Müzeyyen BALÇIKANLI BANKİR

İSKENDERUN TEKNİK
ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA
TEZİ

LİFLİ HİBRİT BETONLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİN ARAŞTIRILMASI VE PERFORMANS OPTİMİZASYONU

Müzeyyen BALÇIKANLI BANKİR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

EYLÜL 2020

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

EYLÜL 2020

LİFLİ HİBRİT BETONLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE PERFORMANS OPTİMİZASYONU

Müzeyyen BALÇIKANLI BANKİR

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EYLÜL 2020

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- ☑ Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- ☑ Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ☑ Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ☑ Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- ☑ Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ☑ Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Müzeyyen BALÇIKANLI BANKİR

15/09/2020

LİFLİ HİBRİT BETONLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE PERFORMANS OPTİMİZASYONU
(Doktora Tezi)

Müzeyyen BALÇIKANLI BANKİR

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2020

ÖZET

Beton günümüzde en çok tercih edilen yapı malzemesidir ve geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Beton, basınç yüklerine karşı mükemmel dayanım gösterirken çekme yüklerine karşı zayıf kalmaktadır. Betonun yük altında ani kırılmasını önleyen, yük aktarımı yapan donatılar veya lifler ile bu çatlakların oluşması engellenmeye çalışılmaktadır.

Liflerin boyutları, geometrileri ve miktarları değiştirilerek farklı özelliklere sahip, amaca yönelik beton üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Ancak her lif türü belirli bir sorun için kullanılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında ise her lif türünün kendine has özelliğinden yararlanılarak Merkezi Kompozit Tasarım yöntemi ile oluşturulan yedi faktörlü deney tasarımı ile otuz farklı Hibrit Lifli Beton (HLB) karışımı yapılmıştır. Çalışma kapsamında çelik, cam elyaf, sentetik ve polipropilen lifler olmak üzere dört farklı lif türü hibritlenmiştir. Bağlayıcı hamuru oluşturan çimento uçucu kül ile ağırlıkça %40'a kadar değişen oranlarda, doğal kırma taş agrega elektrik ark fırın cürufu agregası (EAFC) ile ağırlıkça %100'e kadar değişen oranlarda ikame edilerek tam hibrit bir sistem oluşturulmuştur.

HLB'lerin çökme değerini ve yarmada çekme dayanımını etkileyen en önemli değişkenin cam elyaf lif oranı olduğu belirlenmiştir. Tek tip lif kullanımı yerine farklı liflerin az miktarlarda hibritlenmesi ile betonların eğilme dayanımı ve enerji yutma kapasitesi artmıştır. Toplam lif hacmi %1'i aşmayan HLB üretimi ile donatı çekip çıkarma yükünün arttığı belirlenmiştir. Lif içeren betonların kalite ölçümlerinde dalga iletimine dayalı yöntemlerin yanıltıcı olabileceği görülmüştür. Asit ortamına maruz kalan numunelerde ağırlık kaybı, sülfat ortamına maruz kalan numunelerde ağırlık artışı gözlenmiştir. Ancak ağırlık değişimleri her iki ortam etkisinde %15 civarında mutlak değerce benzerdir ve sentetik lifler HLB'lerin dayanıklılığı açısından yetersiz kalmıştır. HLB'lerin bağlayıcı dozajı ve çelik lif içeriği arttıkça hızlı klor geçirimlilikleri azalmıştır.

Ticari program kullanılarak bağımsız değişkenler ile deney sonuçları arasındaki ilişkiyi ortaya koyan regresyon modelleri elde edilmiştir. Deney sonuçlarının varyans analizi ile bağımsız değişkenlerin her bir tepki için etki ağırlığı hesaplanarak istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı belirlenmiştir. Oluşturulan regresyon modelleri kullanılarak belirlenen objektifler altında mekanik, geçirimlilik, durabilite ve tüm özellikleri optimize eden, erişilebilirlik ihtimali en yüksek olan optimum üretim şartları belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Hibrit lifli beton, merkezi kompozit tasarım, tepki yüzeyi yöntemi, optimizasyon, mekanik özellikler, geçirimlilik, durabilite

Sayfa Adedi : 168

Danışman : Prof. Dr. Umur Korkut SEVİM

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF HYBRID FIBER CONCRETES AND PERFORMANCE OPTIMIZATION
(Ph. D. Thesis)

Müzeyyen BALÇIKANLI BANKİR

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY

ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

September 2020

ABSTRACT

Concrete is the most preferred building material and needs to be developed. While concrete shows excellent performance under compressive loads, it remains weak against tensile loads. These cracks are tried to be prevented with reinforcements or fibers that transfer loads and prevent sudden breakage of concrete under loading.

By changing the dimensions, geometries and quantities of the fibers, it is possible to produce concrete with different features. However, each fiber type is used for a particular problem. Within the scope of this thesis, thirty different Hybrid Fiber Concrete (HLB) mixtures were produced with the seven-factor experimental design created by the Central Composite Design method to use the unique feature of each fiber type. A completely hybrid system was created by replacing the natural crushed stone aggregate with electric arc furnace slag aggregate and fly ash with cement at rates ranging up to 100% and 40% by weight, respectively.

It has been determined that the most important variable affecting the slump value of HLBs and splitting tensile strength is the glass fiber ratio. With the hybridization of different fibers in small amounts instead of using a single type of fiber, the flexural strength and energy absorption capacity of concrete have increased. It has been determined that with the production of HLB whose total fiber volume does not exceed 1%, the pull-out capacity increases. It has been observed that the methods based on wave transmission can be misleading in the quality measurements of concrete containing fiber. Weight loss was observed in samples exposed to acidic environment and weight gain was observed in samples exposed to sulphate environment. However, the weight changes are similar by about 15% in both environments and synthetic fibers were insufficient in terms of the durability of HLBs. As the binder dosage and steel fiber content of HLBs increased, their rapid chloride permeability decreased.

Regression models, which reveal the relationship between independent variables and the experimental results, have been created by using a commercial software programme. Variance analysis was conducted on the experimental results. By using Response Surface Method, the effect weights of independent variables and their interactions and statistically significance for each response were determined. Optimum production conditions that optimize mechanical, permeability, durability and all properties, with the highest desirability function were determined.

Key Words : Hybrid fiber concrete, central composite design, response surface method, optimization, mechanical properties, permeability, durability

Page Number : 168

Supervisor : Prof. Dr. Umur Korkut SEVİM

TEŞEKKÜR

Doktora tezimin başından sonuna kadar her aşamasında her türlü yardımını esirgemeyen, tüm bilgi birikimi ve tecrübesi ile çalışmayı yönlendiren saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Umur Korkut SEVİM'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmamın gidişatını kontrol eden değerli hocalarım Prof. Dr. Cahit BİLİM ve Prof. Dr. Ercan ERDİŞ'e sonsuz şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarımın deneysel kısmında bana yardımcı olan İnşaat Mühendisliği lisans öğrencilerine emeklerinden ötürü teşekkür ederim. Tez çalışması boyunca manevi desteklerini ve hoşgörülerini esirgemeyen değerli mesai arkadaşlarım Arş. Gör. Murat ÖZTÜRK, Arş. Gör. Kevser ÜNSALAN, Arş. Gör. Yakup TÜREDİ, Arş. Gör. M. Musab ERDEM, Arş. Gör. Olcay GENÇ, Arş. Gör Nurullah KARACA, Arş. Gör. Bestami TAŞAR, Arş. Gör. Kaan DAL, Arş. Gör. Ada YILMAZ, Arş. Gör. Sezer SANCAR ve Arş. Gör. H. Çağrı YILMAZ'a ve İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümündeki kıymetli hocalarıma en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca isimlerini burada zikredemediğim ama desteklerini esirgememiş olan herkese teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarıma maddi destek veren, malzeme temini ve nakliyesinde yardımcı olan Kaan İnşaat Yatırım A.Ş'ye, İmfalt Yol Yapı San. Tic. A.Ş'ye, İST Madencilik A.Ş'ye, Adana BASF Türk Kimya San. ve Tic. Ltd. Şti'ye, İskenderun Kılıçlar A.Ş'ye ve Atlas Enerji Üretim A.Ş'ye katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca beni bugüne kadar yetiştiren, desteklerini bir an olsun esirgemeyen her daim yanımda olan en büyük destekçilerim, çok kıymetli anneme ve babama, her durumda destekçim olan kardeşim Vahap BALÇIKANLI'ya ve her koşulda yanımda olan hayat arkadaşım Şahin BANKİR'e en içten saygı, sevgi ve şükranlarımı sunarım. Bana dünyanın en güzel duygusunu yaşatan biricik oğlum Burak Efe'ye sonsuz sevgimi ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xi

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xiii

RESİMLERİN LİSTESİ xvi

SİMGELER VE KISALTMALAR xvii

1. GİRİŞ 1

1.1. Hibrit (Melez) Lifli Beton 3

1.2. Elektrik Ark Fırın Cürufu Agregasının Beton Üretiminde Kullanımı 4

1.3. Uçucu Külün Beton Üretiminde Kullanımı 5

1.4. Tez Çalışmasının Amacı 6

1.5. Tez Çalışmasının Kapsamı 6

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 8

2.1. Taze Beton Özelliklerinin Değerlendirildiği Çalışmalar 9

2.2. Mekanik Özelliklerin Değerlendirildiği Çalışmalar 10

2.3. Fiziksel ve Geçirimlilik Özelliklerinin Değerlendirildiği Çalışmalar 14

2.4. Durabilite Özelliklerinin Değerlendirildiği Çalışmalar 17

3. MATERYAL VE YÖNTEM 22

3.1. Giriş 22

3.2. Malzemeler 22

3.2.1. Çelik lifler 22

3.2.2. Cam elyaf lifler 23
3.2.3. Sentetik lifler (Strux) 23
3.2.4. Polipropilen lifler 23
3.2.5. Elektrik ark fırın cürufu (EAFC) 24
3.2.6. Doğal kırmataş agrega (DKA) 25
3.2.7. Uçucu kül (UK) 26
3.2.8. Çimento 27
3.2.9. Süper akışkanlaştırıcı 27
3.2.10. Su 27
3.3. Deney Tasarımı 28
3.3.1. Merkezi kompozit tasarım (MKT) ve uygulama amacı 28
3.3.2. Tepki yüzeyi yöntemi (TYY) 29
3.3.3. Çoklu objektifli optimizasyon 30
3.3.4. Erişilebilme ihtimali 31
3.3.5. Deney tasarımında kullanılan parametreler 31
3.4. HLB tasarımı ve Üretimi 32
3.5. HLB'nin Taze Beton Özellikleri Deney Yöntemi 37
3.5.1. Çökme (Slump) 37
3.5.2. Birim hacim ağırlık (BHA) 37
3.6. HLB'nin Mekanik Özellikleri Deney Yöntemleri 38
3.6.1. Test çekici (Schmidth) 38
3.6.2. Basınç dayanımı 38
3.6.3. Dört noktadan eğilme dayanımı ve deplasman ölçümü 39
3.6.4. Yarmada çekme dayanımı 40
3.6.5. Çekip çıkarma direnci 41

3.6.6. Aşınma 42

3.7. HLB'nin geçirimlilik özellikleri deney yöntemleri 43

3.7.1. Ultrasonik dalga hızı (UDH) 43

3.7.2. Rezonans frekansı (RF) 43

3.7.3. Hızlı klor geçirimliliği (HKG) 44

3.8. HLB'nin Fiziksel Özellikleri Deney Yöntemleri 45

3.8.1. Su emme kapasitesi 45

3.8.2. Kılcal su emme (Kapilarite) 46

3.9. HLB'nin Durabilite Özellikleri Deney Yöntemleri 46

3.9.1. Asit direnci 46

3.9.2. Sülfat direnci 47

3.9.3. Yüksek sıcaklık etkisinde dayanım değişimi ve RF ölçümü 48

3.9.4. Yüksek sıcaklık etkisinde donatı-beton aderansının değişimi 49

3.9.5. Karbonatlaşma derinliği (KD) 49

4. BULGULAR VE TARTIŞMA 50

4.1. Varyans Analizi (ANOVA) ve Regresyon Modellerinin Oluşturulması 50

4.2. Taze Beton Özelliklerinin Belirlenmesi 51

4.2.1. Çökme (Slump) deneyi 53

4.2.2. Birim hacim ağırlık deneyi 55

4.3. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi 57

4.3.1. Test çekici (Schmidth) 61

4.3.2. Basınç dayanımının zamana bağlı değişimi 62

4.3.3. Dört noktadan eğilme dayanımı ve deplasman ölçümü 67

4.3.4. Yarmada çekme dayanımı 71

4.3.5. Dört noktadan eğilme dayanımı ile yarmada çekme dayanımının karşılaştırılması 75

4.3.6. Çekip çıkarma direnci 76

4.3.7. Aşınma 79

4.4. Geçirimlilik Özelliklerinin Belirlenmesi 81

4.4.1. Ultrasonik dalga hızı (UDH) 83

4.4.2. Rezonans frekansı (RF) 86

4.4.3. Hızlı klor geçirimliliği (HKG) 89

4.5. Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi 92

4.5.1. Su emme kapasitesi 94

4.5.2. Kılcal su emme (Kapilarite) 97

4.6. Durabilite Özelliklerinin Belirlenmesi 103

4.6.1. Asit direnci 108

4.6.2. Sülfat direnci 115

4.6.3. Asit ve sülfat dirençlerinin karşılaştırılması 123

4.6.4. Karbonatlaşma derinliği (KD) 125

4.6.5. Yüksek sıcaklık etkisinde dayanım değişimi ve rezonans frekansı ölçümü 129

4.6.6. Yüksek sıcaklık etkisinde donatı-beton aderansı değişimi 133

4.7. Çoklu Objektifli Optimizasyon 134

4.7.1. Mekanik özelliklere göre optimizasyon 134

4.7.2. Fiziksel ve geçirimlilik özelliklerine göre optimizasyon 135

4.7.3. Durabilite özelliklerine göre optimizasyon 136

4.7.4. Genel özelliklere göre optimizasyon 138

5. SONUÇ VE ÖNERİLER 140

KAYNAKLAR 147

ÖZGEÇMİŞ 163

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. HLB üretiminde kullanılan liflere ait özellikler 24

Çizelge 3.2. EAFC ve DKA'ya ait özellikler 26

Çizelge 3.3. UK'nın kimyasal özellikleri 27

Çizelge 3.4. Çimento'ya ait fiziksel ve kimyasal özellikler 27

Çizelge 3.5. Uygulanan HLB deney tasarımı 34

Çizelge 3.6. 35 dm^3 HLB üretimi için kullanılan malzeme miktarları 35

Çizelge 4.1. HLB çökme değerleri ve birim hacim ağırlıkları 52

Çizelge 4.2. Taze beton özelliklerinden elde edilen sonuçlarının istatistiksel analizi.... 52

Çizelge 4.3. HLB mekanik özellikler deney sonuçları 57

Çizelge 4.4. Mekanik özellikler deney sonuçlarının istatistiksel analizi 58

Çizelge 4.5. HLB geçirimlilik özellikleri deney sonuçları 82

Çizelge 4.6. Geçirimlilik özellikleri deney sonuçlarının istatistiksel analizi..... 83

Çizelge 4.7. ASTM C1202'ye göre klor iyonu geçirimliliğinin sınıflandırılması..... 89

Çizelge 4.8. HLB fiziksel özellikler deney sonuçları 92

Çizelge 4.9. Fiziksel özellikler deney sonuçlarının istatistiksel analizi..... 93

Çizelge 4.10. HLB'lerin asit ve sülfat direncine ait deney sonuçları 104

Çizelge 4.11. HLB'lerin yüksek sıcaklık altındaki dayanımı, çekip çıkarma yükü ve zamana bağlı karbonatlaşma derinliği deney sonuçları 105

Çizelge 4.12. Asit ve sülfat direncine ait deney sonuçlarının istatistiksel analizi 106

Çizelge 4.13. Karbonatlaşma derinliği deney sonuçlarının istatistiksel analizi..... 108

Çizelge 4.14. Mekanik özellikler için optimum HLB üretim şartları ve beklenen deney sonuçları 135

Çizelge 4.15. Fiziksel ve geçirimlilik özellikleri için optimum HLB üretim şartları ve beklenen deney sonuçları..... 136

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.16. Durabilite özellikleri için optimum HLB üretim şartları ve beklenen deney sonuçları 137

Çizelge 4.17. Genel özellikler için optimum HLB üretim şartları ve beklenen deney sonuçları..... 139

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. EAFC üretimi akış şeması 4

Şekil 3.1. Çelik liflerin şematik gösterimi 22

Şekil 3.2. Liflerin çalışma mekanizması 23

Şekil 3.3. Agrega tane dağılımları 26

Şekil 3.4. İki faktörlü tasarım için MKT oluşum örneği 28

Şekil 3.5. Beton test çekici değerlendirme grafiği 38

Şekil 3.6. Dört noktadan eğilme deney düzeneğinin şematik gösterimi 40

Şekil 3.7. Rezonans frekansı ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi 44

Şekil 3.8. Yüksek sıcaklık uygulama rejimi 49

Şekil 4.1. HLB'lerin çökme değerleri 53

Şekil 4.2. Bağımsız değişkenlerin HLB çökme değerine olan etkileri 54

Şekil 4.3. HLB birim hacim ağırlıkları 56

Şekil 4.4. Bağımsız değişkenlerin HLB birim hacim ağırlığına olan etkileri 56

Şekil 4.5. HLB test çekici sonuçları 61

Şekil 4.6. Bağımsız değişkenin test çekici deney sonuçlarına etkisi 62

Şekil 4.7. HLB numunelerin zamana bağlı dayanım kazanma miktarları ve nihai dayanımları 63

Şekil 4.8. HLB basınç dayanımlarının zamana bağlı artış oranları 64

Şekil 4.9. İstatistiksel olarak anlamlı parametrelerin 28 günlük basınç dayanımına etkisi 66

Şekil 4.10. HLB numunelerin dört nokta eğilme dayanımları ve deplasman değerleri .. 67

Şekil 4.11. HLB'lerin eğilme dayanımı ve deplasman arasındaki ilişkisi 68

Şekil 4.12. HLB eğilme dayanımına bağımsız değişkenlerin bireysel etkileri 70

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.13. HLB eğilme dayanımına bağımsız değişkenlerin ikili etkileşimleri 71

Şekil 4.14. HLB numunelerin yarmada çekme ve basınç dayanımları..... 72

Şekil 4.15. Bağımsız değişkenlerin HLB yarmada çekme dayanımlarına olan etkileri . 74

Şekil 4.16. HLB numunelerin dört noktadan eğilme ve yarmada çekme dayanımlarının karşılaştırılması..... 75

Şekil 4.17. HLB numunelerin çekip çıkarma yükü ve değişim oranı..... 77

Şekil 4.18. Bağımsız değişkenlerin HLB çekip çıkarma yük kapasitesine olan etkileri 78

Şekil 4.19. HLB numunelerin aşınma oranı ile basın dayanımı arasındaki ilişki..... 80

Şekil 4.20. Bağımsız değişkenlerin HLB aşınma oranlarına etkisi 81

Şekil 4.21. HLB numunelerin ultrasonik dalga hızları 84

Şekil 4.22. Bağımsız değişkenlerin HLB'lerde ultrasonik dalga hızına etkisi 85

Şekil 4.23. HLB numunelerin rezonans frekansı değerleri..... 87

Şekil 4.24. Bağımsız değişkenlerin HLB'lerin rezonans frekansına etkisi 88

Şekil 4.25. HLB numunelerin hızlı klor geçirimlilik değerleri..... 90

Şekil 4.26. HLB'lerin ultrasonik dalga hızı ve hızlı klor geçirimliliği arasındaki ilişki 90

Şekil 4.27. Bağımsız değişkenlerin HLB'lerin hızlı klor geçirimliliğine etkisi 91

Şekil 4.28. HLB numunelerin su emme kapasiteleri 94

Şekil 4.29. Bağımsız değişkenlerin HLB su emme kapasitesine olan etkileri..... 96

Şekil 4.30. HLB numunelerin kılcal su emme katsayılarının belirlenmesi a)M7 b)M8 c)M14 d)M17 e)M23 f)M28 98

Şekil 4.31. HLB numunelerin kılcal su emme katsayıları 99

Şekil 4.32. HLB numunelerin su emme kapasitesi ile kılcal su emme katsayısı arasındaki ilişki 99

Şekil 4.33. Bağımsız değişkenlerin HLB'lerin kılcal su emme katsayısına olan etkileri 101

Şekil 4.34. H_2SO_4 çözeltisinde bekletilen HLB numunelerin zamana bağlı ağırlık değişimi..... 110

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.35. H_2SO_4 çözeltisinde bekletilen HLB numunelerin zamana bağlı basınç dayanımı değişimi 111

Şekil 4.36. Bağımsız değişkenlerin H_2SO_4 atağı karşısında HLB numunelerin basınç dayanımı değişimine etkisi..... 113

Şekil 4.37. Bağımsız değişkenlerin H_2SO_4 atağı karşısında HLB numunelerin ağırlık değişimine etkisi 114

Şekil 4.38. Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen HLB numunelerin zamana bağlı ağırlık değişimi 116

Şekil 4.39. Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen HLB numunelerin zamana bağlı basınç dayanımı değişimi 116

Şekil 4.40. Bağımsız değişkenlerin Na_2SO_4 atağı karşısında HLB numunelerin basınç dayanımı değişimine etkisi..... 119

Şekil 4.41. Bağımsız değişkenlerin Na_2SO_4 atağı karşısında HLB numunelerin ağırlık değişimine etkisi 122

Şekil 4.42. H_2SO_4 ve Na_2SO_4 çözeltilerindeki HLB numunelerin ağırlık değişim oranlarının karşılaştırılması..... 123

Şekil 4.43. HLB numunelerin H_2SO_4 atağı süresince dayanım kaybı oranlarının karşılaştırılması 124

Şekil 4.44. HLB numunelerin Na_2SO_4 atağı süresince dayanım kaybı oranlarının karşılaştırılması 124

Şekil 4.45. HLB numunelerin 60 ve 720 günlük karbonatlaşma derinlikleri 125

Şekil 4.46. Bağımsız değişkenlerin HLB numunelerdeki karbonatlaşma derinliği üzerine etkisi 128

Şekil 4.47. Yüksek sıcaklık etkisinden sonra HLB numunelerin basınç dayanımları 129

Şekil 4.48. Yüksek sıcaklık etkisinden sonra HLB numunelerin basınç dayanımı değişim oranı..... 130

Şekil 4.49. Yüksek sıcaklık etkisine bağlı HLB numunelerin rezonans frekans değerleri 131

Şekil 4.50. HLB numunelerin yüksek sıcaklık etkisinden sonra basınç dayanımı ve rezonans frekansı ilişkisi..... 132

Şekil 4.51. HLB numunelerin yüksek sıcaklık seviyesine göre çekip çıkarma yükü azalma oranları..... 133

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. HLB üretiminde kullanılan lifler a)çelik lif b)cam elyaf lif c)sentetik lif d)polipropilen lif 24

Resim 3.2. HLB üretiminde kullanılan EAFC agregası a) 0-4 mm b) 4-11 mm..... 25

Resim 3.3. HLB üretiminde kullanılan doğal kırmataş agrega a) 0-4 mm b) 4-11 mm . 25

Resim 3.4. HLB numunelerin üretim aşamaları 33

Resim 3.5. HLB çökme deneyi 37

Resim 3.6. Basınç dayanımı ve deformasyon ölçüm düzeneği 39

Resim 3.7. Dört noktadan eğilme deney düzeneği 40

Resim 3.8. Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği..... 41

Resim 3.9. Çekip çıkarma deney düzeneği 42

Resim 3.10. Dikey aşınma deney düzeneği 42

Resim 3.11. Ultrasonik dalga hızı ölçüm düzeneği 43

Resim 3.12. Hızlı klor geçirimliliği deney düzeneği..... 45

Resim 3.13. Asit ve sülfat atağından sonra HLB numuneler a) asitten sonra b) sülfattan sonra 48

Resim 3.14. Karbonatlaşma derinliğinin ölçülmesi 49

Resim 4.1. 400 gün asit atağına maruz kalan M4 numunesinin görüntüsü 108

Resim 4.2. 400 gün sülfat atağına maruz bırakılan M4 numunesinin görüntüsü 116

Resim 4.3. Farklı HLB numunelere ait karbonatlaşmış kesitler a) M2 b) M28 c) M4 d) M20 125

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
l	Uzunluk
d	Çap
mm	Milimetre
N	Newton
kg	Kilogram
g	Gram
m^3	Metreküp
db	Desibel
Hz	Hertz
m^2	Metrekare
cm^2	Santimetrekare
α	Merkez noktaya olan uzaklık
σ	Gerilme
c	Coulomb
σ_{as}	Numunenin asitten sonraki basınç dayanımı
$\sigma_{aö}$	Numunenin asitten önceki basınç dayanımı
m_{as}	Numunenin asitten sonraki ağırlığı
$m_{aö}$	Numunenin asitten önceki ağırlığı
σ_{ss}	Numunenin sülfat atağından sonraki basınç dayanımı
$\sigma_{sö}$	Numunenin sülfat atağından önceki basınç dayanımı
m_s	Nnumunenin sülfat atağından sonraki ağırlığı
$m_{sö}$	Numunenin sülfat atağından önceki ağırlığı
°C	Santigrat derece
ρ	Etki oranı
s	Saniye
W_p	Parafinlenmiş numune ağırlığı
MPa	Megapaskal

Kısaltmalar	Açıklamalar
ANOVA	Varyans analizi
AO	Aşınma oranı
ASTM	Uluslararası Amerikan test ve materyalleri topluluğu
BHA	Birim hacim ağırlık
CEL	Cam elyaf lif
ÇL	Çelik lif
ÇOO	Çoklu objektifli optimizasyon
D	Bağlayıcı dozajı
DKA	Doğal kırmataş agrega
D(x)	Erişilebilirlik fonksiyonu
EAFC	Elektrik ark fırın cürufu agregası
GYFC	Granüle yüksek fırın cürufu
HKG	Hızlı klor geçirimliliği
HKO	Hatalar karesi ortalaması
HKT	Hatalar karesi toplamı
HLB	Hibrit lifli beton
KD	Karbonatlaşma derinliği
KSK	Kılcal su emme katsayısı
M	Karışım numarası
MKT	Merkezi kompozit tasarım
Ö	İstatistiksel olarak önemlilik
PL	Polipropilen lif
PVA	Polivinil alkol
Q	Sönümleme katsayısı
RF	Rezonans frekansı
RM	Regresyon modeli
R^2	Korelasyon katsayısı
SA	Süper akışkanlaştırıcı
SD	Serbestlik derecesi
SL	Sentetik lif

Kısaltmalar	Açıklamalar
THBB	Türkiye hazır beton birliği
TS EN	Türk Standartları Avrupa Normları
TYY	Tepki yüzeyi yöntemi
UDH	Ultrasonik dalga hızı
UK	Uçucu kül
YÇD	Yarmada çekme dayanımı
2FI	İki faktörlü etkileşim

1. GİRİŞ

Beton, günümüzde en yaygın kullanılan yapı malzemelerinden biridir ve geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Hazır beton üretimine Avrupa ülkelerinden 70 yıl sonra başlayan Türkiye, bugün hazır beton üretiminde dünyada önemli bir yerdedir. Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB) verilerine göre kurulduğu 1988 yılında 1,5 milyon metreküp beton üretimi yapılmışken son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte ihtiyaç ve paralelinde üretim artmıştır. 2017 yılında 115 milyon metreküp üretim ile zirveye ulaşan beton üretimi son yıllarda inşaat sektöründeki yavaşlama neticesinde 2019 yılında 67 milyon metreküpe kadar düşmüştür. Buna rağmen Türkiye bu büyüme performansıyla hazır beton üretiminde Çin ve ABD'den sonra yer almaktadır (Türkiye Hazır Beton Birliği, 2019).

Yapı sektöründe bu denli fazla kullanılan bir malzemenin beklenen mühendislik özelliklerini sağlayan, en ekonomik tasarımın yapılması ile ülke ekonomisine büyük katkı sağlanabilir. Betonun en önemli özelliği, basınç yüklerini taşıma özelliğinin zamana bağlı artan bir fonksiyon olmasıdır ve beton elemanlar basınç yüklerine karşı görevini mükemmel derecede yerine getirmektedir (Baradan, Yazıcı ve Aydın, 2012). Ancak beton çekme yüklerine karşı zayıf kalan bir malzemedir. Çeşitli nedenlerden kaynaklanan çatlaklar, betonun kalıcılığını önemli derecede etkilemektedir. Çekme zorlamalarının birim şekil değiştirme kapasitesini aşması durumunda betonda çatlaklar meydana gelir. Betonda çatlaklar taze ve sertleşmiş halde oluşabilir. Betondaki çekme gerilmeleri aşağıda belirtilen üç farklı durumun biri veya daha fazlası ile gerçekleşebilir.

1. Kendi bünyesinde meydana gelen; kuruma büzülmesi (rötre), termal genleşme veya büzülme hareketleri ve oturma gibi hareketlerin sonucunda çatlak oluşabilir.
2. Betonun bağlayıcı hamurunda veya agregasında meydana gelen alkali-silika, alkali agrega reaksiyonları sonucunda veya betonarme elemanlardaki donatının korozyona uğraması neticesinde meydana gelen hacim artışının sonucu olarak çatlak oluşabilir.
3. Beton elemanların servis ömrü boyunca maruz kaldığı kapasitesinin üzerinde yükleme, kimyasal ve biyolojik etkiler, yapının kısmi oturması gibi çevresel etkiler sebebiyle çatlak oluşabilir.

Betonda taze ve sertleşmiş halde iken oluşan çatlaklar çeşitli katkı malzemeleri veya yardımcı bileşenler kullanılarak engellenebilir. Betona gömülen çelik donatılar çekme yüklerini karşılayarak betonarme elemanın çekme gerilmesini artırabilmektedir. Ancak sağladığı bu olumlu etkinin yanında yapıya gereğinden fazla ağırlık yapması veya uygun olmayan geometrilerde, sık donatı gerektiren kesitlerde yeterli kullanılamaması gibi olumsuz etkiler de meydana gelmektedir. Böyle durumlarda beton elemandaki yük aktarımına katkı sağlayan ve yükleme esnasında ani kırılmayı önleyen lifler katkı olarak kullanılmaktadır. Lif kullanımı ile çatlak oluşumu gecikir, oluşan çatlağın yayılması ve büyümesi önlenebilir ve kırılma anına kadar yavaş yavaş beton matrisinden sıyrıldığından betonun enerji yutma kapasitesini artırabilir (Baradan, Yazıcı ve Aydın, 2012). Farklı lif türleri kullanılarak farklı sorunlara çözüm önerisi geliştirilebilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan liflerin betona sağladığı yararlar şu şekilde bilinmektedir:

Çelik lif: Kullanılan beton elemanın çekme dayanımını, darbe dayanımını, esnekliğini, enerji yutma kapasitesini, büzülmeye karşı direncini geliştirir ve çatlak kontrolü sağlayarak durabilite performansında da iyileşme sağlar.

Cam elyaf lif: Alkali ve asit direnci yüksektir, oksitlenmez, taze betonda meydana gelen plastik büzülmeyi engellemeye yardımcı olur, sertleşmiş betonda çatlak oluşumunu önlemeye yardımcıdır. Suyun geçebileceği mikro kanalların oluşumunu engelleyerek betonun su geçirimliliğinin azalmasında rol oynar böylece betonun dayanıklılık özellikleri gelişir. Beton matrisi içerisinde bir ağ gibi yayılarak agreganın hareketini engeller ve segregasyonu önlemede etkin rol oynar. Betonun yangın etkisindeki dayanımını korumasına yardımcı ve donma-çözülme olayına karşı betona direnç kazandıran bir katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Betona sağladığı bu faydalardan ötürü genellikle vibrasyona maruz kalan zeminlerde, garaj betonlarında, havaalanları, su depoları, deniz kenarında inşa edilen yapılar tüm prekast yapı elemanı üretimlerinde, beton boru ve parke taşı imalatlarında, püskürtme betonlarda ve tamir harçlarında sıklıkla kullanılmaktadır.

Sentetik lif (STRUX 90/40): Mikro çatlakların yayılmasını ve büzülme çatlağını kontrol ederek betonun dayanım ve dayanıklılığını arttırır. Çelik hasır takviyesine alternatif olarak kullanılabilir. Asit ve sülfat direnci yüksek bir lif türü olduğundan deniz bölgelerindeki yapı elemanlarında, zemin betonlarında ve prekast yapı elemanlarında kullanılmaktadır.

Polipropilen lif: Kimyasal direnci yüksek bir lif türü olduğundan alkali ve korozif etkilere karşı betonun direncini artırmaktadır. Endüstriyel zemin döşemelerinde, prefabrik yapı elemanlarında, kuruma büzülmesi çatlaklarını azaltmak için tercih edilen bir lif türüdür. Beton elemanın çekme dayanımını ve darbe direncini artırır.

Bu lif katkıları ile lifli betonlara üstün özellikler kazandırılabilmektedir. Amacına uygun yapılan bir beton tasarımı ile çok iyi özelliklere sahip olan, servis ömrü uzun ve bakım onarım maliyeti çok düşük betonlar üretilebilir. İki veya daha fazla lif türü kullanılarak performansı yüksek, maliyeti düşük beton üretimi de araştırılmaya ihtiyaç duyan bir konudur.

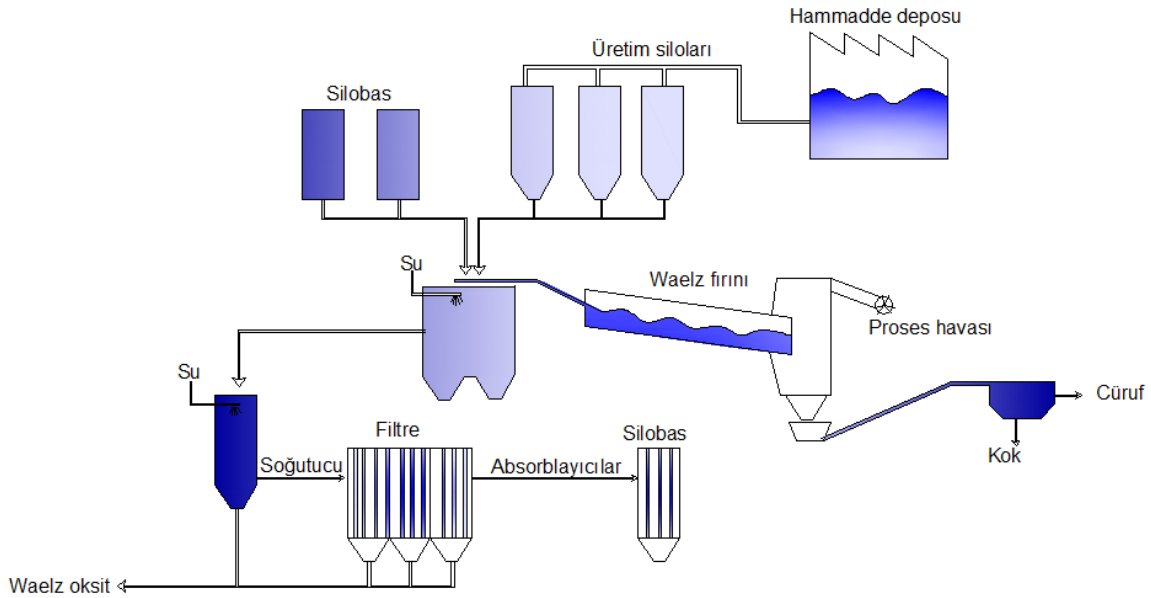
1.1. Hibrit (Melez) Lifli Beton

Hibritleşme, farklı formların yeni uygulamalarda yeni formlarda birleşme yolları olarak tanımlanmaktadır (Durham ve Kellner, 2012). Media and cultural studies: Keyworks. John Wiley & Sons). Bu mantıktan yola çıkılarak aynı prensip ile beton katkı malzemelerinde olan liflerin kendine has özellikleri birleştirilerek yeni özellikte bir beton üretme fikri geliştirilmiştir. İki veya daha fazla lif türünün kombinasyonu ile üretilen betonlar Hibrit Lifli Beton (HLB) olarak adlandırılmaktadır (Altun ve Oltulu, 2020; Fan ve diğerleri, 2020; Larsen ve Thorstensen, 2020). HLB'lerde kullanılan ve yukarıda belirtilen lif türlerinin kendine has özelliğinden yararlanılarak üstün özellikli ve amaca yönelik betonlar üretilebilmektedir (Isa, Pilakoutas, Guadagnini ve Angelakopoulos, 2020).

Hibridizasyon mantığı ile beton bileşenlerinden sadece liflerin değil diğer fazların da hibridizasyonunun beton performansı üzerindeki etkisinin de araştırılması gerektiği düşünülmüştür. Bu nedenle bu tez çalışması kapsamında bağlayıcı hamuru oluşturan çimento, uçucu kül (UK) ile yer değiştirilmek suretiyle, agrega sistemini oluşturan doğal kırma taş agrega da elektrik ark fırın cürufu agregası (EAFC) ile yer değiştirilmek suretiyle hibridize edilmiştir. Böylece betonun oluşturan tüm fazların kendi içinde hibridizasyonu sağlanmıştır.

1.2. Elektrik Ark Fırın Cürufu Agregasının Beton Üretiminde Kullanımı

Çelik üretim sürecinde açığa çıkan katma değerli yan ürün malzemelerin beton sektöründe kullanımı ekonomik ve ekolojik sürdürülebilirlik açısından önem kazanmaktadır. EAFC de bu yan ürünlerden bir tanesidir. Elektrik ark fırınları hurda materyaller çelik üretimi için kullanılmaktadır. Bu esnada EAFC da yan ürün olarak açığa çıkmaktadır. EAFC üretim prosesi Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Üretim silolarına doldurulan hurdalar elektrik ark fırınına üstten boşaltılarak fırın kapağı kapatılır ve elektrotlar fırın içine daldırılır. Bu elektrotlardan geçirilen elektrik neticesinde çıkan ısı ile hurda materyaller erir. Eritme prosesinde kireç, karbon gibi katkı malzemeleri kullanılarak hedeflenen kimyasal kompozisyona ulaşılır. Sıvı hale gelen çelik bünyesindeki safsızlıkları gidermek için elektrik ark ocağına oksijen ilavesi de yapılır. Ocağın alt kısmından döküm alma sistemi ile sıvı çelik potaya aktarıldıktan sonra elektrik ark fırınında kalan cüruf diğer tarafa yatırılarak alınır (Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Sektörel Uygulama Klavuzu).



Şekil 1.1. EAFC üretimi akış şeması (SOYKAN, 2008)

Açığa çıkan bu EAFC yol kaplamalarında kullanım alanı bulmasının yanı sıra beton üretiminde de kullanılarak betona farklı özellikler kazandırılmaktadır. Bu amaçla EAFC'nin ağır agrega olma özelliğinden faydalanılarak radyasyon kalkan betonu özellikleri (Beaucour ve diğerleri, 2020; Öztürk ve diğerleri, 2018), dayanıklılık

özelliğinden faydalanılarak üretilen betonların durabilitesi (Roque, Rodrigues ve Silva, 2020) incelenmiştir. Yüzey morfolojisinden faydalanarak matris ile bağlanma performansı (Lee ve diğerleri, 2020) ve ayrıca EAFC kullanılarak üretilen betonların mekanik ve geçirimlilik özellikleri, kendiliğinden yerleşen betonlarda (Murthi ve diğerleri, 2020) ve silindirle sıkıştırılabilen betonlarda (Santamaría, Ortega-López, Skaf, Chica ve Manso, 2020) kullanılabilirliği referans agregalar ile karşılaştırılarak araştırılmıştır. Literatürde mevcut çalışmalar ışığında EAFC'nin beton agregası olarak kullanılabilir olduğu görülmüştür.

1.3. Uçucu Külün Beton Üretiminde Kullanımı

Uçucu kül, kömürle çalışan termik elektrik santrallerinde çok ince öğütülerek yakılan kömürden açığa çıkan bir yan üründür. Bu esnada nispeten iri taneli olan, baca gazları ile taşınamayan ve kazan tabanına düşen taban külü; siklon tipi ocaklarda yakılan kömürün su ile soğutulup uzaklaştırılması ile elde edilen ham kül; çok ince taneli olan ve baca gazları ile taşınabilen uçucu kül olmak üzere üç farklı türde kül açığa çıkmaktadır. Bacadan çıkan bu küller çevreye zararlı olmaları nedeniyle santral bacasında çeşitli mekanik ve elektrostatik yöntemlerle toplanarak uygun bölgelerde depolanır.

Uçucu külün özellikleri yakılan kömürün özelliklerine ve yakılma yöntemine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bileşiminde genellikle silis ve alümin bulunduğundan puzolanik özellik göstererek çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. İnce taneli olması ve küresel geometriye sahip olması nedeniyle taze betonun işlenebilirliğini artırır. Uçucu kül, çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan kireç ile reaksiyonu sonucunda ilave kalsiyum silikat hidrat jellerini oluşturarak betona dayanım ve dayanıklılık kazandırır (Türker, Erdoğan, Katnaş ve Yeğinobalı, 2003). ASTM C 618 uçucu külleri bünyesindeki CaO oranına göre sınıflandırmıştır. CaO oranı %10'dan az olan uçucu küller F sınıfı, %10'dan fazla olan uçucu küller C sınıfı olarak adlandırılmıştır. F sınıfı uçucu küller puzolanik özelliğe sahip iken C sınıfı uçucu küller puzolanik özelliğin yanı sıra bir miktar bağlayıcı özelliği de sahiptir (Erdoğan, 2003).

Türkiye'de 2020 yılında faaliyet gösteren 42 adet kömür yakıtlı enerji santrali bulunmaktadır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı). Bunlardan bir tanesi de tez çalışmasının yapıldığı Hatay ilinde bulunan Atlas Enerji Üretim A.Ş.'dir. Uçucu külün

betona olan etkilerini araştıran literatürde bulunan çalışmalarında UK katkısı ile daha ekolojik betonların üretildiği (Prakash, Thenmozhi ve Raman, 2019), betonların durabilite performanslarının iyileştirildiği (Sunil, Manjunatha ve Yaragal, 2017), mekanik özelliklerin geliştirilerek daha çevreci betonların üretildiği (Shehab, Eisa ve Wahbe, 2016) ifade edilmiştir.

1.4. Tez Çalışmasının Amacı

Literatür çalışmalarından yararlanarak tek tip lif katkısı ile beton üretiminin yaygın olduğu ancak birden fazla lifin kullanılması ile üretilen hibrit lifli betonların geliştirilmeye ihtiyaç duyduğu belirlenmiştir. Kullanılan liflerin boyutları, geometrileri ve miktarları değiştirildiğinde soruna yönelik beton üretiminin gerçekleştirildiği belirlenmiştir. Her lif türünün farklı bir amaca hizmet ettiği tespit edilmiştir. Örneğin; taze beton çatlaklarının önlenmesi için cam, sentetik (polipropilen, poliefin, naylon) lifler, sertleşmiş betonda eğilme ve çekme dayanımının arttırılması için çelik veya karbon lifler, enerji yutma kapasitesinin arttırılması için polipropilen veya çelik lifler, aşınma dayanımının arttırılması için çelik lifler kullanımı yaygındır (Baradan, Yazıcı ve Aydın, 2012). Ancak, belirtilen sorunların en az ikisine birden çözüm olabilen, betonun özelliklerini araştıran, istatistiksel değerlendirmesini sunan çalışmalara rastlanamamıştır. Farklı yapıda, miktarda ve değişik kombinasyonlarda liflerin birleştirilmesi ile bu sorunların aşılabileceği düşüncesi doğmuştur. Betonun sadece lif ağının değil diğer bağlayıcı matris ve agrega sistemlerinin de hibridizasyonu ile hem lif katkısından kaynaklı artan maliyeti düşürmek hem de daha çevre dostu beton üretimi sağlamak istenmiştir. Bu tez çalışması kapsamında literatürde Hibrit Lifli Beton (HLB) olarak adlandırılan betonların servis ömrü boyunca ihtiyaç duyulan mekanik, geçirimlilik, fiziksel ve durabilite özellikleri açısından performansları merkezi kompozit tasarım ile geniş bir deneysel çalışma yapılarak çalışmanın kısıtlarını oluşturan bağımsız ve bağımlı değişkenler üzerinde istatistiksel olarak anlamlı parametrelerin etki ağırlıklarının belirlenmesi ile ilerideki çalışmalara ışık tutmak istenmiştir.

1.5. Tez Çalışmasının Kapsamı

Merkezi kompozit tasarım yardımıyla 7 faktörlü (çelik, cam elyaf, sentetik ve polipropilen lif katkı oranı, uçucu külün çimento ile yer değiştirme oranı, elektrik ark fırın cürufunun

doğal kırmataş agrega ile yer değiştirme oranı ve bağlayıcı dozajı) bir deney planı oluşturulmuştur. Deney tasarımına sadık kalınarak HLB üretimi gerçekleştirilmiş ve yukarıda belirtilen deneyler yapılarak HLB'lerin taze haldeki özellikleri (çökme değeri ve birim hacim ağırlık) ile mekanik (eğilme dayanımı, eğilme deplasmanı, yarmada çekme dayanımı, zamana bağlı basınç dayanımı, donatı çekip çıkarma yükü, aşınma oranı, test çekici) geçirimlilik (ultrasonik dalga hızı, rezonans frekansı, hızlı klor geçirimliliği), fiziksel (su emme kapasitesi, kılcal su emme katsayısı) ve durabilite (asit ve sülfat direnci, yüksek sıcaklık etkisinde dayanım ve aderans değişimi, karbonatlaşma derinliği) özellikleri araştırılmıştır. Elde edilen deneysel verilerden genel çıkarımların yapılması ve sonraki çalışmalar için bir öngörü oluşturmak için her tepkiyi tanımlayan regresyon modelleri oluşturulmuştur. Deney sonuçlarına varyans analizi (ANOVA) yapılarak her bağımsız değişkenin tepki (bağımlı değişken) üzerindeki istatistiksel etki oranları belirlenmiştir. İstenen özelliklerde belirlenen objektifler altında optimum HLB üretim parametrelerinin belirlenmesi çalışmanın odak noktasını oluşturmuştur.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Betonun en önemli özelliklerinden bir tanesi basınç dayanımının zamanın artan bir fonksiyonu olmasıdır ve beton basınç yüklerine karşı görevini mükemmel derecede yerine getiren bir malzemedir. Buna karşın çekme yüklerine karşı zayıf kalan bir malzemedir. Taze veya sertleşmiş halde çatlak oluşumuna rastlanmaktadır. Farklı sebeplerden ötürü oluşan çatlaklar, betonun servis ömrünü önemli derecede etkilemektedir. Çatlak oluşum ilkesi herhangi bir noktada oluşan çekme gerilmelerinin birim şekil değiştirme kapasitesini aşması olarak açıklanmaktadır. Betondaki çatlaklar; kuruma büzülmesi, termal genleşme veya büzülme hareketleri gibi kendi bünyesindeki hareketlerin bir sonucu olarak meydana gelmektedir. Donatı korozyonu, alkali-silika reaksiyonu, alkali-agrega reaksiyonu gibi beton veya betonarme elemanlardaki bileşenlerin hacim değişikliğinin bir sonucu olarak veya kapasitesini aşan yükleme, kısmi oturma gibi kullanım süresince karşılaştığı çevresel etkiler neticesinde meydana gelmektedir (Baradan, Yazıcı ve Aydın, 2012).

Beton, taze ve sertleşmiş halde iken çatlak oluşum nedenleri farklıdır. Çeşitli katkı malzemelerinin veya yardımcı elemanların beton sistemine dâhil edilmesi ile çatlak oluşumu engellenmeye çalışılmaktadır. Örneğin, çelik donatı kullanımı ile betonun çekme kapasitesinin artırılması ile çekme gerilmelerine karşı direnç artırılabilmektedir. Ancak bu donatı sisteminin yapıya gereğinden fazla ağırlık yapmasının yanı sıra düzgün geometrisi olmayan veya sık donatı kullanımı gerektiren kesitlerin olduğu yapılarda çok fonksiyonel olmamaktadır. Bu tür durumlarda betonun çekme mukavemetini artıracak, yük aktarımını gerçekleştirebilecek lifler beton karışımına ilave edilmektedir. Farklı lif türleri ile farklı sorunlara çözüm önerisi sunulabilmektedir. Betonda lif kullanım, çatlak oluşumunu geciktirmeye, çatlak yayılmasını ve ilerlemesini önlemeye ve betonun enerji yutma kapasitesini önemli oranda geliştirmeye katkı sağlar (Baradan, Yazıcı ve Aydın, 2012).

Beton sektöründe genellikle tek tip lif kullanılarak beton üretimi gerçekleştirilmektedir. Kullanılan liflerin boyutları, geometrileri ve miktarları değiştirilerek farklı özelliklere sahip, özel bir soruna yönelik beton üretimi gerçekleştirilmektedir. Örneğin; taze beton çatlaklarının önlenmesi için cam ve sentetik lifler; sertleşmiş betonun eğilme ve çekme dayanımını arttırmak için çelik veya karbon lifler kullanılmaktadır. Enerji yutma kapasitesini arttırmak için polipropilen veya çelik lifler, aşınma direncini arttırmak için

çelik lifler kullanılmaktadır (Altun ve Oltulu, 2020; CaO, Liu ve Wu, 2020; Sohail, Alnahhal, Taha ve Abdelaal, 2020).

2.1. Taze Beton Özelliklerinin Değerlendirildiği Çalışmalar

Lif katkısının taze betonun taze haldeki özelliklerini olumsuz yönde etkilediği bilinen bir gerçektir. Lif türü ve miktarı betonun kıvamını etkileyen temel faktörlerdir. Farklı türdeki lifler değişen oranlarda betona dâhil edilerek üretilen betonların performansı araştırılmıştır. Bu durumun nedeni olarak liflerin bir araya toplanması ve iri agregaların hareketini kısıtlaması neticesinde iç direncin artması olduğu ifade edilmiştir. Martinie, Rossi ve Roussel (2010), akışkanlığı yüksek olan kendiliğinden yerleşen betonlara bile lif katılması durumunda kıvamın düştüğünü ifade etmişlerdir.

Şahmaran, Yurtseven ve Yaman (2005), lif takviyeli, kendiliğinden yerleşen betonlarda iki farklı tipte çelik lifi bir arada kullanarak hibrit lifli betonların işlenebilirliği ve çekme mukavemeti üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Lif katkısı ile kendiliğinden yerleşen betonların basınç ve yarmada çekme mukavemetinin arttığını ifade etmişlerdir. Lif hacmi, uzunluğu ve en-boy oranının etkisinin yanı sıra şekil ve yüzey pürüzlülüğü gibi liflerin diğer özelliklerinin de işlenebilirlik üzerinde önemli derecede etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Betonun akışkanlığını artırmak için çimento hamuru hacminin yüksek tutulması gerektiğini belirtmişlerdir.

Mehdipour, Vahdani, Libre ve Shekarchi (2013), yüksek derecede akışkan betona lif eklendiğinde betonun artık akamayacağı kritik bir lif konsantrasyonunun olduğunu belirtmişlerdir. Bu kritik lif konsantrasyonunun kullanılan lif türü, narinlik oranı ve iri agrega hacminden etkilendiği ifade edilmiştir (Dhonde, Mo, Hsu ve Vogel, 2007).

