'de verilen S/N grafikleri ve varyans analizine paralel olarak önemli oranda etkiliyken, UK'da en etkili parametrelerden biri

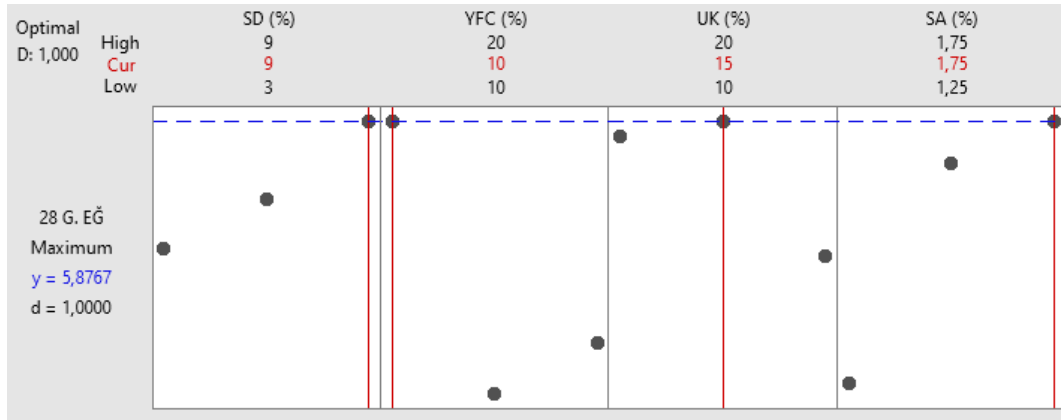
olmuştur. Buna göre UK'daki ikame oranı artışları 28 günlük eğilme dayanımı açısından olumsuzluk teşkil etmiştir.

Şekil 5.33'e göre UK/YFC'nin 28 günlük eğilme dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde YFC için optimum seviyenin %10, UK için optimum seviyenin %10 olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. Taguchi analizi, varyans analizi ve kontur grafiğine göre UK'nın YFC'den daha baskın parametre olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle YFC'nin %20 ve UK'nın %20 ikame oranı 28 günlük eğilme dayanımında olumsuz etki göstermiştir.

28 günlük eğilme dayanımı için iki durumda da doğrulama deneyleri yapılmıştır. Buna göre her iki durum için yöntemin tahmin ettiği eğilme dayanım değerleri Şekil 5.34 ve 5.35'te verilmiştir.



Şekil 5.34. 28 günlük düzeltilmiş eğilmede çekme dayanımı için Taguchi analiz sonuçlarına göre optimum tasarım tahmin değeri

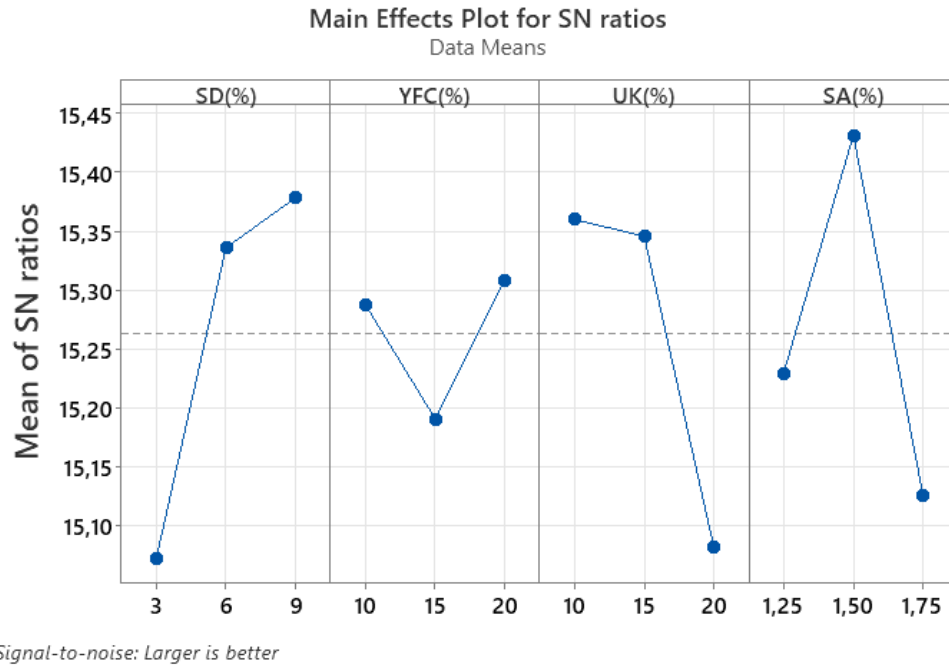


Şekil 5.35. 28 günlük ortalama standart eğilmede çekme dayanımı için Taguchi analizi sonuçlarına göre optimum tasarım tahmin değeri

Varyasyon katsayısının gözetildiği düzeltilmiş deney sonuçlarına göre yapılan Taguchi analizinde, parametrelerin optimum seviyeleri SD için %9, YFC için %10, UK için %10 ve SA için %1.75 olarak bulunmuş ve doğrulama deneyi bu seviyelerde yapılmıştır. Bu seviyelerde Şekil 5.34'e göre yöntemin tahmin ettiği eğilme dayanımı 6.16 MPa, doğrulama deneyi sonucunda elde edilen eğilme dayanımı ise 6.02 MPa olarak bulunmuş rölatif hata oranı %2.33 olmuştur. Diğer yandan standart deney sonuçlarına göre yapılan Taguchi istatistik analizinde parametrelerin optimum seviyeleri SD için %9, YFC için %10, UK için %15 ve SA için %1.75 olarak bulunmuş doğrulama deneyi bu seviyeler için tekrarlanmıştır. Bu seviyelerde yöntem tarafından tahmin edilen eğilme dayanımı 5.87 MPa olurken, doğrulama deneyi sonucunda bulunan eğilme dayanımı 5.92 MPa olmuştur. İki sonuç arasında rölatif hata %0.85 olarak hesaplanmıştır. Buna göre optimum seviyeler, doğrulama deney sonucunun daha yüksek olduğu düzeltilmiş deney sonuçlarından elde edilen SD %9, YFC %10, UK %10 ve SA %1.75 olarak belirlenmiştir.

5.4.3. 56 günlük eğilmede çekme dayanımı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi

Tablo 4.8'de 56 günlük eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları verilmiştir. Buna göre varyasyon katsayısı L9 ortogonal dizinin tüm serilerinde düşük olduğundan direkt olarak deney tekrarlarının ortalaması alınmış ve standart duruma göre istatistik analizler yapılmıştır. 56 günlük standart ortalama eğilme dayanımı sonuçları açısından Taguchi istatistik analizleri Şekil 5.36'da verilen ortalama S/N grafiğine ve Tablo 5.23-5.24'e göre değerlendirildiğinde; en etkili parametreler sırasıyla SD, SA, UK ve YFC olarak belirlenmiştir. Standart durum için yapılan istatistik analizlere göre 56 günlük eğilme dayanımında parametre seviyeleri; SD için %9, YFC için %20, UK için %10 ve SA için %1.5 olarak belirlenmiştir. Şekil 5.37'ye göre SD/YFC nun 56 günlük eğilme dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde; SD için optimum seviyenin %9, YFC için optimum seviyenin %20 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. Buna göre SD/UK nun 56 günlük eğilme dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %9, UK için optimum seviyenin %10 ikame oranı olduğu yüzey grafiklerinden anlaşılmaktadır. Kontur grafiğine göre SD'deki parametrik değişim S/N grafikleri ve varyans analizine paralel olarak önemli oranda etkiliyken, UK'da en etkili parametrelerden biri olmuştur. Buna göre silis dumanındaki ikame oranı artışı dayanımı olumlu etkilerken uçucu küldeki ikame oranı artışı dayanımı olumsuz etkilemiştir.



Şekil 5.36. 56 günlük standart eğilme dayanımı için ortalama S/N grafiği

Tablo 5.23. 56 günlük standart eğilme dayanımı için ortalama S/N değerleri

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	15.07	15.29	15.36	15.23
2	15.34	15.19	15.35	15.43
3	15.38	15.31	15.08	15.13
Delta	0.31	0.12	0.28	0.31
Sıralama	1	4	3	2

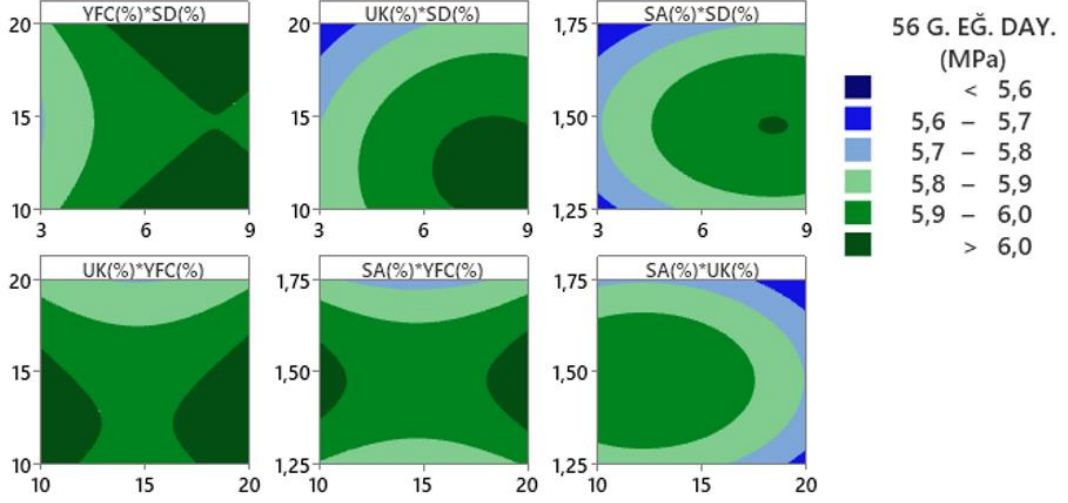
Tablo 5.24. 56 günlük standart eğilme dayanımı için varyans analizi

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	0.07242	34.10%	0.07242	0.036212	*	*
YFC(%)	2	0.01145	5.39%	0.01145	0.005727	*	*
UK(%)	2	0.06419	30.22%	0.06419	0.032094	*	*
SA(%)	2	0.06431	30.28%	0.06431	0.032157	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	0.21238	100.00%				

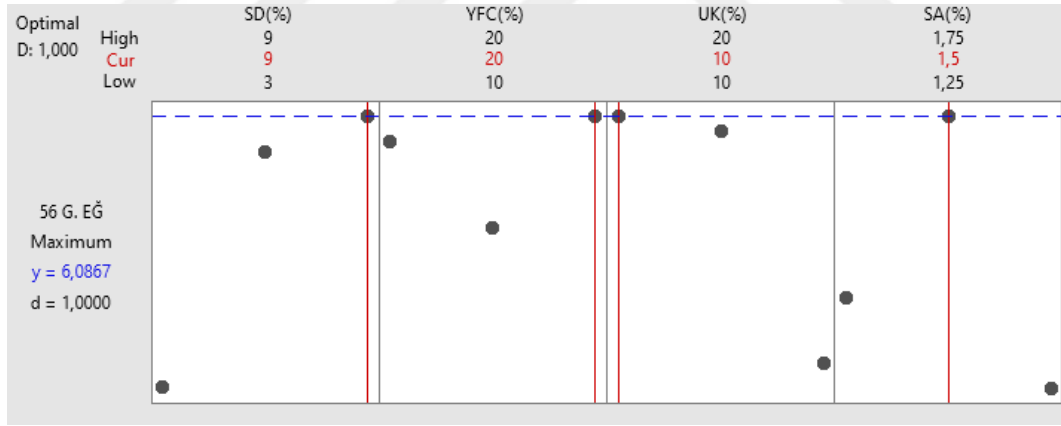
Şekil 5.37'ye göre UK/YFC'nun 56 günlük eğilme dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde YFC için optimum seviyenin %20, UK için optimum seviyenin %10 olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. Taguchi analizi, varyans analizi ve yüzey grafiğine göre baskın parametrenin UK olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle SD'nin %3, UK'nın %20 ikame oranı ve SA'nın %1.75 oranında kullanımı 56 günlük eğilme dayanımında önemli oranda olumsuz etki göstermiştir.

Şekil 5.38'de verilen optimum parametre seviyelerinde 56 günlük eğilme çekme dayanımını maksimum veren durum için Taguchi yöntemi kullanılarak tahmin

edilen eğilme dayanım değeri 6.09 MPa olarak bulunmuştur. Buna göre optimum parametre seviyeleri olan %9 SD, %20 YFC, %10 UK ve %1.5 SA oranları kullanılarak yapılan doğrulama deneyinde elde edilen eğilme dayanımı 6.35 MPa olarak bulunmuş ve rölatif hata oranı yaklaşık % 4.1 olmuştur.



Şekil 5.37. YTM'ye göre elde edilmiş kontur grafikleri



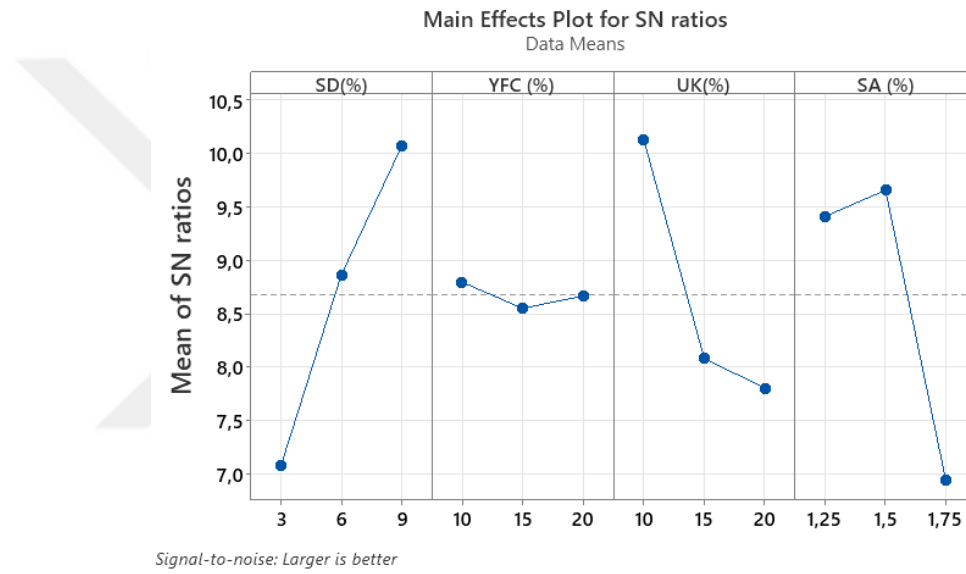
Şekil 5.38. 56 günlük standart eğilmede çekme dayanımı için Taguchi analizi sonuçlarına göre optimum tasarım tahmin değerleri

5.5. Yarmada Çekme Dayanımı

Yarmada çekme dayanımı deneyi $d100 \times l200$ mm boyutlu silindir numunelere 3 farklı kür süresine göre uygulanmıştır. Yarmada çekme dayanımında istatistik analizlerde deney tekrarlarından elde edilen varyasyon katsayısı değerleri göz önünde bulundurulmuştur. Taguchi analizlerinde performans karakteristiği olarak en büyük en iyi kriteri kullanılmıştır.

5.5.1. 14 günlük yarmada çekme dayanımı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi

Tablo 4.9'a göre L9 ortogonal dizi serileri deney tekrarlarının varyasyon katsayıları düşük olduğundan standart ortalama deney verileri ile istatistik analizler gerçekleştirilmiştir. Silis dumanının en yüksek ikame miktarında ve diğer puzolanların en düşük ikame oranlarında en yüksek çekme dayanımlarının elde edilmesi, silis dumanının puzolanik aktivitesinin yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Parametrelerin ortalama S/N oran grafiği Şekil 5.39' da, ortalama S/N oranları Tablo 5.25' te ve varyans analizi Tablo 5.26' da verilmiştir.



Şekil 5.39. 14 günlük standart yarmada çekme dayanımı için ortalama S/N grafiği

Tablo 5.25. 14 günlük yarmada çekme dayanımı S/N oran tablosu

Seviye	SD(%)	YFC (%)	UK(%)	SA (%)
1	7.085	8.797	10.128	9.411
2	8.864	8.551	8.082	9.656
3	10.065	8.667	7.805	6.947
Delta	2.980	0.246	2.323	2.709
Sıralama	1	4	3	2

Tablo 5.26. 14 günlük yarmada çekme dayanımı varyans analizi

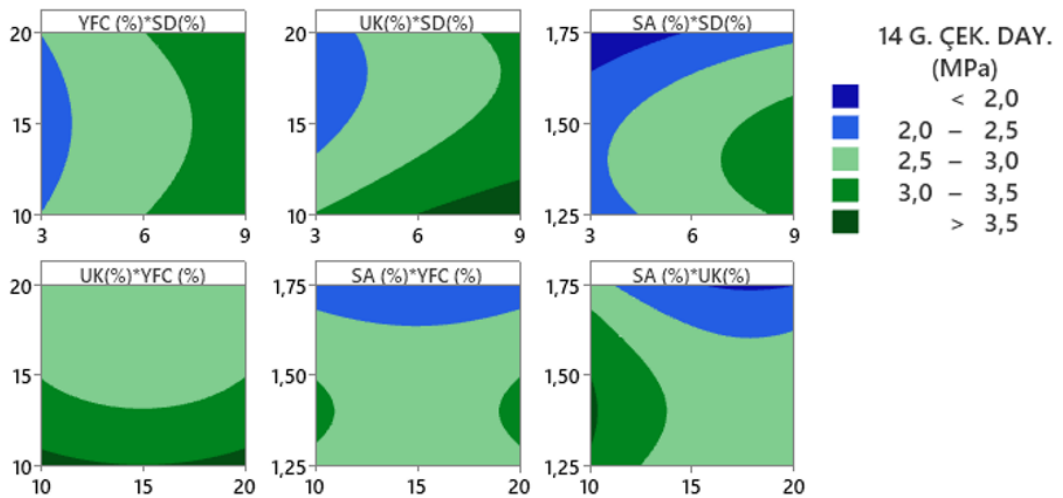
Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	1.14208	36.03%	1.14208	0.57104	*	*
YFC (%)	2	0.04455	1.41%	0.04455	0.02228	*	*
UK(%)	2	0.87520	27.61%	0.87520	0.43760	*	*
SA (%)	2	1.10787	34.95%	1.10787	0.55393	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	3.16970	100.00%				

14 günlük yarmada çekme dayanımında en etkili parametreler sırasıyla SD, SA, UK ve YFC olarak bulunmuştur. Diğer yandan 14 günlük yarmada çekme dayanımı için parametrelerin optimum seviyeleri SD %9, YFC %10, UK %10 ve SA %1.5 olarak belirlenmiştir.

Şekil 5.40'a göre SD/YFC nin 14 günlük yarmada çekme dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %9, YFC için optimum seviyenin %20 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. SD nin ikame oranı artışı 14 günlük çekme dayanımını olumlu etkilerken, YFC deki ikame oranı değişimi çekme dayanımını düşük miktarda etkilemiştir.

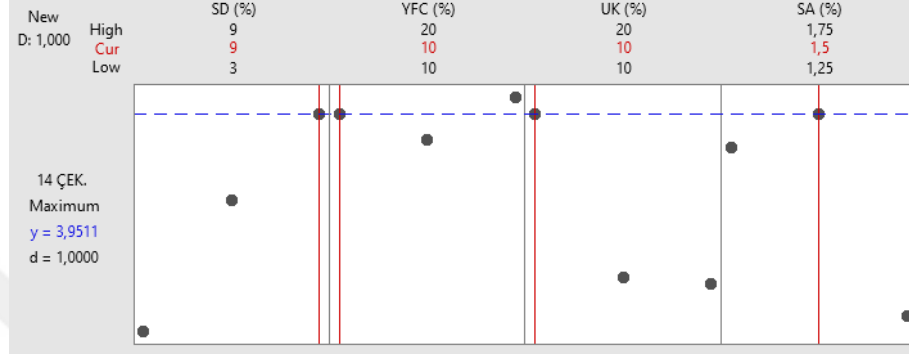
Şekil 5.40'a göre SD/UK nin 14 günlük yarmada çekme dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %9, UK için optimum seviyenin %10 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. Kontur grafiğine göre SD' deki parametrik değişim S/N grafiklerine, varyans analizine uyumlu olarak önemli oranda etkiliyken, UK' da en etkili parametrelerden biri olmuştur. SD ikame oranı artışı çekme dayanımı olumlu etkilerken, UK nin ikame oranı artışı çekme dayanımını olumsuz etkilemiştir.

Buna göre UK/YFC nin 14 günlük yarmada çekme dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde YFC ve UK için optimum seviyenin %10 olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. Taguchi analizi, varyans analizi ve kontur grafiğine göre UK' nın YFC' den daha baskın parametre olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle SD'nin %3 ve UK'nın %20 ikame oranı ile SA'nın %1.75 oranında kullanılması 14 günlük yarmada çekme dayanımında olumsuz etki göstermiştir.



Şekil 5.40. YTM'ye göre elde edilmiş kontur grafikleri

Optimum parametre seviyelerinde 14 günlük yarmada çekme dayanımını maksimum veren durum için Taguchi yöntemi kullanılarak tahmin edilen ve Şekil 5.41’de verilen yarmada çekme dayanım değeri 3.95 MPa olarak bulunmuştur. Buna göre optimum parametre seviyeleri olan %9 SD, %10 YFC, %10 UK ve %1.5 SA oranlarında yapılan doğrulama deneyinde elde edilen yarmada çekme dayanımı 3.83 MPa olarak bulunmuş rölatif hata değeri %3.13 olmuştur.



Şekil 5.41. 14 günlük yarmada çekme dayanımı Taguchi analizi sonuçlarına göre optimum tasarım için tahmin değerleri

5.5.2. 28 günlük yarmada çekme dayanımı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi

Tablo 4.10’ a göre deney tekrarlarının varyasyon katsayıları düşük olduğundan standart ortalama deney sonuçları ile istatistik analizler gerçekleştirilmiştir. Parametrelerin ortalama S/N oran grafiği Şekil 5.42’ de, ortalama S/N oranları Tablo 5.27’ de ve varyans analizi Tablo 5.28’ de verilmiştir.

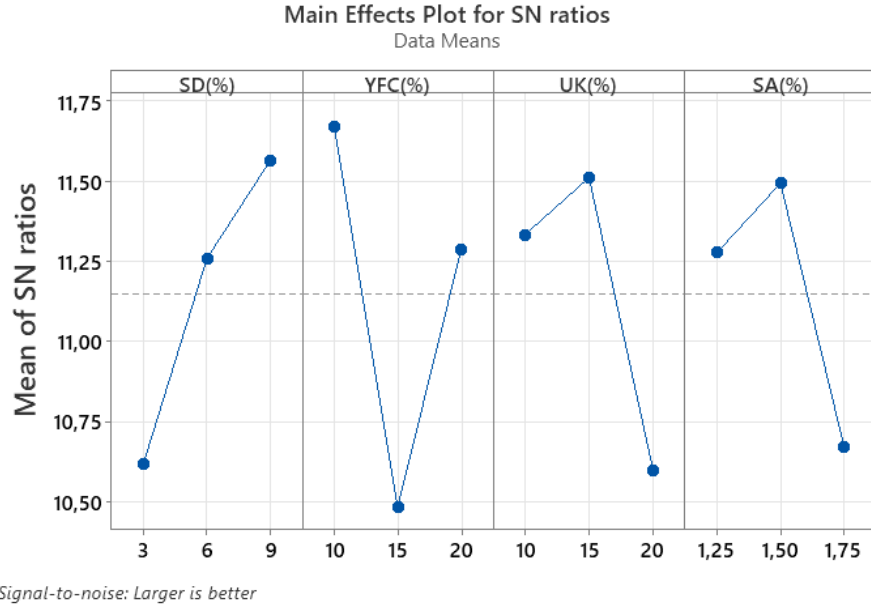
28 günlük yarmada çekme dayanımında en etkili parametreler sırasıyla YFC, SD, UK ve SA olarak bulunmuştur. Diğer yandan 28 günlük yarmada çekme dayanımı için parametrelerin optimum seviyeleri SD %9, YFC %10, UK %15 ve SA %1.5 olarak belirlenmiştir.

Şekil 5.43’e göre SD/YFC nin 28 günlük yarmada çekme dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %9, YFC için optimum seviyenin %10 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. SD nin ikame oranı artışı çekme dayanımını olumlu etkilerken YFC nin %15 ikame oranı dayanımı önemli ölçüde azaltmıştır.

Şekil 5.43’e göre SD/UK nin 28 günlük yarmada çekme dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %9, UK için optimum seviyenin %15

ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. UK'nın betonda %20 ikame oranında kullanımı 14 günlük kür süresinde olduğu gibi dayanımı olumsuz etkilemiştir.

Şekil 5.43'e göre UK/YFC'nin 28 günlük yarmada çekme dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde YFC için optimum seviyenin %10, UK için optimum seviyenin %15 olduğu yüzey grafiklerinden anlaşılmaktadır. Taguchi analizi, varyans analizi ve kontur grafiğine göre baskın parametrenin YFC olduğu anlaşılmaktadır. Kontur grafiklerine göre; özellikle SD'nin %3, YFC'nin %15, UK'nın %20 ve SA'nın %1.75 oranında kullanımı 28 günlük yarmada çekme dayanımında olumsuz etki göstermiştir.



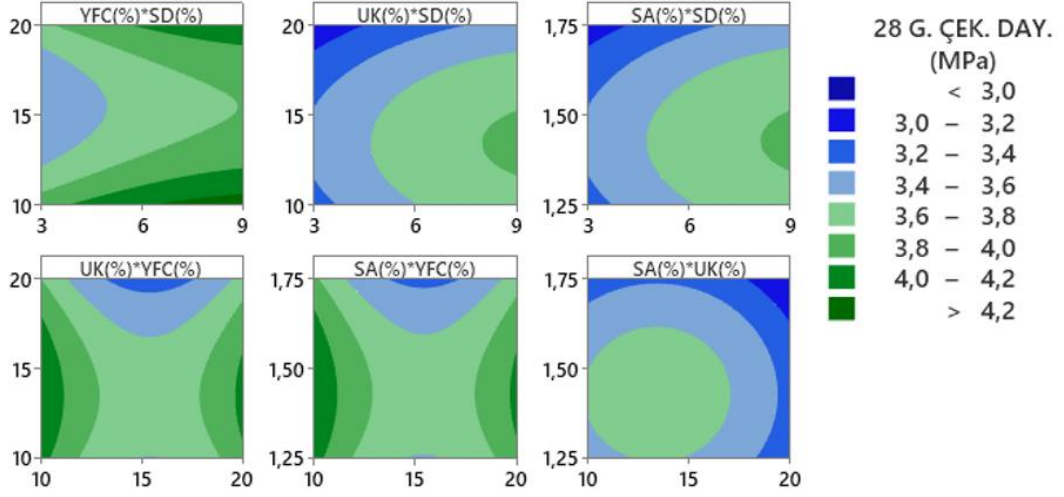
Şekil 5.42. 28 günlük standart yarmada çekme dayanımı için ortalama S/N grafiği

Tablo 5.27. 28 günlük yarmada çekme dayanımı ortalama S/N oran tablosu

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	10.62	11.67	11.33	11.28
2	11.26	10.48	11.51	11.49
3	11.57	11.29	10.60	10.67
Delta	0.95	1.19	0.91	0.82
Sıralama	2	1	3	4

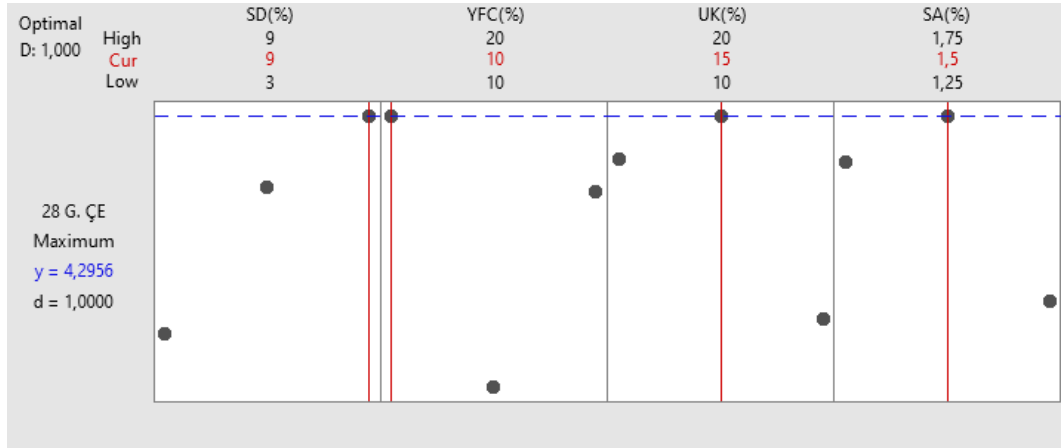
Tablo 5.28. 28 günlük yarmada çekme dayanımı varyans analizi

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	0.2398	23.39%	0.2398	0.11990	*	*
YFC(%)	2	0.3831	37.37%	0.3831	0.19157	*	*
UK(%)	2	0.2220	21.66%	0.2220	0.11102	*	*
SA(%)	2	0.1802	17.58%	0.1802	0.09009	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	1.0252	100.00%				



Şekil 5.43. YTM'ye göre elde edilmiş kontur grafikleri

Optimum parametre seviyelerinde 28 günlük yarmada çekme dayanımını maksimum veren durum için Taguchi yöntemi kullanılarak tahmin edilen yarmada çekme dayanım değeri Şekil 5.44'te verildiği üzere 4.30 MPa olarak bulunmuştur. Buna göre optimum parametre seviyeleri olan %9 SD, %10 YFC, %15 UK ve %1.5 SA oranlarında yapılan doğrulama deneyinde elde edilen çekme dayanımı 4.10 MPa olarak bulunmuş rölatif hata değeri yaklaşık %4.88 olmuştur.

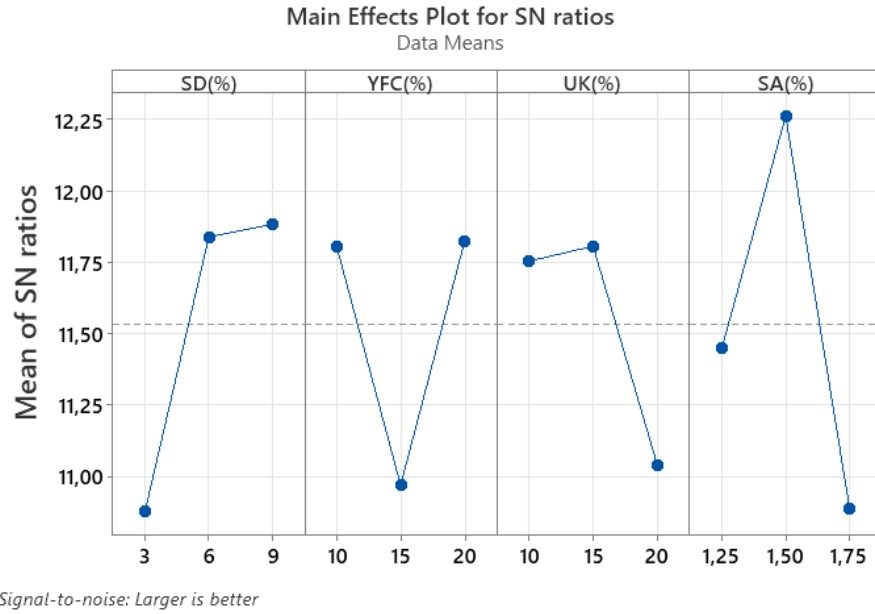


Şekil 5.44. 28 günlük yarmada çekme dayanımı Taguchi analizi sonuçlarına göre optimum tasarım için tahmin değerleri

5.5.3. 56 günlük yarmada çekme dayanımı deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi

Tablo 4.11' e göre deney tekrarlarının varyasyon katsayıları düşük olduğundan standart ortalama deney sonuçları ile istatistik analizler gerçekleştirilmiştir.

Parametrelerin ortalama S/N oran grafiği Şekil 5.45’ te, ortalama S/N oranları Tablo 5.29’ da ve varyans analizi Tablo 5.30’ da verilmiştir.



Şekil 5.45. 56 günlük standart yarmada çekme dayanımı için ortalama S/N grafiği

Tablo 5.29. 56 günlük yarmada çekme dayanımı ortalama S/N oran tablosu

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	10.88	11.80	11.75	11.45
2	11.84	10.97	11.81	12.26
3	11.88	11.82	11.04	10.89
Delta	1.00	0.85	0.77	1.37
Sıralama	2	3	4	1

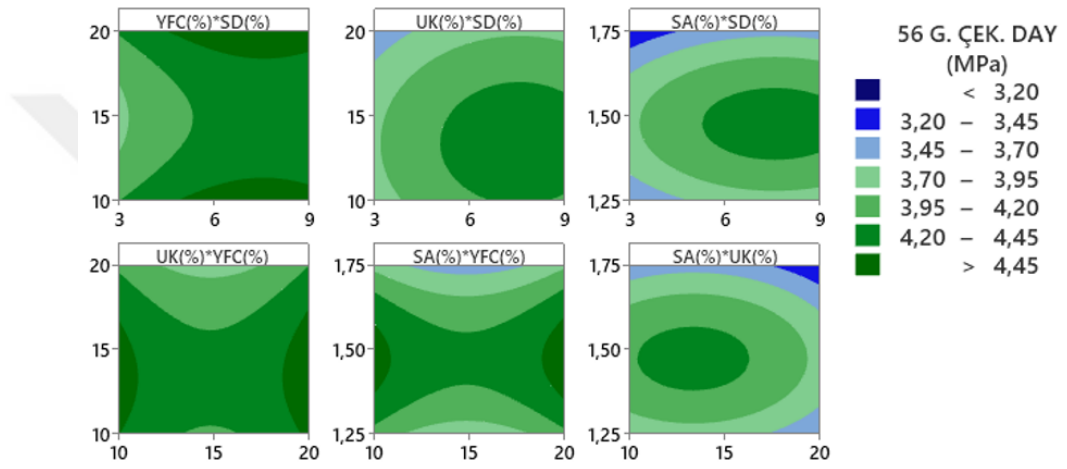
Tablo 5.30. 56 günlük yarmada çekme dayanımı varyans analizi

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	0.3689	26.21%	0.3689	0.18447	*	*
YFC(%)	2	0.2962	21.04%	0.2962	0.14808	*	*
UK(%)	2	0.1895	13.46%	0.1895	0.09474	*	*
SA(%)	2	0.5532	39.30%	0.5532	0.27660	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	1.4078	100.00%				

56 günlük yarmada çekme dayanımında en etkili parametreler sırasıyla SA, SD, YFC ve UK olarak bulunmuştur. Diğer yandan 56 günlük yarmada çekme dayanımı için parametrelerin optimum seviyeleri SD %9, YFC %20, UK %15 ve SA %1.5 olarak belirlenmiştir.

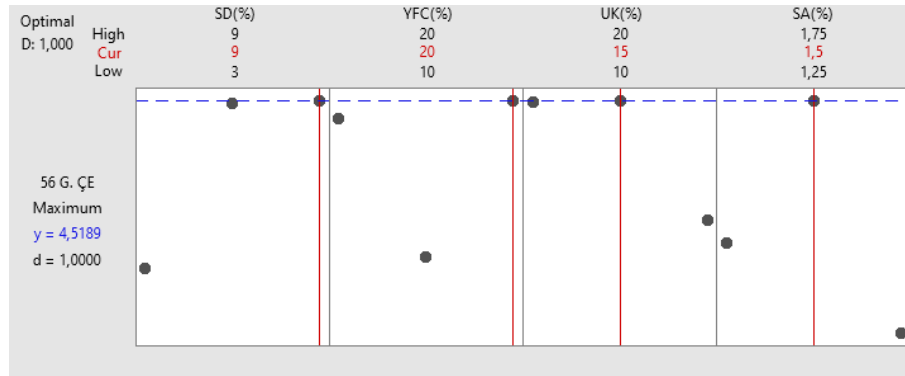
Şekil 5.46’ya göre SD/YFC nin 56 günlük yarmada çekme dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %9, YFC için optimum seviyenin %20

ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. Şekil 5.46'ya göre SD/UK'nın 56 günlük yarmada çekme dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %9, UK için optimum seviyenin %15 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. Şekil 5.46'ya göre UK/YFC'nin 56 günlük yarmada çekme dayanımına parametrik etkisi incelendiğinde YFC için optimum seviyenin %20, UK için optimum seviyenin %15 olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. Özellikle SD'nin %3, YFC'nin %15, UK'nın %20 ve SA'nın %1.75 olduğu seviyeler 56 günlük yarmada çekme dayanımında olumsuz etki göstermiştir.



Şekil 5.46. YTM'ye göre elde edilmiş kontur grafikleri

Optimum parametre seviyelerinde 56 günlük yarmada çekme dayanımını maksimum veren durum için yöntem kullanılarak tahmin edilen yarmada çekme dayanım değeri Şekil 5.47'de verildiği üzere 4.52 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 5.47. 56 günlük yarmada çekme dayanımı Taguchi analizi sonuçlarına göre optimum tasarım için tahmin değerleri

Buna göre optimum parametre seviyeleri olan %9 SD, %20 YFC, %15 UK ve %1.5 SA oranlarında yapılan doğrulama deneyinde elde edilen eğilme dayanımı 4.55 MPa olarak bulunmuş rölatif hata değeri %0.66 olmuştur.

5.6. Su Emme Yüzdesi

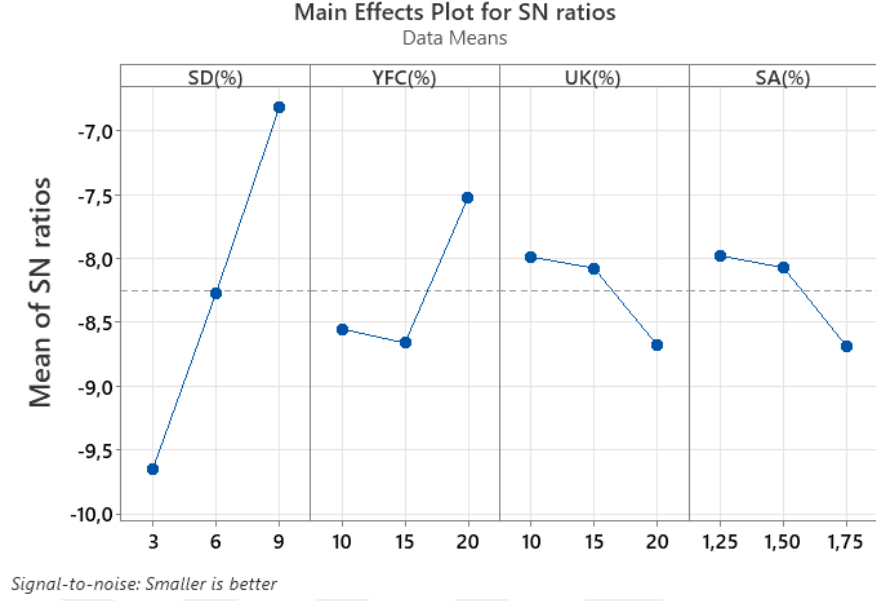
Tez kapsamında su emme oranı tayini deneyleri 28 ve 56 günlük 100x100x400 mm prizmatik hasarlı numunelere uygulanmıştır. Her seride 3 adet numunenin ortalaması alınarak deney yapılmıştır. Taguchi analizlerinde performans karakteristiği olarak en küçük en iyi kriteri kullanılmıştır. Ultra ses geçiş hızının betonun kompasitesi ile ilgili olduğu düşünüldüğünde yöntem tarafından önerilen optimum parametre seviyeleri ultra ses geçiş hızı için bulunanlarla birlikte değerlendirilecektir.

5.6.1. 28 günlük su emme yüzdesi deney sonuçlarının değerlendirilmesi

28 gün boyunca standart kürde kalan prizmatik numuneler eğilme deneyine tabi tutulduktan sonra, 24 saat boyunca, numune ağırlığı sabit kalıncaya kadar etüvde kurutulup oda sıcaklığına kadar soğuduktan sonra tartılmış, kuru ağırlıklar kaydedilmiştir. Daha sonra numuneler, standart kürde 24 saat bekletilip sudan çıkartıldıktan sonra yüzeyleri kurularak, numunenin suya doygun ağırlığı bulunmuştur. Belirlenen ağırlıklara göre numunenin su emme yüzdesi tespit edilmiştir. Deneyler her serinin 3 tekrarlı numunesine uygulanarak ortalama değerler alınmıştır. Deney sonuçlarına göre elde edilen istatistik analiz sonuçları Şekil 5.48-5.49 ve Tablo 5.31-5.32’de verilmiştir.

28 günlük su emme deney sonuçları istatistik analizi Şekil 5.48’de verilen ortalama S/N grafiğine göre değerlendirildiğinde parametrelerin optimum seviyeleri SD %9, YFC %20, UK %10 ve SA %1.25 olmuştur. Bu sonuçlar, Şekil 5.22’de verilen 28 günlük ultra ses geçiş hızı ortalama S/N grafiği ile kıyaslandığında; SA parametresinin seviyesi hariç örtüşmektedir. Ancak Şekil 5.48 ve 5.49’a göre; SA’nın ikinci seviyesinin birinci seviyesine yakın bir değer aldığı düşünüldüğünde SA seviyesindeki farklılık ihmal edilebilir. SD çok ince taneciklerden oluşan bir puzolan olduğundan su emme oranında Şekil 5.48 ve Şekil 5.49’dan anlaşılacağı üzere etki yüzdesi en fazla olan parametre olarak öne çıkmıştır. Tez kapsamında farklı kriterler için yapılan çoğu istatistik değerlendirmede

olduğu gibi YFC'nin %15 ikame oranı geçirimsizliği olumsuz etkilemiştir. UK'nın %20 ikame oranında da benzer durum söz konusudur.



Şekil 5.48. 28 günlük su emme yüzdesi ortalama S/N grafiği

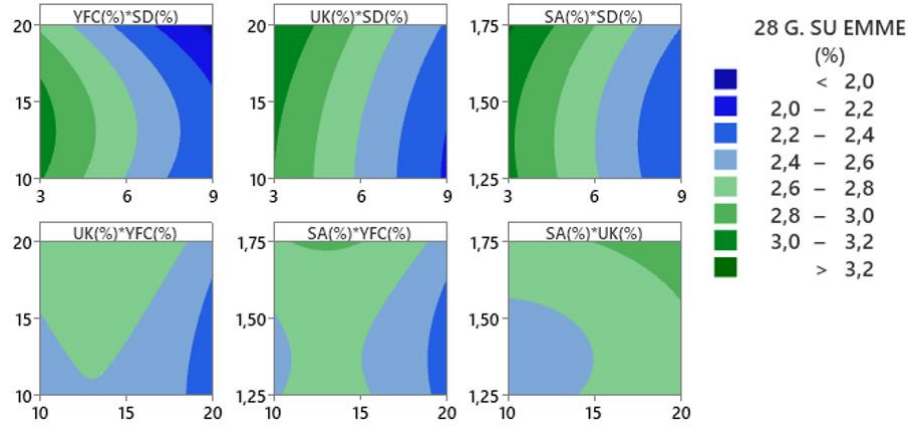
Tablo 5.31. 28 günlük su emme yüzdesi ortalama S/N değerleri

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	-9.646	-8.553	-7.989	-7.980
2	-8.273	-8.662	-8.077	-8.073
3	-6.824	-7.529	-8.678	-8.690
Delta	2.823	1.133	0.688	0.710
Sıralama	1	2	4	3

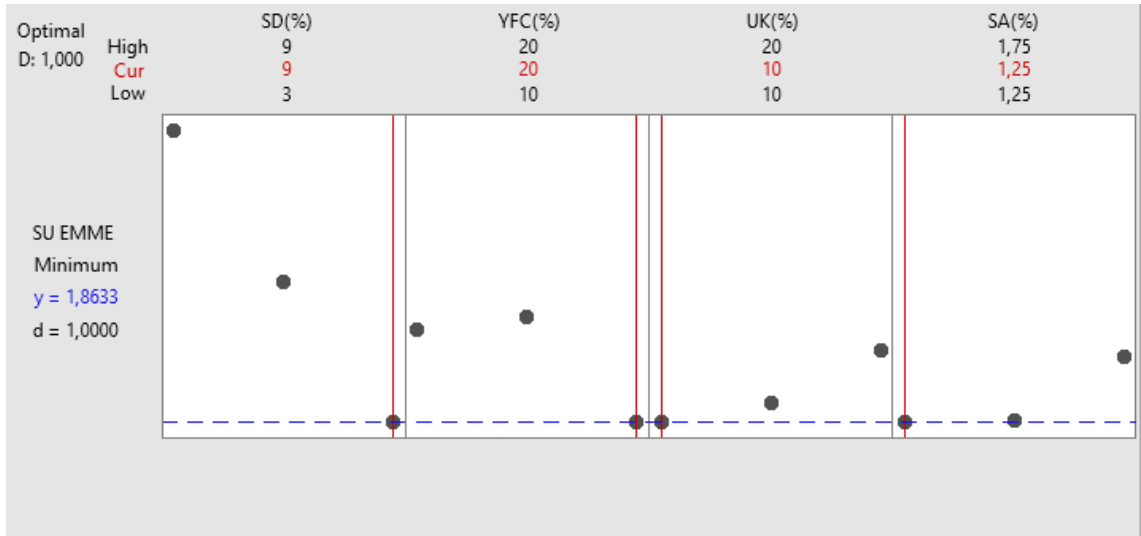
Tablo 5.32. 28 günlük su emme yüzdesi varyans analizi

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	1.04222	77.86%	1.04222	0.52111	*	*
YFC(%)	2	0.16069	12.00%	0.16069	0.08034	*	*
UK(%)	2	0.06842	5.11%	0.06842	0.03421	*	*
SA(%)	2	0.06729	5.03%	0.06729	0.03364	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	1.33862	100.00%				

Şekil 5.50'de Taguchi yöntemi kullanılarak yapılan analizde optimum seviyelerde su emme yüzdesi tahmini %1.86 olarak bulunmuştur. Doğrulama deneyinden elde edilen sonuç ise %2.07 olmuştur. Tahmin ve doğrulama deneyi arasında rölatif hata %10.4 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.49. YTM'ye göre elde edilmiş kontur grafikleri



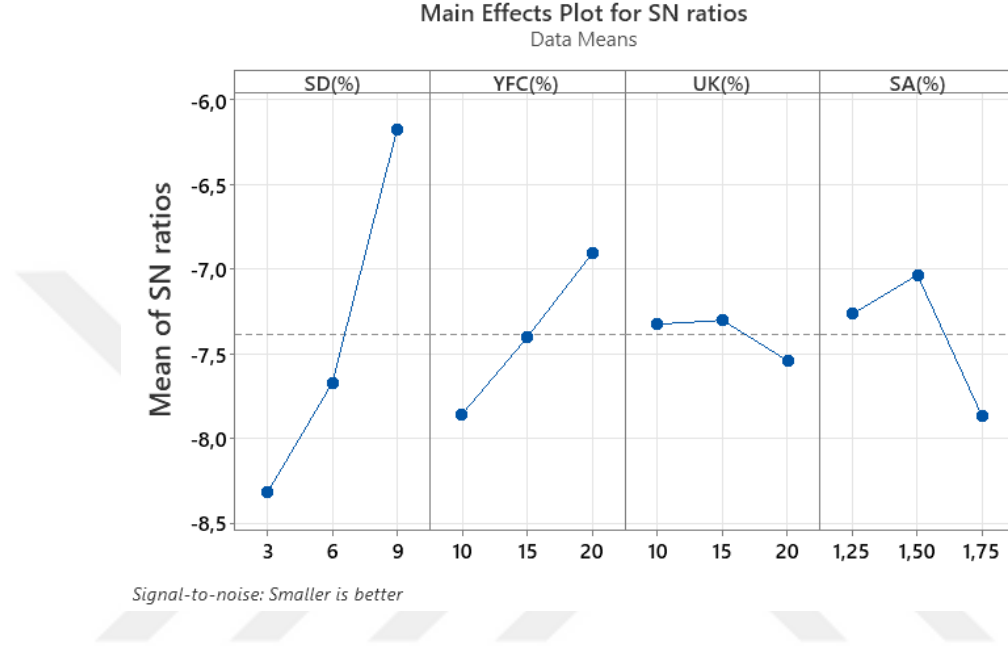
Şekil 5.50. 28 günlük ortalama su emme oranına göre optimum tasarım için Taguchi tahmin değerleri

5.6.2. 56 günlük su emme yüzdesi deney sonuçlarının değerlendirilmesi

56 gün boyunca standart kürde kalan prizmatik numuneler, eğilme deneyine tabi tutulduktan sonra, 24 saat boyunca, numune ağırlığı sabit kalıncaya kadar etüvde kurutulup oda sıcaklığına kadar soğuduktan sonra tartılmış, kuru ağırlıklar kaydedilmiştir. Daha sonra numuneler, standart kürde 24 saat bekletilip sudan çıkartıldıktan sonra yüzeyleri kurularak, numunenin suya doymuş ağırlığı bulunmuştur. Belirlenen ağırlıklara göre numunenin su emme yüzdesi tespit edilmiştir. Deneyler her serinin 3 tekrarlı numunesine uygulanarak ortalama değerler alınmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen istatistik analiz sonuçları Şekil 5.51-5.52 ve Tablo 5.33-5.34'te verilmiştir.

56 günlük su emme deneyi istatistik analizleri sırasıyla Şekil 5.51–Şekil 5.52'de verilen ortalama S/N grafiğine ve kontur grafiklerine göre değerlendirildiğinde;

parametrelerin optimum seviyeleri SD %9, YFC %20, UK %15 ve SA %1.5 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, Şekil 5.25'te verilen 56 günlük ultra ses geçiş hızı ortalama S/N grafiğindeki optimum parametre seviyeleri ile örtüşmektedir. Şekil 5.51 ve Şekil 5.52'den anlaşılacağı üzere silis dumanı çok ince taneciklerden oluşan bir puzolan olduğundan betonun su emme oranında en etkili parametre olmuştur.



Şekil 5.51. 56 günlük su emme yüzdesi ortalama S/N grafiği

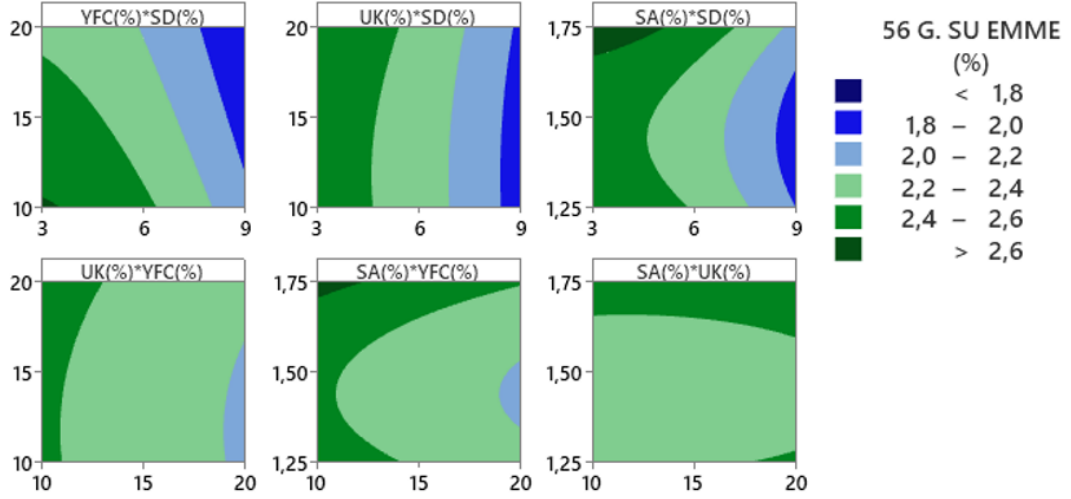
Tablo 5.33. 56 günlük su emme yüzdesi ortalama S/N değerleri

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	-8.316	-7.857	-7.324	-7.263
2	-7.670	-7.403	-7.301	-7.034
3	-6.179	-6.906	-7.540	-7.868
Delta	2.138	0.951	0.240	0.834
Sıralama	1	2	4	3

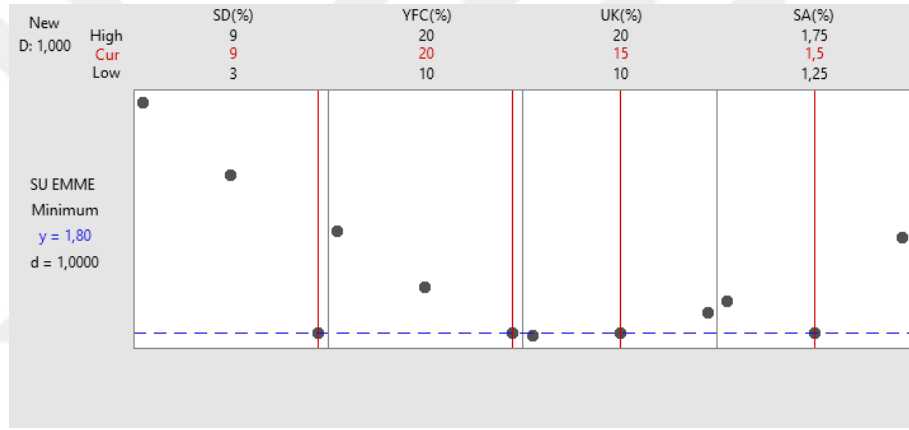
Tablo 5.34. 56 günlük su emme yüzdesi varyans analizi

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	0.503022	73.20%	0.503022	0.251511	*	*
YFC(%)	2	0.094022	13.68%	0.094022	0.047011	*	*
UK(%)	2	0.005756	0.84%	0.005756	0.002878	*	*
SA(%)	2	0.084356	12.28%	0.084356	0.042178	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	0.687156	100.00%				

Şekil 5.53'te Taguchi yöntemi kullanılarak yapılan analizde optimum seviyelerde su emme yüzdesi tahmini %1.80 olarak bulunmuştur. Optimum parametre seviyelerinde yapılan doğrulama deneyinden elde edilen sonuç ise %2.01 olmuştur. Tahmin ve doğrulama deneyi arasındaki rölatif hata %10.45 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.52. YTM'ye göre elde edilmiş kontur grafikleri



Şekil 5.53. 56 günlük ortalama su emme oranına göre optimum tasarım için Taguchi tahmin değerleri

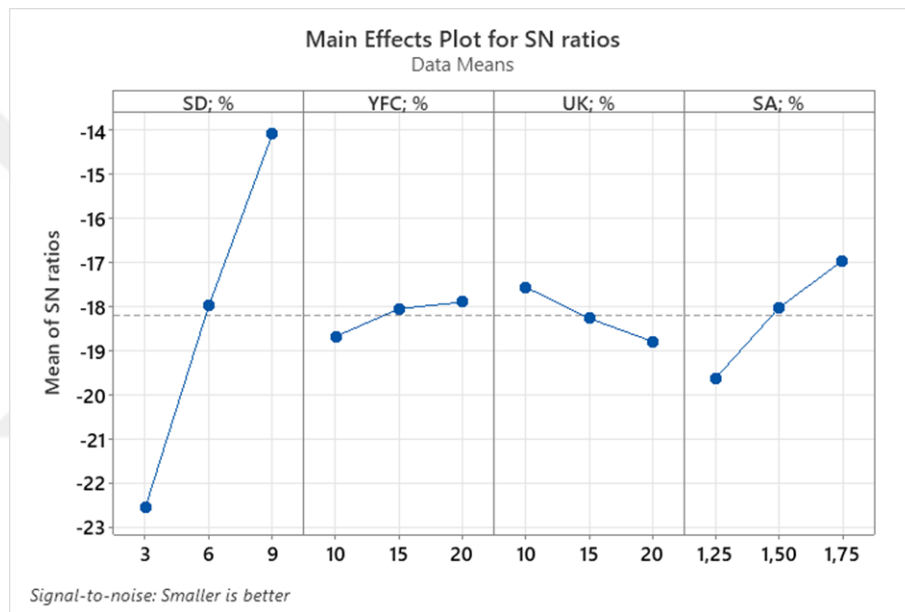
5.7. Hızlandırılmış Korozyon Deneyi

Hızlandırılmış korozyon deney sonuçlarından elde edilen ortalama korozyon akımları istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Seçilen parametre ve seviyelerine uygun olarak L9 ortogonal dizi kullanılmış ve en küçük- en iyi performans karakteristiği için Taguchi analizleri yapılmıştır. Optimum parametre seviyeleri, Taguchi analiz sonuçlarına göre belirlenerek bu seviyelerde doğrulama deneyi yapılmıştır.