Mazaheripour, Ghanbarpour, Mirmoradi ve Hosseinpour (2011), uzunluğu 12 mm olan polipropilen lifler ile hafif kendiliğinden yerleşen beton üreterek taze beton özelliklerini incelemişlerdir. Bağlayıcının ağırlıkça %0,5'i kadar lif kullanıldığında çökme değerinin %40, U kutusu geçiş kapasitesinin %22 azaldığını ve V hunisi akış süresinin %65 arttığını belirtmişlerdir.

Akça, Çakır ve İpek (2015), uzunluğu 50 mm ve çapı 1 mm olan polipropilen lifler ile geri dönüşüm beton agregası ile üretilen betonlarda agrega-lif birleşik etkisi nedeniyle işlenebilirlik seviyesinin azaldığını bildirmişlerdir.

Ulaş, Alyamaç ve Ulucan (2019), agrega gradasyonunun çelik lif katkılı betonların işlenebilirliğine olan etkisini tepki yüzeyi yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Maksimum agrega büyüklüğü 16 mm ve 31,5 mm olan betonların ilk karıştırma işleminden 30, 60 ve 90 dakika sonra işlenebilirlik seviyeleri ölçülmüştür. Agrega tane boyutu küçüldükçe çelik lif oranı değişmese de, işlenebilirliğin arttığı ifade edilmiştir.

Cao, Cheng, Cao ve Gao (2017), kancalı çelik liflerin hacimce % 0,25, % 0,50 ve % 0,75 oranlarında, monofilament polipropilen lifin hacimce % 0,10 oranında kullanılması ile üretilen kendiliğinden yerleşen betonların taze haldeki işlenebilirlik seviyesini ölçmüşlerdir. Taze betonun doldurma ve geçiş kabiliyeti ile viskozitesini değerlendirmek için çökme, akış, J-halkası ve V huni testleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre liflerin hacmi arttıkça taze haldeki betonun işlenebilirliğinin azaldığı belirtilmiştir.

Figueiredo ve Ceccato (2015), beton karışımındaki lif içeriğinin etkisini sadece çökme ve Ve-Be testi gibi geleneksel ölçümler kullanarak değerlendirmişlerdir. Betonun çökme değerinin azalması ve Ve-Be süresinin katlanarak artmasının temel nedeni olarak lif miktarını işaret etmişlerdir. Liflerin iri agrega hareketine engel olarak betonun hareketini de kısıtladığını belirtmişlerdir. Agrega boyutunun veya lifin narinlik oranının (boy/çap) arttırılması ile betonun akışkanlığının azaldığını ifade etmişlerdir. Ayrıca Ve-Be testinin plastik kıvamlı beton için yeterli olmadığını da ifade etmişlerdir.

2.2. Mekanik Özelliklerin Değerlendirildiği Çalışmalar

Beton, çatlak oluşumu için çok elverişli bir malzemedir. Çatlaklı beton her türlü dış etkiye karşı zayıf durumda kalmaktadır. Literatür çalışmaları incelendiğinde, lif kullanılarak üretilen farklı özelliklerdeki betonların mekanik özellikleri ile ilgili oldukça fazla çalışmanın mevcut olduğu görülmüştür. Örneğin, çelik veya karbon fiberler, sertleşmiş betonun eğilme ve çekme mukavemetini arttırmak için kullanılırken polipropilen veya çelik lifler enerji yutma kapasitesini ve aşınma direncini arttırmak için tercih edilirler. Birçok çalışmada liflerin betonun çekme mukavemetini, sünekliğini, tokluğunu artırmak ve

dayanıklılık özelliklerini geliştirmek için betonda kullanılabileceği belirtilmiştir (Lau ve Anson, 2006; Kuder ve Shah, 2010; Pakravan, Latifi ve Jamshidi, 2017).

Glavind ve Aarre (1990), çelik ve propilen liflerin hibritlenmesi ile üretilen kompozitin birim şekil değiştirme kapasitesinin arttığını bildirmişlerdir.

Feldman ve Zheng (1993), çelik ve propilen elyaf liflerin hibritlenmesi ile betonun tokluk ve gerilme kapasitesinin iyileştiğini belirtmişlerdir. Abou El-Mal, Sherbini ve Sallam (1993), lif yapısı ve boyutlarına bağlı olarak, makro çelik lifler ile mikro propilen liflerinin kombinasyonunun sinerjik bir mekanizma oluşturduğunu ve betonun tokluk ve süneklik özelliklerini iyileştirdiğini ifade etmişlerdir. ASTM C1609 standardına göre hibrit çelik-propilen lif sistemlerinde lif karakteristiği (tür, geometri, hacimsel oranı ve elastisite modülü gibi) betonların dayanımını etkileyen önemli bir parametredir.

Betona katılan lif hacminin ve türünün betonun mekanik özelliklerine olan etkisini belirlemek için Yao, Li ve Wu (2003), lif hacmi %0,5 olan hibrit çelik-propilen liflerle beton üretmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, liflerin hibrit formda kullanılmasının mono lifli betona kıyasla daha üstün bir kompozit performansı sergilediğini belirtmişlerdir. Deneysel çalışmada uzunluğu ve çapı sırasıyla 30 mm ve 0,5 mm olan çelik lif, 15 mm ve 0,1 mm olan polipropilen lif ve 5 mm ve 0,007 mm olan karbon lif kullanmışlardır. Çelik lifin hacimsel olarak %0,3 oranında polipropilen lif yerine kullanılması ile üretilen betonların %0,5 lif içeren kompozit ile kıyaslanabilir performans sergilediğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde narinlik oranları 65 ve 80 olan iki tür lif hacimce %0,5 ve %1 oranlarında tekli olarak kullanılıp beton üretilmiştir. Narinlik oranı 80 olan lifin kullanıldığı betonların basınç dayanımının narinlik oranı 65 olan lifin kullanıldığı betonlara göre daha yüksek olduğu ve lif hacmi %1 iken basınç dayanımının %117 daha fazla olduğu ifade edilmiştir (Köksal, Altun, Yiğit ve Şahin, 2008).

Park, Kim, Ryu ve Koh (2012), farklı uzunluk ve geometrideki makro ve mikro çelik liflerin kombinasyonu (pürüzsüz, bükülmüş ve çengelli) ile HLB üretmişlerdir. Deneysel bulgulara göre, çekme gerilmesi üzerinde makro liflerin etkili olduğunu, mikro lif ilavesi ile küçük ancak çok çatlaklı kırılma davranışının meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Çatlama direncinin mikro lif miktarının artışına bağlı olarak önemli ölçüde arttığını bildirmişlerdir.

Benzer şekilde, Cominoli, Meda ve Plizzari (2007), çelik liflerin hibritlenmesi ile üretilen yüksek mukavemetli betonların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kısa (l = 12 mm, d = 0.18 mm) ve uzun (l = 30 mm, d = 0.60 mm) çelik liflerin karma kombinasyonu ile hem küçük hem de büyük çatlak açıklığının azaldığını ifade etmişlerdir.

Banthia ve Sappakittpakorn (2007), betonun tokluğunu artırmak için makro (d=0,8 mm) ve mikro (d=0,4 ve d=0,45 mm) boyutlarda kıvrımlı çelik lifleri kullanarak HLB üretmişlerdir. Makro çelik lifler ile aynı uzunlukta ancak çapı daha küçük olan çelik liflerin hibritlenmesi ile tokluk özelliğinin artabileceğini ifade etmişlerdir.

Ahmed, Maalej ve Paramasivam (2007), çelik ve propilen liflerin çimentolu kompozitlerin pekleşme ve çoklu kırılma davranışları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Teorik olarak, hibrit lifler için kritik bir hacim oranı önermişler ve deneysel olarak bu oranı doğrulamışlardır. Kritik lif hacmi, elyaf uzunluğu ile çapının uygunluğu ve yüzey pürüzlülüğü ile ilişkilendirilmiştir. Sonuçlara göre, propilen liflerin, pekleşme bölgesinde ve çoklu kırılma davranışında daha etkin rol oynadığı ortaya konulmuştur. Çelik liflerin, elastisite modülü daha düşük olan propilen lifler ile yer değiştirilmesi ile kompozit malzemenin mukavemetinin azaldığı, ancak şekil değiştirme kapasitesinin önemli ölçüde arttığı belirtilmiştir.

Lif tipi ve miktarının çatlak davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için Vandewalle (2007), çelik ve elyaf lifleri kullanarak HLB üretmiştir. Lif uzunluğunun hibrit sistemi daha etkin hale getirdiğini ve çatlak genişliğinin çok büyük olması halinde bile iyi derecede süneklik sağlanabildiğini belirtmiştir.

Kim, Park, Ryu ve Koh (2011), makro ve mikro boyutlardaki çelik liflerinin farklı kombinasyonlarını ile üretilen yüksek performanslı HLB'lerin eğilme davranışını incelemişlerdir. Hibrit lifli betonların tokluk ve çatlama sonrası mukavemet değerlerinin tek tip lif içeren betonlara kıyasla önemli ölçüde arttığını belirtmişlerdir. HLB'lerin %1 makro lif + %1 mikro lif içeren kombinasyonunun sadece mikro lif içeren betonun dayanımından %48,7 daha fazla olduğunu ifade etmişlerdir. Deney bulgularına göre, HLB'lerin deformasyon ve enerji yutma kapasitelerinin önemli ölçüde artış gösterdiği belirtilmiştir.

Park, Kim, Ryu ve Koh (2012), farklı uzunluklarda ve geometrilerde (pürüzsüz, bükülmüş ve kanca) makro ve mikro çelik liflerin kombinasyonu ile HLB'lerin mekanik performansını araştırmışlardır. Deneysel çalışma sonuçlarına göre, makro liflerin çekme dayanımını artırdığını, mikro liflerin ise çoklu kırılma davranışı meydana getirdiğini belirtmişlerdir. Mikro lif içeriği arttıkça çatlama direncinin ve kırılma sonrası mukavemetin önemli ölçüde arttığını bildirmişlerdir.

Lifli hibrit betonların yapısal sismik davranışını incelemek için Huang, Xu L, Chi ve Xu H (2015), kolon numuneler üretmişlerdir. Oluklu çelik lif (l=29 mm, d=0.45 mm) ile propilen lifleri (l=19 mm, d=48 mm) hacimsel olarak sırasıyla, %1,5 ve %0,15 oranlarında kullanmışlardır. Deney sonuçlarına göre, kolon numunelerin mekanik özelliklerinde yüksek oranda iyileşmenin sağlandığı tespit edilmiştir. Bu durumun nedeni ise mikro ve makro boyutta çatlakların oluşması ve çoğalması için daha fazla enerjiye gereksinim duyulması neticesinde dayanım artışı olarak açıklanmıştır. Liflerin sinerjik etki ile çekme gerilmelerini daha iyi karşıladıklarını ifade etmişlerdir.

Soltanzadeh, Barros ve Santos (2015), çelik liflerin betonda kullanılması ile beton elemanın sünekliğinin arttığını ve kırılma mekanizmasının olumlu katkı sağlayacak yönde değiştiğini ifade etmişlerdir. Çelik liflerin çatlakları köprüleme ve yükü aktarma yeteneği sayesinde çatlakların büyümesi ve yayılması sınırlandırılmış olur (Mo ve Yap, 2014).

Cam elyaf ve bazalt elyaf liflerin betonun mekanik özelliklerine olan etkisi araştırılan çalışmalarda, lif oranının %0,25 olması durumunda basınç dayanımının %5 artış gösterdiği belirtilmiştir. Eğilme dayanımının ve kırılma enerjisinin ise önemli ölçüde arttığı ifade edilmiştir (Kizilkanat, Kabay, Akyüncü, Chowdhury ve Akça, 2015; Fenu, Forni ve Cadoni, 2016; Hilles ve Ziara, 2018; Madhkhan ve Katirai, 2019).

Singh ve Rai (2018), mukavemeti yüksek, esnek ve sünek olan liflerin çatlama sonrası bölgede betonun tokluk değerini ve deformasyon kapasitesini artırdığını ve düşük mukavemetli liflerin betonun kısa süreli performansına katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, kısa liflerin mikro çatlakları, uzun liflerin makro çatlakları önlediğini belirtmişlerdir. İki farklı lifin hibridizasyonu ile çatlak yayılımının kontrolünün sağlanabildiğini ve betondan beklenen genel performansın geliştiğini ifade etmişlerdir.

Literatür çalışmalarına göre, makro ve mikro liflerin hibritlenmesi ile üretilen betonların tokluğu, çatlak direnci ve enerji yutma kapasitesinin tek tip lif kullanılan betonlara göre artış gösterdiğii anlaşılmıştır. Yaygın olarak kullanılan çelik ve propilen liflerin boyutu ve şekli hibrit lifli betonların mekanik özelliklerinde etkili bir rol oynamıştır (Pakravan, Latifi ve Jamshidi, 2017).

2.3. Fiziksel ve Geçirimlilik Özelliklerinin Değerlendirildiği Çalışmalar

Köprü, bina, kanal ve su yapıları gibi birçok alanda temel yapı malzemesi olarak kullanılan beton hizmet ömrü boyunca çevresel etkilerle karşı karşıyadır ve zamanla aşınarak hasar görür (Zhang ve Li, 2011). Asit ve sülfat atağı, karbondioksit (CO_2) gaz difüzyonu, suyun aşındırma ve boşluklarda ilerlemesi gibi etkileri betona zarar verir ve betonun performansını olumsuz yönde etkiler. Betonun bu gibi etkilere maruz kaldığı yerler beton için zararlı ortam olarak adlandırılır. Zararlı ortamların betondaki etki mekanizmasını araştıran birçok çalışma bulunmaktadır. Jiang, Ling ve Shi (2020), üretilen beton numunelerine CO_2 kürü uygulanması ile su geçirgenliğinin azaldığını ifade etmişlerdir.

Ma, Liu, Duan, Liang ve Wu (2020), inşaat yıkımlarında ortaya çıkan atık tozları ile üretilen beton numunelerin su geçirgenliğinin kontrol numunesine göre daha düşük olduğunu belirtilmişlerdir.

Yahyaei, Asadollahfardi, ve Salehi (2020), zeolit, silis dumanı, uçucu kül ve cüruf kullanarak farklı beton tasarımları ile kendiliğinden yerleşen beton üreterek bu puzolan malzemelerin betonun klor iyonu geçirgenliğine olan etkisini araştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre puzolan katkılar ile üretilen betonların su geçirimliliğin çok düşük bir aralıkta olduğunu belirtmişlerdir.

Binici ve diğerleri (2020), toz halde bulunan bazalt ve çimento ile ince agregayı kısmen yer değiştirerek ürettikleri betonların su emme kapasitelerinin kontrol numunelerine göre %32 daha az olduğunu ifade etmişlerdir. Yapılan çalışmalardan görüldüğü üzere betonun geçirimlilik özelliklerini etkileyen parametreler bilinmeli ve yapısal elemanlar tasarlanırken bu özellikler dikkate alınmalıdır.

Beton temel bileşen olarak agrega, bağlayıcı malzeme ve su içerir ancak lifler ve hava gibi çeşitli bileşenler de betona dâhil olabilmektedir. Farklı lif türleri kullanılarak beton elemanlara farklı özellikler kazandırılmakla birlikte betonların geçirimlilik ve durabilite özelliklerinin de etkilendiği yapılan çalışmalarda ifade edilmiştir. Örneğin; Gao, Zhang, Zhao ve You (2020), çelik lif takviyeli betonların dayanıklılığını klorür iyonu geçirgenliği açısından araştırmak için hacimce %1,5'in üzerinde çelik lif kullanıldığı zaman beton numunelerin dayanıklılık performansının azaldığını belirtmişlerdir.

Liu, Ding ve Qiao (2019), polipropilen lif katkısı ile yüksek performanslı beton üreterek bu betonların klorür direncini ve su geçirimlilik kapasitelerini ölçmüşlerdir. Test sonuçlarına göre polipropilen lif katkısı ile su geçirgenliğinin azaldığı ve klorür direncinin arttığı ifade edilmiştir.

Truong, Son ve Choi (2019), lateks elyaf takviyeli beton numunelerin mekanik ve geçirimlilik özelliklerini araştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre beton karışımına lateks elyaf ve çelik liflerin eklenmesi ile geçirimliliğin azaldığını tespit etmişlerdir.

Algin ve Ozen (2018), bazalt lif katkılı kendiliğinden yerleşen betonlarda su işleme derinliğini ölçmüşlerdir. Lif uzunluğu ve oranı arttıkça su işleme derinliğinin de arttığını belirtmişlerdir. Lif uzunluğunun 24 mm ve lif içeriğinin %0,5 olduğu betonlardaki su işleme derinliğinin en yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Betonda iki veya daha fazla lif türünün bulunmasıyla, hibrit lifli betonlar üretilmektedir. Böylece her bir lif türünün kendine has özellikleri kullanılarak daha işlevsel betonlar üretilebilmektedir. Betonun tek tip lif ile güçlendirilmesi, betonların dayanıklılık özellikleri üzerinde olumlu etki yapar, ancak etkisi sınırlıdır. Bununla birlikte, hibrit lif olarak adlandırılan iki veya daha fazla lif ilavesi, üstün performans elde etmek için tercih edilen bir yöntemdir. Liflerin hibritlenmesi ile betonun çevreden gelen etkilere karşı performansını araştıran çalışmalar mevcuttur. Örneğin; Wang, Zuo, Liu, Zhang ve Han (2019), Polivinil alkol lif (PVA) ile çelik lifleri hibritleyerek mukavemeti ve sünekliği yüksek olan çimentolu kompozitler üretmişlerdir. Liflerin hibridizasyonu ile kontrol betonundan daha küçük ve ince çatlaklar oluştuğunu, böylece geçirgenliğin azaldığını ve sonuç olarak beton numunelerin dayanıklılığının arttığını belirtmişlerdir.

Liu, Jia ve Wang (2019), cam elyaf ve polipropilen liflerin hibritlenmesi ile üretilen betonların klorür iyon difüzyon katsayısını hesaplamışlardır. Deney sonuçlarına göre cam elyaf lif katkılı betonun klorür iyon difüzyon katsayısının cam ve polipropilen lif katkılı betonlarınkinden daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. İlaveten sadece polipropilen lif katkılı betonların klorür iyon difüzyon katsayısının en yüksek düzeyde olduğunu belirtmişlerdir.

Lifli hibrit betonların mekanik özelliklerinin yanı sıra su geçirimliliğini ölçmek için Lawler, Zampini ve Shah (2002), boyu 12 mm ve çapı 0,022 mm olan çelik ve polivinil alkol (PVA) lifleri hibritleyerek beton üretmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, lif kombinasyonunun yükleme sırasındaki çatlama mekanizmasını değiştirdiğini gözlemlemişlerdir. Hibrit lif katkısı ile betonun su geçirimliliğine karşı direncinin önemli ölçüde arttığını belirtmişlerdir. Hidroksil grubunun varlığı ve hidrofilik yapısından dolayı PVA liflerin, çimentolu matris ile güçlü bir bağ oluşturduğunu ifade etmişlerdir.

Pourbaba, Asefi, Sadaghian ve Mirmiran (2018), yüksek performanslı HLB'lerin eğilme mukavemetinin yanı sıra hızlı klor geçirimliliği ve elektriksel öz direnç performansını da araştırmışlardır. Lif takviyeli beton karışımlarında mineral katkı olarak silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu (GYFC), ağırlıkça %10 ve %30 oranlarında çimento ile ikame edilmiştir. Çift ve tek kancalı çelik lifler ve polivinil alkol (PVA) lifler hacimce %0, %0,6 ve %1,2 oranlarında kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre, lif katkısının betonun mekanik mukavemetine ve geçirimlilik özelliklerine olumlu yönde katkıda bulunduğu belirtilmiştir.

Lif katkısının yanı sıra, betonun diğer temel bileşenlerinden olan agrega türü de betonun durabilite performansını önemli derecede etkilemektedir. Farklı kökenlere sahip doğal ve yapay agregalar betonun geçirimliliği üzerinde önemli rol oynar. Zakaria ve Cabrera (1996), yapay ve doğal agrega kullanımının betonun su geçirimlilik özelliklerine olan etkisini araştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre geri dönüştürülmüş tuğla agregası ile %50 uçucu kül ve %50 kil kullanılarak üretilen yapay agrega kullanımının betonun dayanıklılık özelliklerini iyileştirdiğini ifade etmişlerdir.

Çeşitli sektörlerden yan ürün olarak açığa çıkan malzemelerin agrega olarak kullanılmasını araştırmak için Salim (2020), uçucu kül ve cüruftan el yapımı agregalar üretip beton agregası olarak kullanmıştır. Bu agregalar ile üretilen betonların su penetrasyon derinliği

ölçülmüş ve sonuç olarak uçucu kül ve cüruf agregası kullanılan betonların su penetrasyon derinliğinin doğal agrega kullanılan betonlardan daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu durumun nedeni yapay agregaların doğal agregaya göre daha fazla mikro ve makro gözenek içermesi ve dolayısı ile daha zayıf olması şeklinde açıklanmıştır.

Yapay veya atık malzemelerin beton üretiminde agrega olarak kullanılması, aynı zamanda doğal kaynak tüketiminin azalmasına yardımcı olmakta ve farklı sektörlerden açığa çıkan yan ürünlerin depolama sorunlarına çözüm sunabilmektedir. Aynı zamanda betonun genel maliyetinin azaltılmasına katkıda sağlamaktadır. Örneğin; Elektrik ark fırın cürufu (EAFC), demir çelik fabrikalarının bir yan ürünü olarak açığa çıkmaktadır ve çeşitli sektörlerde üretime dâhil edilerek depolama sorununun çözülmesi gerekmektedir. Demir çelik fabrikalarından direkt olarak açığa çıktığından kırma işlemi yapılmaksızın agrega olarak beton karışımına ilave edilebilir. Betonda agrega olarak EAFC'yi kullanan çok sınırlı sayıda çalışma vardır (Abdelbary ve Mohamed, 2018).

Çimento, betona eklenen tüm malzemeleri bir arada tutan en önemli bileşendir. Ancak üretimi sırasında çevreye salınan zararlı gazlar ve üretim maliyeti göz önüne alındığında, alternatif olarak yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve uçucu kül gibi puzolan malzemeler beton üretiminde bağlayıcı olarak kullanılmaktadır (Benli, Karataş ve Gürses, 2017; Sabet, Libre ve Shekarchi, 2013; Devi, Aggarwal ve Saini, 2019). Uçucu kül (UK) betonun işlenebilirliğini artıran ve kendine has küresel yapısı sayesinde üstün özellikler sağlayan bir yan üründür. Betonda, bağlayıcı özelliğinden dolayı alternatif malzeme olarak kullanılır. UK çok ince bir malzeme olduğundan, betondaki boşluklara dolgu etkisi yaparak betonların mekanik ve geçirimlilik özelliklerini iyileştirir. Leung, Kim, Nadeem, Jaganathan ve Anwar (2016), UK'nın çimento ile yer değiştirilmesi ile beton içindeki mikro boşlukların dolduğunu ve dolayısı ile basınç dayanımının arttığını ve kılcal çatlak oranının azaldığını belirtilmişlerdir.

2.4. Durabilite Özelliklerinin Değerlendirildiği Çalışmalar

Beton, uzun yıllar kullanılan geleneksel bir yapı malzemesidir. Günümüzde ihtiyaca yönelik yeni nesil beton üretimi devam etmektedir. Beton, temel görevi olan basınç yüklerinin taşınmasında yeterliliğini korurken, ilave olarak servis ömrü boyunca kalıcılığını da korumalıdır. Betonun hem dayanım hem de dayanıklılık özelliklerini

iyileştirebilmek için birçok araştırma ve uygulama yapılmaktadır. Asit ve sülfat iyonları barındıran ortamlarda beton yapıların uzun süre hizmet vermesi istenmektedir. Son derece etkili olan ve hasar verme potansiyeli yüksek olan bu etkiyi doğuran yeraltı suları, deniz suları yayılma yoluyla betonun içyapısını bozmaktadır (Marchand, Samson, Maltais ve Beaudoin, 2002; Mohammedameen, Gülşan, Alzeebaree, Çevik ve Niş, 2019). Bu tür çevresel etkileri ağır olan ortamlarda kullanılması planlanan betonların dayanıklı olması istenmektedir. Puzolanik malzemeler, dayanıklı agregalar ve lifler kullanılarak bu soruna farklı çözümler üretilebilir (Şahmaran, Yurtseven ve Yaman, 2005; Dhaher, Daoud ve Al-Attar, 2018). Literatürde betonların asit ve sülfat atağına karşı performansını araştırmak için birçok çalışma bulunmaktadır. Betonda kullanılan bağlayıcı türünün zararlı ortamlara karşı etkisini inceleyen çalışmalar vardır. Bingöl ve Balaneji (2019), UK ve silis dumanı (SD) katkısıyla üretilen betonların sülfat direncini tespit etmişlerdir. Sülfat atağına karşı en iyi performansın %10 UK ve %5 SD katkısıyla elde edildiğini belirtilmişlerdir. UK'nın ağırlıkça %10 çimento ile ikame edilmesi ile sülfat direncinin arttığını belirtmişlerdir.

Nie, Zhou, Shu, He ve Huang (2014), UK ve GYFC'nin çimento ile ikame edilmesi ile zararlı ortamlardaki betonların sülfat direncinin arttığını belirtmişlerdir.

Asit ve sülfat içeren zararlı ortamlarda bulunan betonların bağlayıcı etkisini inceleyen çalışmalar vardır. Bhatty ve Taylor (2006), çimento bazlı harçların bağlayıcı içeriğinin sülfat saldırısına karşı etkisini araştırmışlardır. SD ve UK ağırlıkça %7 ve %20 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek üretilen harç numuneler fiziksel bozulmayı gözlemlemek için iki yıl boyunca Na_2SO_4 çözeltilerinde bekletilmiştir. Ağırlıkça %20 UK içeren numunelerin sülfat saldırısına karşı en iyi performansı gösterdiği ifade edilmiştir.

Dinakar, Babu ve Santhanam (2008), %0, %10, %30, %50, %70 ve %85 oranlarında UK ikamesi ile farklı beton sınıflarında üretilen kendiliğinden yerleşen betonların geçirimlilik, su emme kapasitesi, asit direnci ve klorür geçirgenliği bakımından dayanıklılık özelliklerini incelemişlerdir. Asit saldırısında $Ca(OH)_2$ gibi reaksiyon bileşenlerinin çözünmesi neticesinde numunelerin ağırlık kaybettiğini belirtmişlerdir. Ancak, yüksek oranda UK içeren numunelerin klorür iyonu difüzyonunun önemli ölçüde düşük olduğunu da ifade etmişlerdir.

Kurtoğlu ve diğerleri (2018), sülfürik asit ve magnezyum sülfat çözeltilerinde UK ve GYFC esaslı geopolimer betonların mekanik özellikleri ile birlikte kısa vadede dayanıklılık özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan test sonuçlarına göre, GYFC esaslı betonların asit ve sülfat atağına karşı dayanıklılığının en yüksek olduğunu ve UK esaslı betonların geleneksel betona göre daha güçlü çapraz bağlı alümina silikat yapılarının oluşmasının sonucu olarak daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

Bağlayıcı hamurun kalitesi dışında betonun diğer temel bileşenlerinden olan agreganın dayanıklılığı da betonun dayanıklılığını doğrudan etkilemektedir. Doğal kaynak tüketimini azaltmak, betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerini geliştirmek için yapay agregalar kullanılmaktadır (Arribas, Vegas, San-Jose, ve Manso, 2014; Bravo, De Brito, Pontes ve Evangelista, 2015; Faleschini ve diğerleri, 2015; De Brito, Ferreira, Pacheco, Soares ve Guerreiro, 2016). Örneğin; Tamayo, Pacheco, Thomas, Brito ve Rico (2020), geri dönüştürülmüş EAFC agregasını kullanarak beton üretmişlerdir. Betonların mekanik ve kalıcılık özellikleri karşılaştırıldığında mekanik özelliklerin doğal taş agregası ile üretilen betonlarınkine benzer olduğu fakat fonksiyonel olarak daha iyi dayanıklılık özellikleri gösterdiği belirtilmiştir.

Palankar, Shankar ve Mithun (2016), alkalilerle aktive edilmiş UK ve GYFC esaslı betonlarda çelik cüruf agregası kullanarak asit ve sülfat saldırılarına karşı dirençlerini ölçmüşlerdir. Deney sonuçlarına göre çelik cüruf agregası kullanımı ile betonların dayanıklılık performansının nispeten düştüğünü ancak enerjiye gereksinim duymadan çevre dostu bir malzeme olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Zararlı ortamlarda hizmet veren beton elemanların performansını arttırmak için başvurulan diğer bir yöntem lif katkısıdır. Ayrıca, liflerin betonda kullanılmasının korozyon ve asit saldırısına karşı beton direncini arttırmak için yaygın bir yöntem olduğu ifade edilmiştir (Miao, Mu, Tian ve Sun, 2002; Nematzadeh ve Fallah-Valukolaee, 2017). Lifli beton üretilerek yapı elemanlarının kalıcılık özelliklerinin geliştirilmesi istenmektedir. Bu fikri destekleyen çalışmalar literatürde mevcuttur. Aarthi ve Arunachalam (2018), beton karışımında polipropilen lif (PL) kullanarak UK katkılı betonlar üretmişlerdir. Beton numunelerin asit ve sülfat direnci ile klorür iyon geçirimliliğini ölçerek kalıcılık özelliklerini belirlemişlerdir. Liflerin köprüleme etkisi ile beton parçacıkları bir arada tutma etkisini fark etmişlerdir. PL miktarı arttıkça beton numunelerin asit ve sülfat atağı

karşısında ağırlık kaybının azaldığını ifade etmişlerdir. Niu ve Wang (2013), çelik lif katkılı betonların asit atağı karşısında performansını test etmişlerdir. Deney sonuçlarına göre çelik lif katkısı ile betonun asit atağı karşısında aşınmasının sınırlandırıldığı belirlenmiştir (Marcos-Meson, Fischer, Edvardsen, Skovhus ve Michel, 2019).

İki veya daha fazla türde lifin hibridizasyonu ile her bir lif türünün etkisi maksimum seviyeye çıkarılarak kalıcılık anlamında daha iyi verim alınabileceğini ifade eden çalışmalarda mevcuttur (Pacheco, Christ, Quinino ve Tutikian, 2018). Badagha ve Modhera (2015), karbon, cam, polyester ve çelik lifli harçların asidik ortamdaki davranışını incelemişlerdir. Çelik ve polyester lif katkılı harç numunelerin asit atağından sonraki basınç dayanımlarının lif içermeyen kontrol harçlarına göre sırası ile % 18 ve % 19 daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Ranjith, Venkatasubramani ve Sreevidya (2017), polipropilen ve cam elyaf liflerin farklı oranlarda kullanılması ile üretilen çimentolu kompozitlerin asit ve sülfat saldırısına karşı performansını araştırmışlardır. Lif içeriğinin %1,5'e kadar yükselmesi durumunda çimentolu kompozitlerin dayanıklılık özelliklerinin iyileştiğini ve cam elyaf lif katkılı kompozitlerin polipropilen lif katkılı olanlardan daha iyi dayanıklılık özelliklerine sahip olduklarını belirtmişlerdir.

Lifleri betonda ayrı ayrı kullanmanın yanı sıra, kombinasyonları ile farklı avantajlar sağlanabileceğini ifade eden çalışmalar da mevcuttur. Chen ve Liu (2005), beton karışımında tek tip lif kullanmak yerine, hibrit liflerin betonların mekanik özelliklerini ve kalıcılığını önemli ölçüde artırdığını belirtmiştir. Chasioti ve Vecchio (2017), liflerin hibridizasyon yoluyla farklı fonksiyonlarla kullanılabileceğini ve betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin geliştirilebildiğini belirtmişlerdir.

Pratikte sıklıkla karşılaşılan sorunlardan bir tanesi de ağır trafik yüklerine maruz kalan yapılar için, betonun çatlak direncinin zayıf olmasından dolayı betonun dezavantajlı bir kaplama olarak görülmesidir. Silindirle sıkıştırılabilen betonların kullanıldığı kaldırım, havaalanı, yol, benzin istasyonu betonlarında çelik liflerinin kullanılması, geleneksel beton kaplamalara kıyasla üstün çatlama direnci gösterdiği belirtilmiştir (Hejazi, Abtahi ve Safaie, 2016; Jafarifar, Pilakoutas ve Bennett, 2016; Madhkhan, Azizkhani ve Harchegani, 2016). Bu yapıların bazılarında, soğuk bölgelerde karayollarına uygulanan buz çözücü

tuzlar beton kaplamalarda zamanla dökülme, çatlama ve yüzey bozulmasına neden olmaktadır (Portland Cement Association, 2004). Özellikle soğuk bölgelerde çelik lifli betonların kullanıldığı beton kaplamalarda tuz teması ile çelik liflerinin uzun süreli dayanıklılığı ile ilgili ciddi bir endişe vardır (Frazão, Camões, Barros ve Gonçalves, 2015). Mekanik olarak oldukça iyi performans gösteren bu kaplamaların durabilite davranışının da ciddi anlamda incelenmesi gerekmektedir. Literatür çalışmaları incelendiğinde lifli betonların üretimden sonraki uzun vadeli davranışının incelendiği yeterli sayıda çalışmanın olmadığı görülmüştür.

Literatürle hemfikir olunarak, asit, sülfat ve klorür iyon saldırısına maruz kalan hibrit fiber betonlarının mekanik performansı ve kalıcılığı hakkında bilgi veren sınırlı sayıda çalışma vardır. Lif takviyeli beton tasarımı için uluslararası bir standardın olmadığı bilinmektedir (Spanish Development Ministry, 2009; Swedish Standards Institute, 2014; Marcos-Meson, Fischer, Edvardsen, Skovhus ve Michel, 2019). Bu nedenle asit ve sülfat saldırısına maruz kalan betonlar için tasarım esaslarına ihtiyaç vardır. Literatür çalışmaları incelenip yaygın olarak kullanılan lif türleri ve karışım oranları belirlenmiştir. Bu bilgiler ışığında üç fazlı hibrit sistem tasarlanarak optimum bir beton tasarımına ihtiyaç olduğu kanısına varılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Giriş

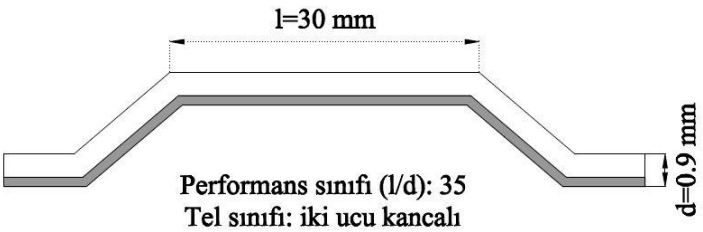
Tez çalışması kapsamında Hibrit Lifli Beton (HLB) üretimi için seçilen bağımsız değişkenlerin türü, miktarları ve çalışma aralığı literatür çalışmaları ışığında ve işlenebilirlik açısından en uygun oranların tespit edilmesi için yapılan ön çalışmalar yardımı ile belirlenmiştir.

3.2. Malzemeler

HLB'lerin donatı yapısını oluşturan ve her biri ayrı amaca hizmet eden, performansları faklı dört tür lif seçilmiştir. Çelik, cam elyaf, sentetik ve polipropilen yapıdaki lif grupları kullanılmıştır. Bağlayıcı sistemin kendi içinde hibritlenmesi için F sınıfı Uçucu Kül (UK) çimento (Cem I 42,5 R) ile yer değiştirilerek ve agrega sisteminin hibritlenmesi için Elektrik Ark Fırın Cürufu (EAFC) dolomitik kireçtaşı orijinli doğal kırmataş agrega ile yer değiştirilerek kullanılmıştır.

3.2.1. Çelik lifler

Kemerix firmasından temin edilen Çelik Lif (ÇL) betonun hem yüzeyinde hem de kenarlarında ve her doğrultuda kontrollü bir dağılma özelliği gösterebilmektedir. Betonun performansının yanı sıra kullanım yerine ve amacına bağlı olarak maliyet ve zaman tasarrufu açısından etkin çözümler sunabilen bir donatı türüdür. Genellikle 20 kg'lık paketler halinde piyasaya sunulmaktadır. Tez çalışması kapsamında KMX 35/30 BL kodlu ÇL kullanılmıştır (Resim 3.1a). ÇL'nin şematik gösterimi Şekil 3.1'de, teknik özellikleri ise Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.



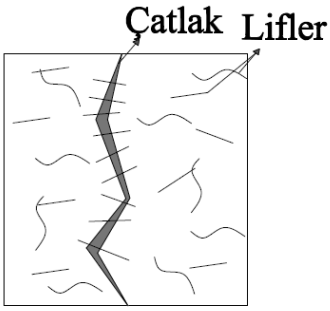
Şekil 3.1. Çelik liflerin şematik gösterimi

3.2.2. Cam elyaf lifler

Beton ve harçlarda çatlak kontrolünde etkili olan ve ikincil donatı görevi üstlenen şeffaf beyaz lif malzemesidir. 6mm, 12 mm, 19 mm ve üzeri ölçülerde üretilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında Fiber Elyaf Kompozit firmasından temin edilen 12 mm kırpılmış Cam Elyaf Lif (CEL) kullanılmıştır (Resim 3.1b). CEL'e ait teknik özellikler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

3.2.3. Sentetik lifler (Strux)

Sentetik lif olarak Strux 90/40 kodlu lif kullanılmıştır (Resim 3.1c). Karıştırma aşamasında hazır beton ve prekast betona eklenen, yüksek mukavemetli ve sentetik makro elyaf grubundadır. Strux 90/40, kuruma-büzülme çatlağını kontrol edebilme kabiliyetine sahip olduğundan çelik hasır ve çelik elyaf takviye uygulamalarına alternatif olarak kullanılabilen bir lif türüdür. Liflerin beton içindeki etki mekanizması Şekil 3.2'de şematik olarak gösterilmiştir. Kullanım miktarları Strux firmasının önerisi doğrultusunda 2,3-7 kg/m^3 arasında değişmektedir. Strux sentetik life ait özellikler Çizelge 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Liflerin çalışma mekanizması

3.2.4. Polipropilen lifler

BASF firması tarafından üretilen Masterfiber 240 Propilen Lif (PL) kullanılmıştır (Resim 3.1d). Propilen makro fiberlerin betona katılma oranı, hedeflenen mühendislik özelliklerine göre 1,5-9 kg/m^3 arasında önerilmektedir. Masterfiber 240 propilen liflere ait özellikler Çizelge 3.1.'de verilmiştir.



Resim 3.1. HLB üretiminde kullanılan lifler a)çelik lif b)cam elyaf lif c)sentetik lif d)polipropilen lif

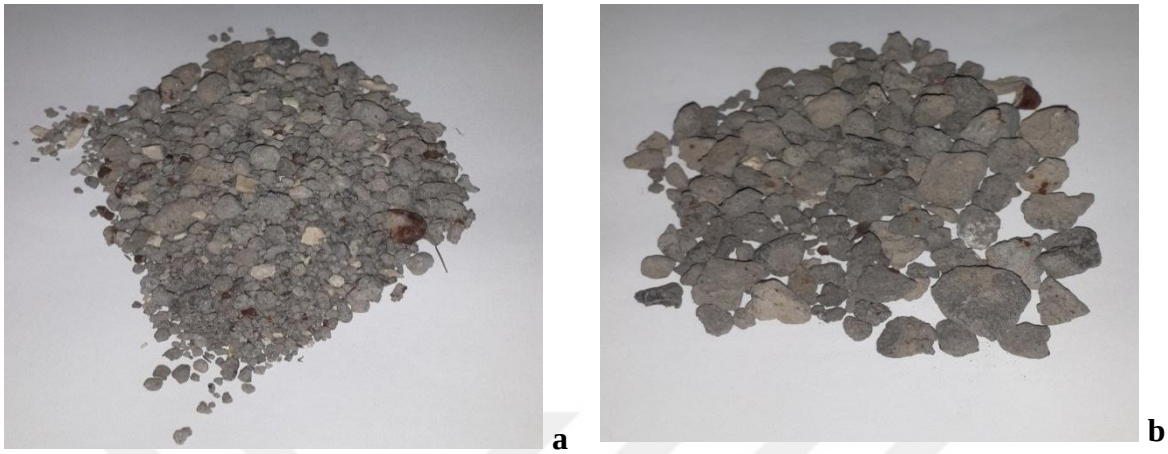
Çizelge 3.1. HLB üretiminde kullanılan liflere ait özellikler

Özellikler	**ÇL**	**CEL**	**SL**	**PL**
Lif uzunluğu, l (mm)	30	10	40	40
Lif çapı, d (mm)	0,9	$13*10^{-3}$	0,75	0,75
Çekme dayanımı (N/mm^2)	1150	3400	620	338
Elastisite modülü (N/mm^2)	200000	77000	9500	4800
Yoğunluk (g/cm^3)	7,85	2,6	0,92	0,91
Erime noktası (°C)	1535	1200	160	160
Narinlik (l/d)	33,33	769	53,33	53,33

3.2.5. Elektrik ark fırın cürufu (EAFC)

İskenderun Kılıçlar A.Ş' de üretilen Elektrik Ark Fırın Cürufu (EAFC) kırma tesislerinde kırılıp elenerek 0-4 mm (Resim 3.2), 4-11 mm (Resim 3.2) boyutlarında iki grup olarak

temin edilmiştir. EAFC'ye ait teknik özellikler Çizelge 3.2' de verilmiştir. Agregaların tane dağılımları Şekil 3.3'de gösterilmiştir.

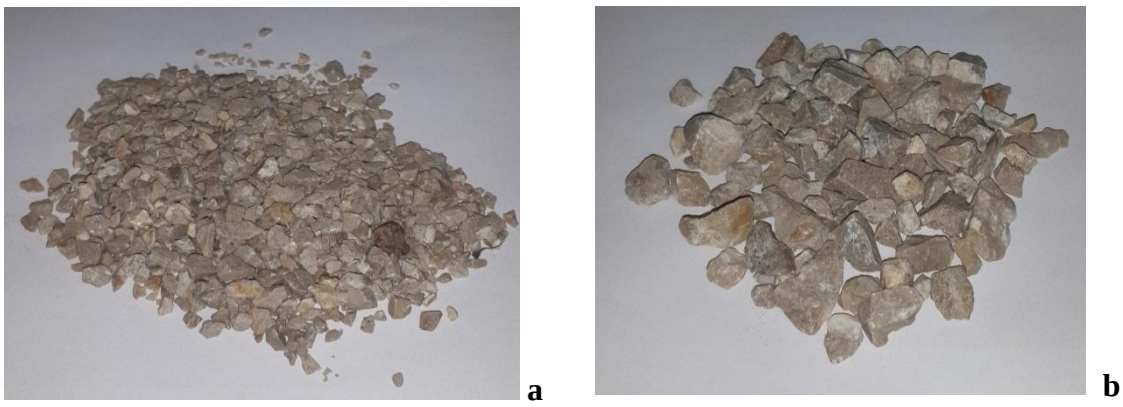


a **b**

Resim 3.2. HLB üretiminde kullanılan EAFC agregası a) 0-4 mm b) 4-11 mm

3.2.6. Doğal kırmataş agrega (DKA)

İskenderun bölgesinden elde edilen dolomitik kireçtaşı orijinli doğal kırma taş agrega (DKA) kullanılmıştır. Kırma eleme tesislerinde ayrıştırılmış 0-4 mm (Resim 3.3) ve 4-11 mm (Resim 3.3) agrega kum ve çakıl olarak kullanılmıştır. DKA'ya ait teknik özellikler Çizelge 3.2'de verilmiştir. Doğal kırmataş agregaların tane dağılımları göz önüne alınarak tane büyüklüğü 4-12 mm olandan %35, 0-4 mm olandan %65 oranlarında alınarak uygun gradasyonda karışım agregası hazırlanmıştır. Agregaların tane dağılımları Şekil 3.3'de gösterilmiştir. EAFC'de deney tasarımında belirlenen oranlarda DKA ile ağırlıkça yer değiştirilerek kullanılmıştır.

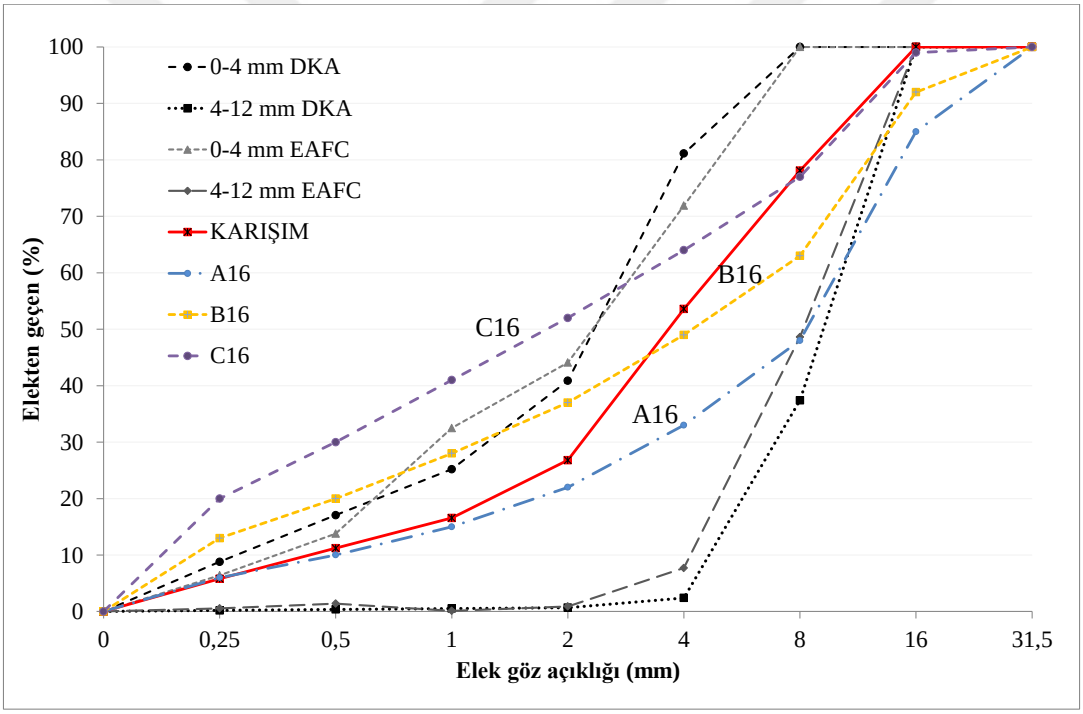


a **b**

Resim 3.3. HLB üretiminde kullanılan doğal kırmataş agrega a) 0-4 mm b) 4-11 mm

Çizelge 3.2. EAFC ve DKA'ya ait özellikler

Özellikler	EAFC		DKA	
Tane büyüklüğü (mm)	0-4	4-11	0-4	4-11
Yoğunluk (g/cm^3)	3,64	3,46	2,74	2,71
Su emme oranı (%)	2,9	2,5	3,1	2,8
Yassılık indeksi	-	FI_{20}	-	FI_{20}
Gevşek yığın yoğunluğu (g/cm^3)	1,78	1,46	1,38	1,31
Asitte çözülebilen sülfat	$AS_{0,2}$	$AS_{0,2}$	-	-
Klorür muhtevası (%)	0,0039	0,0025	0,0043	0,0043
Donma çözülme dayanımı	-	MS_{18}	-	-
Hacim kararlılığı	0,032	0,032	-	-
Alkali silika reaktifliği (%)	0,022	-	-	-
Petrografik tanımlama	Çelik cürufu agregası		Dolomitik kireçtaşı orijinli agrega	



Şekil 3.3. Agrega tane dağılımları

3.2.7. Uçucu kül (UK)

Atlas Enerji A.Ş.'den temin edilen ASTM C 618'deki sınıflandırmaya göre F sınıfı Uçucu Kül (UK) kullanılmıştır. UK'nın yoğunluğu 2,25 g/cm^3 ve Blaine inceliği 2870 cm^2/g'dır. UK'nın kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'te gösterilmiştir. UK'nın SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 miktarı %83,06 ve CaO miktarı %4,24'tür.

Çizelge 3.3. UK'nın kimyasal özellikleri

Kimyasal İçerik	**(%)**
SiO_2	56,2
Al_2O_3	20,17
Fe_2O_3	6,69
CaO	4,24
MgO	1,92
SO_3	1,81
Kızdırma kaybı	1,78
Na_2O	0,58
K_2O	1,89

3.2.8. Çimento

Kahramanmaraş Çimento'ya ait CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 3.4.'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Çimento'ya ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Fiziksel Özellikler	**Sonuç**	**Kimyasal Özellikler**	**Sonuç**
Priz Başlangıcı (dakika)	200	SO_3 (%)	2,48
Priz Sonu (dakika)	240	MgO (%)	0,85
Özgül Ağırlık (g/cm³)	3,15	CaO	60,38
Özgül Yüzey – Blaine (cm²/g)	3880	Al_2O_3	6,12
2 Günlük Dayanım (MPa)	28,1	Kızdırma Kaybı (%)	2,0
		Çözünmeyen Kalıntı (%)	0,40
		C1- (%)	0,0092

3.2.9. Süper akışkanlaştırıcı

Master Glenium SKY 608 yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Satıcı firma tarafından her 100 kg bağlayıcı için 0,8 kg ile 1,5 kg arasında kullanımı önerilmektedir. Özgül ağırlığı 1,1 kg/lt'dir.

3.2.10. Su

HLB üretiminde karışım suyu ve kür suyu olarak İskenderun şebeke suyu kullanılmıştır.

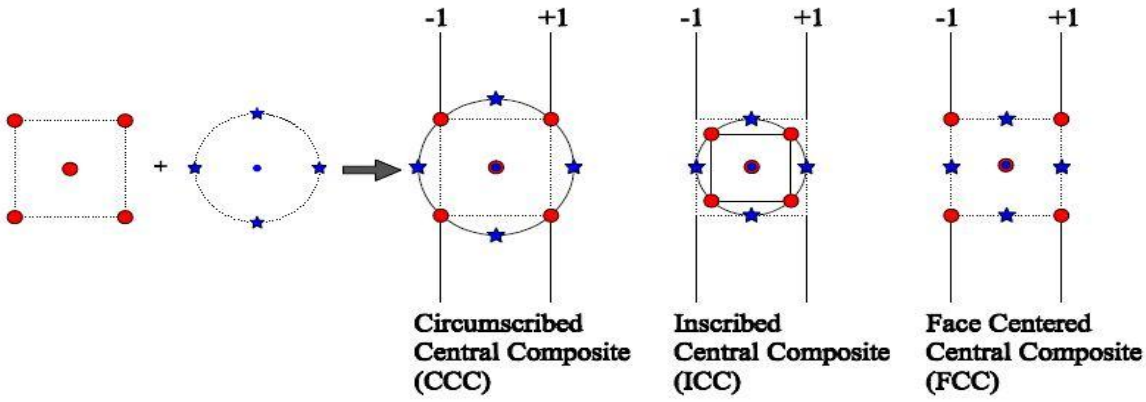
3.3. Deney Tasarımı

HLB'lerin tasarımı geleneksel tasarım yöntemlerinin dışında Merkezi Kompozit Tasarım (MKT) yöntemi yardımıyla yapılmış ve sonuç analizlerinde Tepki Yüzeyi Yöntemi (TYY) kullanılmıştır. Deney tasarımı uygulanırken Design Expert 7.0.3 ticari program kullanılmıştır.

3.3.1. Merkezi kompozit tasarım (MKT) ve uygulama amacı

Genellikle MKT olarak adlandırılan yöntemin özel adı Box-Wilson Merkezi Kompozit Tasarımıdır. Eğrilik tahmini ilkesine dayanan ve yıldızlar noktası ile zenginleştirilmiş merkez noktaları olan faktöriyel bir tasarım yöntemidir. Bir dizi merkezi nokta ve merkez noktaya eşit eksenel uzaklıktaki noktalardan oluşur. Tasarım alanının merkezinden faktöriyel bir noktaya olan mesafe her bir faktör için ± 1 birim kadar iken yıldız noktaların uzaklığı "α" mesafesi kadardır ve α>1'dir. α'nın kesin değeri, tasarım için istenen özelliklere ve ilgili faktör sayısına bağlıdır. MKT'de "α" Eş. (3.1) kullanılarak hesaplanmaktadır. Tasarımın içereceği merkez noktalarının sayısı da tasarım için gereken bazı özelliklere bağlıdır. İki faktörlü bir MKT oluşum örneği Şekil 3.4'te şematik olarak gösterilmiştir.

$$\alpha = (\text{faktör sayısı})^{1/4} \qquad (3.1)$$



Şekil 3.4. İki faktörlü tasarım için MKT oluşum örneği (Heckert ve diğerleri, 2002).

MKT'de her zaman iki kat daha fazla yıldız noktası bulunur. Yıldız noktaları, tasarımdaki her bir faktör için yeni uç değerleri (minimum ve maksimum) temsil eder. MKT'de üç farklı tasarım ilkesi vardır ve Şekiş 3.4'de gösterilmiştir. Bunlar; Dıştan Teğet Merkezi Kompozit (CCC), İçten Teğet Merkezi Kompozit Tasarım (ICC) ve Eş Yüzeyli Kompozit Tasarım'dır (FCC). CCC tasarımları, MKT'nin orijinal biçimidir. Yıldız noktaları, tasarım için istenen özelliklere ve tasarımdaki faktör sayısına bağlı olarak merkezden uzaktadır. Yıldız noktaları, tüm faktörler için minimum ve maksimum uçlar oluşturur. CCI tasarımı faktör ayarlarını yıldız noktaları olarak kabul eder ve bu limitler dâhilinde faktöriyel veya kesirli bir faktöriyel tasarım oluşturur. FCC tasarımında ise yıldız noktaları faktöriyel alanın her bir yüzünün merkezindedir, yani $\alpha = \pm 1$'dir. (Heckert ve diğerleri, 2002). Bu tez çalışması kapsamında CCC esaslı MKT kullanılmıştır.

MKT, sıralı deneyler için kullanılan bir tasarım tekniğidir ve tasarım için çok sayıda noktaya ihtiyaç duymadan tasarım yapar. Sonucu etkileyen parametreler bağımsız değişkenler, araştırılan özellikler ise bağımlı değişkenler olarak adlandırılır.

3.3.2. Tepki yüzeyi yöntemi (TYY)

TYY, bağımlı parametreleri (yanıtları) etkileyen birden fazla bağımsız parametrenin etkisini aynı anda değiştirerek ve sınırlı sayıda deney gerçekleştirerek inceleyen bir tekniktir. Yani TYY, bağımsız değişken ile bir veya daha fazla bağımlı değişken arasındaki ilişkiyi değerlendirmek için matematiksel ve istatistiksel yöntemlerin bir koleksiyonudur. Matematiksel modelin grafiksel gösterimi, TYY'ni ortaya çıkarmaktadır. TYY, temel bağımlı değişken üzerinde önemli etkisi olabilen veya olmayan parametreleri değerlendirmeyi sağlar (Parampalli ve diğerleri, 2007).

Yeni bir ürün yapılacaksa TYY onu formülleştirmede, süreç optimizasyonunda yaygın olarak kullanılır (Yalçın, 2009). Genellikle mühendislik alanlarında deney sayısını azaltması nedeniyle hem malzeme hem işçilik tasarrufu sağladığından tercih edilen TYY, bağımsız değişkenlere bağlı tahmini modeller kurarak tepki yüzeyi eğrilerinin izdüşümlerinden optimum (ideal) noktaları belirleyebilmektedir (Balçıkanlı, 2016).

Beton kompozit bir malzeme olduğundan ve içeriğinde birden fazla bağımsız değişken barındırdığından TYY rahatlıkla kullanılabilmektedir. TYY'de istatistiksel deney tasarımı,

regresyon modeli oluşturma ve optimizasyon teknikleri kullanılmaktadır. TYY'ni diğer deney ve optimizasyon yöntemlerinden ayıran en temel özelliği, deney sayısını sınırlandırarak az zamanda önemli ölçüde bilgi verebilmesi ve aynı zamanda bağımsız parametrelerin ikili etkileşimlerini değerlendirebilme imkanı sunmasıdır. TYY'de bağımsız ve bağımlı parametreler tanımlanmakta ve aralarındaki bağıntı Eş. (3.2) ile ifade edilmektedir (Yalçın, 2009).

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + a \tag{3.2}$$

Burada f: tepkinin fonksiyonu olmak üzere y: bağımlı parametreyi (tepki), x_n: bağımsız parametreleri, n: bağımsız parametre sayısını, a: istatistiksel olarak hata miktarını ifade etmektedir.

Oluşturulan regresyon modellerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı "F testi" (Fisher analizi) ile değerlendirilir. Kurulan bir modeldeki bağımsız değişken sayısı m'den daha az olan "n" sayıda değişkenli daha basit bir modele göre y'nin değişimini kontrol etmek için Eş. (3.3)'de ifade edilen hipotez, en az bir β_{n+i} katsayının sıfıra eşit olmadığı bir "H_0" karşıt hipotezine göre test edilir. Daha basit olan modelin hata karelerinin toplamı ile karmaşık modelin hata karelerinin toplamı arasında tanımlanabilecek parametrenin dağılımı F istatistiğini verir. Hesaplanan değerin F istatistiğinin tablosundan okunan kritik değerden büyük olması ile daha karmaşık olan modelin daha iyi olduğu anlaşılır. (Myers, Montgomery ve Anderson-Cook, 2016).

$$H_0: \beta_{n+1} = \beta_{n+2} = \dots = \beta_m = 0 \tag{3.3}$$

3.3.3. Çoklu objektifli optimizasyon

Bir problemin çözümünde optimum değer veya en iyi çözüm, optimizasyon yöntemi kullanılarak bulunabilir. Optimizasyon problemleri temelinde maksimum veya minimum değer aranması ya da birden fazla objektif kullanılması yer alır. Objektif (amaç) sayısı birden fazla olan problemlere Çoklu Objektifli Optimizasyon (ÇOO) denir. Doğrusal veya doğrusal olmayan modeller oluşturularak sorunlara optimum çözümler üretilebilmektedir (Gunantara, 2018).

Design Expert 7.0.3 programında optimizasyon yapılırken bağımsız ve bağımlı değişkenlerin minimize, maksimize veya çalışma aralığı içinde olması gibi şartlar belirlenir. Her bir amaca özel erişilebilirlik fonksiyonunu belirlemek için bir önem ağırlığı atanabilir. Her hedefin önem derecesi diğer hedeflerle bağlantılı olarak değiştirilebilir.

3.3.4. Erişilebilme ihtimali

Erişilebilirlik, verilen sınır değerlerin dışında, sıfırdan hedefe kadar değişen objektif bir fonksiyondur. Sayısal optimizasyon, erişilebilme ihtimalini en üst düzeye çıkaran bir nokta bulur. Farklı tepkiler ve parametreler için, tüm hedefler tek bir erişilebilirlik fonksiyonunda birleştirilir. ÇOO'nun amacı, istenen bir erişilebilme değerine ulaşmak değil, tüm hedefleri karşılayacak iyi bir koşul kümesi bulmaktır (Design Expert 7.0.3).

Myers ve Montgomery (2016)'ye göre erişilebilirlik fonksiyonunu D(x) olarak tanımlanmaktadır. Erişilebilme ihtimali D(x) 0 ile 1 arasında değer alan, D=1 iken hedefin kesin olarak karşılandığı, D=0 iken ise hedefin asla karşılanmadığı ifade edilmektedir. D(x) tüm yanıtların geometrik bir ortalamasıdır ve Eş. (3.4) ile temsil edilmektedir.

$$D(x) = (d1 \text{ x } d2 \text{ x } \dots \text{ x } dn)^{1/n} = (\prod_{i=1}^{n} di)^{1/n} \quad (3.4)$$

Burada n: tepki sayısını ifade etmektedir. Tepkilerden veya bağımsız değişkenlerden herhangi biri arzu edilen aralığının dışında kalırsa, fonksiyon sıfır olur.

3.3.5. Deney tasarımında kullanılan parametreler

Deneysel çalışma için tasarımda tek bloklu, küçük faktör kategorisi tercih edilerek merkez noktası 1 ve dağılan 29 nokta olmak suretiyle 30 deney grubu içeren deney tasarımı seçilmiş ve uygulanmıştır. HLB performansını etkileyecek ve özelliklerini iyileştirecek olan hibrit lif sistemini oluşturmak amacıyla ÇL, CEL, SL ve PL olmak üzere dört farklı türde lif (fiber) kullanılmıştır. Bağlayıcı sistemi kendi içinde hibritleyebilmek ve lif katkısından dolayı artan maliyeti azaltabilmek için hem daha ucuz hem de çevreci olan UK, çimento ile yer değiştirme tekniği ile sisteme dâhil edilmiştir. Betonu oluşturan diğer temel faz ise agrega sistemidir. Bölgede çokça bulunması, stok probleminin var olması, geri dönüştürülmeye ihtiyaç duyması sebebi ile EAFC, DKA ile yer değiştirilerek

kullanılmıştır. Betonun temel özelliği olan dayanım özelliği üzerinde etkisi oldukça fazla olan ve bir metreküpteki miktarını ifade eden bağlayıcı dozajı (D) da betonun maliyeti ve performansı açısından önemli bir faktördür. Bu nedenle bağlayıcı dozajı da bağımsız değişken olarak tez çalışması kapsamına alınmıştır. Böylece yedi faktörlü bir deney programı oluşturulmuş ve hesaplaması yukarıda açıklanan α katsayısı 1,62658 olarak belirlenmiştir.

MKT'de her sayısal faktör beş farklı değerde ($+\alpha$, $-\alpha$, +1, -1 ve merkez nokta) olacak şekilde ve %95 güvenlik seviyesi sağlanacak şekilde belirlenmiştir. Deney tasarımına göre yedi numerik ve sıfır kategorik faktör tanımlanmıştır. Bu faktörlerden HLB'de kullanılan toplam lif hacmi, tüm beton hacminin %0 ile %2'si arasında değişecek şekilde dört grup lif kombinasyonuna göre belirlenmiştir. Her lif türü için sınır değerler toplam beton hacmine göre %0 ile %0,25 olacak şekilde belirlenmiş ancak α kadar uzaklıktaki noktaları temsil etmesi için her bir lif türü için bağımsız değişkenin girdileri en az ve en çok %0 ile %0,5 olarak seçilmiştir. Bu durumda toplam lif hacmi dört tür lifin hibritlenmesi ile %2 seviyesine kadar çıkabilmiştir. UK'nın çimento ile ağırlıkça yer değiştirme oranı için sınır değerler, %10 ile %40 arasında belirlenmiş ve MKT'de girdileri en az ve en çok %0 ile %40 olarak seçilmiştir. EAFC'nin DKA ile ağırlıkça yer değiştirme oranının girdileri en az ve en çok %15 ile %85 olarak seçilmiş ve deney çalışma verileri %0 ile %100 arasında değişen değerlerde önerilmiştir. 1 m^3 içinde bulunacak olan bağlayıcı dozajının girdileri en az ve en çok 300 ile 400 kg/m^3 olarak seçilmiş ve deneme aralığı 260-500 kg/m^3 olarak önerilmiş ve uygulanmıştır. Tüm HLB üretiminlerinde su/bağlayıcı oranı 0,5 olarak seçilmiştir.

3.4. HLB Tasarımı ve Üretimi

Tez çalışmasında oluşturulan HLB tasarımı Çizelge 3.5'de verilmiştir. ÇL, CEL, SL, PL UK, EAFC ve D çalışmada ifade edilen bağımsız değişkenleri temsil etmektedir. ÇL, CEL, SL ve PL, lif türlerinin toplam beton hacmine göre katılım oranlarını; UK, çimento ile ağırlıkça yer değiştirme oranını; EAFC, DKA ile ağırlıkça yer değiştirme oranını temsil etmektedir. 0-4 mm ve 4-11 mm boyutlarındaki EAFC aynı boyutlardaki DKA ile ayrı ayrı yer değiştirilmiştir.

Çizelge 3.5'de verilen tasarıma göre Çizelge 3.6'daki karışım hesabı yapılarak laboratuvarda malzemeler hazırlanmış ve HLB üretimi yapılmıştır (Resim 3.4).



Resim 3.4. HLB numunelerin üretim aşamaları

Üretilen HLB'lerin performansı taze beton özellikleri, mekanik, fiziksel, geçirimlilik ve durabilite (kalıcılık) özellikleri bakımından değerlendirilmiştir. Tekniğine uygun olarak üretilen HLB numuneler 24 saat kalıpta bekletilmiş, kalıptan çıkarıldıktan sonra 28 gün su kürüne tabi tutulmuş ve ilgili test gününe kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir.

Çizelge 3.5. Uygulanan HLB deney tasarımı

Karışım No	ÇL (%)	CEL (%)	SL (%)	PL (%)	UK (%)	EAFC (%)	Dozaj (kg/m^3)	Toplam lif (%)
M1	0,25	0,25	0,25	0,25	25,0	0,0	350,0	1,00
M2	0,00	0,15	0,15	0,15	25,0	50,0	350,0	0,45
M3	0,00	0,50	0,50	0,00	10,0	85,0	400,0	1,00
M4	0,00	0,25	0,25	0,25	10,0	15,0	400,0	0,75
M5	0,25	0,00	0,00	0,75	30,0	85,0	400,0	1,00
M6	0,15	0,15	0,15	0,15	25,0	100,0	350,0	0,60
M7	0,75	0,00	0,25	0,00	10,0	15,0	400,0	1,00
M8	0,15	0,15	0,15	0,15	25,0	50,0	450,0	0,60
M9	0,15	0,55	0,15	0,15	25,0	50,0	350,0	1,00
M10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	300,0	0,00
M11	0,75	0,00	0,00	0,00	10,0	85,0	400,0	0,75
M12	0,00	0,00	0,25	0,25	40,0	15,0	500,0	0,50
M13	0,40	0,40	0,40	0,40	25,0	50,0	350,0	1,60
M14	0,15	0,15	0,15	0,00	25,0	50,0	350,0	0,45
M15	0,25	0,25	0,25	0,00	30,0	15,0	300,0	0,75
M16	0,25	0,25	0,25	0,25	25,0	50,0	260,0	1,00
M17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	400,0	0,00
M18	0,25	0,00	0,25	0,25	10,0	85,0	400,0	0,75
M19	0,00	0,75	0,00	0,00	10,0	15,0	300,0	0,75
M20	0,00	0,00	0,00	0,00	30,0	85,0	300,0	0,00
M21	0,25	0,25	0,00	0,25	10,0	85,0	300,0	0,75
M22	0,15	0,15	0,15	0,55	25,0	50,0	350,0	1,00
M23	0,15	0,15	0,55	0,15	30,0	50,0	350,0	1,00
M24	0,25	0,00	0,00	0,25	10,0	85,0	300,0	0,50
M25	0,15	0,15	0,15	0,15	0,0	50,0	350,0	0,60
M26	0,00	0,00	0,75	0,25	40,0	85,0	300,0	1,00
M27	0,55	0,15	0,15	0,15	25,0	50,0	350,0	1,00
M28	0,50	0,50	0,50	0,50	25,0	50,0	350,0	2,00
M29	0,25	0,25	0,25	0,00	40,0	85,0	400,0	0,75
M30	0,15	0,35	0,15	0,15	25,0	50,0	350,0	0,80

Tüm HLB üretimlerinde su/bağlayıcı oranı 0,5'tir.

Çizelge 3.6. 35 dm^3 HLB üretimi için kullanılan malzeme miktarları

Karışım No	Su (kg)	Çimento (kg)	UK (kg)	SL (kg)	CEL (kg)	PL (kg)	ÇL (kg)	0-4 mm EAFC (kg)	4-11 mm EAFC (kg)	0-4 mm DKA (kg)	4-11 mm DKA (kg)
M1	6,13	9,19	3,06	0,08	0,23	0,13	0,66	0,00	0,00	41,26	21,97
M2	6,13	9,19	3,06	0,05	0,14	0,08	0,00	27,10	14,59	20,80	11,08
M3	7,00	12,60	1,40	0,16	0,46	0,00	0,00	43,32	23,33	5,87	3,12
M4	6,00	10,80	1,20	0,07	0,20	0,11	0,00	6,58	3,54	28,61	15,24
M5	6,60	9,24	3,96	0,00	0,00	0,37	0,62	40,13	21,61	5,44	2,89
M6	6,13	9,19	3,06	0,05	0,14	0,08	0,39	54,08	29,12	0,00	0,00
M7	7,00	12,60	1,40	0,08	0,00	0,00	1,97	7,64	4,12	33,25	17,71
M8	7,88	11,81	3,94	0,05	0,14	0,08	0,39	23,58	12,70	18,10	9,64
M9	6,13	9,19	3,06	0,05	0,50	0,08	0,39	26,88	14,47	20,63	10,99
M10	5,25	10,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	45,18	24,06
M11	7,00	12,60	1,40	0,00	0,00	0,00	1,97	43,49	23,42	5,89	3,14
M12	8,75	10,50	7,00	0,08	0,00	0,13	0,00	6,44	3,47	28,02	14,92
M13	6,13	9,19	3,06	0,13	0,36	0,21	1,05	26,64	14,34	20,44	10,89
M14	6,13	9,19	3,06	0,05	0,14	0,00	0,39	13,55	7,30	31,20	16,62
M15	5,25	7,35	3,15	0,08	0,23	0,00	0,66	8,59	4,62	37,35	19,89
M16	4,55	6,83	2,28	0,08	0,23	0,13	0,66	29,99	16,15	23,02	12,26
M17	7,00	14,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	40,08	21,35
M18	7,00	12,60	1,40	0,08	0,00	0,13	0,66	43,49	23,42	5,89	3,14
M19	5,25	9,45	1,05	0,00	0,68	0,00	0,00	8,69	4,68	37,79	20,12
M20	5,25	7,35	3,15	0,00	0,00	0,00	0,00	49,18	26,48	6,66	3,55
M21	5,25	9,45	1,05	0,00	0,23	0,13	0,66	49,23	26,51	6,67	3,55
M22	6,13	9,19	3,06	0,05	0,14	0,29	0,39	26,88	14,47	20,63	10,99
M23	6,13	8,58	3,68	0,18	0,14	0,08	0,39	26,78	14,42	20,55	10,95

Çizelge 3.6. (Devam) 35 dm^3 HLB üretimi için kullanılan malzeme miktarları

M24	5,25	9,45	1,05	0,00	0,00	0,13	0,66	49,40	26,60	6,69	3,56
M25	6,13	12,25	0,00	0,05	0,14	0,08	0,39	27,53	14,82	21,13	11,25
M26	5,25	6,30	4,20	0,24	0,00	0,13	0,00	48,21	25,96	6,53	3,48
M27	6,13	9,19	3,06	0,05	0,14	0,08	1,44	26,88	14,47	20,63	10,99
M28	6,13	9,19	3,06	0,16	0,46	0,26	1,31	26,47	14,25	20,32	10,82
M29	7,00	8,40	5,60	0,08	0,23	0,00	0,66	42,36	22,81	5,74	3,06
M30	6,13	9,19	3,06	0,05	0,32	0,08	0,39	26,96	14,52	20,69	11,02

3.5. HLB'nin Taze Beton Özellikleri Deney Yöntemi

HLB üretildikten hemen sonra Slump deneyi ile kıvamı ve birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir.

3.5.1. Çökme (Slump)

Betonun taze halde kıvamının belirlenmesi için uygulaması kolay, hızlı sonuç veren ve ölçüm ekipmanının ucuz olması sebebi ile en yaygın yöntem çökme değerinin ölçülmesidir. Üretilen taze haldeki HLB, taban çapı 200 mm ve üst çapı 100 mm yüksekliği 300 mm olan kesik koni şeklindeki huniye 3 tabaka halinde her tabaka 25 defa şişleme çubuğu ile şişlenerek doldurulur. Üzeri mala ile düzeltilir ve çökme konisi yavaşça yukarı doğru kaldırılır. Taze haldeki beton kendi ağırlığıyla çöker. Huninin üst seviyesine konulan çubuğun alt sınırı ile çöken betonun en üst noktası arasındaki mesafe çökme miktarı (slump) olarak ölçülür. Bu tez çalışması kapsamında üretilen tüm HLB'lerin çökme değeri süper akışkanlaştırıcı katkı yardımı ile TS EN 206'ya göre 160-210 mm (S4 sınıfı) olacak şekilde sabit tutulmuştur (Resim 3.5).



Resim 3.5. HLB çökme deneyi

3.5.2. Birim hacim ağırlık (BHA)

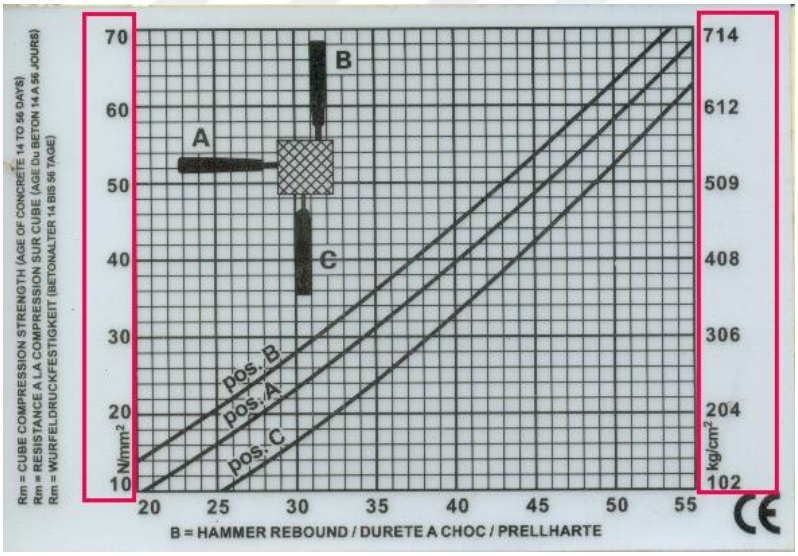
Üretilen taze haldeki HLB'lerin BHA'ları TS EN 12350-6'ya uygun olarak belirlenmiştir. Hacmi bilinen kaba taze beton doldurulup net ağırlığının kap hacmine oranlanması ile hesaplanmıştır.

3.6. HLB'nin Mekanik Özellikleri Deney Yöntemleri

HLB numuneler 28 gün su kürüne tabii tutulduktan sonra laboratuvar şartlarında kurumaya bırakılmış ve günü geldiğinde test edilmiştir. HLB numunelere test çekici, 28, 180, 360 ve 720 günlük basınç dayanımı, dört noktadan eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, donatı-beton aderansını belirlemek için çekip çıkarma direnci ve aşınma deneyleri uygulanmıştır.

3.6.1. Test çekici (Schmidth)

28 günlük 100x100x100 mm^3 boyutlarındaki HLB numunelerine ASTM C 805'e uygun olarak Test Çekici deneyi uygulanmıştır. Her beton karışımını temsil eden üç numune üzerinde farklı noktalardan deney gerçekleştirilerek 10 geri sıçrama sayısı değeri okunmaktadır. Bu değerlerden en büyük ve en küçük olanlarından birer tane atılarak kalan sekiz değerin ortalamasına göre Şekil 3.5.'de gösterilen grafikteki "B" eğrisinden yararlanılarak basınç dayanımı değeri vuruş yönü esas alınarak tespit edilmiştir.



Şekil 3.5. Beton test çekici değerlendirme grafiği

3.6.2. Basınç dayanımı

28 günlük 100mm x 100mm x 100 mm boyutlarındaki HLB numuneler, ASTM C 39'a uygun olarak deneye tabii tutulmuştur (ASTM C 39, 1994). Üç numune üzerinde deney

yapılmış, maksimum kırılma yüklerinin aritmetik ortalaması alınmış ve Eş. (3.5) kullanılarak basınç dayanımı hesaplanmıştır.

$$\sigma_B = \frac{P}{A} \tag{3.5}$$

Burada σ_B, P ve A sırası ile basınç dayanımını, maksimum kırılma yükünü ve numunenin kesit alanını temsil etmektedir.

Basınç dayanımı belirlenirken aynı zamanda yükleme altında HLB numunelerin yapacağı deformasyonu belirlemek için beton presine deplasman ölçer entegre edilerek deformasyon kaydı da alınmıştır. Deney düzeneği Resim 3.6'da gösterilmiştir. Tez çalışması kapsamında laboratuvar şartlarında bekletilen numunelerin 28, 180, 360 ve 720 günlük basınç dayanımları tespit edilmiştir.

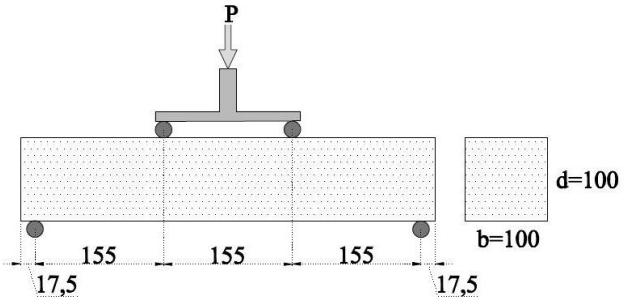


Resim 3.6. Basınç dayanımı ve deformasyon ölçüm düzeneği

3.6.3. Dört noktadan eğilme dayanımı ve deplasman ölçümü

ASTM C1161'e göre 28 günlük 100mm x 100x500 mm^3 boyutlarındaki kiriş HLB numuneler üzerinde dört noktadan eğilme deneyi yapılmıştır (ASTM C1161, 2002). Numuneler sudan çıkarıldıktan ve ortam nemine ulaşmasına ulaştıktan sonra, mesnetler arasındaki açıklık 3 eşit parçaya bölünecek şekilde yükleme yapılmıştır (Şekil 3.6). Deney

düzeneği Resim 3.7'de gösterilmiştir. Eş. (3.6) kullanılarak eğilme dayanımı hesaplanmıştır. Yük uygulanırken, HLB numunelerin ortan noktalarında meydana gelen saf eğilme durumundaki deplasman ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 3.6. Dört noktadan eğilme deney düzeneğinin şematik gösterimi (Ölçüler mm olarak verilmiştir)



Resim 3.7. Dört noktadan eğilme deney düzeneği

$$\sigma_e = \frac{P x\, L}{b\, x\, d^2} \tag{3.6}$$

Burada σ_e: eğilme dayanımını (MPa), P: maksimum kırılma yükünü (N), L: mesnetler arası mesafeyi (mm), b ve d: kiriş numunenin kesit ölçülerini (mm) temsil etmektedir.

3.6.4. Yarmada çekme dayanımı

150x150x150 mm^3 boyutlarındaki HFC numuneleri üzerinde ASTM C 496 standardında belirtilen esaslara göre Yarmada Çekme Dayanımı (YÇD) testi yapılmıştır (Resim 3.8). Küp HLB numunelerin alt ve üst yüzeylerine metal şeritler yerleştirilerek yük çizgisel hale

dönüştürülmüştür. Yükleme doğrultusuna dik doğrultuda çekme gerilmelerinin oluşması neticesinde numuneler yüklemeye paralel yönde çatlamıştır. Lif köprüleri sayesinde HLB numunelerde ayrılma meydana gelmemiştir. Uygulanan maksimum yük kullanılarak YÇD Eş. (3.7) ile hesaplanmıştır.



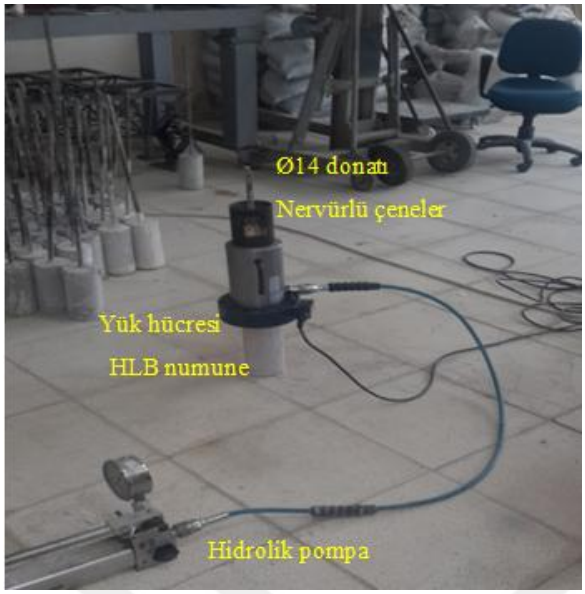
Resim 3.8. Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği

$$\sigma_{ç} = \frac{2P}{\Pi\ x\ a^2} \tag{3.7}$$

Burada $\sigma_{ç}$: Yarmada çekme dayanımını (MPa), P: numunenin kırıldığı maksimum yükü (N) a: küp numunenin bir kenarının ölçüsünü (mm) ifade etmektedir.

3.6.5. Çekip çıkarma direnci

HLB numunelerin donatı ile aderansını belirlemek için çekip çıkarma deneyi yapılmıştır. ø14 mm olan nervürlü donatı ϕ100 / 200 mm boyutlarında üretilen HLB numunesine beton taze halde iken gömülmüş ve 28 gün boyunca suda kür edilmiştir. 28 gün sonra numuneler sudan çıkarılmış ve deney gününe kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Donatı çapına uygun nervürlü dişler donatıya tutturularak hidrolik pompa yardımı ile yük uygulanmış ve donatının betondan sıyrılması sağlanmıştır. Yük hücresi yardımı ile donatının sıyrıldığı andaki yük çekip çıkarma yükü olarak bilgisayar programı vasıtası ile kg cinsinden kaydedilmiştir. Deney düzeneği Resim 3.9'de gösterilmiştir.



Resim 3.9. Çekip çıkarma deney düzeneği

3.6.6. Aşınma

100x100x100 mm^3 boyutlarındaki HLB numunelerin ağırlıkça aşınma oranları (AO) TS EN 2824'te ifade edilen esaslara göre belirlenmiştir (TS 2824 EN 1338, 2005). Numuneler deneye tabii tutulmadan önceki ağırlığı (M_1) ve dikey aşındırma cihazındaki aşınma diski 75 döngü yaptıktan sonraki numune ağırlığı (M_2) ölçülmüştür. Ağırlık farkının (M_1-M_2) başlangıçtaki ağırlığa (M_1) oranlanması ile HLB numunelerin ağırlıkça aşınma oranları Eş. (3.8) kullanılarak hesaplanmıştır. Deney düzeneği Resim 3.10'da gösterilmiştir.

$$AO = \frac{M_1 - M_2}{M_1} x\ 100 \qquad (3.8)$$



Resim 3.10. Dikey aşınma deney düzeneği

3.7. HLB'nin Geçirimlilik Özellikleri Deney Yöntemleri

HLB numuneler 28 gün su kürüne tabii tutulduktan sonra test gününe kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir. HLB numunelere ultrasonik dalga hızı ölçümü, rezonans frekansı ölçümü ve hızlı klor geçirimliliği deneyleri uygulanmıştır.

3.7.1. Ultrasonik dalga hızı (UDH)

UDH ölçümleri, ASTM C 597-02'ye göre 28 gününü suda tamamlamış ve ortam nemine ulaşmış 100x100x100 mm^3 boyutlarındaki HLB numuneleri üzerinde yapılmıştır (ASTM C 597-02, 1994). Deney düzeneği Resim 3.11'de gösterilmiştir. Deneyin esası bir yüzeyden gönderilen ses üstü dalganın diğer yüzeyden alınması arasında geçen sürenin ölçülmesi ile ses üstü dalga hızının Eş. (3.9)'a göre hesaplanması ilkesine dayanmaktadır.

$$V = \frac{L}{t} x\, 100 \qquad (3.9)$$

Burada; V: UDH hızını (m/s), L: dalganın geçtiği mesafeyi (m), t: dalganın belirlenen mesafeyi geçme süresini (μs) ifade etmektedir.

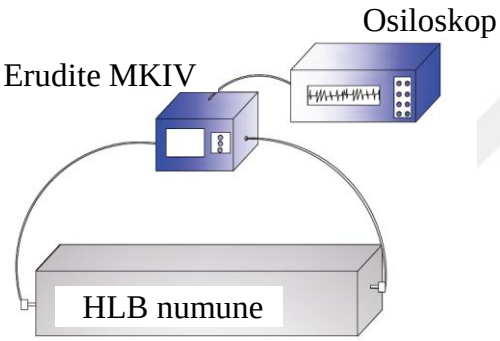


Resim 3.11. Ultrasonik dalga hızı ölçüm düzeneği

3.7.2. Rezonans frekansı (RF)

Boyuna Rezonans Frekans (RF) ölçüm testi, ASTM C 215 'e uygun olarak 100x100x500 mm^3 boyutlarındaki HLB numuneler üzerinde yapılarak ölçümlerin aritmetik ortalamaları

Hertz (Hz) cinsinden alınmıştır (ASTM C 215, 2003). Frekans okumalarındaki tutarlılık seviyesinin %2 içinde olması beklenmektedir. Ölçümler Erudite MKIV PC1004 cihazı ile otomatik mod kullanılarak yapılmıştır. Otomatik mod, RF (Fr) ve sönümleme katsayısı (Q) faktörünü ölçmek için uygun bir yöntemdir. Otomatik modda ölçüm yaparken, Fr, Fl, Fh ve Q çıkışları cihaz tarafından ölçülür. Fr, rezonans frekansını (Hz) Fl ve Fh, rezonans frekansı titreşim genliğinin 0,707'ye düştüğü her iki yüzeydeki düşük ve yüksek frekanslardır. Deney düzeneği Şekil 3.7'de gösterilmektedir. HLB numuneler sıcaklık artışı dakikada 10 °C olan bir etüvde yüksek sıcaklıklara (250 °C, 500 °C ve 750 °C) maruz bırakılmıştır. Etüv, hedeflenen sıcaklık seviyesine ulaştıktan sonra, HLB numuneler 2 saat sabit sıcaklıkta bekletilmiş ve sonra laboratuvar sıcaklığına getirilmiştir. RF ölçümleri yüksek sıcaklık ortamına bırakılan HLB numunelerin performanslarını değerlendirmek için bir yöntem olarak kullanılmıştır.

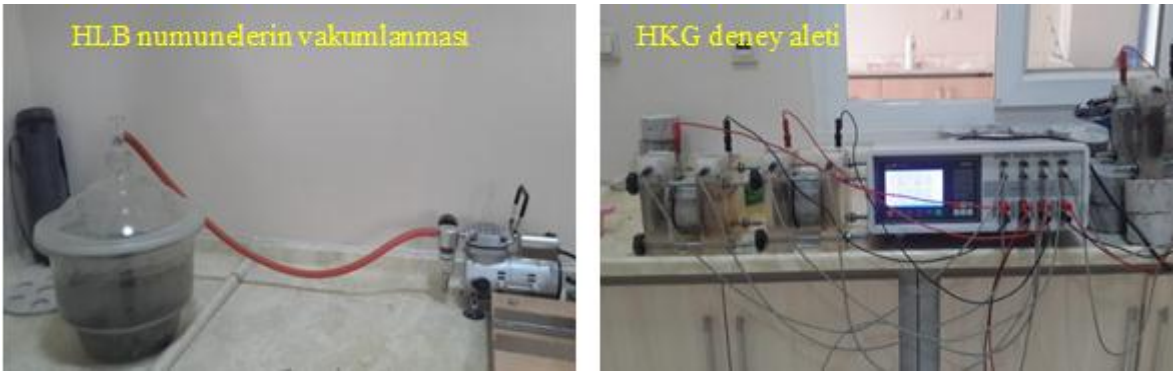


Şekil 3.7. Rezonans frekansı ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi

3.7.3. Hızlı klor geçirimliliği (HKG)

HLB numunelerin HKG özellikleri ASTM C 1202-97 standardına göre ϕ100 / 50 mm boyutlarındaki silindirik numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir (ASTM C 1202-97, 1997). HLB numuneler desikatörde 3 saat kuru halde vakumlandıktan sonra kaynatılıp soğutulmuş su içerisinde de HLB deki gözeneklerin su ile tamamen dolması için 1 saat daha vakumlanmıştır. HLB numuneler 18 saat su içinde bırakıldıktan sonra dört hücreli HKG ölçüm cihazındaki hücrelere yerleştirilerek deney başlatılmıştır (Resim 3.12). Ölçme ünitelerinden bir tanesine ağırlıkça %3'lük (970 g saf su + 30 g saf NaCl) NaCl çözeltisi, diğerine ise 0,3 M (988 gr saf su + 12 gr saf NaOH) NaOH çözeltisi konulmuştur. 60 V sabit potansiyel farkı uygulanarak numuneden geçen elektrik akım şiddeti 30 dakika

aralıklarla otomatik olarak Coulomb (c) cinsinden kaydedilmiştir. 6 saat sonunda deney tamamlanmıştır.



Resim 3.12. Hızlı klor geçirimliliği deney düzeneği

3.8. HLB'nin Fiziksel Özellikleri Deney Yöntemleri

28 gün suda bekletilen HLB numuneler laboratuvar şartlarına ulaştıktan sonra su emme kapasitesi ve kılcal yolla su emme kapasitesi deneyleri yapılarak numunelerin boşluk miktarları ölçülmüştür.

3.8.1. Su emme kapasitesi

Laboratuvar ortamında bekleyen 100x100x100 mm^3 boyutlarındaki numunelerin su emme kapasiteleri ASTM C 642'de belirtilen esaslara göre sabit ağırlığa gelene kadar 105±5 °C'de laboratuvar etüvünde kurutulmuştur (ASTM C 642, 2013). HLB numunelerin etüv kurusu ağırlıkları (W_k) belirlendikten sonra numunelerdeki boşlukların tamamen su ile dolması için 24 saat suda bekletilip çıkarılmıştır. Numune yüzeyleri kurutularak doygun yüzey kuru ağırlıkları (W_{dyk}) belirlenmiştir. Eş. (3.10) kullanılarak HLB numunelerin su emme kapasiteleri hesaplanmıştır.

$$\text{Su emme kapasitesi } (\%) = \frac{W_{dyk} - W_k}{W_k} \text{ x } 100 \qquad (3.10)$$

3.8.2. Kılcal su emme (Kapilarite)

Bağlantılı boşluk yapısını değerlendirebilmek için HLB numunelerin kılcal yolla su emme katsayıları (KSK) ASTM C1585'e göre hesaplanmıştır. KSK, birim zamanda birim alandan geçen su miktarını tanımlar. 100x100x100 mm^3 boyutlarındaki HLB numuneler etüvde 105 ± 5 °C' de kurutulup laboratuvar şartlarına döndükten sonra yan yüzeyleri parafin ile kaplanarak tartılmıştır (W_p). Böylece numune içerisine sadece alt taban kesitinden su girmesine izin verilmiştir. HFC numuneler su dolu kap içindeki yarım cam mesnetler üzerine yerleştirilerek deney başlatılmış ve kronometre ile süre takibi yapılmıştır. 6 saat boyunca HLB numunelerin emdiği su miktarı, numuneler tartılarak belirlenmiştir. Eş. (3.11) den faydalanılarak zamanın karekköküne karşı grafiği çizilmiştir. Grafiğin eğiminden KSK elde edilmiştir.

$$Q_i = \frac{W_t - W_p}{a^2} \tag{3.11}$$

Burada, Q_i: 1 cm^2 alandan emilen su miktarı (g), W_t: t anındaki HLB ağırlığı (g), W_p: parafinle kaplanmış kuru HLB ağırlığı (g), a: küp numunenin bir kenarının uzunluğu (cm) olarak tanımlanmıştır.

3.9. HLB'nin Durabilite Özellikleri Deney Yöntemleri

HLB numunelerin servis ömrünü etkileyebilecek çevresel etkilere karşı performanslarını belirlemek için HLB numunelerin asit ve sülfat atağına karşısındaki davranışları, yüksek sıcaklık (yangın) etkisindeki davranışları ve karbonatlaşma derinlikleri belirlenmiştir.

3.9.1. Asit direnci

50mm x 50mm x 50mm boyutlarında üretilen HLB numuneler H_2SO_4 (asit) konsantrasyonu %5 olan çözeltiye yerleştirilmiştir. Numunelerin asit atağına karşı performans değerlendirmesi dayanım ve ağırlık değişimi olarak belirlenmiştir. H_2SO_4 çözeltisine maruz bırakılmadan önce numunelerin ağırlıkları belirlenmiştir. Kısa ve uzun dönem performanslarını değerlendirebilmek için 60, 300 ve 400 gün sonra HLB numuneler çözeltiden çıkarılıp üç gün laboratuvar ortamında kurumaya bırakılmıştır (Resim 3.13).

Numunelerin basınç dayanımları ve ağırlıkları ölçülmüştür. Başlangıç durumuna göre basınç dayanımındaki değişim Eş. (3.12), ağırlığındaki değişim ise Eş. (3.13) kullanılarak hesaplanmıştır. Çözeltilerin konsantrasyonları, bir pH metre ile kontrol altında tutulmuş ve konsantrasyon değeri değiştiğinde çözeltiler yenilenmiştir.

$$\text{Dayanım değişimi} = \frac{\sigma_{as}-\sigma_{aö}}{\sigma_{aö}} \text{ x } 100 \quad (3.12)$$

$$\text{Ağırlık değişimi} = \frac{m_{as}-m_{aö}}{m\sigma_{aö}} \text{ x } 100 \quad (3.13)$$

Burada σ_{as}: numunenin asitten sonraki basınç dayanımını (MPa), $\sigma_{aö}$: numunenin asitten önceki basınç dayanımını (MPa), m_{as}: numunenin asitten sonraki ağırlığını (g), $m_{aö}$: numunenin asitten önceki ağırlığını (g) ifade etmektedir.

3.9.2. Sülfat direnci

50mm x 50mm x 50 mm boyutlarında üretilen HLB numuneler Na_2SO_4 (sülfat) konsantrasyonu %5 olan çözeltiye yerleştirilmiştir. Numunelerin sülfat atağına karşı performans değerlendirmesi dayanım ve ağırlık değişimi olarak belirlenmiştir. Na_2SO_4 çözeltisine maruz bırakılmadan önce numunelerin ağırlıkları belirlenmiştir. Kısa ve uzun dönem performanslarını değerlendirebilmek için 60, 300 ve 400 gün sonra HLB numuneler çözeltiden çıkarılıp üç gün laboratuvar ortamında kurumaya bırakılmıştır (Resim 3.13). Numunelerin basınç dayanımları ve ağırlıkları ölçülmüştür. Başlangıç durumuna göre basınç dayanımındaki değişim Eş. (3.14), ağırlığındaki değişim ise Eş. (3.15) kullanılarak hesaplanmıştır. Çözeltilerin konsantrasyonları, bir pH metre ile kontrol altında tutulmuş ve konsantrasyon değeri değiştiğinde çözeltiler yenilenmiştir.

$$\text{Dayanım değişimi} = \frac{\sigma_{ss}-\sigma_{sö}}{\sigma_{sö}} \text{ x } 100 \quad (3.14)$$

$$\text{Ağırlık değişimi} = \frac{m_{ss}-m_{sö}}{m\sigma_{sö}} \text{ x } 100 \quad (3.15)$$

Burada σ_{ss}: numunenin sülfat atağından sonraki basınç dayanımını (MPa), $\sigma_{sö}$: numunenin sülfat atağından önceki basınç dayanımını (MPa), m_{ss}: numunenin sülfat atağından sonraki ağırlığını (g), $m_{sö}$: numunenin sülfat atağından önceki ağırlığını (g) ifade etmektedir.



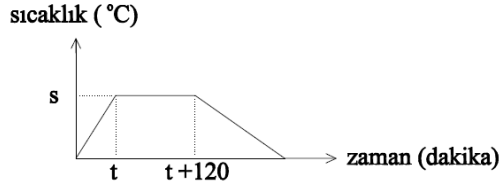
a

b

Resim 3.13. Asit ve sülfat atağından sonra HLB numuneler a) asitten sonra b) sülfattan sonra

3.9.3. Yüksek sıcaklık etkisinde dayanım değişimi ve RF ölçümü

Yüksek sıcaklık etkisinde HLB numunelerin basınç dayanımlarında meydana gelen değişimi belirlemek için 28 gün suda kür edildikten sonra laboratuvar şartlarında bekletilen numuneler 250 °C, 500 °C ve 750 °C yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Numuneler sıcaklık artış hızı dakikada 10° olan etüve yerleştirildikten sonra etüv çalıştırılıp hedef sıcaklığa ulaşması sağlanmıştır. Hedef sıcaklığa ulaştıktan sonra 120 dakika sabit sıcaklıkta bekletilmiş ve numunelerin tekrar laboratuvar şartlarına dönmesi sağlanmıştır. Yüksek sıcaklık uygulama rejimi Şekil 3.8'de gösterilmiştir. HLB numunelerde oluşan etki hem basınç dayanımı hem de RF ölçümleri yapılarak belirlenmiştir.



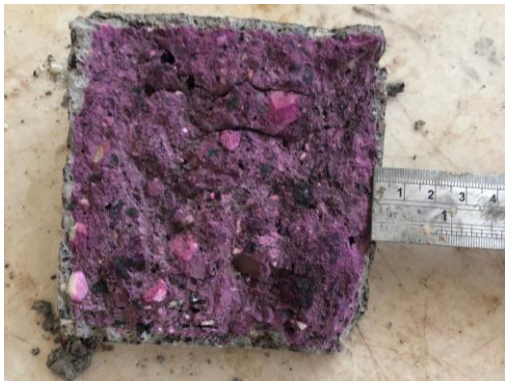
Şekil 3.8. Yüksek sıcaklık uygulama rejimi

3.9.4. Yüksek sıcaklık etkisinde donatı-beton aderansının değişimi

Betonarme elemanların yüksek sıcaklık etkisindeki davranışını temsilen donatılı HLB numuneler 250 °C, 500 °C ve 750 °C yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Numuneler sıcaklık artış hızı dakikada 10° olan etüve yerleştirildikten sonra etüv çalıştırılıp hedef sıcaklığa ulaşması sağlanmıştır. Hedef sıcaklığa ulaştıktan sonra 120 dakika sabit sıcaklıkta bekletilmiş ve numunelerin tekrar laboratuvar şartlarına dönmesi sağlanmıştır. Yüksek sıcaklık uygulama rejimi Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Numunelere çekip çıkarma yükü uygulanarak donatı sıyrılma yükü ölçülmüştür. Sıyrılma yükleri sıcaklık seviyesine bağlı kıyaslanarak HLB numunelerin yüksek sıcaklık seviyesine bağlı davranışını değerlendirilmiştir.

3.9.5. Karbonatlaşma derinliği (KD)

100mm x 100 mm kesitli HLB numunelerin TS EN 14630'da belirtilen esaslara göre 60 ve 720 günlük karbonatlaşma derinlikleri ölçülmüştür (TS EN 14630, 2012). HLB numuneler yarılarak iç kesitine saf alkol ve fenolftaleyn ile hazırlanan çözelti püskürtülerek KD belirlenmiştir (Resim 3.14).



Resim 3.14. Karbonatlaşma derinliğinin ölçülmesi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Hibrit Lifli Betonların (HLB) performanslarını belirlemek için fiziksel, mekanik, geçirimlilik ve durabilite özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Deney sonuçları üzerinde Varyans Analizi (ANOVA) yapılıp bağımız ve bağımlı değişkenler arasındaki ilişki istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Çoklu Objektifli Optimizasyon (ÇOO) çalışması yapılarak istenen özellikler doğrultusunda optimum üretim şartları belirlenmiştir.

4.1. Varyans Analizi (ANOVA) ve Regresyon Modellerinin Oluşturulması

Deneyler sonucunda elde edilen verilerin Varyans Analizi yapılarak çalışmada belirlenen lif türlerinin katılım oranı, UK ve EAFC yer değiştirme oranı ve bağlayıcı dozajı gibi bağımsız değişkenler arasında istatistiksel olarak anlamlı lineer veya ikinci derece regresyon modelleri elde edilmiştir. Design-Expert 7.0.0 ticari programı, her araştırılan özellik yani bağımlı değişken için istatistiksel olarak anlamlı olan farklı modelleri analize dâhil ederek kullanıcıya sunmaktadır. Geriye doğru regresyon analizi yapılmıştır. Bu sistemde bağımsız her değişken başlangıçta sisteme dâhil edilir ve verileri en iyi açıklayan bir model bulmak için regresyon modelindeki değişkenleri aşamalı olarak sistemden çıkarılır. Geriye doğru eleme regresyonu olarak da bilinir (Rawlings, Pantula ve Dickey, 2001). Bu yöntemle çalışma kapsamında lineer (doğrusal), 2FI (iki faktörlü etkileşim), kuadratik regresyon modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerin detayları şu şekilde özetlenebilir.

Lineer model: Bağımsız değişkenlerin sadece bireysel etkilerinin temsil edildiği doğrusal denklem modelidir. Bu çalışmada lif türünün katılım oranı (ÇL, CEL, SL ve PL), UK yer değiştirme oranı, EAFC yer değiştirme oranı ve bağlayıcı dozajı (D) ile oluşturulan regresyon modelleridir.

2FI modeli: Bağımsız değişkenlerin tekli ve ikili etkileşimlerinin göz önüne alınması ile oluşturulan doğrusal regresyon modelidir. Bu çalışmada PL, D, ÇL-CEL, UK-D, EAFC-SL gibi etkileşimlerin bir arada bulunması şeklinde elde edilen regresyon modelleridir.

Kuadratik model: Bağımsız değişkenlerin tekli, ikili etkileşimlerinin yanı sıra ikinci dereceden etkili olan parametrelerin de göz önünde bulundurulması ile elde edilen ikinci derece regresyon modelidir. Bu çalışmada SL, UK-EAFC, D'nin karesel etkisi (D^2) gibi etkileşimlerin tek bir denklemde birleşmesi ile elde edilen regresyon modelleridir.