5.7.1. K2 durumunda çekilen korozyon akımı sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi

K2 durumunda çekilen korozyon akımı deney sonuçlarının Taguchi analizleri Şekil 5.54 ve Tablo 5.35-5.36'da verilmiştir.

Hızlandırılmış korozyon deneyi sonuçlarına göre; K2 durumu için serilerin çektiği ortalama korozyon akımları istatistik açıdan Şekil 5.54'e göre değerlendirildiğinde, en etkili parametre SD olurken, parametrenin optimum seviyesi %9 olarak tespit edilmiştir. SD₁, kullanılan bağlayıcılar içerisinde en küçük tanecik çapına sahip puzolan olduğundan, betonun boşluk yapısını iyileştirmiştir. Daha düşük gözeneklilik, donatı yüzeyine su ve klorür geçişini azaltmış, buna bağlı olarak da korozyon gelişimi yavaşlamıştır. YFC ve UK'nın ortalama çekilen akım miktarına katkı yüzdeleri yakın değerler almıştır. YFC ve UK için optimum parametre seviyeleri sırasıyla %20 ve %10 olarak tespit edilmiştir. SA için optimum parametre seviyesi % 1.75 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.54. K2 durumunda çekilen ortalama korozyon akımı S/N grafiği

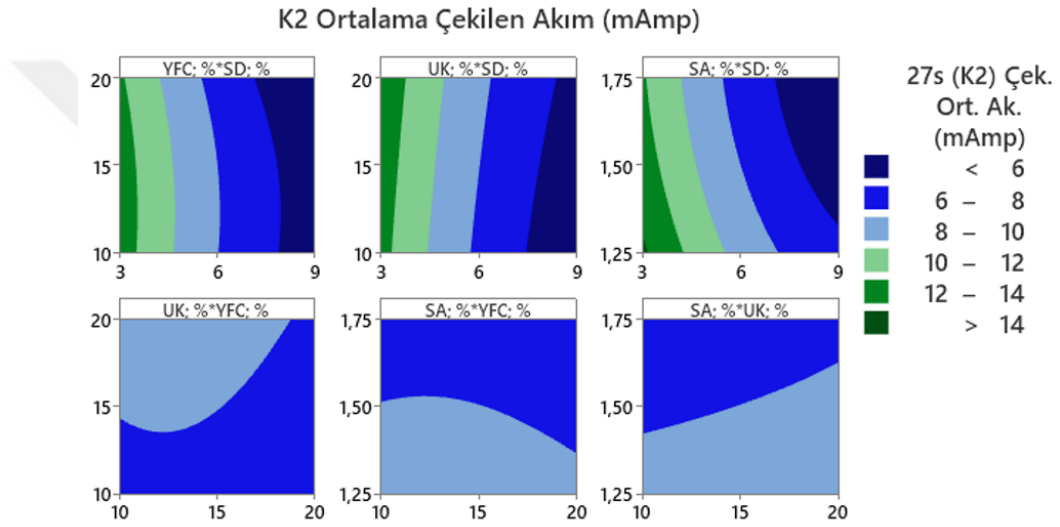
Tablo 5.35. K2 durumunda çekilen ortalama korozyon akımı S/N oran tablosu

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	-22.56	-18.68	-17.57	-19.63
2	-17.98	-18.05	-18.27	-18.03
3	-14.09	-17.90	-18.79	-16.96
Delta	8.47	0.78	1.22	2.67
Sıralama	1	4	3	2

Tablo 5.36. K2 durumunda çekilen ortalama korozyon akımı varyans analizi

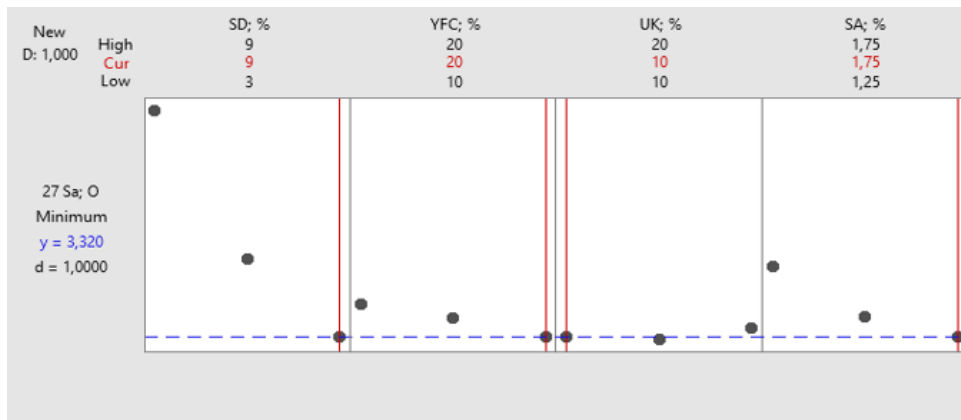
Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	107.724	88.41%	107.724	53.8622	*	*
YFC(%)	2	1.024	0.84%	1.024	0.5119	*	*
UK(%)	2	2.264	1.86%	2.264	1.1321	*	*
SA(%)	2	10.832	8.89%	10.832	5.4158	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	121.844	100.00%				

Şekil 5.55'e göre SD/YFC nin K2 durumunda ortalama çekilen korozyon akımına parametrik etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %9YFC için optimum seviyenin %20 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. SD, K2 durumu ortalama çekilen korozyon akımında en etkili parametre olmuştur. YFC açısından ise en uygun seviye YFC'nin 3. seviyesi olan %20 ikame oranıdır. Kontur grafiklerine göre UK için, optimum seviye %10 ikame oranı olarak belirlenmiştir. Akım çekme miktarları, puzolanların boşluk doldurma özellikleri ve mikro yapıda yaptıkları iyileştirme ile yakından ilişkilidir. Kontur grafiklerine göre süper akışkanlaştırıcı için optimum parametre seviyesi %1.75 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.55. YTM'ye göre elde edilmiş kontur grafikleri

Taguchi yöntemi kullanılarak K2 durumunda optimum seviyelerde tahmin edilen çekilecek akım değeri Şekil 5.56'da 3.32 mAh olarak verilmiştir.

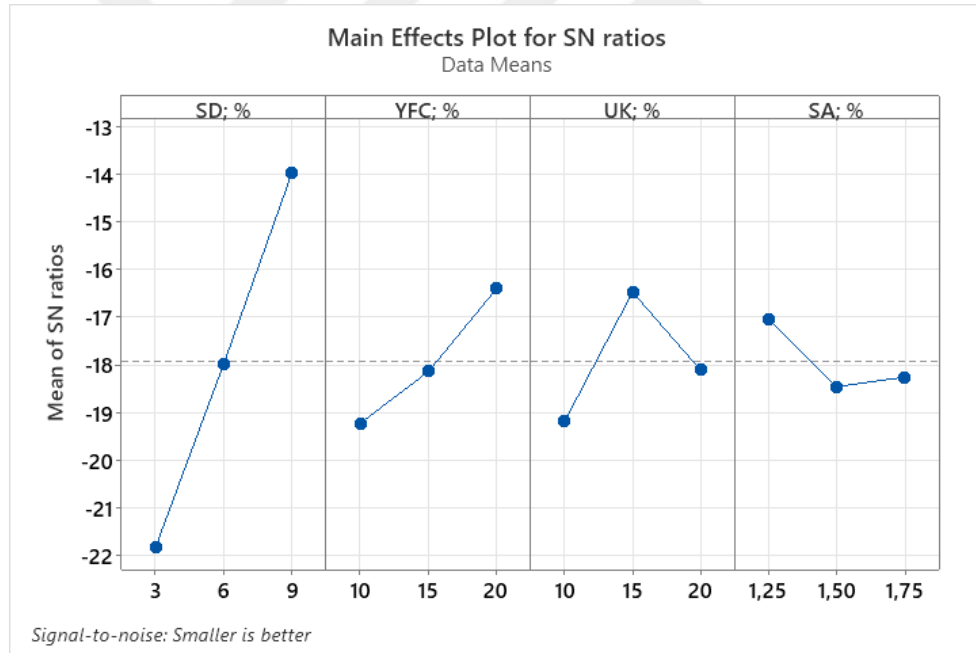


Şekil 5.56. K2 durumunda Taguchi analizi sonuçlarına göre optimum tasarım için tahmini çekilen akım

Buna göre optimum seviyeler olan SD %9, YFC %20, UK %10 ve SA %1.75 seviyelerinde yapılan doğrulama deneyinde beton numunesinin çektiği akım değeri 6.60 mAh olarak bulunmuştur. Burada yöntem tarafından tahmin edilen değerle doğrulama deneyi sonucu elde edilen değer arasında rölatif hata yüksek çıkmıştır. Ancak; K2 durumu doğrulama deneyi sonucu bulunan bu değer, Tablo 4.14'te verilen L9 ortogonal dizi serilerinden en az akım çeken M9 serisine (5.80 mAh) yakın bir değerdir. Doğrulama deneyinden elde edilen sonucun referans betondan çok daha az akım çektiği düşünüldüğünde bulunan bu sonuç makul olarak değerlendirilmiştir.

5.7.2. K4 durumunda çekilen korozyon akımı sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi

K4 durumunda çekilen korozyon akımı deney sonuçlarının Taguchi analizleri Şekil 5.57 ve Tablo 5.37-5.38'de verilmiştir.



Şekil 5.57. K4 durumunda çekilen ortalama korozyon akımı S/N grafiği

Tablo 5.37. K4 durumunda çekilen ortalama korozyon akımı S/N oran tablosu

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	-21.83	-19.23	-19.18	-17.04
2	-17.97	-18.14	-16.47	-18.46
3	-13.96	-16.39	-18.11	-18.26
Delta	7.87	2.83	2.71	1.41
Sıralama	1	2	3	4

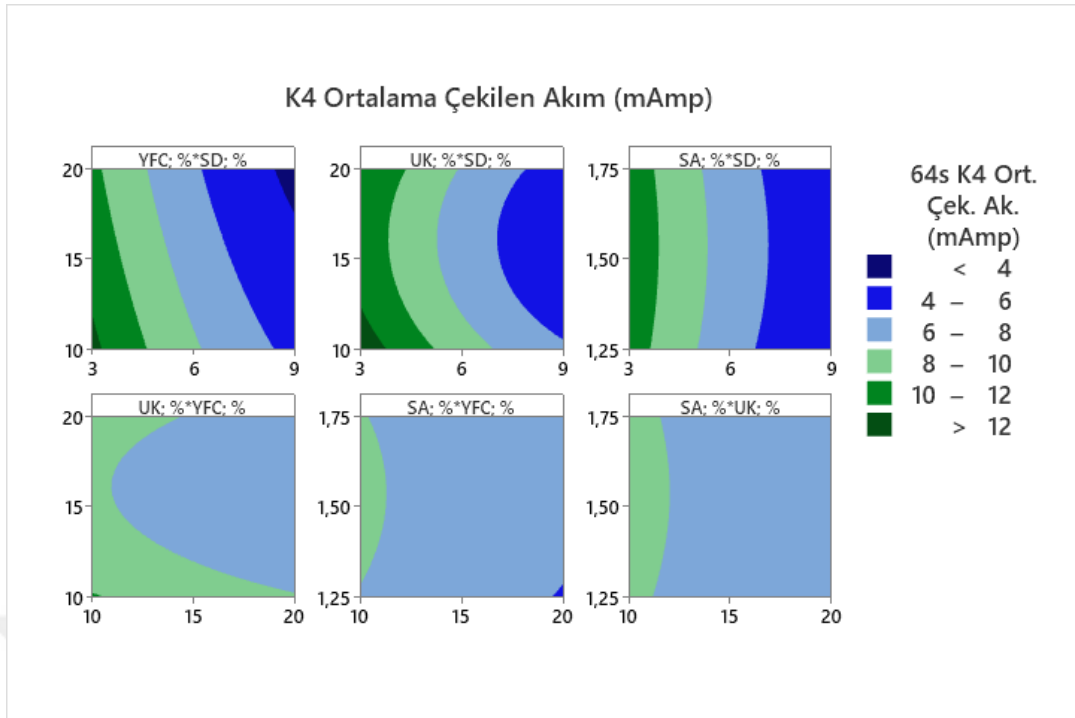
Tablo 5.38. K4 durumunda çekilen ortalama korozyon akımı varyans analizi

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	93.000	77.52%	93.000	46.500	*	*
YFC(%)	2	12.268	10.23%	12.268	6.134	*	*
UK(%)	2	11.180	9.32%	11.180	5.590	*	*
SA(%)	2	3.519	2.93%	3.519	1.760	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	119.968	100.00%				

Hızlandırılmış korozyon deney sonuçlarına göre, K4 durumu için serilerin çektiği ortalama korozyon akımları istatistik açıdan Şekil 5.57’de verilen ortalama S/N grafiğine göre değerlendirildiğinde; en etkili parametrenin K2 durumunda olduğu gibi silis dumanı, optimum seviyesinin de %9 olduğu tespit edilmiştir. Silis dumanı, kullanılan bağlayıcılar içerisinde en küçük tanecik yapısına sahip puzolan olduğundan boşluk yapılarını doldurarak Cl⁻ iyonlarının donatıya nüfuzunu engellemede önemli oranda katkı sağlamıştır. YFC ve UK nın ortalama çekilen akım miktarına katkı yüzdeleri yakın değerler almıştır. YFC ve UK için optimum parametre seviyeleri sırasıyla %20 ve %15 olarak tespit edilmiştir. SA etki yüzdesi yaklaşık %3 olurken optimum parametre seviyesi % 1.25 olarak belirlenmiştir.

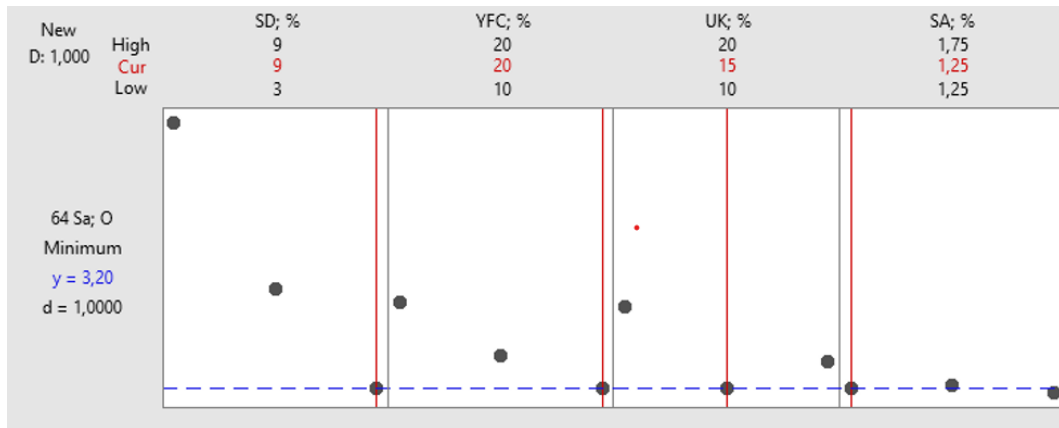
Şekil 5.58’de verilen kontur grafiklerine göre parametrelerin K4 durumunda ortalama korozyon akımına etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %9YFC için optimum seviyenin %20 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. SD, K4 durumda da ortalama çekilen korozyon akımında en etkili parametre olmuştur. UK nın için, optimum seviye tepki yüzey grafiklerinden anlaşıldığı gibi %15 ikame oranı olarak belirlenmiştir. Akım çekme miktarları, puzolanların boşluk doldurma özellikleri ve mikro yapıda yaptıkları iyileştirme ile yakından ilişkilidir. Süper akışkanlaştırıcı için optimum parametre seviyesi %1.25 olarak belirlenmiştir.

Buna göre SD %9, YFC %20 UK %15 ve SA %1.25 seviyelerinde yapılan doğrulama deneyinde beton numunesinin çektiği ortalama akım değeri 5.96 mAh olarak bulunmuştur. Burada yöntem tarafından tahmin edilen değerle doğrulama deneyi sonucu elde edilen değer arasında rölatif hata yüksek olmuştur. Ancak; doğrulama deneyleri sonucu bulunan bu değer Tablo 4.15’te verilen L9 ortogonal dizi serilerinden en az akım çeken M9 serisine (3.16 mAh) yakın bir değerdir. Doğrulama deneyinden elde edilen sonucun referans betondan çok daha az akım çektiği düşünüldüğünde bulunan bu sonuç makul olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.58. K4 durumunda çekilen ortalama korozyon akımı tepki yüzey ilişki grafikleri

K4 durumunda Taguchi yöntemi kullanılarak optimum seviyelerde tahmin edilen çekilen ortalama akım değeri Şekil 5.59’da 3.20 mAmp olarak verilmiştir.



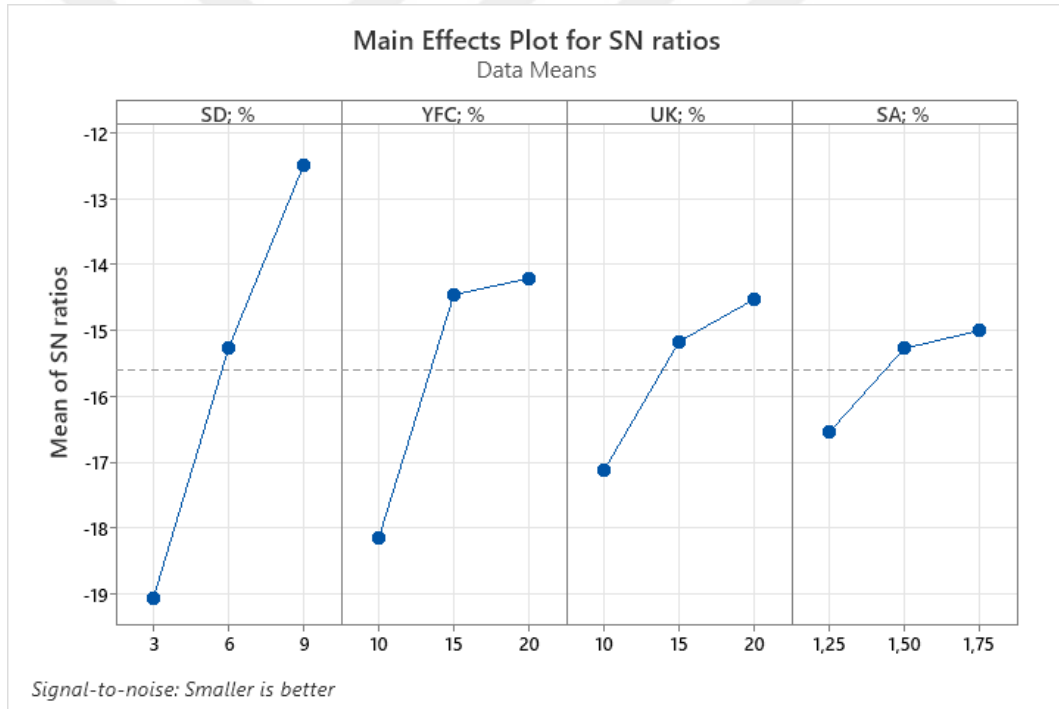
Şekil 5.59. K4 durumunda Taguchi analizi sonuçlarına göre optimum tasarım için tahmini çekilen akım

5.7.3. K6 durumunda çekilen korozyon akımı sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi

K6 durumunda çekilen korozyon akımı deney sonuçlarının Taguchi analizleri Şekil 5.60 ve Tablo 5.39-5.40’ta verilmiştir.

Hızlandırılmış korozyon deney sonuçlarına göre K6 durumu için serilerin çektiği ortalama korozyon akımları istatistik açıdan Şekil 5.60’ta verilen ortalama S/N grafiğine

göre değerlendirildiğinde; en etkili parametre K2 ve K4 durumunda olduğu gibi SD iken, parametrenin optimum seviyesi %9 olarak tespit edilmiştir. SD, kullanılan bağlayıcılar içerisinde en küçük tanecik yapısına sahip puzolan olduğundan beton içindeki boşluk yapılarını doldurduğundan Cl⁻ iyonlarının donatıya ulaşmasını engellemede önemli oranda katkı sağlamıştır. YFC ikinci en etkili parametre olurken optimum parametre seviyesi %20 olarak belirlenmiştir. UK için optimum parametre seviyesi %20 olarak belirlenmiştir. SA etki yüzdesi yaklaşık %4 olurken optimum parametre seviyesi % 1.75 olarak belirlenmiştir. Buna göre en uzun korozyon akımına maruziyet süresi olan K6 durumunda; istatistik analiz sonuçlarına göre deneylerde kullanılan puzolanların son seviyeleri (en yüksek ikame oranı) optimum parametre seviyeleri olarak belirlenmiştir. Bu durum, uzun süreli korozyon maruziyetinde puzolan kullanımının korozyon direncine olan katkısının göstergesi olarak değerlendirilebilir.



Şekil 5.60. K6 durumunda çekilen ortalama korozyon akımı S/N grafiği

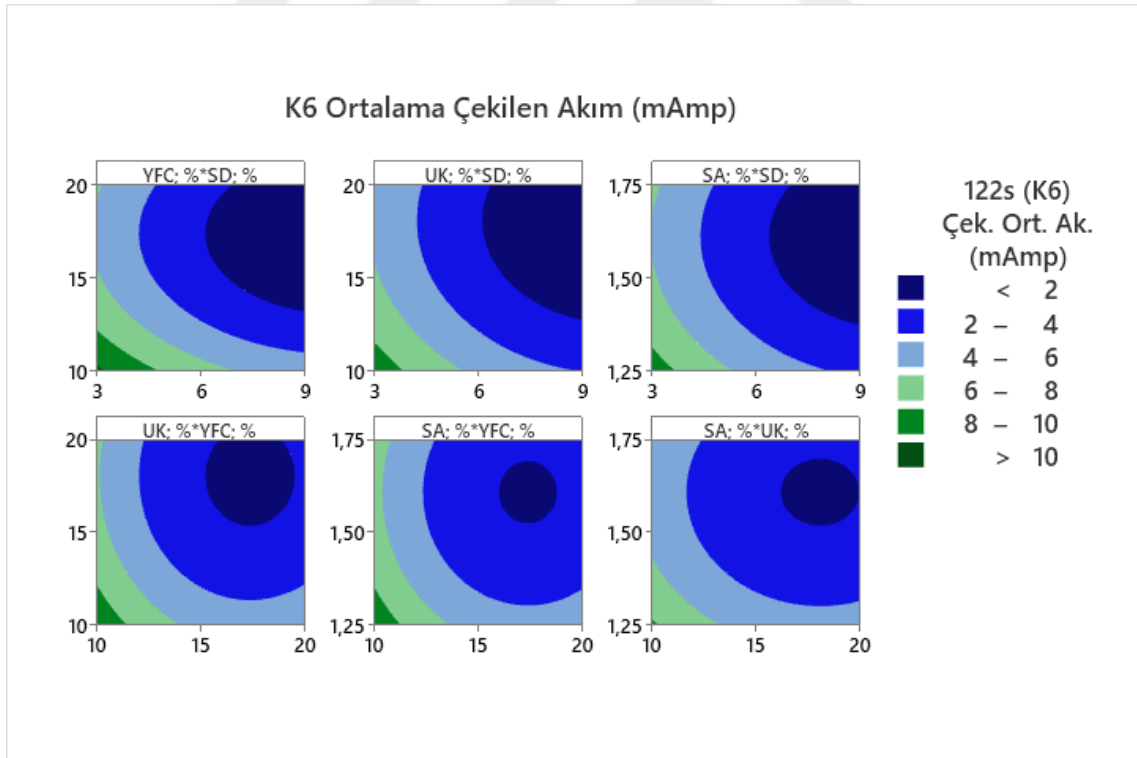
Tablo 5.39. K6 durumunda çekilen ortalama korozyon akımı S/N oran tablosu

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	-19.07	-18.16	-17.13	-16.55
2	-15.27	-14.46	-15.17	-15.28
3	-12.49	-14.21	-14.53	-15.01
Delta	6.58	3.95	2.60	1.55
Sıralama	1	2	3	4

Tablo 5.40. K6 durumunda çekilen ortalama korozyon akımı varyans analizi

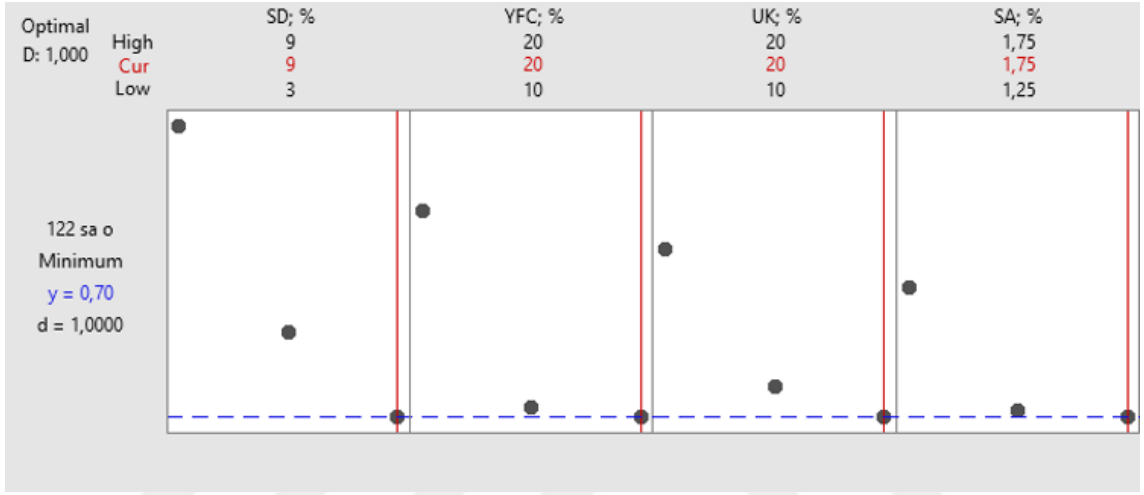
Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	65.465	59.56%	65.465	32.732	*	*
YFC(%)	2	29.348	26.70%	29.348	14.674	*	*
UK(%)	2	11.014	10.02%	11.014	5.507	*	*
SA(%)	2	4.092	3.72%	4.092	2.046	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	109.919	100.00%				

Şekil 5.61'e göre parametrelerin K6 durumunda ortalama korozyon akımına etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %9, YFC için optimum seviyenin %20 ikame oranı olduğu yüzey grafiklerinden anlaşılmaktadır. SD seviye değişim oranı, K6 durumda da ortalama çekilen korozyon akımında en etkili parametre olmuştur. UK için, optimum seviye tepki yüzey grafiklerinden anlaşıldığı gibi %20 ikame oranı olarak belirlenmiştir. Akım çekme miktarları, puzolanların boşluk doldurma özellikleri ve mikro yapıda yaptıkları iyileştirme ile yakından ilişkilidir. SA için optimum parametre seviyesi %1.75 olarak belirlenmiştir.

**Şekil 5.61.** K6 durumunda çekilen ortalama korozyon akımı tepki yüzey ilişki grafikleri

K6 durumunda Taguchi yöntemi kullanılarak optimum seviyelerde tahmin edilen çekilecek ortalama akım değeri Şekil 5.62'de 0.70 mA olarak verilmiştir. Buna göre SD

%9, YFC %20 UK %20 ve SA %1.75 seviyelerinde yapılan doğrulama deneyinde beton numunesinin çektiği ortalama akım değeri 4.86 mAh olarak bulunmuştur. Burada yöntem tarafından tahmin edilen değerle doğrulama deneyi sonucu elde edilen değer arasında rölatif hata yüksek çıkmıştır. Ancak; doğrulama deneyleri sonucu bulunan bu değer Tablo 4.16'da verilen L9 ortogonal dizi serilerinden en az akım çeken M9 serisine (3.80 mAh) yakın bir değerdir. Doğrulama deneyinden elde edilen sonucun referans betondan çok daha az akım çektiği düşünüldüğünde bulunan bu sonuç makul olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.62. Taguchi analizi sonuçlarına göre K6 durumunda optimum tasarım için tahmini çekilen akım

5.8. Pullout Testi

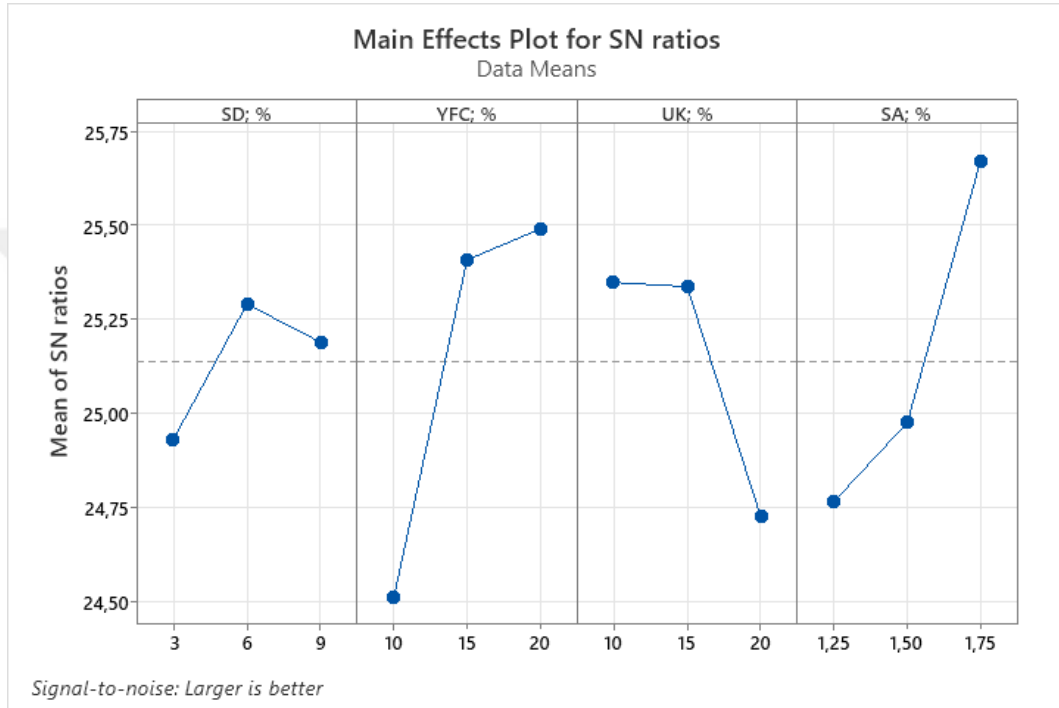
Pullout testi istatistik analizleri, K0, K2, K4 ve K6 durumları için L9 ortogonal dizi serilerinin 2 tekrarlı numunelerinin deney sonucu ortalamalarına uygulanmıştır. Parametrelerin maksimum bağ dayanımına ve tüketilen toplam enerjiye olan istatistik değerlendirmesi bu bölümde verilmiştir.

5.8.1. Maksimum aderans gerilmesi (τ_u) deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi

Korozyona uğratılmamış ve farklı sürelerde hızlandırılmış korozyon deneyi uygulanan numunelerde, puzolan kullanımının ve korozyonun bağ dayanımına etkisini araştırmak amacıyla çekip çıkarma (pullout) deneyleri yapılmıştır. İstatistik analizlerde hedef performans kriteri olarak en büyük-en iyi kullanılmıştır. Buna göre korozyonsuz ve farklı korozyon durumları için elde edilen sonuçlar bu bölümde verilmiştir.

5.8.1.1. K0 durumunda aderans gerilmesi (τ) deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi

Hızlandırılmış korozyon deneyinin uygulanmadığı (K0) durumda içerisinde farklı oranda puzolanların bulunduğu seriler için (L9 ortogonal dizi) elde edilen deney verilerine uygulanan istatistik analiz sonuçları Şekil 5.63 ve Tablo 5.41-Tablo 5.42’de verilmiştir.



Şekil 5.63. K0 durumunda maksimum aderans gerilmesi (τ) ortalama S/N grafiği

K0 durumunda maksimum aderans gerilmesi (τ) sonuçları açısından Taguchi istatistiksel analizleri Şekil 5.63’te verilen ortalama S/N grafiğine göre değerlendirildiğinde; SD %6, YFC için %20, UK için %10 ve SA için de %1.75 seviyesinin optimum seviye olduğu belirlenmiştir. K0 durumunda τ sonuçlarına göre en etkili parametreler sırasıyla YFC, SA, UK ve SD olmuştur.

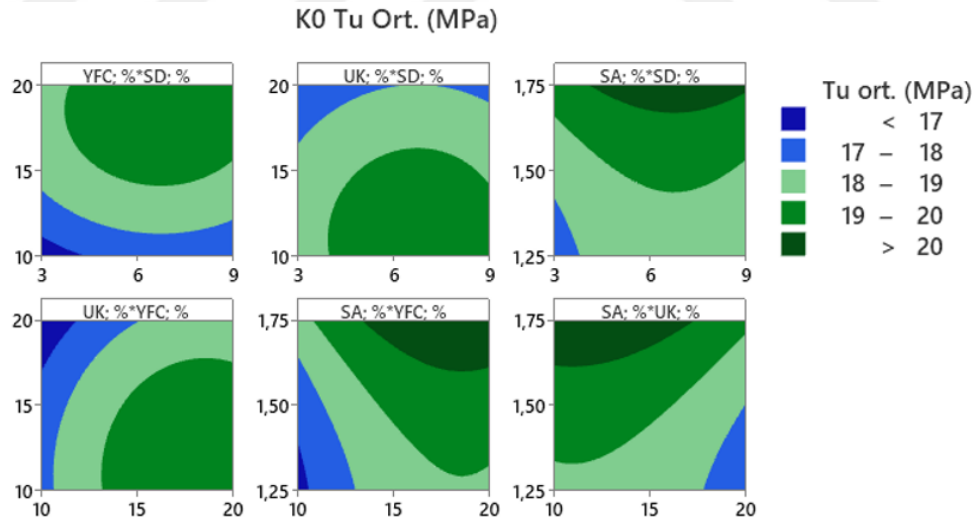
Tablo 5.41. K0 durumunda maksimum aderans gerilmesi (τ) S/N oran tablosu

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	24.93	24.51	25.35	24.77
2	25.29	25.41	25.34	24.98
3	25.19	25.49	24.72	25.67
Delta	0.36	0.98	0.62	0.90
Sıralama	4	1	3	2

Tablo 5.42. K0 durumunda maksimum aderans gerilmesi (τ) varyans analizi tablosu

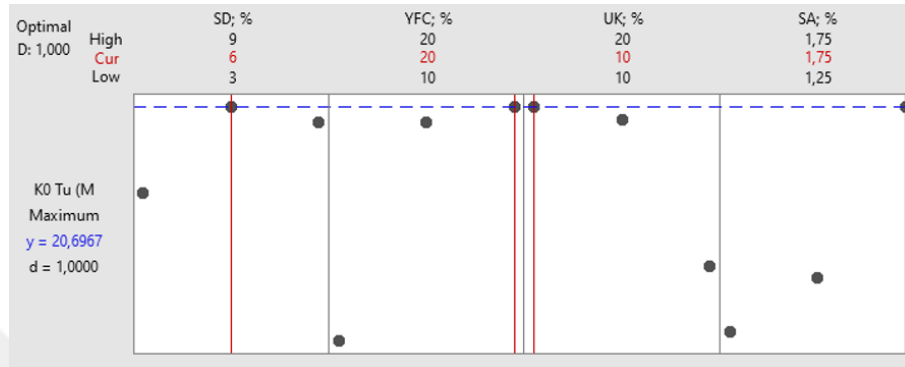
Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	0.2069	5.07%	0.2069	0.1034	*	*
YFC(%)	2	1.7691	43.33%	1.7691	0.8845	*	*
UK(%)	2	0.7638	18.71%	0.7638	0.3819	*	*
SA(%)	2	1.3428	32.89%	1.3428	0.6714	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	4.0826	100.00%				

Şekil 5.64'e göre parametrelerin K0 durumunda maksimum aderans gerilmesine etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %6, YFC için optimum seviyenin %20 ikame oranı olduğu yüzey grafiklerinden anlaşılmaktadır. SD seviye değişim oranı, korozyonsuz durumda maksimum bağ dayanımını sınırlı etkilemiştir. K0 durumu bağ dayanımında, YFC açısından en uygun seviye YFC'nin 3. seviyesi olan %20 ikame oranı olmuştur. Bunun sebebinin YFC'nin ince taneli yapısı ve polimerizasyona sağladığı katkı olduğu düşünülmektedir. UK için, optimum seviye kontur grafiklerinden anlaşıldığı gibi %10 ikame oranı olarak belirlenmiştir. Kontur grafiklerinden anlaşılabileceği üzere uçucu külün %15 seviyesi optimum seviyesi olan %10'a yakın sonuç vermiştir. SA için optimum parametre seviyesi %1.75 olarak belirlenmiştir.

**Şekil 5.64.** K0 durumunda maksimum ortalama aderans gerilmesi (τ) kontur ilişki grafikleri

K0 durumunda Taguchi yöntemi kullanılarak optimum seviyelerde tahmin edilen maksimum aderans gerilmesi değeri Şekil 5.65'te 20.70 MPa olarak verilmiştir. Buna göre; SD %9, YFC %20 UK %10 ve SA %1.75 seviyelerinde yapılan doğrulama deneyinde lolipop numunelerden elde edilen ortalama aderans gerilmesi 18.16 MPa

olarak bulunmuştur. Burada yöntem tarafından tahmin edilen değerle doğrulama deneyi sonucu elde edilen değer arasında rölatif hata yaklaşık %14 olarak bulunmuştur. Ancak; doğrulama deneyleri sonucu bulunan bu değer Şekil 4.26'da verilen L9 ortogonal dizi serilerinden M6 ve M8 serisi hariç diğerlerine yakın bir değerdir. Referans betonla da aderans gerilmesi açısından yakın olan bu sonuç kabul edilebilir, makul bir sonuçtur.



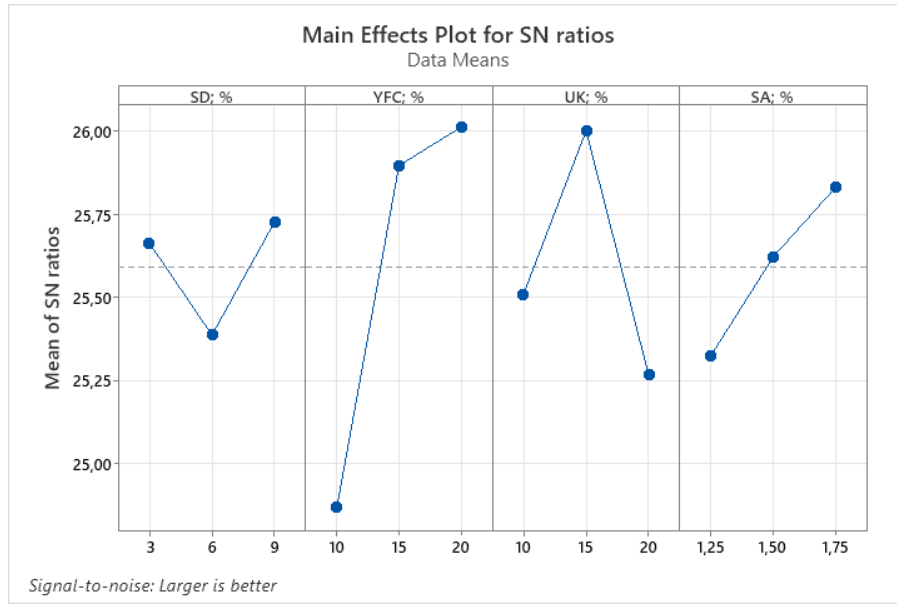
Şekil 5.65. Taguchi analizi sonuçlarına göre K0 durumunda optimum tasarım için tahmini aderans gerilmesi

5.8.1.2. K2 durumunda aderans gerilmesi (τ) deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi

K2 durumunda korozyona uğratılmış, içerisinde farklı oranda puzolanların bulunduğu seriler (L9 ortogonal dizi), üzerinde pullout deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçları ile yapılan istatistik analizlere göre elde edilen sonuçlar Şekil 5.66-5.67 ve Tablo 5.43-5.44'te verilmiştir.

K2 durumunda τ Taguchi istatistiksel analiz sonuçları Şekil 5.66'da verilen ortalama S/N grafiğine göre değerlendirildiğinde; SD için %9, YFC için %20, UK için %15 ve SA için %1.75 seviyesinin optimum seviye olduğu belirlenmiştir. K2 durumunda τ sonuçlarına göre en etkili parametreler sırasıyla YFC, UK, SA ve SD olmuştur.

Şekil 5.67'ye göre parametrelerin K2 durumunda maksimum aderans gerilmesine etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %9, YFC için optimum seviyenin %20 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. SD seviye değişim oranı, K2 durumunda maksimum bağ dayanımını sınırlı etkilemiştir. YFC açısından K2 durumunda bağ dayanımı için en uygun seviye YFC'nin 3. seviyesi olan %20 ikame oranı olmuştur. Bunun sebebinin YFC'nin ince taneli yapısı ve polimerizasyona sağladığı katkı olduğu düşünülmektedir. UK için, optimum seviye kontur grafiklerinden anlaşıldığı gibi %15 ikame oranı olarak belirlenmiştir. SA için optimum parametre seviyesi %1.75 olmuştur.



Şekil 5.66. K2 durumunda maksimum aderans gerilmesi (τ_u) S/N grafiği

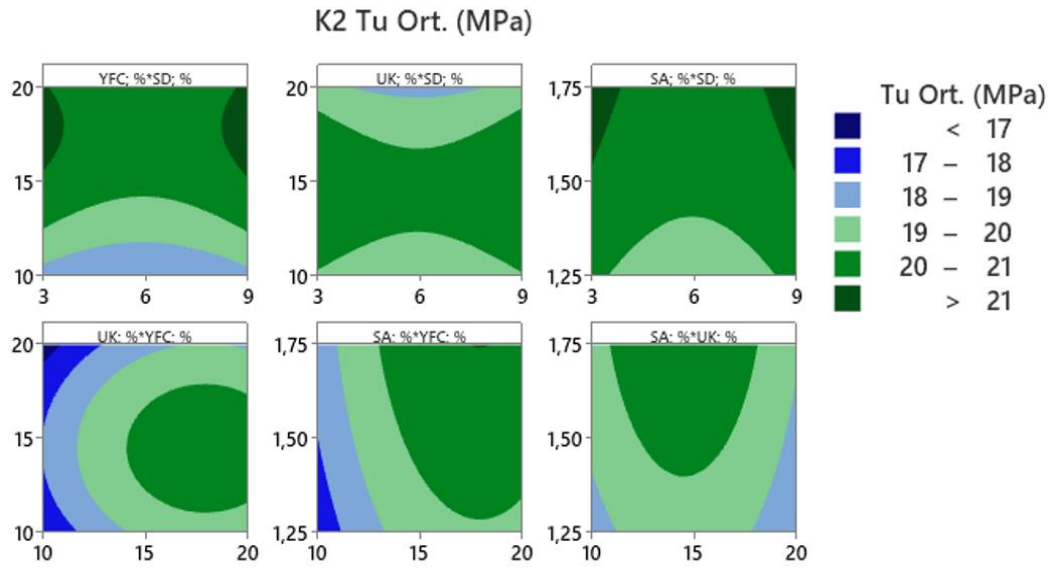
Tablo 5.43. K2 durumunda maksimum aderans gerilmesi (τ_u) S/N oran tablosu

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	25.66	24.87	25.51	25.32
2	25.39	25.90	26.00	25.62
3	25.73	26.01	25.26	25.83
Delta	0.34	1.15	0.74	0.51
Sıralama	4	1	2	3

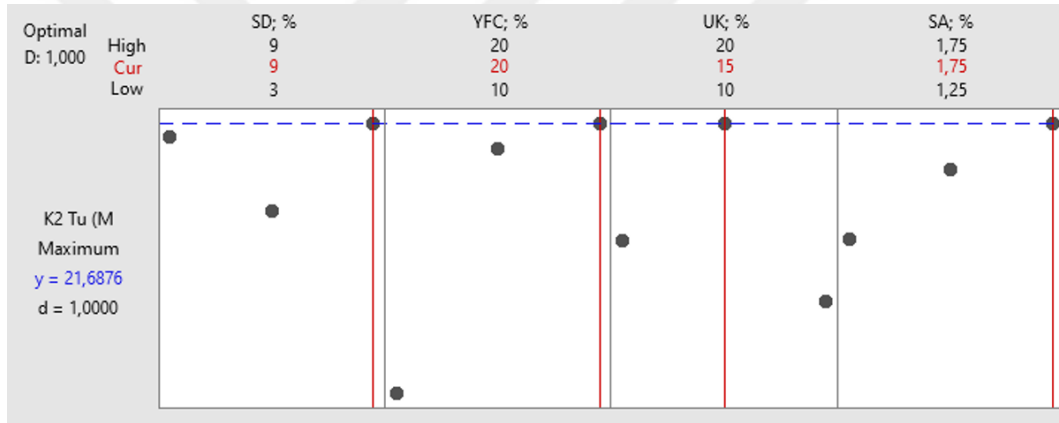
Tablo 5.44. K2 durumunda maksimum aderans gerilmesi (τ_u) varyans analizi tablosu

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	0.1969	5.16%	0.1969	0.09845	*	*
YFC(%)	2	2.3882	62.57%	2.3882	1.19408	*	*
UK(%)	2	0.8441	22.12%	0.8441	0.42203	*	*
SA(%)	2	0.3875	10.15%	0.3875	0.19375	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	3.8166	100.00%				

K2 durumunda Taguchi yöntemi kullanılarak optimum seviyelerde tahmin edilen maksimum aderans gerilmesi değeri Şekil 5.68’de 21.69 MPa olarak verilmiştir. Buna göre; SD %9, YFC %20 UK %15 ve SA %1.75 seviyelerinde yapılan doğrulama deneyinde loliop numunelerden elde edilen ortalama aderans gerilmesi 19.86 MPa olarak bulunmuştur. Burada yöntem tarafından tahmin edilen değerle doğrulama deneyi sonucu elde edilen değer arasında rölatif hata yaklaşık %9 olmuştur. Doğrulama deneyinden elde edilen bu sonuç, Şekil 4.26’da verilen L9 ortogonal dizi serilerinin geneline yakın bir değerdir. Referans betonun üzerinde olan bu sonuç kabul edilebilir, makul bir sonuçtur.



Şekil 5.67. K2 durumunda maksimum ortalama aderans gerilmesi (τ) kontur ilişki grafikleri

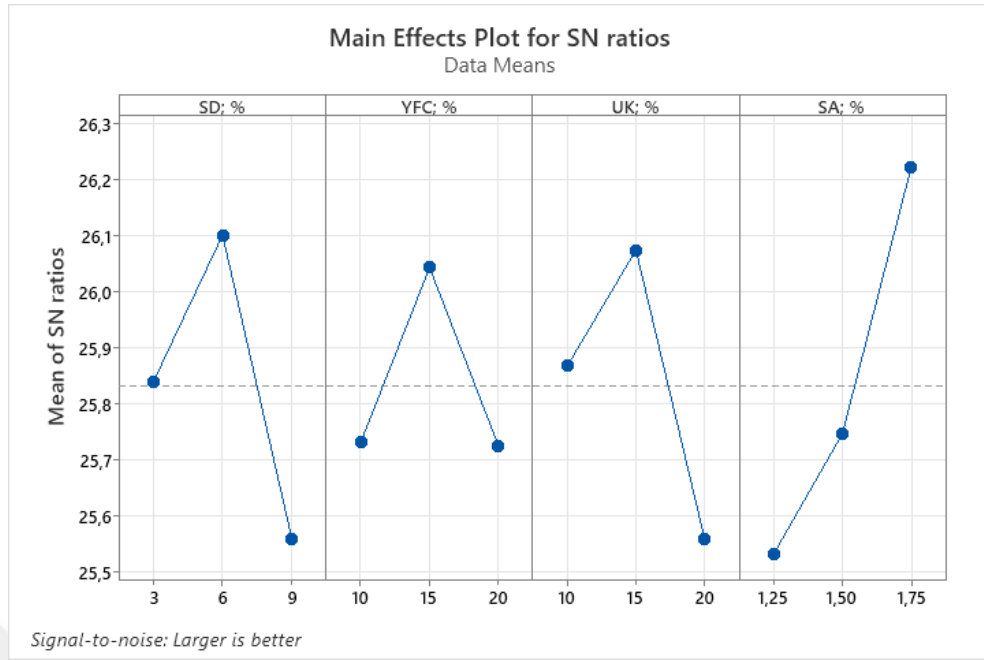


Şekil 5.68. Taguchi analizi sonuçlarına göre K2 durumunda optimum tasarım için tahmini aderans gerilmesi

5.8.1.3. K4 durumunda aderans gerilmesi (τ) deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi

K4 durumunda korozyona uğratılmış, içerisinde farklı oranda puzolanların bulunduğu seriler (L9 ortogonal dizi), üzerinde pullout deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçları ile yapılan istatistik analizlere göre elde edilen sonuçlar Şekil 5.69-5.70 ve Tablo 5.45-5.46'da verilmiştir.

K4 durumunda τ sonuçları Taguchi istatistiksel analiz sonuçları Şekil 5.69'da verilen ortalama S/N grafiğine göre değerlendirildiğinde; SD için %6, YFC için %15, uçucu kül için %15 ve SA için de %1.75 seviyesinin optimum seviye olduğu belirlenmiştir. K4 durumunda τ sonuçlarına göre en etkili parametreler sırasıyla SA, SD, UK ve YFC olmuştur.



Şekil 5.69. K4 durumunda maksimum aderans gerilmesi (τ) ortalama S/N grafiği

Tablo 5.45. K4 durumunda maksimum aderans gerilmesi (τ) S/N oran tablosu

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	25.84	25.73	25.87	25.53
2	26.10	26.04	26.07	25.75
3	25.56	25.72	25.56	26.22
Delta	0.54	0.32	0.52	0.69
Sıralama	2	4	3	1

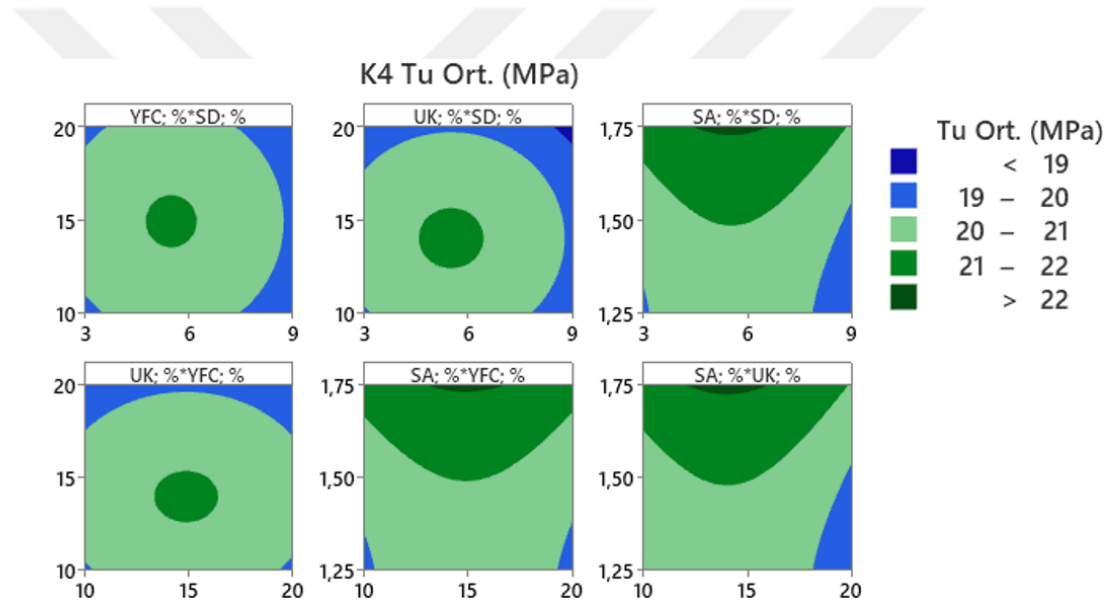
Tablo 5.46. K4 durumunda maksimum aderans gerilmesi (τ) varyans analizi tablosu

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	0.4389	24.58%	0.4389	0.21946	*	*
YFC(%)	2	0.1978	11.07%	0.1978	0.09888	*	*
UK(%)	2	0.4038	22.61%	0.4038	0.20191	*	*
SA(%)	2	0.7454	41.74%	0.7454	0.37271	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	1.7859	100.00%				

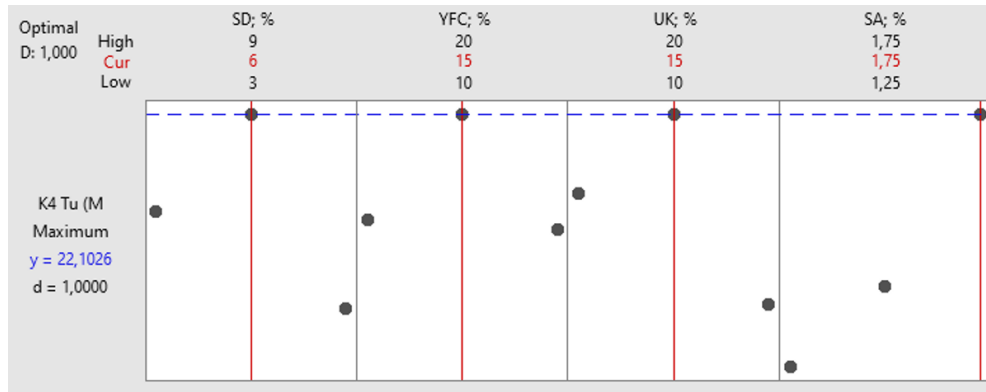
Şekil 5.70'e göre parametrelerin K4 durumunda maksimum aderans gerilmesine etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %6, YFC için optimum seviyenin %15 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. K4 durumu bağ dayanımında YFC açısından en uygun seviye YFC'nin 2. seviyesi olan %15 ikame oranı olmuştur. Buna sebep olarak YFC'nin ince taneli yapısı ve polimerizasyona sağlamış olduğu katkı düşünülebilir. UK için, optimum seviye tepki yüzey grafiklerinden anlaşıldığı gibi %15 ikame oranı olarak belirlenmiştir. UK'nın parametrik değişimi K4 durumunda aderans

dayanımı için en etkili parametre olmuştur. SA için optimum parametre seviyesi %1.75 olarak belirlenmiştir.