Bu çalışmada deney sonuçları kullanılarak yedi faktörlü (bağımsız değişkenli) lineer modeller Eş. (4.1), 2FI modeller Eş. (4.2) ve kuadratik modeller Eş. (4.3) formunda ifade edilmiştir.

$$y = b_0 + b_i x_i + \varepsilon \quad (4.1)$$

$$y = b_0 + \sum\sum_{i\leq j} b_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4.2)$$

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{k} b_i x_i + \sum\sum_{i\leq j} b_{ij} x_i x_j + \sum b_i x_i^2 + \varepsilon \quad (4.3)$$

Burada x_i ve x_j: i. ve j. faktörleri, y: tepkiyi, b_0, b_i ve b_j: bağımsız değişkenlerin tepkideki regresyon katsayılarını, $\sum_{i=1}^{k} b_i x_i$: x_i faktörünün lineer etkisini, $\sum\sum_{i\leq j} b_{ij} x_i x_j$: x_i ve j_i'nin ikili etkileşimlerini, $\sum b_i x_i^2$: x_i'nin karesinin etkisini, ε: meydana gelen hataları temsil etmektedir (Balcikanli, 2016). Regresyon modellerindeki sabit katsayılar, normal dağılımda % 95 güvenlik düzeyinde çoklu lineer regresyon analizi ile belirlenmiştir.

4.2. Taze Beton Özelliklerinin Belirlenmesi

HLB üretimi karışım tasarımında belirlenen şartlara göre yapıldıktan sonra lif katkısının, UK oranının, agrega türünün ve bağlayıcı dozajının taze beton üzerindeki etkisini belirlemek için TS EN 206 ve TS EN 12350-6 standardlarına uygun olarak sırasıyla çökme deneyi yapılmış ve birim ağırlıkları belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. HLB çökme değerleri ve birim hacim ağırlıkları

Karışım No	ÇL (%)	CEL (%)	SL (%)	PL (%)	UK (%)	EAFC (%)	D (kg/m^3)	Çökme* (cm)	SA (g)	Birim ağırlık (g/cm^3)
M1	0,25	0,25	0,25	0,25	25,0	0,0	350,0	7,0	67	2,17
M2	0,00	0,15	0,15	0,15	25,0	50,0	350,0	7,5	20	2,32
M3	0,00	0,50	0,50	0,00	10,0	85,0	400,0	5,0	125	2,61
M4	0,00	0,25	0,25	0,25	10,0	15,0	400,0	6,5	80	2,27
M5	0,25	0,00	0,00	0,75	30,0	85,0	400,0	6,5	80	2,66
M6	0,15	0,15	0,15	0,15	25,0	100,0	350,0	7,5	150	2,72
M7	0,75	0,00	0,25	0,00	10,0	15,0	400,0	5,5	125	2,30
M8	0,15	0,15	0,15	0,15	25,0	50,0	450,0	8,0	70	2,38
M9	0,15	0,55	0,15	0,15	25,0	50,0	350,0	6,0	125	2,39
M10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	300,0	13,0	65	2,25
M11	0,75	0,00	0,00	0,00	10,0	85,0	400,0	6,5	100	2,74
M12	0,00	0,00	0,25	0,25	40,0	15,0	500,0	10,0	90	2,27
M13	0,40	0,40	0,40	0,40	25,0	50,0	350,0	3,0	135	2,50
M14	0,15	0,15	0,15	0,00	25,0	50,0	350,0	8,5	100	2,39
M15	0,25	0,25	0,25	0,00	30,0	15,0	300,0	8,0	60	2,19
M16	0,25	0,25	0,25	0,25	25,0	50,0	260,0	6,5	140	2,48
M17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	400,0	14,0	10	2,26
M18	0,25	0,00	0,25	0,25	10,0	85,0	400,0	5,5	150	2,67
M19	0,00	0,75	0,00	0,00	10,0	15,0	300,0	6,5	150	2,23
M20	0,00	0,00	0,00	0,00	30,0	85,0	300,0	16,0	0	2,48
M21	0,25	0,25	0,00	0,25	10,0	85,0	300,0	6,0	145	2,65
M22	0,15	0,15	0,15	0,55	25,0	50,0	350,0	6,5	120	2,44
M23	0,15	0,15	0,55	0,15	30,0	50,0	350,0	7,5	100	2,47
M24	0,25	0,00	0,00	0,25	10,0	85,0	300,0	7,5	65	2,60
M25	0,15	0,15	0,15	0,15	0,0	50,0	350,0	7,0	80	2,44
M26	0,00	0,00	0,75	0,25	40,0	85,0	300,0	9,5	110	2,49
M27	0,55	0,15	0,15	0,15	25,0	50,0	350,0	7,0	80	2,53
M28	0,50	0,50	0,50	0,50	25,0	50,0	350,0	1,0	175	2,41
M29	0,25	0,25	0,25	0,00	40,0	85,0	400,0	9,0	95	2,59
M30	0,15	0,35	0,15	0,15	25,0	50,0	350,0	6,5	85	2,39

*Çökme değeri süper akışkanlaştırıcı kullanılmadan önce ölçülen değerlerdir.

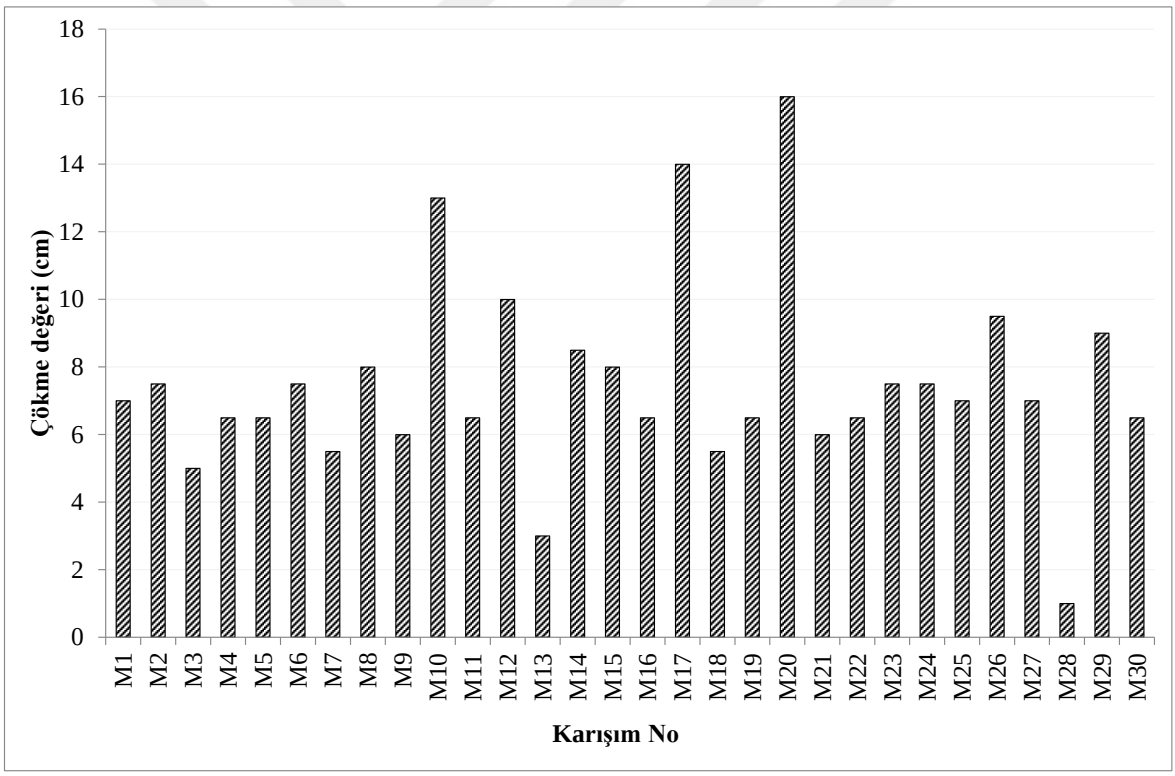
Çizelge 4.2. Taze beton özelliklerinden elde edilen sonuçlarının istatistiksel analizi

Bağımlı değişkenler	Bağımsız değişkenler	RM	R^2	SD	HKT	HKO	F-değeri	P-değeri	Ö	%ρ
Çökme Değeri (cm)	Sabit	11,44	0,835	5	206,97	41,39	24,37	< 0,0001	E	-
	ÇL	-6,98		1	59,76	59,76	35,18	< 0,0001	E	30,4
	CEL	-7,94		1	66,22	66,22	38,98	< 0,0001	E	33,6
	SL	-4,7		1	17,58	17,58	10,35	0,0037	E	8,9
	PL	-6,95		1	43,38	43,38	25,54	< 0,0001	E	22,0
	UK	0,058		1	9,90	9,90	5,83	0,0237	E	5,0
	Artık değer			24	40,77	1,70				
	Toplam			29	247,74					
Birim Ağırlık (g/cm^3)	Sabit	2,21	0,915	3	0,69	0,23	93,77	< 0,0001	E	-
	ÇL	0,14		1	0,024	0,024	9,58	0,0047	E	3,5
	UK	-2,30		1	0,019	0,019	7,86	0,0094	E	2,9
	EAFC	4,97		1	0,62	0,62	252,98	< 0,0001	E	93,6
	Artık değer			26	0,064	0,0024				
	Toplam			29	076					

RM: regresyon modeli, R^2: korelasyon katsayısı, SD: serbestlik derecesi, HKT: hatalar karesi toplamı, HKO: hatalar karesi ortalaması, Ö: Önemlilik ($p<0,05$ ise E: Evet, $p>0,05$ ise H: Hayır)

4.2.1. Çökme (slump) deneyi

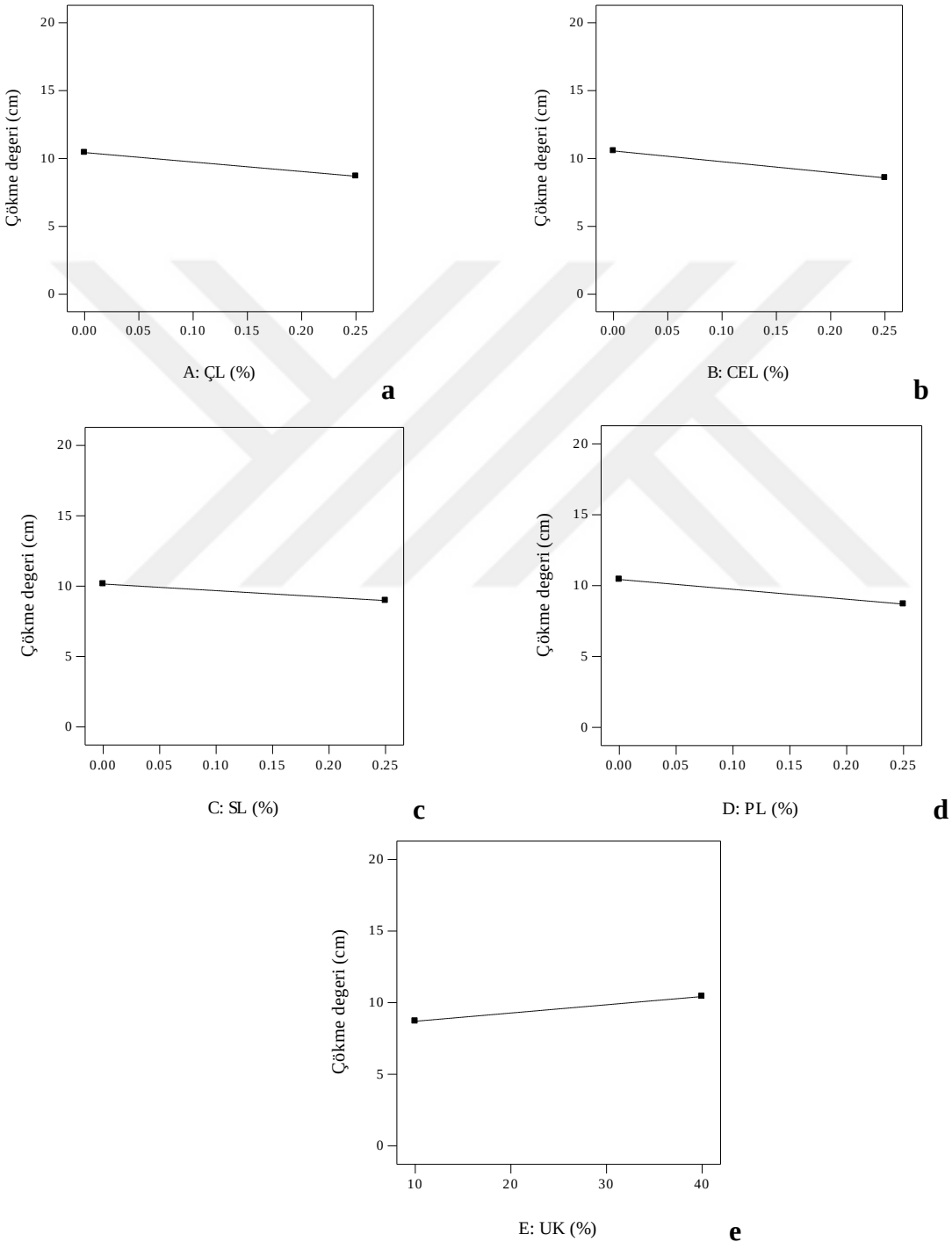
HLB üretiminde SA katkı kullanılarak çökme değerleri sabit tutulmuştur. Tüm karışımların çökme sınıfının S4 (160-210 mm) olması için ilave edilen SA miktarları ve SA kullanılmadan önceki çökme değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir ve Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekil 4.1'den görüldüğü üzere lif bulunmayan kontrol grubunda (M10, M17 ve M20) çökme değeri oldukça yüksek iken lifin en yoğun bulunduğu M28 karışımının çökme değeri en düşüktür. Buradan lif katkısının çökme değeri üzerinde etkin rol oynadığı anlaşılmaktadır. Kullanılan SA miktarı her kaışımın çökme değerine bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Lif türüne bağımlı olarak lif miktarı arttıkça ve karışımdaki UK ikame oranı azaldıkça SA katkı oranı da artmıştır.



Şekil 4.1. HLB'lerin çökme değerleri

Beton içerisindeki lif miktarı arttıkça işlenebilirliğin azaldığı bilinen bir gerçektir (Chen ve Liu, 2005; Gencel, Brostow, Datashvili ve Thedford, 2011; Gencel, Ozel, Brostow ve Martinez-Barrera, 2011). Ancak, hangi lif türü kullanımında işlene bilirlik seviyesinin daha çok düştüğü net olarak tanımlanamamıştır. Bu nedenle HLB'lerin işlenebilirliğini etkileyen parametreleri belirlemek için deneysel olarak elde edilen çökme değerlerinin varyans

analizi yapılarak HLB'lerin çökme değerini tanımlayan doğrusal regresyon modeli oluşturulmuştur. Etkisi olan bağımsız değişkenler ve etki ağırlıkları Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. ÇL, CEL, SL, PL ve UK'nın çökme değerini doğrusal olarak etkileyen parametreler olduğu Çizelge 4.2'den anlaşılmıştır.



Şekil 4.2. Bağımsız değişkenlerin HLB çökme değerine olan etkileri

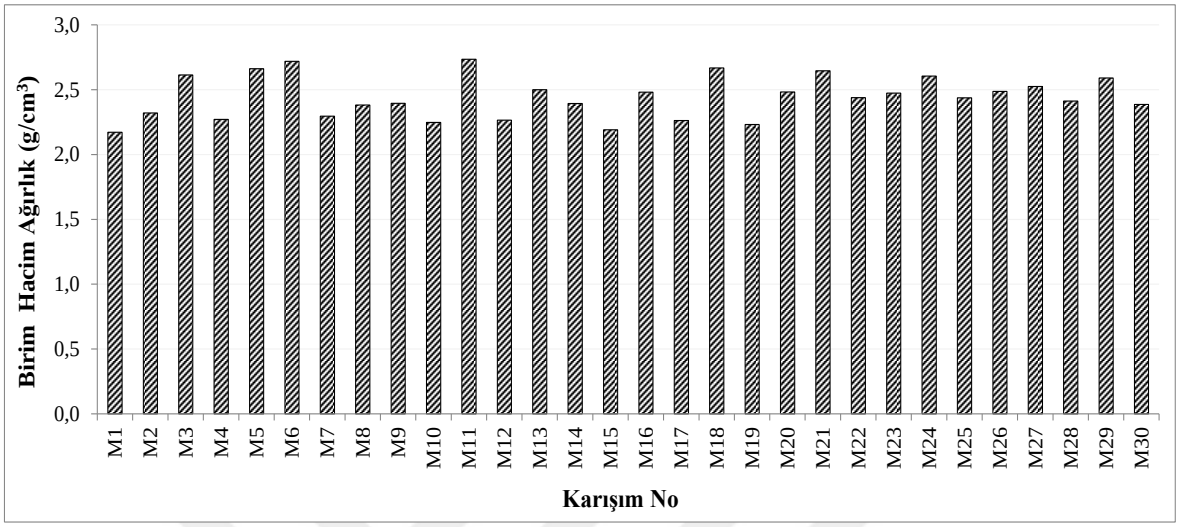
Çizelge 4.2'de bulunmayan diğer parametrelerin istatistiksel olarak çökme değerini etkileme oranı çok düşük olduğundan modele dâhil edilmemiştir. Etkili olan bağımsız değişkenlerin tamamı istatistiksel olarak önemli olduğundan regresyon modelinde sadeleştirme yapılmadan tüm parametreler verilmiştir. HLB'lerin çökme değeri üzerinde en önemli parametrelerin etki oranları sırasıyla %33,6, %30,4, %22, %8 ve %5 olan CEL, ÇL, PL, SL ve UK'dir. Oluşturulan lineer regresyon modeli Eş. 4.4'de verilmiştir. HLB'lerin çökme değerini istatistiksel olarak etkileyen parametreler lif türlerinin tamamı ve UK katkısıdır. Tüm lif türleri HLB çökme değerini azaltma eğilimi gösterirken (Şekil 4.2a-d) UK katkısı çökme seviyesini artırma eğilimi göstermiştir (Şekil 4.2e). Lineer regresyon modeli oluşturulduğundan bağımsız değişkenler tepkiyi bireysel olarak etkilemişlerdir. Lifler arasında CEL, çökme değeri üzerinde en yüksek etki oranına (% 33,6) sahip iken SL en düşük etki oranına (% 8,9) sahiptir. UK katkısının etki oranı ise % 5 ile en düşüktür. Bazı çalışmalarda PL katkısının çökme değerini daha fazla etkilediği belirtilirken (Dhaher, Daoud, ve Al-Attar, 2018) bu çalışmada ÇL'nin PL'den daha yüksek etki oranına (Tablo 5) sahip olduğu belirlenmiştir.

Çökme değeri =11,44-6,98*ÇL - 7,94*CEL - 4,7*SL - 6,95*PL + 0,058*UK (4.4)

4.2.2. Birim hacim ağırlık deneyi

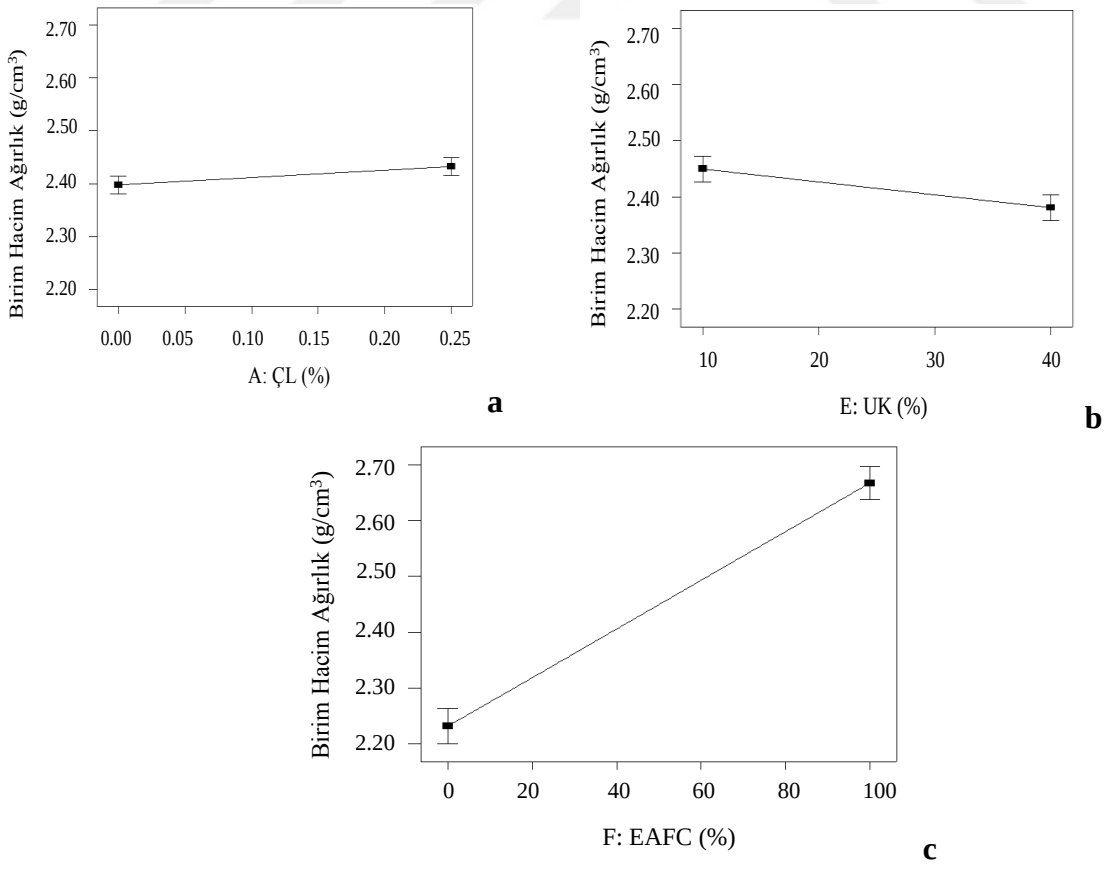
HLB'lerin birim ağırlıkları Çizelge 4.1'de verilmiştir ve Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Birim hacim ağırlığı en fazla olan M11 kodlu HLB iken en az olan M1 kodlu HLB'dir. Bu durumun sebebini belirlemek için birim hacim ağırlık sonuçlarına ANOVA uygulanmış ve lineer regresyon modeli oluşturularak (Eş. 4.5) bağımsız değişkenlerin etki ağırlıkları belirlenmiştir (Çizelge 4.2). Regresyon modelindeki tüm bağımsız değişkenlerin istatistiksel olarak önemli olduğu tespit edilmiştir. Regresyon modeli incelendiğinde HLB'nin birim hacim ağırlığı üzerinde en fazla etki ağırlığına sahip parametrenin EAFC yer değiştirme oranı (ρ =%93,6) olduğu, yanı sıra ÇL (ρ =%3,5) ve UK (ρ =%2,9) oranından da etkilendiği tespit edilmiştir. Bu parametrelerin HLB birim hacim ağırlığını nasıl etkiledikleri Şekil 4.4'de gösterilmiştir. UK katkısı arttıkça HLB'lerin birim hacim ağırlıkları azalırken (Şekil 4.4b) ÇL ve EAFC miktarı arttıkça HLB'lerin birim hacim ağırlıklarının arttığı (Şekil 4.4a, Şekil 4.4c) görülmüştür. Yer değiştirilen malzemenin birim ağırlığı yerine geldiği malzemeden yüksekse (γ_{EAFC} = 3,64 g/cm^3, γ_{DKA}= 2,74 g/cm^3)

HLB'lerin birim ağırlığının arttığı, düşükse (γ_{UK}= 2,25 g/cm^3, $\gamma_{çimento}$= 3,15 g/cm^3) azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.3. HLB birim hacim ağırlıkları

Birim hacim ağırlık = 2,21+ 0,14*ÇL – 2,30*UK +4,97*EAFC (4.5)



Şekil 4.4. Bağımsız değişkenlerin HLB birim hacim ağırlığına olan etkileri

4.3. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

HLB, Çizelge 3.5'de belirtilen şartlara göre üretilip 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak 28 gün su kürüne tabii tutulmuştur. HLB'lerin mekanik özelliklerini belirlemek için 28 günlük numuneler üzerinde test çekici, 28, 180, 360 ve 720 günlük basınç dayanımları, 28 günlük numuneler üzerinde dört noktadan eğilme dayanımı, maksimum deplasman (eğilme), yarmada çekme dayanımı, çekip çıkarma direnci (Pull Out) ve aşınma oranı testleri yapılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.3'de verilmiştir. Deney sonuçları üzerinde ANOVA yapılarak bağımsız değişkenler ile bağımlı değişkenler arasındaki ilişki, bağımsız değişkenlerin çoklu etkileşimleri ve istatistiksel olarak etki ağırlıkları belirlenmiştir. Sonuçların istatistiksel analizi Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. HLB mekanik özellikler deney sonuçları

Karışım No	**Test Çekici (N/mm^2)**	**Basınç Dayanımı (MPa)**				**Eğilme D. (MPa)**	**Maksimum Deplasman (mm)**	**Yarma Ç. D. (MPa)**	**Pull Out (kg)**	**Aşınma (%)**
		28 gün	**180 gün**	**360 gün**	**720 gün**					
M1	28	37,9	40,0	38,1	39,1	3,23	17,75	3,81	713	0,4682
M2	26	20,8	24,6	23,0	26,5	3,15	16,31	2,90	434	0,4762
M3	29,5	32,1	33,4	34,9	36,7	3,62	16,93	4,78	869	0,3989
M4	30	35,1	36,2	36,1	38,1	5,27	17,72	4,28	527	0,4318
M5	30	37,5	39,0	37,2	37,3	6,22	10,48	2,92	755	0,4166
M6	27	25,1	27,2	25,8	26,1	4,44	16,16	3,30	481	0,4535
M7	29	36,9	38,6	38,2	41,8	5,41	18,6	4,91	779	0,4304
M8	31,5	33,6	35,8	34,2	35,7	4,24	15,79	3,57	693	0,3987
M9	27	25,2	28,3	27,3	26,6	3,56	16,1	3,74	625	0,4615
M10	25	27,1	27,2	28,1	30,2	2,11	5,96	1,83	226	0,4417
M11	30	33,0	35,5	35,8	33,9	5,41	15,68	3,54	496	0,4217
M12	34	43,1	45,4	44,8	46,2	5,66	18,12	2,49	745	0,3584
M13	29	35,0	39,2	37,9	38,6	5,99	17,32	5,32	869	0,4414
M14	29	36,3	38,9	36,5	35,4	4,05	14,93	3,12	352	0,4544
M15	25	25,2	31,3	33,7	39,4	6,01	14,36	3,93	459	0,4910
M16	23	32,5	37,3	35,2	35,9	3,83	17,69	3,13	367	0,5026
M17	29,5	36,0	37,2	39,0	39,5	2,99	6,27	2,15	293	0,3999
M18	29,5	33,3	36,7	37,3	40,0	5,44	17,71	3,68	490	0,4113
M19	26	29,8	29,6	30,3	35,7	4,45	16,78	4,65	465	0,4642
M20	24	27,2	29,1	30,8	33,7	2,67	6,65	2,10	268	0,4903
M21	24,5	26,4	26,3	26,6	28,9	4,30	16,26	3,64	425	0,4888
M22	29	35,7	37,6	36,6	39,3	4,46	17,36	3,65	517	0,4592
M23	26	23,7	27,2	28,3	31,5	4,73	15,04	3,78	558	0,4099
M24	25	24,6	26,3	26,0	29,5	3,30	16,8	3,00	399	0,4714
M25	27,5	28,3	28,6	28,4	27,6	5,78	13,17	3,57	382	0,4083
M26	26	27,3	29,9	36,9	38,7	3,28	19,48	3,91	422	0,4745
M27	30	42,6	44,8	44,1	47,4	4,88	19,6	3,84	589	0,4668
M28	26,5	31,0	38,4	39,0	41,3	6,14	19,71	5,93	909	0,4462
M29	29	31,9	34,2	37,6	40,1	3,87	19,99	3,08	531	0,4136
M30	27	31,7	34,3	34,4	35,7	3,77	18,87	3,35	388	0,4489

Çizelge 4.4. Mekanik özellikler deney sonuçlarının istatistiksel analizi

Bağımlı değişkenler	Bağımsız değişkenler	RM	R^2	SD	HKT	HKO	F-değeri	P-değeri	Ö	% ρ
Test çekici (N/mm^2)	Sabit	11,90	0,859	1	151,08	151,08	170,58	< 0,0001	E	-
	D	0,04		1	151,08	151,08	170,58	< 0,0001	E	100,0
	Artık değer			28	24,80	0,89				
	Toplam			29	175,88					
28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	Sabit	+36,10	0,998	25	898,09	35,92	67,07	0,0005	E	-
	ÇL	+18,48		1	181,41	181,41	338,68	< 0,0001	E	7,5
	CEL	+26,57		1	86,48	86,48	161,44	0,0002	E	3,6
	SL	-29,25		1	129,42	129,42	241,62	0,0001	E	5,3
	PL	-12,97		1	88,62	88,62	165,44	0,0002	E	3,6
	UK	+7,01		1	66,66	66,66	124,44	0,0004	E	2,7
	EAFC	-10,48		1	120,30	120,30	224,58	0,0001	E	4,9
	D	-2,55		1	113,83	113,83	212,51	0,0001	E	4,7
	ÇL*CEL	-42,26		1	21,49	21,49	40,11	0,0032	E	0,9
	ÇL* SL	-25,25		1	104,53	104,53	195,16	0,0002	E	4,3
	ÇL* PL	+30,99		1	113,25	113,25	211,44	0,0001	E	4,7
	ÇL*UK	+40,64		1	101,96	101,96	190,35	0,0002	E	4,2
	ÇL*EAFC	-32,25		1	103,20	103,20	192,67	0,0002	E	4,2
	ÇL*D	+34,92		1	98,61	98,61	184,10	0,0002	E	4,1
	CEL*SL	+4,37		1	70,32	70,32	131,28	0,0003	E	2,9
	CEL*PL	-111,97		1	104,00	104,00	194,15	0,0002	E	4,3
	CEL*UK	+22,31		1	77,69	77,69	145,05	0,0003	E	3,2
	CEL*EAFC	+155,01		1	108,82	108,82	203,16	0,0001	E	4,5
	SL*PL	+145,18		1	106,01	106,01	197,92	0,0001	E	4,4
	SL*EAFC	-127,81		1	99,18	99,18	185,15	0,0002	E	4,1
	SL*D	-35,29		1	102,88	102,88	192,07	0,0002	E	4,2
	PL*UK	-74,08		1	108,22	108,22	202,04	0,0001	E	4,4
	PL*EAFC	+15,55		1	68,36	68,36	127,63	0,0003	E	2,8
	PL*D	+5,78		1	78,62	78,62	146,77	0,0003	E	3,2
	UK*D	-7,49		1	82,93	82,93	154,82	0,0002	E	3,4
	$ÇL^2$	-2,56		1	96,53	96,53	180,21	0,0002	E	4,0
	Artık değer			4	2,14	0,54				
	Toplam			29	900,23					
180 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	Sabit	-3,40	0,998	25	926,35	37,05	76,33	0,0004	E	-
	ÇL	-1263,58		1	137,5	137,5	283,24	< 0,0001	E	7,7
	CEL	-539,62		1	55,66	55,66	114,66	0,0004	E	3,1
	SL	1824,88		1	91,34	91,34	188,15	0,0002	E	5,1
	PL	-157,16		1	63,32	63,32	130,44	0,0003	E	3,5
	UK	4,42		1	96,37	96,37	198,53	0,0001	E	5,4
	EAFC	-0,62		1	124,96	124,96	257,41	< 0,0001	E	7,0
	D	0,10		1	15,15	15,15	31,2	0,005	E	0,8
	ÇL * CEL	-2289,11		1	81,52	81,52	167,93	0,0002	E	4,5
	ÇL* SL	-1284,60		1	66,04	66,04	136,03	0,0003	E	3,7
	ÇL * PL	1663,23		1	79,67	79,67	164,12	0,0002	E	4,4
	ÇL * UK	16,92		1	62,15	62,15	128,02	0,0003	E	3,5
	ÇL * EAFC	-5,88		1	65,78	65,78	135,51	0,0003	E	3,7
	ÇL* D	4,40		1	61,03	61,03	125,72	0,0004	E	3,4
	CEL * SL	253,19		1	57,68	57,68	118,81	0,0004	E	3,2
	CEL * PL	-5805,66		1	68,26	68,26	140,61	0,0003	E	3,8
	CEL* UK	9,59		1	50,51	50,51	104,06	0,0005	E	2,8
	CEL* EAFC	29,01		1	72,96	72,96	150,3	0,0003	E	4,1
	SL* PL	7566,54		1	70,3	70,3	144,81	0,0003	E	3,9
	SL * EAFC	-23,40		1	63,63	63,63	131,07	0,0003	E	3,5
	SL * D	-4,77		1	73,35	73,35	151,09	0,0003	E	4,1

Çizelge 4.4. (Devam) Mekanik özellikler deney sonuçlarının istatistiksel analizi

	PL* UK	-33,13		1	76,1	76,1	156,75	0,0002	E	4,2
	PL* EAFC	2,77		1	41,42	41,42	85,31	0,0008	E	2,3
	PL * D	0,95		1	82,4	82,4	169,75	0,0002	E	4,6
	UK* D	-0,01		1	62,25	62,25	128,23	0,0003	E	3,5
	$ÇL^2$	-145,41		1	75,88	75,88	156,31	0,0002	E	4,2
	Artık değer			4	1,94	0,49				
	Toplam			29	928,29					
360 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	Sabit	-2,64	0,807	16	778,9	48,68	3,39	0,0159	E	-
	ÇL	-7,14		1	85,71	85,71	5,97	0,0296	E	9,2
	CEL	17,28		1	105,02	105,02	7,31	0,0181	E	11,2
	SL	-51,36		1	27,69	27,69	1,93	0,1884	H	3,0
	PL	52,52		1	35,4	35,4	2,46	0,1405	H	3,8
	UK	1,69		1	127,01	127,01	8,84	0,0108	E	13,6
	EAFC	-0,24		1	131,23	131,23	9,13	0,0098	E	14,0
	D	0,10		1	11,97	11,97	0,83	0,3779	H	1,3
	ÇL * CEL	77,91		1	28,07	28,07	1,95	0,1856	H	3,0
	ÇL * SL	73,70		1	19,99	19,99	1,39	0,2593	H	2,1
	ÇL * UK	-0,39		1	2,03	2,03	0,14	0,7129	H	0,2
	ÇL * EAFC	0,38		1	20,54	20,54	1,43	0,2532	H	2,2
	CEL * UK	-1,91		1	109,92	109,92	7,65	0,016	E	11,8
	SL * PL	-115,39		1	26,64	26,64	1,85	0,1964	H	2,8
	SL * EAFC	0,92		1	96,2	96,2	6,7	0,0225	E	10,3
	PL* EAFC	-0,54		1	52,82	52,82	3,68	0,0774	H	5,7
	UK * D	-0,003		1	55,17	55,17	3,84	0,0718	H	5,9
	Artık değer			13	186,76	14,37				
	Toplam			29	965,66					
720 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	Sabit	12,01	0,917	22	823,54	37,43	3,52	0,0466	E	-
	ÇL	922,42		1	4,09	4,09	0,38	0,5547	H	0,3
	CEL	268,83		1	112,94	112,94	10,62	0,0139	E	7,6
	SL	-1025,22		1	51,29	51,29	4,82	0,0641	H	3,5
	PL	33,43		1	53,96	53,96	5,07	0,059	H	3,6
	UK	0,80		1	83,39	83,39	7,84	0,0265	E	5,6
	EAFC	-0,61		1	73,41	73,41	6,9	0,034	E	4,9
	D	0,06		1	25,24	25,24	2,37	0,1673	H	1,7
	ÇL * CEL	893,91		1	59,27	59,27	5,57	0,0503	H	4,0
	ÇL* SL	593,13		1	67,23	67,23	6,32	0,0401	E	4,5
	ÇL * PL	-620,09		1	44,96	44,96	4,23	0,0788	H	3,0
	ÇL * UK	-11,02		1	74,53	74,53	7,01	0,0331	E	5,0
	ÇL * EAFC	3,01		1	75,49	75,49	7,1	0,0323	E	5,1
	ÇL * D	-2,57		1	88,9	88,9	8,36	0,0233	E	6,0
	CEL * PL	2632,09		1	79,4	79,4	7,47	0,0292	E	5,3
	CEL* UK	-6,97		1	99,96	99,96	9,4	0,0182	E	6,7
	CEL* EAFC	-12,90		1	77,13	77,13	7,25	0,0309	E	5,2
	SL * PL	-3431,80		1	78,47	78,47	7,38	0,0299	E	5,3
	SL* EAFC	12,66		1	90,01	90,01	8,46	0,0227	E	6,1
	SL* D	2,29		1	77,78	77,78	7,31	0,0304	E	5,2
	PL * UK	10,82		1	50,14	50,14	4,72	0,0665	H	3,4
	PL * EAFC	-1,70		1	68,62	68,62	6,45	0,0387	E	4,6
	UK* EAFC	0,01		1	48,99	48,99	4,61	0,069	H	3,3
	Artık değer			7	74,44	10,63				
	Toplam			29	897,98					
Dört Nokta Eğilme Dayanımı (MPa)	Sabit	-2,84	0,994	27	36,78	1,360	11,35	0,0841	H	-
	ÇL	+830,08		1	0,39	0,39	3,22	0,2145	H	3,9
	CEL	+114,73		1	0,44	0,44	3,76	0,1957	H	4,6
	SL	-960,03		1	0,44	0,44	3,70	0,1944	H	4,5

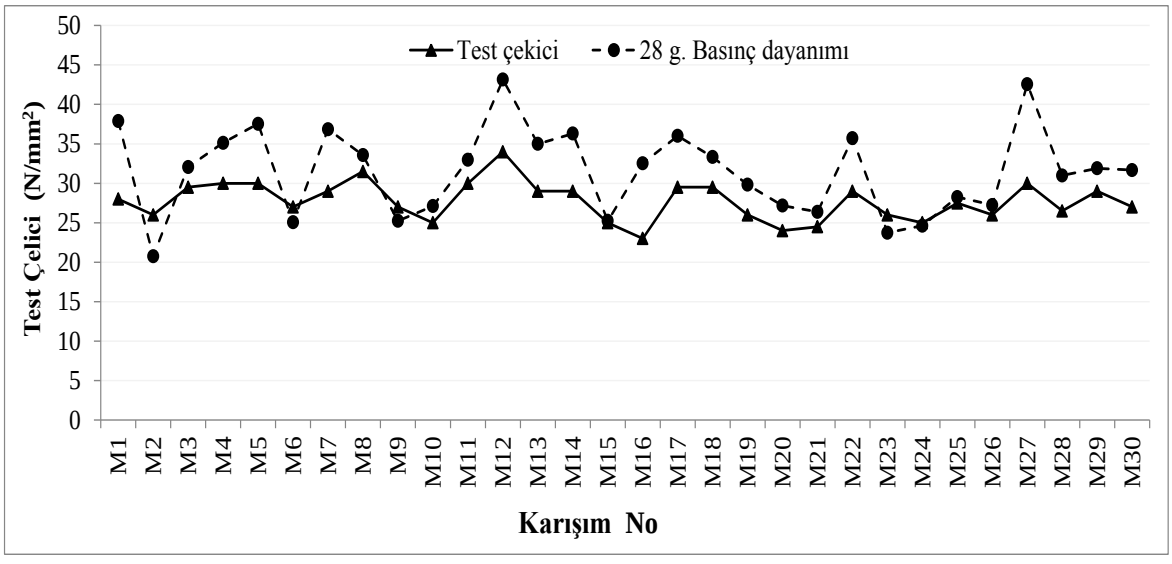
Çizelge 4.4. (Devam) Mekanik özellikler deney sonuçlarının istatistiksel analizi

	PL	+74,87		1	0,50	0,50	4,14	0,1789	H	5,0
	UK	+0,24		1	0,016	0,016	0,13	0,7532	H	0,2
	EAFC	-0,18		1	0,024	0,024	0,20	0,7008	H	0,2
	D	+0,02		1	0,032	0,032	0,26	0,6586	H	0,3
	ÇL * CEL	+1231,35		1	0,46	0,46	3,81	0,1902	H	4,6
	ÇL * SL	+776,44		1	0,50	0,50	4,21	0,1768	H	5,1
	ÇL * PL	-854,54		1	0,50	0,50	4,15	0,1787	H	5,0
	ÇL * UK	-11,86		1	0,44	0,44	3,67	0,1954	H	4,5
	ÇL * EAFC	+3,92		1	0,47	0,47	3,95	0,1851	H	4,8
	ÇL *D	-2,57		1	0,45	0,45	3,72	0,1934	H	4,5
	CEL * SL	-184,53		1	0,44	0,44	3,64	0,1967	H	4,4
	CEL * PL	+2698,35		1	0,41	0,41	3,43	0,2052	H	4,2
	CEL * UK	-6,92		1	0,50	0,50	4,18	0,1776	H	5,1
	CEL * EAFC	-14,07		1	0,43	0,43	3,58	0,1989	H	4,3
	CEL *D	+0,57		1	0,54	0,54	4,54	0,1668	H	5,5
	SL * PL	-3686,88		1	0,43	0,43	3,55	0,2000	H	4,3
	SL * UK	-1,44		1	0,19	0,19	1,61	0,3325	H	2,0
	SL *EAFC	+11,84		1	0,42	0,42	3,49	0,2026	H	4,2
	SL *D	+2,51		1	0,41	0,41	3,43	0,2054	H	4,2
	PL * UK	+17,68		1	0,45	0,45	3,79	0,1910	H	4,6
	PL *EAFC	-1,44		1	0,34	0,34	2,81	0,2355	H	3,4
	PL *D	-0,48		1	0,17	0,17	1,46	0,3508	H	1,8
	UK *EAFC	+0,006		1	0,29	0,29	2,41	0,2604	H	2,9
	UK *D	-0,0007		1	0,18	0,18	1,50	0,3460	H	1,8
	Artık değer			2	0,24	0,12				
	Toplam			29	37,1					
Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	Sabit	2,4	0,878	5	21,56	21,56	34,49	< 0,0001	E	-
	ÇL	2,04		1	5,12	5,12	40,94	< 0,0001	E	25,6
	CEL	2,65		1	7,33	7,33	58,63	< 0,0001	E	36,6
	SL	2,65		1	5,56	5,56	44,49	< 0,0001	E	27,8
	PL	0,91		1	0,74	0,74	5,89	0,0231	E	3,7
	UK	-0,02		1	1,27	1,27	10,18	0,0039	E	6,4
	Artık değer			24	3	0,12				
	Toplam			29	24,55					
Çekip Çıkarma-Pull Out (kg)	Sabit	+427,68	0,825	5	$8,132*10^5$	$1,626*10^5$	22,67	< 0,0001	E	-
	ÇL	+39,34		1	$1,221*10^5$	$1,221*10^5$	17,02	0,0004	E	16,5
	CEL	+50,90		1	$1,671*10^5$	$1,671*10^5$	23,29	< 0,0001	E	22,6
	SL	+37,95		1	87337,45	87337,45	12,17	0,0019	E	11,8
	PL	+39,73		1	96050,55	96050,55	13,39	0,0012	E	13,0
	D	+95,94		1	$2,665*10^5$	$2,665*10^5$	37,15	< 0,0001	E	36,1
	Artık değer			24	1,72*105	7174,01				
	Toplam			29	9,85*105					
Aşınma Oranı (%)	Sabit	+0,45	0,795	2	0,027	0,014	52,41	< 0,0001	E	-
	EAFC	+0,0084		1	0,0012	0,0012	4,68	0,0394	E	4,3
	D	-0,030		1	0,027	0,027	103,02	< 0,0001	E	95,7
	Artık değer			27	0,007	$2,592*10^{-4}$				
	Toplam			29	0,034					

RM: regresyon modeli, R^2: korelasyon katsayısı, SD: serbestlik derecesi, HKT: hatalar karesi toplamı, HKO: hatalar karesi ortalaması, Ö: Önemlilik (p<0,05 ise E: Evet, p>0,05 ise H: Hayır)

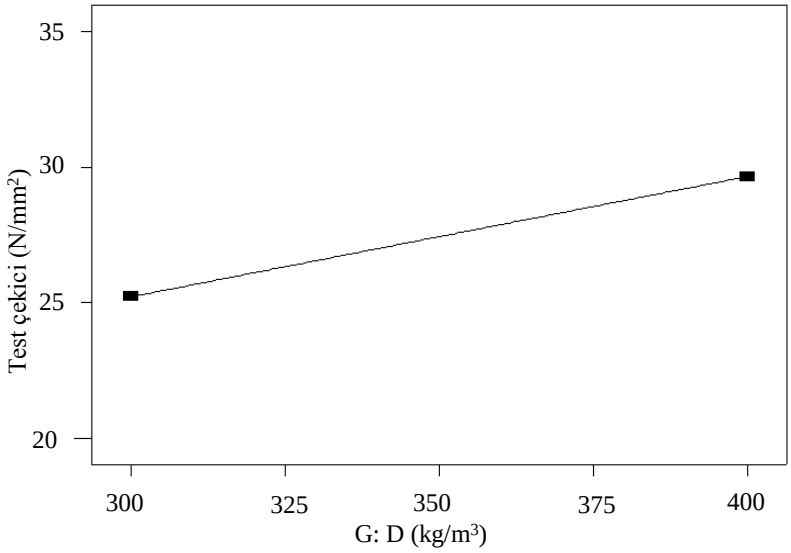
4.3.1. Test çekici (Schmidth)

HLB numuneler üzerinde yapılan test çekici deneyinde okunan geri sıçrama sayılarına karşılık gelen dayanım değeri hesaplanarak Çizelge 4.3'de verilmiş ve Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Test çekici üzerinden alınan okumalara karşılık gelen dayanım değerleri arasında çok fark olmadığı gözle görülebilmektedir (Şekil 4.5). Bu nedenle test çekici deney sonuçlarının varyans analizi yapılarak hangi parametrenin daha etkin olduğu incelenmiştir. Çizelge 4.4'de deney sonuçlarının istatistiksel analizi verilmiştir. Test çekicinden faydalanılarak basınç dayanımını belirlemek için lineer regresyon modeli oluşturulmuş ve Eş. 4.5'de gösterilmiştir. Geriye dönük eleme (backward elimination) yöntemiyle analiz yapıldığından %95 güvenik düzeyinde etkisi az olan veya hiç olmayan parametreler regresyon modeline dâhil edilmemiştir. Regresyon modelinde sadece dozaj (D) bağımsız değişkeninin olması ile test çekici deney sonuçlarını %95 güvenlik düzeyinde etkileyen tek parametrenin D olduğu anlaşılmıştır. (ρ=%100). D bağımsız değişkeninin test çekici deney sonuçlarına olan etkisi Şekil 4.6'de gösterilmiştir. D'nin artmasına bağlı olarak test çekicinden okunan değer artmıştır ve bu bulgu literatür çalışmaları ile de örtüşmektedir (Nepomuceno, ve Bernardo, 2019). Aynı HLB numuneler basınç testine tabii tutularak 28 günlük basınç dayanımları da belirlenmiştir. Basınç dayanımı ile test çekici deney sonuçları arasındaki ilişki Şekil 4.5'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. HLB test çekici sonuçları

Test çekici = 11,9 + 0,04*D (4.5)



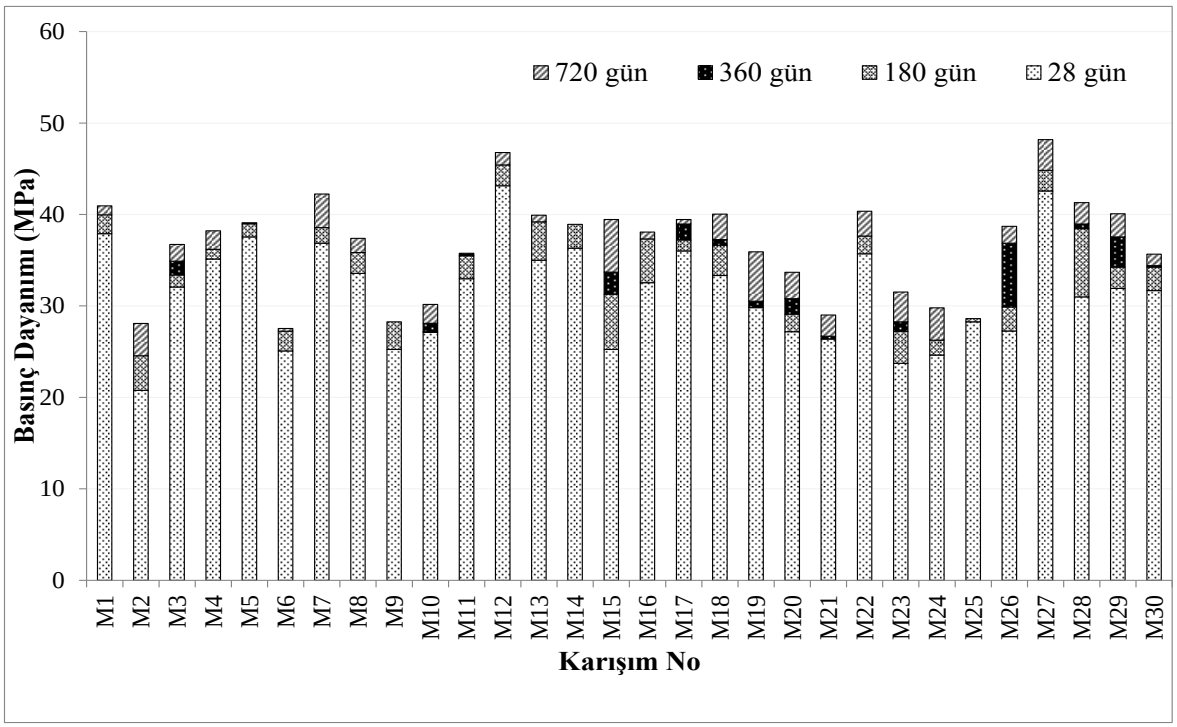
Şekil 4.6. Bağımsız değişkenin test çekici deney sonuçlarına etkisi

4.3.2. Basınç dayanımının zamana bağlı değişimi

Zamana bağlı basınç dayanımında meydana gelen değişimleri tespit etmek için 28, 180, 360 ve 720 günlük HLB numuneler teste tabi tutulmuştur. Deney sonuçları Çizelge 4.3'de verilmiştir. Şekil 4.7'de HLB numunelerin zamana bağlı dayanım kazanma miktarları ve nihai dayanımları gösterilmiştir. Her renk tonlamasının üst sınırı ilgili seviyedeki basınç dayanımını ifade etmektedir. Örneğin M2 numunesinin 28 günlük basınç dayanımı 20 MPa seviyelerinde iken, 180 günlük basınç dayanımı 24,6 MPa, 720 günlük basınç dayanımı ise 26,5 MPa olarak okunabilmektedir. M10, M17 ve M20 karışımlarında hiç lif olmadığından kontrol numunesi olarak kabul edilmişlerdir. Bu numunelerde bağlayıcı dozajı, EAFS oranı ve FA oranı diğer karışımlardan farklılık göstermektedir. HLB numunelerin 28 günlük dayanımları referans kabul edilip basınç dayanımı artışı oransal olarak Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Örneğin M15 kodlu HLB numunelerin 180 gün sonunda %24, 360 gün sonunda %33 ve 720 gün sonunda %56 oranında basınç dayanımlarında artış görülmüştür. Şekil 4.8 incelendiğinde, M2, M15 ve M26 UK ikame oranları sırasıyla %25, %30 ve %40 olan numunelerinin basınç dayanımı artış oranının (sırasıyla% 27,5, % 56,28 ve % 42) 180, 360 ve 720 günlerde en yüksek olduğu görülmektedir. Bunun uzun vadede, UK içeren matris ve liflerin iyi bağlanması neticesinde olduğu düşünülmektedir (Afroz, Venkatesan ve Patnaikuni, 2019). Jiang, Yılmaz, Liu ve Qiu, (2020), zamanla dayanım artışının UK içeriğine önemli ölçüde bağlı olduğunu belirtmiştir. UK'nın eklenmesi, yer değiştirme

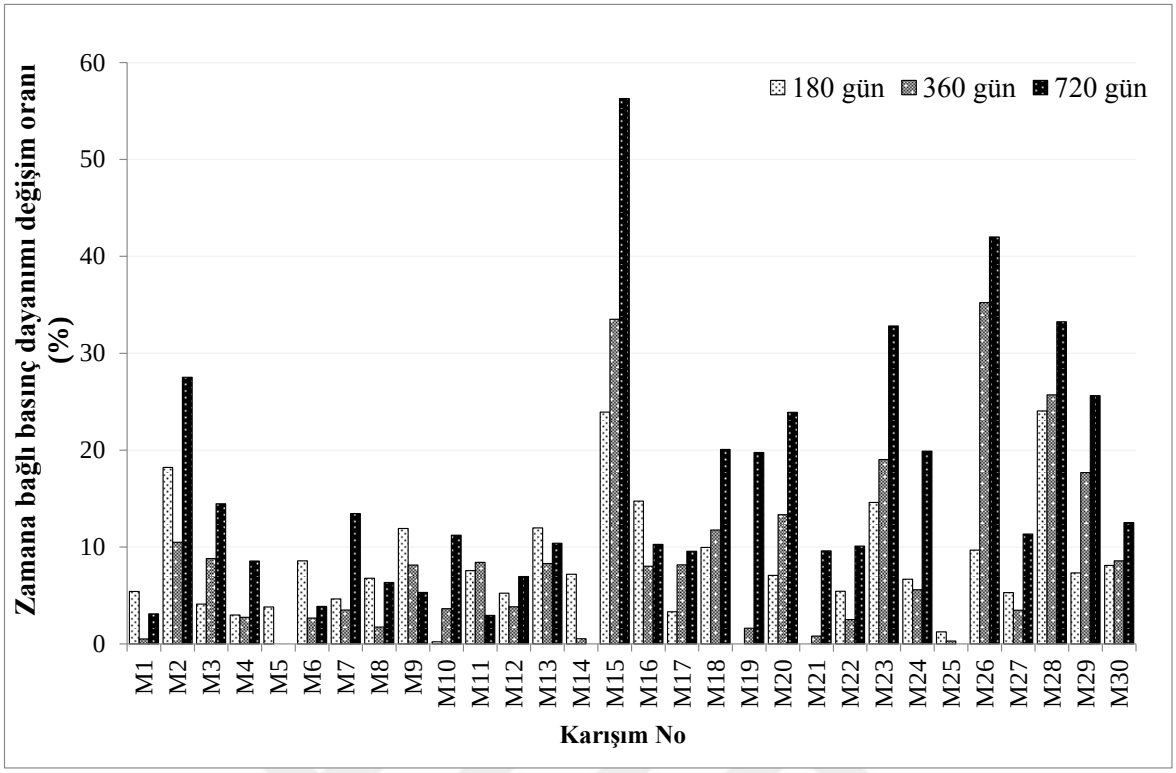
seviyesine ve servis ömrü süresine bağlı olarak betonların mukavemetini artırabilir veya azaltabilir.