K4 durumunda Taguchi yöntemi kullanılarak optimum seviyelerde tahmin edilen maksimum aderans gerilmesi değeri Şekil 5.71’de 22.10 MPa olarak verilmiştir. Buna göre; SD %6, YFC %15 UK %15 ve SA %1.75 seviyelerinde yapılan doğrulama deneyinde lolipop numunelerden elde edilen ortalama aderans gerilmesi 19.69 MPa olarak bulunmuştur. Burada yöntem tarafından tahmin edilen değerle doğrulama deneyi sonucu elde edilen değer arasında rölatif hata yaklaşık %12 çıkmıştır. Doğrulama deneyinden elde edilen bu sonuç, Şekil 4.27’de verilen L9 ortogonal dizi serilerine yakın bir değerdir. Referans betonun üzerinde olan bu sonuç kabul edilebilir, makul bir sonuçtur.



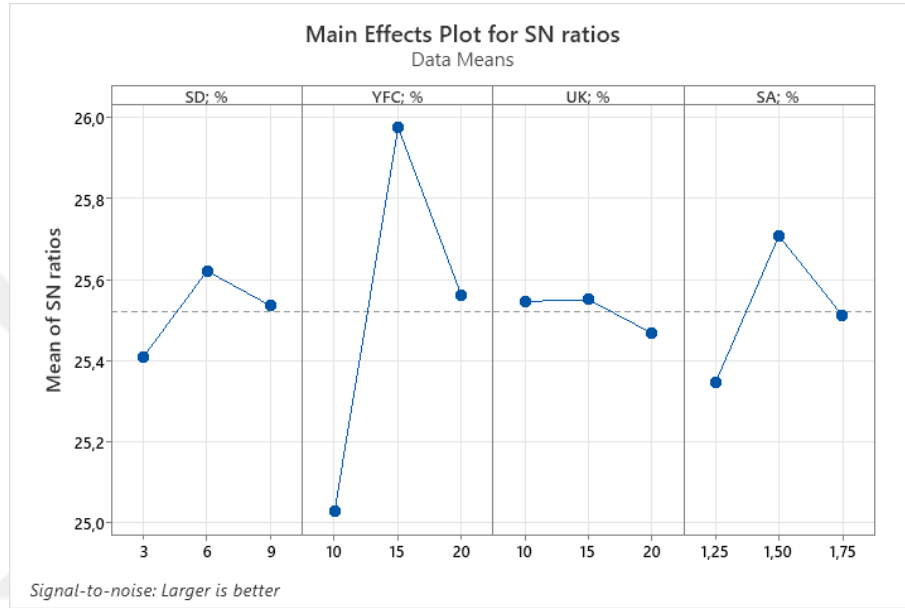
Şekil 5.70. K4 durumunda maksimum ortalama aderans gerilmesi (τ_u) kontur ilişki grafikleri



Şekil 5.71. Taguchi analizi sonuçlarına göre K4 durumunda optimum tasarım için tahmini aderans gerilmesi

5.8.1.4. K6 durumunda aderans gerilmesi (τ) deney sonuçlarının istatistik açıdan değerlendirilmesi

K6 durumunda korozyona uğratılmış, içerisinde farklı oranda puzolanların bulunduğu seriler (L9 ortogonal dizi), üzerinde pullout deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçları ile yapılan istatistik analizlere göre elde edilen sonuçlar Şekil 5.72-5.73 ve Tablo 5.47-5.48’de verilmiştir.



Şekil 5.72. K6 durumunda maksimum aderans gerilmesi (τ) S/N grafiği

Tablo 5.47. K6 durumunda maksimum aderans gerilmesi (τ) S/N oran tablosu

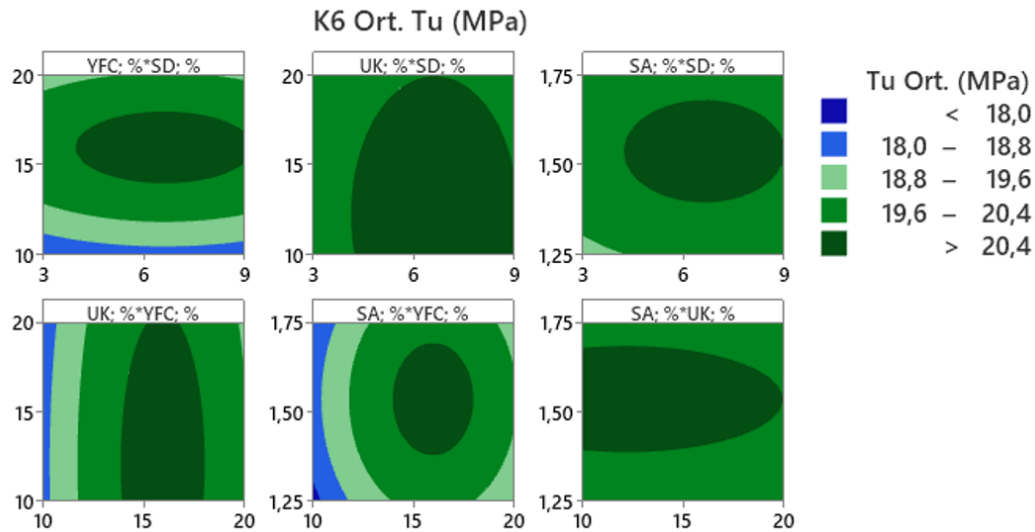
Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	25.41	25.03	25.55	25.34
2	25.62	25.98	25.55	25.71
3	25.53	25.56	25.47	25.51
Delta	0.21	0.95	0.08	0.36
Sıralama	3	1	4	2

Tablo 5.48. K6 durumunda maksimum aderans gerilmesi (τ) varyans analizi tablosu

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	0.06885	4.21%	0.06885	0.034427	*	*
YFC(%)	2	1.35524	82.87%	1.35524	0.677620	*	*
UK(%)	2	0.01311	0.80%	0.01311	0.006556	*	*
SA(%)	2	0.19822	12.12%	0.19822	0.099112	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	1.63543	100.00%				

K6 durumunda τ_u sonuçları açısından Taguchi istatistiksel analizleri Şekil 5.72’de verilen ortalama S/N grafiğine göre değerlendirildiğinde; SD için %6, YFC için %15, UK için %15 ve SA için de %1.5 seviyesinin optimum seviye olduğu belirlenmiştir. K6 durumunda τ_u sonuçlarına göre en etkili parametreler sırasıyla YFC, SA, SD ve UK olmuştur.

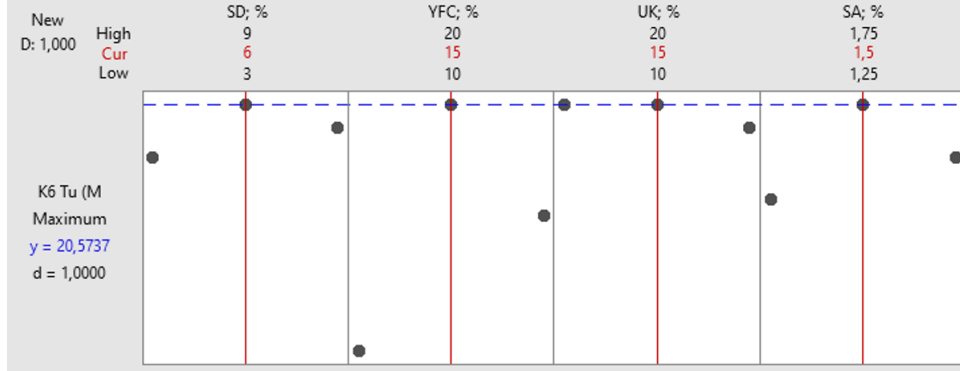
Şekil 5.73’ e göre parametrelerin K6 durumunda maksimum aderans gerilmesine etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %6, YFC için optimum seviyenin %15 ikame oranı olduğu yüzey grafiklerinden anlaşılmaktadır. YFC’nin ikame oranındaki değişim K6 durumu bağ dayanımında çok etkili olmuştur. SD ve UK nın seviye değişim oranı, K6 durumunda maksimum bağ dayanımını sınırlı etkilemiştir. UK için, optimum seviye kontur grafiklerinden anlaşıldığı gibi %15 olmuştur. SA için optimum parametre seviyesi %1.5 olarak belirlenmiştir. K6 durumunda Taguchi yöntemi kullanılarak optimum seviyelerde tahmin edilen maksimum aderans gerilmesi değeri Şekil 5.74’te 20.57 MPa olarak verilmiştir.



Şekil 5.73. K6 durumunda maksimum ortalama aderans gerilmesi (τ_u) tepki yüzey ilişki grafikleri

Buna göre; SD %6, YFC %15 UK %15 ve SA %1.5 seviyelerinde yapılan doğrulama deneyinde lolipop numunelerden elde edilen ortalama aderans gerilmesi 19.33 MPa olarak bulunmuştur (Şekil 5.74). Burada yöntem tarafından tahmin edilen değerle doğrulama deneyi sonucu elde edilen değer arasında rölatif hata yaklaşık %6 olmuştur. Doğrulama deneyinden elde edilen bu sonuç, Şekil 4.27’de verilen L9 ortogonal dizi

serilerine yakın bir değerdir. Referans betonun yaklaşık %18 üzerinde olan bu sonuç kabul edilebilir, makul bir değerdir.



Şekil 5.74. Taguchi analizi sonuçlarına göre K6 durumunda optimum tasarım için tahmini aderans gerilmesi

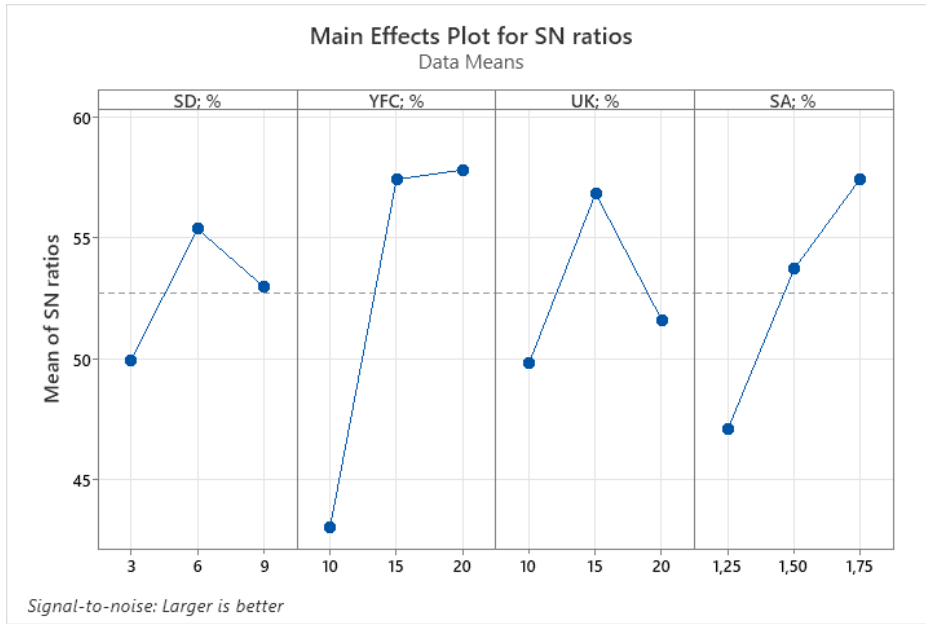
5.8.2. Toplam tüketilen enerji (TTE)

Hızlandırılmış korozyon deneyi uygulanan numuneler ve korozyonsuz numuneler, puzolan kullanımının ve korozyonun tüketilen enerjiye etkisini araştırmak amacıyla çekip çıkarma (pullout) deneyine tabi tutulmuştur. İstatistik analizlerde hedef performans kriteri olarak en büyük-en iyi kullanılmıştır. Buna göre korozyonsuz ve farklı korozyon durumları için elde edilen istatistik sonuçlar bu bölümde verilmiştir.

5.8.2.1. K0 durumunda toplam tüketilen enerjilerin istatistik açıdan değerlendirilmesi

Korozyona uğramamış, içerisinde farklı oranda puzolanların bulunduğu seriler (L9 ortogonal dizi), üzerinde pullout deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçları ile yapılan istatistik analizlere göre elde edilen sonuçlar Şekil 5.75-5.76 ve Tablo 5.49-5.50’de verilmiştir

K0 durumunda TTE sonuçları açısından Taguchi istatistiksel analizleri Şekil 5.72’de verilen S/N grafiğine göre değerlendirildiğinde; SD için %6, YFC için %20, UK için %15 ve SA için de %1.75 seviyesinin optimum seviye olduğu belirlenmiştir. K0 durumunda TTE sonuçlarına göre en etkili parametreler sırasıyla YFC, SA, UK ve SD olmuştur.



Şekil 5.75. K0 durumunda ortalama TTE S/N grafiği

Tablo 5.49. K0 durumunda ortalama TTE S/N oran tablosu

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	49.89	43.00	49.82	47.09
2	55.36	57.40	56.83	53.69
3	52.96	57.80	51.56	57.42
Delta	5.47	14.80	7.01	10.33
Sıralama	4	1	3	2

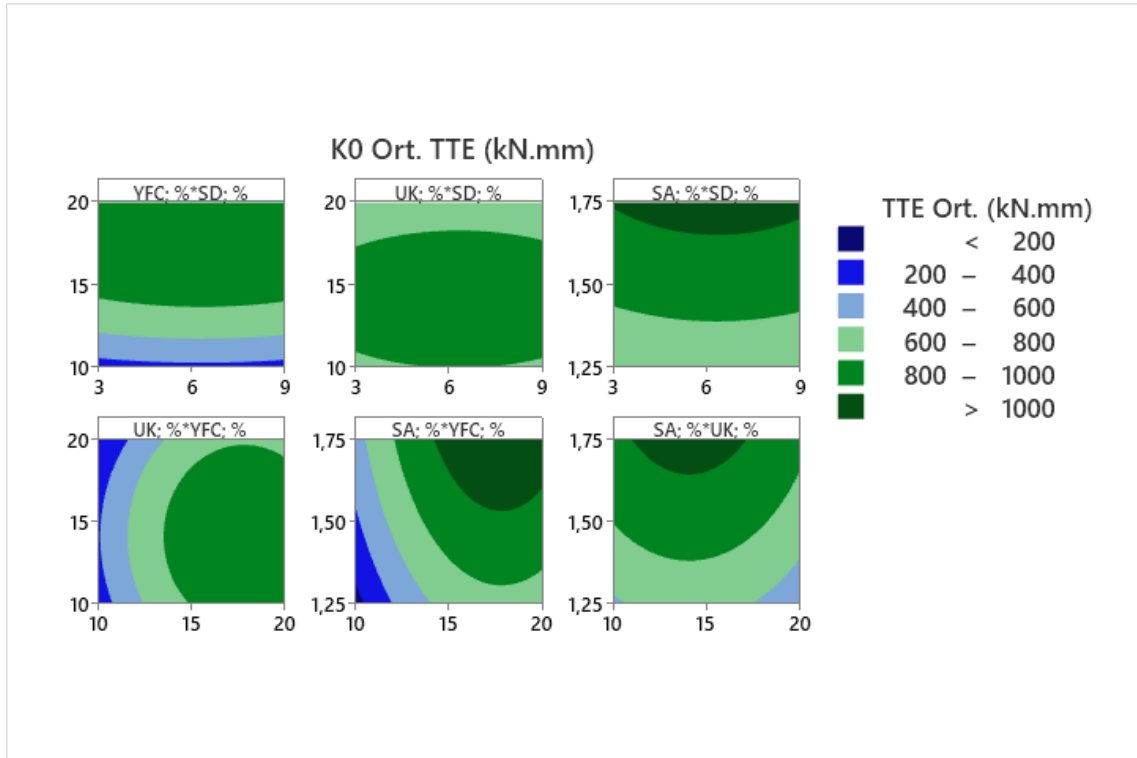
Tablo 5.50. K0 durumunda ortalama TTE varyans analizi tablosu

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	45.06	6.30%	45.06	22.53	*	*
YFC(%)	2	426.63	59.61%	426.63	213.31	*	*
UK(%)	2	79.90	11.16%	79.90	39.95	*	*
SA(%)	2	164.09	22.93%	164.09	82.04	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	715.67	100.00%				

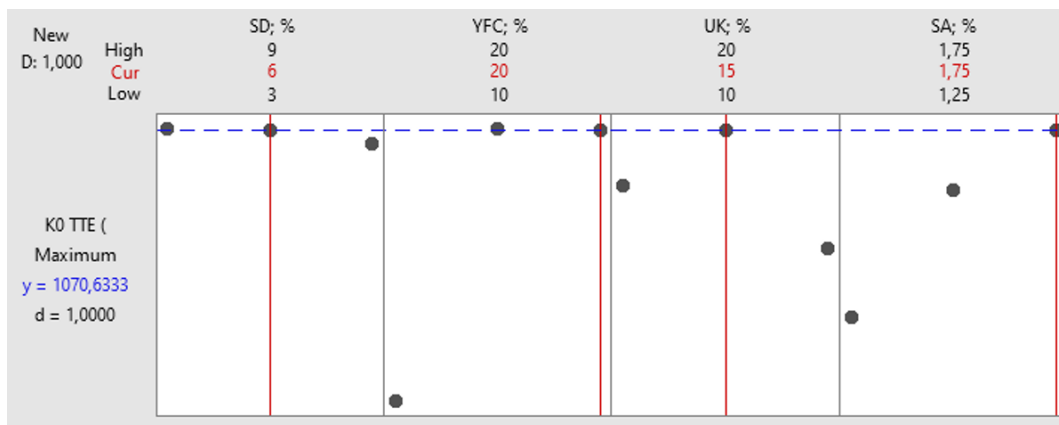
Şekil 5.76'ya göre parametrelerin K0 durumunda TTE'ye etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %6, YFC için optimum seviyenin %20 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. YFC'nin ikame oranındaki değişim K0 durumunda tüketilen toplam enerjiler için çok etkili olmuştur. UK için, optimum seviye kontur grafiklerinden anlaşıldığı gibi %15 ikame oranı olarak belirlenmiştir. SA için optimum parametre seviyesi %1.75 olarak belirlenmiştir.

K0 durumunda Taguchi yöntemi kullanılarak optimum seviyelerde tahmin edilen maksimum aderans gerilmesi değeri Şekil 5.77'de 1070 kN.mm olarak verilmiştir. Buna

göre; SD %6, YFC %20 UK %15 ve SA %1.75 seviyelerinde yapılan doğrulama deneyinde lolipop numunelerden elde edilen ortalama tüketilen enerji yaklaşık 977 kN.mm olarak bulunmuştur. Taguchi yöntemi kullanılarak tahmin edilen değerle doğrulama deneyi sonucu elde edilen değer arasında rölatif hata yaklaşık %10 olmuştur. Doğrulama deneyinde bulunan bu sonuç, Şekil 4.32’de verilen L9 ortogonal dizi serileri ve referans numunenin üzerinde kabul edilebilir bir sonuçtur.



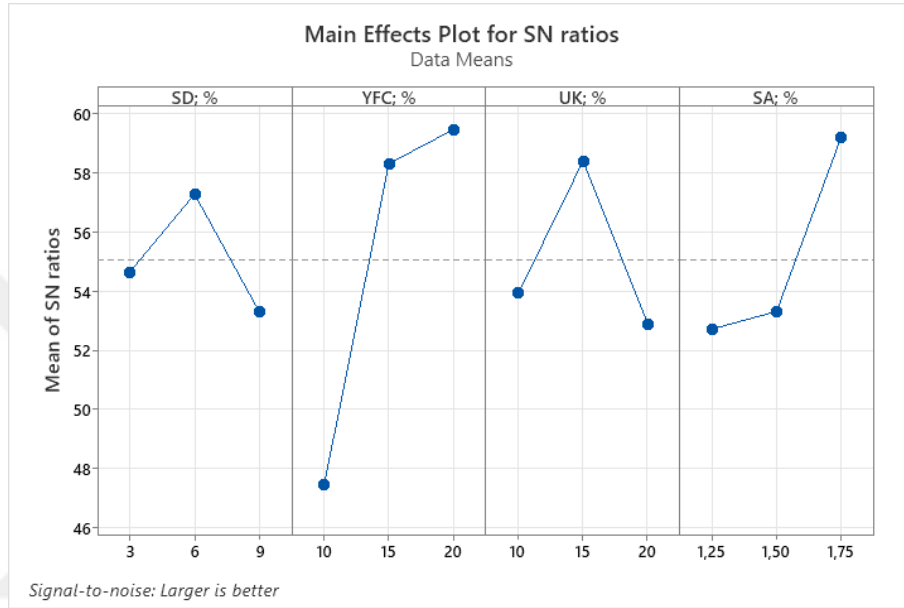
Şekil 5.76. K0 durumunda TTE için kontur ilişki grafikleri



Şekil 5.77. Taguchi analizi sonuçlarına göre K0 durumunda optimum tasarım için tahmini TTE

5.8.2.2. K2 durumunda toplam tüketilen enerjilerin istatistik açıdan değerlendirilmesi

K2 durumunda korozyona uğratılmış, içerisinde farklı oranda puzolanların bulunduğu seriler (L9 ortogonal dizi), üzerinde pullout deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçları ile yapılan istatistik analizlere göre elde edilen sonuçlar Şekil 5.78-5.79 ve Tablo 5.51-5.52’de verilmiştir.



Şekil 5.78. K2 durumunda ortalama TTE S/N grafiği

Tablo 5.51. K2 durumunda ortalama TTE S/N oran tablosu

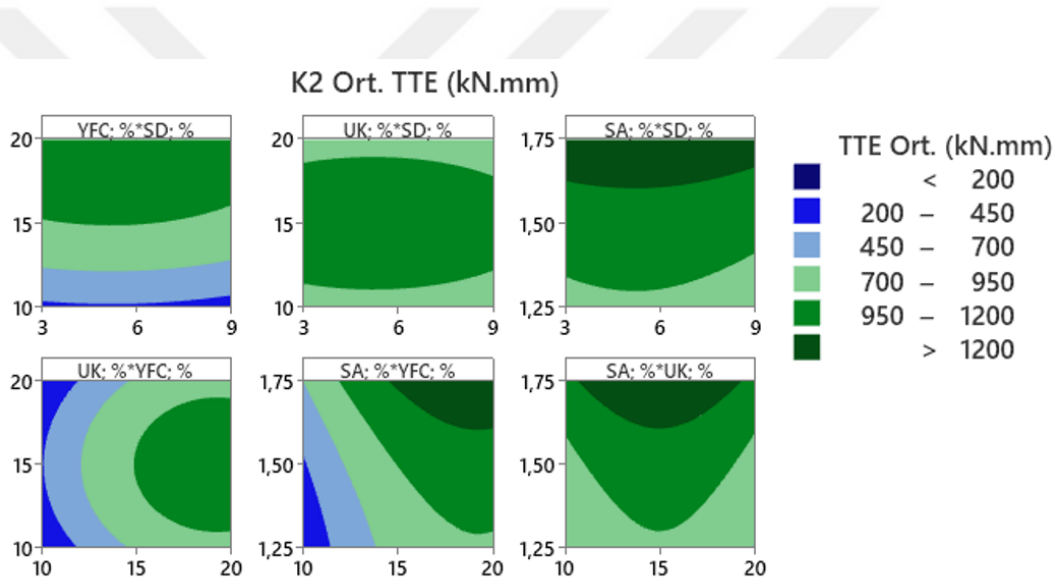
Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	54.63	47.43	53.91	52.70
2	57.26	58.29	58.38	53.30
3	53.28	59.45	52.88	59.17
Delta	3.98	12.02	5.50	6.47
Sıralama	4	1	3	2

Tablo 5.52. K2 durumunda ortalama TTE varyans analizi tablosu

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	24.54	5.90%	24.54	12.27	*	*
YFC(%)	2	263.77	63.37%	263.77	131.89	*	*
UK(%)	2	51.31	12.33%	51.31	25.65	*	*
SA(%)	2	76.62	18.41%	76.62	38.31	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	416.24	100.00%				

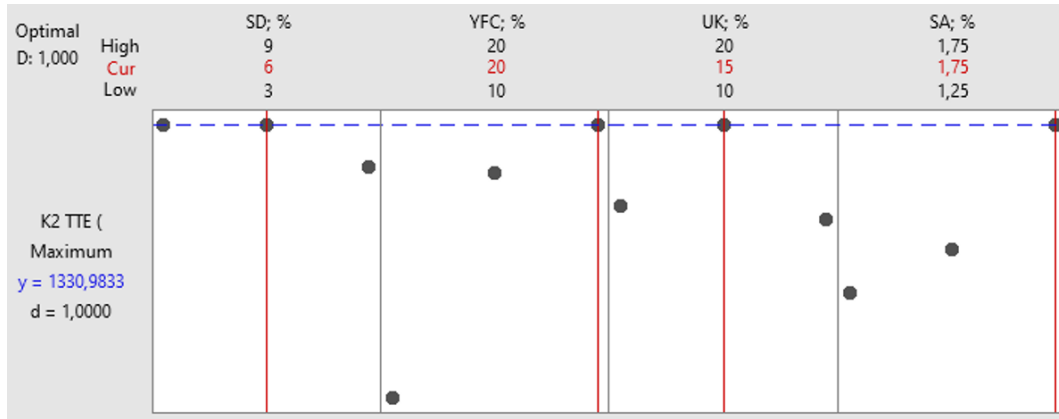
K2 durumunda TTE sonuçları açısından Taguchi istatistiksel analizleri Şekil 5.78’de verilen ortalama S/N grafiğine göre değerlendirildiğinde; SD için %6, YFC için %20, UK için %15 ve SA için de %1.75 seviyesinin optimum seviye olduğu belirlenmiştir. K2 durumunda TTE sonuçlarına göre en etkili parametreler sırasıyla YFC, SA, UK ve SD olmuştur.

Şekil 5.79’a göre parametreleri K2 durumunda TTE’ye etkisi SD için optimum seviyenin %6, YFC için optimum seviyenin %20 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. YFC’nin ikame oranındaki değişim K0 durumunda olduğu gibi K2 durumu aderans gerilmeleri için de çok etkili olmuştur. UK için optimum seviye, kontur grafiklerinden anlaşıldığı gibi %15 ikame oranı olarak belirlenmiştir. Süper akışkanlaştırıcı için optimum parametre seviyesi %1.75 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.79. K2 durumunda TTE kontur ilişki grafikleri

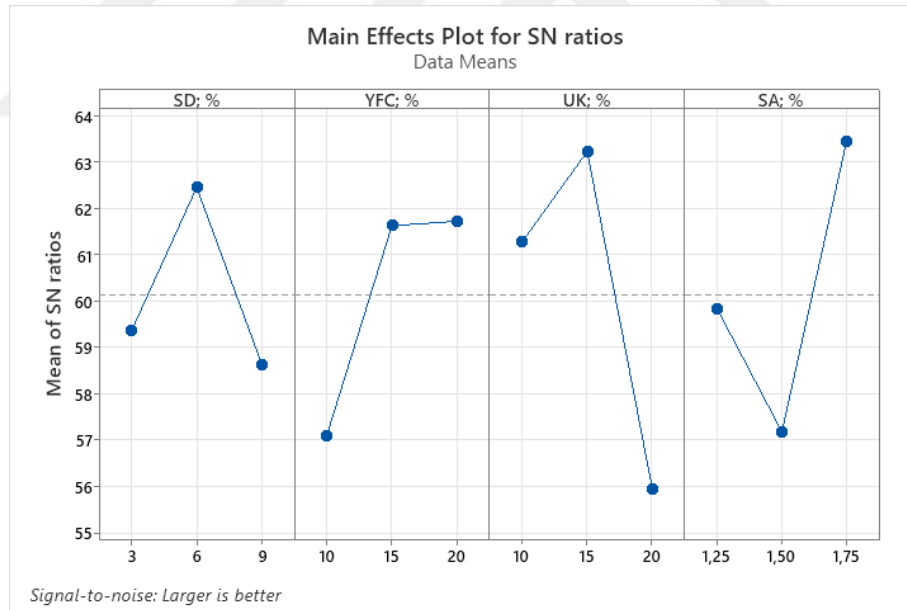
K2 durumunda Taguchi yöntemi kullanılarak optimum seviyelerde tahmin edilen maksimum aderans gerilmesi değeri Şekil 5.80’de 1330.98 kN.mm olarak verilmiştir. Buna göre; SD %6, YFC %20 UK %15 ve SA %1.75 seviyelerinde yapılan doğrulama deneyinde lolipop numunelerden elde edilen ortalama tüketilen enerji yaklaşık 1033 kN.mm olarak bulunmuştur. Yöntem tarafından tahmin edilen değerle doğrulama deneyi sonucu elde edilen değer arasında rölatif hata yüksek değer almıştır. Doğrulama deneyinde bulunan bu sonuç, Şekil 4.32’de verilen L9 ortogonal dizi serilerinin çoğundan yüksek ve referans numuneye yakın kabul edilebilir bir sonuçtur.



Şekil 5.80. Taguchi analizi sonuçlarına göre K0 durumunda optimum tasarım için tahmini TTE

5.8.2.3. K4 durumunda toplam tüketilen enerjilerin istatistik açıdan değerlendirilmesi

K4 durumunda korozyona uğratılmış, içerisinde farklı oranda puzolanların bulunduğu seriler (L9 ortogonal dizi), üzerinde pullout deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçları ile yapılan istatistik analizlere göre elde edilen sonuçlar Şekil 5.81-5.82 ve Tablo 5.53-5.54'te verilmiştir.



Şekil 5.81. K4 durumunda ortalama TTE S/N grafiği

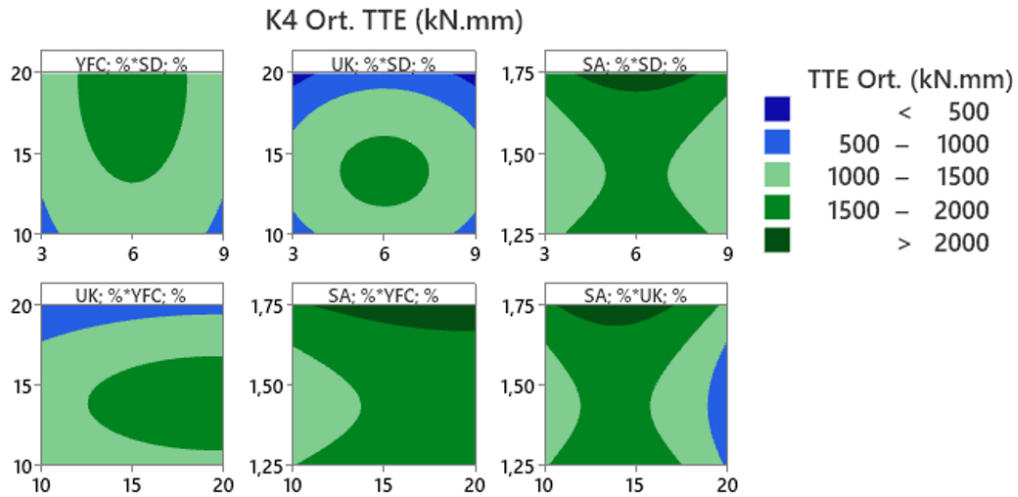
Tablo 5.53. K4 durumunda ortalama TTE S/N oran tablosu

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	59.35	57.09	61.27	59.82
2	62.45	61.62	63.22	57.17
3	58.63	61.72	55.94	63.44
Delta	3.82	4.62	7.29	6.27
Sıralama	4	3	1	2

Tablo 5.54. K4 durumunda ortalama TTE varyans analizi tablosu

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	24.66	11.67%	24.66	12.33	*	*
YFC(%)	2	41.88	19.83%	41.88	20.94	*	*
UK(%)	2	85.32	40.39%	85.32	42.66	*	*
SA(%)	2	59.38	28.11%	59.38	29.69	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	211.24	100.00%				

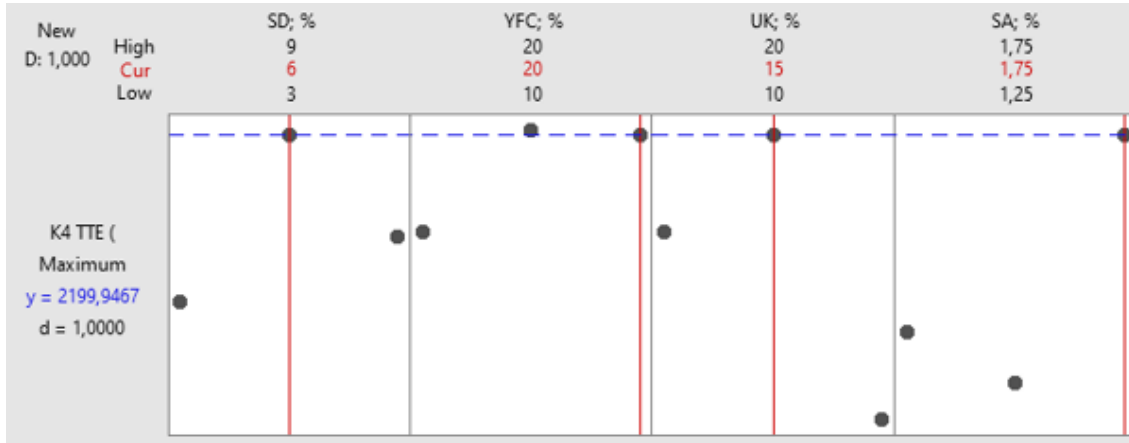
K4 durumunda TTE sonuçları açısından Taguchi istatistiksel analizleri Şekil 5.81’de verilen ortalama S/N grafiğine göre değerlendirildiğinde; SD için %6, YFC için %20, UK için %15 ve SA için de %1.75 seviyesinin optimum seviye olduğu belirlenmiştir. K4 durumunda TTE sonuçlarına göre en etkili parametreler sırasıyla UK, SA, YFC ve SD olmuştur.

**Şekil 5.82.** K4 durumunda TTE tepki yüzey ilişki grafikleri

Şekil 5.82’ye göre parametrelerin K4 durumunda TTE’ye etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %6, YFC için optimum seviyenin %20 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. YFC’nin ilk seviyesi olan %10 ikame oranı K4 durumunda bağ dayanımının en olumsuz etkilendiği seviyedir UK için, optimum seviye kontur grafiklerinden anlaşıldığı gibi %15 ikame oranı olarak belirlenmiştir. Uk nın son seviyesi olan %20 ikame oranı K4 durumunda bağ dayanımının en olumsuz etkilendiği seviyedir. SA için optimum parametre seviyesi %1.75 olarak belirlenmiştir.

Taguchi yöntemi kullanılarak K4 durumunda optimum seviyelerde tahmin edilen TTE miktarı Şekil 5.83’te 2199.95 kN.mm olarak verilmiştir. Buna göre bu seviyelerde yapılan doğrulama deneyinde lolipop numunelerden elde edilen ortalama TTE miktarı

1442.75 kN.mm olarak bulunmuştur. Burada yöntem tarafından tahmin edilen değerle doğrulama deneyi sonucu elde edilen değer arasında rölatif hata yüksek olmuştur. Ancak; doğrulama deneyleri sonucu bulunan bu değer Şekil 4.32’de verilen L9 ortogonal dizi serilerinden en yüksek TTE miktarına sahip (1943.49) M4 serisine nispeten yakın ve referans seriden (1043.33) yaklaşık %40 daha yüksek olduğundan kabul edilebilir olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.83. Taguchi analizi sonuçlarına göre K4 durumunda optimum tasarım için tahmini TTE miktarı

5.8.2.4. K6 durumunda toplam tüketilen enerjilerin istatistik açıdan değerlendirilmesi

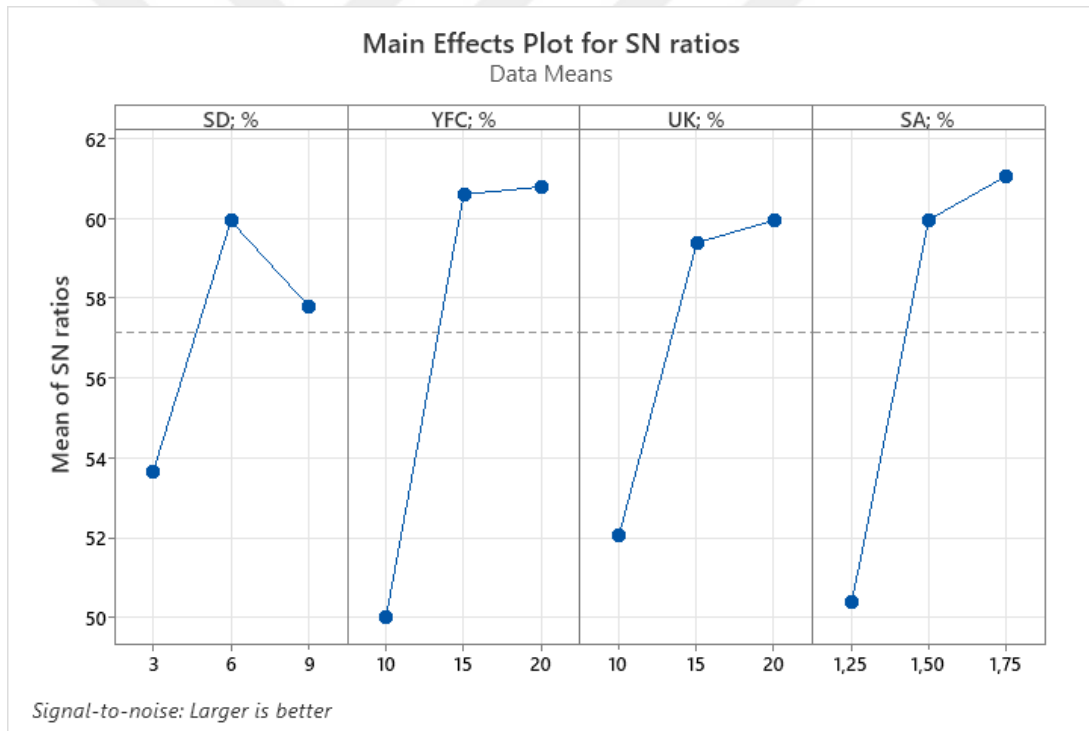
K6 durumunda korozyona uğratılmış, içerisinde farklı oranda puzolanların bulunduğu seriler (L9 ortogonal dizi), üzerinde pullout deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçları ile yapılan istatistik analizlere göre elde edilen sonuçlar Şekil 5.84-5.85 ve Tablo 5.55-5.56’da verilmiştir.

K6 durumunda TTE sonuçları açısından Taguchi istatistiksel analizleri Şekil 5.84’te verilen ortalama S/N grafiğine göre değerlendirildiğinde; SD için %6, YFC için %20, UK için %20 ve SA için de %1.75 seviyesinin optimum seviye olduğu belirlenmiştir. K6 durumunda TTE sonuçlarına göre en etkili parametreler sırasıyla YFC, SA, UK ve SD olmuştur.

Şekil 5.85’e göre parametrelerin K6 durumunda TTE’ye etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %6, YFC için optimum seviyenin %20 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. YFC’nin ikame oranındaki değişim K6 dahil tüm durumlar için çok etkili olmuştur. UK için, optimum seviye kontur grafiklerinden anlaşıldığı gibi %20 ikame oranı olarak belirlenmiştir. SA için optimum parametre

seviyesi %1.75 olarak belirlenmiştir. Tüm puzolanların en düşük ikame oranları, en çok korozyon akımına maruz kalınan durum olan K6 durumunda, TTE açısından en olumsuz durumu oluşturmuştur. Buna puzolan oranı azlığına bağlı olarak oluşan korozyon derecesinin yüksekliğinin sebep olduğu düşünülmektedir.

Taguchi yöntemi kullanılarak K6 durumunda optimum seviyelerde tahmin edilen TTE miktarı Şekil 5.86'da 1615.05 kN.mm olarak verilmiştir. Buna göre bu seviyelerde yapılan doğrulama deneyinde beton numunesinden elde edilen ortalama TTE miktarı 1388.54 kN.mm olarak bulunmuştur. Burada yöntem tarafından tahmin edilen değerle doğrulama deneyi sonucu elde edilen değer arasında rölatif hata yüksek olmuştur. Ancak; doğrulama deneyi sonucu bulunan bu değer Şekil 4.32'de verilen L9 ortogonal dizi serilerinden en yüksek TTE miktarına sahip (1595.13) M3 serisine nispeten yakın ve referans seriden (126.70) epey yüksek olmuştur.



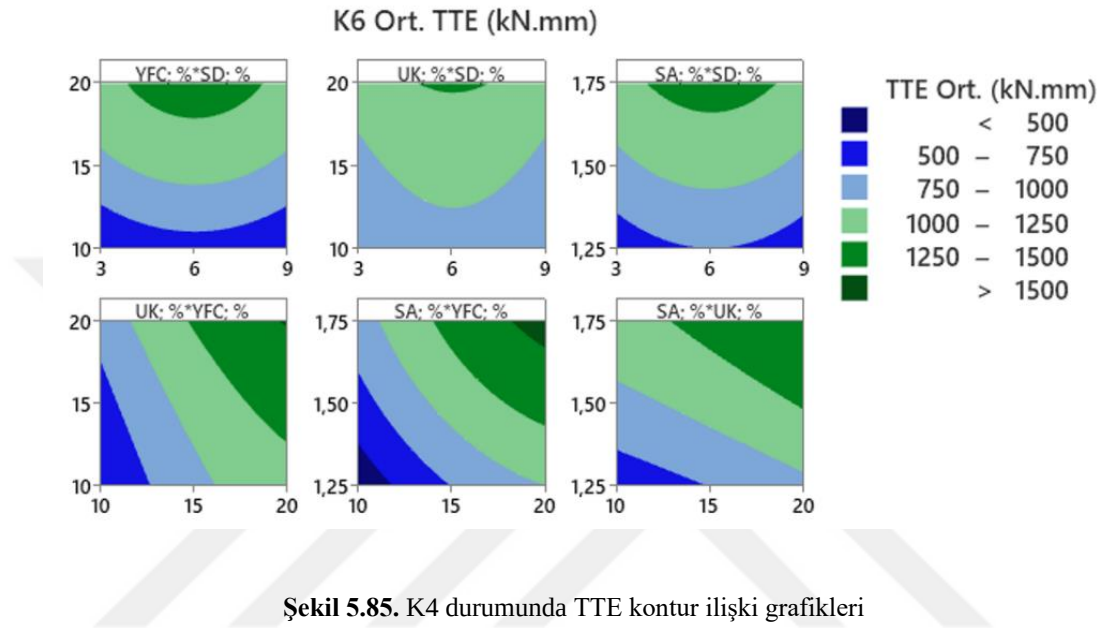
Şekil 5.84. K6 durumunda ortalama TTE S/N grafiği

Tablo 5.55. K6 durumunda ortalama TTE S/N oran tablosu

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	53.65	50.00	52.05	50.37
2	59.93	60.60	59.38	59.97
3	57.80	60.79	59.95	61.05
Delta	6.28	10.79	7.90	10.68
Sıralama	4	1	3	2

Tablo 5.56. K6 durumunda ortalama TTE varyans analizi tablosu

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	61.28	9.98%	61.28	30.64	*	*
YFC(%)	2	228.80	37.27%	228.80	114.40	*	*
UK(%)	2	116.39	18.96%	116.39	58.19	*	*
SA(%)	2	207.39	33.78%	207.39	103.69	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	613.85	100.00%				



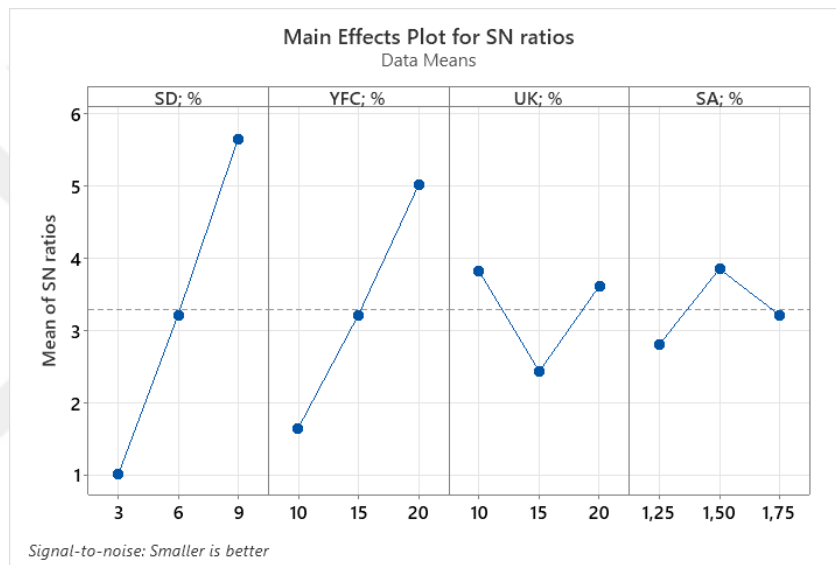
5.9. Ağırlık Kaybı Yüzdesi

İlk ağırlıkları kaydedilen donatılar, farklı sürelerde uygulanan (K2, K4 ve K6) hızlandırılmış korozyon deneyi sonrasında aderans deneyine tabi tutulmuş, daha sonra donatılar, yüzeyinde bulunan pas ve beton parçalarından kral suyu çözeltisi yardımıyla temizlenmiştir. Temizlenen donatıların son ağırlıkları tartılarak gerçek ağırlık kaybı yüzdeleri hesaplanmıştır. Her seri için hesaplanan ağırlık kaybı yüzdeleri için Taguchi

yöntemi kullanılarak istatistik analizler gerçekleştirilmiş parametrelerin optimum seviyeleri tespit edilmiştir. Ağırlık kaybı yüzdeleri için Taguchi analizlerinde hedef performans karakteristiği en küçük-en iyi olarak belirlenmiştir.

5.9.1. K2 durumunda gerçek ağırlık kaybı yüzdesinin istatistik açıdan değerlendirilmesi

Serilerin ağırlık kaybı yüzdeleri deney sonuçlarının Taguchi istatistik analizleri Şekil 5.87 ve Tablo 5.57-5.58’de verilmiştir.



Şekil 5.87. K2 durumunda gerçek ağırlık kaybı yüzdesi ortalama S/N grafiği

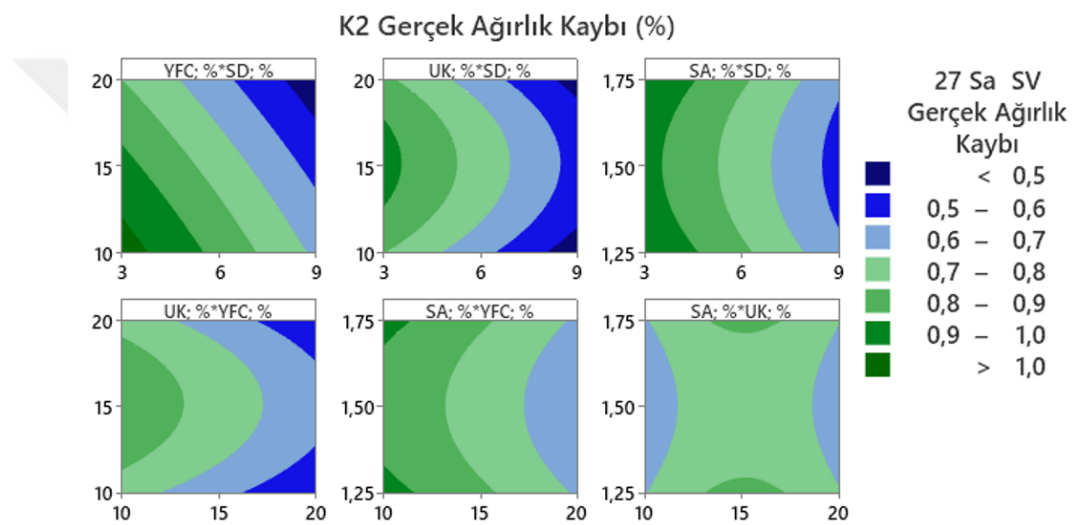
Tablo 5.57. K2 durumunda gerçek ağırlık kaybı yüzdesi S/N oran tablosu

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	1.006	1.642	3.818	2.803
2	3.209	3.209	2.427	3.844
3	5.641	5.005	3.611	3.209
Delta	4.635	3.364	1.391	1.042
Sıralama	1	2	3	4

Tablo 5.58. K2 durumunda gerçek ağırlık kaybı yüzdesi varyans analiz tablosu

Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	32.257	59.42%	32.257	16.1284	*	*
YFC(%)	2	16.997	31.31%	16.997	8.4987	*	*
UK(%)	2	3.378	6.22%	3.378	1.6890	*	*
SA(%)	2	1.655	3.05%	1.655	0.8274	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	54.287	100.00%				

Hızlandırılmış korozyon deney sonuçlarına göre K2 durumu için serilerde meydana gelen ağırlık kaybı yüzdeleri istatistik açıdan Şekil 5.85'e göre değerlendirildiğinde; en etkili parametre, çekilen korozyon akımı istatistik analizine benzer olarak SD dir. Buna göre parametrenin optimum seviyesi %9 olarak tespit edilmiştir. SD, ince tanecik özelliğinden dolayı betonda kompakt bir yapı oluşmasını sağlayarak korozyon kaynaklı donatı kesit kayıplarını engellemiştir. YFC ikinci en etkili parametre olurken optimum parametre seviyesi %20 olarak belirlenmiştir. UK için optimum parametre seviyesi %10 olarak belirlenmiştir. Tablo 5.58'e göre SA etki yüzdesi yaklaşık %3 olurken optimum parametre seviyesi % 1.5 olarak belirlenmiştir.

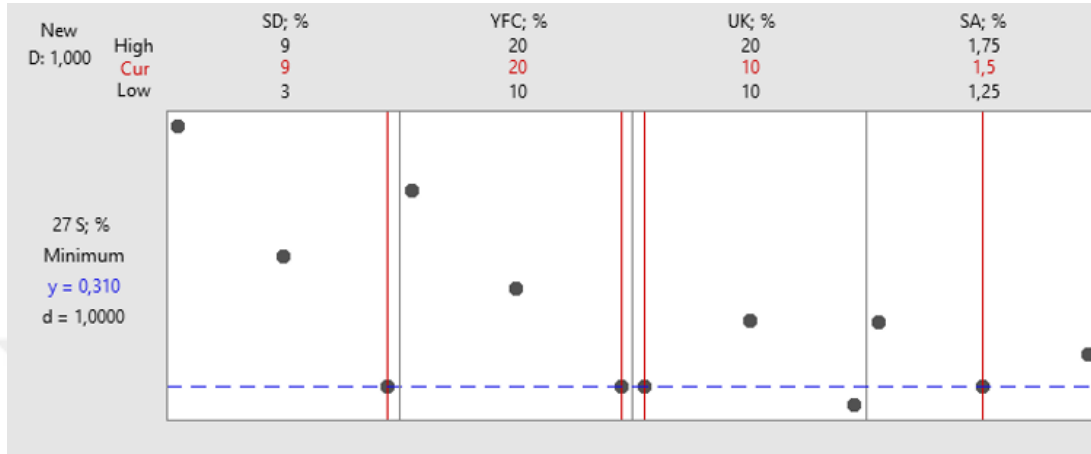


Şekil 5.88. K2 durumunda gerçek ağırlık kaybı kontur grafikleri

Şekil 5.88'e göre parametrelerin K2 durumunda gerçek ağırlık kaybına etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %9, YFC için optimum seviyenin %20 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. SD seviye değişim oranı, K2 durumu gerçek ağırlık kaybında en etkili parametre olmuştur. UK için, optimum seviye tepki yüzey grafiklerinden anlaşıldığı gibi %10 ikame oranı olarak belirlenmiştir. Korozyon kaynaklı ağırlık kayıpları, puzolanların boşluk doldurma özellikleri ve mikro yapıda yaptıkları iyileştirme ile yakından ilişkilidir. Bu sayede donatının elektrokimyasal korozyonuna bağlı kayıplarının önüne geçilmektedir. Süper akışkanlaştırıcı için optimum parametre seviyesi %1.5 olarak belirlenmiştir.

Taguchi yöntemi kullanılarak K2 durumunda optimum seviyelerde tahmin edilen gerçek ağırlık kaybı yüzdesi Şekil 5.89'da %0.31 olarak verilmiştir. Buna göre bu seviyelerde yapılan doğrulama deneyinde donatıda oluşan ağırlık kaybı yüzdesi 0.49

olarak bulunmuştur. Bu sonuç L9 ortogonal dizi içerisinde en az kütle kaybı yüzdesine (0.50) sahip M6, M8 ve M9 serilerine yakın olmuştur. Tahminin rölatif hata yüzdesi yüksek olmasına rağmen referans betonla ve L9 ortogonal dizi serileri ile birlikte değerlendirildiğinde doğrulama deneyinden elde edilen sonuç tatmin edici olmuştur.



Şekil 5.89. Taguchi analizi sonuçlarına göre K2 durumunda optimum tasarım için tahmini yüzde ağırlık kaybı

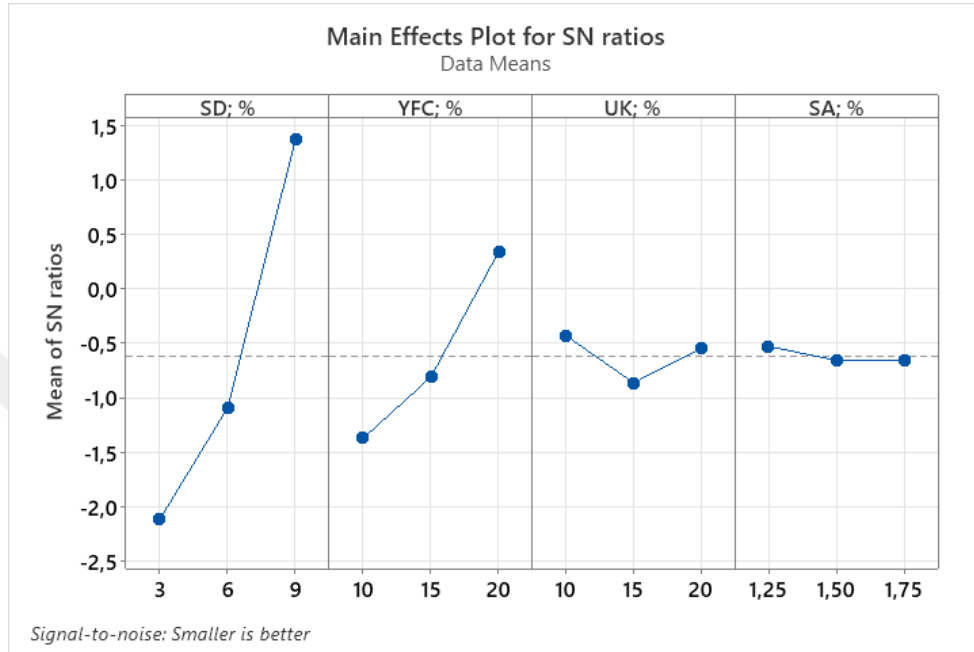
5.9.2. K4 durumunda gerçek ağırlık kaybı yüzdesinin istatistik açıdan değerlendirilmesi

Serilerin ağırlık kaybı yüzdeleri deney sonuçlarının Taguchi analizleri Şekil 5.90 ve Tablo 5.59-5.60'ta verilmiştir.

Hızlandırılmış korozyon deney sonuçlarına göre K4 durumu için serilerde meydana gelen ağırlık kaybı yüzdeleri istatistik açıdan Şekil 5.90'a göre değerlendirildiğinde; en etkili parametre, çekilen korozyon akımı istatistik analizlerine ve K2 durumu ağırlık kaybı istatistik analizlerine benzer olarak SD iken, parametrenin optimum seviyesi %9 olarak tespit edilmiştir. SD, ince tanecik özelliğinden dolayı betonda kompakt bir yapı oluşmasını sağlayarak korozyon kaynaklı donatı kayıplarını engellemiştir. YFC ikinci en etkili parametre olurken optimum parametre seviyesi %20 olarak belirlenmiştir. UK için optimum parametre seviyesi %10 olarak belirlenmiştir. SA K4 durumu ağırlık kaybı yüzdesi için etkisi en az olan parametre olmuştur.

Şekil 5.91'e göre parametrelerin K4 durumunda gerçek ağırlık kaybına etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %9, YFC için optimum seviyenin %20 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. SD, K4 durumu gerçek ağırlık kaybında en etkili parametre olmuştur. UK için, optimum seviye kontur grafiklerinden anlaşıldığı gibi %10 ikame oranı olarak belirlenmiştir. Korozyon kaynaklı ağırlık kaybı

oranları, puzolanların boşluk doldurma özellikleri ve mikro yapıda yaptıkları iyileştirme ile yakından ilişkilidir. Bu sayede donatının elektrokimyasal korozyonuna bağlı kayıplarının önüne geçilmektedir. SA'nın etki yüzdesi çok az olurken optimum parametre seviyesi %1.25 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.90. K4 durumunda gerçek ağırlık kaybı yüzdesi S/N grafiği

Tablo 5.59. K4 durumunda gerçek ağırlık kaybı yüzdesi S/N oran tablosu

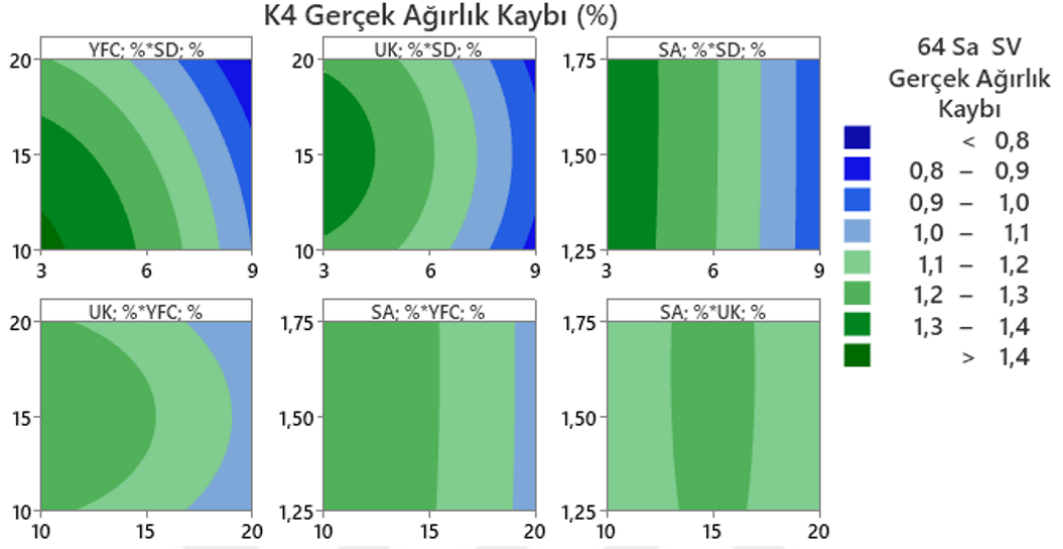
Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	-2.1171	-1.3735	-0.4322	-0.5289
2	-1.0941	-0.8116	-0.8643	-0.6588
3	1.3662	0.3400	-0.5486	-0.6574
Delta	3.4833	1.7135	0.4320	0.1299
Sıralama	1	2	3	4

Tablo 5.60. K4 durumunda gerçek ağırlık kaybı yüzdesi varyans analiz tablosu

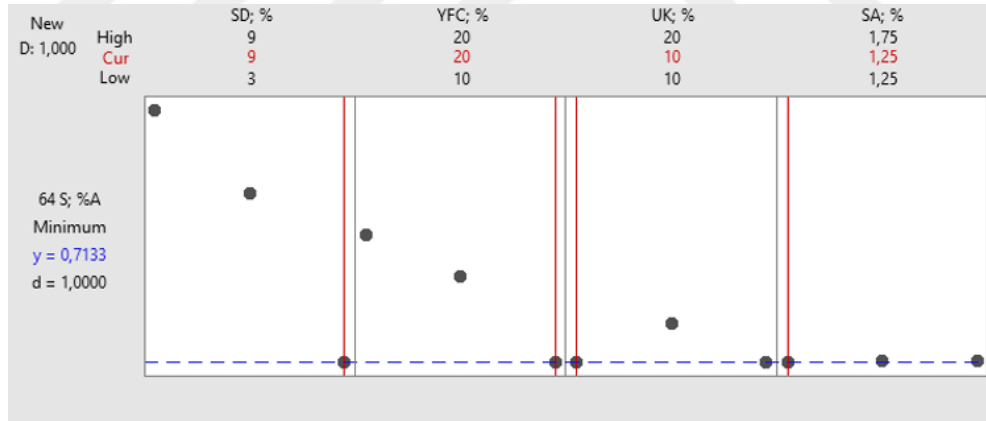
Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	19.2329	79.66%	19.2329	9.61647	*	*
YFC(%)	2	4.5780	18.96%	4.5780	2.28902	*	*
UK(%)	2	0.2998	1.24%	0.2998	0.14992	*	*
SA(%)	2	0.0334	0.14%	0.0334	0.01670	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	24.1442	100.00%				

Taguchi yöntemi kullanılarak K4 durumunda optimum seviyelerde tahmin edilen gerçek ağırlık kaybı yüzdesi Şekil 5.92'de %0.71 olarak verilmiştir. Buna göre bu seviyelerde yapılan doğrulama deneyinde donatıda oluşan ağırlık kaybı yüzdesi 0.92

olarak bulunmuştur. Bu sonuç L9 ortogonal dizi içerisinde en az kütle kaybı yüzdesine (0.78) sahip M9 serisine yakın olmuştur. Tahminin rölatif hata yüzdesi yüksek olmasına rağmen referans betonla ve L9 ortogonal dizi serileri ile birlikte değerlendirildiğinde doğrulama deneyinden elde edilen sonuç tatmin edici olmuştur.



Şekil 5.91. K4 durumunda gerçek ağırlık kaybı yüzdesi kontur ilişki grafikleri



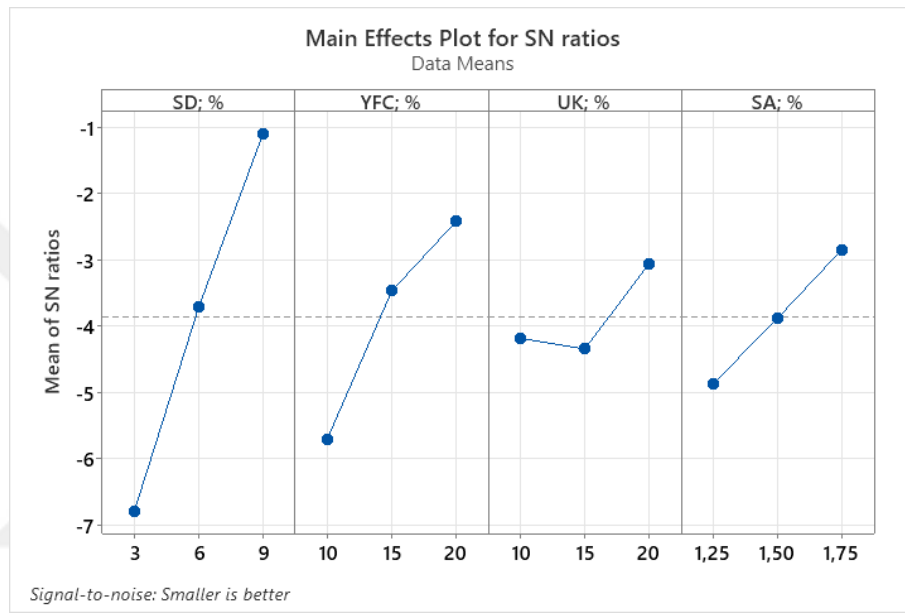
Şekil 5.92. Taguchi analizi sonuçlarına göre K4 durumunda optimum tasarım için tahmini yüzde ağırlık kaybı

5.9.3. K6 durumunda gerçek ağırlık kaybı yüzdesinin istatistik açıdan değerlendirilmesi

Serilerin ağırlık kaybı yüzdeleri deney sonuçlarının Taguchi analizleri Şekil 5.93 ve Tablo 5.61-5.62’de verilmiştir.

Hızlandırılmış korozyon deney sonuçlarına göre K6 durumu için serilerde meydana gelen ağırlık kaybı yüzdeleri istatistik açıdan Şekil 5.93’e göre

değerlendirildiğinde; en etkili parametre, çekilen korozyon akım değerlerine benzer olarak silis dumanıyken, parametrenin optimum seviyesi %9 olarak tespit edilmiştir. SD, ince tanecik özelliğinden dolayı betonda kompakt bir yapı oluşmasını sağlayarak korozyon kaynaklı donatı kayıplarını engellemiştir. YFC ikinci en etkili parametre olurken optimum parametre seviyesi %20 olarak belirlenmiştir. UK için optimum parametre seviyesi %20 olarak belirlenmiştir. SA için optimum parametre seviyesi %1.75 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.93. K6 durumunda gerçek ağırlık kaybı yüzdesi S/N grafiği

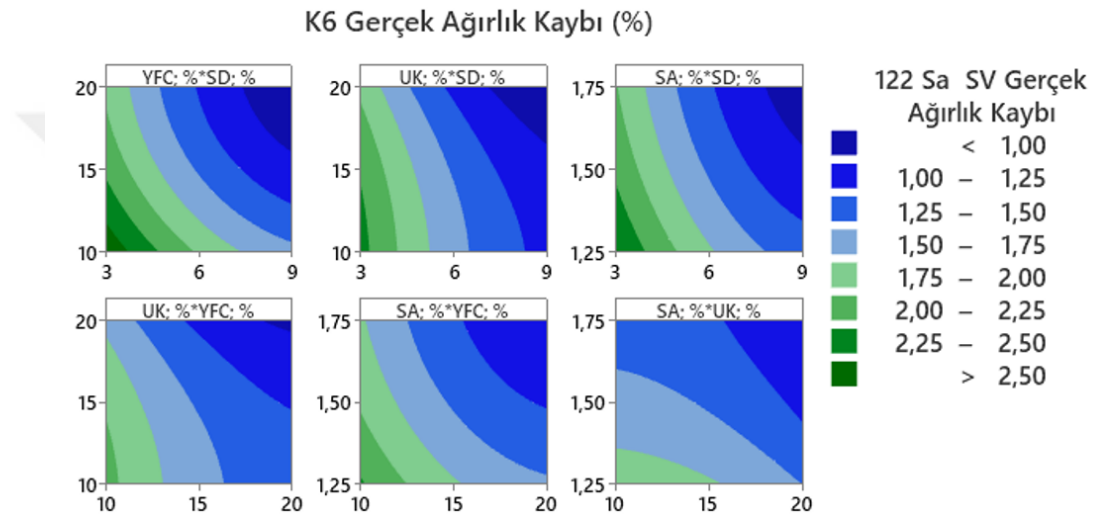
Tablo 5.61. K6 durumunda gerçek ağırlık kaybı yüzdesi S/N oran tablosu

Seviye	SD(%)	YFC(%)	UK(%)	SA(%)
1	-6.783	-5.697	-4.182	-4.866
2	-3.712	-3.470	-4.345	-3.880
3	-1.094	-2.422	-3.063	-2.843
Delta	5.689	3.275	1.282	2.023
Sıralama	1	2	4	3

Tablo 5.62. K6 durumunda gerçek ağırlık kaybı yüzdesi varyans analiz tablosu

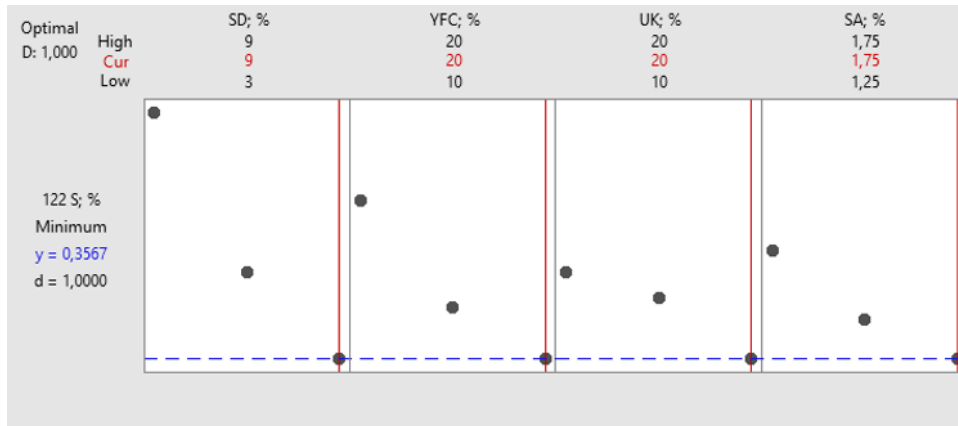
Parametre	DF	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
SD(%)	2	48.643	65.30%	48.643	24.322	*	*
YFC(%)	2	16.783	22.53%	16.783	8.391	*	*
UK(%)	2	2.923	3.92%	2.923	1.461	*	*
SA(%)	2	6.139	8.24%	6.139	3.069	*	*
Hata	0	*	*	*	*		
Toplam	8	74.488	100.00%				

Şekil 5.94'e göre parametrelerin K6 durumunda gerçek ağırlık kaybına etkisi incelendiğinde SD için optimum seviyenin %9, YFC için optimum seviyenin %20 ikame oranı olduğu kontur grafiklerinden anlaşılmaktadır. SD K6 durumunda da gerçek ağırlık kaybında en etkili parametre olmuştur. UK için, optimum seviye kontur grafiklerinden anlaşıldığı gibi %20 ikame oranı olarak belirlenmiştir. Gerçek ağırlık kayıp oranları, puzzlelerin boşluk doldurma özellikleri ve mikro yapıda yaptıkları iyileştirme ile yakından ilişkilidir. Bu sayede donatının elektrokimyasal korozyonuna bağlı kayıplarının önüne geçilmektedir. SA için optimum parametre seviyesi %1.75 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.94. K6 durumunda gerçek ağırlık kaybı tepki yüzey ilişki grafikleri

Taguchi yöntemi kullanılarak K6 durumunda optimum seviyelerde tahmin edilen gerçek ağırlık kaybı yüzdesi Şekil 5.95'te %0.36 olarak verilmiştir.



Şekil 5.95. Taguchi analizi sonuçlarına göre K6 durumunda optimum tasarım için tahmini yüzde ağırlık kaybı

Buna göre bu seviyelerde yapılan doğrulama deneyinde donatıda oluşan ağırlık kaybı yüzdesi 1.16 olarak bulunmuştur. Bu sonuç L9 ortogonal dizi içerisinde en az kütle kaybı yüzdesine (1.00) sahip M8 serisine yakın olmuştur. Tahminin rölatif hata yüzdesi yüksek olmasına rağmen referans betonla ve L9 ortogonal dizi serileri ile birlikte değerlendirildiğinde doğrulama deneyinden elde edilen sonuç tatmin edici olmuştur.

5.10. Bazı Kriterler İçin Regresyon Denkleminin Elde Edilmesi

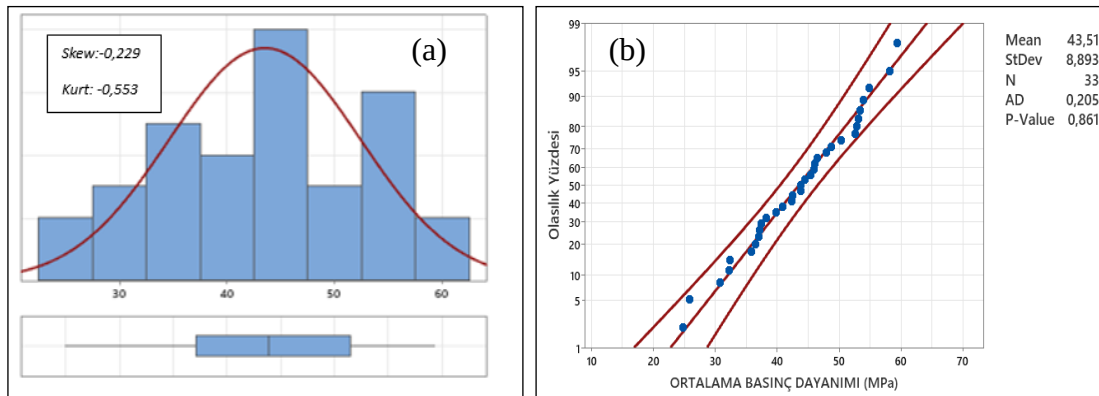
Çoklu regresyon analizi birçok parametre ve seviyesinin olduğu problemlerde, parametrik değişkenlerin ilgili amaca yönelik etkisini belirlemek için kullanılmaktadır. Eğer bir probleme doğrusal çoklu regresyon uygulanacaksa; parametrelerin tam temsiliyeti ve çıkarılan denklemin yüksek (R^2) doğruluk değeri için yeterli sayıda gözlem değerinin olması gerekmektedir. Gözlem değeri ne kadar fazla olursa çıkarılan denklemin tahmin değeri de o kadar iyi olacaktır. Mühendislik problemlerinde; özellikle istatistik tabanlı deney tasarımlarında gözlem sayısının az olması zaten çalışmanın amaçlarından birini oluşturmaktadır. Bu sebeple istatistik deney tasarımlarında gözlem sayısının azlığı sebebiyle doğrusal regresyonun uygulanması çoğu zaman uygun olmamakla birlikte tatmin edici bir sonuç elde edilememektedir.

Bu tez çalışmasında gözlem sayısı az olduğundan çoklu lineer regresyon yapılması uygun görülmemiş, onun yerine genellikle az verinin bulunduğu mühendislik çalışmalarında tercih edilen bir yöntem olan “Yüzey Tepki Metodu (Response Surface Methodology)” kullanılmıştır. Buna göre tez çalışmasında Taguchi metodu kullanılarak az sayıda deney ile parametre optimizasyonunun yapılması amaçlandığından sınırlı sayıda deney gerçekleştirilmiştir. Basınç, eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımları için her yaşta L9 ortogonal diziye uygun 9 deney yapılmıştır. Regresyon denklemi için deney sayısının çok az olmasından dolayı kür süresi (KS) de bir parametre alınarak veri sayısı artırılmış, regresyon eşitliği buna göre çıkarılmıştır. Diğer yandan pullout testleri için L9 ortogonal diziye uygun K0, K2, K4 ve K6 durumlarının her biri için 9 deney yapılmıştır. Buna göre denklem oluşturulurken korozyon durumu kategorik faktör olarak seçilmiş her korozyon durumu için ayrı regresyon eşitliği elde edilmiştir. Çoklu regresyon analizi yapılmadan önce değişkenlerin çoklu regresyon analizine uygun olup olmadığına yönelik ön şartların analiz edilmesi gerekmektedir. Değişken değerinin normal dağılıma sahip olması bu şartlardan ilkidir. Verilerin normallikleri test edilirken betimsel istatistik değerlerden (çarpıklık, basıklık vb.), histogram grafiklerinden veya hipotez testlerinden yararlanılmaktadır (Pituch ve Stevens, 2016). Deney sonuçlarına göre elde edilen

verilerin normal dağılıma sahip olup olmadığı araştırılırken basıklık ve çarpıklık değerleri dikkate alınmış olup basıklık ve çarpıklık değerleri -1.5 - +1.5 aralığında olduğunda verilerin normal dağılıma sahip olduğu kabul edilmiştir (Tabachnick ve Fidell, 2013). Ayrıca verilerin %95 güven aralığı için normal olasılık grafiği çizildiğinde, elde edilen P değerinin 0.05'ten büyük olması verilerin normal dağılıma sahip olduğunu göstermektedir (Demir vd., 2016; Mertler ve Vannatta, 2005; Yenginar, 2020). Diğer yandan çıkarılan regresyon denklemi ile elde edilen tahminlere ait hata değerleri de normal dağılıma sahip olmalıdır. Bu kapsamda basınç, eğilmede çekme, yarmada çekme dayanımı, maksimum bağ dayanımı ve TTE için regresyon denklemleri Minitab 21.0 programı kullanılarak elde edilmiş, bulgular aşağıda verilmiştir.

5.10.1. Basınç dayanımı regresyon denkleminin elde edilmesi

Tüm yaşlardaki basınç dayanım değerleri histogram grafiğine göre normal dağılıma sahiptir. Şekil 5.96.a'da betimsel istatistik test değerlerinden çarpıklık değerinin -0.229 ve basıklık değerinin -0.553 olması ve Şekil 5.96.b'de normal olasılık grafiğinde verilen P değerinin 0.861 olması verilerin normal dağılıma sahip olduğunu göstermektedir.

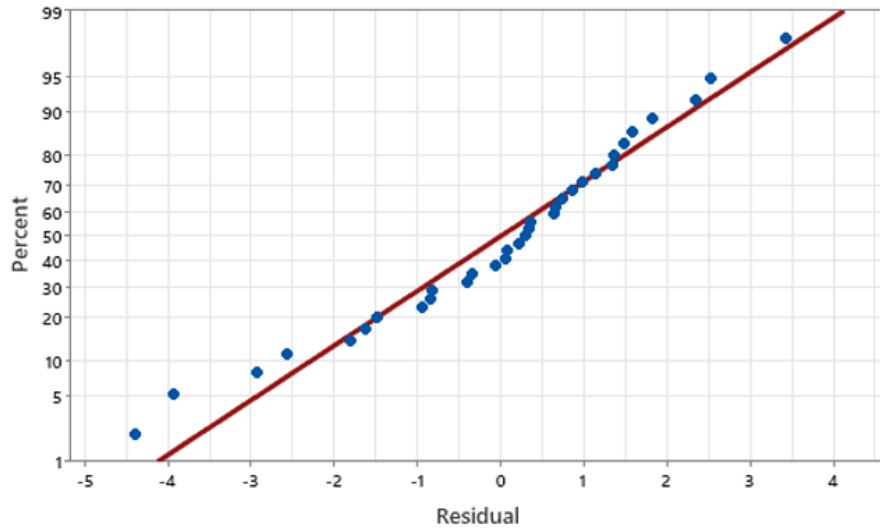


Şekil 5.96. Basınç dayanımı için elde edilen a) histogram grafiği ve b) normal olasılık grafiği

YTM kullanılarak yapılan regresyon analizinden elde edilen Denklem 5.1 parametrelerin seviyesine bağlı olarak verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 BD = & -205.9 + 3.18SD - 3.99YFC + 2.94UK + 314.6SA + 1.254KS \\
 & - 0.2414SD^2 + 0.1292YFC^2 - 0.1245UK^2 - 105.4SA^2 \\
 & - 0.01226KS^2
 \end{aligned} \quad (5.1)$$

Buna göre denklem tahmin sonuçlarından elde edilen artık değerlerin çoğu pozitif artık değer olmakla birlikte Şekil 5.97’de verilmiştir.



Şekil 5.97. Basınç dayanımı için geliştirilen modeldeki hataların normal olasılık grafiği

Basınç dayanımı ve tasarımlarda kullanılan parametreler arasında parametrelerin hem doğrusal hem de karelerinin katsayıları ile oluşturulan Denklem 5.1’ de verilen modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmin) değerleri sırasıyla Tablo 5.63’te %96.01, %94.20 ve %90.33 olarak sunulmuştur. Bu sonuçlara göre yüksek regresyon yüzdelерinin elde edildiği model kabul edilmiştir.

Tablo 5.63. Basınç dayanımı için oluşturulan modelin regresyon katsayıları

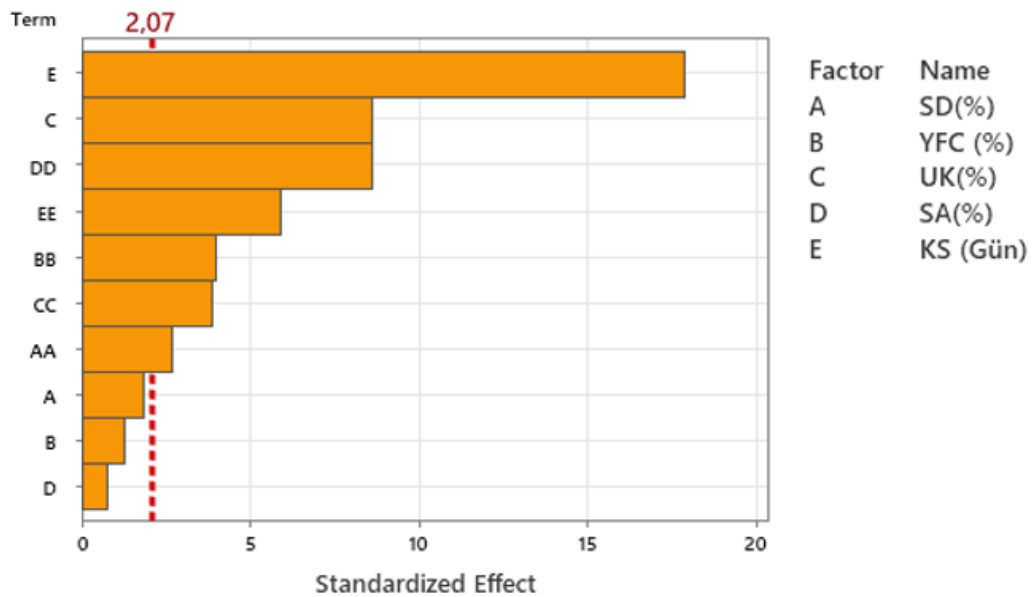
S	R ²	R ² (düz.)	R ² (tahmin)
2.14183	96.01%	94.20%	90.33%

Geliştirilen denklemde parametrelere bağlı olarak tahmin sonucunu daha anlamlı ve yüksek oranda temsil etmek amacıyla parametrelerin kareleri modelde kullanılmıştır (Cihan vd., 2013). Elde edilen modele göre; Tablo 5.64 ve Şekil 5.98 değerlendirildiğinde basınç dayanımı üzerinde en etkili parametreler sırasıyla KS, UK ve SA olmuştur. Denklemin istatistik açıdan değerlendirilmesinden elde edilen bu sonuçlar; 14, 28 ve 56

günlük basınç dayanımı Taguchi analizleri için en etkili parametreler yönüyle örtüşmektedir.

Tablo 5.64. Basınç dayanımı için elde edilen varyans analizi sonuçları

Parametre	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	10	2429.82	242.98	52.97	0.0000000
Doğrusal	5	1752.33	350.47	76.40	0.0000000
SD(%)	1	15.01	15.01	3.27	0.0841727
YFC (%)	1	7.17	7.17	1.56	0.2244178
UK(%)	1	338.84	338.84	73.86	0.0000000
SA(%)	1	2.85	2.85	0.62	0.4388608
KS (Gün)	1	1462.72	1462.72	318.85	0.0000000
Karesel	5	623.39	124.68	27.18	0.0000000
SD(%)*SD(%)	1	33.51	33.51	7.30	0.0130015
YFC (%)*YFC (%)	1	73.44	73.44	16.01	0.0006014
UK(%)*UK(%)	1	68.95	68.95	15.03	0.0008140
SA(%)*SA(%)	1	338.02	338.02	73.68	0.0000000
KS (Gün)*KS (Gün)	1	158.49	158.49	34.55	0.0000065
Hata	22	100.92	4.59		
Lack-of-Fit	19	99.79	5.25	13.93	0.0256454
Net Hata	3	1.13	0.38		
Toplam	32	2530.74			

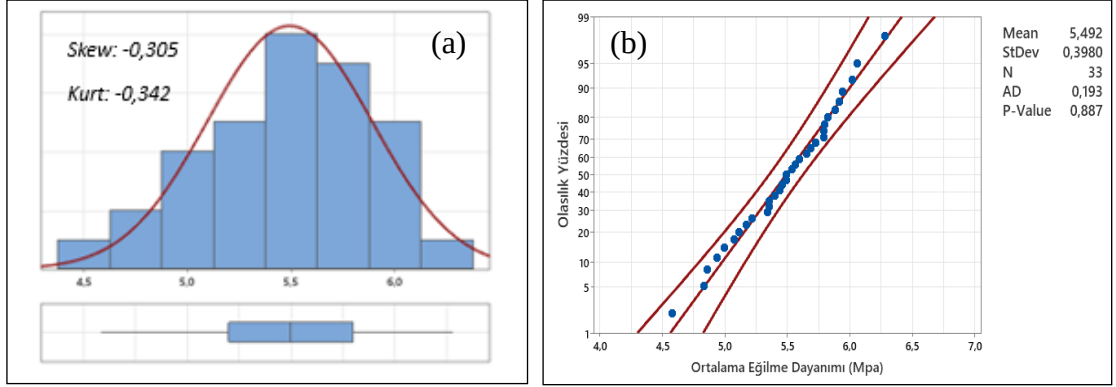


Şekil 5.98. Basınç dayanımı için elde edilen parametre etki (pareto) grafiği

5.10.2. Eğilmede çekme dayanımı regresyon denkleminin elde edilmesi

Tüm yaşlardaki eğilmede çekme dayanım değerleri histogram grafiğine göre normal dağılıma sahiptir. Şekil 5.99.a'da betimsel istatistik test değerlerinden çarpıklık değerinin -0.305 ve basıklık değerinin -0.342 olması ve Şekil 5.99.b'de normal olasılık

grafiginde verilen P değerinin 0.867 olması verilerin normal dağılıma sahip olduğunu göstermektedir.

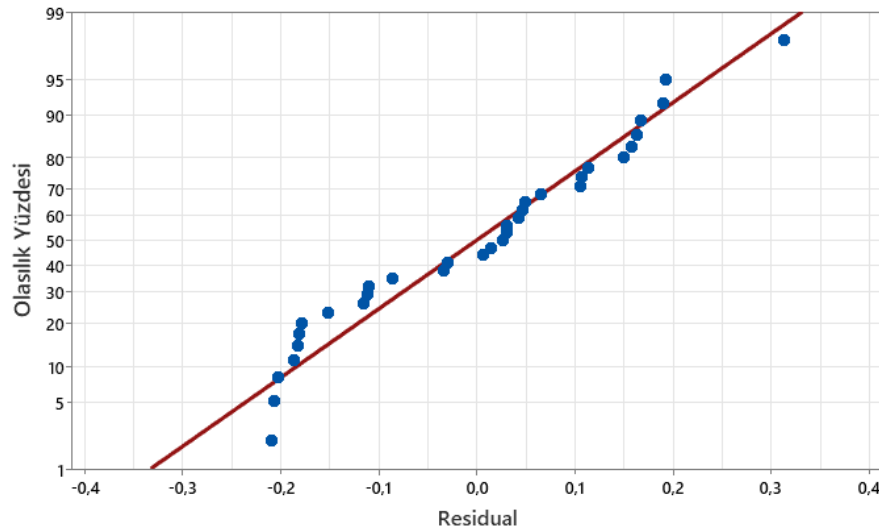


Şekil 5.99. Eğilmede çekme dayanımı için elde edilen a) histogram grafiği ve b) normal olasılık grafiği

YTM kullanılarak yapılan regresyon analizinden elde edilen Denklem 5.2 parametrelerin seviyesine bağlı olarak verilmiştir.

$$ED = 0.66 + 0.07818SD - 0.284YFC + 0.0102UK + 7.91SA + 0.0456KS - 0.00354SD^2 + 0.00867YFC^2 - 0.00113UK^2 - 2.63SA^2 - 0.000408KS^2 \quad (5.2)$$

Buna göre denklem tahmin değerlerinden elde edilen artık değerlerin çoğu pozitif artık değer olmakla birlikte Şekil 5.100’de verilmiştir.



Şekil 5.100. Eğilmede çekme dayanımı için geliştirilen modeldeki hataların normal olasılık grafiği

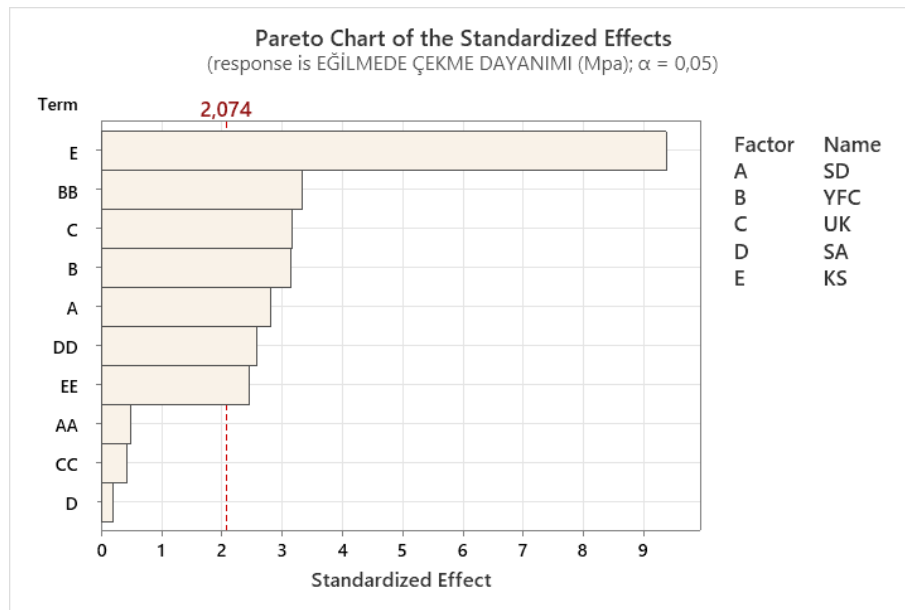
Eğilmede çekme dayanımı ve tasarımlarda kullanılan parametreler arasında parametrelerin hem doğrusal hem de karelerinin katsayıları ile oluşturulan Denklem 5.2’de verilen modele göre. R-kare. R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmin) değerleri sırasıyla Tablo 5.65’te %87.12. %81.26 ve %69.72 olarak verilmiştir. Bu sonuçlarla, yüksek regresyon yüzdelerinin elde edildiği model kabul edilmiştir.

Tablo 5.65. Eğilmede çekme dayanımı için oluşturulan modelin regresyon katsayıları

S	R ²	R ² (düz.)	R ² (tahmin)
0.172280	87.12%	81.26%	69.72%

Tablo 5.66. Eğilmede çekme dayanımı için elde edilen varyans analizi sonuçları

Parametre	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	10	4.41506	0.44151	14.88	0.000
Doğrusal	5	3.53840	0.70768	23.84	0.000
SD	1	0.23663	0.23663	7.97	0.010
YFC	1	0.29321	0.29321	9.88	0.005
UK	1	0.29925	0.29925	10.08	0.004
SA	1	0.00130	0.00130	0.04	0.836
KS	1	2.61181	2.61181	88.00	0.000
Karesel	5	0.65494	0.13099	4.41	0.006
SD*SD	1	0.00725	0.00725	0.24	0.626
YFC*YFC	1	0.32999	0.32999	11.12	0.003
UK*UK	1	0.00571	0.00571	0.19	0.665
SA*SA	1	0.19760	0.19760	6.66	0.017
KS*KS	1	0.18091	0.18091	6.10	0.022
Hata	22	0.65297	0.02968		
Lack-of-Fit	19	0.55420	0.02917	0.89	0.637
Net Hata	3	0.09877	0.03292		
Toplam	32	5.06802			

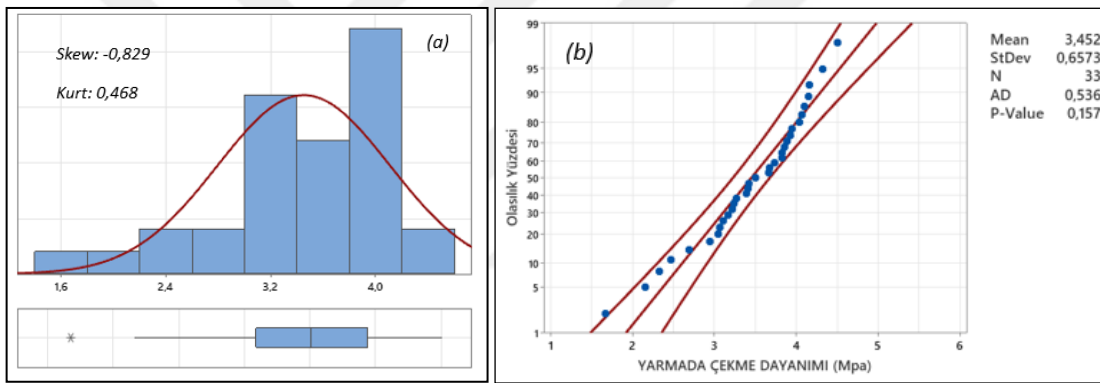


Şekil 5.101. Eğilmede çekme dayanımı için elde edilen parametre etki (pareto) grafiği

Elde edilen modele göre; Tablo 5.66 ve Şekil 5.101 değerlendirildiğinde eğilmede çekme dayanımı üzerinde en etkili parametreler sırasıyla KS ve YFC olurken diğer parametreleri etki oranları birbirine yakın çıkmıştır. Denklem değerlendirilmesinden elde edilen bu sonuçlar; 14, 28 ve 56 günlük eğilmede çekme dayanımı Taguchi analizleri için en etkili parametreler yönüyle örtüşüğünü göstermektedir.

5.10.3. Yarmada çekme dayanımı regresyon denkleminin elde edilmesi

Tüm yaşlardaki yarmada çekme dayanım değerleri histogram grafiğine göre normal dağılıma sahiptir. Şekil 5.102. a’da betimsel istatistik test değerlerinden çarpıklık değerinin -0.829 ve basıklık değerinin 0.468 olması ve Şekil 5.102.b’de normal olasılık grafiğinde verilen P değerinin 0.157 olması verilerin normal dağılıma sahip olduğunu göstermektedir.



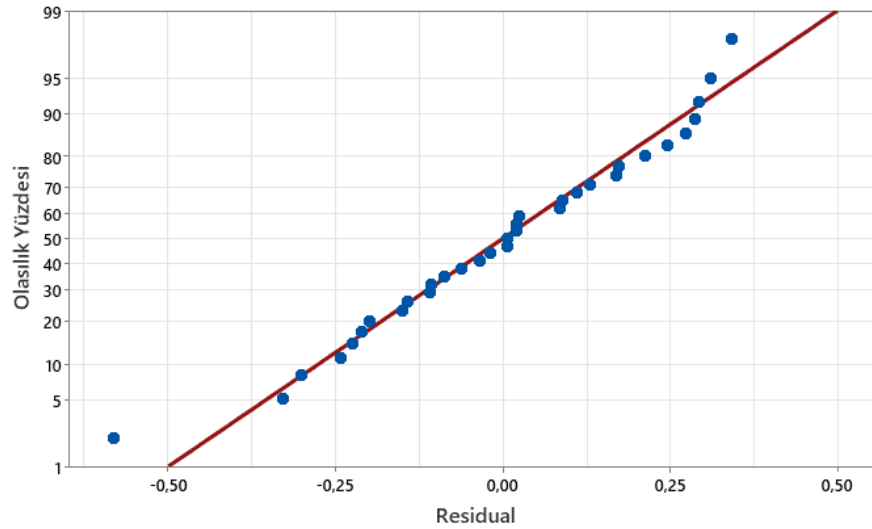
Şekil 5.102. Yarmada çekme dayanımı için elde edilen a) histogram grafiği ve b) normal olasılık grafiği

YTM kullanılarak yapılan regresyon analizinden parametrelerin hem doğrusal hem de karelerinin katsayıları ile elde edilen Denklem 5.3 parametrelerin seviyesine bağlı olarak verilmiştir. Buna göre denklem oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned}
 YD = & -8.98 + 0.209SD - 0.401YFC + 0.032UK + 17.72SA + 0.1162KS \\
 & - 0.0094SD^2 + 0.01316YFC^2 - 0.00265UK^2 - 6.13SA^2 \\
 & - 0.001322KS^2
 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Buna göre denklem tahmin değerlerinden elde edilen artık değerlerin çoğu pozitif artık değer olmakla birlikte Şekil 5.103’te verilmiştir.

Yarmada çekme dayanımı ve tasarımlarda kullanılan parametreler arasında parametrelerin hem doğrusal hem de karelerinin katsayıları ile oluşturulan Denklem 5.3' te verilen modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmin) değerleri sırasıyla Tablo 5.67'de %87.12, %81.26 ve %69.72 olarak verilmiştir. Bu sonuçlarla yüksek regresyon yüzdelерinin elde edildiği model kabul edilmiştir.



Şekil 5.103. Yarmada çekme dayanımı sonuçları için geliştirilen modeldeki hataların normal olasılık grafiği

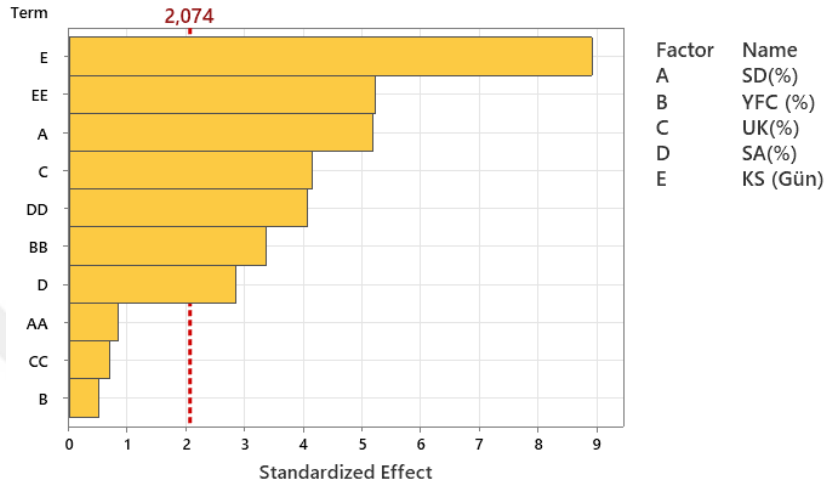
Tablo 5.67. Yarmada çekme dayanımı için oluşturulan modelin regresyon katsayıları

S	R ²	R ² (düz.)	R ² (tahmin)
0.258547	89.36%	84.53%	74.48%

Elde edilen modele göre; Tablo 5.68 ve Şekil 5.104 değerlendirildiğinde yarmada çekme dayanımı üzerinde en etkili parametreler sırasıyla KS ve YFC olurken diğer parametreleri etki oranları birbirine yakın çıkmıştır. Denklem değerlendirilmesinden elde edilen bu sonuçlar; 14, 28 ve 56 günlük yarmada çekme dayanımı Taguchi analizleri için en etkili parametreler yönüyle örtüşmektedir.

Basınç, eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımları için yapılan doğrulama deneyleri ve istatistik yöntemler tarafından tahmin edilen dayanım değerleri Tablo 5.69 ve sırasıyla Şekil 5.105-Şekil 5.107 arasında verilmiştir. Buna göre; 14, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı için verilen parametre seviyelerine göre Taguchi yöntemi ve RSM yöntemi ile elde edilmiş denklemin tahmin değerleri için rölatif hata 14 günlük basınç dayanımında sırasıyla %3.62 ve %0.36, 28 günlük basınç dayanımında sırasıyla %8.76 ve %3.7 ve 56 günlük basınç dayanımında sırasıyla %9.58 ve %5.15 olarak

gerçekleşmiştir. Ayrıca 14, 28 ve 56 günlük eğilmede çekme dayanımı için verilen parametre seviyelerine göre Taguchi yöntemi ve YTM yöntemi ile elde edilmiş denklemin tahmin değerleri için rölatif hata 14 günlük eğilmede çekme dayanımında %1.43. 28 günlük eğilmede çekme dayanımında sırasıyla %2.33 ve %3 ve 56 günlük eğilmede çekme dayanımında sırasıyla %4.1 ve %4.41 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.104. Yarmada çekme dayanımı için elde edilen parametre etki (pareto) grafiği

Tablo 5.68. Yarmada çekme dayanımı için elde edilen varyans analizi sonuçları

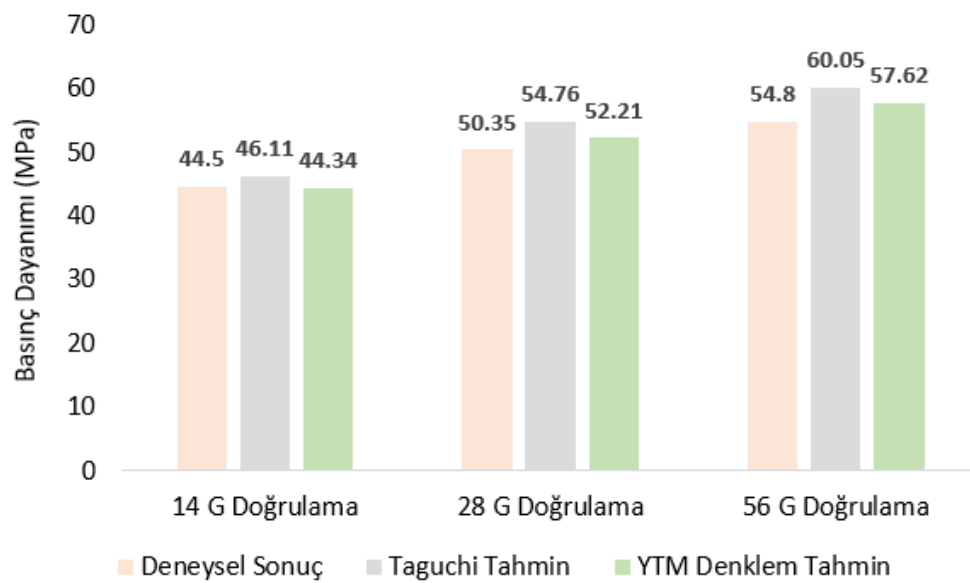
Parametre	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	10	12.3538	1.23538	18.48	0.000000
Doğrusal	5	8.8387	1.76774	26.44	0.000000
SD(%)	1	1.8006	1.80064	26.94	0.000033
YFC (%)	1	0.0177	0.01774	0.27	0.611609
UK(%)	1	1.1528	1.15278	17.25	0.000416
SA(%)	1	0.5417	0.54173	8.10	0.009382
KS (Gün)	1	5.3190	5.31899	79.57	0.000000
Karesel	5	3.3376	0.66752	9.99	0.000043
SD(%)*SD(%)	1	0.0480	0.04796	0.72	0.406122
YFC (%)*YFC (%)	1	0.7574	0.75736	11.33	0.002789
UK(%)*UK(%)	1	0.0328	0.03285	0.49	0.490671
SA(%)*SA(%)	1	1.1004	1.10043	16.46	0.000524
KS (Gün)*KS (Gün)	1	1.8210	1.82103	27.24	0.000031
Hata	22	1.4706	0.06685		
Lack-of-Fit	19	1.4469	0.07615	9.62	0.043258
Net Hata	3	0.0237	0.00792		
Toplam	32	13.8245			

Diğer yandan 14, 28 ve 56 günlük yarmada çekme dayanımı için verilen parametre seviyelerine göre Taguchi yöntemi ve YTM yöntemi ile elde edilmiş denklemin tahmin değerleri için rölatif hata 14 günlük yarmada çekme dayanımında sırasıyla %3.13 ve

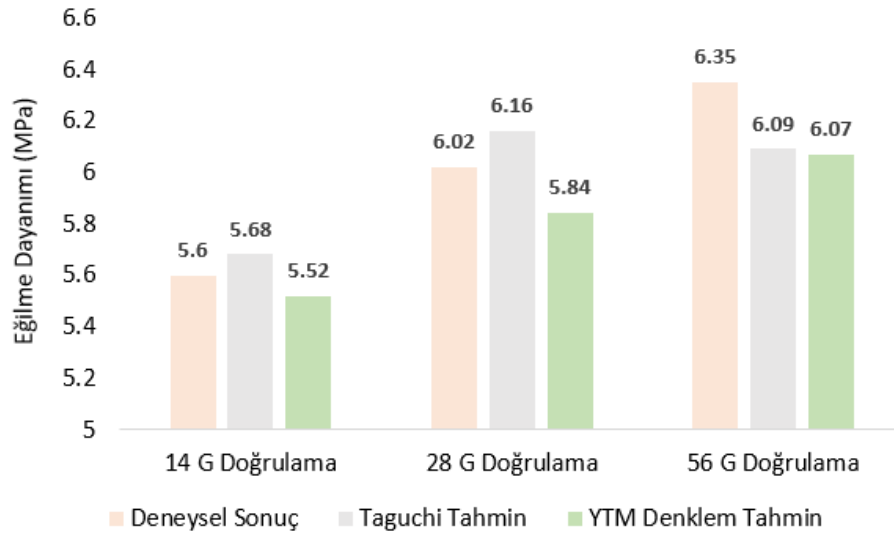
%4.43, 28 günlük yarmada çekme dayanımında sırasıyla %4.88 ve %5.61 ve 56 günlük eğilmede çekme dayanımında sırasıyla %0.66 ve %2.86 olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 5.69. Doğrulama deneyi yapılmış tüm dayanımlar için Taguchi Yöntemi ve RSM denkleminin tahmin değerleri

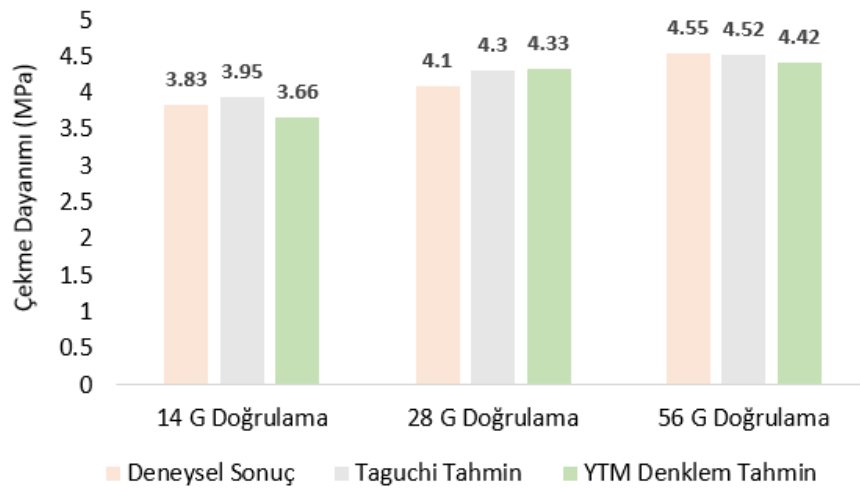
Basınç dayanımı (MPa)							
Seri adı	SD (%)	YFC (%)	UK (%)	SA (%)	DeneySEL sonuç	Taguchi tahmin	YTM denklem tahmin
14 G Doğrulama	6	10	10	1.5	44.50	46.11	44.34
28 G Doğrulama	9	20	10	1.5	50.35	54.76	52.21
56 G Doğrulama	9	20	15	1.5	54.80	60.05	57.62
Eğilmede çekme dayanımı (MPa)							
14 G Doğrulama	6	10	10	1.5	5.60	5.68	5.52
28 G Doğrulama	9	10	10	1.75	6.02	6.16	5.84
56 G Doğrulama	9	20	10	1.5	6.35	6.09	6.07
Yarmada çekme dayanımı (MPa)							
14 G Doğrulama	9	10	10	1.5	3.83	3.95	3.66
28 G Doğrulama	9	10	15	1.5	4.10	4.30	4.33
56 G Doğrulama	9	20	15	1.5	4.55	4.52	4.42



Şekil 5.105. Basınç dayanımı doğrulama deney sonuçlarının Taguchi ve YTM tahmin sonuçları ile karşılaştırılması



Şekil 5.106. Eğilme dayanımı doğrulama deney sonuçlarının Taguchi ve YTM tahmin sonuçları ile karşılaştırılması



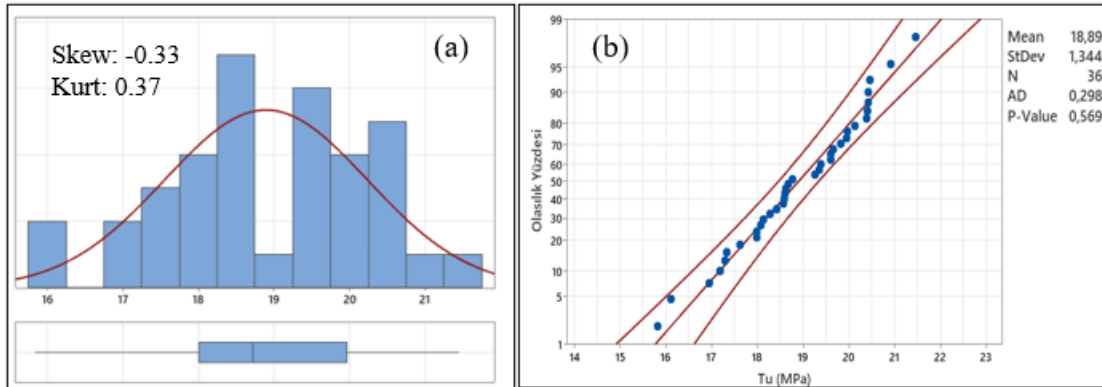
Şekil 5.107. Yarmada çekme dayanımı doğrulama deney sonuçlarının Taguchi ve YTM tahmin sonuçları ile karşılaştırılması

5.10.4. Maksimum bağ dayanımı regresyon denkleminin elde edilmesi

Tüm durumlarda elde edilen bağ dayanım değerleri histogram grafiğine göre normal dağılıma sahiptir. Şekil 5.108.a’da betimsel istatistik test çarpıklık değerinin -0.33 ve basıklık değerinin -0.37 olması ve Şekil 5.108.b’de normal olasılık grafiğinde verilen P değerinin 0.569 olması verilerin normal dağılıma sahip olduğunu göstermektedir.