Lif katkısı ile HLB'lerin basınç dayanımının daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumun nedenini Tawfiq, Jamshid ve Rodolfo (1999), monofilament liflerin yüksek Young modülüne sahip olduğu ve bu nedenle basınç yüklerine karşı daha dirençli davrandıkları şeklinde açıklamışlardır. Monofilament tipi liflerin beton içinde yayılması ile çatlaklar arasındaki ağın kolayca oluşturulabildiğini ve çatlak hatlarındaki gerilme konsantrasyonunun azaldığını ifade etmişlerdir.



Şekil 4.7. HLB numunelerin zamana bağlı dayanım kazanma miktarları ve nihai dayanımları

HLB numunelerin 28, 180, 360 ve 720 günlük basınç dayanımı için sırası ile kuadratik, kuadratik, 2FI ve 2FI regresyon modelleri oluşturulup deney sonuçlarına varyans analizi uygulanarak istatistiksel olarak anlamlı değerlendirmeler yapılmıştır. HLB'Lerin zamana bağlı değişimlerinin istatistiksel analizi Çizelge 4.4'de verilmiştir ve her bağımsız değişkenin bireysel ve/veya etkileşimlerinin etki ağırlıkları belirtilmiştir.



Şekil 4.8. HLB basınç dayanımlarının zamana bağlı artış oranları

Testin gerçekleştirildiği dört farklı zaman için ayrı ayrı regresyon modelleri oluşturulmuş ve Eş. (4.6), Eş (4.7), Eş. (4.8) ve Eş. (4.9)'da verilmiştir. Denklemleri sadeleştirmek için istatistiksel olarak önemli olmayan parametreler eşitliklerde elenmiştir.

Basınç dayanımı (28 günlük) = +36,10 + 18,48*ÇL + 26,57*CEL - 29,25*SL - 12,97*PL - 10,48*EAFC – 2,55*D - 25,25* ÇL * SL + 30,99* ÇL * PL + 40,64* ÇL *UK - 32,25* ÇL * EAFC + 34,92* ÇL *D - 111,97* CEL * PL + 22,31* CEL * UK + 155,01* CEL * EAFC + 145,18* SL * - 127,81* SL * EAFC - 35,29* SL *D - 74,08*PL* UK + 5,78* PL *D - 7,49* UK *D - 2,56* $ÇL^2$ (4.6)

Basınç dayanımı (180 günlük) = -3,4-1263,58*ÇL – 539,62*CEL + 1824,88*SL – 157,16*PL +4,42*UK -0,62* EAFC +0,1*D – 2289,11*ÇL*CEL – 1284,6*ÇL*SL + 1663,23* ÇL*PL +16,92*ÇL*UK – 5,88*ÇL*EAFC+ 4,4*ÇL*D + 253,19*CEL*SL - 5805,66*CEL*PL + 9,59*CEL*UK+ 29,01*CEL*EAFC +7566,54* SL*PL – 23,4*SL*EAFC – 4,77*SL*D – 33,13*PL*UK+ 2,77*PL*EAFC+ 0,95*PL*D-0,01*UK*D-145,41*$ÇL^2$ (4.7)

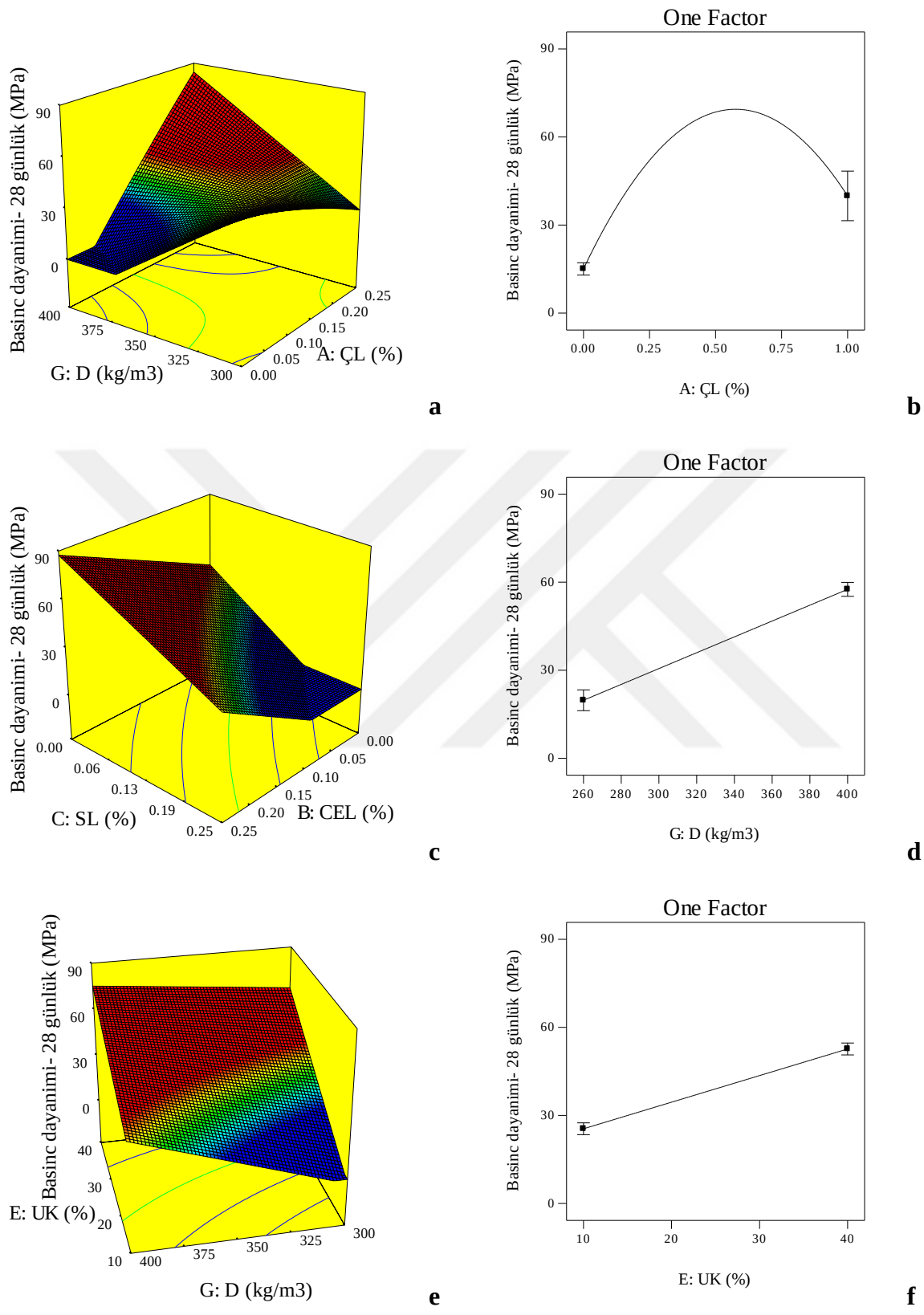
Basınç dayanımı (360 günlük) = -2,64-7,14*ÇL+17,28*CEL+1,69*UK-0,24*EAFC-1,91*CEL*UK+0,92SL*EAFC (4.8)

Basınç dayanımı (720 günlük) = 12,01 + 268,83*CEL + 0,80*UK - 0,61*EAFC + 593,13ÇL*SL - 11,02*ÇL*UK + 3,01*ÇL*EAFC - 2,57*ÇL*D + 2632,09*CEL*PL - 6,97*CEL*UK - 12,90*CEL*EAFC - 3431,8*SL*PL + 12,66*SL*EAFC + 2,29*SL*D - 1,70*PL*EAFC (4.9)

28 günlük basınç dayanımı üzerinde en yüksek etki oranına (%ρ) sahip bağımsız değişkenlerin tek ve ikili etkileşimleri Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Şekil 4.9a, SL ve D'nin basınç dayanımı üzerindeki ikili etkileşimini göstermektedir. Çelik lif içeriği %0,15'i, bağlayıcı dozajı 350 kg/m^3'ü aştıktan sonra basınç dayanımında önemli artışların olduğu görülmüştür. Bu durum, ÇL'nin basınç dayanımı üzerindeki bireysel etkisini göstermiştir. Belli bir eşik değerini aştıktan sonra basınç dayanımı azalmaya başlamıştır. Optimum ÇL katkı oranının %0,6 civarında olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.9b). Şekil 4.9c, SL ve CEL'nin ikili etkileşimi ile basınç dayanımındaki değişiklikleri göstermektedir. Çizelge 4.4 ve Şekil 4.9c'de açıkça görülmektedir. SL ve CEL'nin birlikte kullanılması ile basınç dayanımının azaldığı belirlenmiştir. SL ve CEL'nin birlikte kullanımı önemli bir etki oranına (%2,9) sahip değil iken SL'nin tek başına kullanımının basınç dayanımı üzerindeki etki oranı %5,3'dur. Basınç dayanımının D ve beton içeriğinden doğrudan etkilendiği görülmektedir (Şekil 4.9a, Şekil 4.9d). Fall ve Benzaazoua (2005)'nın belirttiği gibi içeriğinde UK bulunan ve bağlayıcı dozajı yüksek olan betonlarda UK'nın puzolanik reaksiyonu sonucunda ikincil kalsiyum-silikat-hidrat (C–S–H) jellerinin oluşumuna katkıda bulunur ve basınç dayanımı artar.

Şekil 4.9d ve Şekil 4.9f'de D ve UK'nın bireysel etkilerinden görüldüğü gibi, basınç dayanımı UK ve D arttıkça artmıştır. Basınç dayanımını artırmak için bağlayıcı dozajı düşük olan (300 kg/m^3) HLB'lerde UK miktarı arttırılmalı ve yüksek dozajlı (400 kg/m^3) HLB'lerde UK miktarı sınırlandırılmalıdır (Şekil 4.9e).

Bağımsız değişkenlerin HLB'lerin 180, 360 ve 720 günlük basınç dayanımlarına olan etkileri de 28 günlük dayanıma olan etkileri ile benzerlik gösterdiğinden ayrıca detaylandırılmamıştır.

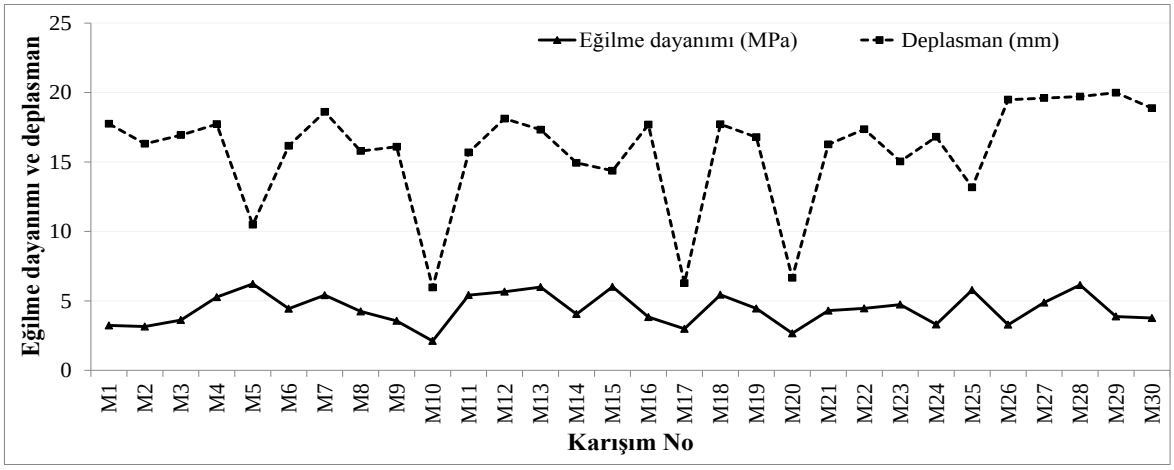


Şekil 4.9. İstatistiksel olarak anlamlı parametrelerin 28 günlük basınç dayanımına etkisi

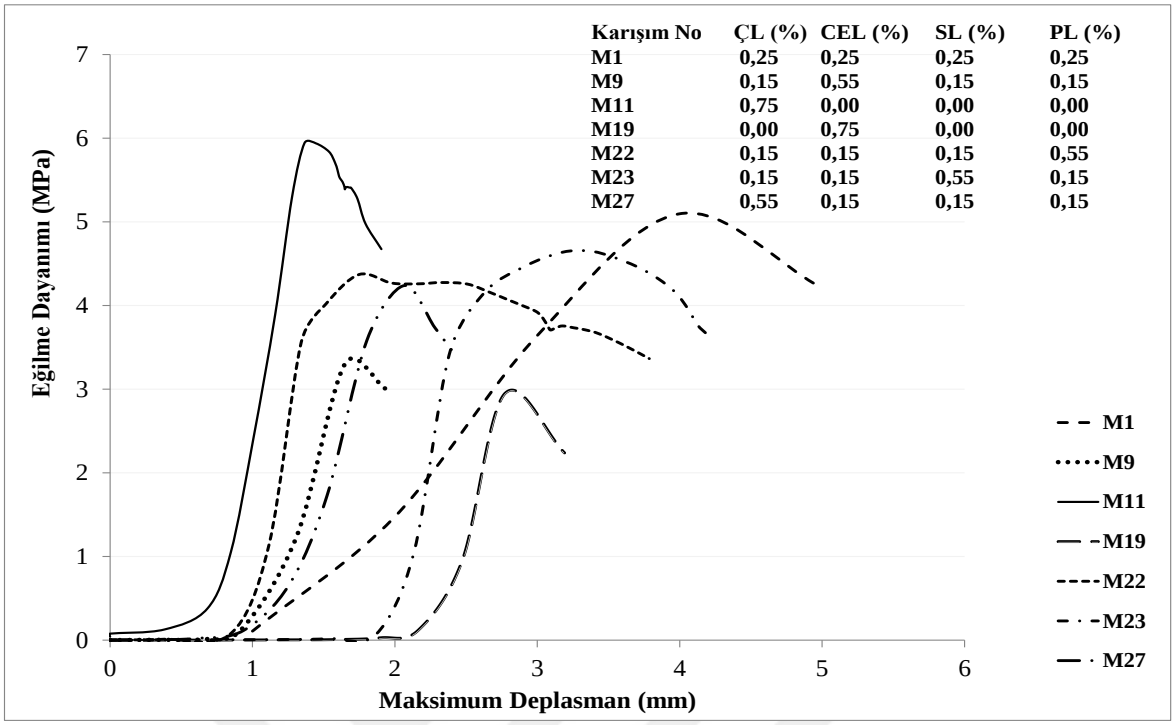
4.3.3. Dört noktadan eğilme dayanımı ve deplasman ölçümü

Dört nokta eğilme dayanımı testi, Çizelge 3.5'de belirtilen koşullara göre üretilen 28 günlük 100 mm x 100mm x 500 mm prizmatik numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş ve test sonuçları Çizelge 4.3'de verilmiştir. Şekil 4.10'da HLB numunelerin eğilme dayanımları ve eğilme esnasında yapmış oldukları maksimum deplasman değerleri gösterilmiştir. Şekil 4.10'da lifsiz HLB (kontrol) numunelerinin (M10, M17 ve M20) diğer HLB numunelere kıyasla eğilme dayanımlarının ve deplasman değerlerinin daha düşük olduğu gösterilmiştir. Liflerin hibritlenmesi ile betonların hem tokluğu hem de eğilme mukavemeti büyük ölçüde artırılabilir (Junior, Ferreira, Toledo, Fairbairn ve Dweck, 2019; Xue, Yılmaz, Song ve Cao, 2019).

Betonun deplasman yeteneği lif türü ve katkı oranından doğrudan etkilenmiştir. Şekil 4.11'de, farklı lif türlerin hibritlenmesi ile üretilen ve toplam lif hacmi %1'i aşmayan HLB örnekleri seçilerek deplasman-eğilme dayanımı arasındaki ilişki gösterilmiştir. İçeriğinde sadece %0,75 oranında ÇL (M11), %0,75 CEL (M19), dört lif türünden biri diğerlerinden fazla olan kombinasyonları bulunan (M9, M22, M23 ve M27) ve her lif türünün eşit olarak bulunduğu (M1), numunelerinin davranışları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.11 incelendiğinde, tokluk değeri (eğrinin altında kalan alan) en yüksek olan HLB'nin her lif türünün eşit ve az miktarda bulunduğu M1 numunesi olduğu görülmektedir. Literatür çalışmalarında da hibrit formda lif ilavesi, tekil lifli betonlarla karşılaştırıldığında enerji yutma kapasitesi, süneklik ve dayanıklılık açısından betonun mühendislik özelliklerini arttırdığı görülmüştür (Pakravan, Latifi ve Jamshidi, 2017; Singh ve Rai, 2018).



Şekil 4.10. HLB numunelerin dört nokta eğilme dayanımları ve deplasman değerleri



Şekil 4.11. HLB'lerin eğilme dayanımı ve deplasman arasındaki ilişkisi

Deney sonuçlarına ANOVA uygulanarak bağımsız değişkenlerin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Eğilme dayanımını temsil eden 2FI (iki faktörlü etkileşim) regresyon modeli elde edilmiştir. Regresyon modelinde tüm bağımsız değişkenler arasındaki fark istatistiksel olarak anlamsız olduğundan model sadeleştirmeye gidilmeden Eş. (4.10)'da verilmiştir.

Eğilme dayanımı (MPa) = -2,84 + 830,08*ÇL + 114,73*CEL - 960,03*SL + 74,87*PL + 0,24*UK - 0,18*EAFC + 0,02*D +1231,35*ÇL*CEL + 776,44*ÇL*SL -854,54*ÇL*PL - 11,86*ÇL*UK + 3,92*ÇL*EAFC - 2,57*ÇL*D - 184,53*CEL*SL + 2698,35*CEL*PL - 6,92*CEL*UK - 14,07*CEL*EAFC + 0,57*CEL*D - 3686,88*SL*PL - 1,44*SL*UK + 11,84*SL*EAFC + 2,51*SL*D + 17,68PL*UK - 1,44*PL*EAFC - 0,48*PL*D + 0,006*UK*EAFC - 0,0007*UK*D (4.10)

Eğilme dayanımının istatistiksel analizi Çizelge 4.4'de verilmiştir. Çizelge 4.4'de görüldüğü üzere, her bağımsız değişken eğilme dayanımı üzerinde bir etkiye sahiptir. Şekil 4.12'de bağımsız değişkenlerin bireysel etkilerinin eğilme dayanımına olan etkileri gösterilmiştir. Tüm lif türleri, UK, EAFC ve D eğilme dayanımını artırma eğilimi göstermiştir. Liflerin ve bağlayıcı dozajının etkisi UK ve EAFC'ye göre daha fazladır

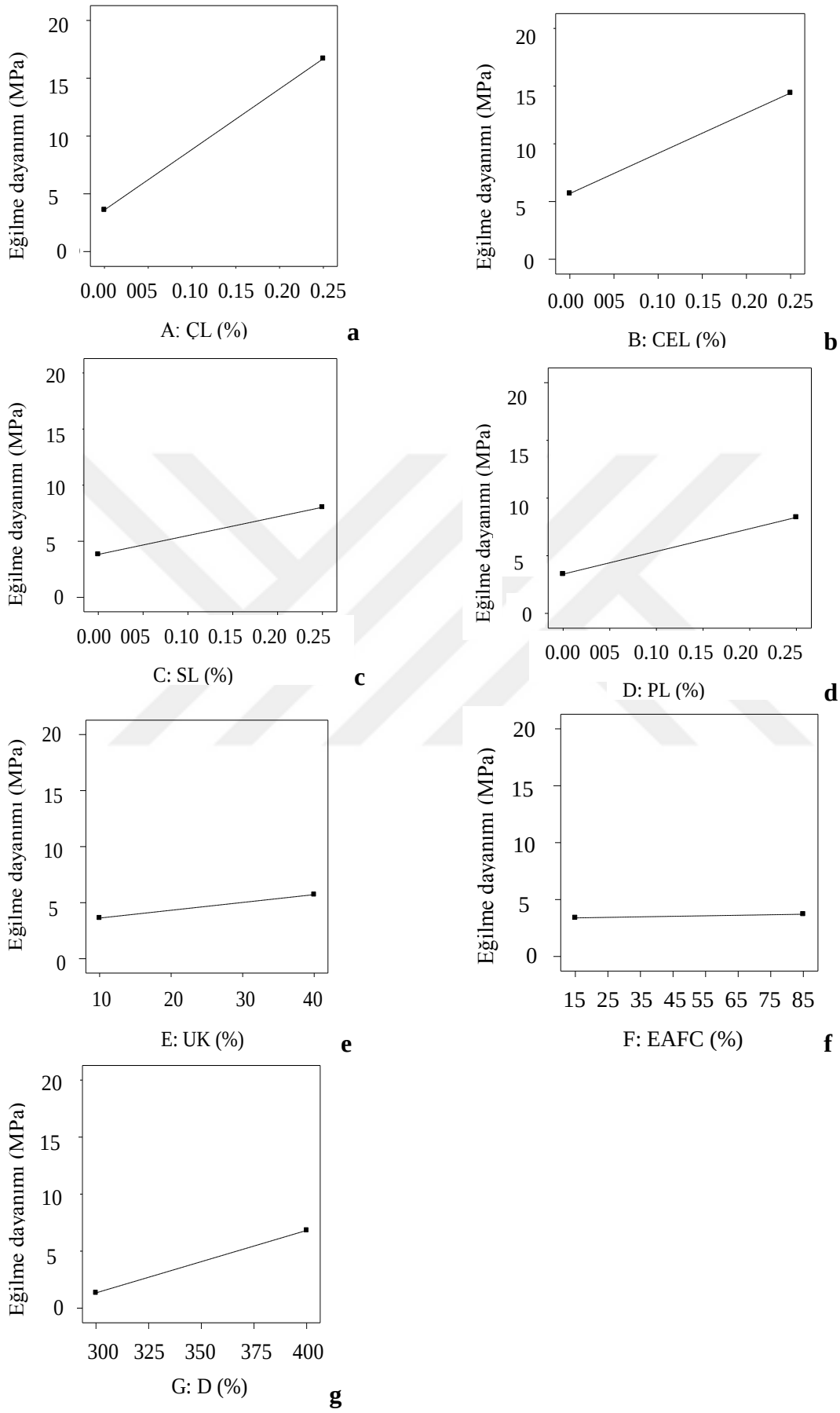
(Çizelge 4.4, Şekil 4.12). Lif katkısının eğilme dayanımına etki oranının diğer parametrelerden (UK, EAFC ve D) daha fazla olduğu yani eğilme dayanımına daha fazla katkı sunduğu tespit edilmiştir. ÇL, CEL, SL ve PL sırası ile %3,9, %4,6, %4,5 ve %5 etki ağırlığına sahip iken UK, EAFC ve D sırası ile %0,2, %0,2 ve %0,3 (yok denecek kadar az) etki oranına sahiptir. Başka bir deyişle, eğilme dayanımı çoğunlukla lif içeriği ve tipinden etkilenmiştir. Bağımsız değişkenlerin bireysel etkilerinin yanı sıra ikili etkileşimleri de eğilme dayanımı üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Lif türlerinin birbirleri ile ve diğer parametrelerle olan ÇL-SL, SL-PL, CEL-UK ve CEL-D gibi etki ağırlığı yüksek olan etkileşimleri seçilmiş, eğilme dayanımına olan etkileri Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Şekil 4.13a'dan anlaşıldığı üzere %0,1 CEL katkısı ile UK yer değiştirme oranı %40'a kadar çıkarılarak eğilme dayanımı üzerinde pozitif katkı sağlanabilmektedir. Katkı malzemesinin içeriğine ve miktarına göre eğilme dayanımı hakkında Şekil 4.13 kullanılarak fikir sahibi olunabilir.

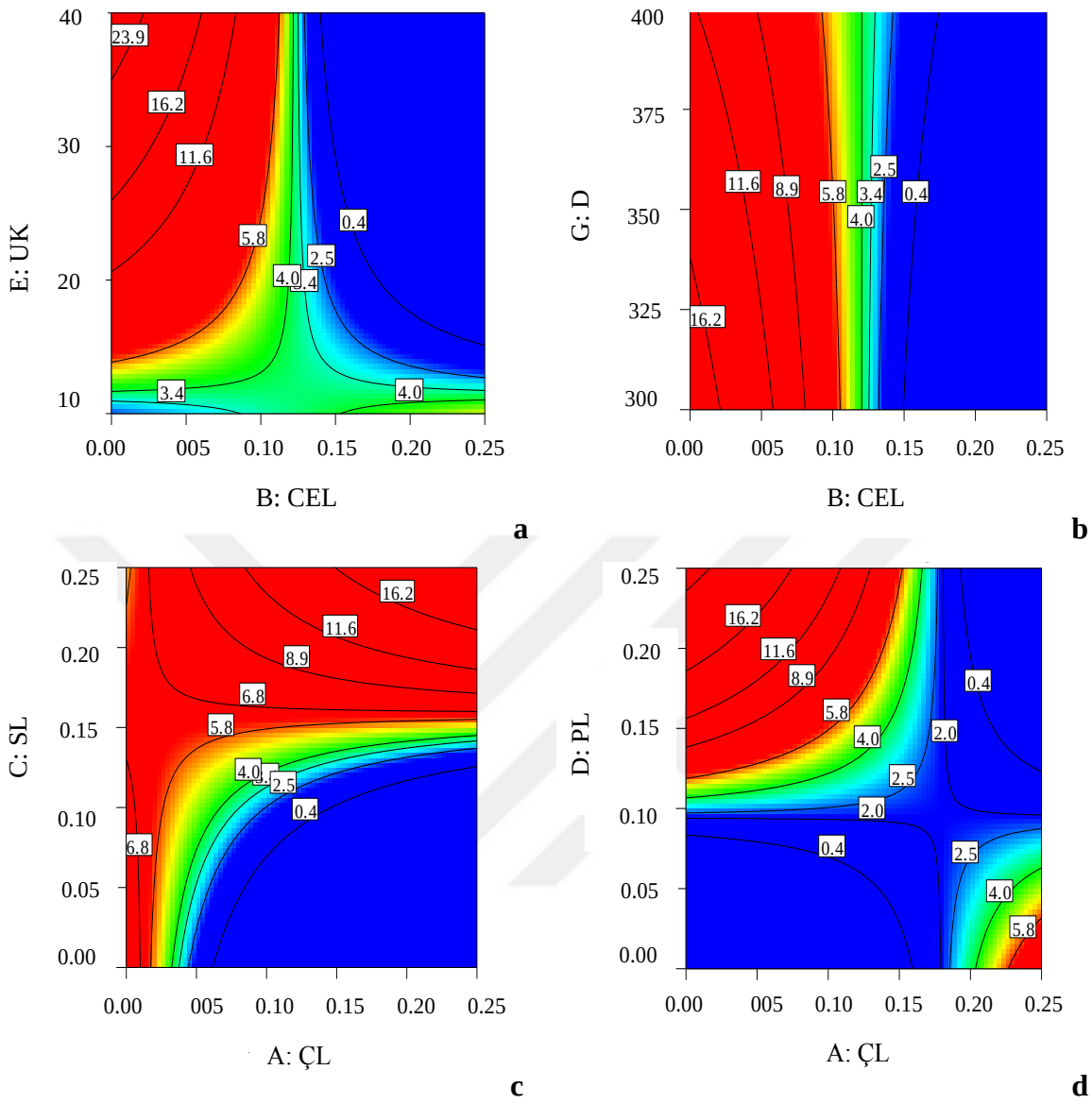
UK içeriği ve CEL oranının birlikte artması ile eğilme dayanımının azaldığı görülmüştür. Şekil 4.13b'de CEL-D ikili etkileşimin eğilme dayanıma olan etkisi gösterilmiştir. Tüm dozaj seviyelerinde CEL oranı %0,1'in üzerine çıktıktan sonra eğilme dayanımında azalmanın olduğu tespit edilmiştir. ÇL, SL ile birlikte kullanılırsa Şekil 4.13c'de görüldüğü gibi lif kullanımı için eşik değerler SL için %0,15 ve ÇL için %0,5 olmalıdır. Yani bu değerlerin altında istenen dayanım değerlerine ulaşmak mümkün olmayabilir.

Yaygın olarak kullanılan ÇL için diğer bir hibrit arkadaş ise PL'dir. ÇL, PL ile birlikte kullanılırsa Şekil 4.12d'ye göre ÇL kullanım oranı %0,15'i aşmamalı ve PL oranı %0,1'den fazla olmalıdır.

İstatistiksel analiz sonuçları, liflerin hibritlenmesi ile üretilen betonların eğilme dayanımının tekil lif ile üretilen betonların eğilme dayanımına kıyasla daha yüksek olduğunu göstermiştir. Literatür çalışmaları da bu bulguyu destekler niteliktedir (Song, Wu, Hwang ve Sheu, 2005). Singh ve Rai (2018), aynı özellikteki betonun, liflerin tekil kullanımı yerine hibritlenmesi ile daha az miktarda lif kullanılarak üretilebileceğini ifade etmişlerdir. Banthia ve Rai (2004), hibridizasyon yöntemi ile çok düşük oranda lif kullanarak tek tip lif ile üretilen betonlardan elde edilen performansın yakalanabileceğini belirtmişlerdir.



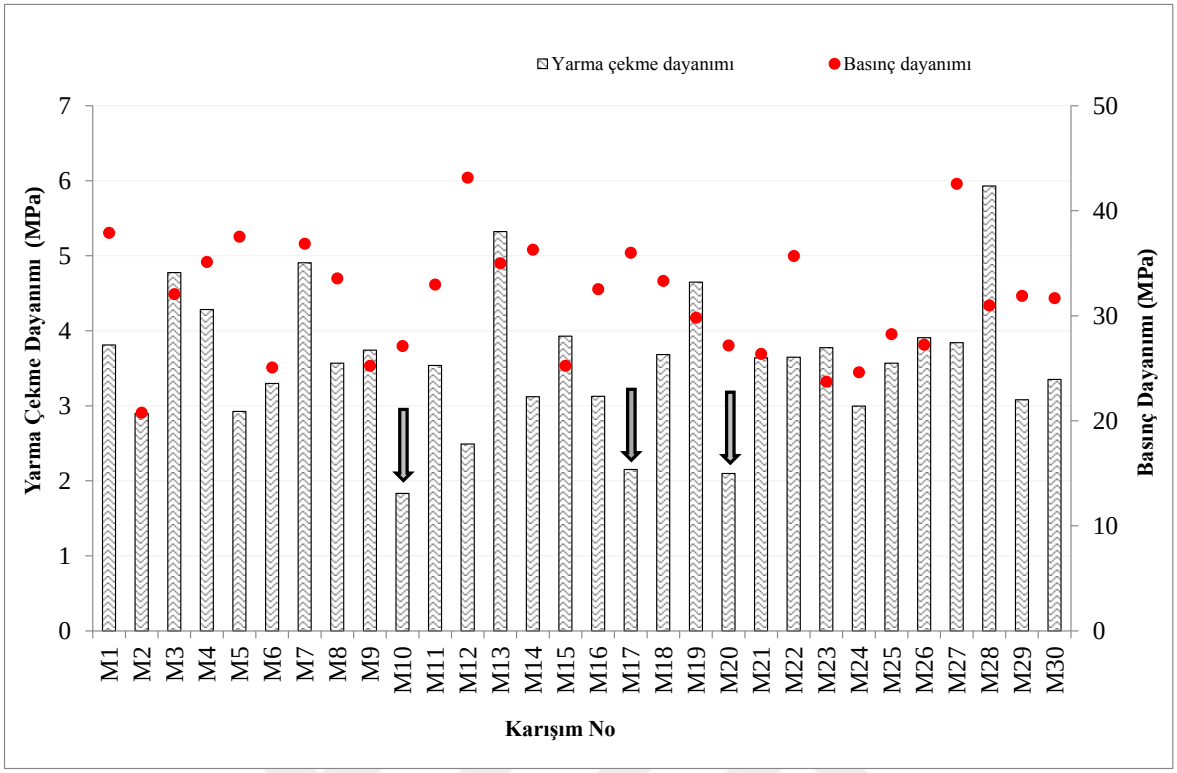
Şekil 4.12. HLB eğilme dayanımına bağımsız değişkenlerin bireysel etkileri



Şekil 4.13. HLB eğilme dayanımına bağımsız değişkenlerin ikili etkileşimleri

4.3.4. Yarmada çekme dayanımı

HLB numunelerin YÇD test sonuçları Çizelge 4.3'de verilmiştir. Şekil 4.14'de HLB numunelerin YÇD ve basınç dayanımları gösterilmiştir. M10, M17 ve M20 kodlu numunelerde lif bulunmadığından (kontrol grubu) YÇD en düşüktür. Buradan lif katkısının çekme dayanımı artışına pozitif katkı sağladığı görülmüş ve literatür çalışmaları ile de desteklenmiştir (Karahan, Durak, İlkentapar, Atabey ve Atiş, 2019; Ismail, Hassan ve Lachemi, 2018; Iskhakov ve Ribakov, 2019).



Şekil 4.14. HLB numunelerin yarmada çekme ve basınç dayanımları

En yüksek lif içeriğine sahip olan M28 (%2) numunesinin YÇD en yüksek iken, hiçbir fazı (agrega ve bağlayıcı) hibridize edilmemiş ve hiç lif içermeyen M10 numunesinin YÇD en düşüktür (Çizelge 4.3, Şekil 4.14). Farklı lif türlerinin değişen oranlarda karışıma eklenmesi ile HLB'lerin YÇD önemli ölçüde değişmiştir. Geleneksel betonda basınç ve çekme dayanımını tanımlayan sabit katsayılar tanımlanmıştır (Falade ve Iqbal, 2019; Kılıç, Teymen, Özdemir ve Atiş, 2019; Akinpelu, Odeyemi, Olafusi ve Muhammed, 2019).

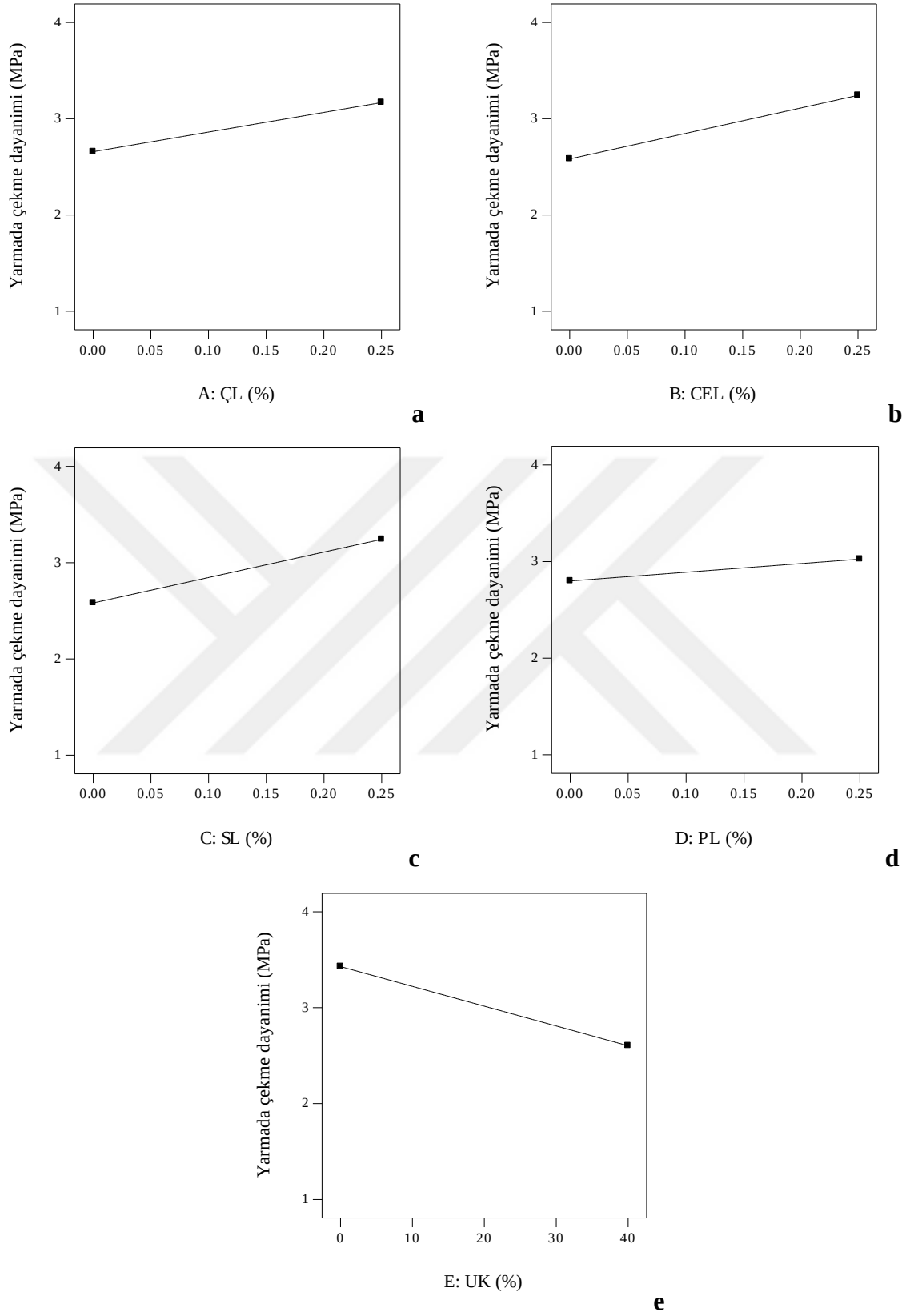
Ancak farklı özellikteki liflerin bir arada kullanıldığı HLB'ler için sabit bir katsayı belirlenememiştir. Her lif türünün elastisite modülü ve çekme mukavemeti farklı olduğundan, HLB numunelerin çekme dayanımı da lif özelliğine bağlı olarak değişmiştir.

Şekil 4.14'den görüldüğü gibi, basınç dayanımı düşük olan numunelerin eğilme dayanımı da düşük olur fikri HLB numuneler için gerçeği yansıtmamıştır. Bu nedenle YÇD üzerinde hangi parametrenin daha etkili olduğunu belirlemek için deney sonuçlarının varyans analizi yapılmış, lineer regresyon modeli oluşturulmuştur (Eş. 4.11). Çizelge 4.5'de YÇD sonuçlarının istatistiksel analizi verilmiştir. HLB numunelerin YÇD'yi etkileyen en önemli parametrenin CEL (ρ=%36,6) ve en az etkili parametrenin PL (ρ=%3,7) olduğu

belirlenmiştir (Çizelge 4.5). Narinlik oranı en yüksek olan lif türü CEL olduğundan beton içerisinde bulunan lif sayısının fazla olması ile köprü görevi gören tane tayısı da fazladır. Bu nedenle CEL yük aktarımında daha etkin rol oynamıştır. Etki ağırlıkları göz önüne alındığında YÇD'yi en fazla etkileyen bağımsız değişkenler sırasıyla CEL, SL, ÇL, UK ve PL'dir. Bağımsız değişkenlerin YÇD davranışına olan eğilimleri Şekil 4.15'de gösterilmiştir. Tüm lif türleri YÇD'ye pozitif katkı yaparken UK kullanımı ile negatif yönde bir etki meydana gelmiştir. Deney 28 günlük numuneler üzerinde yapıldığından UK ikame oranı arttıkça çimentonun hidratasyon ürünlerinin azalması ile dayanım kazandıran kalsiyum-silikat hidrat jellerinin oluşumu azalmıştır. Dolayısı ile HLB numunelerin YÇD değerleri düşük çıkmıştır (Şekil 4.15a-e). Daha ileriki yaşlarda deney yapılsaydı UK ikame oranının YÇD üzerinde muhtemel pozitif etkisinin olması beklenebilirdi.

Bu bulguların literatür çalışmaları ile uyum içinde olduğu görülmüştür. (Köksal, Şahin, Gencel ve Yiğit, 2013; Dong ve diğerleri, 2020; Ye, Liu, Zhang, Wang, ve Peng, 2020; Singh ve Rai, 2020; Anto, Vigneshkannan, Devananth, ve Manju,2020; Prakash, Thenmozhi, Raman, ve Subramanian, 2020). %95 güvenlik düzeyinde geriye doğru eleme yöntemi ile regresyon modeli oluşturulmuştur. Bu aşamada bağımsız değişkenlerin tümü modele dâhil edilerek her birinin etkisi teker teker analize alınır ve etkisi olmayan parametreler modelden çıkarılır. Etkisi bulunmayan veya yok denecek kadar az olan bağımsız değişkenler oluşturulan regresyon modeline dâhil edilmez. Bu nedenle regresyon modeline dâhil edilmeyen bağımsız değişkenler (EAFC ve D) Çizelge 4.4'de verilmemiştir. Çizelge 4.4'de "Ö" ile belirtilen sütun ilgili parametrenin istatistiksel olarak önemli olup olmadığını (E: Evet, H: Hayır) ifade etmektedir. YÇD için regresyon modelinde bulunan tüm parametreler istatistiksel olarak önemlidir.

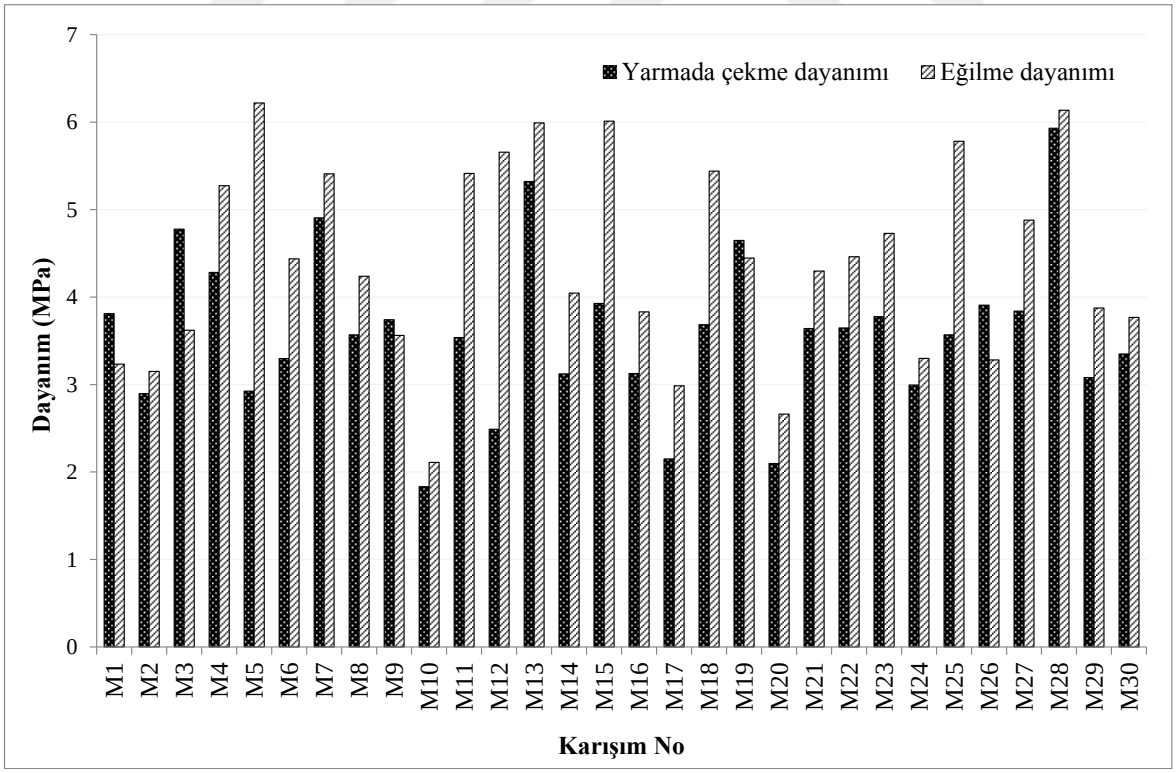
Yarmada çekme dayanımı (MPa) = 2,4 + 2,04*ÇL + 2,65*CEL + 2,65*SL + 0,91*PL - 0,02*UK (4.11)



Şekil 4.15. Bağımsız değişkenlerin HLB yarmada çekme dayanımlarına olan etkileri

4.3.5. Dört noktadan eğilme dayanımı ile yarmada çekme dayanımının karşılaştırılması

HLB numunelerin dört noktadan eğilme ve yarmada çekme dayanımları karşılaştırılmıştır (Şekil 4.16). Yarmada çekme dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki oranların ortalaması %83 olarak hesaplanmıştır. Yani HLB'lerin YÇD, dört noktadan eğilme dayanımının ortalama %83'ü kadardır. Beton numune eğilme testine tabii tutulduğunda en büyük çekme gerilmesi kiriş kesitinin alt bölgesinde oluşurken üst bölgesi basınç yüklerini karşılamaktadır. Beton çatlamaya alt bölgeden başladığından tarafsız eksene doğru çekme gerilmeleri azalır. Gerilme azaldıkça yeni çatlak oluşmasına yol açan enerji de azalmış olur. Dolayısı ile çekme yüklerini karşılayan bölgedeki çatlak veya kusur sayısıda tüm kesite göre daha azdır. Yarmada çekme deneyinde yük uygulanan bölgelerdeki basınç gerilmeleri, kesitin 2/3D'si kadar etkili olan orta bölgede uniform çekme gerilmelerine dönüşür. İki yönlü çekme etkisi oluştuğundan yarmada çekme dayanımı eğilme dayanımına kıyasla daha düşük olur (Turhan, 2003).

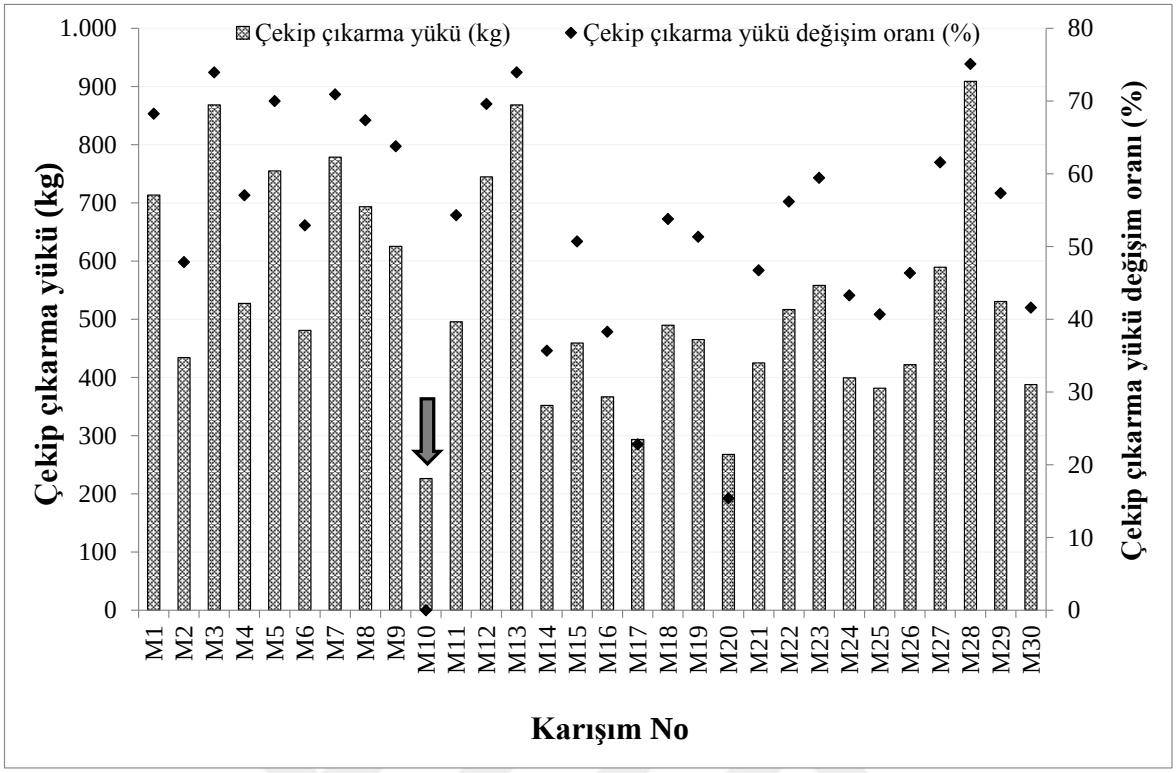


Şekil 4.16. HLB numunelerin dört noktadan eğilme ve yarmada çekme dayanımlarının karşılaştırılması

HLB'lerinde içeriğindeki lif türü ve miktarı eğilme ve yarmada çekme dayanımlarını doğrudan etkilemiş ve iki dayanım arasındaki farkın büyüklüğünü belirleyici faktör olmuştur. M1, M3, M9, M19 ve M26 numunelerinin YÇD dayanımlarının dört noktadan eğilme dayanımından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu karışımların içerikleri incelendiğinde YÇD üzerinde istatistiksel etki ağırlıkları en yüksek olan CEL (%36,6), SL (%27,8) katkılarının karışımlarda bulunma oranlarının diğer karışımlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Yani HLB numunelerin YÇD'sini artırmak için CEL ve SL kullanılması amaca yönelik etkin bir çözüm olmaktadır.