YTM kullanılarak yapılan regresyon analizinden elde edilen Denklem 5.4-5.7 parametrelerin hem doğrusal hem de karelerinin katsayıları ile farklı korozyon durumları için ve parametrelerin seviyesine bağlı olarak K0, K2, K4 ve K6 durumları için sırasıyla

verilmiştir. Buna göre denklem tahmin değerlerinden elde edilen artık değerlerin çoğu pozitif artık değer olmakla birlikte Şekil 5.109’da verilmiştir.



Şekil 5.108. τ_u için elde edilen a) histogram grafiği ve b) normal olasılık grafiği

$$\tau_u(\text{MPa}) = -4.27 + 0.303SD + 1.497YFC + 0.596UK + 4.7SA - 0.0170SD^2 - 0.0423YFC^2 - 0.0243UK^2 - 0.54SA^2 \quad (5.4)$$

$$\tau_u(\text{MPa}) = -2.75 + 0.216SD + 1.508YFC + 0.676UK + 3.9SA - 0.0170SD^2 - 0.0423YFC^2 - 0.0243UK^2 - 0.54SA^2 \quad (5.5)$$

$$\tau_u(\text{MPa}) = 1.03 + 0.104SD + 1.261YFC + 0.662UK + 4.8SA - 0.0170SD^2 - 0.0423YFC^2 - 0.0243UK^2 - 0.54SA^2 \quad (5.6)$$

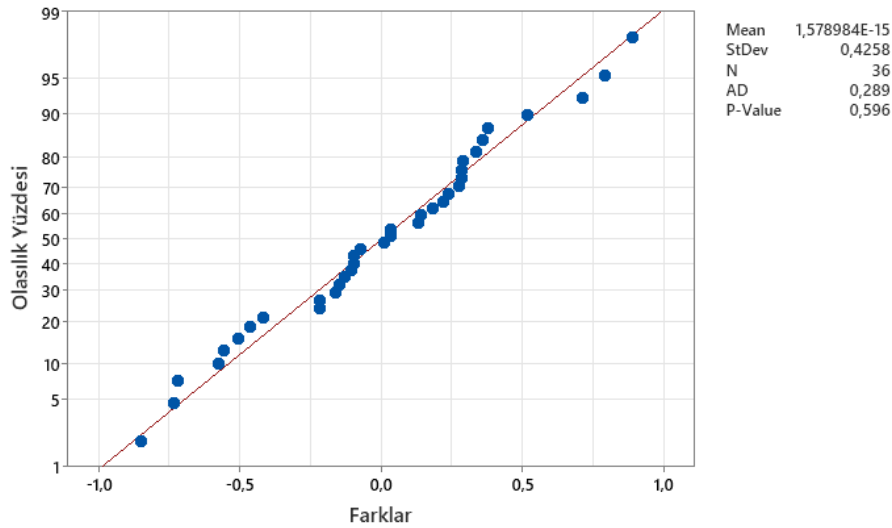
$$\tau_u(\text{MPa}) = 0.62 + 0.247SD + 1.381YFC + 0.710UK + 2.3SA - 0.0170SD^2 - 0.0423YFC^2 - 0.0243UK^2 - 0.54SA^2 \quad (5.7)$$

Maksimum aderans dayanımı ve tasarımlarda kullanılan parametreler arasında oluşturulan modele göre, R-kare ve R-kare (tahmin) değerleri sırasıyla Tablo 5.70’te %89.96 ve %70.73 olarak verilmiştir.

Tablo 5.70. Aderans dayanımı τ_u için oluşturulan modelin regresyon katsayıları

S	R ²	R ² (tahmin)
0.727158	89.96%	70.73%

Bu sonuçlara göre, görece yüksek regresyon yüzdelерinin elde edildiği model kabul edilmiştir. Geliştirilen denklemlerde parametrelere bağlı olarak tahmin sonucunu daha anlamlı ve yüksek oranda temsil etmek amacıyla parametrelerin kareleri de modelde kullanılmıştır (Cihan vd., 2013).

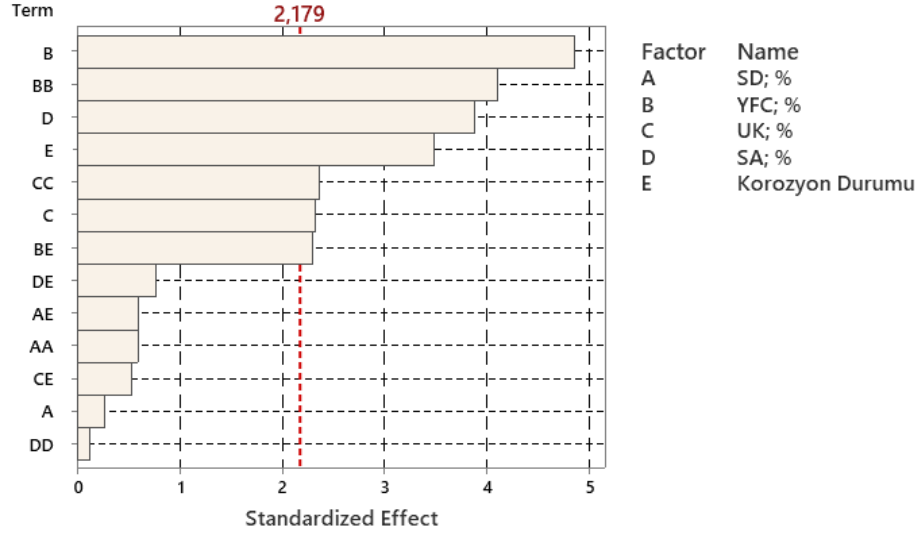


Şekil 5.109. Maksimum aderans dayanımı sonuçları için geliştirilen modellerdeki hataların normal olasılık grafiği

Tablo 5.71. Aderans dayanımı regresyon denklemi için elde edilen varyans analizi sonuçları

Parametre	DF	Seq SS	Katkı Yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	23	56.8767	89.96%	56.8767	2.4729	4.68	0.004
Doğrusal	7	35.1378	55.58%	35.1378	5.0197	9.49	0.000
SD; %	1	0.0384	0.06%	0.0384	0.0384	0.07	0.792
YFC; %	1	12.4978	19.77%	12.4978	12.4978	23.64	0.000
UK; %	1	2.8636	4.53%	2.8636	2.8636	5.42	0.038
SA; %	1	7.9429	12.56%	7.9429	7.9429	15.02	0.002
Korozyon durumu	3	11.7950	18.66%	11.7950	3.9317	7.44	0.004
Karesel	4	12.0840	19.11%	12.0840	3.0210	5.71	0.008
SD; %*SD; %	1	0.1874	0.30%	0.1874	0.1874	0.35	0.563
YFC; %*YFC; %	1	8.9258	14.12%	8.9258	8.9258	16.88	0.001
UK; %*UK; %	1	2.9616	4.68%	2.9616	2.9616	5.60	0.036
SA; %*SA; %	1	0.0092	0.01%	0.0092	0.0092	0.02	0.897
2-Way Interaction	12	9.6550	15.27%	9.6550	0.8046	1.52	0.239
SD; %*Korozyon durumu	3	1.1479	1.82%	1.1479	0.3826	0.72	0.557
YFC; %*Korozyon durumu	3	6.0262	9.53%	6.0262	2.0087	3.80	0.040
UK; %*Korozyon durumu	3	1.0166	1.61%	1.0166	0.3389	0.64	0.603
SA; %*Korozyon durumu	3	1.4643	2.32%	1.4643	0.4881	0.92	0.459
Hata	12	6.3451	10.04%	6.3451	0.5288		
Toplam	35	63.2218	100.00%				

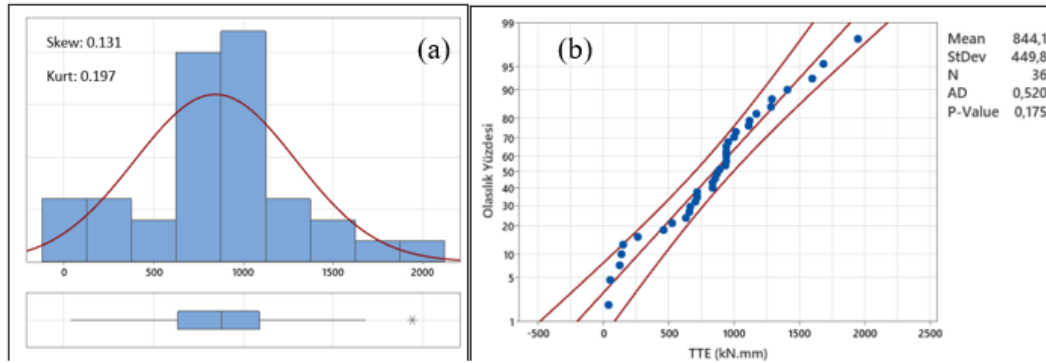
Elde edilen modele göre; Tablo 5.71 ve Şekil 5.110 değerlendirildiğinde maksimum bağ dayanımı üzerinde en etkili parametreler sırasıyla yüksek fırın cürufu ve süper akışkanlaştırıcı olmuştur. Denklemin istatistik açıdan değerlendirilmesinden elde edilen bu sonuçlar; farklı korozyon durumlarında aderans dayanımı Taguchi analizleri için en etkili parametreler yönüyle örtüşmektedir.



Şekil 5.110. Maksimum bağ dayanımı (τ) için elde edilen parametre etki (pareto) grafiği

5.10.5. Toplam tüketilen enerji için regresyon denkleminin elde edilmesi

Tüm durumlarda elde edilen TTE değerleri histogram grafiğine göre normal dağılıma sahiptir. Şekil 5.111.a’da betimsel istatistik test çarpıklık değerinin 0.131 ve basıklık değerinin 0.175 olması ve Şekil 5.111.b’de normal olasılık grafiğinde verilen P değerinin 0.569 olması verilerin normal dağılıma sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.111. TTE için elde edilen a) histogram grafiği ve b) normal olasılık grafiği

YTM kullanılarak yapılan regresyon analizinden elde edilen Denklem 5.8-5.11 parametrelerin hem doğrusal hem de karelerinin katsayıları ile farklı korozyon durumları için ve parametrelerin seviyesine bağlı olarak K0, K2, K4 ve K6 durumları için sırasıyla verilmiştir.

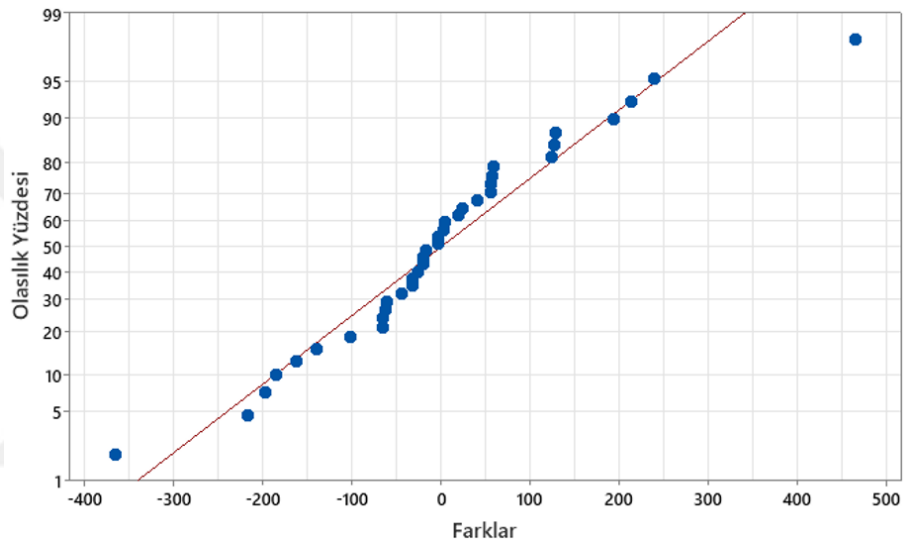
Buna göre denklem tahmin değerlerinden elde edilen artık değerlerin çoğu pozitif artık değer olmakla birlikte Şekil 5.112’de verilmiştir.

$$TTE(kNmm) = -3124 + 173SD + 311YFC + 268UK - 2210SA - 14.81SD^2 - 8.54YFC^2 - 9.35UK^2 + 988SA^2 \quad (5.8)$$

$$TTE(kNmm) = -3210 + 162SD + 318YFC + 277UK - 2206SA - 14.81SD^2 - 8.54YFC^2 - 9.35UK^2 + 988SA^2 \quad (5.9)$$

$$TTE(kNmm) = -2221 + 207SD + 282YFC + 231UK - 1923SA - 14.81SD^2 - 8.54YFC^2 - 9.35UK^2 + 988SA^2 \quad (5.10)$$

$$TTE(kNmm) = -4087 + 146SD + 318YFC + 312UK - 1766SA - 14.81SD^2 - 8.54YFC^2 - 9.35UK^2 + 988SA^2 \quad (5.11)$$



Şekil 5.112. TTE sonuçları için geliştirilen modeldeki hataların normal olasılık grafiği

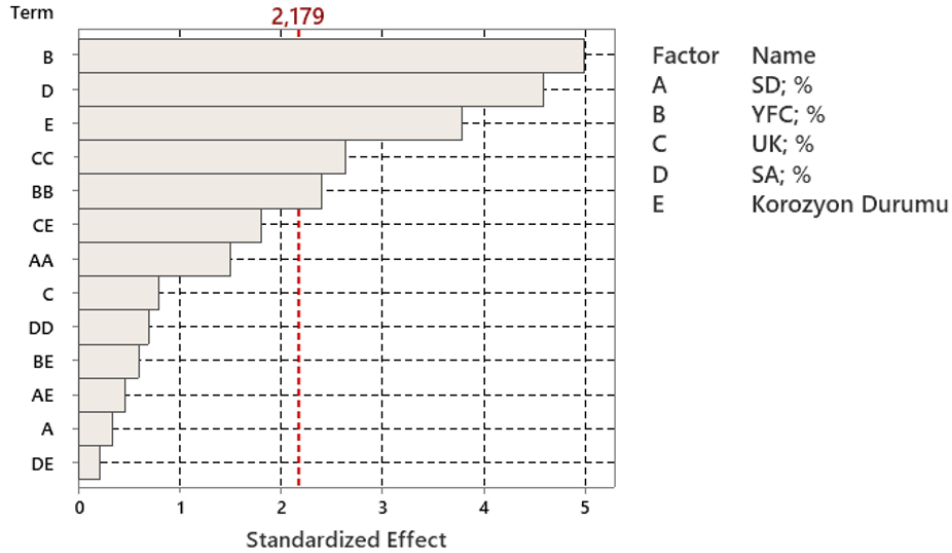
TTE ve tasarımlarda kullanılan parametreler arasında oluşturulan modele göre, R-kare ve R-kare (tahmin) değerleri sırasıyla Tablo 5.72’de %89.35 ve %68.95 olarak verilmiştir.

Tablo 5.72. TTE için oluşturulan modelin regresyon katsayıları

S	R ²	R ² (tahmin)
250.639	89.35%	68.95%

Bu sonuçlara göre görece yüksek regresyon yüzdelerinin elde edildiği model kabul edilmiştir. Geliştirilen denklemde parametrelere bağlı olarak tahmin sonucunu daha anlamlı ve yüksek oranda temsil etmek amacıyla parametrelerin kareleri de modelde kullanılmıştır (Cihan vd., 2013). Elde edilen modele göre; Tablo 5.73 ve Şekil 5.113 değerlendirildiğinde maksimum bağ dayanımı üzerinde en etkili parametreler sırasıyla

yüksek fırın cürufu ve süper akışkanlaştırıcı olmuştur. Denklemin istatistik açıdan değerlendirilmesinden elde edilen bu sonuçlar; farklı korozyon durumlarında TTE Taguchi analizleri için en etkili parametreler yönüyle örtüşmektedir.



Şekil 5.112 TTE için elde edilen parametre etki (pareto) grafiği

Tablo 5.73. TTE regresyon denklemi için elde edilen varyans analizi sonuçları

Parametre	DF	Seq SS	Katkı Yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	23	6326583	89.35%	6326583	275069	4.38	0.005389
Doğrusal	7	4557536	64.37%	4557536	651077	10.36	0.000295
SD; %	1	7304	0.10%	7304	7304	0.12	0.739015
YFC; %	1	1565602	22.11%	1565602	1565602	24.92	0.000313
UK; %	1	40531	0.57%	40531	40531	0.65	0.437456
SA; %	1	1323305	18.69%	1323305	1323305	21.07	0.000622
Korozyon durumu	3	1620795	22.89%	1620795	540265	8.60	0.002560
Karesel	4	974062	13.76%	974062	243516	3.88	0.030218
SD; %*SD; %	1	142190	2.01%	142190	142190	2.26	0.158315
YFC; %*YFC; %	1	364447	5.15%	364447	364447	5.80	0.032995
UK; %*UK; %	1	436891	6.17%	436891	436891	6.95	0.021687
SA; %*SA; %	1	30533	0.43%	30533	30533	0.49	0.498981
2-Way Interaction	12	794984	11.23%	794984	66249	1.05	0.464085
SD; %*Korozyon durumu	3	106240	1.50%	106240	35413	0.56	0.649195
YFC; %*Korozyon durumu	3	134818	1.90%	134818	44939	0.72	0.561522
UK; %*Korozyon durumu	3	499793	7.06%	499793	166598	2.65	0.096249
SA; %*Korozyon durumu	3	54133	0.76%	54133	18044	0.29	0.833745
Hata	12	753838	10.65%	753838	62820		
Toplam	35	7080420	100.00%				

5.11. Gri İlişkisel Analiz ve Entropi ile Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV)

Deneyisel çalışmalarda parametre optimizasyonu genellikle sinyal-gürültü oranı (S/N) kullanılarak geleneksel Taguchi yaklaşımına göre yapılmaktadır. Daha yüksek ve daha düşük sinyal-gürültü oranı. seçilen tasarım kriteri için parametrelerin optimum

olanına daha yakın olduğu anlamına gelmektedir. Diğer yandan Taguchi metodu kullanılarak tek yanıtli optimizasyon yapılabilmekte yanıt sayısı birden fazla olduğunda çoklu kriter optimizasyonu yapılamamaktadır. Bu nedenle tez kapsamında çok kriterli optimizasyon problemlerini çözmek için Taguchi yöntemiyle birleştirilmiş Gri İlişkisel Analiz (GİA) metodu uygulanmıştır. Buna göre; 28 günlük dayanım ve dayanıklılık performans deneyleri için ayrı ayrı GİA yapılmıştır. Dayanım performans deneyleri için en büyük en iyi dayanıklılık performans deneyleri için en küçük en iyi karakteristikleri kullanılmıştır (Rao vd., 2016).

5.11.1. Dayanım kriterleri için GİA yapılarak optimum serinin seçilmesi

Burada; 28 günlük deney sonuçlarına göre yapılmış istatistiksel analizlerden elde edilen S/N oranları kullanılıp Taguchi tabanlı GİA yöntemi uygulanarak çoklu kriterlere göre GİD'si tespit edilmiştir. Her seri için bulunan GİD'e göre en büyük – en iyi durumunda çoklu kriterler için seriler arasında optimum sonucun elde edildiği seri belirlenmiştir. GİA'ya göre göz önünde bulundurulacak kriterler; basınç dayanımı (BD), eğilmede çekme dayanımı (ED), yarmada çekme dayanımı (ÇD), ultra ses geçiş hızı (UPV) ve K0, K2, K4, K6 durumlarında pullout deney sonuçlarından elde edilen T_u ve TTE değerleridir. Tablo 5.74'te S/N oranları kullanılarak oluşturulmuş giriş veri değerleri sunulmuştur. Tablo 5.75'te Denklem 3.7' ye göre hesaplanmış normalizasyon matrisi, Tablo 5.76'da ise mutlak değer matrisi verilmiştir. Tablo 5.77'de Denklem 3.9' a göre hesaplanmış gri ilişki katsayı matrisi verilmiştir. Bu aşamada kriter ağırlık oranları hem entropi yöntemi uygulanarak belirlenmiş hem de kriterlerin ağırlıkları eşit alınarak değerlendirme yapılmıştır. Entropi yöntemi ile kriter ağırlıklarının tespit edilmesi adımları Denklem 3.11 ve Denklem 3.14 arasında verilen formüllere göre hesaplanarak Tablo 5.79-5.80'de verilmiştir. Aynı zamanda eşit ağırlık ilkesine göre belirlenmiş gri ilişki katsayıları kullanılarak da derecelendirme yapılmıştır. Buna göre ağırlık oranları değişiminin seçime olan etkisi irdelenmiştir

Tablo 5.74. Taguchi analizi yapılarak bulunan S/N oranlarına göre giriş verilerinin belirlenmesi

Seri Adı	28 Günlük BD (MPa)	28 Günlük ED (MPa)	28 Günlük ÇD (MPa)	28 Günlük UPV (km/s)	28 Günlük Pullout TTE (kN.mm)	28 Günlük Pullout Tu (MPa)
M1	33.36	14.71	11.46	14.30	41.72	24.74
M2	33.28	14.65	10.66	14.15	60.55	25.98
M3	31.10	14.58	9.74	13.61	60.87	25.66
M4	32.55	15.25	11.66	13.91	59.05	25.62
M5	31.65	14.10	10.18	13.84	57.01	25.36
M6	34.78	14.79	11.93	14.70	60.18	25.81
M7	33.14	15.10	11.89	14.30	47.37	24.74
M8	32.85	15.58	10.60	14.30	60.88	26.00
M9	33.25	14.96	12.19	14.44	58.76	25.62

*İlgili hedef deney değerinin maksimum olduğu seri koyu renkle gösterilmiştir

Tablo 5.75. En büyük en iyi kriterine göre veri normalizasyonun yapılması

Seri Adı	28 Günlük BD (MPa)	28 Günlük ED (MPa)	28 Günlük ÇD (MPa)	28 Günlük UPV (km/s)	28 Günlük Pullout TTE (kN.mm)	28 Günlük Pullout Tu (MPa)
M1	0.6139	0.4141	0.7001	0.6395	0.0000	0.0001
M2	0.5914	0.3707	0.3725	0.5000	0.9826	0.9846
M3	0.0000	0.3270	0.0000	0.0000	0.9996	0.7265
M4	0.3932	0.7807	0.7844	0.2781	0.9047	0.6974
M5	0.1504	0.0000	0.1802	0.2135	0.7979	0.4939
M6	1.0000	0.4679	0.8939	1.0000	0.9637	0.8517
M7	0.5553	0.6783	0.8759	0.6395	0.2946	0.0000
M8	0.4747	1.0000	0.3516	0.6395	1.0000	1.0000
M9	0.5839	0.5846	1.0000	0.7615	0.8892	0.6973

Tablo 5.76. Mutlak değer matrisinin bulunması

Seri Adı	28 Günlük BD (MPa)	28 Günlük ED (MPa)	28 Günlük ÇD (MPa)	28 Günlük UPV (km/s)	28 Günlük Pullout TTE (kN.mm)	28 Günlük Pullout Tu (MPa)
M1	0.3861	0.5859	0.2999	0.3605	1.0000	0.9999
M2	0.4086	0.6293	0.6275	0.5000	0.0174	0.0154
M3	1.0000	0.6730	1.0000	1.0000	0.0004	0.2735
M4	0.6068	0.2193	0.2156	0.7219	0.0953	0.3026
M5	0.8496	1.0000	0.8198	0.7865	0.2021	0.5061
M6	0.0000	0.5321	0.1061	0.0000	0.0363	0.1483
M7	0.4447	0.3217	0.1241	0.3605	0.7054	1.0000
M8	0.5253	0.0000	0.6484	0.3605	0.0000	0.0000
M9	0.4161	0.4154	0.0000	0.2385	0.1108	0.3027

Tablo 5.77. Gri ilişki katsayısının bulunması

Seri Adı	28 Günlük BD (MPa)	28 Günlük ED (MPa)	28 Günlük ÇD (MPa)	28 Günlük UPV (km/s)	28 Günlük Pullout TTE (kN.mm)	28 Günlük Pullout Tu (MPa)
M1	0.5642	0.4605	0.6251	0.5811	0.3333	0.3334
M2	0.5503	0.4428	0.4435	0.5000	0.9664	0.9700
M3	0.3333	0.4263	0.3333	0.3333	0.9992	0.6464
M4	0.4517	0.6952	0.6988	0.4092	0.8399	0.6230
M5	0.3705	0.3333	0.3788	0.3887	0.7121	0.4970
M6	1.0000	0.4845	0.8249	1.0000	0.9323	0.7712
M7	0.5293	0.6085	0.8011	0.5811	0.4148	0.3333
M8	0.4877	1.0000	0.4354	0.5811	1.0000	1.0000
M9	0.5458	0.5462	1.0000	0.6771	0.8186	0.6229

Tablo 5.78. Eşit ağırlık ilkesine göre gri ilişki derecesinin belirlenmesi

Seri Adı	Silis Dumanı İkame (%)	Yüksek Fırın Cürufu İkame (%)	Uçucu Kül İkame (%)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Eşit Ağırlıklı Gri İlişki Derecesi (GİD)	Sıralama
M1	3.00	10.00	10.00	1.25	0.4829	8
M2	3.00	15.00	15.00	1.50	0.6455	4
M3	3.00	20.00	20.00	1.75	0.5120	7
M4	6.00	10.00	15.00	1.75	0.6196	5
M5	6.00	15.00	20.00	1.25	0.4467	9
M6*	6.00	20.00	10.00	1.50	0.8355	1
M7	9.00	10.00	20.00	1.50	0.5447	6
M8	9.00	15.00	10.00	1.75	0.7507	2
M9	9.00	20.00	15.00	1.25	0.7018	3

M6*: Gri ilişki derecesine göre kriterler için en uygun seri

Tablo 5.79. Entropide normalize karar matrisi

Seri Adı	28 Günlük BD (MPa)	28 Günlük ED (MPa)	28 Günlük ÇD (MPa)	28 Günlük UPV (km/s)	28 Günlük Pullout TTE (kN.mm)	28 Günlük Pullout Tu (MPa)
M1	0.1127	0.1100	0.1142	0.1121	0.0824	0.1078
M2	0.1124	0.1095	0.1062	0.1109	0.1196	0.1132
M3	0.1051	0.1090	0.0971	0.1067	0.1202	0.1118
M4	0.1100	0.1141	0.1163	0.1091	0.1166	0.1116
M5	0.1070	0.1054	0.1015	0.1085	0.1126	0.1105
M6	0.1175	0.1106	0.1189	0.1152	0.1188	0.1125
M7	0.1120	0.1129	0.1185	0.1121	0.0935	0.1078
M8	0.1110	0.1165	0.1057	0.1121	0.1202	0.1133
M9	0.1123	0.1119	0.1215	0.1132	0.1160	0.1116

Tablo 5.80. Entropi değerleri ve kriter ağırlık oranının belirlenmesi

Seri Adı	28 Günlük BD (MPa)	28 Günlük ED (MPa)	28 Günlük ÇD (MPa)	28 Günlük UPV (km/s)	28 Günlük Pullout TTE (kN.mm)	28 Günlük Pullout Tu (MPa)
M1	-0.2460	-0.2428	-0.2478	-0.2454	-0.2057	-0.2401
M2	-0.2457	-0.2422	-0.2382	-0.2439	-0.2539	-0.2466
M3	-0.2368	-0.2416	-0.2265	-0.2387	-0.2547	-0.2449
M4	-0.2428	-0.2476	-0.2502	-0.2417	-0.2506	-0.2447
M5	-0.2391	-0.2372	-0.2322	-0.2410	-0.2459	-0.2434
M6	-0.2516	-0.2435	-0.2532	-0.2490	-0.2531	-0.2457
M7	-0.2452	-0.2463	-0.2527	-0.2454	-0.2216	-0.2401
M8	-0.2440	-0.2504	-0.2375	-0.2454	-0.2547	-0.2467
M9	-0.2456	-0.2451	-0.2561	-0.2466	-0.2499	-0.2447
<i>e_j</i>	0.9998	0.9998	0.9988	0.9999	0.9968	0.9999
<i>d_j</i>	0.000210	0.000168	0.001245	0.000113	0.003234	0.000071
<i>W_j[*]</i>	0.0417	0.0333	0.2470	0.0224	0.6416	0.0140

W_j^{*}: Kriter ağırlık oranını ifade etmektedir.

Tablo 5.81. Entropi ile bulunan ağırlık oranları kullanılarak hesaplanmış gri ilişki katsayısı

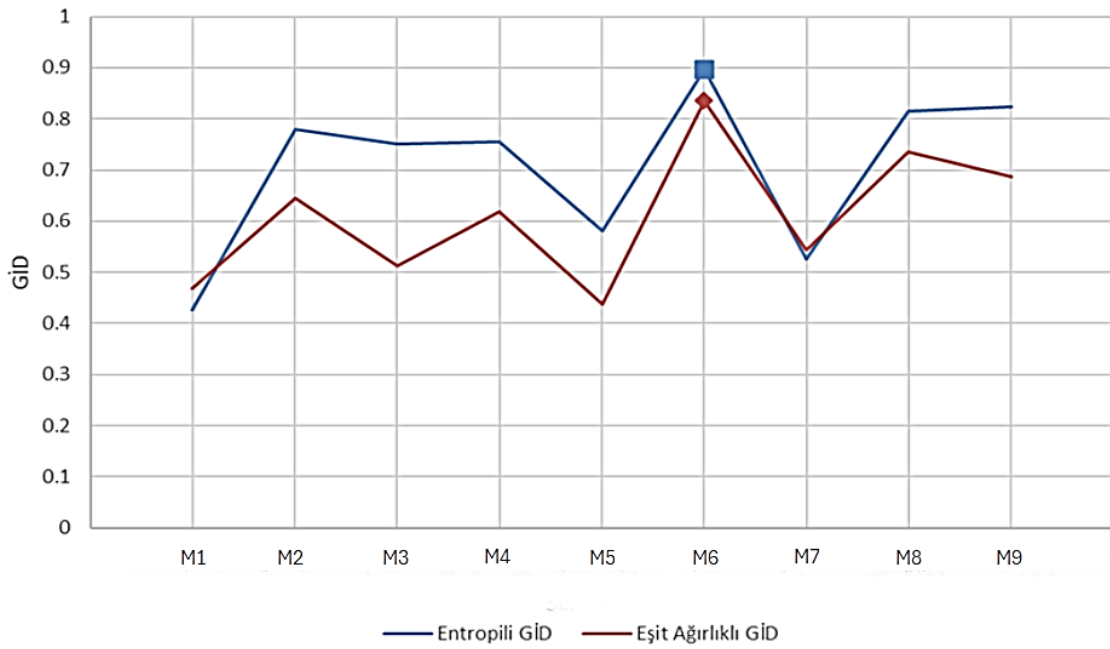
Seri Adı	28 Günlük BD (MPa)	28 Günlük ED (MPa)	28 Günlük ÇD (MPa)	28 Günlük UPV (km/s)	28 Günlük Pullout TTE (kN.mm)	28 Günlük Pullout Tu (MPa)
M1	0.023521	0.015333	0.154400	0.013024	0.213866	0.004666
M2	0.022940	0.014744	0.109538	0.011207	0.620022	0.013577
M3	0.013895	0.014195	0.082335	0.007471	0.641096	0.009048
M4	0.018831	0.023149	0.172598	0.009171	0.538852	0.008719
M5	0.015443	0.011100	0.093575	0.008711	0.456906	0.006956
M6	0.041686	0.016133	0.203753	0.022413	0.598157	0.010795
M7	0.022063	0.020263	0.197876	0.013024	0.266145	0.004666
M8	0.020329	0.033300	0.107548	0.013024	0.641599	0.013997
M9	0.022752	0.018188	0.247005	0.015175	0.525236	0.008718

Tablo 5.82. Entropi kriter ağırlıklarına göre gri ilişki derecesinin belirlenmesi

Seri Adı	Silis Dumanı İkame (%)	Yüksek Fırın Cürufu İkame (%)	Uçucu Kül İkame (%)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Farklı Ağırlıklı Gri İlişki Derecesi (GİD)	Sıralama
M1	3.00	10.00	10.00	1.25	0.424811	9
M2	3.00	15.00	15.00	1.50	0.792029	4
M3	3.00	20.00	20.00	1.75	0.768040	6
M4	6.00	10.00	15.00	1.75	0.771321	5
M5	6.00	15.00	20.00	1.25	0.592692	7
M6*	6.00	20.00	10.00	1.50	0.892936	1
M7	9.00	10.00	20.00	1.50	0.524037	8
M8	9.00	15.00	10.00	1.75	0.829797	3
M9	9.00	20.00	15.00	1.25	0.837074	2

M6*: Gri ilişki derecesine göre kriterler için en uygun seri

Entropi yöntemi ile bulunan, objektif bir değerlendirmeyeyle belirlenen kriter ağırlık oranları ve her kriterin ağırlık oranının eşit alındığı durum olan eşit ağırlık kabulü ile yapılan değerlendirme için Şekil 5.114'te verilen duyarlılık analizine göre kriterlerin ağırlık oranları farklı değerler olsa da GİD'nin en yüksek olduğu sıralama seviyesi 1 olan M6 serisi değişmemiştir. Buna göre; ÇKKV'de L9 ortogonal dizi içinde bulunan parametre seviyeleri, SD için %6, YFC için %20, UK için %10 ve SA için %1.5 olarak belirlenmiştir.



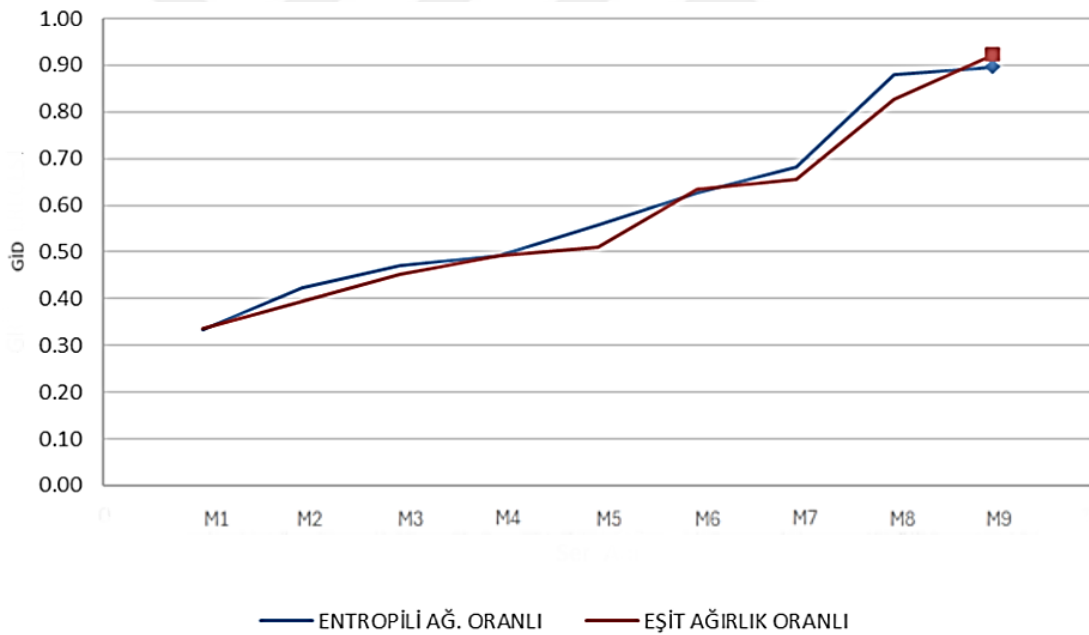
Şekil 5.114. Farklı ağırlık oranlarında gri ilişki derecesinin değişimi (Duyarlılık)

5.11.2. Dayanıklılık kriterleri için GİA yapılarak optimum serinin seçilmesi

28 günlük deney sonuçlarına göre yapılmış istatistiksel analizlerden elde edilen S/N oranları kullanılıp Taguchi tabanlı GİA yöntemi uygulanarak çoklu kriterlere göre GİD tespit edilmiştir. Her seri için bulunan GİD'e göre en büyük – en iyi durumunda çoklu kriterler için seriler arasında optimum sonucun elde edildiği seri belirlenmiştir. Buna göre GİA uygulanan kriterler; su emme yüzdesi, K2, K4 ve K6 durumları için çekilen ortalama korozyon akımları ve K2, K4 ve K6 durumları için ortalama gerçek ağırlık kaybı değerleridir. Tablo 5.83'te S/N oranları kullanılarak oluşturulmuş giriş veri değerleri verilmiştir. Tablo 5.84'te Denklem 3.8'e göre hesaplanmış normalizasyon matrisi, Tablo 5.85'te ise mutlak değer matrisi verilmiştir. Tablo 5.86'da Denklem 3.9'a göre hesaplanmış gri ilişki katsayı matrisi verilmiştir. Tablo 5.87'de kriterlerin eşit ağırlık oranında derecelendirildiği durum için GİD değerleri verilmiştir. Sonrasında; kriter

ağırlık oranları, entropi yöntemi uygulanarak belirlenmiş ve Tablo 5.88-5.89’da verilmiştir. Entropi yöntemi ile kriter ağırlıklarının tespit edilmesi adımları Denklem 3.11-3.14’te verilmiştir. Tablo 5.91’de entropi yöntemi kullanılarak objektif kriter ağırlık oranlarına göre hesaplanmış GİD değerleri verilmiştir. Aynı zamanda eşit ağırlık ilkesine göre belirlenmiş gri ilişki katsayıları kullanılarak da derecelendirme yapılmıştır. Ağırlık oranı değişiminin seçime olan etkisi irdelenmiştir.

Entropi yöntemi ile bulunan. objektif bir değerlendirmeyeyle belirlenen kriter ağırlık oranları ve her kriterin ağırlık oranının eşit alındığı durum olan eşit ağırlık kabulü ile yapılan değerlendirme için Şekil 5.115’te verilen duyarlılık analizine göre kriterlerin ağırlık oranları farklı değerler olsa da GİD’nin en yüksek olduğu sıralama seviyesi (rank) 1 olan M9 serisi değişmemiştir. Buna göre; ÇKKV’de L9 ortogonal dizi içinde bulunan parametre seviyeleri silis dumunu için %9. yüksek fırın cürufu için %20. uçucu kül için %15 ve süper akışkanlaştırıcı için %1.25 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.115. Farklı ağırlık oranlarında gri ilişki derecesinin değişimi (Duyarlılık)

Tablo 5.83. Taguchi analizi yapılarak bulunan S/N oranlarına göre giriş verilerinin belirlenmesi

Seri Adı	28 Günlük Su Emme Yüzdesi	Çekilen Ortalama Korozyon Akımı K2 (mAmper)	Çekilen Ortalama Korozyon Akımı K4 (mAmper)	Çekilen Ortalama Korozyon Akımı K6 (mAmper)	Ortalama Ağırlık Kaybı K2 (%)	Ortalama Ağırlık Kaybı K4 (%)	Ortalama Ağırlık Kaybı K6 (%)
M1	-9.426	-23.807	-23.522	-24.082	-0.588	-2.607	-9.94
M2	-9.714	-22.279	-21.138	-17.147	0.630	-2.607	-6.89
M3	-9.799	-21.584	-20.828	-17.266	2.975	-1.138	-3.52
M4	-8.850	-17.266	-18.170	-16.777	0.630	-2.144	-5.01
M5	-8.850	-19.825	-17.501	-13.979	2.975	-1.138	-3.52
M6	-7.121	-16.852	-18.244	-15.056	6.021	0.000	-2.61
M7	-7.384	-14.964	-15.987	-13.625	4.883	0.630	-2.14
M8	-7.421	-12.041	-15.778	-12.256	6.021	1.310	0.00
M9	-5.666	-15.269	-10.103	-12.041	6.021	2.158	-1.14

Tablo 5.84. En küçük en iyi kriterine göre veri normalizasyonunun yapılması

Seri Adı	28 Günlük Su Emme Yüzdesi	Çekilen Ortalama Korozyon Akımı K2 (mAmper)	Çekilen Ortalama Korozyon Akımı K4 (mAmper)	Çekilen Ortalama Korozyon Akımı K6 (mAmper)	Ortalama Ağırlık Kaybı K2 (%)	Ortalama Ağırlık Kaybı K4 (%)	Ortalama Ağırlık Kaybı K6 (%)
M1	0.090	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
M2	0.021	0.130	0.178	0.576	0.184	0.000	0.307
M3	0.000	0.189	0.201	0.566	0.539	0.308	0.646
M4	0.230	0.556	0.399	0.607	0.184	0.097	0.496
M5	0.230	0.338	0.449	0.839	0.539	0.308	0.646
M6	0.648	0.591	0.393	0.750	1.000	0.547	0.738
M7	0.584	0.752	0.562	0.868	0.828	0.679	0.784
M8	0.575	1.000	0.577	0.982	1.000	0.822	1.000
M9	1.000	0.726	1.000	1.000	1.000	1.000	0.885

Tablo 5.85. Mutlak değer matrisinin bulunması

Seri Adı	28 Günlük Su Emme Yüzdesi	Çekilen Ortalama Korozyon Akımı K2 (mAmper)	Çekilen Ortalama Korozyon Akımı K4 (mAmper)	Çekilen Ortalama Korozyon Akımı K6 (mAmper)	Ortalama Ağırlık Kaybı K2 (%)	Ortalama Ağırlık Kaybı K4 (%)	Ortalama Ağırlık Kaybı K6 (%)
M1	0.9097	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
M2	0.9795	0.8701	0.8224	0.4240	0.8157	1.0000	0.6930
M3	1.0000	0.8111	0.7992	0.4339	0.4609	0.6918	0.3544
M4	0.7703	0.4441	0.6011	0.3933	0.8157	0.9029	0.5039
M5	0.7703	0.6615	0.5513	0.1610	0.4609	0.6918	0.3544
M6	0.3519	0.4089	0.6067	0.2504	0.0000	0.4529	0.2623
M7	0.4157	0.2484	0.4385	0.1315	0.1722	0.3206	0.2157
M8	0.4247	0.0000	0.4229	0.0178	0.0000	0.1780	0.0000
M9	0.0000	0.2743	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1145

Tablo 5.86. Gri ilişki katsayısının bulunması

Seri Adı	28 Günlük Su Emme Yüzdesi	Çekilen Ortalama Korozyon Akımı K2 (mAmper)	Çekilen Ortalama Korozyon Akımı K4 (mAmper)	Çekilen Ortalama Korozyon Akımı K6 (mAmper)	Ortalama Ağırlık Kaybı K2 (%)	Ortalama Ağırlık Kaybı K4 (%)	Ortalama Ağırlık Kaybı K6 (%)
M1	0.3547	0.3333	0.3333	0.3333	0.3333	0.3333	0.3333
M2	0.3380	0.3649	0.3781	0.5411	0.3800	0.3333	0.4191
M3	0.3333	0.3814	0.3848	0.5354	0.5203	0.4195	0.5852
M4	0.3936	0.5296	0.4541	0.5597	0.3800	0.3564	0.4980
M5	0.3936	0.4305	0.4756	0.7565	0.5203	0.4195	0.5852
M6	0.5869	0.5501	0.4518	0.6663	1.0000	0.5247	0.6559
M7	0.5460	0.6681	0.5328	0.7917	0.7438	0.6093	0.6986
M8	0.5407	1.0000	0.5418	0.9656	1.0000	0.7375	1.0000
M9	1.0000	0.6457	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.8137

Tablo 5.87. Eşit ağırlık ilkesine göre gri ilişki derecesinin belirlenmesi

Seri Adı	Silis Dumanı İkame (%)	Yüksek Fırın Cürufu İkame (%)	Uçucu Kül İkame (%)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Gri İlişki Derecesi (GİD)	Sıralama
M1	3.00	10.00	10.00	1.25	0.3364	9
M2	3.00	15.00	15.00	1.50	0.3935	8
M3	3.00	20.00	20.00	1.75	0.4514	7
M4	6.00	10.00	15.00	1.75	0.4531	6
M5	6.00	15.00	20.00	1.25	0.5116	5
M6	6.00	20.00	10.00	1.50	0.6337	4
M7	9.00	10.00	20.00	1.50	0.6558	3
M8	9.00	15.00	10.00	1.75	0.8265	2
M9	9.00	20.00	15.00	1.25	0.9228	1

Tablo 5.88. Entropide normalize karar matrisi

Seri Adı	28 Günlük Su Emme Yüzdesi	Çekilen Ortalama Korozyon Akımı K2 (mAmper)	Çekilen Ortalama Korozyon Akımı K4 (mAmper)	Çekilen Ortalama Korozyon Akımı K6 (mAmper)	Ortalama Ağırlık Kaybı K2 (%)	Ortalama Ağırlık Kaybı K4 (%)	Ortalama Ağırlık Kaybı K6 (%)
M1	0.13	0.19	0.20	0.26	0.17	0.14	0.21
M2	0.13	0.16	0.15	0.12	0.14	0.14	0.15
M3	0.13	0.15	0.14	0.12	0.11	0.12	0.10
M4	0.12	0.09	0.11	0.11	0.14	0.13	0.12
M5	0.12	0.12	0.10	0.08	0.11	0.12	0.10
M6	0.10	0.09	0.11	0.09	0.08	0.10	0.09
M7	0.10	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09
M8	0.10	0.05	0.08	0.07	0.08	0.09	0.07
M9	0.08	0.07	0.04	0.07	0.08	0.08	0.08

Tablo 5.89. Entropi değerleri ve kriter ağırlık oranının belirlenmesi

Seri Adı	28 Günlük Su Emme Yüzdesi	Çekilen Ortalama Korozyon Akımı K2 (mAmper)	Çekilen Ortalama Korozyon Akımı K4 (mAmper)	Çekilen Ortalama Korozyon Akımı K6 (mAmper)	Ortalama Ağırlık Kaybı K2 (%)	Ortalama Ağırlık Kaybı K4 (%)	Ortalama Ağırlık Kaybı K6 (%)
M1	-0.26	-0.32	-0.32	-0.35	-0.30	-0.27	-0.33
M2	-0.27	-0.30	-0.28	-0.25	-0.28	-0.27	-0.28
M3	-0.27	-0.28	-0.28	-0.25	-0.24	-0.25	-0.23
M4	-0.25	-0.22	-0.24	-0.25	-0.28	-0.27	-0.25
M5	-0.25	-0.26	-0.23	-0.21	-0.24	-0.25	-0.23
M6	-0.23	-0.21	-0.24	-0.22	-0.20	-0.23	-0.22
M7	-0.23	-0.19	-0.21	-0.20	-0.21	-0.22	-0.21
M8	-0.23	-0.15	-0.20	-0.18	-0.20	-0.21	-0.18
M9	-0.20	-0.19	-0.13	-0.18	-0.20	-0.20	-0.20
ej	0.995	0.962	0.966	0.951	0.982	0.992	0.971
dj	0.005	0.038	0.034	0.049	0.018	0.008	0.029
wj	0.0280	0.2124	0.1872	0.2685	0.1016	0.0426	0.1597

Wj*: Kriter ağırlık oranını ifade etmektedir.

Tablo 5.90. Entropi ile bulunan ağırlık oranları kullanılarak hesaplanmış gri ilişki katsayısı

Seri Adı	28 Günlük Su Emme Yüzdesi	Çekilen Ortalama Korozyon Akımı K2 (mAmper)	Çekilen Ortalama Korozyon Akımı K4 (mAmper)	Çekilen Ortalama Korozyon Akımı K6 (mAmper)	Ortalama Ağırlık Kaybı K2 (%)	Ortalama Ağırlık Kaybı K4 (%)	Ortalama Ağırlık Kaybı K6 (%)
M1	0.0099	0.0708	0.0624	0.0895	0.0339	0.0142	0.0532
M2	0.0095	0.0775	0.0708	0.1453	0.0386	0.0142	0.0669
M3	0.0093	0.0810	0.0721	0.1437	0.0529	0.0179	0.0934
M4	0.0110	0.1125	0.0850	0.1503	0.0386	0.0152	0.0795
M5	0.0110	0.0914	0.0890	0.2031	0.0529	0.0179	0.0934
M6	0.0164	0.1168	0.0846	0.1789	0.1016	0.0224	0.1047
M7	0.0153	0.1419	0.0998	0.2126	0.0756	0.0260	0.1115
M8	0.0151	0.2124	0.1014	0.2593	0.1016	0.0314	0.1597
M9	0.0280	0.1371	0.1872	0.2685	0.1016	0.0426	0.1299

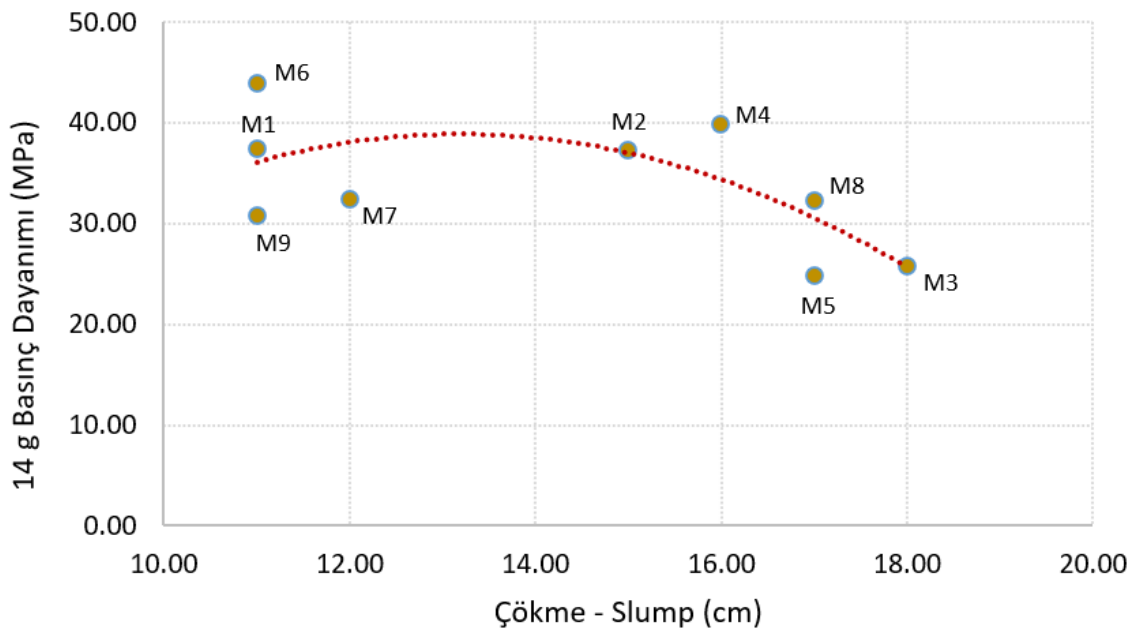
Tablo 5.91. Entropi kriter ağırlıklarına göre gri ilişki derecesinin belirlenmesi

Seri Adı	Silis Dumanı İkame (%)	Yüksek Fırın Cürufu İkame (%)	Uçucu Kül İkame (%)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Gri İlişki Derecesi (GİD)	Sıralama
M1	3.00	10.00	10.00	1.25	0.3339	9
M2	3.00	15.00	15.00	1.50	0.4228	8
M3	3.00	20.00	20.00	1.75	0.4703	7
M4	6.00	10.00	15.00	1.75	0.4921	6
M5	6.00	15.00	20.00	1.25	0.5588	5
M6	6.00	20.00	10.00	1.50	0.6255	4
M7	9.00	10.00	20.00	1.50	0.6826	3
M8	9.00	15.00	10.00	1.75	0.8809	2
M9	9.00	20.00	15.00	1.25	0.8950	1

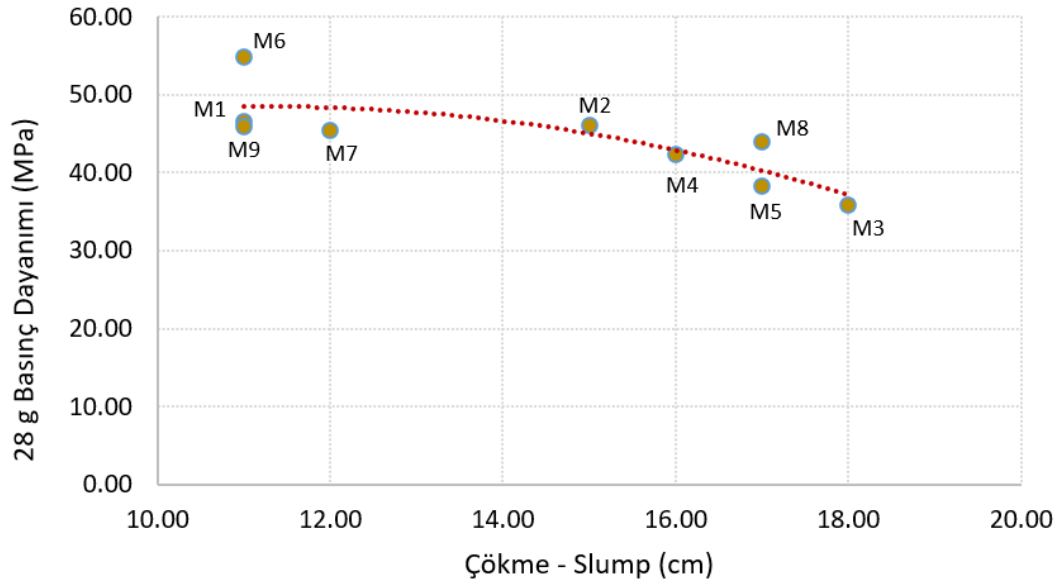
6. DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRMALI İNCELENMESİ VE GENEL DEĞERLENDİRME

6.1. Ortogonal Dizi Serilerinde Basınç Dayanımı-Çökme (Slump) İlişkisi

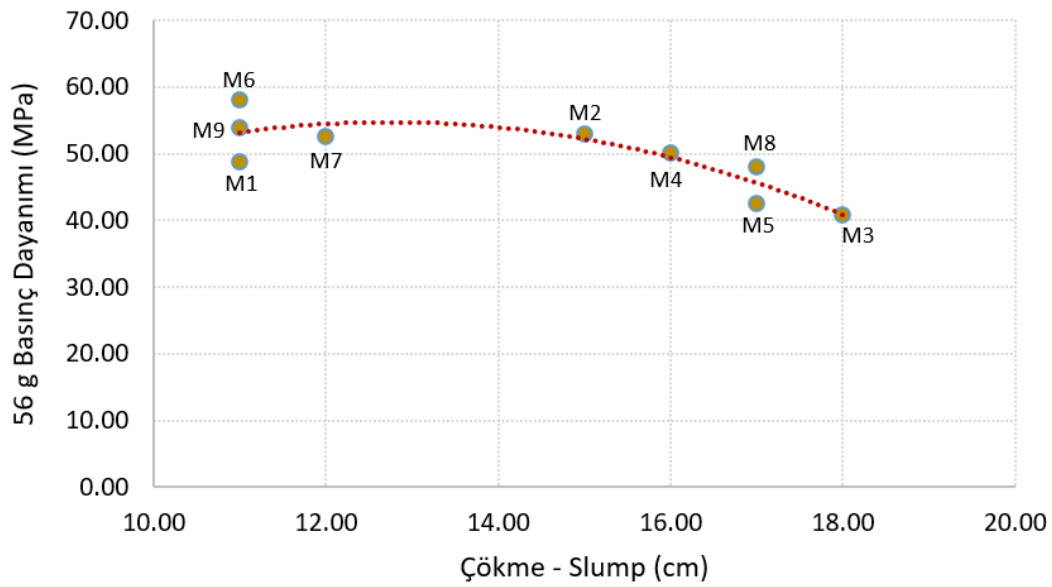
L9 ortogonal dizi serilerinden elde edilen farklı kür sürelerindeki basınç dayanımı ve taze beton çökme değerleri ilişkisi Şekil 6.1, 6.2 ve 6.3'te gösterilmiştir. Verilen grafikler değerlendirildiğinde; kür süresinden bağımsız olarak, özellikle çökme (slump) değerlerinin 16 cm'den yüksek olması durumunda serilerin basınç dayanımları olumsuz etkilemiştir. Şekil 6.1, 6.2 ve 6.3'te L9 ortogonal dizi serileri için optimum çökme değeri yaklaşık 13 cm olarak belirlenmiştir. Toplam puzolan içeriğinin en yüksek olduğu M3 ve M5 serilerinde çökme değeri de yüksek olmuştur. Diğer yandan bu serilerin ortak özelliği UK ikame oranlarının %20 olmasıdır. Buna göre UK betonun çökme değerini artırırken basınç dayanımını olumsuz etkilemiştir. Ancak M7 serisinde, UK içeriği %20 olmasına rağmen dayanım performansı M3 ve M5 serilerinden çok daha iyi olmuştur. Bunda SD ikame oranının %9 olmasının etkili olduğu düşünülmektedir. M7 serisinde %9 oranında kullanılan SD betondaki çökme değerini sınırlandırmış bu sebeple toplam puzolan içeriğinin hemen hemen aynı olduğu bu seriler arasında en yüksek dayanımın elde edildiği seri olmuştur.



Şekil 6.1. 14 günlük kür süresinde basınç dayanımı-çökme miktarı ilişkisi



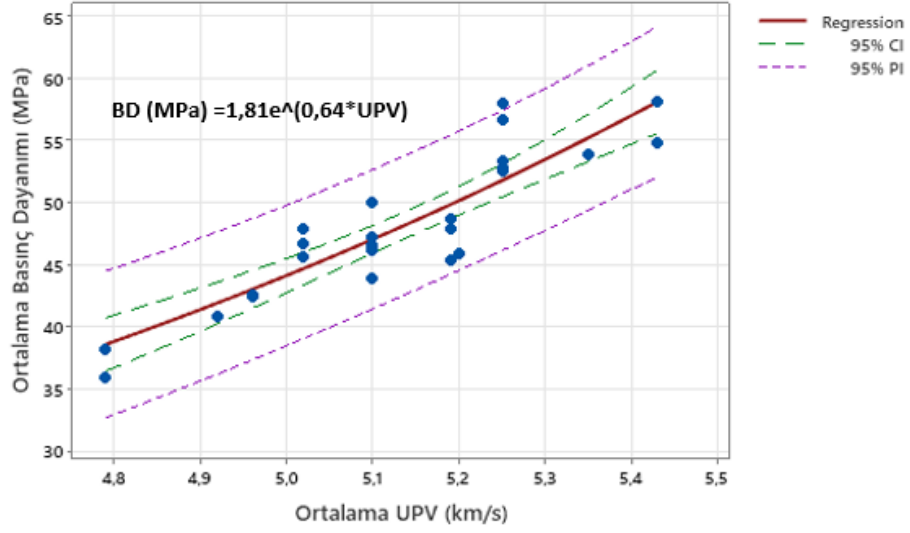
Şekil 6.2. 28 günlük kür süresinde basınç dayanımı-çökme miktarı ilişkisi



Şekil 6.3. 56 günlük kür süresinde betonda basınç dayanımı-çökme miktarı ilişkisi

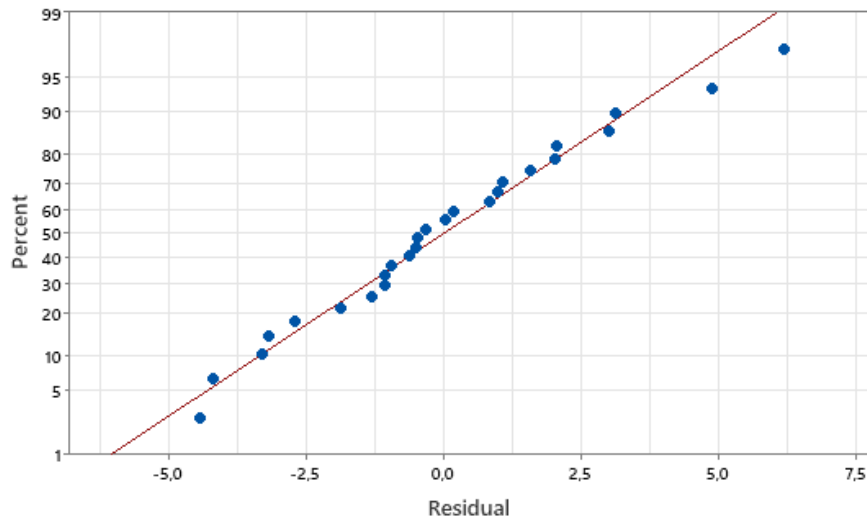
6.2. Basınç Dayanımı – Ultra ses Geçiş Hızı İlişkisi

Literatürde basınç dayanımı ve ultra ses geçiş hızı arasındaki ilişkiyi ifade etmek amacıyla birçok eşitlik verilmiştir. Buna göre bu çalışmadan elde edilen basınç dayanım ve ultra ses geçiş hızı deney sonuçları kullanılarak nonlineer regresyon analizi ile denklem çıkarılmış, literatürde yaygın olarak kullanılan denklemlerle (Nash't vd., 2005; Rouf vd., 1986) karşılaştırılması yapılmıştır. Regresyon eşitliğini elde etmek için Minitab 21.0 programı kullanılmıştır. Elde edilen regresyon denklemi Şekil 6.4'te verilmiştir.

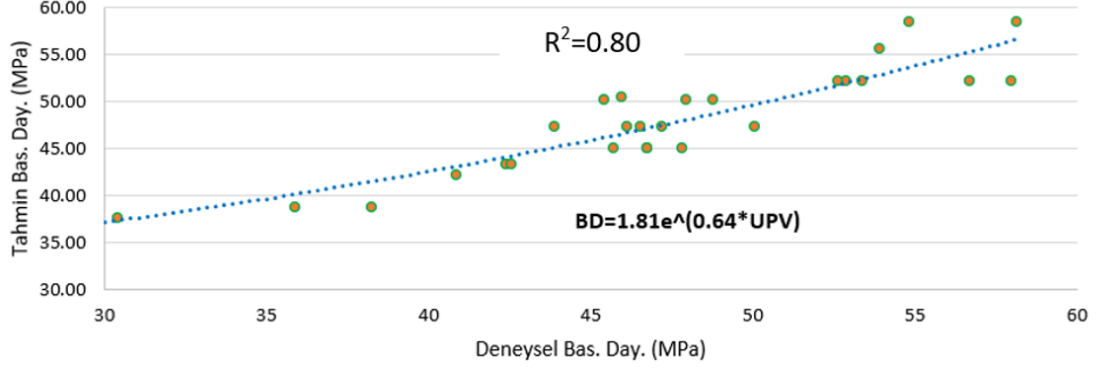


Şekil 6.4. Tez deney sonuçları kullanılarak nonlineer regresyon analizi sonucu elde edilen denkleme göre regresyon eğrisi

Şekil 6.5'te ise regresyon denklemine göre tahmin edilen basınç dayanımının artık değer dağılımları verilmiştir. Denkleme göre tahmin sonuçlarının, yaklaşık %10'unda basınç dayanımı için tahmin artık değeri 5 MPa olurken, %10'unda da artık değer yaklaşık 4 MPa olarak bulunmuştur. Tahminlerin %80'ninde artık değer +/- 2.5 MPa olarak bulunmuştur. Tez çalışmasında yapılan deney sonuçları kullanılarak elde edilen bu denkleme göre; deney sonuçları ile uyumlu olarak betonda basınç dayanımının artışı ultra ses geçiş hızını da artırmıştır. Bunda dayanımla birlikte elde edilen yüksek kompazitenin etkili olduğu düşünülmektedir.



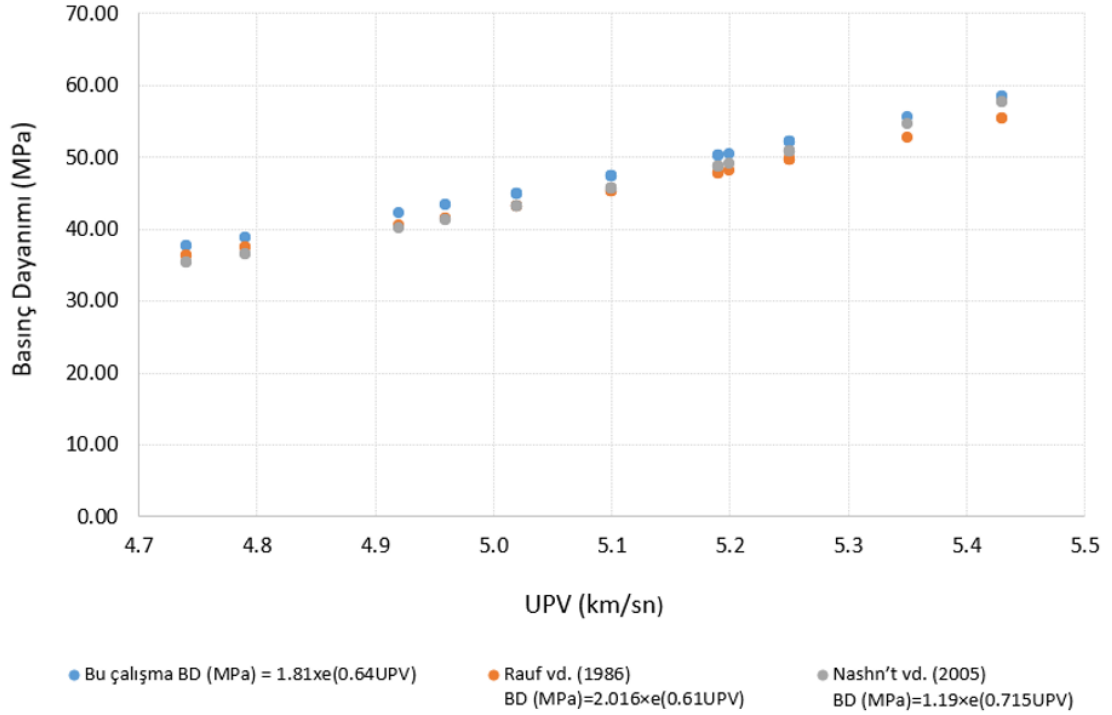
Şekil 6.5. Denklem tahmin sonuçlarına göre artık değerlerin dağılımı



Şekil 6.6. Basınç dayanımı ve UPV ilişkisinde regresyon denkleminin performansı

Şekil 6.6’da denklem kullanılarak tahmin edilen basınç dayanımlarının deneysel olarak elde edilmiş basınç dayanımları ile olan ilişkisi verilmiş tahmin ve deneysel sonuçlar arasındaki regresyon katsayısı 0.8 olarak bulunmuştur.

Şekil 6.7’de deney sonuçları için literatürde verilen ve bu çalışmadan elde edilen denklemlerin basınç dayanımı tahminlerine yönelik karşılaştırması verilmiştir. Buna göre denklemlerin tahmin sonuç değerleri birbirine yakın olmakla birlikte nonlineer regresyon analizi sonucu elde edilen denklemin ultra ses geçiş hızına göre basınç dayanımı tahmin değeri, diğer denklemlerden daha yüksek olmuştur.

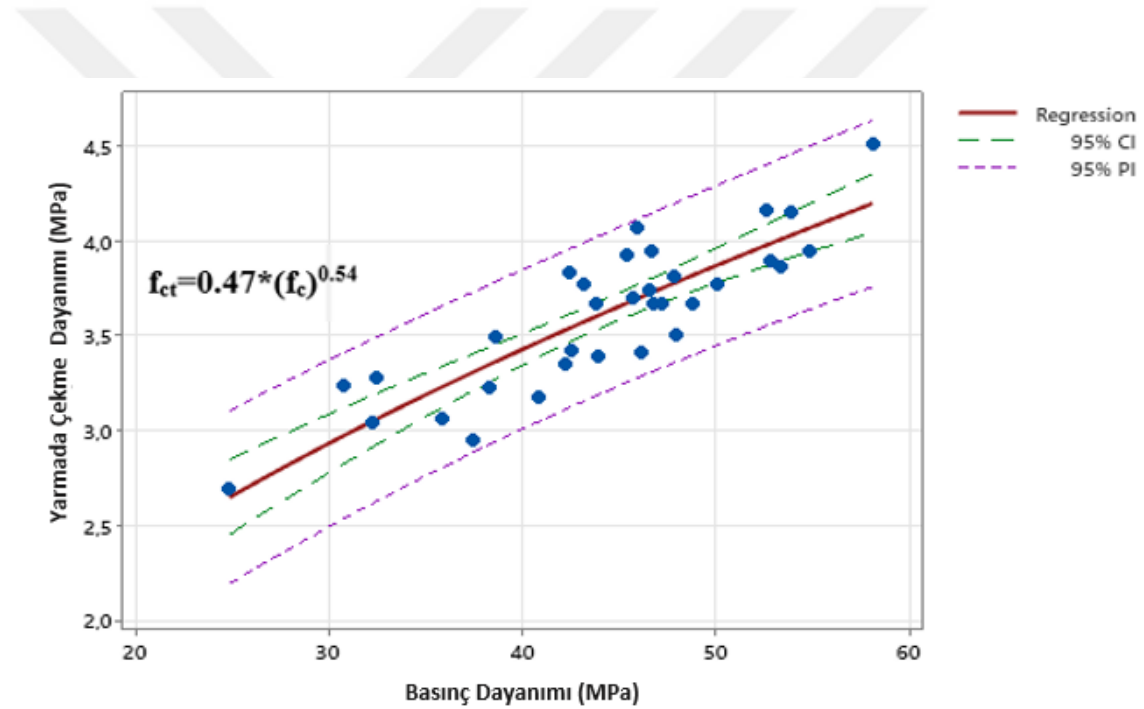


Şekil 6.7. Farklı denklemlere göre UPV-Basınç dayanımı ilişkisi

6.3. Basınç Dayanımı – Yarmada Çekme Dayanımı İlişkisi

Deney sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki araştırılmıştır. Deney sonuçları kullanılarak çıkarılan denklemin literatürde kullanılan diğer denklemlerle kıyaslaması yapılmıştır.

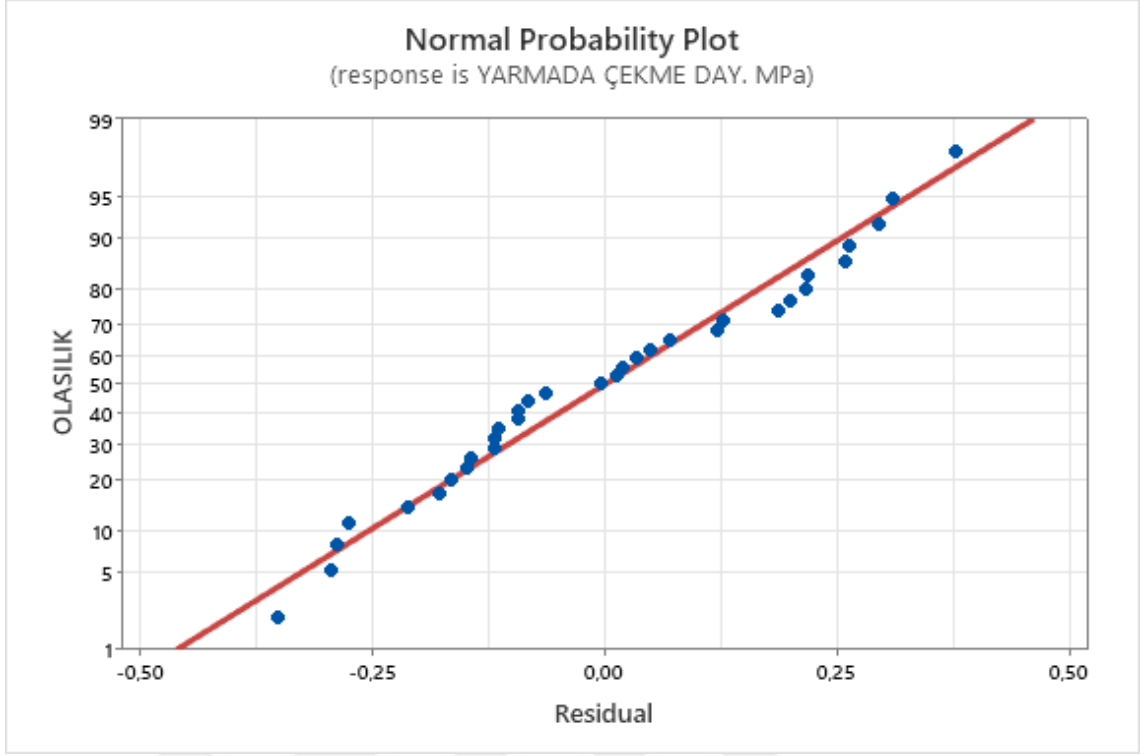
Literatürde basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişkiyi ifade etmek amacıyla çeşitli denklemler verilmiştir. Buna göre bu çalışmadan elde edilen basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deney sonuçları kullanılarak nonlineer regresyon analizi ile denklem çıkarılmış ve kriterler arasındaki ilişki irdelenmiştir. Regresyon eşitliğini elde etmek için Minitab 21.0 programı kullanılmıştır. Elde edilen regresyon denklemi Şekil 6.8’de verilmiştir.



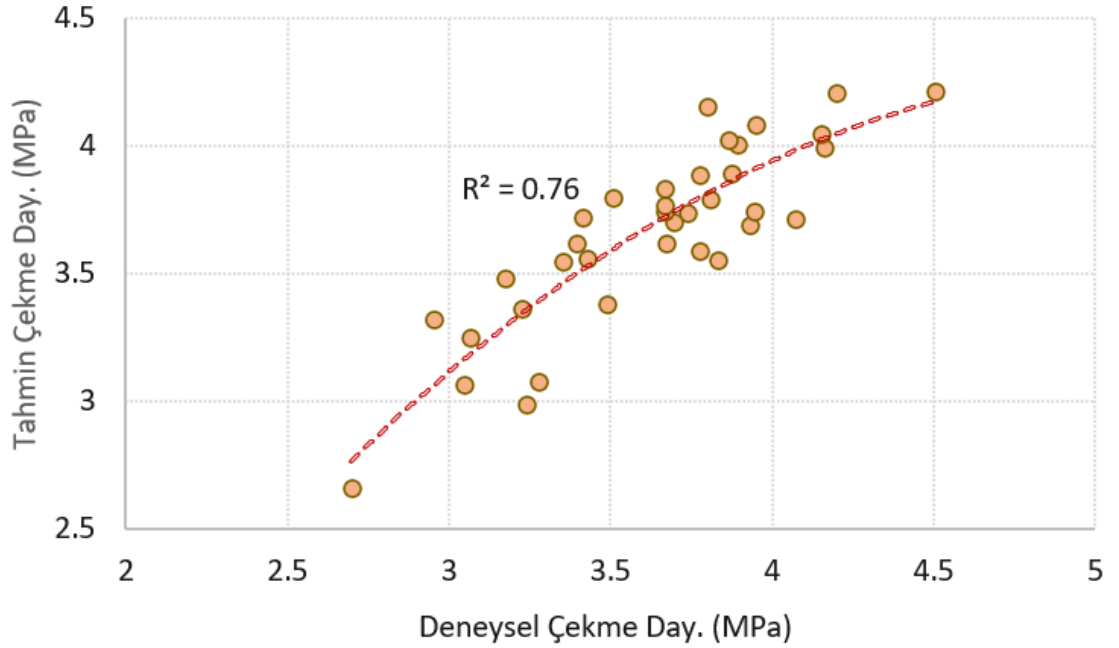
Şekil 6.8. Tez deney sonuçları kullanılarak nonlineer regresyon analizi sonucu elde edilen denkleme göre regresyon eğrisi

Şekil 6.9’da elde edilen regresyon denklemine göre tahmin edilen çekme dayanım değerlerinin artık değer dağılımları verilmiştir. Denkleme göre; sonuçların yaklaşık %20’sinde çekme dayanımı için tahmin artık değeri +/- 0.25 MPa dan fazla olurken, tahminlerin %80’ninde artık değer +/- 0-2.5 MPa aralığında bulunmuştur.

Şekil 6.10’da geliştirilen denklem kullanılarak, tahmin edilen çekme dayanımlarının, deneysel olarak bulunan çekme dayanımları ile ilişkisi verilmiş tahmin ve deneysel sonuçlar arasındaki regresyon katsayısı 0.76 olmuştur.



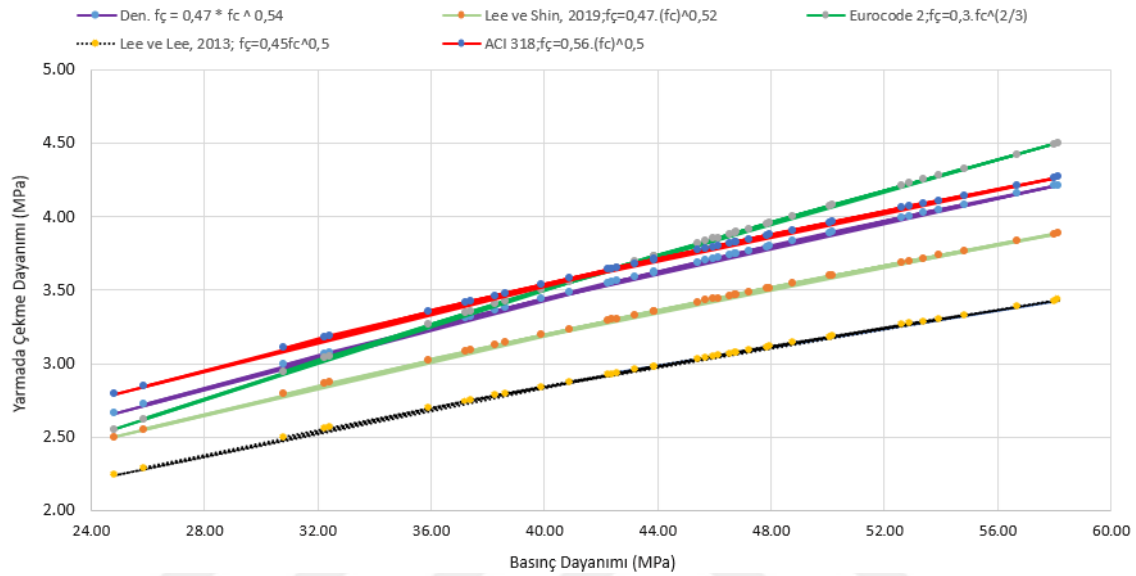
Şekil 6.9. Denklem tahmin sonuçlarına göre artık değerlerin normal dağılımı



Şekil 6.10. Basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı ilişkisinde regresyon denkleminin performansı

Şekil 6.11’de deney sonuçları için bu çalışmada çıkarılan ve literatürde kullanılan denklemlerin (Lee ve Lee, 2013; Lee ve Shin, 2019) basınç dayanımı tahminlerine yönelik karşılaştırma grafikleri verilmiştir. Buna göre; elde edilen denklem, literatürde

verilmiş denklemlerle yakın tahminlerde bulunmuştur. Diğer yandan Eurocode 2’de verilen denklem diğer denklemlerden ayrılarak 40 MPa’nın üstündeki basınç dayanımlarında daha yüksek çekme dayanımı tahmin etmiştir. Ayrıca ACI 318 ve Eurocode 2 yönetmeliklerinde verilen denklemler, bu çalışmada bulunan ve diğer literatür denklemlerinden genel anlamda daha yüksek çekme dayanımı sonucu vermiştir.

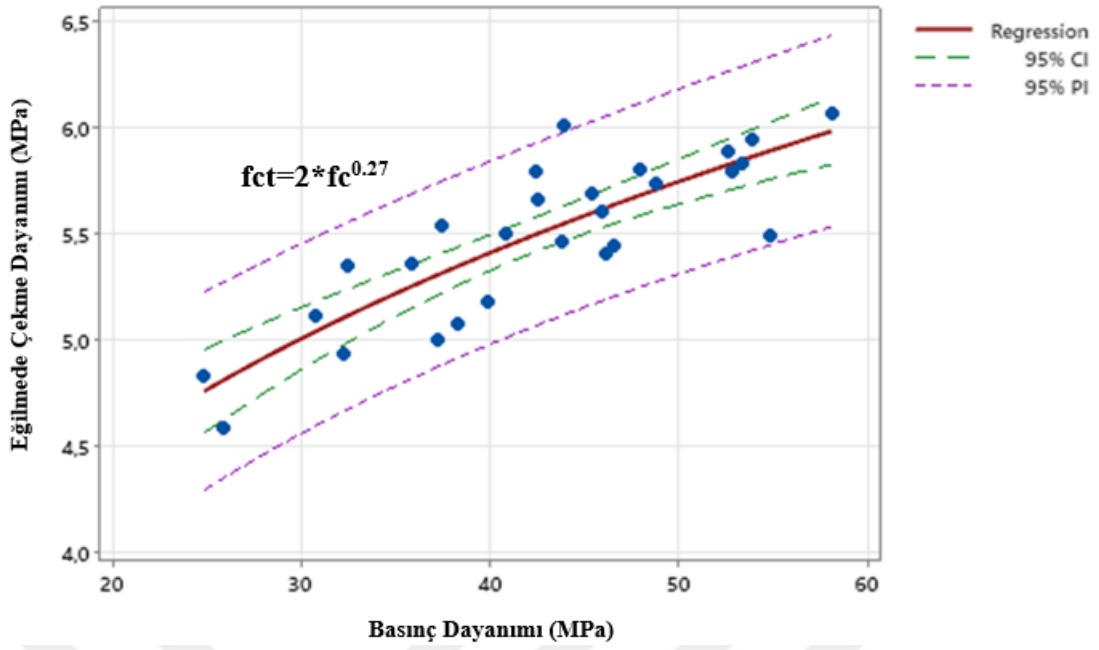


Şekil 6.11. Basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı regresyon denkleminin literatür karşılaştırması

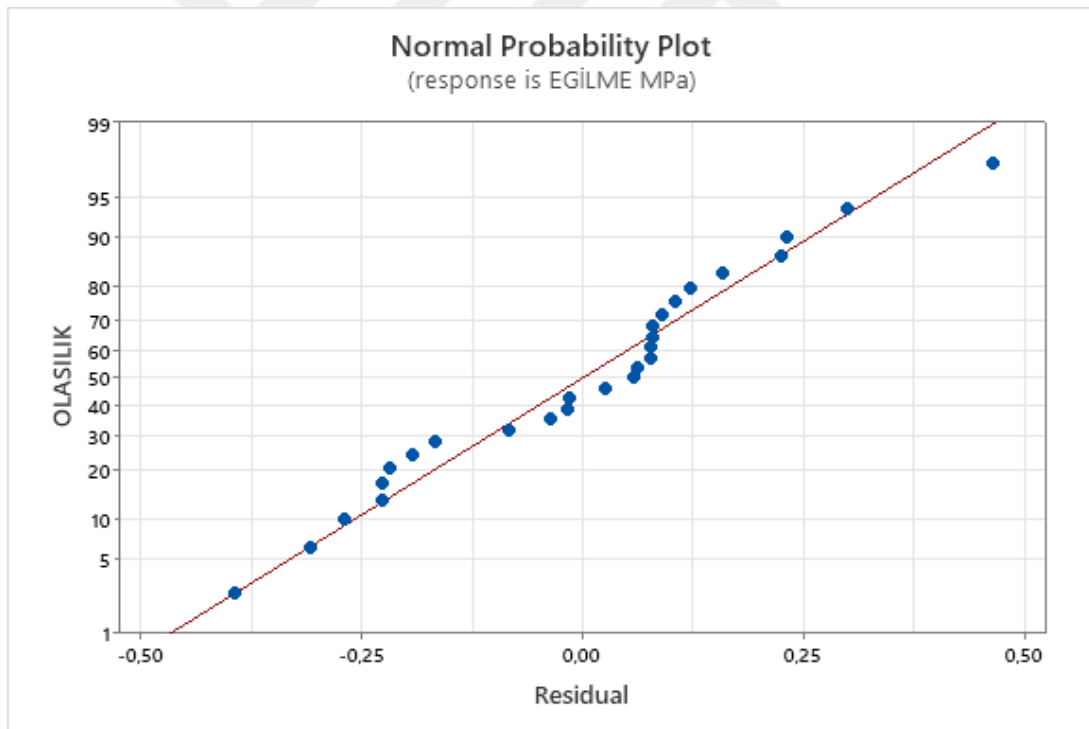
6.4. Basınç Dayanımı – Eğilmede Çekme Dayanımı İlişkisi

Deney sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak basınç dayanımı ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki araştırılmıştır. Buna göre çıkarılan denklemin literatürde kullanılan diğer denklemlerle kıyaslaması yapılmıştır.

Literatürde basınç dayanımı ve eğilme dayanımı arasındaki ilişkiyi ifade etmek amacıyla birçok eşitlik verilmiştir. Buna göre bu çalışmadan elde edilen basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları kullanılarak nonlineer regresyon analizi ile denklem çıkarılmıştır. Regresyon eşitliğini elde etmek için Minitab 21.0 programı kullanılmıştır. Buna göre elde edilen regresyon denklemi Şekil 6.12’de verilmiştir. Şekil 6.13’ te ise elde edilmiş regresyon denklemine göre tahmin edilen çekme dayanımı değerlerinin artık değer dağılımları verilmiştir. Denkleme göre; sonuçların yaklaşık %20’sinde çekme dayanımı için tahmin artık değeri +/- 0.25 MPa dan fazla olurken, tahminlerin %80’inde artık değer +/- 0-2.5 MPa aralığında bulunmuştur.

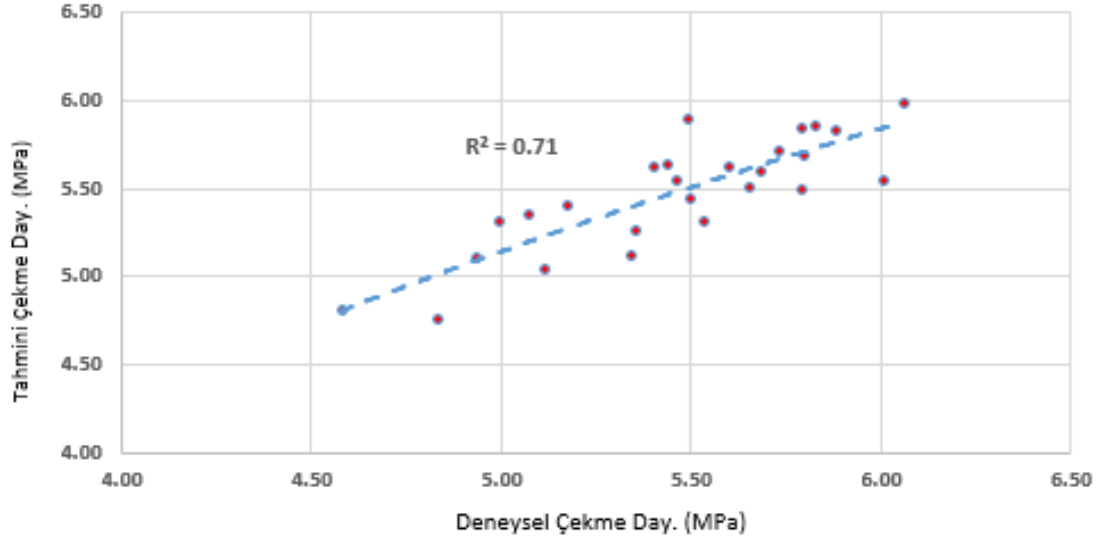


Şekil 6.12. Deney sonuçları kullanılarak nonlineer regresyon analizi sonucu elde edilen denkleme göre regresyon eğrisi



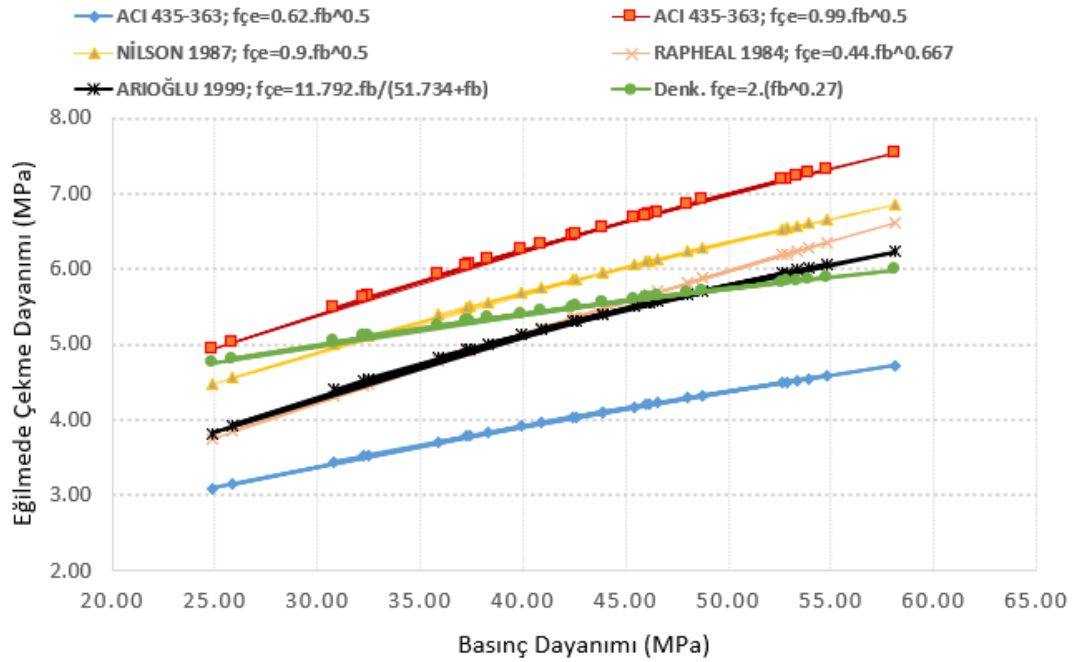
Şekil 6.13. Tahmin sonuçlarına göre artık değerlerin dağılımı

Şekil 6.14'te, denklemlle tahmin edilen eğilmede çekme dayanımlarının, deneysel olarak elde edilmiş eğilmede çekme dayanımları ile olan ilişkisi verilmiş tahmin ve deneysel sonuçlar arasındaki regresyon katsayısı 0.71 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.14. Basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı ilişkisinde regresyon denkleminin performansı

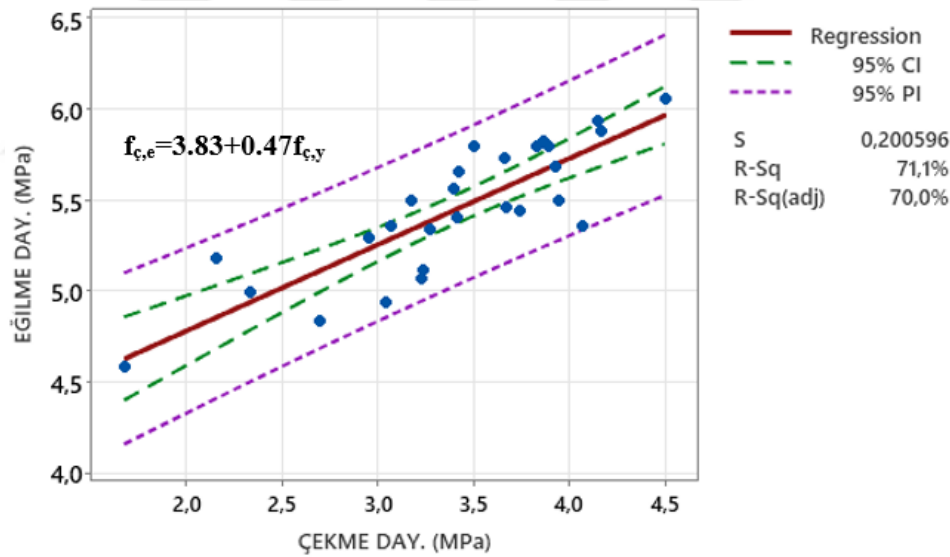
Şekil 6.15'te deney sonuçları için; bu çalışmada önerilen denklemle yönetmelik ve literatürde kullanılan denklemlerin eğilmede çekme dayanımı tahminlerine yönelik karşılaştırması verilmiştir. Buna göre, elde edilen denklem, literatürde verilen denklemlerle yakın şekilde tahminlerde bulunmuştur. Deney sonuçları genel olarak literatürdeki sonuçlarla uyumlu olmuştur.



Şekil 6.15. Basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı regresyon denkleminin literatür karşılaştırması

6.5. Yarmada Çekme Dayanımı – Eğilmede Çekme Dayanımı İlişkisi

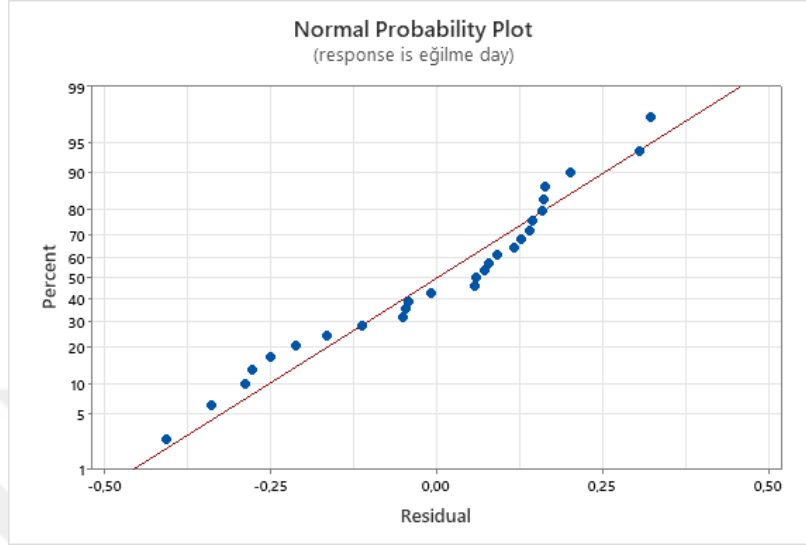
Sertleşmiş beton deneylerinde; betonda çekme gerilmesi tespiti için 2 tür deney sisteminden söz edilebilir. Bunlardan birincisi direkt eksenel çekme deneyi, diğeri ise dolaylı olarak çekme dayanımı tespit deneyleridir. Dolaylı yöntemlerden en yaygın olarak kullanılanları ise silindir yarma deneyi ve kiriş eğilme deneyleridir. Direkt yöntem, uygulaması zor ve varyasyon katsayısı yüksek bir deney sistemidir. Silindir yarma deneyi ise değerlendirilmesi kolay, değişkenlik katsayısı en düşük deney türüdür. Kiriş eğilme deneyi ise değerlendirme ve uygulama kolaylığı yönünden bu iki deney türü arasında yer almaktadır (Arioğlu ve Girgin, 1999). Deney sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak yarmada çekme dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı arasındaki ilişki araştırılmıştır. Şekil 6.16 incelendiğinde, eğilmede çekme deneyinden elde edilen çekme dayanımı, yarmada çekme dayanımı deneyinden elde edilen çekme dayanımından daha fazla olmuştur.



Şekil 6.16. Deney sonuçları kullanılarak doğrusal regresyon analizi sonucu elde edilen denkleme göre regresyon eğrisi

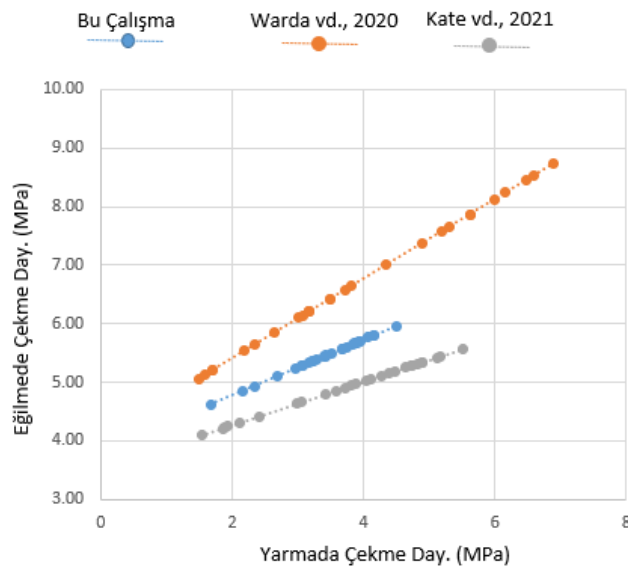
Buna göre dayanımlar arasında doğrusal bir ilişki belirlenmiş eğilme dayanımı arttıkça çekme dayanımı da artmıştır. Eğilmede çekme dayanımında, numunenin gerçekte çekme gerilmesine zorlanan hacmi toplam numune hacmine oranla çok düşük olduğundan eğilmede çekme dayanımı yarmada çekme dayanımından daha yüksek çıkmaktadır. Şekil 6.17’de, elde edilen regresyon denklemine göre tahmin edilen eğilmede çekme dayanım değerlerinin artık değer dağılımları verilmiştir. Denkleme göre

elde edilen sonuçların yaklaşık %20'sinde eğilmede çekme dayanımı için tahmin artık değeri ± 0.25 MPa dan fazla olurken, tahminlerin %80'ninde artık değer ± 0.25 MPa aralığında bulunmuştur.



Şekil 6.17. Denklem tahmin sonuçlarına göre artık değerlerin dağılımı

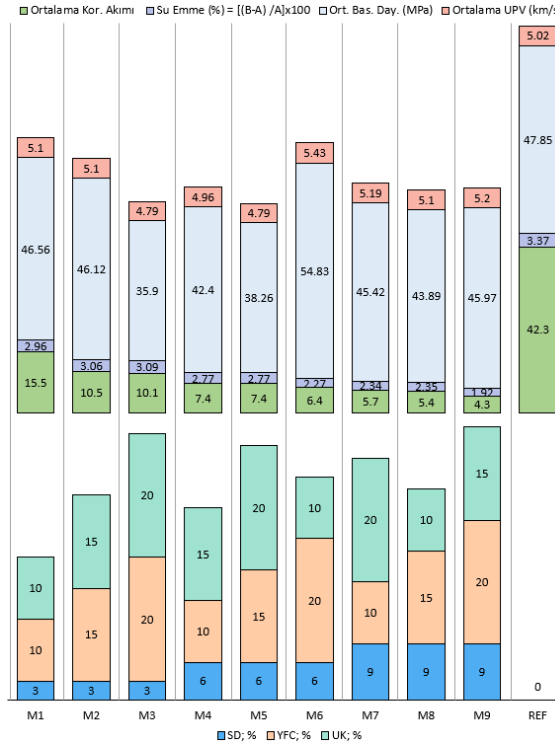
Literatürde eğilmede çekme dayanımı ($f_{\text{ç,e}}$), yarmada çekme dayanımı ($f_{\text{ç,y}}$) oranı $f_{\text{ç,e}}/f_{\text{ç,y}}$ 1.23-1.95 arasında değerler almaktadır (Warda vd., 2020; Kate vd., 2021; Tang vd., 2021; Arıoğlu ve Girgin, 1999). Şekil 6.18'de eğilmede çekme dayanımı ve yarmada çekme dayanımındaki ilişki verilmiştir. Buna göre tez çalışmasından elde edilen çekme dayanımları arasındaki ilişki literatürdeki diğer çalışmalarla uyumluluk göstermektedir.



Şekil 6.18. Yarmada çekme dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı ilişkisini karşılaştırması

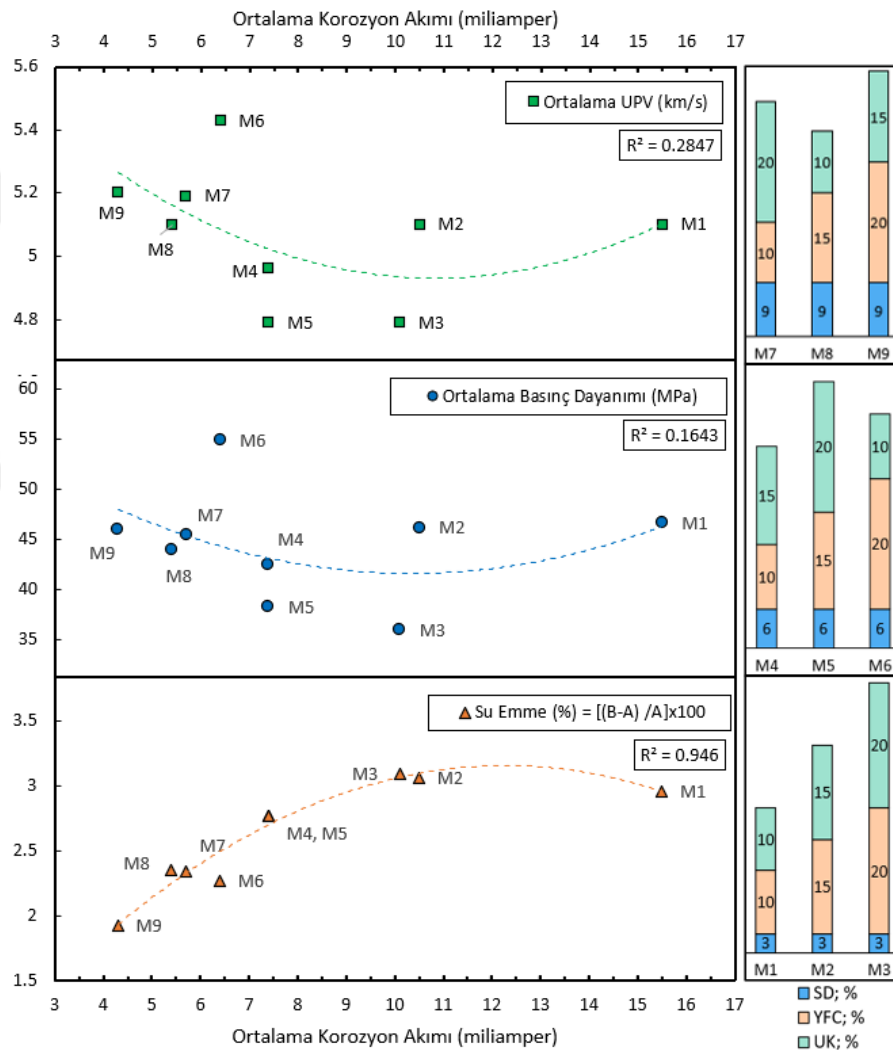
6.6. Korozyon Özelliklerinin Basınç Dayanımı ve Su Emme Yüzdesi ile İlişkisi

Ortalama korozyon akımının basınç dayanımı ve su emme yüzdesine göre değişimi 28 günlük deney sonuçları için Şekil 6.19, 6.20 ve 6.21’de göre değerlendirildiğinde; genel anlamda su emme yüzdesindeki artış, serilerde çekilen korozyon akımlarında ve ağırlık kaybı yüzdesinde artışa sebep olmakta, su emme yüzdesi, çekilen akım ve ağırlık kaybı yüzdesi arasında yüksek düzeyde bir korelasyon katsayısı elde edilmektedir. Şekil 6.20’ye göre basınç dayanımı ve çekilen korozyon akımı arasında düşük bir korelasyon oluşmakta, basınç dayanımındaki artış çekilen korozyon akımı ile anlamlı bir ilişki göstermemektedir. Diğer yandan ultra ses geçiş hızı ve çekilen korozyon akımı arasındaki ilişki de basınç dayanımına benzerdir. Ancak çekilen ortalama akım ile ultra ses geçiş hızı arasındaki korelasyon katsayısı, basınç dayanımından daha yüksek olmuştur. Bu durum çimentodan çok daha ince tanecik yapısına sahip puzolanlar sayesinde kompasitesi yüksek, geçirimsiz beton ve buna bağlı olarak yüksek ses dalgası elde edilmesi ile açıklanabilir. Buna göre betonda, özellikle SD gibi çimentodan çok daha ince tanecikli puzolanların varlığı dolgu malzemesi işlevi görüp daha kompakt bir yapı oluşturmakta NaCl içerikli elektrolitin donatıya nüfuzu zorlaşmakta ve çekilen ortalama akım değerleri düşmektedir.



Şekil 6.19. 28 günlük bazı deney sonuçlarının birbiri ile ilişkilendirilmesi

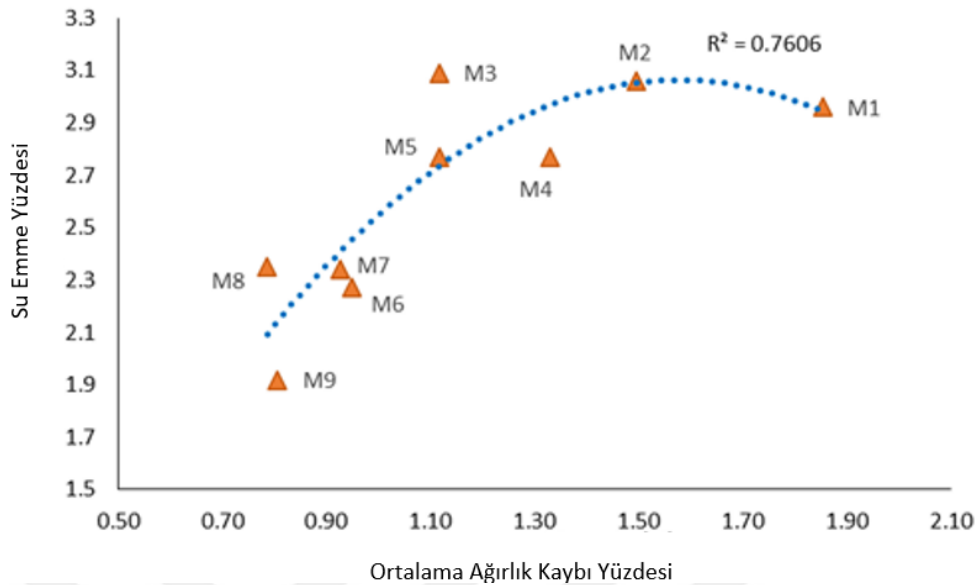
Şekil 6.19'a göre 28 günlük basınç dayanımında referans betonun 47.85 MPa gibi yüksek bir dayanım göstermesine karşılık çekilen ortalama akım değerinin 42.3 mili amper olması bu durumun göstergesidir. Başka bir deyişle dayanımın yüksek olması genel olarak çekilen korozyon akımının düşük olacağı anlamına gelmemektedir. Bunu destekleyen bir durum M3 serisi için geçerlidir. En az basınç dayanımına sahip M3 serisi çekilen korozyon akımı açısından kendisinden daha fazla dayanımına sahip REF, M1 ve M2 serilerinden daha iyi bir performans göstermiştir. Bu durum beton içeriğindeki puzolan ikame oranının sözü edilen serilerden fazla olmasıyla açıklanabilmektedir.



Şekil 6.20. 28 günlük bazı deney sonuçlarının birbiri ile ilişkilendirilmesi

Şekil 6.20'de su emme yüzdesi ve çekilen ortalama korozyon akımı arasındaki yüksek korelasyona sahip ilişki gösterilmiştir. Buna göre su emme yüzdesindeki artış çekilen korozyon akımını da artırmakta ve donatının korozyona uğramasını kolaylaştırmaktadır. Betonun su emme yüzdesi ve donatıda meydana gelen ortalama

ağırlık kaybı yüzdesi arasındaki ilişki Şekil 6.21’de verilmiştir. Su emme yüzdesindeki artış, donatıda oluşan korozyon kaynaklı ağırlık kayıplarını artırmaktadır.



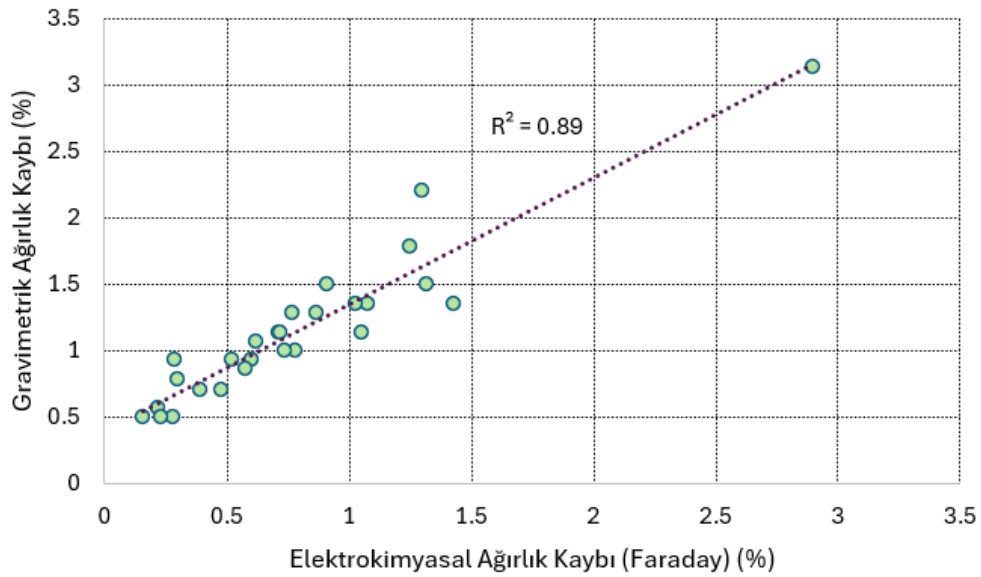
Şekil 6.21. 28 günlük bazı deney sonuçlarının birbiri ile ilişkilendirilmesi

6.6. Gravimetrik ve Elektrokimyasal Kütle Kaybı İlişkisi

Bu kısımda, betonarme örneklerde korozyon nedeniyle donatıda meydana gelen kütle kayıplarının; elektrokimyasal ölçümlerle tahmin edilen kayıplar ile gravimetrik (ağırlık kaybı) olarak ölçülen kayıplar arasındaki karşılaştırması yapılmıştır. Numunelerin korozyon süresi boyunca çeşitli zamanlarda elektrokimyasal olarak ölçülen korozyon hızları, faraday denklemine (elektrokimyasal) entegre edilerek malzeme kayıpları hesaplanmıştır. Çelik donatılardaki elektrokimyasal ölçümler, bir tahmin değeri sunmaktadır.