4.3.6. Çekip çıkarma direnci

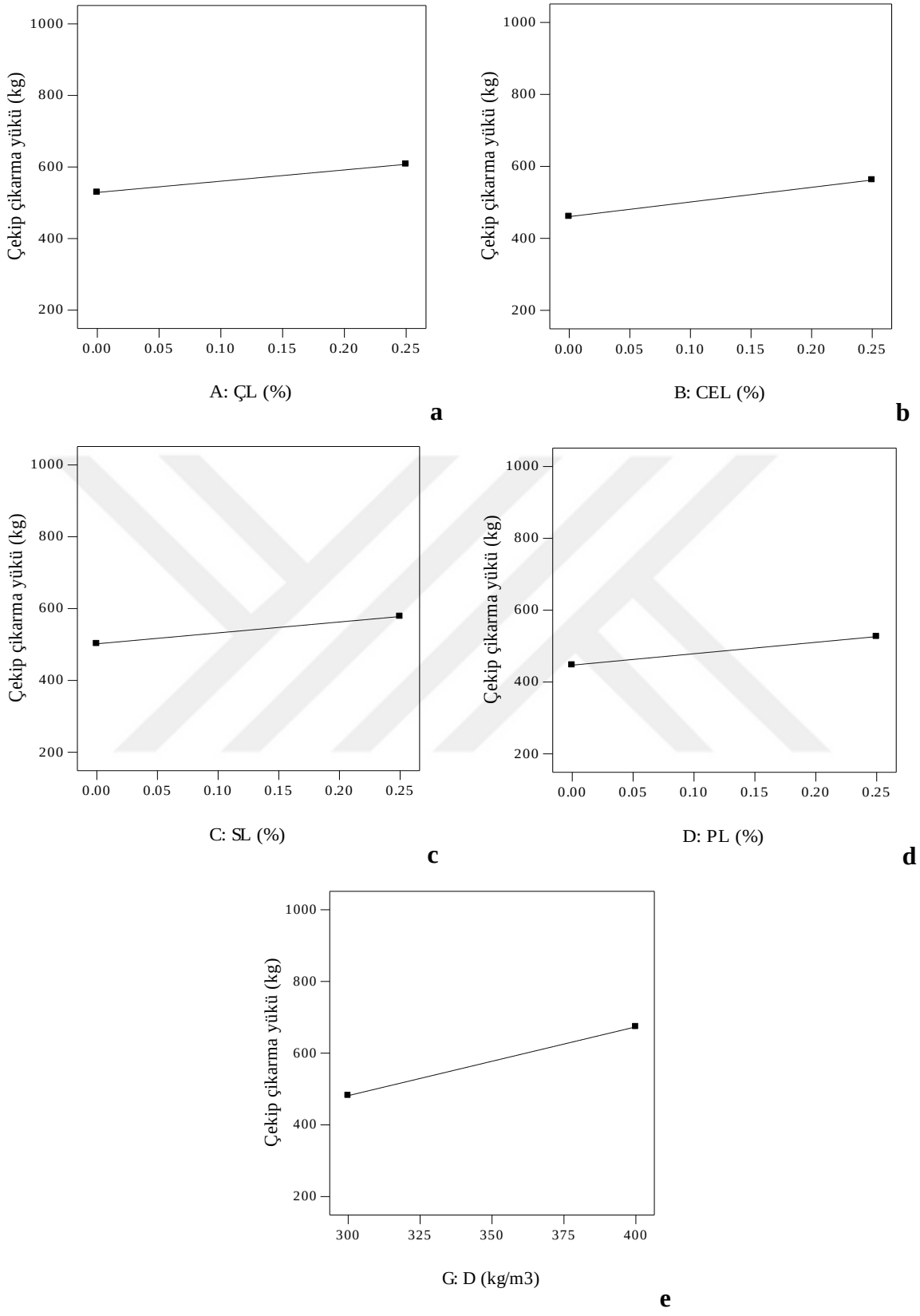
Silindirik HLB numunelerine gömülmüş ø14 mm çelik donatıya çekme yükü uygulanmış ve donatının sıyrılma anındaki en büyük yük çekip çıkarma (Pull out) yükü olarak alınmıştır. Deney sonuçları Şekil 4.17'de gösterilmiştir. M10, M17 ve M20 numunelerinde lif bulunmamaktadır ve kontrol grubudur. Donatının en kolay sıyrıldığı HLB numunesi M10'dur (226 kg). M10 numunesi referans olarak seçilip diğer HLB numunelerin çekip çıkarma yükleri oransal olarak kıyaslanmıştır (Şekil 4.17). İçeriğindeki lif oranı %2 olan M28 kodlu HLB'nin çekip çıkarma yükü referans numunesine göre %75,1 daha fazla iken toplam lif oranı %1 olan M3 numunesinin çekip çıkarma yükü %73,9 daha fazladır. Çekip çıkarma yükü, donatı-bağlayıcı hamur ve liflerin işbirliği ile artmaktadır. M28 numunesinin lif oranına kıyasla çekip çıkarma yükü artırma oranı M3'den daha azdır. Lif yoğunluğunun eşik bir değerin üzerine çıkmasının bir sonucu olarak, betonun işlene bilirlik seviyesinde azalma meydana gelmiştir. Taze betonun boşluksuz olarak kalıba yerleşmesini engelleyip, donatı ile beton arasındaki bağlanma yüzeyinin azalmasına sebep olduğu düşünülmüştür. Bu nedenle donatı ve beton arasındaki bağın zayıfladığı düşüncesi literatür çalışmaları ile desteklenmiştir (Türker, Özbay ve Balçıkanlı, 2016). Bununla birlikte, lif oranının ortalama düzeyde olduğu HLB'lerde, bağlanma kapasitesinin artması ile birlikte çekip çıkarma direnci de artmıştır. Ayrıca, ideal oranda lif kullanımı mikro çatlakların başlamasını ve büyümesini engellemeye yardımcı olarak makro çatlakların oluşumunu geciktirdiğinden HLB numunelerin yük taşıma kapasitesi de artmıştır. Deng, Ding, Chi, Xu ve Wang (2018), çalışmalarında bu bulguyu desteklemişlerdir.



Şekil 4.17. HLB numunelerin çekip çıkarma yükü ve değişim oranı

Deneysel çalışmadan elde edilen test sonuçlarına ANOVA uygulanmış ve R^2=0,825 olan lineer regresyon modeli elde edilmiştir (Eş. 4.12). HLB numunelerin çekip çıkarma yükünü etkileyen bağımsız değişkenlerin istatistiksel analizi Çizelge 4.4'de verilmiştir. Bağımsız değişkenlerin çekip çıkarma yükü üzerindeki etki oranları (%ρ) incelendiğinde, en etkili parametrenin D olduğu (%36,1) ve bunu sırasıyla %22,6, %16,5, %13 ve %11,8'lik etki oranıyla CEL, ÇL, PL ve SL takip etmiştir. Lineer regresyon modeline göre, UK ve EAFC'nin çekip çıkarma yük kapasitesi ile ilişkisin olmadığı belirlenmiştir. Regresyon modeline dâhil edilen tüm bağımsız değişkenler istatistiksel olarak önemlidir (Çizelge 4.4) ve bu bağımsız değişkenlerin çekip çıkarma yüküne olan etkisi Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Regresyon modeli lineer olduğundan bağımsız değişkenlerin ikili etkileşimleri olmamıştır. Bu nedenle her parametrenin bireysel etkisi değerlendirilmiştir. Dört lif katkısı (ÇL, CEL, SL ve PL) ve D artışı HLB numunelerin çekip çıkarma yük kapasiteni artırma trendi göstermiştir (Şekil 4.18a-e).

Çekip çıkarma yükü (kg) = 427,68 + 39,34*ÇL + 50,9*CEL + 37,95*SL + 39,73*PL + 95,94*D (4.12)



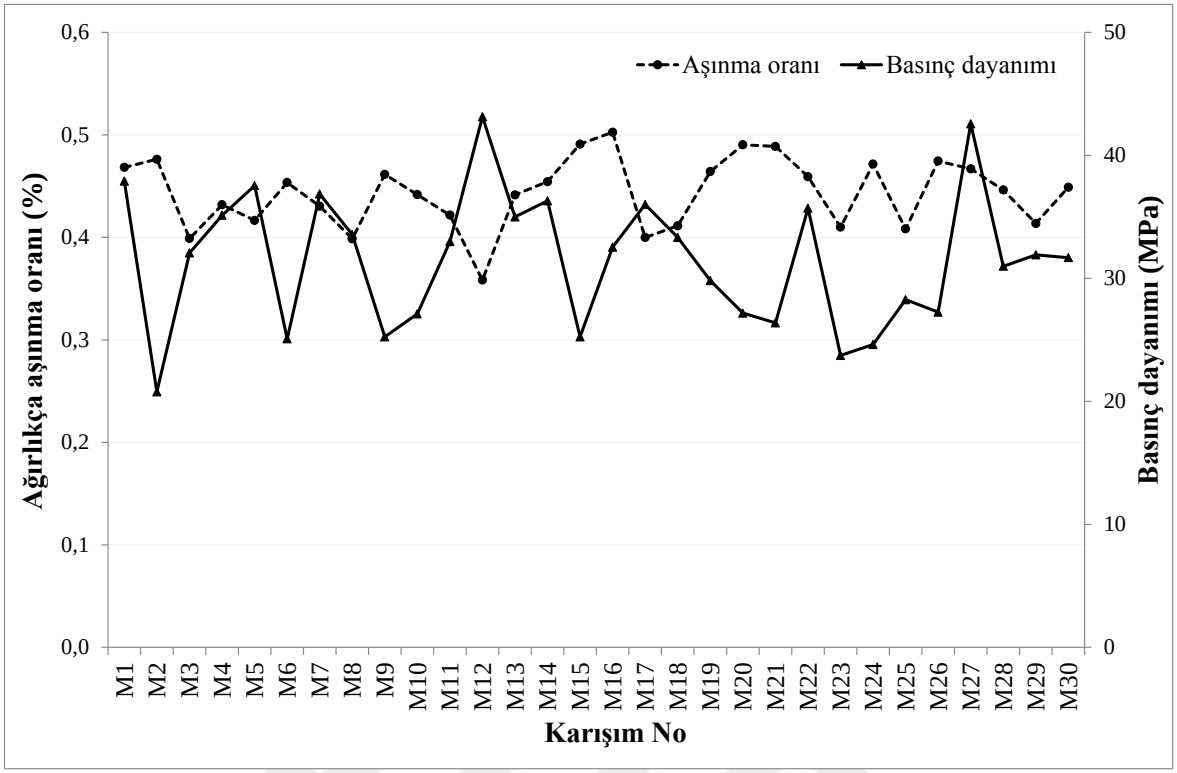
Şekil 4.18. Bağımsız değişkenlerin HLB çekip çıkarma yük kapasitesine olan etkileri

Her lif türü çekip çıkarma yük kapasitesi üzerinde ayrı bir görev üstlenmiş ve kapasitenin artmasına katkı sağlamıştır. Örneğin PL, hidrate olmuş parçacıkları bir arada tutarak daha yoğun bir ağ sistemi kurulmasını desteklerken, ÇL donatı betondan tamamen sıyrılıncaya kadar ek sürtünme direnci sağlamış ve yük kapasitesini artırmışlardır (Xu, Deng ve Chi, 2017). Donatı ve beton arasındaki aderans, matris yoğunluğundan ve lifler ile beton matrisi arasındaki bağdan da doğrudan etkilenmiştir. Arada kurulan bu bağ, kimyasal aderans, sürtünme direnci ve mekanik etkileşim olmak üzere üç şekilde artırılmıştır. Geometrik olarak düz olan lifler kurulan bu bağı sadece kimyasal aderans ve sürtünme direnci (CEL, SL ve PL) ile etkilerken, kancalı lifler (ÇL) matris ve lifler arasında ilaveten mekanik olarak da etkilemiştir (Deng, Ding, Chi, Xu ve Wang, 2018). Bu durumda, donatı-beton arasındaki aderans yani çekip çıkarma yükü Şekil 4.18e'de gösterildiği üzere bağlayıcı dozajının artması ile pozitif yönde etkilenmiştir.

4.3.7. Aşınma

HLB numunelerinin ağırlıkça aşınma oranı Çizelge 4.3'de verilmiş, 28 günlük basınç dayanımı ile olan ilişkisi Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Aşınma oranı en düşük olan numune M12 (%0,36) kodlu HLB iken en yüksek M16 (%0,5) numunesidir. M12 ve M16 numunelerinin içerikleri incelendiğinde, M12 numunesinin lif içeriğinin (%0,5) M16 (%1)'den daha az olduğu görülmüştür. Aynı zamanda M12, bağlayıcı dozajı en yüksek (500 kg/m^3) olan HLB'dir. Gupta ve Kumar (2019), lif miktarı eşik bir değerin üzerindeyse, betondaki boşlukların çimento hamuru ile tamamen dolmasının zorlaştığını ve boşluklu bir beton elde edildiğini ifade etmişlerdir. Bağlayıcı dozajı düşük olan betonların boşluk miktarının daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle HLB numunelerin de kompakt yapısı zayıflamış aşınma oranı artmıştır.

Yüksek basınç mukavemetine sahip betonların aşınma direnci de yüksektir. Yani, basınç dayanımı arttıkça aşınma oranı azalır. Rashad, Bai, Basheer, Milestone ve Collier (2013), basınç dayanımı ile aşınma oranı arasında ters ilişkinin olduğunu belirtmişlerdir. HLB numunelerde de benzer durum söz konusu olmuş, basınç dayanımı ile aşınma oranı arasında ters ilişkinin olduğu görülmüştür (Şekil 4.19). Rashad, Seleem ve Shaheen (2014), basınç dayanımının betonun aşınma direncini etkileyen önemli bir faktör olduğu ifade etmişlerdir.

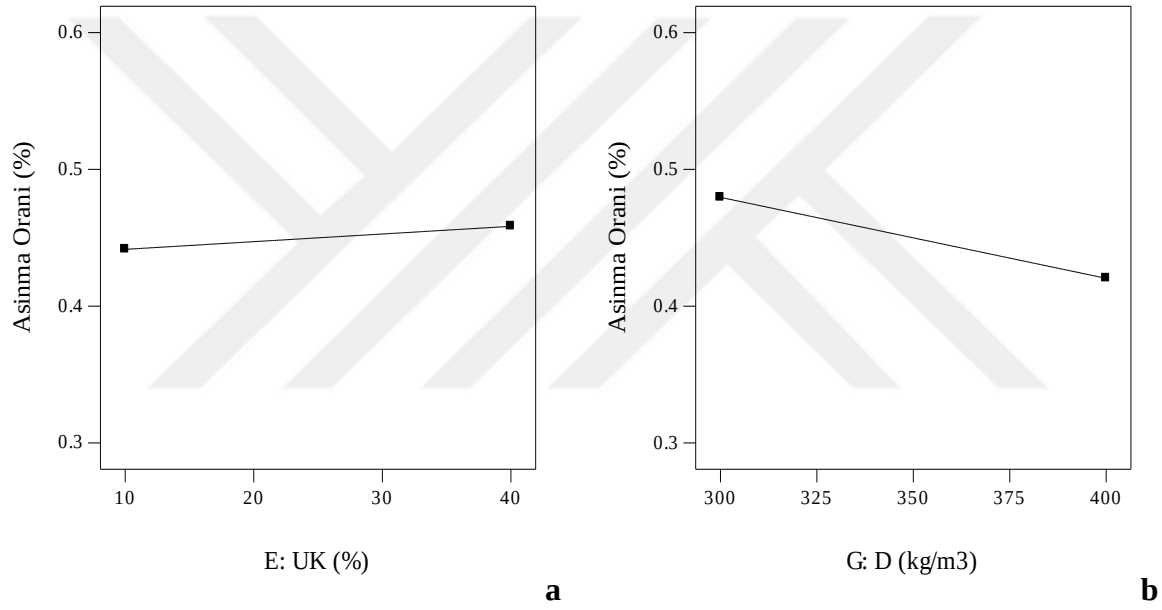


Şekil 4.19. HLB numunelerin aşınma oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

HLB'lerin aşınma oranını hangi bağımsız değişkenin ne kadar etkilediğini ve hangisinin daha önemli olduğunu anlayabilmek için deney sonuçlarına ANOVA uygulanmıştır. İstatistiksel analiz Çizelge 4.4'de verilmiştir. R^2= 0,7952 olan lineer regresyon modeli elde edilmiştir (Eş. 4.13). ANOVA sonuçlarına göre, UK ve D bağımsız parametreleri aşınma oranını doğrudan etkilemiştir. Gencel, Gök ve Brostow (2011), matris bileşenlerinin aşınma miktarını doğrudan etkilediğini belirtmişlerdir. Etki oranları (%ρ) dikkate alındığında, aşınma oranını etkileyen en önemli bağımsız değişkenin D olduğu (%ρ = 95,7) görülmüştür. Aşınma oranını üzerinde istatistiksel olarak anlamlı olan diğer bir parametrenin UK (%ρ = 4,3) olduğu belirlenmiştir. Buradan da anlaşılacağı üzere UK'nın aşınma direnci üzerinde çok az etkisi vardır. Ayrıca, aşınma direncinin doğrudan bağlayıcı dozajına bağlı olduğunu ve bağlayıcı içeriğinden etkilenmediğini ifade eden çalışmalarda mevcuttur (Türk ve Karataş, 2011).

Aşınma oranı (%) = +0,45 + 0,0084*E – 0,030*G (4.13)

Bağımsız değişkenlerin (UK ve D) aşınma oranına olan bireysel etkileri Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Deney 28 günlük numuneler üzerinde yapıldığından UK ikame oranı arttıkça aşınma oranı artmış (Şekil 4.20a) ancak D arttıkça aşınma oranı azalmıştır (Şekil 4.20b). Aşınma direnci üzerinde sadece bu iki bağımsız değişkenin (UK ve D) geriye dönük eleme yöntemi ile oluştutulan regreson modeline dâhil edilmiştir. Lif ve agrega türünün aşınma direnci üzerinde %5 hata düzeyinde anlamlı bir etkisi bulunmamış ve modelde belirtilmemiştir. İleriki yaşlarda deney yapılsaydı UK'nın ilave C-S-H üretimine katkı sağlamasıyla HLB numunelerin dayanımı ve paralelinde aşınma direncinin de artacağı düşünülmektedir.



Şekil 4.20. Bağımsız değişkenlerin HLB aşınma oranlarına etkisi

4.4. Geçirimlilik Özelliklerinin Belirlenmesi

HLB, Çizelge 3.5'de belirtilen şartlara göre üretilip 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak 28 gün su kürüne tabii tutulmuştur. HLB'lerin geçirimlilik özelliklerini belirlemek için uygun numuneler üzerinde ultrasonik dalga hızı (UDH), rezonans frekansı (RF) ve hızlı klor geçirimliliği (HKG) testleri yapılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.5'de verilmiştir. Deney sonuçları üzerinde ANOVA yapılarak bağımsız değişkenler ile bağımlı değişkenler arasındaki ilişki, bağımsız değişkenlerin çoklu etkileşimleri ve istatistiksel olarak etki ağırlıkları belirlenmiştir. Sonuçların istatistiksel analizi Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.5. HLB geçirimlilik özellikleri deney sonuçları

Karışım No	ÇL (%)	CEL (%)	SL (%)	PL (%)	UK (%)	EAFC (%)	D (kg/m^3)	UDH (m/s)	RF (Hz)	HKG (c)	HKG-ASTM C1202
M1	0,25	0,25	0,25	0,25	25,0	0,0	350,0	3170	3810	4063	Yüksek
M2	0,00	0,15	0,15	0,15	25,0	50,0	350,0	3124	3707	4138	Yüksek
M3	0,00	0,50	0,50	0,00	10,0	85,0	400,0	3510	4418	3687	Orta
M4	0,00	0,25	0,25	0,25	10,0	15,0	400,0	3453	3726	3663	Orta
M5	0,25	0,00	0,00	0,75	30,0	85,0	400,0	3385	3201	3927	Orta
M6	0,15	0,15	0,15	0,15	25,0	100,0	350,0	3167	4630	4210	Yüksek
M7	0,75	0,00	0,25	0,00	10,0	15,0	400,0	3478	4763	3981	Orta
M8	0,15	0,15	0,15	0,15	25,0	50,0	450,0	3717	3187	3265	Orta
M9	0,15	0,55	0,15	0,15	25,0	50,0	350,0	3136	3450	4260	Yüksek
M10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	300,0	3074	3796	4431	Yüksek
M11	0,75	0,00	0,00	0,00	10,0	85,0	400,0	3511	3960	3795	Orta
M12	0,00	0,00	0,25	0,25	40,0	15,0	500,0	4230	4064	2583	Orta
M13	0,40	0,40	0,40	0,40	25,0	50,0	350,0	3057	4127	4212	Yüksek
M14	0,15	0,15	0,15	0,00	25,0	50,0	350,0	3177	3969	4254	Yüksek
M15	0,25	0,25	0,25	0,00	30,0	15,0	300,0	3103	4287	4399	Yüksek
M16	0,25	0,25	0,25	0,25	25,0	50,0	260,0	2786	3310	5193	Yüksek
M17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	400,0	3756	4696	3645	Orta
M18	0,25	0,00	0,25	0,25	10,0	85,0	400,0	3599	3843	3895	Orta
M19	0,00	0,75	0,00	0,00	10,0	15,0	300,0	3054	4551	4290	Yüksek
M20	0,00	0,00	0,00	0,00	30,0	85,0	300,0	3507	3704	3899	Orta
M21	0,25	0,25	0,00	0,25	10,0	85,0	300,0	3036	3686	4429	Yüksek
M22	0,15	0,15	0,15	0,55	25,0	50,0	350,0	3134	4160	4033	Yüksek
M23	0,15	0,15	0,55	0,15	30,0	50,0	350,0	3262	4058	3881	Orta
M24	0,25	0,00	0,00	0,25	10,0	85,0	300,0	3033	3575	4691	Yüksek
M25	0,15	0,15	0,15	0,15	0,0	50,0	350,0	3175	3502	4266	Yüksek
M26	0,00	0,00	0,75	0,25	40,0	85,0	300,0	3086	3680	3937	Orta
M27	0,55	0,15	0,15	0,15	25,0	50,0	350,0	3028	3521	4264	Yüksek
M28	0,50	0,50	0,50	0,50	25,0	50,0	350,0	3179	3661	4150	Yüksek
M29	0,25	0,25	0,25	0,00	40,0	85,0	400,0	3382	3259	4068	Yüksek
M30	0,15	0,35	0,15	0,15	25,0	50,0	350,0	3259	4640	3891	Orta

Çizelge 4.6. Geçirimlilik özellikleri deney sonuçlarının istatistiksel analizi

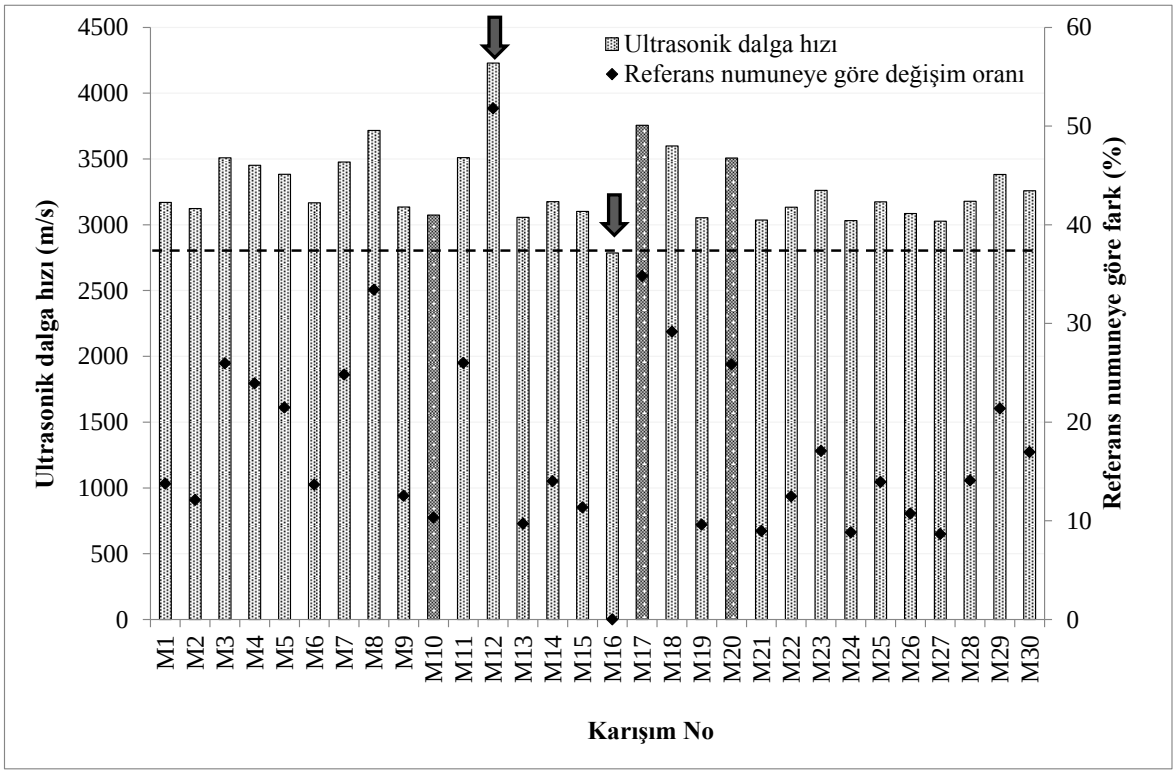
Bağımlı değişkenler	Bağımsız değişkenler	RM	R^2	SD	HKT	HKO	F-değeri	P-değeri	Ö	%ρ
ULtrasonik Dalga Hızı (m/s)	Sabit	+1724.33	0,849	4	2,06E+06	$5,16*10^5$	35,01	< 0.0001	E	-
	ÇL	-262.70		1	85065.49	85065.49	5,77	0.0241	E	4,4
	CEL	-283.87		1	84392.81	84392.81	5,72	0.0246	E	4,4
	PL	-255.41		1	63378.58	63378.58	4,30	0.0486	E	3,3
	D	+4.81		1	$1,68*10^6$	$1,68*10^6$	114,08	< 0.0001	E	87,8
	Artık değer			25	$3,685*10^5$	14741,57				
	Toplam			29	$2,433*10^6$					
Rezonans Frekansı (Hz)	Sabit	+3729,02	0,967	21	$5,61*10^9$	$2,67*10^8$	11,05	0,0008	E	-
	ÇL	+1884,58		1	$2,27*10^9$	$2,27*10^9$	93,87	< 0,0001	E	7,0
	CEL	+10,09		1	2450,79	2450,79	0,10	0,7583	H	0,0
	SL	-810,93		1	$1,54*10^9$	$1,54*10^9$	63,65	< 0,0001	E	4,8
	PL	-136,29		1	$2,57*10^8$	$2,57*10^9$	10,62	0,0116	E	0,8
	UK	-37,72		1	3533,02	3533,02	0,15	0,7122	H	0,0
	EAFC	+381,07		1	$4,43*10^8$	$4,43*10^9$	18,32	0,0027	E	1,4
	D	-454,82		1	$1,41*10^9$	$1,41*10^9$	58,47	< 0,0001	E	4,4
	ÇL * CEL	-1045,18		1	$1,73*10^9$	$1,73*10^9$	71,71	< 0,0001	E	5,4
	ÇL * PL	+491,75		1	$1,13*10^9$	$1,13*10^9$	46,56	0,0001	E	3,5
	ÇL * EAFC	-564,59		1	$1,65*10^9$	$1,65*10^9$	68,33	< 0,0001	E	5,1
	CEL * SL	+154,04		1	$3,65*10^9$	$3,65*10^9$	15,10	0,0046	E	1,1
	CEL * PL	-2162,23		1	$2,73*10^9$	$2,73*10^9$	112,73	< 0,0001	E	8,4
	CEL * UK	+848,82		1	$2,00*10^9$	$2,00*10^9$	82,86	< 0,0001	E	6,2
	CEL * EAFC	+2367,94		1	$2,79*10^9$	$2,79*10^9$	115,58	< 0,0001	E	8,6
	SL * PL	+2625,90		1	$2,88*10^9$	$2,88*10^9$	118,97	< 0,0001	E	8,9
	SL * UK	+831,69		1	$1,13*10^9$	$1,13*10^9$	46,86	0,0001	E	3,5
	SL * EAFC	-1756,46		1	$2,97*10^9$	$2,97*10^9$	122,95	< 0,0001	E	9,2
	PL * UK	-370,57		1	$2,15*10^8$	$2,15*10^9$	82,86	0,0176	E	6,2
	PL *D	+600,96		1	$1,05*10^9$	$1,05*10^9$	43,55	0,0002	E	3,3
	UK *D	-904,28		1	$2,24*10^9$	$2,24*10^9$	92,63	< 0,0001	E	6,9
	CEL^2	-392,03		1	$1,73*10^9$	$1,73*10^9$	71,36	< 0,0001	E	5,3
	Artık değer			8	24170,53					
	Toplam			29						
Hızlı klor geçirimliliği (c)	Sabit	6669,05	0,804	2	$4,7*10^6$	$2,35*10^6$	55,43	< 0.0001	E	-
	ÇL	566,86		1	$4,01*10^5$	$4,01*10^5$	9,46	0.0048	E	8,2
	D	-7,67		1	$4,48*10^6$	$4,48*10^6$	105,70	< 0.0001	E	91,8
	Artık değer			27	$1,15*10^6$	42404,97				
	Toplam			29	$5,85*10^6$					

RM: regresyon modeli, R^2: korelasyon katsayısı, SD: serbestlik derecesi, HKT: hatalar karesi toplamı, HKO: hatalar karesi ortalaması, Ö: Önemlilik ($p<0,05$ ise E: Evet, $p>0,05$ ise H: Hayır)

4.4.1. Ultrasonik dalga hızı (UDH)

Küp HLB numunelerin UDH testinin deney sonuçları Çizelge 4.5'de verilmiştir. Sonuçlar her bir HLB numune için beş ölçümün ortalaması alınarak elde edilmiştir. M10, M17 ve M20 numunelerinde hiç lif bulunmamaktadır ve lif etkisini görebilmek için kontrol grubu olarak seçilmiştir. M12 ve M16 kodlu HLB'lerin UDH'si sırasıyla 4230 m/s ve 2786 m/s olarak en yüksek ve en düşük değerleri almıştır. Şekil 4.21'de HLB numunelerden UDH'si

en düşük olan numune (M16) referans seçilerek, diğer HLB numunelerin UDH'leri arasındaki farklar oransal olarak gösterilmiştir. Örneğin, M12 numunesi ultrasonik dalgayı referans seçilen M16'ye göre %51,8 daha hızlı iletmiştir. Bu durum literatür çalışmalarında genellikle betonun boşluk yapısı ilişkilendirilmiştir (Larissa, Anjos, Sá, Souza ve Farias, 2020). Ancak HLB numunelerde ultrasonik dalganın yönünü ve hızını etkileyebilecek agrega tipi ve lif katkısı gibi faktörler bulunmaktadır. Dolayısı ile UDH'yi hangi faktörün ne oranda etkilediğini belirlemek için test sonuçlarına ANOVA uygulanmış ve istatistiksel analizi Çizelge 4.6'da verilmiştir.



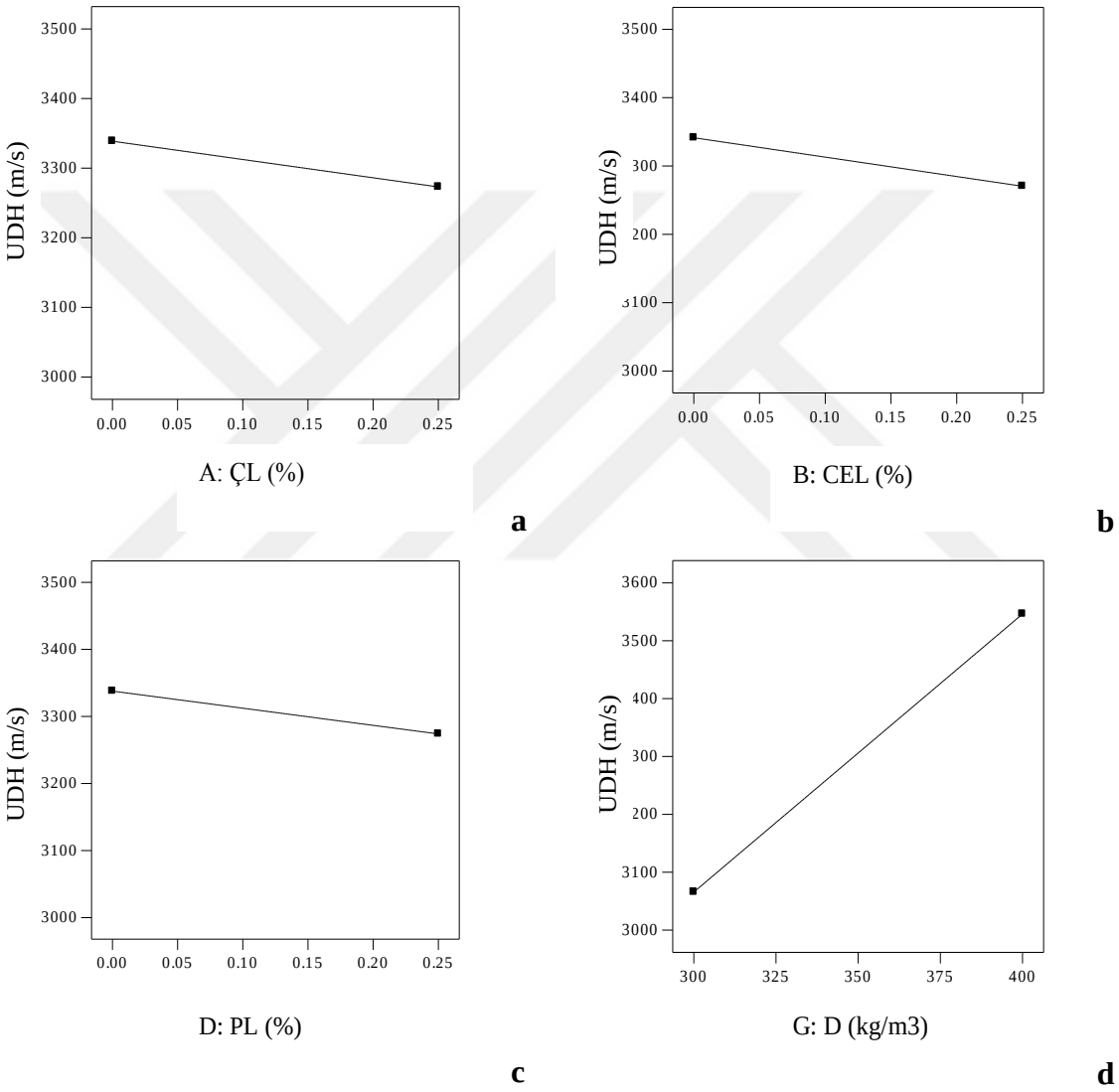
Şekil 4.21. HLB numunelerin ultrasonik dalga hızları

Deney sonuçları kullanılarak R^2=0,849 olan Eş. 4.14'deki lineer regresyon modeli oluşturulmuştur. Çizelge 4.6'dan görüldüğü gibi en yüksek etki ağırlığına (% 87,8) sahip olan parametre D, UDH değişiminden birinci derecede sorumludur. ÇL, CEL ve PL parametreleri de D kadar olmasa da istatistiksel olarak önemli derecede HLB numunelerin UDH'sini etkilemiştir.

UDH (m/s) = 1724,33 - 262,72*ÇL-283,87*CEL-255,41*PL+4,81*D (4.14)

UDH, lif türü ve boyutu, bağlayıcı türü ve içeriği, su/ bağlayıcı oranı gibi birçok faktöre bağlıdır (Khademi, Akbari ve Jamal, 2016). Regresyon modeli lineer olduğu için bağımsız parametreler arasında ikili etkileşim yoktur.

İstatistiksel olarak önemli parametrelerin HLB'nin UDH'si üzerindeki bireysel etkileri Şekil 4.22'de gösterilmiştir.



Şekil 4.22. Bağımsız değişkenlerin HLB'lerde ultrasonik dalga hızına etkisi

Etki oranları istatistiksel olarak anlamlı olan ÇL, CEL ve PL, UDH'yi azaltan bir etki göstermiştir (Şekil 4.22a-c). Bunun, ultrasonik dalgaların lifleri takip etmesinden ve HLB karışımındaki lif dağılımının rastgele olmasından ve dalga yönüne paralel olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu nedenle verici uçtan çıkan ultrasonik dalga alıcı uca daha geç ulaşmıştır. HLB'nin UDH'si üzerindeki olumsuz etkinin sadece boşluk yapısından

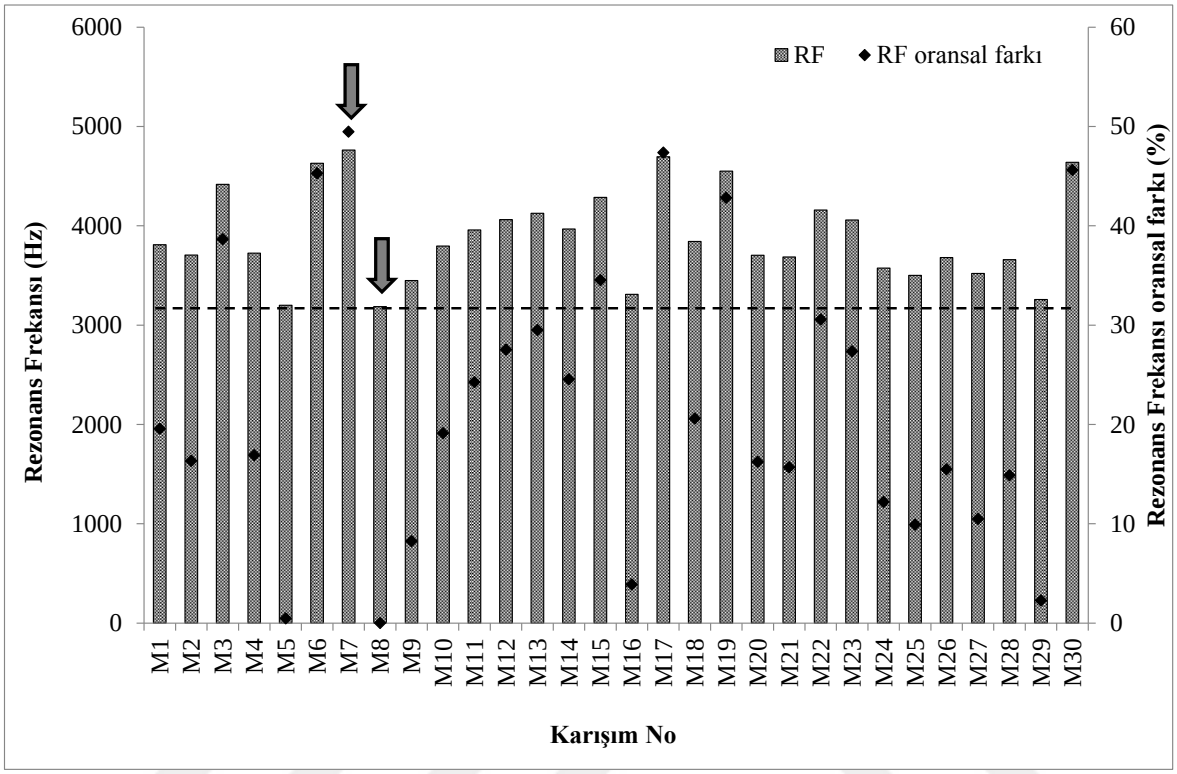
değil, aynı zamanda dalgaları yönlendirebilen bir bileşenin (liflerin) varlığından da kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu düşünceyi destekler nitelikte olan literatür çalışmaları da mevcuttur. Lif takviyeli betonlarda, liflerin çevresinde yer alan ve homojen olmayan gözeneklerin dalganın ilerlemesini engellediği belirtilmiştir (Gebretsadik, 2013). Hedjazi ve Castillo (2020), daha yüksek lif hacmine sahip karışımlarda lif takviyeli betonların UDH'sinin azalma nedenini işlenebilirlik seviyesinin düşmesine bağlı olarak kalıba yerleştirilirken beton bünyesindeki gözenek miktarının artmasına ve liflerin köprü kurma etkisinin azalmasına bağlamıştır.

Liflerin UDH'yi azaltıcı etkisinin aksine D parametresindeki artış ile UDH, 3050 m/s'den 3550 m/s'ye kadar artmıştır (Şekil 4.22d). Agregaları çevreleyen bağlayıcı hamur miktarı ve ilave ürün (C-S-H) oluşumu arttıkça, betonun boşluk yapısı azalır ve böylece UDH artar. Mendes ve diğerleri (2020), hidrate olmuş ürün miktarı artışına bağlı olarak matristeki boşlukların zamanla azaldığını ve ultrasonik dalganın daha hızlı geçtiğini ifade etmişlerdir. Sadece UDH ölçümleri ile doğrudan HLB'nin boşluk yapısı veya dayanımı hakkında kesin bir sonuca varılamayacağı da görülmüştür. Ayrıca lif kullanılan betonlarda bağlayıcı dozajının artırılması gerektiği anlaşılmıştır.

4.4.2. Rezonans frekansı (RF)

Laboratuvar koşulunda (23°C) test gününe kadar bekleyen HLB numunelerin RF ölçümleri yapılmıştır. HLB numunelerin RF değerleri Çizelge 4.5'te verilmiş ve Şekil 4.23'te gösterilmiştir. HLB numunelerin RF değerleri karşılaştırıldığında en yüksek RF, M7 en düşük M8 numunesinde ölçülmüştür. RF en düşük olan M8 numunesi referans kabul edilerek diğer HLB numunelerin oransal farkları hesaplanmış ve Şekil 4.23'te gösterilmiştir. Örneğin, M1 numunesine ait RF değerinin referans seçilen M8 numunesine göre %20 daha fazla olduğu gösterilmiştir. M7 içeriği incelendiğinde ÇL katkı oranının % 0,75 olduğu görülmektedir (tüm HLB'ler dikkate alındığında ÇL katkı oranı en yüksektir). Bu durumda RF'nin ÇL oranından doğrudan etkilendiği görülmüştür. M8'in içeriği incelendiğinde tüm lif türlerinden eşit oranda ve toplam lif hacminin %0,6 olduğu görülmüştür. Fakat RF'nin hangi etkenden ne oranda etkilendiği anlaşılmamıştır. Bu nedenle deney sonuçlarının varyans analizi yapılarak HLB'deki parametrelerin etkili olup olmadığı istatistiksel olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.6). Deney sonuçları kullanılarak korelasyonu yüksek (R^2= 0,967) kuadratik regresyon modeli elde edilmiştir. Modeli

sadeleştirmek için istatistiksel olarak anlamsız parametreler regresyon modelinden çıkarılmıştır (Eş. 4.15).

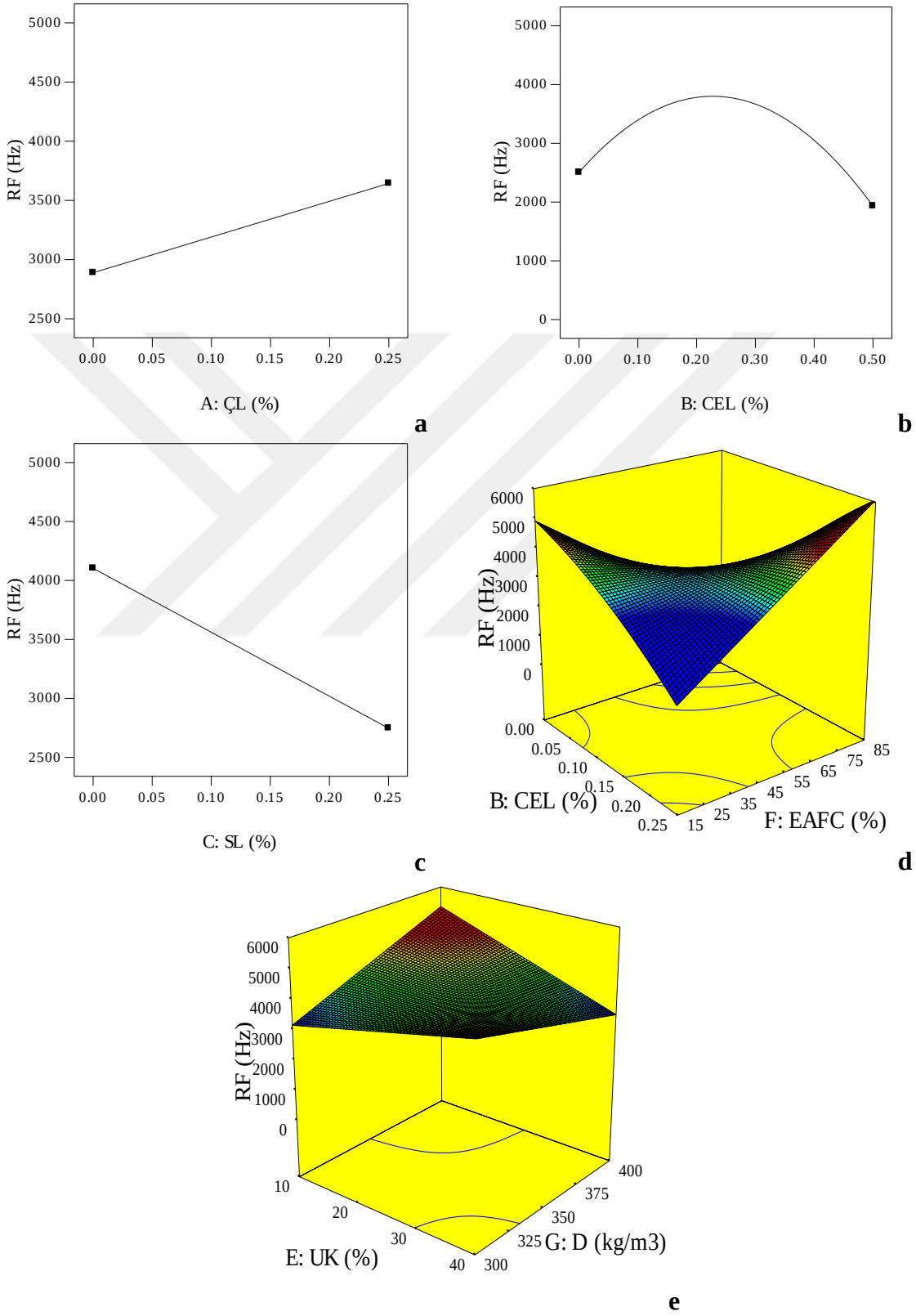


Şekil 4.23. HLB numunelerin rezonans frekansı değerleri

Rezonans Frekansı (Hz) = 3729,02 + 1884,58*ÇL - 810,93*SL- 136,29*PL + 381,07*EAFC - 454,82*PL - 1045,18*ÇL*CEL + 491,75*ÇL*PL - 564,59*ÇL*EAFC - 2162,23*CEL*PL + 848,82*CEL* UK + 2367,94*CEL* EAFC + 2625,9* SL*PL + 831,69* SL *UK - 1756,46* SL * EAFC - 370,57*PL* UK + 600,96*PL*D - 904,28*UK*D - 392,03*CEL^2 (4.15)

Bağımsız değişkenlerin HLB'lerde RF'ye olan etki oranları (ρ%) incelendiğinde en etkili parametrenin SL-EAFC ikili etkileşimi (%9,2) olduğu ve bireysel etkisi en fazla olan parametrenin ÇL (%7) olduğu görülmüştür. Bu bulguya literatür çalışmalarında da rastlanmıştır. Khalil, Abbas ve Nasser (2019), ÇL miktarının artması ile RF'nin de arttığını ve katkı oranının %0,5 olduğu durumda RF'nin maksimum olduğunu ifade etmişlerdir. Agreganın yer değişmesi ile RF değerlerinin azaldığı görülmüştür (M8). UK'nın RF üzerinde hiçbir etkisi yokken PL'nin etkisi yok denecek kadar azdır (%0,8). Ancak CEL-EAFC ve SL-PL ikili etkileşimleri sırası ile %8,6 ve %8,9 olmak üzere RF üzerinde

önemli derecede bir etkiye sahiptir (Çizelge 4.6). CEL regresyon modeline karesel etkisi ile dâhil olmuş ve ideal katkı oranın %0,25 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.24. Bağımsız değişkenlerin HLB'lerin rezonans frekansına etkisi

HLB numunelerin RF değerleri üzerinde anlamlı etkisi bulunan parametrelerin etkisi Şekil 4.24'de gösterilmiştir. ÇL, CEL ve SL'nin bireysel etkileri Şekil 4.24a-c'de gösterilmiştir. ÇL miktarı arttıkça RF değerinin arttığı, SL miktarı arttıkça RF değerinin azaldığı belirlenmiştir. CEL için ideal bir oranın olduğu Şekil 4.24b'den görülmüş ve bu oranın %0,25 olduğu tespit edilmiştir. Verici uçtan çıkan frekans dalgalarının liflere denk gelmesi ile yönlerinin değiştiği ve lif yapısına bağlı olarak dalga hızının değişmesi ile RF değerlerinin azalıp arttığı düşünülmektedir. %0,25 oranında CEL kullanılan HLB'lerde yan ürün olan EAFC'nin yüksek oranlarda betonda kullanılabileceği görülmüştür (Şekil 4.24d). Bağlayıcı içeriğinin RF üzerindeki etkisi Şekil 4.24e'de gösterilmiş ve buradan UK ikamesi için en uygun oranın %10 olduğu tespit edilmiştir.