Öte yandan çelik donatılar, lolipop beton numunelerden çıkarılarak donatı yüzeyindeki pas ve beton kalıntıları kral suyu ile temizlenmiştir. Hazırlık aşamasında hassas bir şekilde tartılan donatılar, temizleme işleminden sonra tekrar hassas bir şekilde tartılarak gravimetrik olarak ölçülen kütle kayıpları belirlenmiştir.

Elektrokimyasal yöntemle tahmin edilen kütle kayıpları ile gravimetrik yöntemle ölçülen kütle kayıpları arasında yüksek bir korelasyon saptanmış ve bu ilişki Şekil 6.22’de gösterilmiştir. Grafikten anlaşılabileceği üzere, elektrokimyasal yöntemlerle tahmin edilen kütle kayıpları ile gravimetrik ölçümlerle belirlenen kütle kayıpları arasında güçlü bir uyum gözlenmektedir. Ancak, gravimetrik yöntemden elde edilen kütle kaybı yüzdesi, elektrokimyasal tahminden biraz daha fazla olmaktadır.

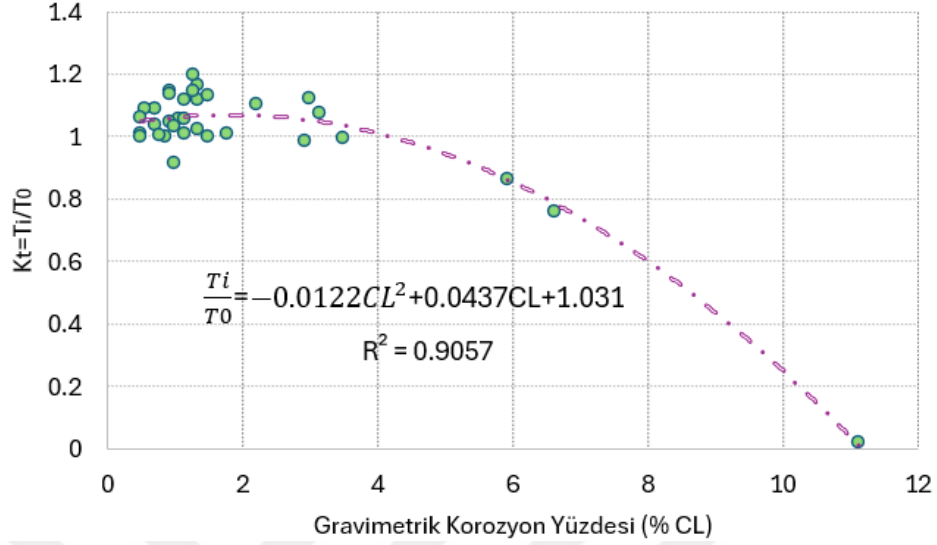


6.22. Hızlandırılmış korozyon seneyi sonunda elektrokimyasal olarak hesaplanan kütle kayıpları ile gravimetrik olarak ölçülen kütle kayıplarının karşılaştırılması

6.7. Bağ Dayanımı ve Gravimetrik Kütle Kaybı İlişkisi

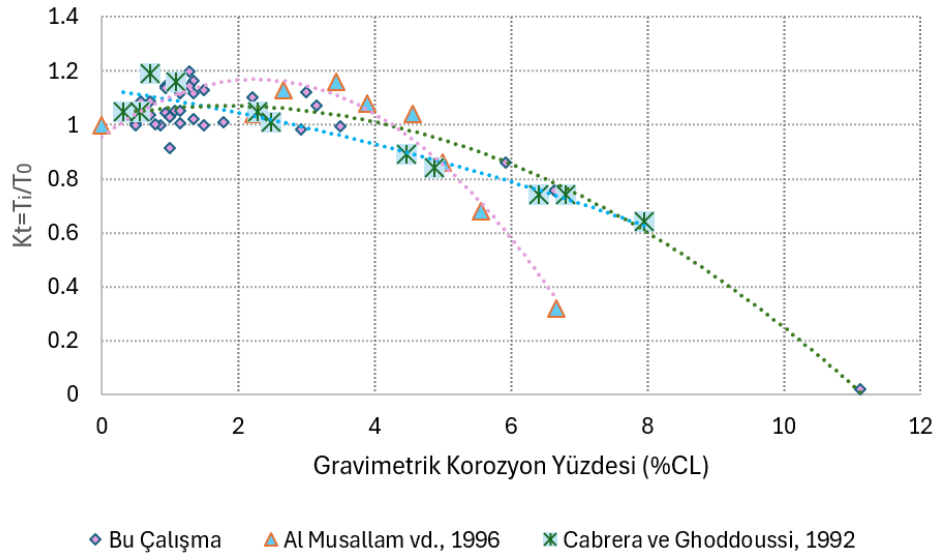
Beton dayanıklılığı, beton içindeki donatı çeliğinin korozyon hızını etkileyen önemli bir faktördür. Araştırmalar, beton dayanıklılığının artmasıyla korozyon hızının azalan bir eğilim gösterdiğini ortaya koymuştur (Hornbostel vd., 2016). Bu ilişki, çelik donatının korozyonunu önlemede beton direncinin önemini vurgulamaktadır. Çelik-beton arayüz bölgesinin porozitesi de beton içindeki çelik çubukların korozyon hızını belirlemede kritik bir rol oynamaktadır (Zheng vd., 2020). Tez çalışması kapsamında farklı korozyon oranlarında beton serilerinde meydana gelen rölatif bağ dayanımı değişimleri Şekil 6.23'te verilmiştir. Buna göre; regresyon denkleminde verilen T_i , her serinin farklı korozyon oranlarındaki maksimum bağ dayanımını, T_0 , her serinin korozyonsuz durumdaki maksimum bağ dayanımını ve CL ise hızlandırılmış korozyon deneyi sonrasında oluşan gravimetrik (ağırlık) kütle kaybını göstermektedir. Şekil 6.23'e göre donatı kütle kaybı yüzdesinin %3 olduğu duruma kadar bağ dayanımında bir kaybın yaşanmadığı görülmektedir. Diğer yandan deney sonuçları kullanılarak elde edilen donatı kütle kaybı ve bağ dayanımı ilişkisi regresyon denkleminde yaklaşık 0.91 gibi yüksek oranda korelasyon katsayısıyla temsil edilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan numune özellikleri için, donatıda oluşan ağırlık kaybı yüzdesinin %10'un üzerinde değerler alması beton ile donatı arasında oluşan bağ dayanımını neredeyse ortadan kaldırmaktadır.

Donatıda oluşan ağırlık kaybı yüzdesinin yaklaşık %11 olması durumunda oluşan korozyon ürünleri sebebiyle beton çatladığından bağ dayanımı elde edilememiştir.



Şekil 6.23. Bağ dayanımının korozyon oranına göre rölatif olarak değişimi

Şekil 6.24'te deneysel çalışma ve literatürde yapılan çalışmaların korozyon oranlarına göre rölatif bağ dayanımı değişimleri gösterilmiştir. Buna göre; çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile tez kapsamında yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar benzerlik göstermektedir. Donatı ağırlık kaybının %3'e kadar olan durumlarında beton ve donatı arasındaki bağ dayanımı kaybının ihmal edilebileceği çalışmalardan elde edilen sonuçtur.



Şekil 6.24. Deneysel çalışma ve literatürde verilen bazı çalışmaların karşılaştırılması

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada çimento yerine; belirli oranlarda silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ikame edilerek üretilen sürdürülebilir çevreci betonun, mekanik ve korozyon özelliklerini kapsayan deney sonuçları kullanılarak Taguchi, Yüzey Tepki ve Gri İlişkisel analiz istatistik tabanlı yöntemler ile parametrik etki araştırılmıştır. Üç farklı yapay puzolanın kullanıldığı bu çalışmada beton reolojisinin dayanım ve dayanıklılık üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla süper akışkanlaştırıcı katkı yüzdesi de parametre olarak seçilmiştir. Buna göre kullanılan 4 farklı parametrenin 3 seviyesi için Taguchi L9 ortogonal dizi seçilerek 9 farklı karışım üretilmiştir. Üretilen bu karışımlarda silis dumanı (SD) ikame oranları %3-6-9, yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül (UK) ikame oranları %10-15-20 ve süper akışkanlaştırıcı (SA) kullanım oranı %1.25-1.50-1.75 olarak belirlenmiştir. İçeriğinde puzolanların bulunduğu karışımların dayanım ve dayanıklılık özellikleri, içerisinde mineral katkı bulunmayan 300 kg/m³ Portland çimentolu referans beton serisi ile karşılaştırılmıştır. Diğer yandan betonarme yapılarda yaygın olarak kullanılan korozyon inhibitörlerinden biri olan kalsiyum nitritin, beton dayanım ve dayanıklılık özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. L9 ortogonal diziyeye göre üretilen her seride seçilen üç çeşit puzolan farklı oranlarda kullanılmıştır. Buna göre 28 ve 56 günlük kür sürelerinde Taguchi yöntemi kullanılarak belirlenen optimum toplam puzolan içeriğinde puzolanların tekli kullanımlarıyla karışımlar üretilmiş; basınç, eğilme, UPV ve su emme deneyleri uygulanıp, üçlü puzolan kullanılarak üretilen beton karışımlarıyla karşılaştırılmıştır.

Farklı karışım içeriklerinde üretilen betonların dayanım özellikleri; basınç, eğilme ve çekme tahribatlı dayanım deneyleri uygulanarak belirlenmiştir. Aynı zamanda tahribatsız deney yöntemlerinden olan ultra ses geçiş hızı deneyi yapılarak basınç dayanımı/ultra ses geçiş hızı ilişkisi irdelenmiştir. Diğer yandan farklı karışım içeriklerinde üretilen numunelerin durabilite özellikleri; su emme oranı, hızlandırılmış korozyon deneyi akım çekme miktarları ve donatı ağırlık kaybı yüzdeleri hesaplanarak değerlendirilmiştir. Referans betonun akım çekme özelliklerine göre belirlenen farklı korozyon sürelerinde tüm seriler sabit potansiyel altında korozyon akımına maruz bırakılarak korozyonun bağ dayanımına etkisi, pullout (çekip çıkarma) deneyleriyle araştırılmıştır. L9 ortogonal dizi serilerinden elde edilen hızlandırılmış korozyon ve bağ dayanımı karakteristikleri, referans seri ile içerisinde %2 oranında kalsiyum nitrit bulunan seri için karşılaştırılmıştır.

Tüm serilerden elde edilen deney sonuçları kullanılarak yapılan bu karşılaştırmalar sonrasında her bir kriter (hedef değer) için istatistik analizler yapılarak parametrelerin optimum seviyeleri belirlenmiştir. Belirlenen bu optimum seviyelerde doğrulama deneyleri yapıp Taguchi yönteminin tahmin değerlerinin doğruluğu test edilmiştir. Ayrıca doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar tüm serilerin deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçların efektifliği gösterilmiştir.

Deneysel ve istatistik analizlerden elde edilen sonuçlar çeşitli grafikler çizilerek yorumlanmıştır. Bu sayede her bir kriter için optimum karışım içeriği belirlenmiş ayrıca uygulanan kriterlerin birbiri ile olan ilişkisi irdelenmiştir.

Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, çekme dayanımı ve bağ dayanımı için yüzey tepki metodu kullanılarak çalışma kapsamında göz önünde bulundurulmuş parametrelerin bağımsız değişken olduğu çoklu regresyon denklemleri elde edilmiştir. Buna göre geliştirilen modeller için bağımlı değişken tahminleri belirli bir güven aralığında yapılabilmektedir.

Taguchi metodu ve yüzey tepki metodu tek bir kriter için parametre optimizasyonu yapan istatistik tabanlı yöntemlerdir. Birçok kriterin değerlendirildiği bu çalışmada çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılarak dayanım ve dayanıklılık kriterleri için ayrı ayrı değerlendirmeler yapılarak genel anlamda en uygun L9 ortogonal dizinin seçimine karar verilmiştir. Bu sayede, birçok kriter için referans betondan daha üstün özellikli en uygun seriler belirlenmiştir.

Gri ilişkisel analizde kriterler eşit ağırlıklı derecelendirme ve entropi yöntemi kullanılarak objektif şekilde ağırlıklandırılmış optimum seri seçiminin iki durumda da değişmediği gösterilmiştir.

Çalışma kapsamında seçilen bazı basınç dayanımı serilerinden SEM görüntüleri alınıp EDX analizleri yapılarak serilerden elde edilen deney sonuçları mikroyapısal değerlendirmelerle desteklenmiştir.

7.1. Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında yapılan deneysel, istatistik ve mikroyapısal çalışmalardan elde edilen önemli sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- **İşlenebilirlik**

L9 ortogonal dizi serilerinde, içerisinde uçucu kül oranının %20, yüksek fırın cürufu oranının %15 ve silis dumanı oranının %3-6 olarak kullanıldığı tasarımlarda slump

değerleri yüksek olmuştur. Silis dumanının %9 ikame oranı slump değerini azaltmıştır. Buna göre aynı oranda süper akışkanlaştırıcı (%1.25) bulunduran; %23 oranında toplam puzolan ikamesinin yapıldığı M1 serisinin slump değeri, içerisinde %6 silis dumanı, %15 yüksek fırın cürufu ve %20 uçucu kül bulunan M5 serisinden %55 oranında daha az olmuştur. İçerisinde %1.25 süper akışkanlaştırıcı bulunan referans serinin slump değeri, içerisinde %1.25 oranında süper akışkanlaştırıcı bulunan L9 ortogonal dizi serilerinin slump değeri ortalamasından %60 daha düşük çıkmıştır. Taguchi yöntemi kullanılarak 28 ve 56 günlük basınç dayanımının optimum parametre seviyelerinde, puzolan ve süper akışkanlaştırıcı için %39-%1.5 (28 günlük) ve %44-%1.5 (56 günlük) içeriklerinde uçucu külün, yüksek fırın cürufunun ve silis dumanının tek puzolan ikamesi olarak kullanıldığı karışımlar üretilmiştir. Böylelikle puzolanların slump değerine olan etkisi bireysel olarak da irdelenmiştir. Buna göre, yukarıda verilen toplam puzolan ikame oranlarında silis dumanının tekli kullanımı, çok ince tanecik yapısından dolayı mümkün olmamış, karışım elde edilememiştir. Diğer yandan uçucu külün tekli kullanımından elde edilen slump değerleri, yüksek fırın cürufunun tekli kullanımından elde edilen değerlerden yaklaşık olarak %35 daha fazla olmuştur. Her iki durum için de puzolanların tekli kullanımı %1.5 süper akışkanlaştırıcı içeren referans serinin slump değerinden daha yüksek olmuştur. Tüm bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde puzolanların portland çimentosu yerine ikame edilerek kullanımı beton karışımların işlenebilirlik özelliklerini artırmıştır. İstatistik analiz sonuçlarına göre; işlenebilirliğin en yüksek olduğu parametre seviyeleri, etki oranları sıralamasıyla; SA:%1.75, YFC:%15, UK:%20 ve SD:%6 olarak elde edilmiştir. Optimum durum için deneysel ve istatistiki tahmin sonuçları arasında %10.5 fark oluşmuştur. Ayrıca kalsiyum nitritin %2 oranında kullanımı beton karışımının işlenebilirliğini referans betona kıyasla artırmıştır.

- **Basınç dayanımı**

14 günlük erken yaş kür süresinde bile L9 ortogonal dizi serilerinden; içerisinde %6 SD, %20 YFC, % 10 UK ve %1.5 SA bulunan M6 serisi, referans betonların ortalama basınç dayanımını yaklaşık olarak %7 oranında geçmiştir. Erken yaş kür süresinde, içerisinde yüksek oranda UK ve YFC bulunan serilerin (M3, M5 ve M9) basınç dayanımları düşük çıkmıştır. Deneylerden elde edilen bu sonuçlar istatistik sonuçlarla örtüşmektedir.

28 günlük kür süresinde L9 ortogonal dizi serilerinin çoğu, basınç dayanımı açısından referans betonların dayanımlarını yakalamıştır. L9 ortogonal dizi serileri arasında dayanımın en yüksek olduğu M6 serisi referans betonların ortalama dayanımlarının %18

oranında üzerinde bir performans göstermiştir. Nihai kür süresi olan 56 günlük sürede M6 serisinin basınç dayanımı, referans serilerin basınç dayanım ortalamalarından %20 oranında daha fazla olmuştur. Kür sürelerinin artışına bağlı olarak referans betonların dayanım kazanımı sınırlı (%17) olurken puzolanlı serilerin dayanım kazanımları oldukça yüksek (%50) olmuştur. Basınç dayanımı açısından optimum seviyelerde tekli puzolan ikame oranları kullanılarak üretilen betonların dayanımları, 28 ve 56 günlük doğrulama betonundan yaklaşık olarak %40 daha az olmuştur. Buna göre, puzolanların üçlü kullanımları sayesinde dayanım açısından eksik yönlerinin tolere edildiği düşünülmektedir. Tüm kür sürelerinde, referans betonda SA oranının değişimi basınç dayanımını önemsenmeyecek derecede etkilemiştir. Üretilen tüm seriler arasında kür sürelerinin tamamında, içerisinde %2 oranında kalsiyum nitrit bulunan serinin basınç dayanımı referans seriden yaklaşık %20 oranında daha fazla olmuştur. 14, 28 ve 56 günlük optimum tasarımlardan elde edilen sonuçlar referans betondan sırasıyla %5, %9.7 ve %16 daha yüksek olmuştur. Diğer yandan 14, 28 ve 56 günlük optimum tasarımlardan elde edilen deneysel ve istatistiki sonuçlar arasında sırasıyla %5.5, %8.8 ve %9.6 oranında farklar oluşmuştur.

- **Ultra ses geçiş hızı (UPV)**

Serilerin ultra ses geçiş hızları, basınç dayanımları ile orantılı olarak değişim göstermiştir. Buna göre yüksek basınç dayanımına sahip serilerin UPV değerleri de yüksek olmuştur. Ancak birbirleri ile yakın basınç dayanımına sahip olan puzolanlı ve referans serilerin UPV sonuçları, puzolanlı serilerde daha yüksek değerler almıştır. Bu durumun oluşması puzolanların ince tanecik yapıları sayesinde sağladıkları komposite ile ilişkilendirilmiştir. Diğer yandan kür süresindeki artış, serilerin UPV değerlerini de artırmıştır. Puzolanlı seriler arasında en yüksek UPV geçiş hızı M6 serisinden elde edilmiştir. Buna göre 28 ve 56 günlük kür sürelerinde M6 serisinin UPV geçiş hızı referans betonlardan sırasıyla %8.2 ve %6.5 oranında daha yüksek olmuştur. 28 ve 56 günlük optimum tasarımlardan elde edilen UPV sonuçları, referans betonun sonuçlarından sırasıyla %6.6 ve %6.5 daha fazla olmuştur. Diğer yandan 28 ve 56 günlük optimum tasarımlardan elde edilen deneysel ve istatistiki sonuçlar arasında sırasıyla %3.6 ve %1 oranında farklar oluşmuştur. %2 oranında kalsiyum nitrit içeren serinin UPV değeri 28 ve 56 günlük kür süreleri için referans betondan sırasıyla %4.6 ve %2.9 daha yüksek olmuştur.

- **Eğilme dayanımı**

Serilerin eğilme dayanımları basınç dayanımı artışına bağlı olarak artış göstermiştir. M6 serisi, 28 günlük kür süresi hariç ortogonal dizi serilerinden en yüksek eğilme dayanımının elde edildiği seri olmuştur. Ancak, 28 günlük kür süresinde de M6 serisi diğer puzolanlı serilere yakın dayanım göstermiştir. Referans serilerin eğilme dayanımları, tüm seriler arasında en yüksek değerleri almıştır. Bu duruma yüksek puzolan oranlarının su talebine bağlı olarak betonda oluşturduğu bünyesel (otojen) rötre çatlaklarının neden olduğu düşünülmektedir. SA oranının %1.5-1.75 olarak kullanıldığı referans serilerde eğilme dayanımı SA'nın %1.25 olduğu duruma göre daha yüksek olmuştur. Buna, betonun daha iyi yerleşmesinin sebep olduğu düşünülmektedir. Puzolanlı seriler arasında en yüksek eğilme dayanımının elde edildiği M6 serisinin 14, 28 ve 56 günlük kür süresinde eğilme dayanımları, referans serilerin ortalamalarına göre sırasıyla %20, %22 ve 20.7 oranında daha az olmuştur. Taguchi yöntemi kullanılarak 28 ve 56 günlük kür sürelerinde belirlenen optimum karışım içeriğinde üretilen tek puzolanlı karışımların eğilme dayanımı seriler arasında en kötü dayanımın elde edildiği seriler olmuştur. Buna göre 28 ve 56 günlük kür sürelerinde YFC'nin tekli kullanımda UK'nın tekli kullanımına nazaran sırasıyla %9.2 ve %14.7 daha fazla dayanım elde edilmiştir. Ayrıca optimum (doğrulama) tasarımlarının 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları sırasıyla YFC'nin tekli kullanımından %40 ve %30, UK'nın tekli kullanımından %53 ve %48 oranında daha yüksek olmuştur. %2 oranında kalsiyum nitrit içeren serinin eğilme dayanımı performansı tüm yaşlarda L9 ortogonal dizi serilerine yakın olmuştur. 14, 28 ve 56 günlük optimum tasarımlardan elde edilen deneysel ve istatistiki sonuçlar arasında sırasıyla %3, %0.85 ve %4.1 oranında farklar oluşmuştur.

- **Yarmada çekme dayanımı**

Serilerin yarmada çekme dayanımları; basınç ve eğilme dayanımı artışına bağlı olarak artış göstermiştir. Yarmada çekme dayanımı açısından, L9 ortogonal serileri arasında en iyi performansı M6 serisi göstermiştir. Buna göre M6 serisi; 14, 28 ve 56 günlük kür sürelerinde referans betonların ortalama yarmada çekme dayanımından sırasıyla %4, %6 ve %18 daha fazla dayanım göstermiştir. Referans betonlarda süperakışkanlaştırıcı dozajının değişimi betonun yarmada çekme dayanımını önemsenmeyecek şekilde etkilemiştir. Taguchi yöntemi kullanılarak 28 ve 56 günlük kür sürelerinde belirlenen optimum karışım içeriğinde üretilen tek puzolanlı karışımların yarmada çekme dayanımları, seriler arasında elde edilen en kötü dayanımlar olmuştur. Eğilmede çekme

dayanımında olduğu gibi YFC'nin tekli kullanımı UK'nın tekli kullanımından daha iyi performans göstermiştir. 28 ve 56 günlük kür sürelerinde optimum (doğrulama) karışımdan elde edilen çekme dayanım değerleri, YFC'nin tekli kullanımından sırasıyla %56 ve %46; UK'nın tekli kullanımından sırasıyla %66 ve %49 oranında daha fazla olmuştur. Taguchi yöntemi kullanılarak belirlenen optimum karışımın 14, 28 ve 56 gün kür sürelerinde yarmada çekme dayanımları referans serilerin ortalamalarından sırasıyla %8.3, %10 ve %18.7 daha fazla olmuştur. %2 oranında kalsiyum nitrit içeren serinin tüm kür sürelerinde yarmada çekme dayanımları referans betonlara yakın değerler almıştır. 14, 28 ve 56 günlük optimum tasarımlardan elde edilen deneysel ve istatistiki sonuçlar arasında sırasıyla %3.13, %4.88 ve %0.66 oranında farklar oluşmuştur.

- **Su emme yüzdesi**

Tüm serilerde, kür süresi artışına bağlı olarak su emme yüzdesi değerleri azalmıştır. Puzolanlı seriler arasında en az su emme oranına sahip seriler, kür süresinden bağımsız olarak silis dumanı ikame oranının %9 olduğu M7, M8 ve M9 serileri olmuştur. Genel anlamda, silis dumanı ikame oranının artışı geçirimsizliği azaltmıştır. Puzolanlı serilerin tamamında su emme oranı referans serilerden daha düşük çıkmıştır. Buna göre; 28 ve 56 günlük kür sürelerinde sırasıyla L9 ortogonal dizi serilerinin ortalama su emme değerleri %2.61 ve %2.36 olurken, referans serilerin ortalaması sırasıyla %3.28 ve %3.24 olmuştur. Referans serilerin 28 günlük ortalama su emme yüzdeleri puzolanlı (L9) serilerin ortalamasından yaklaşık %26 daha fazla olurken, referans serilerin 56 günlük ortalama su emme yüzdeleri puzolanlı (L9) serilerin ortalamasından yaklaşık %37 daha fazla olmuştur. Referans serilerde 56 günlük kür süresinde su emme yüzdesi 28 günlük kür süresine göre ortalama %1.23 azalırken L9 ortogonal dizi serilerinde bu azalma %10.6 olmuştur. Bu durum; referans betonlar için reaksiyonların büyük ölçüde tamamlandığının ancak puzolanlı serilerde reaksiyonların devam ederek betonda dayanıklılık açısından iyileşmenin devam ettiğinin göstergesidir. Elde edilen sonuçlara göre serilerin su emme yüzdeleri, dayanımdan çok içeriğinde bulunan ince taneli puzolanların oranıyla değişmektedir. İçerisinde %2 oranında kalsiyum nitrit bulunan serinin su emme yüzdesi 28 ve 56 günlük kür sürelerinde referans betonların ortalama su emme yüzdesi değerlerine yakın çıkmıştır. Taguchi yöntemi kullanılarak elde edilen optimum (doğrulama) tasarımın 28 ve 56 günlük su emme değerleri, referans betonların su emme değerlerinden sırasıyla %36 ve %38 oranında daha az olmuştur. 28 ve 56 günlük optimum tasarımlardan elde

edilen deneysel ve istatistiki sonuçlar arasında sırasıyla %10.4 ve %10.5 oranında farklar oluşmuştur.

- **Hızlandırılmış korozyon**

İçerisinde puzolan bulunan serilerin hızlandırılmış korozyon deneylerinde; K2, K4 ve K6 durumlarındaki akım çekme miktarları, referans ve kalsiyum nitrit içeren seriden oldukça düşük çıkmıştır. Bu durum serilerin su emme yüzdeleri ile büyük oranda ilişkilidir. Su emme yüzdesinde olduğu gibi; silis dumanının %9 oranında kullanıldığı M7, M8 ve M9 serileri tüm korozyon durumlarında akımın en az çekildiği seriler olmuştur. Bu seriler ortalama olarak, referans betonun yaklaşık %12'si kadar akım çekmişlerdir. Diğer yandan M6 serisi de en az akım çeken serilerden biri olmuştur. Puzolanlı serilerden, %23 toplam puzolan ikame oranı ile en az puzolan içeren M1 serisinin tüm korozyon durumlarında akım çekme miktarı, diğer puzolanlı serilerden daha fazla olmuştur. Bu durum; puzolanların yüksek oranda kullanılmasıyla, elektrolit çözeltinin donatıya nüfuzunu engelleyerek akım çekme miktarını sınırlandırmasının bir göstergesidir. Puzolanlı serilerden en fazla akım çeken M1 serisi bile; K2, K4 ve K6 durumlarında, referans seriden sırasıyla %69.6, %65.1 ve %52 oranında daha az akım çekmiştir. Kalsiyum nitrit içeren seri, K2 durumunda referans betonla yakın akım çekerken K4 ve K6 durumlarında referans betondan daha fazla akım çekmiştir. Korozyon inhibitörü (kalsiyum nitrit) içeren serinin akım çekme oranının yüksek olması; $[NO_2^-/Cl^-]$ iyon oranının düşük oluşuna bağlanmaktadır. Ortalama çekilen akım açısından Taguchi yöntemi kullanılarak belirlenen optimum karışımın, K2, K4 ve K6 durumlarında akım çekme miktarları referans seriden sırasıyla %87, %86.1 ve %85.3 oranında daha az olmuştur. K2, K4 ve K6 durumlarında optimum tasarımlardan elde edilen deneysel ve istatistiki sonuçlarda rölatif hata oranları yüksek olmuştur. Ancak, Taguchi yöntemi kullanılarak elde edilen optimum tasarımların akım çekme miktarları L9 ortogonal dizi serilerinden en az akımın çekildiği M9 serisine nispeten yakın değerler almıştır. Referans betondan çok daha az akım çekmeleri ile birlikte düşünüldüğünde doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar makul ve kabul edilebilir sonuçlardır.

- **Pullout (bağ dayanımı)**

Tüm seriler için korozyonsuz (K0) durumda yapılan pullout testlerinde, maksimum bağ gerilmesi ve toplam tüketilen enerji (TTE) açısından M6 ve M8 serileri, referans betonun bağ dayanımını karakteristiklerini geçmiştir. M1 ve M7 serileri hariç genel olarak L9

ortogonal dizi serilerinin bağ dayanımları referans betona yakın olarak elde edilmiştir. Kalsiyum nitrit içeren serinin bağ dayanımı korozyonsuz durumda referans betondan ve L9 ortogonal dizi serilerinin ortalamasından sırasıyla %9 ve %3.3 daha az olmuştur. Diğer yandan optimum tasarımın bağ dayanımı ve toplam tüketilen enerjisi sırasıyla referans betondan %4.9 daha az ve %7.3 daha fazla olmuştur. K0 durumunda; optimum tasarımlardan elde edilen maksimum bağ dayanımı ve TTE açısından deneysel ve istatistiki sonuçlar arasında sırasıyla %14 ve %10 oranında farklar oluşmuştur.

Tüm serilerde, yaklaşık %3 korozyon seviyesine kadar (gerçek ağırlık kaybı) bağ dayanımı karakteristiklerinde K0 durumuna göre rölatif olarak bir kayıp yaşamamıştır. Genel manada yaklaşık %1.8 korozyon seviyesine kadar korozyon, bağ dayanımını rölatif olarak %20 oranında artırmıştır. Korozyona bağlı ağırlık kaybının % 6-7 olduğu seviyede, bağ dayanımı yaklaşık %20 oranında azalmıştır. Özellikle K4 ve K6 durumlarında bağ dayanımı açısından; puzolanlı seriler referans betondan daha iyi performans sergilemiştir. K6 durumunda maksimum bağ dayanımı için; M6 ve M8 serilerinden referans betona göre sırasıyla %19.7 ve %21.6 daha yüksek bir bağ dayanım değeri elde edilmiştir. Benzer şekilde K6 durumunda TTE enerji açısından M6 ve M8 serileri referans betona göre çok daha iyi bir performans göstermiştir. Kalsiyum nitrit içeren betonlar K4 ve K6 durumlarında hızlandırılmış korozyon deneyi esnasında çatladığından en kötü bağ dayanımı performansının elde edildiği seri olmuştur.

K2, K4 ve K6 durumlarında optimum tasarımdan elde edilen maksimum bağ dayanımları referans betondan sırasıyla; %5.7, %3.5 ve %17.7 oranında daha fazla olmuştur. K2, K4 ve K6 durumlarında optimum tasarımdan elde edilen TTE miktarları referans betondan; K2 durumunda %2.3 daha az, K4 ve K6 durumlarında ise sırasıyla %38.2 ve 10 kat daha fazla olmuştur.

- **Ağırlık kaybı yüzdesi**

Serilerin ağırlık kaybı yüzdeleri çektikleri korozyon akım miktarları ile orantılı olmuştur. Tüm serilerde, korozyon akımına maruz kalınan süre arttıkça oluşan ağırlık kaybı da artmıştır. İçerisinde silis dumanı ikame oranının en fazla olduğu M7, M8 ve M9 serileri korozyon sonrasında en az ağırlık kaybına uğrayan seriler olmuştur. Ayrıca M6 serisi de ağırlık kaybı açısından en iyi performansı gösteren serilerden biridir. K2, K4 ve K6 durumlarında korozyon kaynaklı ağırlık kaybının en fazla yaşandığı, içerisinde en az

ikame puzolan barındıran M1 serisinde bile referans betondan sırasıyla %63, %61.3 ve %47 oranında daha az ağırlık kaybı oluşmuştur. Genel manada serilerde oluşan ağırlık kaybı yüzdeleri beton içerisindeki puzolan oranları ile ilişkilidir. Buna göre toplam puzolan ikame oranının diğer serilere göre daha az olduğu M1, M2 ve M4 serilerinin ağırlık kaybı yüzdeleri daha fazla değerler almıştır. K2, K4 ve K6 durumları için optimum tasarımlardan elde edilen ağırlık kaybı değerleri referans betondan sırasıyla %83.2, %73.6 ve %80.4 daha az olmuştur. İçerisinde kalsiyum nitrit bulunan serinin ağırlık kaybı yüzdeleri tüm durumlarda referans seriden daha fazla olmuştur. Ayrıca K4 ve K6 durumlarında referans seriden yaklaşık 2 kat daha fazla ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Tüm seriler arasında sadece kalsiyum nitrit içeren seride; K4 ve K6 durumlarında, oluşan donatı ağırlık kayıpları neticesinde beton, donatıda meydana gelen hacimsel artıştan kaynaklı gerilmeleri karşılayamayarak çatlamıştır. Burada nitrit bazlı inhibitör $[NO_2^-/Cl^-]$ iyon oranına bağlı olarak, korozyonu engellememiş aksine hızlandırmıştır.

- **SEM-EDX**

SEM görüntü analizleri numunelerin dayanım özellikleri bakımından mikroyapısal olarak da desteklenmesi amacıyla yapılmıştır. Buna göre görüntülemelerde en masif yapılar; M6, optimum tasarım (doğrulama) ve kalsiyum nitrit içeren serilerden elde edilmiştir. Bu serilerin yoğun CSH yapıları 28 ve 56 günlük kür sürelerinde referans seriden daha belirgin olmuştur. Diğer yandan optimum toplam puzolan içeriğinde üretilen tekli karışımların SEM görüntülerinde; basınç dayanımı düşüklüklerine uygun olarak boşluklu yapıların, portlanditin ve hidratasyona uğramamış taneciklerin daha yoğun olduğu tespit edilmiştir. SEM-EDX analizi yapılan serilerde, atomik Ca/Si oranları 28 günden 56 gün kür süresine geçişte azalmıştır. Bu durum, kür süresi artışıyla birlikte serilerde oluşan basınç dayanımı yükselişiyle ilişkilendirilmiştir. Diğer yandan her iki kür süresinde de dayanımın en düşük olduğu YFC TEK ve UK TEK kodlu serilerde Ca/Si oranı en yüksek değerleri almıştır. Referans ve kalsiyum nitrit içeren seride kür süresine bağlı olarak Ca/Si oranı azalması sınırlı olurken genel olarak puzolan içeren serilerde bu azalma yüksek olmuştur. Bu durum; basınç dayanım sonuçlarına uyumlu olarak sadece Portland çimentosu içeren karışımların 28 günlük kür süresinde hemen hemen nihai dayanıma eriştiği yönünde değerlendirilmiştir. Ancak; puzolanlı serilerde, puzolonik reaksiyonlara bağlı olarak Ca tüketimi devam ettiğinden Ca/Si oranındaki azalma kür süresi artışında daha yüksek olmuştur. Bu durum; puzolanlı serilerin 56 gün kür süresi sonunda yüksek

dayanım artış oranına ulaşmasıyla ilişkilendirilmiştir. İki farklı kür süresinde de yüksek dayanıma sahip serilerin Ca/Si oranları, dayanımı düşük serilerden daha düşük çıkmıştır.

- **İstatistik yöntemler**

Tez çalışması kapsamında istatistik yöntemler, deneysel verilerin analizi ve yorumlanması sürecinde bilimsel bir temele dayanarak, rastlantısal etkilerin kontrol edilmesine yardımcı olunması amacıyla kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan Taguchi yöntemi ve yüzey tepki metodu (YTM), sınırlı sayıda bir örnekleme dayanarak genellemeler yapma imkânı sağlamıştır. Böylece, genel geçerlilik artırılarak zaman ve kaynak tasarrufu sağlanmıştır. Her bir kriter için bahsedilen yöntemler kullanılarak optimum tasarımlar elde edilmiştir. Buna göre; Taguchi yönteminin tahmin değeri ile optimum tasarımın deney sonucu karşılaştırılarak yöntemin kabul edilebilir bir hata oranı ile optimizasyon yapabildiği görülmüştür. Yüzey tepki metodu ile yapılan analizler Taguchi yöntemi ile bulunan parametre optimum seviyeleri ile benzerlik göstermiş yöntemler birbirini destekleyen sonuçlar vermiştir. Kullanılan bu iki yöntem; kriterler için ayrı ayrı optimizasyon yapan yöntemler olduğundan ayrıca çok kriterli karar verme (ÇKKV) durumlarında optimizasyon yapabilmek için gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılmıştır. Buna göre tez kapsamında göz önünde bulundurulan dayanım kriterleri için içerisinde %6 SD, %20 YFC, %10 UK ve %1.5 SA bulunan M6 serisi gri ilişki derecesi en yüksek seri olmuştur. Diğer yandan tez kapsamında ele alınan dayanıklılık kriterleri için içerisinde %9 SD, %20 YFC, %15 UK ve %1.25 SA bulunan M9 serisi gri ilişki derecesi en yüksek seri olmuştur. Dayanım ve dayanıklılık kriterleri birlikte değerlendirildiğinde, betonda dayanım kriterlerinin daha önemli olduğu kabul edilerek optimum genel tasarım serisi olarak M6 serisinin seçiminin daha uygun olacağı kararlaştırılmıştır. Bu bağlamda, seçilen M6 serisi dayanım ve dayanıklılık kriterleri yönünden referans betona göre eğilmede çekme dayanımı hariç diğer tüm kriterler için daha iyi performans göstermiştir.

Günümüz dünyasında; insan kaynaklı karbondioksit emisyonlarındaki artış, küresel ısınmaya ve buna bağlı olarak dünya genelinde bir dizi etkiye yol açmaktadır. Yükselen ortalama sıcaklıklar; buzulların erimesi, deniz seviyesinde meydana gelen yükselme, şiddetli hava olayları (kasırgalar, seller, kuraklık), tarım ve su kaynakları üzerindeki etkiler gibi birçok sorunu beraberinde getirmektedir. Buna göre; yapılarımızın büyük bir bölümünde kullanılan çimento üretiminden dolayı, yıllık olarak atmosferimize yaklaşık

1.5 milyar ton CO₂ gazı salınımı meydana gelmektedir (Kumar vd., 2023). Çimento üretimi ile atmosfere salınan CO₂ gazı, toplam CO₂ gazı salınımının %8'ini oluşturmaktadır (Bheel vd., 2020; Çınar vd., 2022). Bu kapsamda değerlendirildiğinde, tez çalışmasından; uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi atık malzemelerin betonda kullanımıyla %36 oranında çimento tasarrufu sağlanarak hem dayanım hem de dayanıklılık yönüyle etkin, çevresel zararların azaltılması ve inşaat uygulamalarının genel sürdürülebilirliğinin iyileştirilmesi konusunda umut vaat eden sonuçlar elde edilmiştir.

7.2. Öneriler

Yapılan bu tez çalışması ve literatürdeki diğer çalışmalar göz önüne alındığında, ileride araştırılması muhtemel çalışmalara yapılmış olan öneriler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Bu çalışmada kullanılan yapay puzolanların dışında volkanik tüf veya volkanik cam gibi doğal puzolanlarla istatistik tabanlı deney tasarım yöntemleri kullanılarak araştırma yapılabilir.
- Bu çalışmada çeşitli mineral katkıların betonun dayanım ve korozyon davranışına etkisi istatistik yöntemler kullanılarak araştırılmıştır. İleride yapılacak olan çalışmalarda parametre sayısı azaltılarak tam faktöriyel yöntemle istatistik yöntemlerin karşılaştırması yapılabilir.
- Çalışma kapsamında yapılan hızlandırılmış korozyon deneylerinde korozyon seviyeleri sınırlı kalmıştır. Korozyon akım süreleri uzatılarak daha yüksek korozyon seviyelerindeki bağ dayanımlarının değişimleri araştırılabilir.
- Yapılan deneysel çalışmada korozyonu engellemede mineral katkıların etkisi araştırılmıştır. Buna ilave olarak korozyona karşı dayanıklı donatılar kullanılarak da araştırma yapılabilir.
- Çalışma kapsamında aderansı belirlemek için çekip çıkarma yöntemi kullanılmıştır. İleri dönem çalışmalarda farklı aderans belirleme yöntemleriyle istatistik tabanlı deney tasarımı kullanılarak irdelenebilir.
- Kalsiyum nitrit tabanlı korozyon inhibitörünün etkinliğinde $[\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-]$ iyonunun optimum oranı istatistik tabanlı yöntemlerle araştırılabilir. Ayrıca farklı anodik korozyon inhibitörleri ile çalışmalar yapılabilir.
- Deprem gerçeği ile her zaman karşı karşıya olan ülkemizde; kentsel dönüşüm amacıyla ya da herhangi bir şekilde elde edilen çok büyük oranda beton atığı

oluşacaktır. Açığa çıkmış ve çıkacak olan bu atık betonlardan elde edilecek geri dönüştürülmüş agregalar puzolanlar ile birlikte kullanılarak daha çevreci sürdürülebilir betonları üretilmesi çalışmaları istatistik yöntemler kullanılarak yapılabilir. Bu çalışmaların sadece laboratuvar çalışması olarak kalmaması, inşaat alanlarında da uygulanması ülke ekonomimiz açısından da yüksek katma değer oluşturacaktır.



8. KAYNAKLAR

- A. Karataş, M. 2022. "Inconel 718'in tel erozyon ile işlenmesinde yüzey pürüzlülüğünün Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz yöntemi ile çok kriterli optimizasyonu". Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 28(4), 516–532.
- Abdulrahman, A. S., Mohammad, I. 2012. "Evaluation of corrosion inhibiting admixtures for steel reinforcement in concrete". International Journal of the Physical Sciences, 7(1), 139–143.
- Abosrra, L., Ashour, A. F., Youseffi, M. 2011. "Corrosion of steel reinforcement in concrete of different compressive strengths". Construction and Building Materials, 25(10), 3915–3925.
- Al-jaberi, L. A., Ali, A. M. 2014. "Evaluation of compressive strength by non-destructive test using ultrasonic pulse velocity with maximum size aggregate (10 and 20) mm". Journal of Engineering and Sustainable Development, 18(3), 208–222.
- Al-Amoudi, O. S. B., Maslehuddin, M., Lashari, A. N., Almusallam, A. A. 2003. "Effectiveness of corrosion inhibitors in contaminated concrete". Cement and Concrete Composites, 25(4–5), 439–449.
- Al-Shannag, M. J., Charif, A. 2017. "Bond behavior of steel bars embedded in concretes made with natural lightweight aggregates". Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 29(4), 365–372.
- Al-Sulaimani, G. J., Kaleemullah, M., Basunbul, I. A., Rasheeduzzafar. 1990. "Influence of Corrosion and Cracking on Bond Behavior and Strength of Reinforced Concrete Members". Structural Journal, 87(2), 220–231.
- Alighardashi, A., Mehrani, M. J., Fakhravar, N., Ramezaniyanpour, A. M. 2019. "Material design and characterization of pervious concrete reactive barrier containing nano-silica and fine pumice aggregate". Asian Journal of Civil Engineering, 20(1), 49–56.
- Almusallam, A. A., Al-Gahtani, A. S., Aziz, A. R., Rasheeduzzafar. 1996. "Effect of reinforcement corrosion on bond strength". Construction and Building Materials, 10(2), 123–129.
- Amer, I., Kohail, M., El-Feky, M. S., Rashad, A., Khalaf, M. A. 2021. "Characterization of alkali-activated hybrid slag/cement concrete". Ain Shams Engineering Journal, 12(1), 135–144.
- Andrade, C., Alonso, C., Sarra, J. 2002. "Corrosion rate evolution in concrete structures exposed to the atmosphere". Cement and Concrete Composites, 24(1), 55–64.

- Angst, U., Elsener, B., Larsen, C. K., Vennesland, Ø. 2009. "Critical chloride content in reinforced concrete — A review". *Cement and Concrete Research*, 39(12), 1122–1138.
- Ann, K. Y., Buenfeld, N. R. 2015. "The effect of calcium nitrite on the chloride-induced corrosion of steel in concrete". <https://doi.org/10.1680/macr.2007.59.9.689>, 59(9), 689–697.
- Arnoğlu, E., Girgin, C. 1999. "Uzun Süreli ve Değişik Kür Şartlarında Eğilme Dayanımı Bağlantıları". *Beton Prefabrikasyon*, (50).
- ASTM C109/C109M-20. 2020. "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)". Tarihinde adresinden erişildi https://www.astm.org/c0109_c0109m-20.html
- ASTM C618-22. 2023. "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete". Tarihinde adresinden erişildi <https://www.astm.org/c0618-22.html>
- ASTM C642-21. 2021. "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete". Tarihinde adresinden erişildi <https://www.astm.org/c0642-21.html>
- Atabey, İ. İ., Çelikten, S., Yurt, Ü. 2020. "Farklı Mineral Katkılı Yüksek Dayanımlı Betonlarda Metagabro Agregalarının Kullanılabilirliğinin Araştırılması". *Academic Platform - Journal of Engineering and Science*, 8(3), 514–522.
- Atış, C. D., Özcan, F., Kiliç, A., Karahan, O., Bilim, C., Severcan, M. H. 2005. "Influence of dry and wet curing conditions on compressive strength of silica fume concrete". *Building and Environment*, 40(12), 1678–1683.
- Aydın, Ö., Çizmecioglu, Z. 2013. "Beton Yapılarda İnhibitör Kullanımının Korozyon Önlemedeki Etkinliğinin Değerlendirilmesi". *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 129(137).
- Aydın, T., Pehlivanlı, Z. O. 2016. "Jeopolimer Esaslı Gözenekli Hafif Yapı Malzemelerinin Geliştirilmesi". *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(1), 227–238.
- Azad, A. K., Ahmad, S., Al-Gohi, B. H. A. 2015. "Flexural strength of corroded reinforced concrete beams". <https://doi.org/10.1680/macr.2010.62.6.405>, 62(6), 405–414.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın, S., Ün, H., Türkel, S. 2015. "*Beton*". İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.

- Başar, G., Akın, H. K., Kahraman, F. 2020. "Tepki yüzeyi metodolojisi kullanılarak nanokompozitin delinmesinde oluşan itme kuvvetinin modellenmesi ve analizi". Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 8(2), 293–305.
- Beaudoin, J. ve Marchand, J. 2000. "Pore Structure". İçinde *Handbook Of Analytical Techniques In Concrete Science And Technology Principles, Techniques, and Applications*. Elsevier.
- Bektaş, H., Tuna, K. 2013. "Borsa İstanbul Gelişen İşletmeler Piyasası'nda İşlem Gören Firmaların Gri İlişkisel Analiz ile Performans Ölçümü". Journal of the Faculty of Economics and Administrative Sciences, 3(2), 185–198. Tarihinde adresinden erişildi <https://dergipark.org.tr/en/pub/ckuiibfd/issue/32901/365494>
- Berke, N. S., Dallaire, M. P., Hicks, M. C., Hoopes, R. J. 1993. "Corrosion of Steel in Cracked Concrete". Corrosion, 49(11). Tarihinde adresinden erişildi <https://onepetro.org/corrosion/article-abstract/117064/Corrosion-of-Steel-in-Cracked-Concrete>
- Bheel, N., Jokhio, M. A., Abbasi, J. A., Lashari, H. B., Qureshi, M. I., Qureshi, A. S. 2020. "Rice Husk Ash and Fly Ash Effects on the Mechanical Properties of Concrete". Engineering, Technology & Applied Science Research, 10(2), 5402–5405.
- Bilici, H., Türköz, M., Savaş, H. 2022. "Üç Farklı Termik Santralden Alınan Uçucu Külün İnce Taneli Zeminin Kompaksiyon Ve Dayanım Özellikleri Üzerindeki Performansı". Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University, 30(3), 379–388.
- Bilim, C., Atış, C. D. 2011. "Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu İçeren Harçların Aşınma ve Mukavemet Özellikleri". Politeknik Dergisi, 14(2), 101–107. Tarihinde adresinden erişildi <https://dergipark.org.tr/tr/pub/politeknik/issue/33057/367904>
- Boğa, A. R. 2005. "Uçucu küllü betonarme elemanlarda donatı korozyonunun hızlandırılmış yöntemlerle araştırılması". YL Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- Boğa, A. R. 2010. "Yüksek Fırın Cürufu ve Korozyon İnhibitörü Kullanımının Beton İçerisindeki Donatı Korozyonuna ve Beton Özelliklerine Etkileri". Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- Boran, H., Günaydın, O., Güçlüer, K. 2020. "Investigation of Engineering Properties of

- Blast Furnace Slag Additive Mortars". *MANAS Journal of Engineering*, 8(2), 138–143.
- Box, G. 1988. "Signal-to- noise ratios, performance criteria, and transformations". *Technometrics*, 30(1), 1–17.
- Cabrera, J. G., Ghoddoussi, P. 1992. "The effect of reinforcement corrosion on the strength of the steel/concrete bond". İçinde *In International conference on bond in concrete*. Riga, Latvia.
- Caniyilmaz, E., Kutay, F. 2013. "Taguchi Metodunda Varyans Analizine Alternatif Bir Yaklaşım". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 18(3), 51–63. Tarihinde adresinden erişildi <https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd/issue/6657/88993>
- Cao, Z., Hibino, M., Goda, H. 2015. "Effect of nitrite inhibitor on the macrocell corrosion behavior of reinforcing steel". *Journal of Chemistry*, 2015.
- Chatterjee, A., Das, D. 2013. "Assessing flow response of self-compacting mortar by Taguchi method and ANOVA interaction". *Materials Research*, 16(5), 1084–1091.
- Chehrehghani, S., Noaparast, M., Rezai, B., Shafaei, S. Z. 2017. "Bonded-particle model calibration using response surface methodology". *Particuology*, 32, 141–152.
- Chelladurai, S. J. S., Murugan, K., Ray, A. P., Upadhyaya, M., Narasimharaj, V., Gnanasekaran, S. 2021. "Optimization of process parameters using response surface methodology: A review". *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 1301–1304.
- Choi, Y. S., Yi, S. T., Kim, M. Y., Jung, W. Y., Yang, E. I. 2014. "Effect of corrosion method of the reinforcing bar on bond characteristics in reinforced concrete specimens". *Construction and Building Materials*, 54, 180–189.
- Chong, B. W., Othman, R., Jaya, R. P., Hasan, M. R. M., Sandu, A. V., Nabiałek, M., ... Abdullah, M. M. A. B. 2021. "Design of Experiment on Concrete Mechanical Properties Prediction: A Critical Review". *Materials* 2021, Vol. 14, Page 1866, 14(8), 1866.
- Chung, L., Jay Kim, J. H., Yi, S. T. 2008. "Bond strength prediction for reinforced concrete members with highly corroded reinforcing bars". *Cement and Concrete Composites*, 30(7), 603–611.
- Cihan, M. T., Güner, A., Yüzer, N. 2013. "Response surfaces for compressive strength of concrete". *Construction and Building Materials*, 40, 763–774.
- Çinar, M., Sütçü İmam Üniversitesi, K., Mühendisliği, İ., Yazar, S., Author, C. 2022. "Geoteknik Uygulamalarda Geopolimerlerin Kullanılabilirliğinin İncelenmesi,

- Literatür Çalışması". Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25(4), 774–789.
- Dave, S. V., Bhogayata, A., Arora, N. K. 2021. "Mix design optimization for fresh, strength and durability properties of ambient cured alkali activated composite by Taguchi method". Construction and Building Materials, 284, 122822.
- De Side, G. N., Kencaawati, N. N., Hariyadi. 2020. "An application of Taguchi experiment design methods on optimization of mortar mixture composition with Silica Fume as a partial substitute for cement". IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 413(1), 012012.
- Demirboğa, R., Türkmen, İ., Karakoç, M. B. 2004. "Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixtured concrete". Cement and concrete research, 34 (12), 2.
- Ding, Q., Geng, J., Hu, S., Sun, J., Sun, B. 2009. "Different effects of fly ash and slag on anti-rebar corrosion ability of concrete with chloride ion". Wuhan University Journal of Natural Sciences, 14(4), 355–361.
- Doğan, M. 2009. "Betonarme Yapılardaki Deprem Hasarlarına Korozyonun Etkisi". Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskisehir Osmangazi University, 22(1), 147–168. Tarihinde adresinden erişildi <https://dergipark.org.tr/en/pub/ogummf/issue/30154/325411>
- Doğan, Ü. A. 2008. "Beton Bileşim Parametrelerinin Geçirimsizlik Özellikleri ve Gömülü Çelik Donatı Korozyonuna Etkisi". Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Dorum, A., Koçak, Y., Yılmaz, B., Uçar, A. 2013. "Uçucu Kül Katkılı Çimento Hidratasyonuna Elektrokinetik Özelliklerin Etkisi". Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 25(3), 449–457. Tarihinde adresinden erişildi <https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd/issue/6685/88569>
- Eken, M. 2021. "Farklı mineral ve tarımsal atık kaplamalı betonarme donatıların ve katkılı betonların korozyon performansının incelenmesi". Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 11(2), 466–481.
- Erdoğan, T. Y. 2003. "Beton". ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık ve İletişim A.Ş., 741 s.
- Eşme, U. 2009. "Application of Taguchi Method for The Optimization of Resistance Spot Welding Process". Arabian Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media BV), 34.