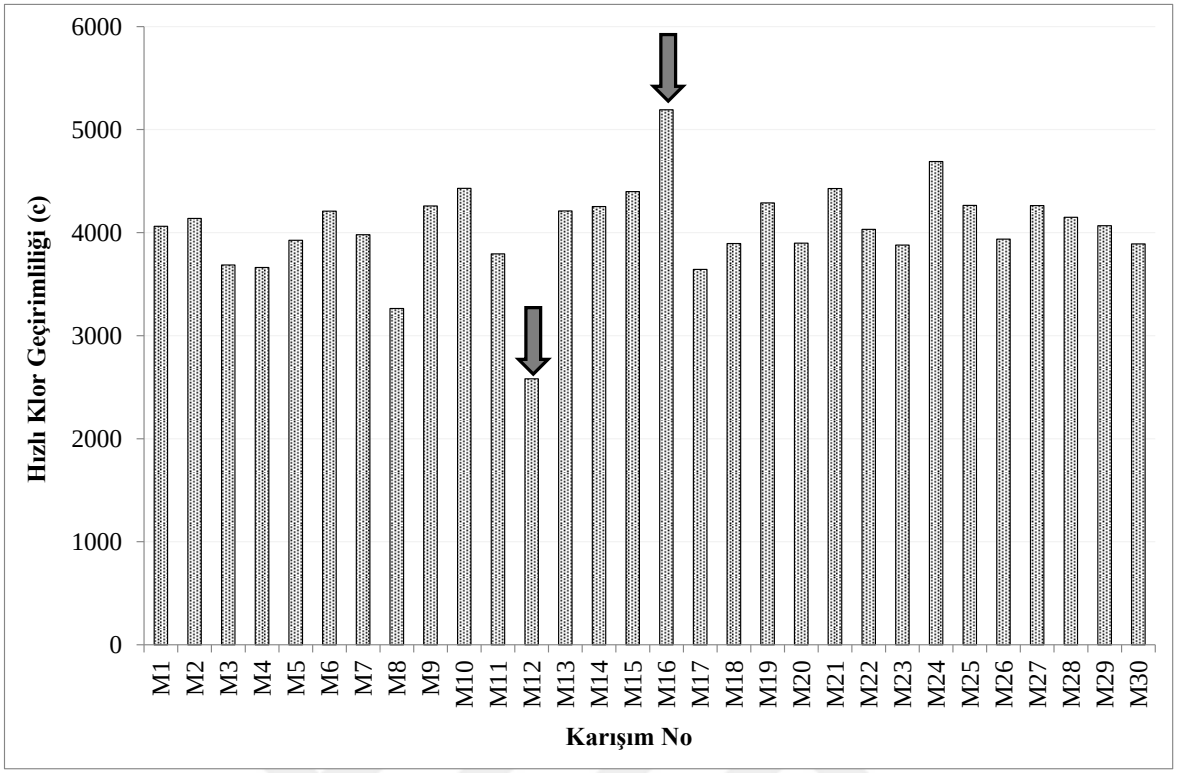
4.4.3. Hızlı klor geçirimliliği (HKG)

Laboratuvar koşullarında (23°C) test gününe kadar bekleyen HLB numuneleri standardına uygun aşamalardan geçirildikten sonra HKG ölçümleri yapılmıştır ve deney sonuçları Çizelge 4.5'te verilmiştir. Şekil 4.25'den görüldüğü üzere HKG en yüksek ve en düşük olan numuneler sırası ile M16 (5193c) ve M12 (2583c)'dir.

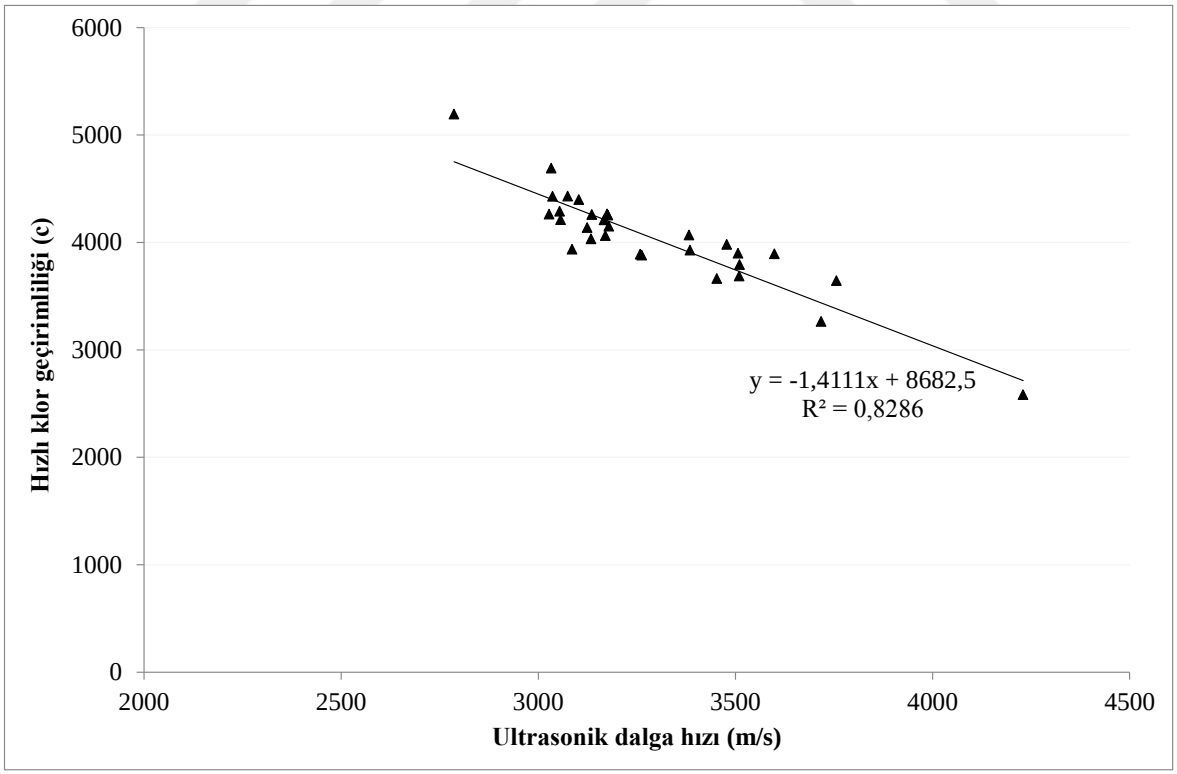
HLB numunelerinin geçirimlilik özelliklerini tanımlayan deney sonuçları arasındaki ilişkiler irdelendiğinde UDH ve HKG arasında korelasyonu yüksek (R^2= 0,8286) ters ilişki olduğu tespit edilmiş ve Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Bu bulgu literatür çalışmaları ile de benzerlik göstermiştir. (Kumar, Sinha ve Chakravarty, 2019). HLB numunelerin hızlı klor geçirimliliği sınıfları Çizelge 4.7'de belirtilen esaslara uygun olarak ASTM C1202'ye göre belirlenmiş (ASTM C1202) ve Çizelge 4.5'te belirtilmiştir.

Çizelge 4.7. ASTM C1202'ye göre klor iyonu geçirimliliğinin sınıflandırılması

Geçen Klor İyonları (c)	**Sınıflandırma**
> 4000	Yüksek
2000 – 4000	Orta
1000 – 2000	Düşük
100 – 1000	Çok düşük
< 100	İhmal edilebilir



Şekil 4.25. HLB numunelerin hızlı klor geçirimlilik değerleri

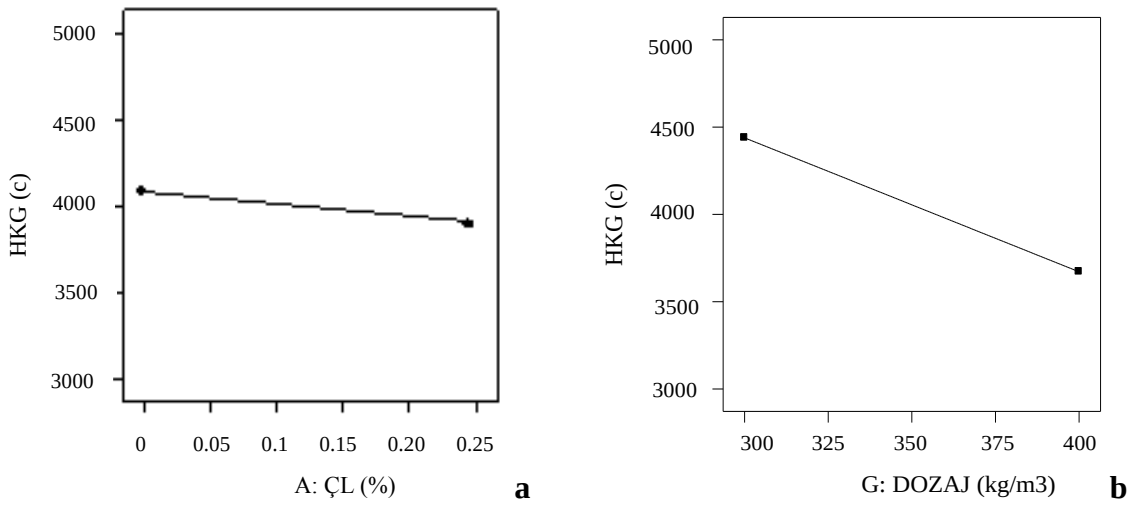


Şekil 4.26. HLB'lerin ultrasonik dalga hızı ve hızlı klor geçirimliliği arasındaki ilişki

HLB numunelerin klor geçirimliliğinin hangi parametrelerden ne oranda etkilendiğini anlamak için deney sonuçları üzerinde ANOVA yapılmış ve Eş. (4.16)'da verilen korelasyonu 0,804 olan lineer regresyon modeli oluşturulmuştur.

Hızlı klor geçirimliliği (c) = 6669,05 + 566,86*ÇL - 7,67*D (4.16)

ANOVA sonuçlarına göre, HKG üzerinde istatistiksel olarak anlamlı parametreler sırasıyla %8,2 ve %91,8 etki oranlarına sahip ÇL ve D'dir. İstatistiksel sonuçlardan da anlaşılacağı gibi (Çizelge 4.6) HKG üzerindeki en etkili parametre D'dir. Bağımsız değişkenlerin HKG üzerindeki etkileri Şekil 4.27'de gösterilmiştir. Hem ÇL hem de D'nin artması ile HKG değerleri azalmıştır. HLB numunelerin ÇL oranı %0'dan % 0,25'e yükseldiğinde HKG değerleri, 4180 c'den 3850 c'ye düşmüştür. Wang, Sun, Guo, Gu ve Zong (2018), ÇL'nin çatlak oluşumunu ve yayılmasını kısıtladığını ve yüzey alanını artırması nedeniyle ÇL'nin bazı klorürleri adsorbe ettiğini dolayısı ile alıcı hücreye geçen klor miktarının azaldığını belirtmişlerdir. Bu durumda, HKG ölçümü ÇL içeren betonların dayanıklılık performansını doğru bir şekilde yansıtmayacağı dikkate alınmalıdır. D arttıkça, boşluk miktarı azaldığından daha yoğun içyapının oluştuğu ve HKG değerlerinin 4450 c'den 3600 c'ye gerilemesi ile geçirgenliğin azaldığı düşülmüştür. Fall ve Benzaazoua (2005), yaptıkları çalışmada bağlayıcı dozajının artışına bağlı olarak UK ve çimentonun hidratasyonu ile ikincil C-S-H jel oluşumunun arttığını belirtmişlerdir. Hossain ve Lachemi (2006), çalışmalarında beton içindeki boşlukların ilave jeller ile dolduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 4.27. Bağımsız değişkenlerin HLB'lerin hızlı klor geçirimliliğine etkisi

4.5. Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

HLB, Çizelge 3.5'de belirtilen şartlara göre üretilip 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak 28 gün su kürüne tabii tutulmuştur. HLB'lerin fiziksel özelliklerini belirlemek için numunelerin su emme kapasiteleri (SEK) ve kılcal su emme katsayıları belirlenmiştir. Deney sonuçları Çizelge 4.8'de verilmiştir. Deney sonuçları üzerinde ANOVA yapılarak bağımsız değişkenler ile bağımlı değişkenler arasındaki ilişki, bağımsız değişkenlerin çoklu etkileşimleri ve istatistiksel olarak etki ağırlıkları belirlenmiştir. Sonuçların istatistiksel analizi Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.8. HLB fiziksel özellikler deney sonuçları

Karışım No	ÇL (%)	CEL (%)	SL (%)	PL (%)	UK (%)	EAFC (%)	D (kg/m^3)	SEK (%)	KSEK (cm^2/s)
M1	0,25	0,25	0,25	0,25	25,0	0,0	350,0	3170	0,0318
M2	0,00	0,15	0,15	0,15	25,0	50,0	350,0	3124	0,02
M3	0,00	0,50	0,50	0,00	10,0	85,0	400,0	3510	0,0198
M4	0,00	0,25	0,25	0,25	10,0	15,0	400,0	3453	0,0189
M5	0,25	0,00	0,00	0,75	30,0	85,0	400,0	3385	0,019
M6	0,15	0,15	0,15	0,15	25,0	100,0	350,0	3167	0,0225
M7	0,75	0,00	0,25	0,00	10,0	15,0	400,0	3478	0,0192
M8	0,15	0,15	0,15	0,15	25,0	50,0	450,0	3717	0,0268
M9	0,15	0,55	0,15	0,15	25,0	50,0	350,0	3136	0,0359
M10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	300,0	3074	0,0176
M11	0,75	0,00	0,00	0,00	10,0	85,0	400,0	3511	0,0198
M12	0,00	0,00	0,25	0,25	40,0	15,0	500,0	4230	0,0153
M13	0,40	0,40	0,40	0,40	25,0	50,0	350,0	3057	0,0218
M14	0,15	0,15	0,15	0,00	25,0	50,0	350,0	3177	0,0194
M15	0,25	0,25	0,25	0,00	30,0	15,0	300,0	3103	0,0267
M16	0,25	0,25	0,25	0,25	25,0	50,0	260,0	2786	0,0547
M17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	400,0	3756	0,0156
M18	0,25	0,00	0,25	0,25	10,0	85,0	400,0	3599	0,0191
M19	0,00	0,75	0,00	0,00	10,0	15,0	300,0	3054	0,0375
M20	0,00	0,00	0,00	0,00	30,0	85,0	300,0	3507	0,0304
M21	0,25	0,25	0,00	0,25	10,0	85,0	300,0	3036	0,0367
M22	0,15	0,15	0,15	0,55	25,0	50,0	350,0	3134	0,0252
M23	0,15	0,15	0,55	0,15	30,0	50,0	350,0	3262	0,0219
M24	0,25	0,00	0,00	0,25	10,0	85,0	300,0	3033	0,029
M25	0,15	0,15	0,15	0,15	0,0	50,0	350,0	3175	0,0174
M26	0,00	0,00	0,75	0,25	40,0	85,0	300,0	3086	0,0326
M27	0,55	0,15	0,15	0,15	25,0	50,0	350,0	3028	0,0195
M28	0,50	0,50	0,50	0,50	25,0	50,0	350,0	3179	0,0165
M29	0,25	0,25	0,25	0,00	40,0	85,0	400,0	3382	0,0195
M30	0,15	0,35	0,15	0,15	25,0	50,0	350,0	3259	0,0223

Çizelge 4.9. Fiziksel özellikler deney sonuçlarının istatistiksel analizi

Bağımlı değişken	Bağımsız değişkenler	RM	R^2	SD	HKT	HKO	F-değeri	P-değeri	Ö	%ρ
Su Emme Kapasitesi (%)	Sabit	9,19	0,988	26	20,12	0,77	9,50	0,0437	E	-
	ÇL	-595,27		1	1,39	1,39	17,10	0,0257	E	3,3
	CEL	-243,96		1	1,94	1,94	23,83	0,0164	E	4,6
	SL	476,24		1	2,15	2,15	26,41	0,0143	E	5,0
	PL	173,58		1	1,10	1,10	13,54	0,0348	E	2,6
	UK	0,97		1	0,30	0,30	3,67	0,1512	H	0,7
	EAFC	0,05		1	0,081	0,081	1,00	0,3916	H	0,2
	D	-43,70		1	1,01	1,01	12,44	0,0387	E	2,4
	ÇL* CEL	-283,87		1	1,66	1,66	20,34	0,0204	E	3,9
	ÇL * SL	-340,79		1	1,09	1,09	13,43	0,0351	E	2,6
	ÇL * PL	235,96		1	1,29	1,29	15,84	0,0284	E	3,0
	ÇL * UK	6,07		1	1,80	1,80	22,06	0,0183	E	4,2
	ÇL* EAFC	-1,33		1	1,46	1,46	17,87	0,0242	E	3,4
	ÇL * D	1,62		1	1,72	1,72	21,16	0,0193	E	4,0
	CEL * PL	-1897,52		1	1,90	1,90	23,37	0,0169	E	4,5
	CEL* UK	2,76		1	1,48	1,48	18,21	0,0236	E	3,5
	CEL* EAFC	7,80		1	1,96	1,96	24,02	0,0163	E	4,6
	CEL* D	0,32		1	4,52	4,52	55,47	0,005	E	10,6
	SL * PL	2260,11		1	1,85	1,85	22,75	0,0175	E	4,3
	SL * UK	-1,72		1	0,67	0,67	8,23	0,0641	E	1,6
	SL * EAFC	-7,84		1	1,83	1,83	22,54	0,0177	E	4,3
	SL* D	-0,91		1	2,07	2,07	25,45	0,015	E	4,9
	PL*UK	-5,97		1	1,76	1,76	21,60	0,0188	E	4,1
	PL* EAFC	1,72		1	1,32	1,32	16,26	0,0274	E	3,1
	PL* D	-0,57		1	0,76	0,76	9,28	0,0556	E	1,8
	UK* EAFC	-3,88		1	2,83	2,83	34,75	0,0097	E	6,6
	UK*D	-271,71		1	2,68	2,68	32,91	0,0105	E	6,3
	Artık değer			3	0,24	0,081				
	Toplam			29	20,36					
Kılcal Su Emme Katsayısı (cm^2/s)	Sabit	3729,02	0,946	24	$1,87*10^{-3}$	$1,87*10^{-3}$	3,63	0,0778	H	-
	ÇL	$9,72*10^{-3}$		1	$1,12*10^{-4}$	$1,12*10^{-4}$	5,24	0,0708	H	5,3
	CEL	3,47		1	$3,04*10^{-5}$	$3,04*10^{-5}$	1,42	0,2871	H	1,4
	SL	0,87		1	$7,33*10^{-5}$	$7,33*10^{-5}$	3,43	0,1234	H	3,4
	PL	-2,16		1	$2,08*10^{-6}$	$2,08*10^{-6}$	0,10	0,7679	H	0,1
	UK	-1,84		1	$1,66*10^{-5}$	$1,66*10^{-5}$	0,78	0,4186	H	0,8
	EAFC	$-1,54*10^{-3}$		1	$8,44*10^{-5}$	$8,44*10^{-5}$	3,94	0,1039	H	4,0
	D	$-6,32*10^{-4}$		1	$3,78*10^{-6}$	$3,78*10^{-6}$	0,18	0,6920	H	0,2
	ÇL *SL	$2,02*10^{-5}$		1	$4,22*10^{-5}$	$4,22*10^{-5}$	1,97	0,2193	H	2,0
	ÇL *PL	1,71		1	$2,91*10^{-6}$	$2,91*10^{-6}$	0,14	0,7274	H	0,1
	ÇL *UK	-0,1		1	$1,04*10^{-4}$	$1,04*10^{-4}$	4,88	0,0782	H	4,9
	ÇL *EAFC	-0,04		1	$5,50*10^{-5}$	$5,50*10^{-5}$	2,57	0,1700	H	2,6
	ÇL *D	$5,49*10^{2}$		1	$8,41*10^{-5}$	$8,41*10^{-5}$	3,93	0,1043	H	3,9
	CEL*PL	-875,67		1	$5,25*10^{-5}$	$5,25*10^{-5}$	2,45	0,1781	H	2,5
	CEL*UK	6,50		1	$3,05*10^{-6}$	$3,05*10^{-6}$	0,14	0,7215	H	0,1
	CEL*EAFC	-225,04		1	$7,05*10^{-5}$	$7,05*10^{-5}$	3,29	0,1292	H	3,3
	SL*PL	-0,03		1	$5,38*10^{-5}$	$5,38*10^{-5}$	2,51	0,1739	H	2,5
	SL*UK	-7,96		1	$3,48*10^{-5}$	$3,48*10^{-5}$	1,62	0,2585	H	1,6

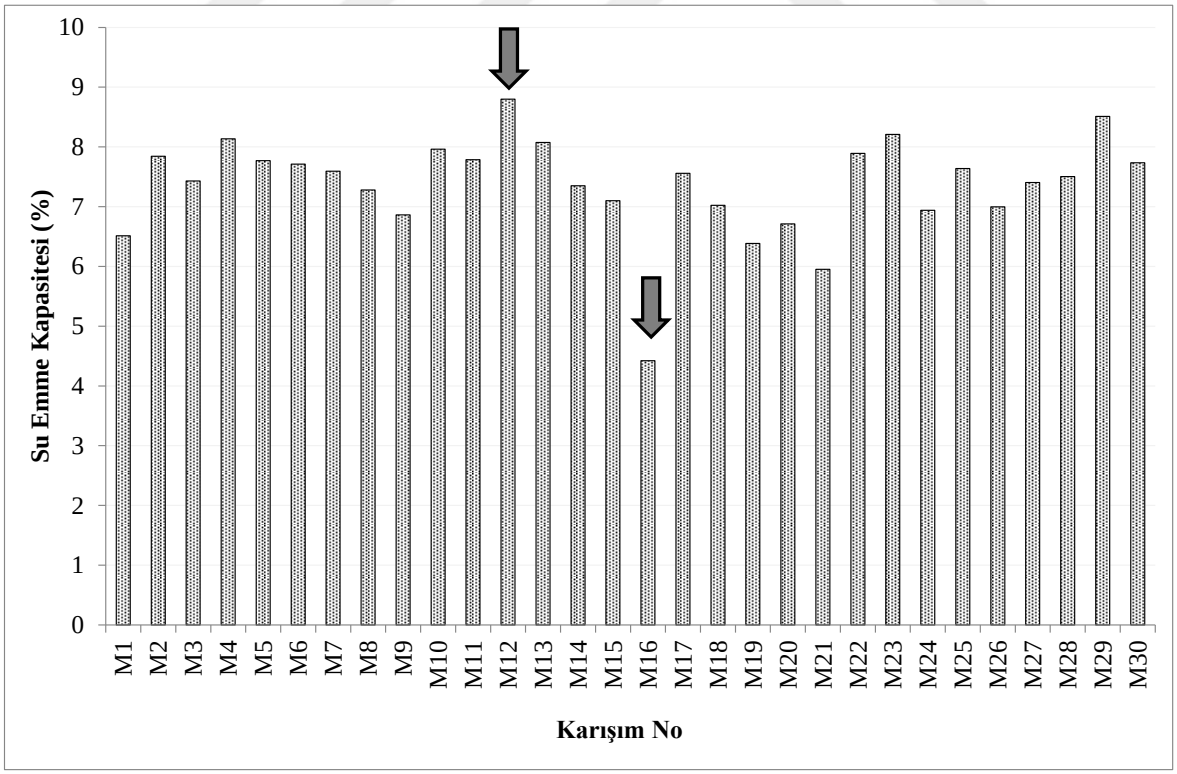
Çizelge 4.9. (Devam) Fiziksel özellikler deney sonuçlarının istatistiksel analizi

SL*EAFC	0,01	1	$5,89*10^{-5}$	$5,89*10^{-5}$	2,75	0,1579	H 2,8
SL*D	0,03	1	$1,71*10^{-4}$	$1,71*10^{-4}$	7,98	0,0369	E 8,0
PL*UK	$3,36*10^{2}$	1	$1,21*10^{-4}$	$1,21*10^{-4}$	5,66	0,0633	H 5,7
PL*EAFC	0,025	1	$4,40*10^{-5}$	$4,40*10^{-5}$	2,05	0,2114	H 2,1
PL*D	$-8,88*10^{2}$	1	$5,75*10^{-5}$	$5,75*10^{-5}$	2,69	0,1621	H 2,7
UK*EAFC	$5,34*10^{2}$	1	$4,15*10^{-4}$	$4,15*10^{-4}$	19,41	0,0070	E 19,5
CEL^2	3,86	1	$4,36*10^{-4}$	$4,36*10^{-4}$	20,37	0,0063	E 20,5
Artık değer	-0,54	5	$1,07*10^{-4}$	$2,14*10^{-5}$			
Toplam		29	$1,97*10^{-3}$				

RM: regresyon modeli, R^2: korelasyon katsayısı, SD: serbestlik derecesi, HKT: hatalar karesi toplamı, HKO: hatalar karesi ortalaması, Ö: Önemlilik (p<0,05 ise E: Evet, p>0,05 ise H: Hayır)

4.5.1. Su emme kapasitesi

Laboratuvar koşullarında (23°C) test gününe kadar bekleyen küp numunelerin su emme kapasiteleri ilgili standarda uygun olarak belirlenmiş ve deney sonuçları Çizelge 4.8'de verilmiştir. Şekil 4.28'de SEK en yüksek (%8,8) ve en düşük (%4,42) olan M12 ve M16 numuneleri gösterilmiştir.

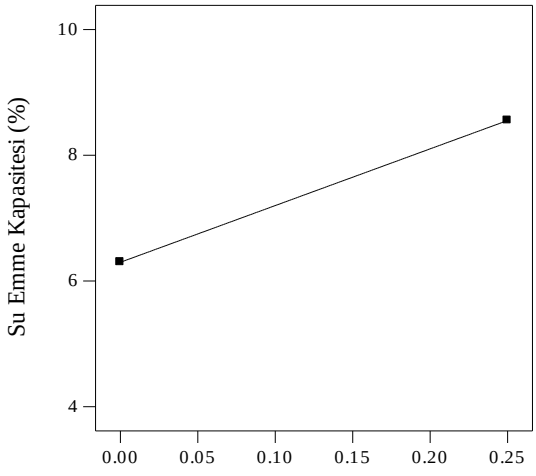


Şekil 4.28. HLB numunelerin su emme kapasiteleri

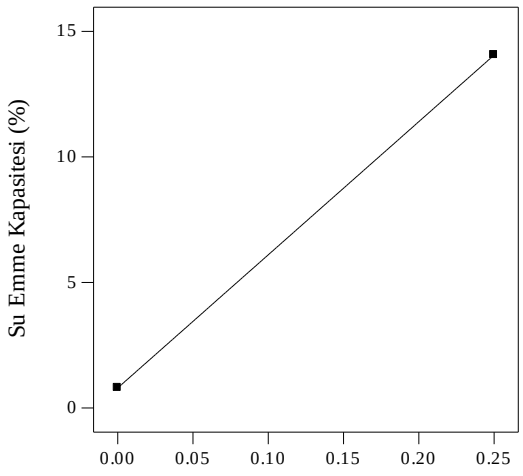
HLB numunelerin su emme kapasitesinin hangi parametrelerden ne oranda etkilendiğini anlamak için deney sonuçlarının ANOVA'sı yapılmış ve Eş. (4.17)'de istatistiksel olarak önemsiz parametreler ($p<0,05$) modelden çıkarılarak sadeleştirilmiş denklem verilmiştir. Korelasyonu 0,988 olan 2FI regresyon modeli oluşturulmuştur. HLB numunelerin su emme kapasitesini temsil eden modelin istatistiksel analizi Çizelge 4.9'da verilmiştir. Modele etki eden çarpanların etki ağırlıkları hesaplanarak (Çizelge 4.9) hangi parametrenin daha etkili olduğu tespit edilmiştir.

Su emme kapasitesi (%) = 9,19 - 595,27*ÇL - 243,96*CEL + 476,24*SL + 173,58*PL - 43,70*D - 283,87*ÇL*CEL - 340,79*ÇL*SL + 235,96*ÇL*PL + 6,07*ÇL*UK - 1,33*ÇL*EAFC + 1,62*ÇL*D - 897,52*CEL*PL + 2,76*CEL*UK + 7,80*CEL*EAFC + 0,32*CEL*D + 2260,11*SL*PL - 1,72*SL*UK - 7,84*SL*EAFC - 0,91*SL*D - 5,97*PL*UK + 1,72*PL*EAFC - 0,57*PL*D - 3,88*UK*EAFC - 271,71*UK*D (4.17)

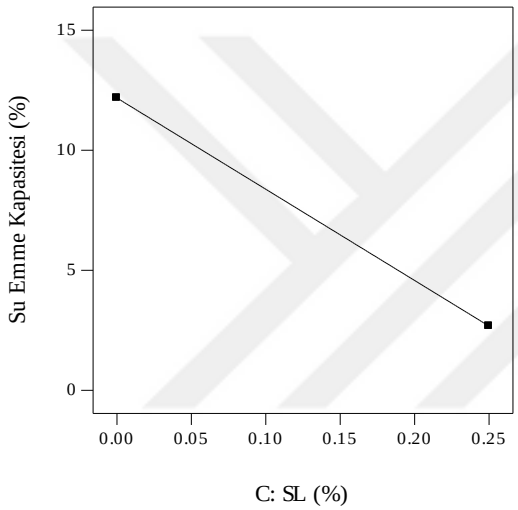
HLB numunelerin SEK'nin bağımsız değişkenlerin hem bireysel etkilerinden hem de ikili etkileşimlerinden etkilendiği 2FI regresyon modelinden anlaşılmıştır. Şekil 4.29'da istatistiksel olarak önemli olan bağımsız değişkenlerin bireysel etkileri ile etki ağırlığı (%ρ) en yüksek olan etkileşimlerin SEK'e olan etkileri gösterilmiştir. ÇL ve CEL katkısı ile HLB numunelerin su emme kapasitesi artırma eğilimi gösterirken (Şekil 4.29a,b), SL ve PL katkısı ile azalma eğilimi göstermiştir (Şekil 4.29c,d). HLB'deki bağlayıcı miktarı arttıkça boşluk yapısı azaldığından SEK'de azalmıştır (Şekil 4.29e). Düşük dozajlı betonlarda CEL kullanılarak su emme kapasitesinin azaltılabileceği ve bu etkinin önemli bir parametre olduğu (%ρ= %10,6) tespit edilmiştir (Şekil 4.29f). UK ve EAFC bireysel olarak SEK üzerinde istatistiksel olarak önemli bir etkiye sahip değil iken ikili etkileşimi %ρ= %6,6 olan önemli bir etkiye sahiptir (Şekil 4.29g). SEK düşük olan beton hedeflendiğinde UK kullanılacaksa agrega olarak EAFC seçimi yerinde olacaktır. İkisi birbirini tamamlayıcı nitelik kazanarak, SEK'i azaltmada etkili parametredir. Ayrıca bağlayıcı dozajı 350 kg/m^3'ten fazla olan betonlarda SEK'i minimum seviyede tutmak için UK %20 ile %40 oranında çimento ile yer değiştirilebilir (Şekil 4.29h).


Su Emme Kapasitesi (%)
10
8
6
4
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
0.25
A: ÇL (%)

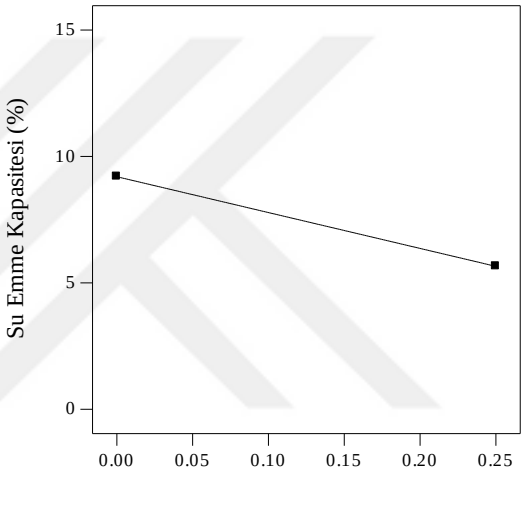
a


Su Emme Kapasitesi (%)
15
10
5
0
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
0.25
B: CEL (%)

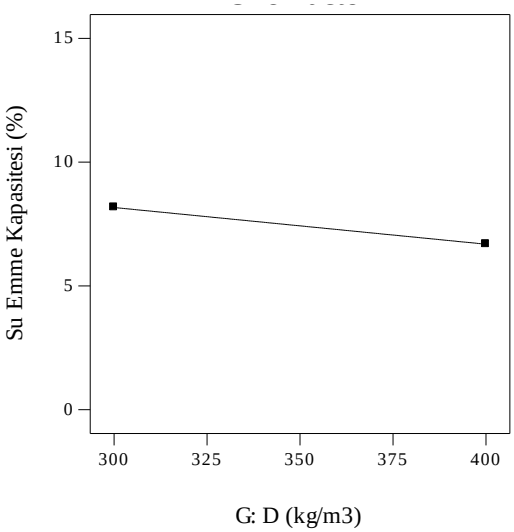
b


Su Emme Kapasitesi (%)
15
10
5
0
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
0.25
C: SL (%)

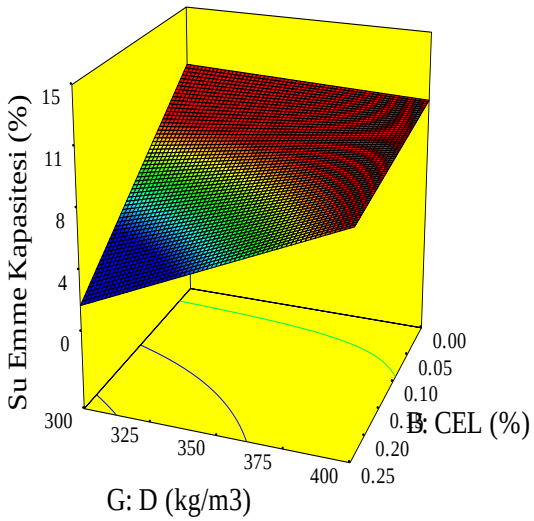
c


Su Emme Kapasitesi (%)
15
10
5
0
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
0.25
D: PL (%)

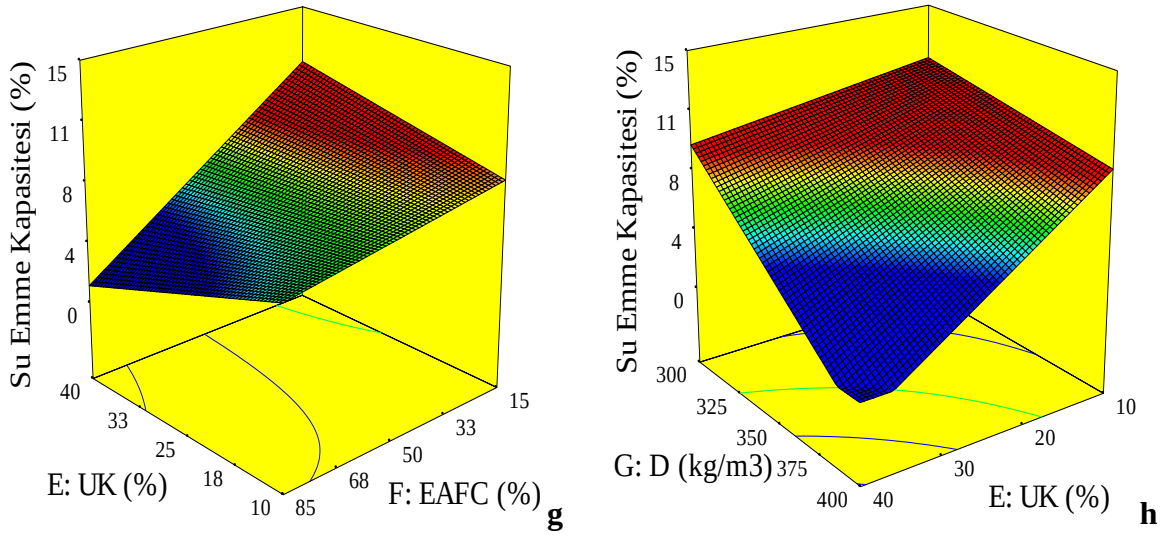
d


Su Emme Kapasitesi (%)
15
10
5
0
300
325
350
375
400
G: D (kg/m3)

e


Su Emme Kapasitesi (%)
15
11
8
4
0
300
325
350
375
400
G: D (kg/m3)
0.00
0.05
0.10
0.20
0.25
B: CEL (%)

f

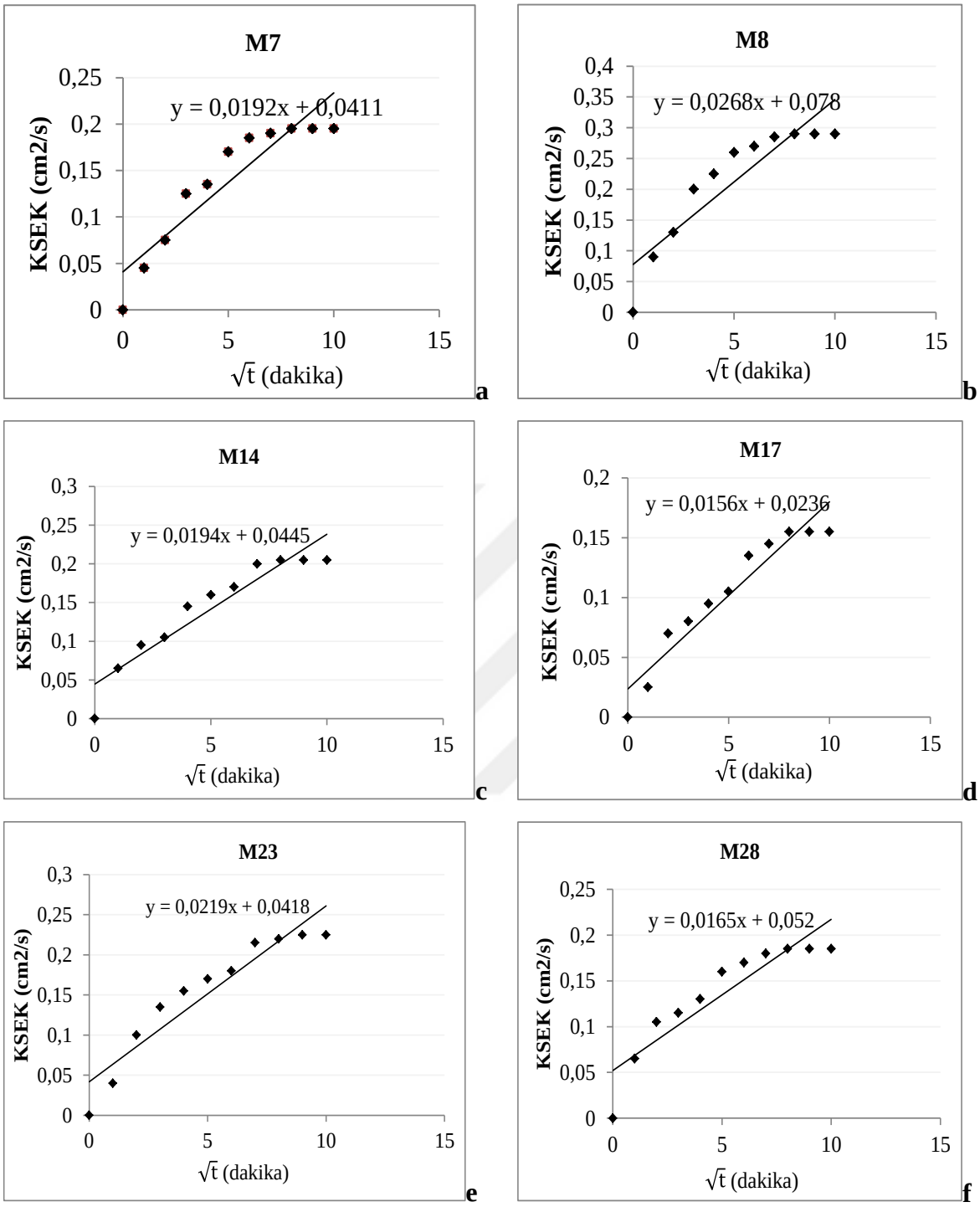


Şekil 4.29. Bağımsız değişkenlerin HLB su emme kapasitesine olan etkileri

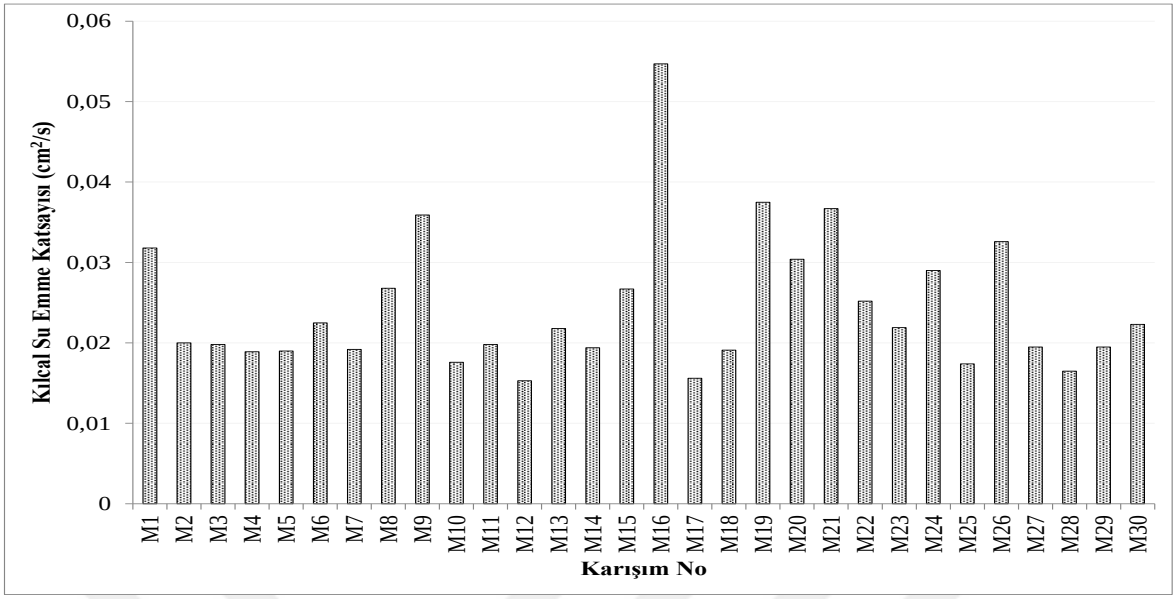
4.5.2. Kılcal su emme (Kapilarite)

100mm x 100mm x 100 mm boyutlarındaki küp numunelerin kılcal su emme katsayıları (KSEK) bir saniyede 1 cm^2 alandan emilen su miktarı olarak hesaplanmıştır. Seçilen bazı numunelere (M1, M8, M14, M17, M23 ve M28) ait KSEK belirlerken oluşturulan grafikler örnek olarak Şekil 4.30a-f'de gösterilmiştir. HLB numunelere ait KSEK'ler Çizelge 4.8'de verilmiştir. KSEK en yüksek ve en düşük olan HLB numuneler sırası ile M16 (0,0547 cm^2/s) ve M12 (0,0153 cm^2/s)'dir ve Şekil 4.31'de gösterilmiştir. HLB numunelerin SEK ve KSEK arasında literatürde bulunan geleneksel beton üzerinde yapılmış çalışmaların aksine ters bir ilişkinin olduğu belirlenmiş ve Şekil 4.32'de gösterilmiştir (Özdemir, 2002).

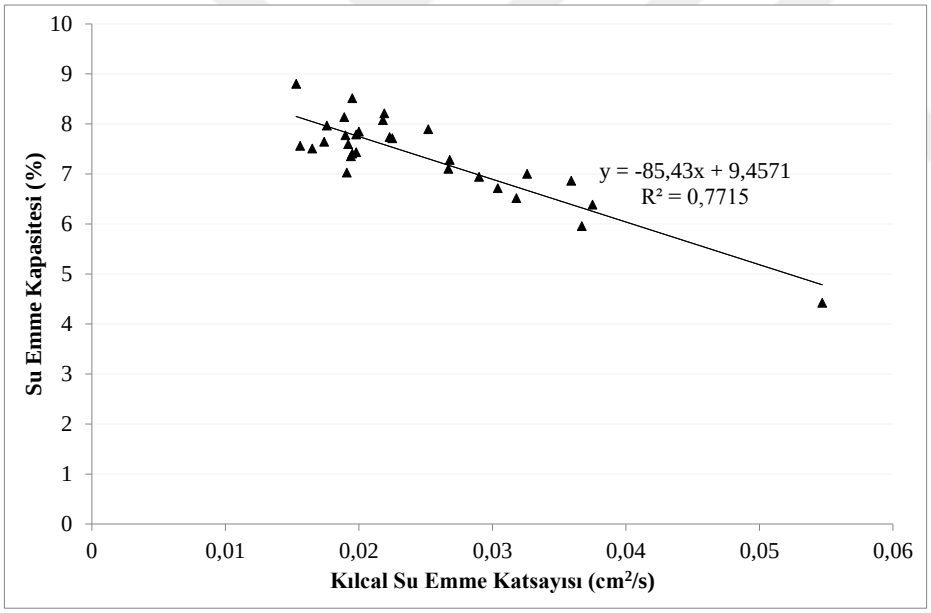
Kılcal yolla emilen suyun bir müddet sonra HLB'de bulunan ve su emme yeteneğini sınırlayan lif türleri ile karşılaşarak lif bo yunca yolunu değiştirdiği ve tek yönden emilen suyun ilerlemesini kısıtladığı düşünülmektedir. Su emme kapasitesi belirlenirken dışa açık tüm boşluklardan içeriye su girer. Kılcal su emme deneyinde ise kapiler boşluklardan su ilerler. HLB'lerde liflerin köprüleme etkisi ile suyun lif hattında hareket ettiği ve beton içinde karşılaştığı boşluk sayısı artmaktadır. Böylece daha fazla suyu bünyesine alabildiği düşünülmektedir. Dolayısı ile su emme kapasitesi yüksek olan betonlarda bile kılcal su emme katsayısının daha düşük olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.30. HLB numunelerin kılcal su emme katsayılarının belirlenmesi a)M7 b)M8 c)M14 d)M17 e)M23 f)M28



Şekil 4.31. HLB numunelerin kılcal su emme katsayıları



Şekil 4.32. HLB numunelerin su emme kapasitesi ile kılcal su emme katsayısı arasındaki ilişki

Deneysel sonuçlara göre varyans analizi yapılarak HLB numunelerin KSEK'sini etkileyen bağımsız değişkenleri belirlemek için yüksek korelasyonlu (R^2=0,946) kuadratik regresyon modeli oluşturulmuştur. Çizelge 4.9'da ANOVA sonuçları ve bağımsız değişkenlerin etki ağırlıkları verilmiştir. Eş. (4.18)'de istatistiksel olarak önemli olmayan parametreler çıkarılarak regresyon denklemi sadeleştirilmiştir.

$$KSEK\ (cm^2/s) = 3729{,}02 + 0{,}03*SL*D + 534*UK*EAFC + 3{,}86*\ CEL^2 \quad (4.18)$$

HLB numunelerin KSEK'si üzerinde bağımsız değişkenlerin bireysel etkileri ve istatistiksel olarak önemli parametrelerin etkileri Şekil 4.33'de gösterilmiştir. ÇL, CEL ve SL, KSEK'yi azaltıcı etki yaparken (Şekil 4.33a,b,c), PL artırıcı etki yapmıştır (Şekil 4.33d). CEL, karesel etkisinden dolayı (CEL^2) %20,5 oranında önemli bir etki oranına sahip, istatistiksel olarak anlamlı bir parametredir. Bolat, Şimşek, Çullu, Durmuş ve Can (2014), çalışmalarında SL'nin betonun KSEK'sini azalttığını bildirmişlerdir. Betonun kalıplara yerleştirilmesi sırasında uygulanan titreşimin etkisi ile SL gibi yoğunluğu az olan liflerin yukarı doğru hareket etmesi ile betonun üst tabakasında toplandığını ve dolayısı ile alt yüzeyde su kanalı oluşturabilecek lifin kalmadığını belirtmişlerdir. Bu nedenle de HLB numunelerin KSEK daha düşük değerlerdedir. Yehia, Douba, Abdullahi ve Farrag (2016), ÇL ve SL arasındaki etkileşimin, kontrol numunesine göre geçirgenliğinin artmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Bu durumun, ÇL, SL ve bağlayıcı hamur arasında yer alan etkileşim bölgelerindeki boşlukların artması ile ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir. Bu çalışmada da benzer durumla karşılaşılmıştır (Şekil 4.33h).

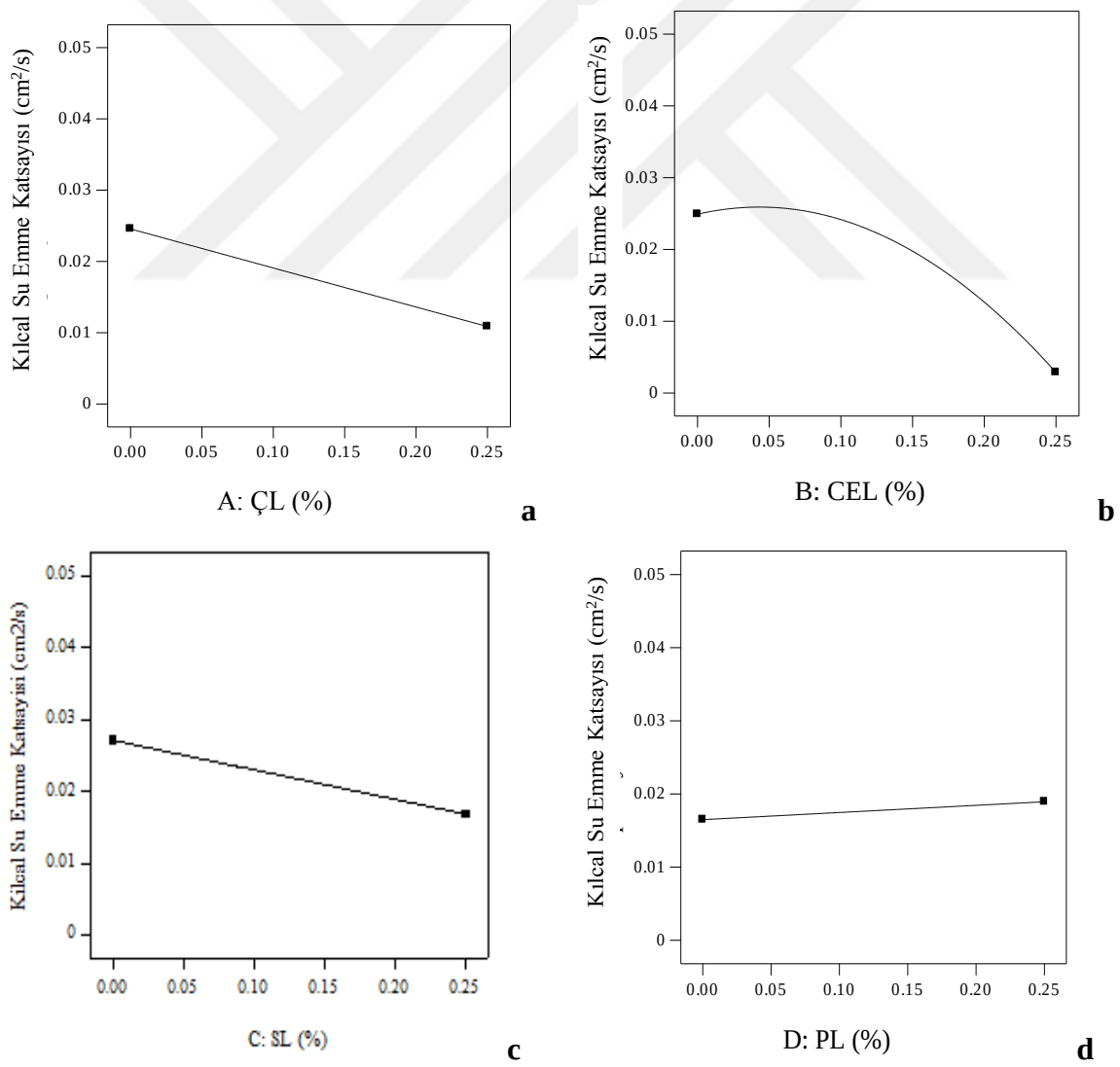
UK ve EAFC'nin çimento ve DKA ile yer değiştirmesi KSEK'yi azaltmak için tercih edilen bir yöntem olabilir. Bağlayıcı dozajının artması betondaki boşluk yapısının azalmasına yarar sağladığından ve aynı zamanda UK ile reaksiyonu ile ilave ürün oluşturarak boşlukların dolmasını desteklediğinden KSEK'yi azaltmaya yardımcı olmuştur.