- Fang, C., Lundgren, K., Chen, L., Zhu, C. 2004. "Corrosion influence on bond in reinforced concrete". *Cement and Concrete Research*, 34(11), 2159–2167.
- Fei, F. L., Hu, J., Yu, Q. J., Wei, J. X., Nong, Y. B. 2015. "The effect of a tailored electro-migrating corrosion inhibitor on the corrosion performance of chloride-contaminated reinforced concrete". *Materials and Corrosion*, 66(10), 1039–1050.
- Feng, W., Tarakbay, A., Ali Memon, S., Tang, W., Cui, H. 2021. "Methods of accelerating chloride-induced corrosion in steel-reinforced concrete: A comparative review". *Construction and Building Materials*, 289, 123165.
- Feng, Z., Frankel, G. S., Matzdorf, C. A. 2014. "Quantification of Accelerated Corrosion Testing of Coated AA7075-T6". *Journal of The Electrochemical Society*, 161(1), C42–C49.
- Fu, X., Chung, D. D. L. 1997. "Effect of corrosion on the bond between concrete and steel rebar". *Cement and Concrete Research*, 27(12), 1811–1815.
- Gaidis, J. M. 2004. "Chemistry of corrosion inhibitors". *Cement and Concrete Composites*, 26(3), 181–189.
- Gao, L., Adesina, A., Das, S. 2021. "Properties of eco-friendly basalt fibre reinforced concrete designed by Taguchi method". *Construction and Building Materials*, 302, 124161.
- Ghanei, A., Eskandari-Naddaf, H., Davoodi, A. 2018. "Corrosion behavior and optimization of air-entrained reinforced concrete, incorporating microsilica". *Structural Concrete*, 19(5), 1472–1480.
- Gmira, A., Pellenq, R. J. M., Rannou, I., Duclaux, L., Clinard, C., Cacciaguerra, T., ... Van Damme, H. 2002. "A Structural Study of Dehydration/Rehydration of Tobermorite, a Model Cement Compound". *Studies in Surface Science and Catalysis*, 144, 601–608.
- Gönen, T., Yazıcıoğlu, S. 2004. "Farklı Nem Ortamlarındaki Betonlarda Karbonatlaşma Gelişimi". *F.Ü Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 367–373. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.researchgate.net/publication/258926193>
- Gouda, V. K. 1970. "Corrosion and Corrosion Inhibition of Reinforcing Steel: I. Immersed in Alkaline Solutions". *British Corrosion Journal*, 5(5), 198–203.
- Gu, G. P., Beaudoin, J. J., Ramachandran, V. S. 2000. "Techniques for Corrosion Investigation in Reinforced Concrete". İçinde *Handbook Of Analytical Techniques In Concrete Science And Technology* (s. 964). William Andrew Publishing.
- Güleryüz, E., Özen, S., Mardani-Aghabaglou, A. 2020. "Effect of utilization of mineral

- admixture on the fresh and hardened properties of air-entrained cement mortars". Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 26(6), 1053–1061.
- Gulikers, J. J. W. 1996. "Experimental investigations on macro cell corrosion in chloride-contaminated concrete". HERON, 41 (2), 1996. Tarihinde adresinden erişildi <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A75f2718d-1a5f-40f3-b412-5cbbd176bf72>
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M. 2008. "A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag". Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 41(3), 479–493.
- Guo, Z., Jiang, T., Zhang, J., Kong, X., Chen, C., Lehman, D. E. 2020. "Mechanical and durability properties of sustainable self-compacting concrete with recycled concrete aggregate and fly ash, slag and silica fume". Construction and Building Materials, 231, 117115.
- Hausmann, D. A. 1967. "Hausmann, D. A. (1967). Steel corrosion in concrete--How does it occur?". Materials protection.
- Hımslıoğlu, S., Bayrak, O. Ü. 2007. "Optimization of early flexural strength of pavement concrete with silica fume and fly ash by the Taguchi method". Civil Engineering and Environmental Systems, 21(2), 79–90.
- Hornbostel, K., Angst, U. M., Elsener, B., Larsen, C. K., Geiker, M. R. 2016. "Influence of mortar resistivity on the rate-limiting step of chloride-induced macro-cell corrosion of reinforcing steel". Corrosion Science, 110, 46–56.
- Ihekwebi, N. M., Hope, B. B., Hansson, C. M. 1996. "Pull-out and bond degradation of steel rebars in ECE concrete". Cement and Concrete Research, 26(2), 267–282.
- IS 13311-1. 1992. "Method of Non-destructive testing of concret, Part 1". Tarihinde adresinden erişildi <https://law.resource.org/pub/in/bis/S03/is.13311.1.1992.pdf>
- Jafari, K., Tabatabaeian, M., Joshaghani, A., Ozbakkaloglu, T. 2018. "Optimizing the mixture design of polymer concrete: An experimental investigation". Construction and Building Materials, 167, 185–196.
- Jiang, C., Wu, Y. F., Dai, M. J. 2018. "Degradation of steel-to-concrete bond due to corrosion". Construction and Building Materials, 158, 1073–1080.
- Jones, R., Gatfield, E. N. 1955. "Testing concrete by an ultrasonic pulse tech". Ultrasonic Testing of Materials, 34.
- Joshaghani, A., Ramezani-pour, A. A., Ataei, O., Golroo, A. 2015. "Optimizing pervious concrete pavement mixture design by using the Taguchi method".

- Construction and Building Materials, 101, 317–325.
- Karaatlı, M. 2016. "Entropi-gri ilişkisel analiz yöntemleri ile bütünleşik bir yaklaşım: turizm sektöründe uygulama". Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 21(1), 63–77. Tarihinde adresinden erişildi <https://dergipark.org.tr/en/pub/sduibfd/issue/20859/223798>
- Karthik, S., Saravana, K., Mohan, R., Ledesma, F. 2021. "A Taguchi Approach for Optimizing Design Mixture of Geopolymer Concrete Incorporating Fly Ash, Ground Granulated Blast Furnace Slag and Silica Fume". Crystals 2021, Vol. 11, Page 1279, 11(11), 1279.
- Kate, G. K., Nayak, C. B., Thakare, S. B. 2021. "Optimization of sustainable high-strength–high-volume fly ash concrete with and without steel fiber using Taguchi method and multi-regression analysis". Innovative Infrastructure Solutions, 6(2), 1–18.
- Khokhar, M. I. A., Roziere, E., Turcry, P., Grondin, F., Loukili, A. 2010. "Mix design of concrete with high content of mineral additions: Optimisation to improve early age strength". Cement and Concrete Composites, 32(5), 377–385.
- Kivak, T. 2014. "Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts". Measurement, 50(1), 19–28.
- Kırgız, M. S. 2011. "İkameli ve Katkılı Çimento Pastalarının Hidratasyon Bileşiklerinin Taramalı Elektron Mikroskobu Kullanılarak Belirlenmesine İlişkin Literatür Araştırmaları". Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University, 24(1), 72–90. Tarihinde adresinden erişildi <https://dergipark.org.tr/en/pub/ogummf/issue/30022/324102>
- Koyuncu, F. 2013. "Entropi ile ağırlıklandırılmış sezgisel bulanık mantık-gri ilişki analiz tabanlı tedarikçi seçim modeli". Yüksek Lisans Tezi İstanbul Üniversitesi.
- Kumar, K. N., Divahar, R., Gupta, M., Raj, P. S. A., Sangeetha, S. P., Joanna, P. S. 2023. "Elimination of global warming gas emissions by utilizing high reactive metakaolin in high strength concrete for eco-friendly protection". Materials Research Express, 10(8), 085507.
- Kunther, W., Ferreira, S., Skibsted, J. 2017. "Influence of the Ca/Si ratio on the compressive strength of cementitious calcium–silicate–hydrate binders". Journal of Materials Chemistry A, 5(33), 17401–17412.
- Kuo, Y., Yang, T., Huang, G. W. 2008. "The use of grey relational analysis in solving

- multiple attribute decision-making problems". *Computers & Industrial Engineering*, 55(1), 80–93.
- Lee, Lee, H. K. 2013. "Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature". *Construction and Building Materials*, 47, 1201–1209.
- Lee, S., Shin, S. 2019a. "Prediction on Compressive and Split Tensile Strengths of GGBFS/FA Based GPC". *Materials* 2019, Vol. 12, Page 4198, 12(24), 4198.
- Lee, S., Shin, S. 2019b. "Prediction on Compressive and Split Tensile Strengths of GGBFS/FA Based GPC". *Materials* 2019, Vol. 12, Page 4198, 12(24), 4198.
- Li, C., Chen, Q., Wang, R., Wu, M., Jiang, Z. 2020. "Corrosion assessment of reinforced concrete structures exposed to chloride environments in underground tunnels: Theoretical insights and practical data interpretations". *Cement and Concrete Composites*, 112, 103652.
- Lopez-Calvo, H. Z., Montes-Garcia, P., Bremner, T. W., Thomas, M. D. A., Jiménez-Quero, V. G. 2012. "Compressive strength of HPC containing CNI and fly ash after long-term exposure to a marine environment". *Cement and Concrete Composites*, 34(1), 110–118.
- Lothenbach, B., Scrivener, K., Hooton, R. D. 2011. "Supplementary cementitious materials". *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1244–1256.
- Madandoust, R., Ghavidel, R., Nariman-Zadeh, N. 2010. "Evolutionary design of generalized GMDH-type neural network for prediction of concrete compressive strength using UPV". *Computational Materials Science*, 49(3), 556.
- Mangat, P. S., Elgarf, M. S. 1999. "Bond characteristics of corroding reinforcement in concrete beams". *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 32(2), 89–97.
- Mazloom, M., Ramezani-pour, A. A., Brooks, J. J. 2004. "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete". *Cement and Concrete Composites*, 26(4), 347–357.
- Mehta, P. K., Paulo, J. M. M. 1986. *"Concrete: Microstructure, Properties, and Materials"* (4th Editio). McGraw-Hill Education.
- Mohamed, O. A., Najm, O. F. 2017. "Compressive strength and stability of sustainable self-consolidating concrete containing fly ash, silica fume, and GGBS". *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 11(4), 406–411.
- Mohammed, T. U., Yamaji, T., Aoyama, T., Hamada, H. 1989. "Mechanisms of

- Corrosion of Steel in Concrete". *Materials Science of Concrete*, 1(697), 285–316.
- Montes, P., Bremner, T. W., Castellanos, F. 2006. "Interactive effects of fly ash and CNI on corrosion of reinforced high-performance concrete". *Materials and Structures*, 39, 201–210.
- Muralidharan, S., Saraswathy, V., Nima, S. P. M., Palaniswamy, N. 2004. "Evaluation of a composite corrosion inhibiting admixtures and its performance in Portland pozzolana cement". *Materials Chemistry and Physics*, 86(2–3), 298–306.
- Mutafa, C. M., Shahmoor, S. M., Dulal, I. 1997. "Corrosion behaviour of mild steel in moderately alkaline to acidic simulated cooling water containing molybdate and nitrite". *British Corrosion Journal*, 32(2), 133–137.
- Nagaratnam, B. H., Rahman, M. E., Mirasa, A. K., Mannan, M. A., Lame, S. O. 2016. "Workability and heat of hydration of self-compacting concrete incorporating agro-industrial waste". *Journal of Cleaner Production*, 112, 882–894.
- Nash't, I. H., A'bour, S. H., Sadoon, A. A. 2005. "Finding an united relationship between crushing strength of concrete and non-destructive tests". İçinde *Proceedings of Middle East Non-destructive Testing Conference & Exhibition, Bahrain*.
- Nasir Amin, M., Ur Rehman, K., Shahzada, K., Khan, K., Wahab, N., Abdulalim Alabdullah, A. 2022. "Mechanical and microstructure performance and global warming potential of blended concrete containing rice husk ash and silica fume". *Construction and Building Materials*, 346, 128470.
- Olivia, M., Nikraz, H. 2012. "Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method". *Materials & Design (1980-2015)*, 36, 191–198.
- Ostrowski, M., Pichniarczyk, P., Kądziałowski, G. 2020. "Ecological and technological effects of using concretes with low Portland clinker". *MATEC Web of Conferences*, 322, 01021.
- Ouglova, A., Berthaud, Y., Foct, F., François, M., Ragueneau, F., Petre-Lazar, I. 2008. "The influence of corrosion on bond properties between concrete and reinforcement in concrete structures". *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 41(5), 969–980.
- Özbay, E., Erdemir, M., Durmuş, H. I. 2016. "Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review". *Construction and Building Materials*, 105, 423–434.
- Paşa, O. 2018. "*Uçucu Kül ve Silis Dumanı Katkılı Yüksek Dayanımlı Betonların Kalıcılık Özellikleri*". Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edabali Üniversitesi, Fen Bilimleri

Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü.

- Paul, S. C., van Rooyen, A. S., van Zijl, G. P. A. G., Petrik, L. F. 2018. "Properties of cement-based composites using nanoparticles: A comprehensive review". *Construction and Building Materials*, 189, 1019–1034.
- Perez, B. M. 1999. "*Service Life Modelling of R.C. Highway Structures Exposed to Chlorides*". Doctor of Philosophy Graduate Department of Civil Engineering University of Toronto.
- Pituch, K. A., Stevens, J. P. 2016. "*Applied multivariate statistics for the social sciences*" (6. baskı). Routledge.
- Qin, L., Gao, X., Chen, T. 2019. "Influence of mineral admixtures on carbonation curing of cement paste". *Construction and Building Materials*, 212, 653–662.
- Raj, S. R., Arulraj, P. G., Anand, N., Balamurali, K., Gokul, G. 2021. "Influence of Various Design Parameters on Compressive Strength of Geopolymer Concrete: A Parametric study by Taguchi Method". *International Journal of Engineering*, 34(10), 2351–2359.
- Ramachandran, V. S., Feldman, R. F. 1996. "Concrete Science". *Concrete Admixtures Handbook*, 1–66.
- Ramasamy, N. G., Lakshmiathy, M., Kannan Rajkumar, P. R. 2020. "Optimization and Experimental investigation of High-Performance concrete". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 912(6), 062051.
- Ramezaniapour, A. A., Malhotra, V. M. 1995. "Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume". *Cement and Concrete Composites*, 17(2), 125–133.
- Rao, C. M., Venkatasubbaiah, K., Rao, K. J. 2016. "Experimental investigation of surface roughness characteristics R_a , R_q and R_z ". *International Journal of Hybrid Information Technology*, 9(7), 373–388.
- Ray, D., Sarkar, B. K., Rana, A. K., Bose, N. R. 2001. "The mechanical properties of vinylester resin matrix composites reinforced with alkali-treated jute fibres". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(1), 119–127.
- Reou, J. S., Ann, K. Y. 2008. "The electrochemical assessment of corrosion inhibition effect of calcium nitrite in blended concretes". *Materials Chemistry and Physics*, 109(2–3), 526–533.
- Rouf, Z., Younis, F., Abdullatif, M. 1986. "Control of quality of the concrete via using

- Ultrasonic vibration". National Center for laboratories construction.
- Sabarish, K. V., Parvati, T. S. 2021. "An anatomization of concrete elements with Taguchi optimization method". *Materials Today: Proceedings*, 39, 654–661.
- Sabarish, K. V., Paul, P. 2020. "Optimizing the concrete materials by L9 orthogonal array". *Materials Today: Proceedings*, 22, 460–464.
- Sadeghi, N., Sharma, A. 2019. "Pull-Out Test for Studying Bond Strength in Corrosion Affected Rc Structures-A Review". *Otto-Graf-Journal*, 18.
- Şahin, Y. İ., Koçak, Y. 2022. "Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimentoların Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması". *Duzce University Journal of Science and Technology*, 10(2), 802–814.
- Sahoo, S., Das, B. B., Mustakim, S. 2016. "Acid, Alkali, and Chloride Resistance of Concrete Composed of Low-Carbonated Fly Ash". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(3), 04016242.
- Sahu, A. K., Kumar, T., Jain, V. 2014. "Formulation optimization of erythromycin solid lipid nanocarrier using response surface methodology". *BioMed Research International*, 2014.
- Saraya, M. E. S. I. 2014. "Study physico-chemical properties of blended cements containing fixed amount of silica fume, blast furnace slag, basalt and limestone, a comparative study". *Construction and Building Materials*, 72, 104–112.
- Saridemir, M. 2013. "Effect of silica fume and ground pumice on compressive strength and modulus of elasticity of high strength concrete". *Construction and Building Materials*, 49, 484–489.
- Sarkar, S. L., Aimin, X., Jana, D. 1999. "Scanning Electron Microscopy, X-Ray Microanalysis of Concretes". İçinde *Handbook Of Analytical Techniques In Concrete Science And Technology* (ss. 231–275). William Andrew Publishing/Noyes Publications.
- Savaşkan, M., Taptık, Y., Ürgen, M. 2010. "Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu". *İtüdergisi/d*, 3(6). Tarihinde adresinden erişildi http://itudergi.itu.edu.tr/index.php/itudergisi_d/article/view/742
- Savva, A. E. 2001. "High-strength concrete: mechanical and elastic properties of fly ash and silica fume containing mixtures". İçinde *In Proc. Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolan in Concrete* (ss. 125–139).
- Serencam, H., Uçurum, M. 2019. "Taguchi Deney Tasarımı Kullanılarak Uçucu Kül İle Ni (II) Gideriminde Bazı Adsorpsiyon Parametrelerinin Etkinliğinin İrdelenmesi".

- Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(1), 336–344.
- Sevinç, A. H., Durgun, M. Y., Eken, M. 2017. "A Taguchi approach for investigating the engineering properties of concretes incorporating barite, colemanite, basaltic pumice and ground blast furnace slag". *Construction and Building Materials*, 135, 343–351.
- Sharifi, E., Sadjadi, S. J., Aliha, M. R. M., Moniri, A. 2020. "Optimization of high-strength self-consolidating concrete mix design using an improved Taguchi optimization method". *Construction and Building Materials*, 236, 117547.
- Smart, N. R., Reddy, B., Rance, A. P., Nixon, D. J., Diomidis, N. 2017. "The anaerobic corrosion of carbon steel in saturated compacted bentonite in the Swiss repository concept". *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 52, 113–126.
- Song, Y., Liu, J., Wang, H., Shu, H. 2019. "Research Progress of Nitrite Corrosion Inhibitor in Concrete". *International Journal of Corrosion*, 2019.
- Tabachnick, B. G., Fidell, L. S. 2013. "*Using multivariate statistics*". Boston, Pearson.
- Taguchi, G. 1986. "*Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes*". The Organization.
- Taguchi, G., Elsayed, E. A., Hsiang, T. C. 1989. "*Quality engineering in production systems*". New York: McGraw-Hill College.
- Taguchi, G., Phadke, M. S. 1986. "Quantity Engineering Through Design Optimization". İçinde *Proceedings of the National Electronics Conference* (C. 40, ss. 32–39). Professional Education Int Inc.
- Tang, C. W., Cheng, C. K., Ean, L. W. 2022. "Mix Design and Engineering Properties of Fiber-Reinforced Pervious Concrete Using Lightweight Aggregates". *Applied Sciences* 2022, Vol. 12, Page 524, 12(1), 524.
- Tanyildizi, H. 2021. "Investigation of mechanical properties of polymer impregnated concrete containing polypropylene fiber by taguchi and anova methods". *Revista de la construcción*, 20(1), 52–61.
- TBDY. 2018. "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği". Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- Teimortashlu, E., Dehestani, M., Jalal, M. 2018. "Application of Taguchi method for compressive strength optimization of tertiary blended self-compacting mortar". *Construction and Building Materials*, 190, 1182–1191.
- Thangavel, K., Rengaswamy, N. S. 1998. "Relationship between chloride/hydroxide ratio and corrosion rate of steel in concrete". *Cement and Concrete Composites*, 20(4), 283–292.

- Tittarelli, F., Carsana, M., Bellezze, T. 2013. "Corrosion behavior of reinforced no-fines concrete". *Corrosion Science*, 70, 119–126.
- Tofan, S. 2008. "*Konya Bölgesindeki İçme Sularında Metal Tayini*". Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Bölümü, Yüksek Lisans tezi.
- Tokay, M. 2014. "Betonda UK, GYFC ve SD'nin Rolü: Mevcut Bilgi Birikimi". Hazır Beton.
- Tommaselli, M. A. G., Mariano, N. A., Kuri, S. E. 2009. "Effectiveness of corrosion inhibitors in saturated calcium hydroxide solutions acidified by acid rain components". *Construction and Building Materials*, 23(1), 328–333.
- Tondolo, F. 2015. "Bond behaviour with reinforcement corrosion". *Construction and Building Materials*, 93, 926–932.
- Topçu, İ. B., Uzunömeroğlu, A. 2020. "Properties of corrosion inhibitors on reinforced concrete". *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, 3(2), 93–109.
- Toutanji, H. A., Bayasi, Z. 1999. "Effect of curing procedures on properties of silica fume concrete". *Cement and Concrete Research*, 29(4), 497–501.
- Trepanier, S. M., Hope, B. B., Hansson, C. M. 2001. "Corrosion inhibitors in concrete: Part III. Effect on time to chloride-induced corrosion initiation and subsequent corrosion rates of steel in mortar". *Cement and Concrete Research*, 31(5), 713–718.
- TS 3526. 1980. "Beton agregalarında özgül ağırlık ve su emme oranı tayini". Tarihinde adresinden erişildi <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?>
- TS 706 EN 12620+A1. 2009. "Beton agregaları". Tarihinde adresinden erişildi <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?>
- TS 708. 2016. "Çelik - Betonarme için - Donatı çeliği". Tarihinde adresinden erişildi <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?>
- TS EN 1008. 2003. "Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları". Tarihinde adresinden erişildi <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?>
- TS EN 12350-2. 2019. "Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi". Tarihinde adresinden erişildi <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?>
- TS EN 12390-3. 2019. "Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü (TSE)". Tarihinde 17 Mayıs 2023, adresinden erişildi

- Journal of Engineering Research and Development, 16(1), 340–355.
- Uray, K., Koçer, M., Uray, E., Açıklı, H., Erbakan Üniversitesi, N., Fakültesi, M., ... Başvuru, T. 2023. "İnşaat Mühendisliği Deneysel ve Analitik Tasarımlarında Taguchi Yönteminin Kullanılabilirliğinin Araştırılması". International Journal of Engineering Research and Development, 15(2), 429–445.
- Uysal, Mucteba. 2012. "Taguchi and Anova approach for optimisation of design parameters on the compressive strength of HSC". Magazine of Concrete Research, 64(8), 727–735.
- Uysal, Mucteba, Akyuncu, V., Tanyildizi, H., Sumer, M., Yildirim, H. 2019. "Optimization of durability properties of concrete containing fly ash using Taguchi's approach and Anova analysis". Revista de la Construcción, 17(3), 364–382.
- Uysal, Mücteba, Yılmaz, K. 2012. "Aşırı Dozda Akışkanlaştırıcı Katkı Kullanımının Beton Özellikleri Etkisi". Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University, 25(1), 19–36. Tarihinde adresinden erişildi <https://dergipark.org.tr/en/pub/ogummf/issue/29999/323823>
- Uzbaş, B. 2019. "Çimento Esaslı Silis Dumanlı Uçucu Küllü Kompozitlerin Sem ve Xrd Destekli Görsel Analizlerin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi". Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği.
- Uzbaş, B., Aydın, A. C. 2019. "Analysis of Fly Ash Concrete With Scanning Electron Microscopy and X-Ray Diffraction". Advances in Science and Technology Research Journal, 13(4), 11.
- Verma, N., Misra, A. K. 2015. "Bond characteristics of reinforced TMT bars in Self Compacting Concrete and Normal Cement Concrete". Alexandria Engineering Journal, 54(4), 1155–1159.
- Verma, S. K., Bhadauria, S. S., Akhtar, S. 2014. "Monitoring corrosion of steel bars in reinforced concrete structures". The Scientific World Journal, 2014.
- Wang, D., Han, L., Ju, Y., Zeng, C., Li, Z. 2022. "Bond behavior between reinforcing bar and reactive powder concrete". Structural Concrete, 23(4), 2630–2642.
- Warda, M. A., Khalil, H. S., Ahmad, S. S. E., Mahdi, I. M. 2020. "Optimum Sustainable Mix Proportions of High Strength Concrete by Using Taguchi Method". Frattura ed Integrità Strutturale, 14(54), 211–225.
- Wei-liang, J., Yu-xi, Z. 2001. "Effect of corrosion on bond behavior and bending strength of reinforced concrete beams". Journal of Zhejiang University-Science A, 298–308.
- Winter, N. B. 2012. "Scanning electron microscopy of cement and concrete". WHD

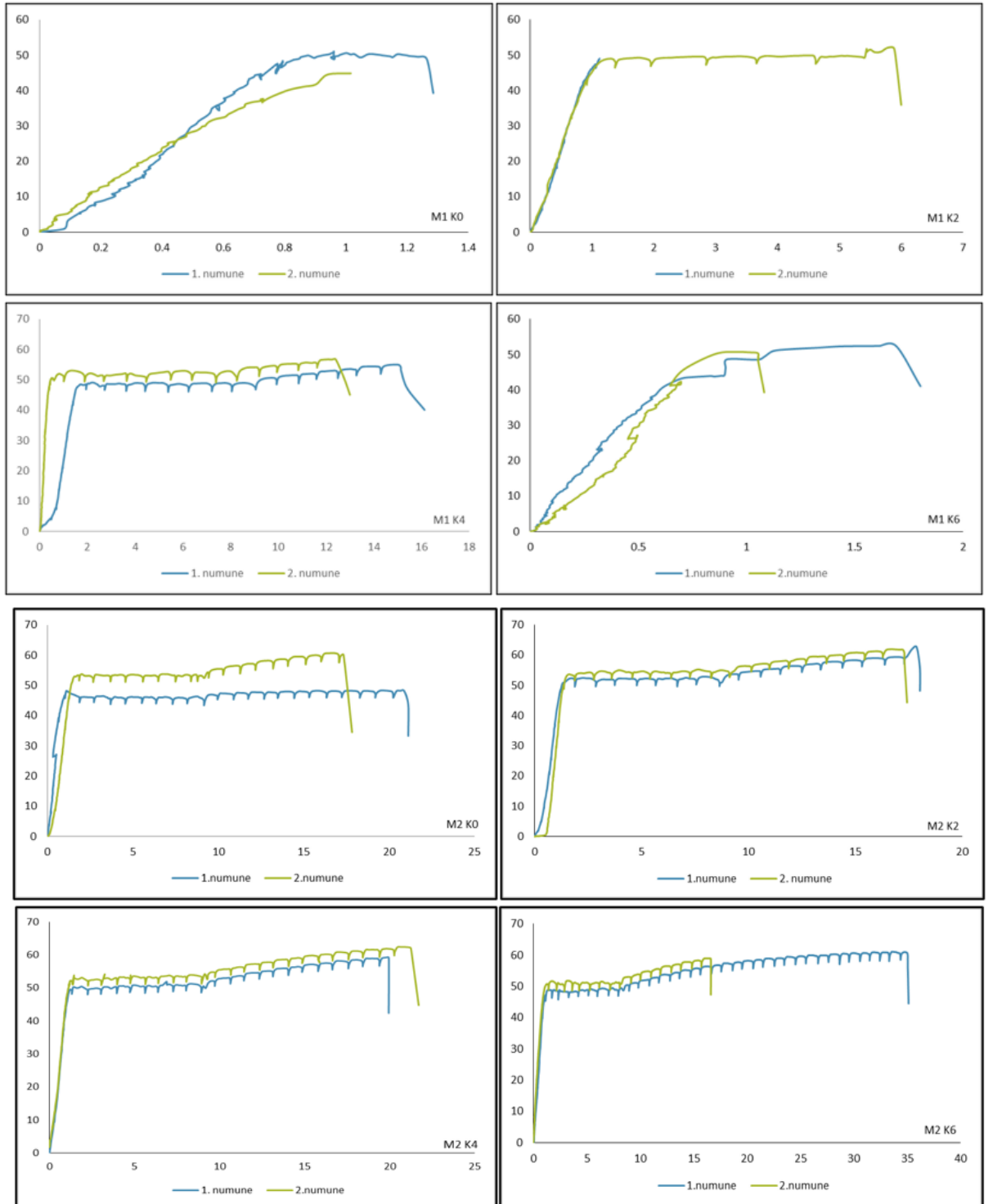
Microanalysis Consultants Ltd.

- WOS-1. 2023. "Web of Science". Tarihinde 13 Ekim 2022, adresinden erişildi
<https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/24c4417b-991a-4b1a-a632-f9fe2b81c565-571adfc7/relevance/1>
- WOS-2. 2023. "Web of Science". Tarihinde adresinden erişildi
<https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/5873ee75-bca9-49b0-8ace-aa049a92b8c2-5729300f/relevance/1>
- Wu, X., Zhang, Z., Qi, W., Tian, R., Huang, S., Shi, C. 2019. "Corrosion Behavior of SMA490BW Steel and Welded Joints for High-Speed Trains in Atmospheric Environments". *Materials* 2019, Vol. 12, Page 3043, 12(18), 3043.
- Wu, Y.-F., Zhao, X.-M. 2013. "Unified Bond Stress–Slip Model for Reinforced Concrete". *Journal of Structural Engineering*, 139(11), 1951–1962.
- Yalciner, H., Eren, O., Sensoy, S. 2012. "An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete cover, strength and corrosion level". *Cement and Concrete Research*, 42(5), 643–655.
- Yalciner, H., Ertuğ, İ., Kumbasaroglu, A. 2018. "Korozyon Etkisine Maruz Bırakılmış Betonarme Kirişlerin Eğilme Davranışı". *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(1), 1–10.
- Yalciner, H., Kumbasaroglu, A. 2019. "Paslanmaya Maruz Kalmış Tam Ölçekli Betonarme Kolonların Monotonik Yükleme Etkisi Altında Yapısal Davranışlarının İncelenmesi: Korozyon Çalışmaları İçin Öneriler". *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(2), 695–713.
- Yang, C. B., Chiang, H. L. 2013. "Using Gray-Based Taguchi Method to Construct Multi-Objective Optimal Model in Super-Resolution Near-Field Photolithography". *Scanning*, 35(1), 47–58.
- Yavuz, R., Günaydin, O., Güçlüer, K. 2019. "Donatılı Betonda Korozyon ve Aderansın Araştırılması". *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 22.
- Yeau, K. Y., Kim, E. K. 2005. "An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag". *Cement and Concrete Research*, 35(7), 1391–1399.
- Yeğinobalı, A. 2011. "*Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, Türkiye Çimento Mühtahsilleri Birliği*". Tarihinde adresinden erişildi www.tcma.org.tr
- Yenginar, Y. 2020. "*Derin Karıştırma Kolonlarının Performansını Etkileyen Faktörlerin*

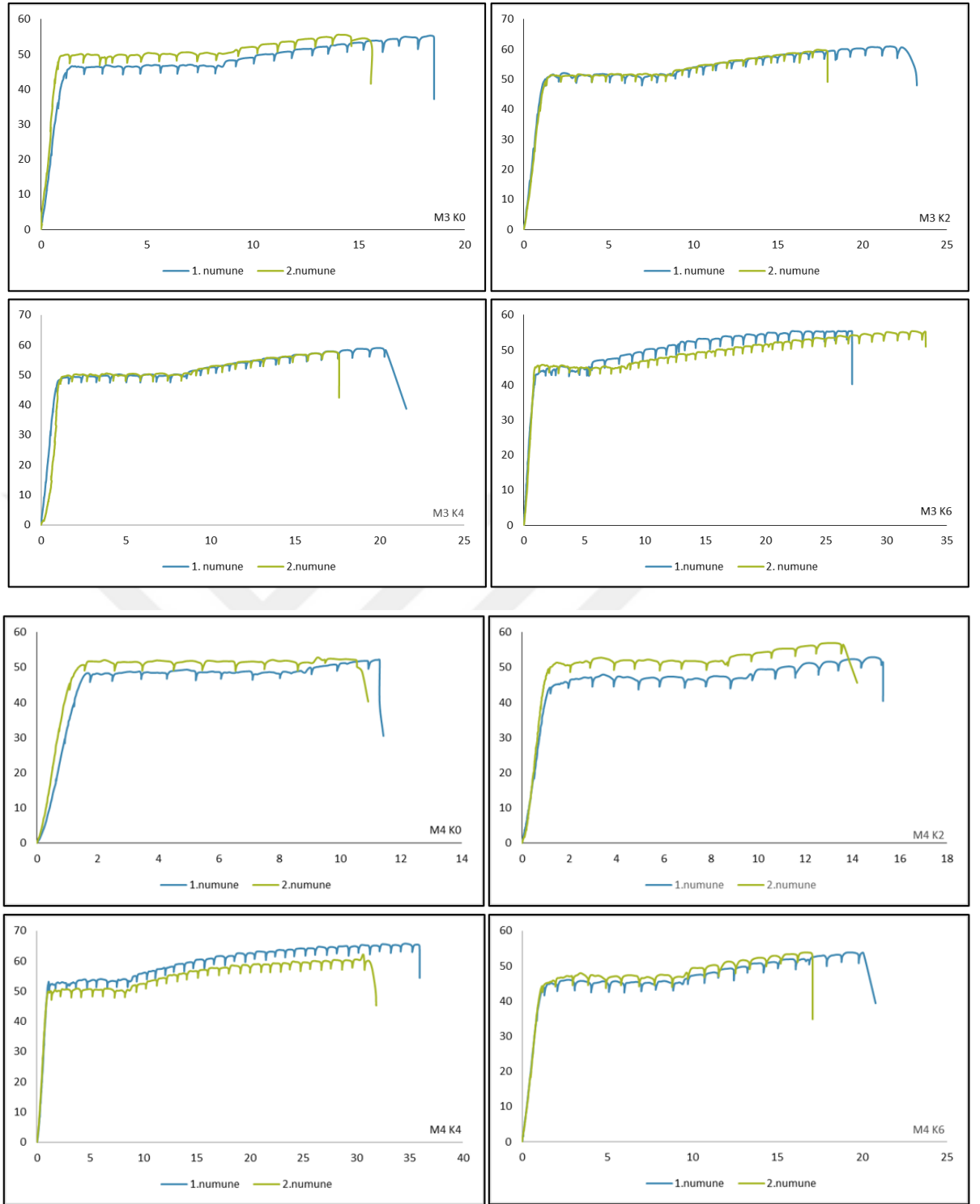
- Model Deneylerle Araştırılması*". Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Analim Dalı, Konya Teknik Üniversitesi.
- Yiğiter, H. 2008. "*Betonarme Donatısında Klorid Korozyonu Gelişiminin Elektrokimyasal Yöntemlerle Belirlenmesi*". Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Yıldırım, M., Bal, K., Doğan, M. 2021. "Gri ilişkisel analiz yöntemi ile finansal performans analizi: BİST’te işlem gören demir çelik şirketleri üzerinde bir uygulama". Muhasebe Bilim Dünyası Dergisi, 23(1), 122–143.
- Yoon, J. 2007. "Application of experimental design and optimization to PFC model calibration in uniaxial compression simulation". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 44(6), 871–889.
- Zebarı, Z. 2017. "*Ultrasonik dalga hızı ölçümü yardımıyla betonun basınç dayanımının belirlenmesi*". Fen bilimleri Enstitüsü, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır.
- Zheng, X., Yang, S., Sun, S. 2020. "Determination of the Corrosion Rate of Steel Bars in Concrete Based on the Porosity of Interfacial Zone". Frontiers in Materials, 7, 573193.
- Zhou, Q., Lu, C., Wang, W., Wei, S., Xi, B. 2020. "Effect of fly ash and corrosion on bond behavior in reinforced concrete". Structural Concrete, 21(5), 1839–1852.

EKLER

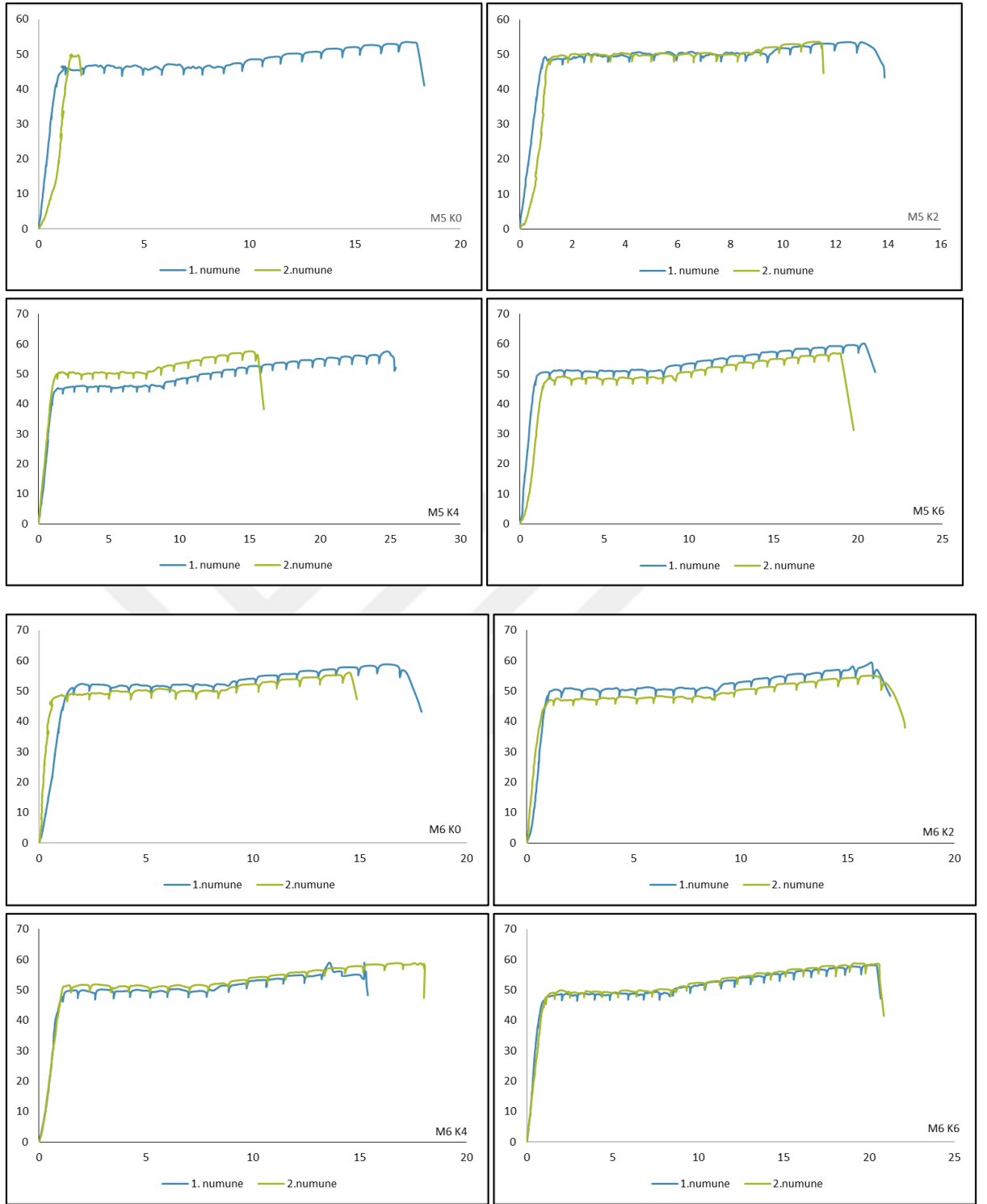
EK-1 Pullout Yük-Deplasman Eğrileri



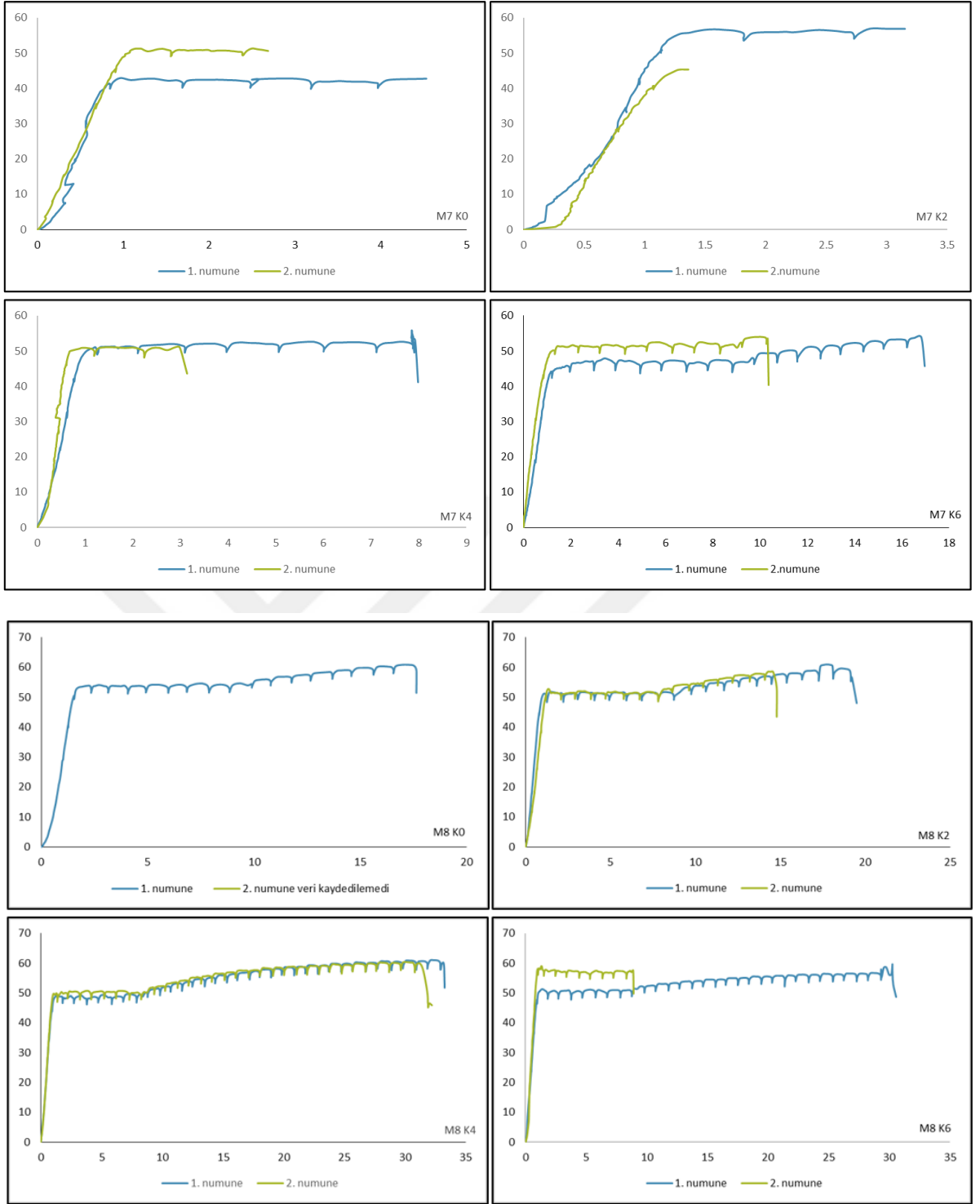
Şekil Ek 1.1. M1- M2 serilerinin korozyonsuz ve farklı korozyon durumları için yük deplasman eğrileri



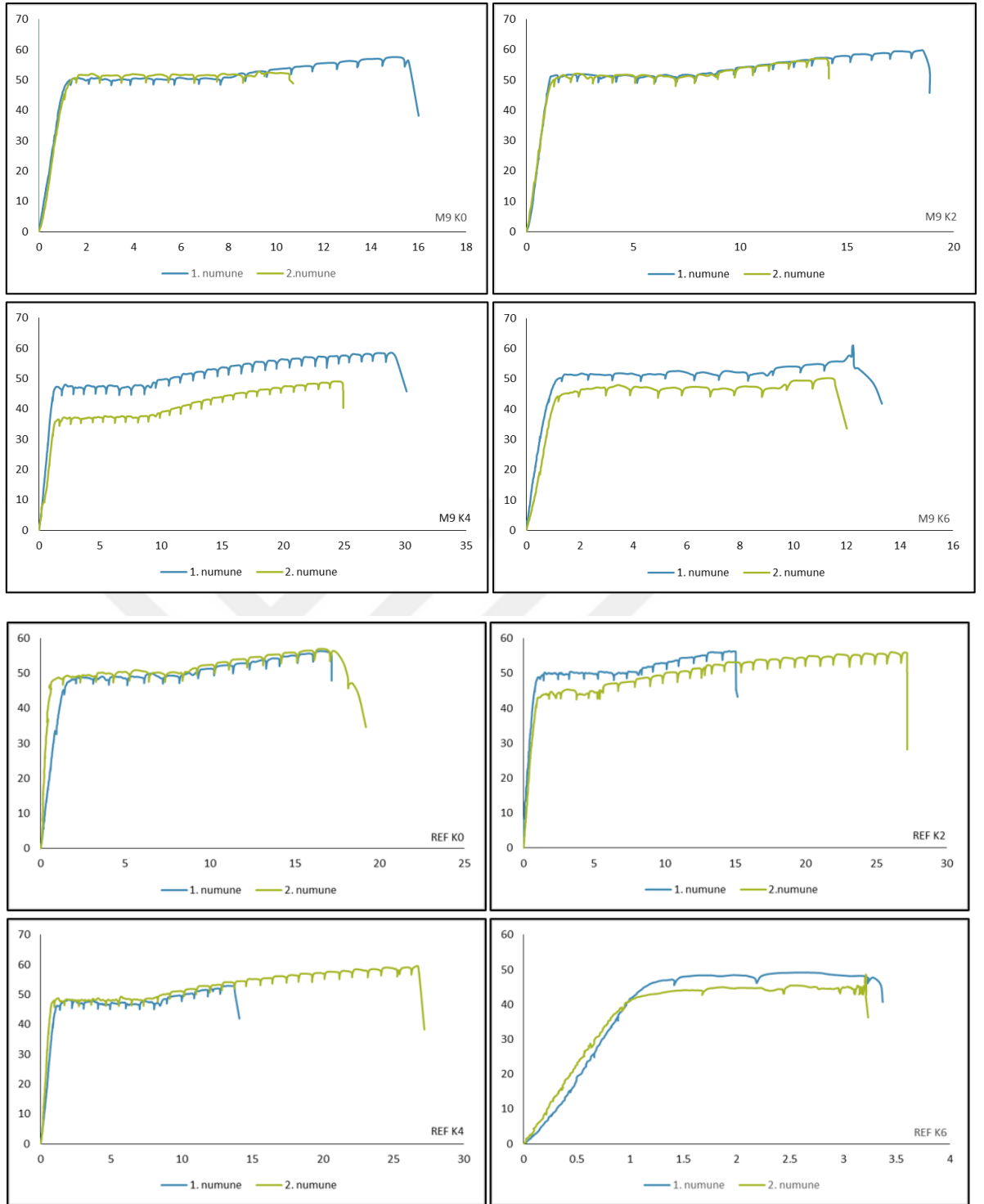
Şekil Ek 1.2. M3- M4 serilerinin korozyonsuz ve farklı korozyon durumları için yük deplasman eğrileri



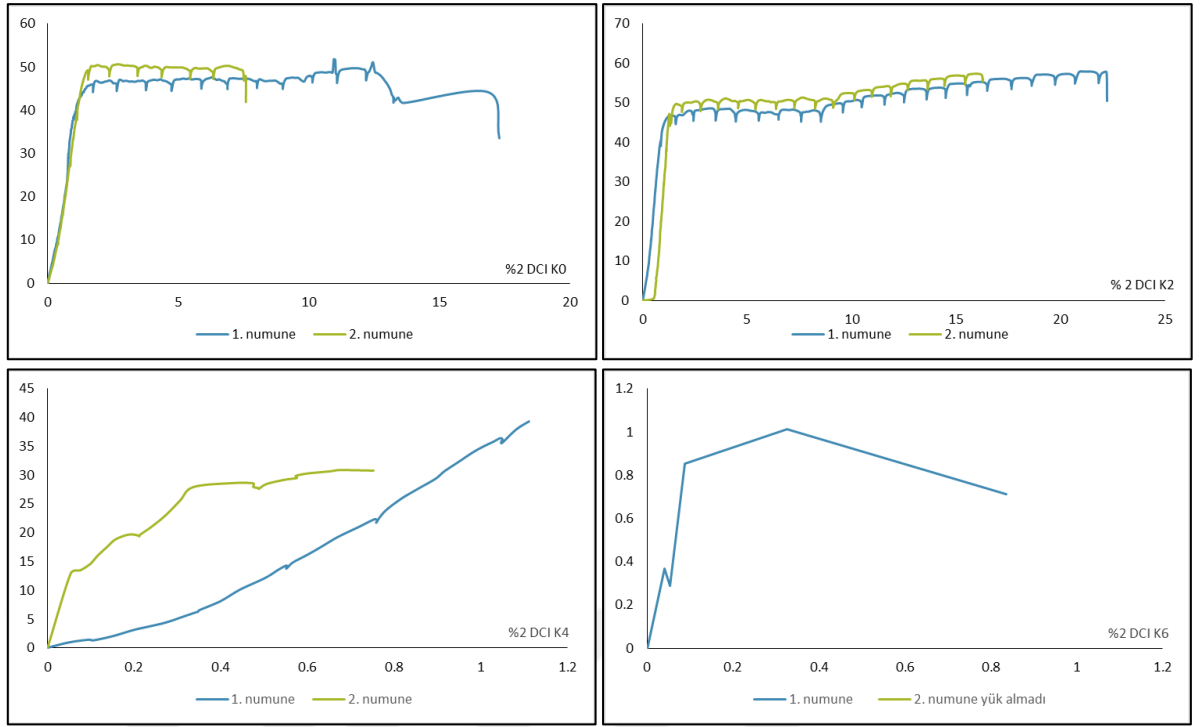
Şekil Ek 1.3. M5- M6 serilerinin korozyonsuz ve farklı korozyon durumları için yük deplasman eğrileri



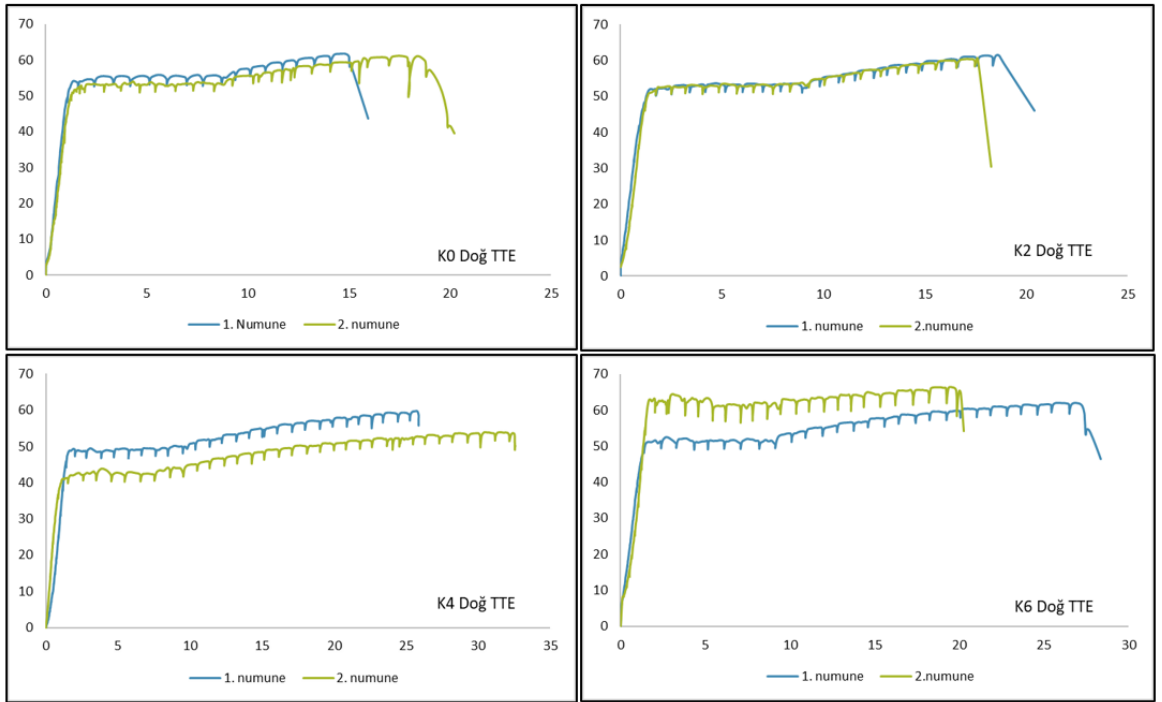
Şekil Ek 1.4. M7- M8 serilerinin korozyonsuz ve farklı korozyon durumları için yük deplasman eğrileri



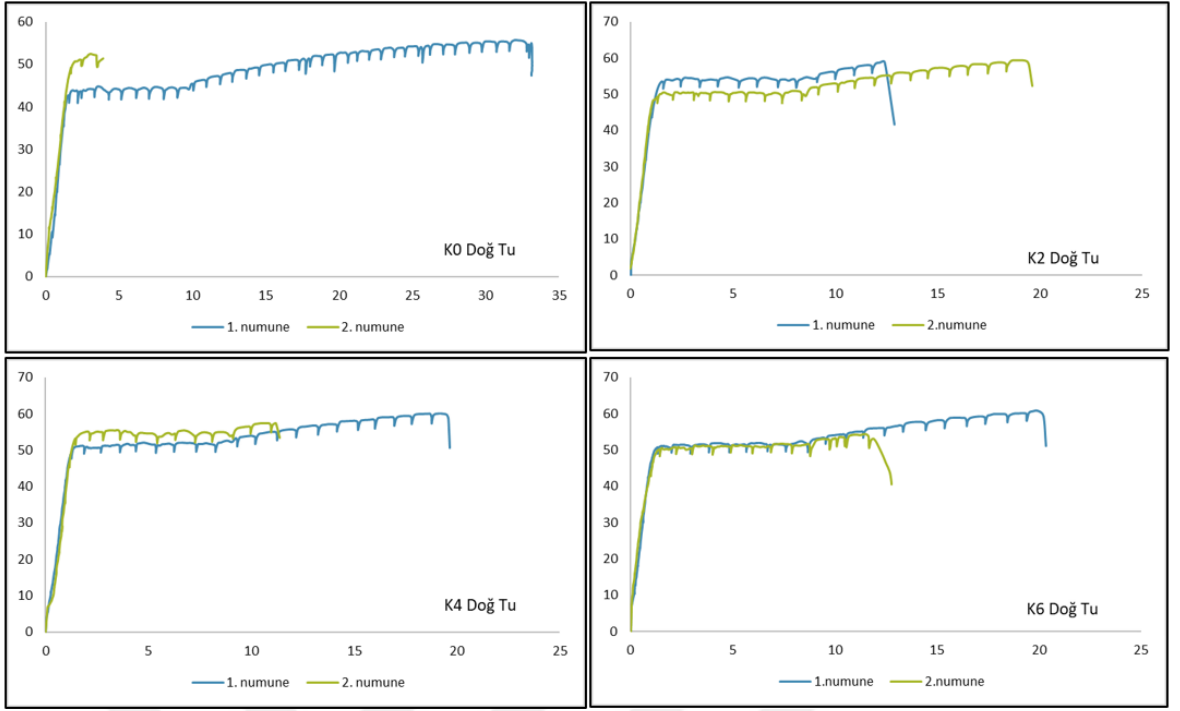
Şekil Ek 1.5. M9-REF serilerinin korozyonsuz ve farklı korozyon durumları için yük deplasman eğrileri



Şekil Ek 1.6. %2 DCI serisinin korozyonsuz ve farklı korozyon durumları için yük deplasman eğrileri



Şekil Ek 1.7. TTE miktarları için optimum seviyelerde üretilen numunelerden elde edilen yük deplasman grafikleri



Şekil Ek 1.8. T_u değerleri için optimum seviyelerde üretilen numunelerden elde edilen yük deplasman grafikleri