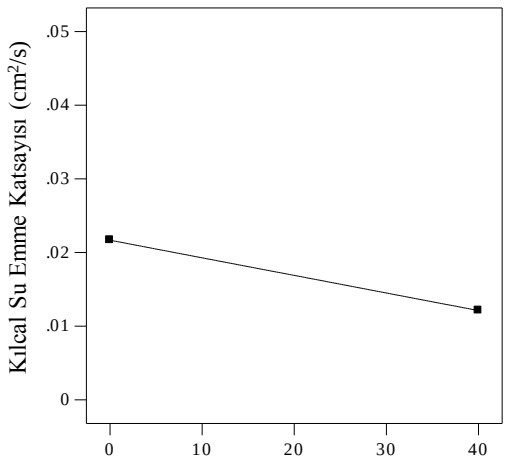
UK katkısı dolgu etkisi nedeniyle HLB'lerde KSEK'nin azalmasına neden olmuştur (Şekil 4.33e) ve ayrıca ilave kalsiyum silikat hidrat (CSH) oluşumuna yardımcı olduğundan boşluklar ilave ürünlerle dolmuştur (Ercikdi, Kesimal, Cihangir, Deveci ve Alp,2009).

DKA ile yer değiştirilen EAFC, HLB'lerin KSEK'ye pozitif yönde katkıda bulunmuştur ve Şekil 4.32f'de görüldüğü gibi KSEK 0,025 cm^2 / s'den 0,007 cm^2 / s'ye düşmüştür. Bunun nedeni, EAFC'nin içyapısının DKA'dan daha yoğun olması ve gözeneklerin daha az olması olarak düşünülmüştür.

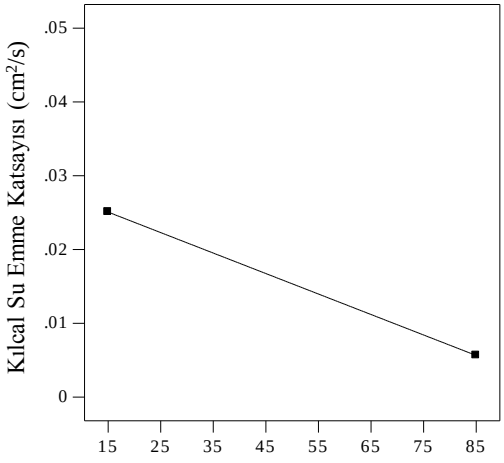
Bağlayıcı dozajı 300 kg/m^3'ten 400 kg/m^3'e artırıldığında, HLB'nin KSEK değeri Şekil 4.32g'de görüldüğü gibi 0,02 cm^2/s'den 0,009 cm^2/s'ye düşmüştür. D arttıkça, bağlayıcı hamur hacmi artar ve böylece agrega yüzeyleri daha iyi sarılır. Dolayısı ile HLB numunelerin kapiler geçirgenliği azalır (Fall ve Benzaazoua, 2005).

Bağımsız parametrelerin istatistiksel olarak anlamlı ikili etkileşimleri sırasıyla UK-EAFC ve SL-D ve etki oranları sırasıyla %19,5 ve %8'dir. Şekil 4.33i'den EAFC ve UK'nın yüksek oranlarda kullanılması ile KSEK'nin azaldığı anlaşılmaktadır. Yani, EAFC %85'e kadar arttırıldığında ve UK %20 oranında çimento ile yer değiştirilerek kullanılabilir ve bu durum KSEK üzerinde olumlu sonuçlar verir. Ancak, UK yer değiştirme oranı %20'yi aşarsa, KSEK değeri yaklaşık 5 kar artar. Bu durumda kılcal yolla su emme özelliğinin önemli olduğu betonlarda UK yer değiştirme oranının %20'yi aşmaması gerekir. Bağlayıcı dozajı düşük olan HLB'lerin KSEK'sini azaltmak için SL kullanımı önerilebilir. Şekil 4.32j'de görüldüğü gibi, D 300 kg/m^3 olduğunda %0,25 SL kullanılarak lifler köprüleme grevii yerine getirebilir ve beton taneciklerini bir arada tutabilir. Böylece KSEK'nin 0,05 cm^2/s'den 0,02 cm^2/s'ye düşmesi sağlanabilir.

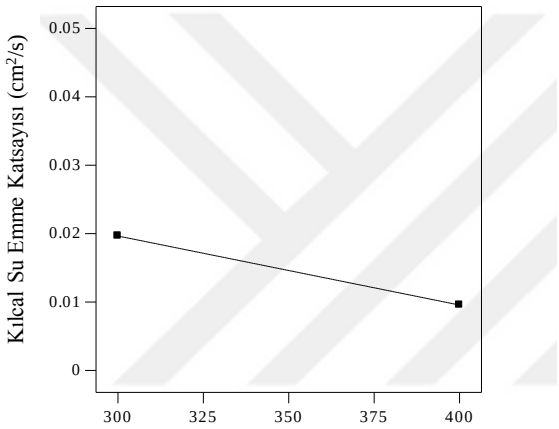



Kılcal Su Emme Katsayısı (cm²/s)
.05
.04
.03
.02
.01
0
0
10
20
30
40
E: UK (%)

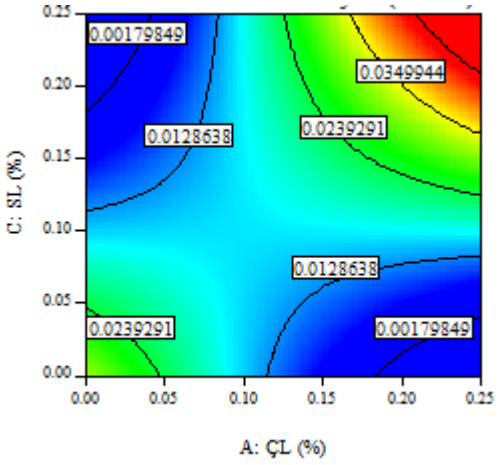
e


Kılcal Su Emme Katsayısı (cm²/s)
.05
.04
.03
.02
.01
0
15
25
35
45
55
65
75
85
F: EAFC (%)

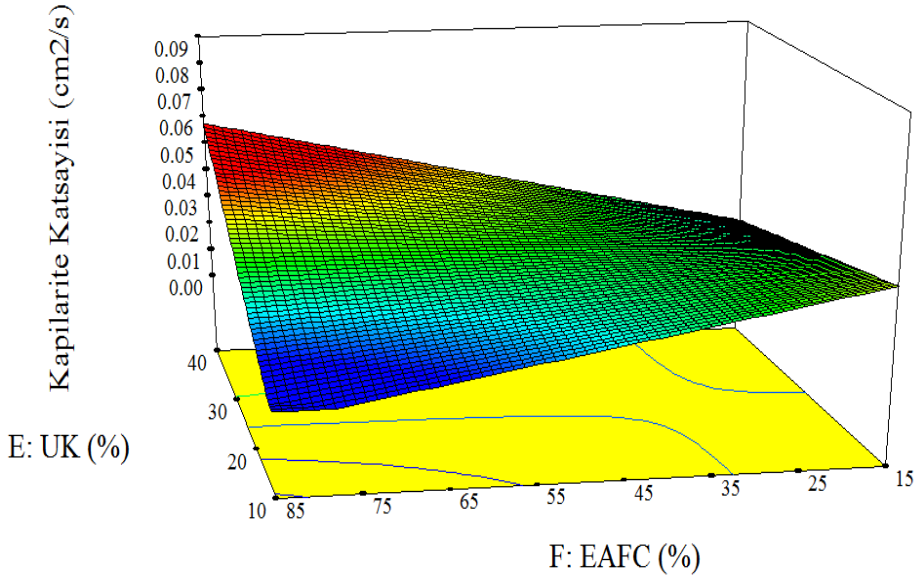
f


Kılcal Su Emme Katsayısı (cm²/s)
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
300
325
350
375
400
G: D (kg/m³)

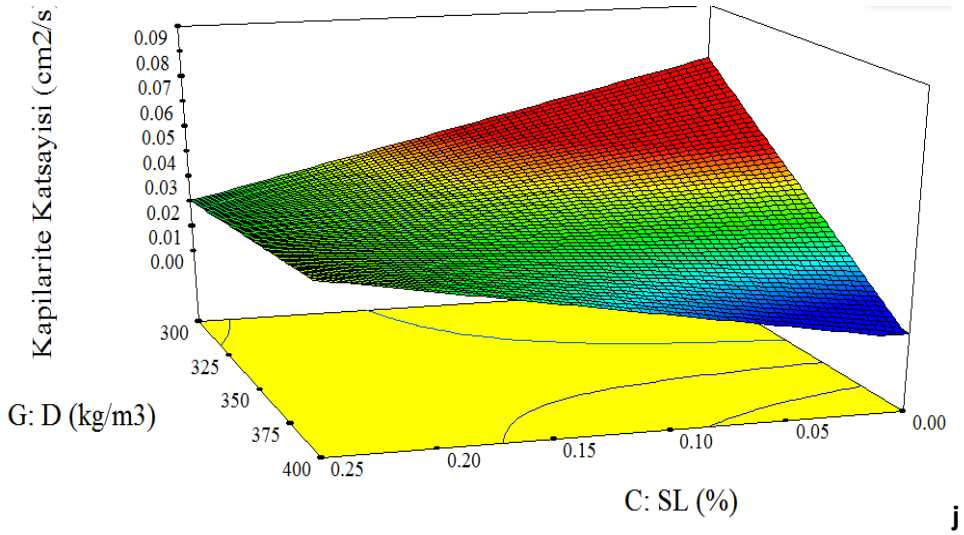
g


C: SL (%)
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
0.00
0.00179849
0.0349944
0.0128638
0.0239291
0.0128638
0.0239291
0.00179849
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
0.25
A: ÇL (%)

h


Kapilarite Katsayisi (cm2/s)
0.09
0.08
0.07
0.06
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0.00
40
30
20
10
E: UK (%)
85
75
65
55
45
35
25
15
F: EAFC (%)

i



Şekil 4.33. Bağımsız değişkenlerin HLB'lerin kılcal su emme katsayısına olan etkileri

4.6. Durabilite Özelliklerinin Belirlenmesi

HLB, Çizelge 3.5'de belirtilen şartlara göre üretilip 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak 28 gün su kürüne tabii tutulmuştur. HLB'lerin durabilite özelliklerini belirlemek için numuneler asit (H_2SO_4) ve sülfat (Na_2SO_4) ile hazırlanan çözeltilerde 400 gün bekletilmiş ve bu süre zarfında farklı günlerde ağırlık ve dayanım kayıpları belirlenmiştir. Deney sonuçları Çizelge 4.10'da verilmiştir. Ayrıca yangın etkisini laboratuvar ortamında belirleyebilmek için numuneler 250 °C, 500°C ve 750 °C yüksek sıcaklıklara maruz bırakılarak dayanım ve donatı-beton arasındaki çekip çıkarma yük değişimleri tespit edilmiştir. 720 gün sonunda HLB numunelerin karbonatlaşma derinlikleri de ölçülmüştür. Deney sonuçları Çizelge 4.11'de verilmiştir. Deney sonuçları üzerinde ANOVA yapılarak bağımsız değişkenler ile bağımlı değişkenler arasındaki ilişki, bağımsız değişkenlerin çoklu etkileşimleri ve istatistiksel olarak etki ağırlıkları belirlenmiştir. Sonuçların istatistiksel analizi Çizelge 4.12'de verilmiştir.

Çizelge 4.10. HLB'lerin asit ve sülfat direncine ait deney sonuçları

Karışım No	A. S. Ağırlık Değişimi (%)			S. S. Ağırlık Değişimi (%)			A. S Dayanım Değişimi (%)		S. S Dayanım Değişimi (%)	
	A60	A300	A400	S60	S300	S400	A60	A400	S60	S400
M1	-7,4	-9,1	-12,3	4,5	6,4	1,9	-12,1	-38,3	-18,8	-31,6
M2	-6,6	-9,0	-11,4	3,8	7,5	3,7	-30,0	-44,3	-22,2	-27,8
M3	-9,1	-12,5	-14,8	6,3	8,6	2,3	-37,7	-46,3	-19,0	-35,7
M4	-5,0	-5,2	-9,9	5,6	7,1	1,5	-17,7	-43,4	-22,8	-25,5
M5	-2,2	-2,8	-4,6	4,6	11,9	7,3	-21,1	-40,3	-38,0	-47,3
M6	-5,9	-9,5	-10,8	1,6	11,2	9,6	-9,0	-35,7	-24,2	-36,0
M7	-8,2	-10,7	-12,8	4,2	8,6	4,3	-16,7	-38,0	-15,7	-28,4
M8	-4,2	-10,0	-11,8	4,6	9,6	5,0	-4,8	-20,5	-10,6	-37,5
M9	-6,7	-11,3	-12,1	4,0	6,9	2,9	-11,0	-33,0	-14,7	-25,5
M10	-9,1	-12,3	-14,5	6,1	9,8	3,7	-14,6	-49,7	-41,7	-64,3
M11	-12,5	-13,8	-15,7	1,8	7,5	5,6	-7,1	-40,9	-24,8	-35,1
M12	-1,6	-2,7	-3,9	7,5	7,8	0,3	-14,1	-18,4	-22,5	-28,5
M13	-8,6	-11,4	-13,1	2,7	11,7	9,0	-11,4	-43,7	-13,7	-55,4
M14	-12,7	-14,2	-14,5	7,6	8,8	1,2	-6,4	-44,6	-15,6	-28,0
M15	-9,3	-11,8	-13,9	2,5	4,9	2,5	-27,4	-46,7	-14,1	-28,1
M16	-14,1	-16,1	-19,1	5,5	10,6	5,1	-4,7	-66,6	-51,8	-74,0
M17	-7,6	-9,7	-11,0	8,1	12,0	3,9	-22,6	-52,9	-34,8	-66,5
M18	-10,9	-13,2	-14,3	3,6	8,7	5,1	-5,8	-46,0	-25,0	-48,7
M19	-6,4	-6,6	-9,6	4,1	8,3	4,2	-20,6	-47,7	-35,7	-47,2
M20	-8,2	-10,5	-13,5	4,4	8,7	4,2	-35,0	-62,6	-44,4	-66,8
M21	-6,8	-8,3	-14,6	2,6	7,6	5,0	-7,5	-44,4	-28,0	-50,4
M22	-2,6	-4,4	-5,8	3,0	8,1	5,1	-19,4	-31,9	-27,0	-32,0
M23	-10,1	-11,3	-12,0	3,6	5,9	2,3	-21,9	-40,5	-14,2	-44,2
M24	-8,5	-11,6	-12,6	1,8	7,4	5,6	-43,8	-47,6	-34,2	-40,7
M25	-9,5	-10,4	-10,7	2,9	5,7	2,8	-24,5	-34,6	-26,5	-41,0
M26	-4,0	-5,3	-6,0	3,2	6,3	3,1	-15,8	-19,9	-3,3	-47,7
M27	-7,8	-10,8	-15,2	3,9	5,7	1,8	-20,2	-38,0	-11,1	-26,4
M28	-10,4	-11,9	-12,5	4,2	5,3	1,1	-25,8	-35,2	-22,6	-44,5
M29	-12,6	-14,1	-15,8	3,9	7,9	4,0	-41,3	-40,4	-23,8	-49,4
M30	-7,2	-8,7	-10,0	3,0	6,0	3,0	-27,0	-45,8	-32,9	-38,8

A.S. : Asit atağından sonra, S. S.: Sülfat atağından sonra

Çizelge 4.11. HLB'lerin yüksek sıcaklık altındaki dayanımı, çekip çıkarma yükü ve zamana bağlı karbonatlaşma derinliği deney sonuçları

Karışım No	Dayanım Değerleri (MPa)				Çekip Çıkarma Yük Değerleri (kg)				Karbonatlaşma Derinliği (mm)	
	23°C	250°C	500°C	750°C	23°C	250°C	500°C	750°C	60. gün	720. gün
M1	37,9	25,2	18,0	14,9	713	657	527	358	2,3	12,8
M2	20,8	11,4	10,2	7,4	434	400	320	214	2,5	13,0
M3	32,1	13,0	9,8	9,8	869	799	586	435	1,9	10,5
M4	35,1	14,8	10,7	10,3	527	491	375	284	1,7	4,5
M5	37,5	19,4	11,4	9,2	755	661	497	351	1,4	6,5
M6	25,1	13,0	14,3	12,	481	451	348	260	2,0	8,3
M7	36,9	21,3	19,1	15,8	779	724	588	430	1,8	7,8
M8	33,6	23,9	11,2	10,	693	620	492	386	1,5	6,5
M9	25,2	16,0	13,2	13,6	625	574	457	298	1,6	8,8
M10	27,1	17,1	18,1	10,2	226	185	162	85	1,0	5,3
M11	33,0	15,8	15,0	12,5	496	427	329	268	1,7	7,3
M12	43,1	24,9	17,5	16,7	745	662	522	387	1,4	9,5
M13	35,0	24,8	12,3	11,2	869	778	561	413	1,2	9,8
M14	36,3	29,2	21,3	9,8	352	315	248	196	1,1	7,4
M15	25,2	21,4	20,6	20,1	459	398	336	267	1,6	8,0
M16	32,5	23,6	21,7	15,2	367	274	188	75	1,3	5,8
M17	36,0	16,0	11,0	10,	293	231	225	114	1,5	7,5
M18	33,3	23,5	19,9	12,2	490	414	348	225	1,0	5,3
M19	29,8	21,5	15,0	14,4	465	417	340	264	0,8	4,7
M20	27,2	20,6	10,5	10,5	268	211	177	103	1,8	4,3
M21	26,4	18,6	12,7	12,7	425	360	291	208	1,4	5,9
M22	35,7	22,5	19,2	8,7	517	433	344	231	1,2	8,3
M23	23,7	11,5	8,8	10,7	558	476	375	242	2,2	8,8
M24	24,6	12,3	10,6	8,1	399	346	293	215	0,5	6,0
M25	28,3	16,0	11,7	9,8	382	351	265	209	0,7	5,8
M26	27,3	17,4	17,2	9,6	422	353	274	200	0,9	6,0
M27	42,6	18,5	18,3	9,6	589	529	462	307	0,2	4,3
M28	31,0	17,8	15,3	14,3	909	831	664	491	0,1	3,5
M29	31,9	16,2	9,5	6,7	531	458	378	261	2,1	9,0
M30	31,7	16,7	12,2	8,2	388	339	281	181	1,2	6,1

Çizelge 4.12. Asit ve sülfat direncine ait deney sonuçlarının istatistiksel analizi

Bağımlı değişken	Bağımsız değişkenler	RM	R^2	SD	HKT	HKO	F-değeri	P-değeri	Ö	%ρ
Asit atağından sonra basınç dayanımı değişimi (%)	Sabit	-30,84	0,835	14	2666,94	190,50	5,00	0,0019	E	-
	ÇL	-138,41		1	44,28	44,28	1,16	0,2980	H	1,1
	SL	+276,62		1	17,54	17,54	0,46	0,5078	H	0,4
	PL	-22,23		1	2,73	2,73	0,07	0,7927	H	0,1
	UK	-4,40		1	151,18	151,18	3,97	0,0649	H	3,8
	EAFC	+0,48		1	5,07	5,07	0,13	0,7203	H	0,1
	PL	-0,05		1	1172,62	1172,62	30,78	< 0,0001	E	29,4
	ÇL * SL	-182,29		1	243,89	243,89	6,40	0,0231	E	6,1
	ÇL * UK	+2,90		1	229,38	229,38	6,02	0,0268	E	5,8
	ÇL * EAFC	-1,393		1	513,79	513,79	13,49	0,0023	E	12,9
	ÇL * D	+0,49		1	146,38	146,38	3,84	0,0688	H	3,7
	SL * PL	+195,64		1	340,46	340,46	8,94	0,0092	E	8,5
	SL * D	-0,82		1	271,01	271,01	7,11	0,0176	E	6,8
	UK * EAFC	-0,01		1	152,80	152,80	4,01	0,0636	H	3,8
	UK * D	+0,01		1	694,75	694,75	18,24	0,0007	E	17,4
	Artık değer			15	571,39	38,09				
	Toplam			29	3238,33					
Asit atağından sonra ağırlık değişimi (%)	Sabit	-23,22	0,979	24	336,12	14,01	9,83	0,0092	E	-
	ÇL	-2218,15		1	22,15	22,15	15,55	0,0109	E	3,8
	CEL	-675,66		1	28,82	28,82	20,24	0,0064	E	5,0
	SL	+2326,56		1	28,33	28,33	19,89	0,0066	E	4,9
	PL	+117,22		1	18,11	18,11	12,72	0,0161	E	3,1
	UK	+2,26		1	15,34	15,34	10,77	0,0219	E	2,7
	EAFC	+0,49		1	0,24	0,24	0,17	0,6972	H	0,0
	D	+0,03		1	4,07	4,07	2,86	0,1516	H	0,7
	ÇL * CEL	-2307,39		1	25,40	25,40	17,83	0,0083	E	4,4
	ÇL * SL	-1613,70		1	28,55	28,55	20,04	0,0065	E	5,0
	ÇL * PL	+1580,30		1	23,02	23,02	16,16	0,0101	E	4,0
	ÇL * UK	+27,84		1	28,95	28,95	20,33	0,0063	E	5,0
	ÇL * EAFC	-8,13		1	29,85	29,85	20,96	0,0060	E	5,2
	ÇL * D	+6,49		1	27,96	27,96	19,63	0,0068	E	4,9
	CEL * SL	+262,03		1	26,98	26,98	18,94	0,0073	E	4,7
	CEL * PL	-7574,23		1	28,39	28,39	19,93	0,0066	E	4,9
	CEL * UK	+14,35		1	27,78	27,78	19,50	0,0069	E	4,8
	CEL * EAFC	+35,22		1	27,52	27,52	19,32	0,0071	E	4,8
	SL * PL	+9623,66		1	28,41	28,41	19,95	0,0066	E	4,9
	SL * EAFC	-31,98		1	28,41	28,41	19,95	0,0066	E	4,9
	SL * D	-5,63		1	26,17	26,17	18,38	0,0078	E	4,5
	PL * UK	-35,91		1	25,45	25,45	17,87	0,0083	E	4,4
	PL * EAFC	+5,00		1	30,31	30,31	21,28	0,0058	E	5,3
	UK * EAFC	-0,02		1	24,41	24,41	17,14	0,0090	E	4,2
	UK * D	$-6,5*10^{-3}$		1	21,54	21,54	15,12	0,0115	E	3,7
	Artık değer			5	7,12	1,42				
	Toplam			29	343,25					
Sülfat atağından sonra basınç dayanımı değişimi (%)	Sabit	-33,86	0,941	26	4983,31	191,67	1,85	0,342	H	-
	ÇL	-31945,72		1	722,15	722,15	6,96	0,0778	H	4,54
	CEL	-5890,62		1	710,75	710,75	6,85	0,0792	H	4,47
	SL	39163,75		1	712,99	712,99	6,87	0,079	H	4,48
	PL	-4379,77		1	684,59	684,59	6,59	0,0827	H	4,30
	UK	2,86		1	461,69	461,69	4,45	0,1255	H	2,90

Çizelge 4.12. (Devam) Asit ve sülfat direncine ait deney sonuçlarının istatistiksel analizi

	EAFC	9,03		1	2,76	2,76	0,027	0,8809	H 0,02
	D	-0,09		1	4,91	4,91	0,047	0,8417	H 0,03
	ÇL * CEL	-48112,90		1	699,41	699,41	6,74	0,0807	H 4,40
	ÇL * SL	-27732,94		1	667,19	667,19	6,43	0,0851	H 4,19
	ÇL * PL	31389,44		1	677,1	677,1	6,52	0,0837	H 4,25
	ÇL * UK	467,57		1	703,03	703,03	6,77	0,0802	H 4,42
	ÇL * EAFC	-148,82		1	692,2	692,2	6,67	0,0816	H 4,35
	ÇL * D	98,22		1	686,13	686,13	6,61	0,0824	H 4,31
	CEL * SL	7146,45		1	655,94	655,94	6,32	0,0867	H 4,12
	CEL * PL	-1,08		1	696,8	696,8	6,71	0,081	H 4,38
	CEL * UK	251,96		1	680,56	680,56	6,55	0,0832	H 4,27
	CEL * EAFC	558,52		1	700,04	700,04	6,74	0,0806	H 4,40
	CEL * D	-17,13		1	511,38	511,38	4,93	0,1131	H 3,22
	SL * PL	1,46		1	699,1	699,1	6,73	0,0807	H 4,39
	SL * UK	62,74		1	451,92	451,92	4,35	0,1282	H 2,84
	SL * EAFC	-470,47		1	696,76	696,76	6,71	0,081	H 4,38
	SL * D	-103,94		1	709,96	709,96	6,84	0,0793	H 4,46
	PL * UK	-686,84		1	692,79	692,79	6,67	0,0816	H 4,35
	PL * EAFC	56,30		1	626,94	626,94	6,04	0,0911	H 3,94
	PL *D	23,71		1	515,31	515,31	4,96	0,1122	H 3,24
	UK * EAFC	-0,34		1	851,9	851,9	8,2	0,0643	H 5,35
	Artık değer			3	311,06	103,69			
	Toplam			29	5302,71				
Sülfat atağından sonra ağırlık değişimi (%)	Sabit	+4,47	0,934	25	106,92	4,28	2,37	0,2082	H -
	ÇL	+1735,65		1	29,63	29,63	16,45	0,0154	H 4,54
	CEL	+332,56		1	43982	31,05	17,24	0,0142	H 4,47
	SL	-2864,12		1	30,42	30,42	16,89	0,0147	H 4,48
	PL	+1037,88		1	30,37	30,37	16,86	0,0148	H 4,30
	UK	-0,71		1	13,5	13,5	7,49	0,052	H 2,90
	EAFC	-0,74		1	9,1	9,1	5,05	0,0879	H 0,02
	D	+0,02		1	4,5	4,5	2,5	0,189	H 0,03
	ÇL * CEL	+4284,42		1	29,89	29,89	16,59	0,0152	H 4,40
	ÇL * SL	+1522,51		1	28,59	28,59	15,87	0,0164	H 4,19
	ÇL * PL	-2627,73		1	29,82	29,82	16,55	0,0152	H 4,25
	ÇL * UK	-29,79		1	29,59	29,59	16,43	0,0154	H 4,42
	ÇL * EAFC	+10,65		1	29,56	29,56	16,41	0,0155	H 4,35
	ÇL * D	-5,73		1	31,22	31,22	17,33	0,0141	H 4,31
	CEL * SL	-656,0		1	28,84	28,84	16,01	0,0161	H 4,12
	CEL * PL	+6614,35		1	31,25	31,25	17,35	0,0141	H 4,38
	CEL * UK	-17,38		1	28,71	28,71	15,94	0,0162	H 4,27
	CEL * EAFC	-39,14		1	30,82	30,82	17,11	0,0144	H 4,40
	CEL * D	+1,48		1	19,17	19,17	10,64	0,031	H 3,22
	SL * PL	-9302,09		1	30,79	30,79	17,09	0,0144	H 4,39
	SL * UK	-13,98		1	30,79	30,79	17,09	0,0144	H 2,84
	SL * EAFC	+28,58		1	30,79	30,79	17,09	0,0144	H 4,38
	SL * D	+8,89		1	31,13	31,13	17,28	0,0142	H 4,46
	PL * UK	+55,77		1	44135	31,1	17,26	0,0142	H 4,35
	PL * D	-4,67		1	30,67	30,67	17,03	0,0145	H 3,94
	UK * EAFC	+0,03		1	33,85	33,85	18,79	0,0123	H 3,24
	Artık değer			4	7,21				
	Toplam			29	114,12				

Çizelge 4.13. Karbonatlaşma derinliği deney sonuçlarının istatistiksel analizi

Bağımlı değişkenler	Bağımsız değişkenler	RM	R^2	SD	HKT	HKO	F-değeri	P-değeri	Ö	%ρ
Karbonatlaşma Derinliği (mm)	Sabit	-1,75	0,880	24	142,35	5,93	1,52	0,3402	H	-
	ÇL	-1.773,52		1	0,25	0,25	0,064	0,8106	H	0,0
	CEL	-542,39		1	42,38	42,38	10,89	0,0215	E	6,4
	SL	796,80		1	23,33	23,33	5,99	0,0581	H	3,5
	PL	1.264,43		1	11,65	11,65	2,99	0,1442	H	1,8
	UK	1,99		1	0,045	0,045	0,011	0,9188	H	0,0
	EAFC	0,00		1	0,00289	0,00289	0,00074	0,9793	H	0,0
	D	0,02		1	9,16	9,16	2,35	0,1857	H	1,4
	ÇL*CEL	601,07		1	38,93	38,93	10	0,025	E	5,9
	ÇL*SL	-1.085,10		1	40,4	40,4	10,38	0,0234	E	6,1
	ÇL*UK	13,51		1	36,87	36,87	9,47	0,0275	E	5,5
	ÇL*EAFC	-2,15		1	27,19	27,19	6,99	0,0458	E	4,1
	ÇL*D	4,58		1	44,04	44,04	11,31	0,02	E	6,6
	CEL*SL	-166,10		1	13,95	13,95	3,58	0,1169	H	2,1
	CEL*PL	-4.801,44		1	41,26	41,26	10,6	0,0226	E	6,2
	CEL*UK	5,72		1	44,77	44,77	11,5	0,0194	E	6,7
	CEL*EAFC	14,95		1	40,26	40,26	10,34	0,0236	E	6,1
	CEL*D	0,87		1	12,01	12,01	3,09	0,1394	E	1,8
	SL*PL	5.268,10		1	40,53	40,53	10,41	0,0233	E	6,1
	SL*UK	-13,54		1	40,7	40,7	10,46	0,0231	E	6,1
	SL*EAFC	-19,90		1	41,87	41,87	10,76	0,022	E	6,3
	PL*UK	-2,89		1	14,08	14,08	3,62	0,1156	H	2,1
	PL* EAFC	7,11		1	39,12	39,12	10,05	0,0248	E	5,9
	PL *D	-4,62		1	44,63	44,63	11,47	0,0195	E	6,7
	UK*D	-0,01		1	17,13	17,13	4,4	0,09	H	2,6
	Artık değer			5	19,46	32568				
	Toplam			29	161,81					

RM: regresyon modeli, R^2: korelasyon katsayısı, SD: serbestlik derecesi, HKT: hatalar karesi toplamı, HKO: hatalar karesi ortalaması, Ö: Önemlilik ($p<0,05$ ise E: Evet, $p>0,05$ ise H: Hayır)

4.6.1. Asit direnci

HLB numuneler %5 konsantrasyonda hazırlanan asit (H_2SO_4) çözeltisinden 60, 300 ve 400 gün sonra çıkarılarak ağırlık değişimleri ile basınç dayanımı değişim oranları belirlenmiştir. Deney sonuçları Çizelge 4.10'da verilmiştir. Asit çözeltisine bırakılmadan önce belirlenen ağırlık ve basınç dayanımı değerleri referans alınarak değişim oranları yüzde cinsinden hesaplanmıştır. HLB numunelerinin ağırlık ve basınç dayanımı değişim oranları sırasıyla Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'te gösterilmiştir. Her sütunun alt sınırı, ifade ettiği zaman dilimine ait oranı ifade etmektedir. Örneğin Şekil 4.34'de M1 numunesi 60, 300 ve 400 gün sonunda ağırlığının sırası ile %7,4, %9,1 ve %12,3'ünü kaybetmiştir. 400 gün sonunda ağırlık kaybının en fazla olduğu numune M16 (%19,1) iken en az olan

numune M12 (%3,9)'dir. Aynı şekilde basınç dayanımı kaybı en fazla olan numune M16 (%66,6) iken en az olan numune M12 (%18,4)'dir.

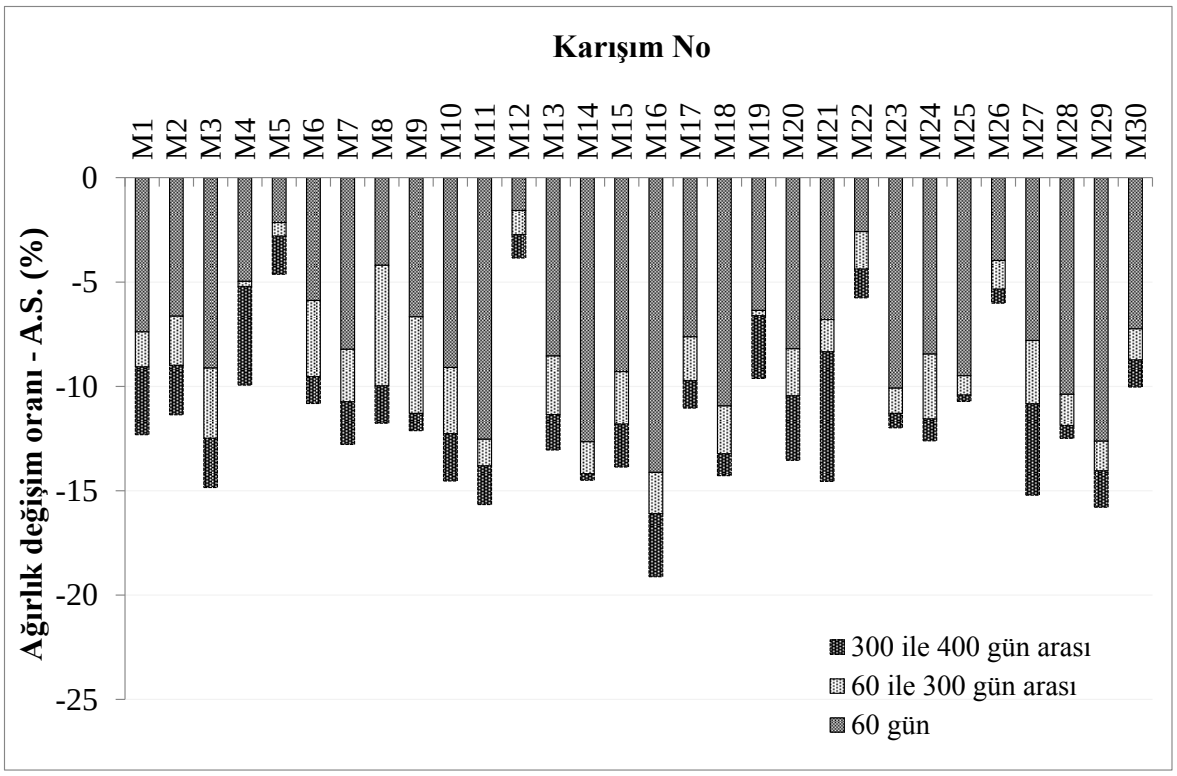
Asit (H_2SO_4) saldırısının çözünme yoluyla beton üzerinde zararlı bir etkisi vardır. Çözünme mekanizması bir dizi reaksiyonla açıklanmıştır. Öncelikle asit parçacıkları betona nüfuz eder, pH seviyesi 12-12,5 aralığında $Ca(OH)_2$ ve kalsiyum alüminat hidratın çözünür ve pH seviyesi 10,6 ile 11,6 arasında olduğunda hacmi 7 kat daha fazla olan ikincil etrenjitler oluşur. Daha sonra pH seviyesi 10,6'nın altına düştüğünde etrenjitin alüminyum hidroksite ayrışması başlar, etrenjit genleşmesine bağlı olarak lokal gerilmeler meydana gelir (Monteny, De Belie, Vincke, Verstraete ve Taerwe, 2001; Hadigheh, Gravina ve Smith, 2017). Son olarak betonun bağlayıcı matrisine doğru asit tanecikleri sızmaya başlar ve beton tanecikleri bozunarak dökülme meydana gelir. Böylece boşluklar oluşur. H_2SO_4 etkisi nedeniyle, kalsiyum silikat hidrat jelleri (C-S-H) yok olur dolayısı ile betonda ağırlık ve dayanım kaybı meydana gelir (Monteny ve diğerleri, 2000). 400 gün asit atağına maruz kalan M4 numunesinin yükleme yapılmadan hemen önceki görüntüsü Resim 4.1'de gösterilmiştir.



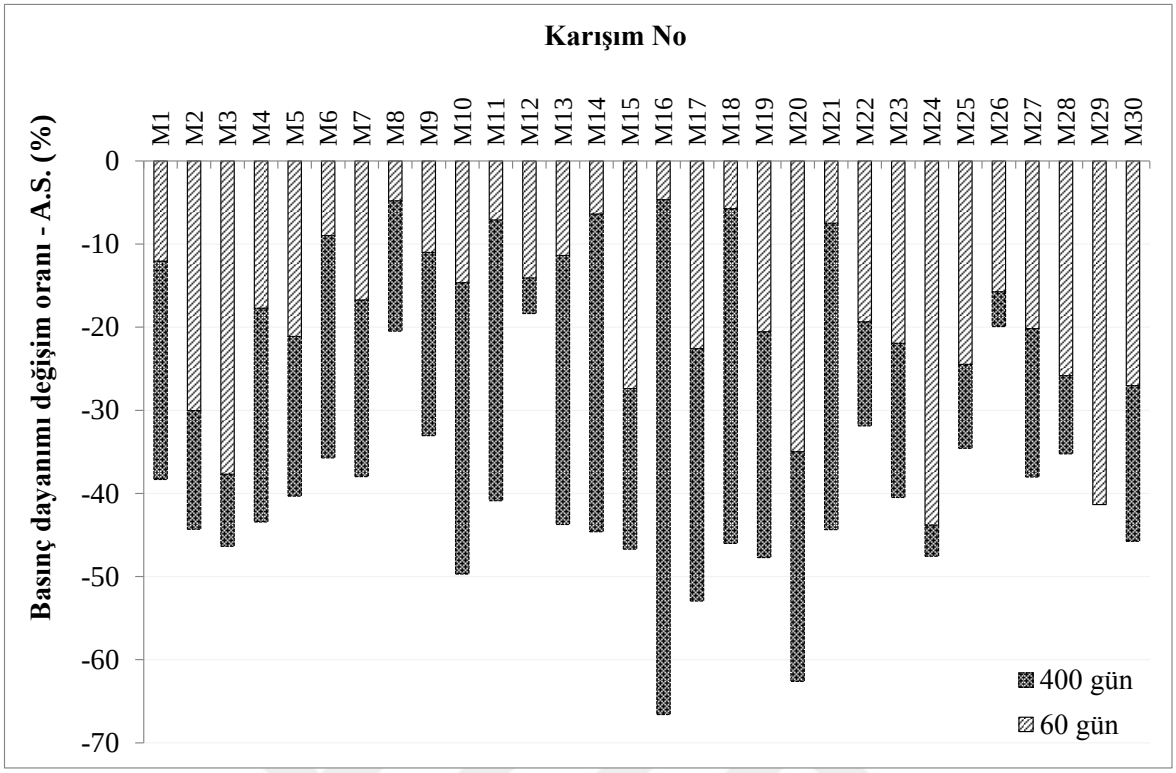
Resim 4.1. 400 gün asit atağına maruz kalan M4 numunesinin görüntüsü

Lif katkılı betonların asit atağına karşı davranışını inceleyen çalışmalar olumlu sonuçların alındığını belirtmiştir. Bassuoni ve Nehdi (2007), asit saldırısı karşısında ÇL ve PL'nin hibritlenmesi ile üretilen betonların ağırlık kaybının on iki hafta sonra %25-30 arasında olduğunu belirtmiştir. Başka bir çalışmada, Nematzadeh ve Fallah-Valukolaee (2017), tüm numunelerde H_2SO_4 saldırısı sırasında ağırlık kaybı meydana geldiğini ifade etmiştir.

Ayrıca, lif katkılı betonlarda H_2SO_4 saldırısının başladığı ilk zamanlarda meydana gelen ağırlık kaybı oranının son zamanlara göre daha az olduğu belirtilen çalışmalarda mevcuttur. Buradan lif katkısının asit saldırısı üzerinde olumlu bir etkisinin olduğu anlaşılmıştır. Ranjith, Venkatasubramani ve Sreevidya (2017), lif içeriğinin %1,5'e kadar artırılmasının betonların dayanıklılık özelliklerini geliştirdiğini belirtmiştir. 90 gün asit atağına maruz kalan harç numunelerin ağırlık kaybı oranında bir artış olduğunu belirtmişlerdir. PL ve CEL'nin hibrit olarak kullanıldığı numunelerin basınç dayanımı ve ağırlık kaybının geleneksel harç numunelerine göre daha az olduğunu ve liflerin harç karışımlarını yoğunlaştırarak bir arada tuttuğunu ifade etmişlerdir.



Şekil 4.34. H_2SO_4 çözeltisinde bekletilen HLB numunelerin zamana bağlı ağırlık değişimi



Şekil 4.35. H_2SO_4 çözeltisinde bekletilen HLB numunelerin zamana bağlı basınç dayanımı değişimi

HLB numunelerin H_2SO_4 atağı karşısında basınç dayanımı ve ağırlık kaybı oranlarını hangi parametrelerin etkilediğini belirlemek için deney sonuçlarına ANOVA uygulanmıştır. Hem ağırlık hem de basınç dayanımını temsil eden 2FI regresyon modelleri oluşturulmuş ve istatistiksel analizi Çizelge 4.12'de verilmiştir. İstatistiksel olarak önemli olmayan parametreler denklemden çıkarılarak Eş. (4.19) ve Eş. (4.20) elde edilmiştir.

Ağırlık değişim oranı - A. S. (%) = -23,22 - 2218,15*ÇL - 675,66*CEL + 2326,56*SL + 117,22*PL + 2,26*UK - 2307,39*ÇL*CEL - 1613,69*ÇL*SL + 1580,30*ÇL*PL + 27,85*ÇL*UK - 8,13*ÇL*EAFC + 6,49*ÇL*D + 262,03*CEL*SL - 7574,23*CEL*PL + 14,35*CEL*UK + 35,22*CEL*EAFC + 9623,67*SL*PL - 31,98*SL*EAFC - 5,63*SL*D- 35,91*PL*UK + 5*PL*EAFC - 0,02*UK*EAFC - 6,50091*10^{-3}*UK*D (4.19)

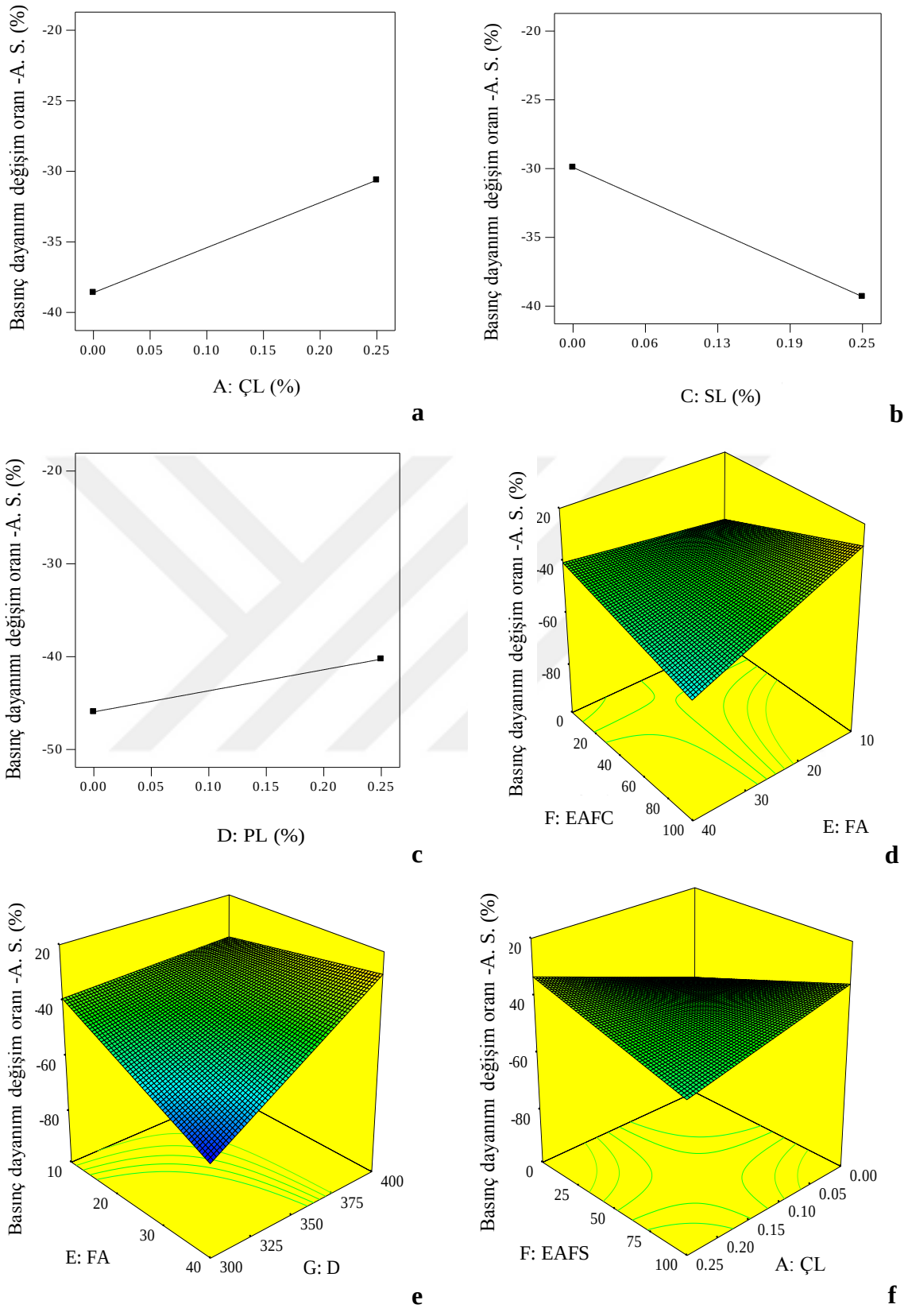
Basınç dayanımı değişim oranı – A. S. (%) = -30,84 - 0,05*D - 182,29*ÇL*SL + 2,90*ÇL*UK - 1,39*ÇL*EAFC + 195,64*SL*PL - 0,82*SL*D + 0,01*UK*D (4.20)

Asit atağı karşısında ÇL, SL ve PL'nin performansları basınç dayanımı kaybı açısından incelenmiştir. Asit saldırısına karşı basınç dayanımı kaybını azaltmak için ÇL ve PL'nin

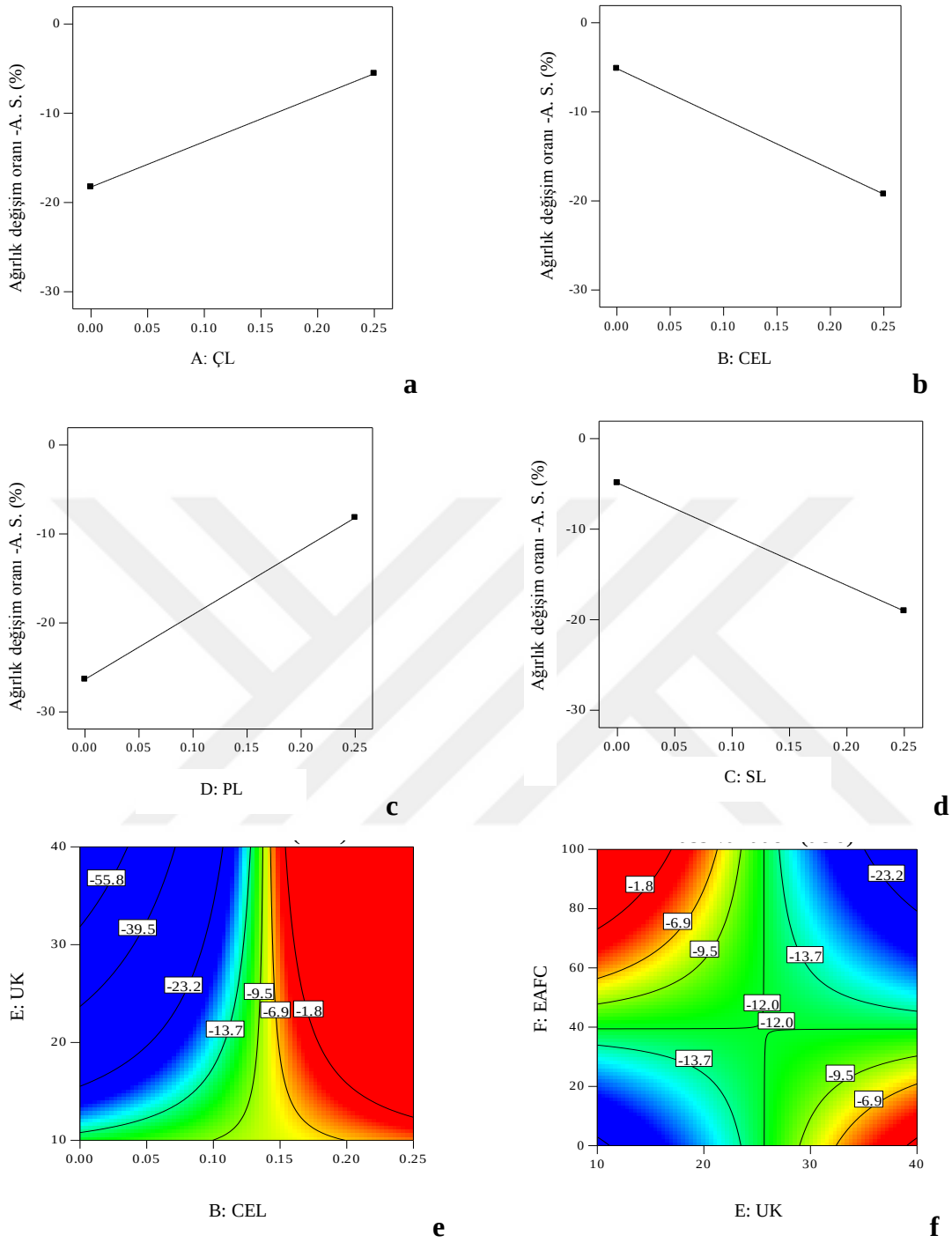
kullanılabilir olduğu ancak SL'nin basınç dayanımı kaybını arttırmaya neden olabileceği görülmüştür (Şekil 4.36a-c). Liflerin yapısı nedeniyle, performansları da değişiklik göstermiştir. Sentetik malzemeler asit etkisine karşı dirençli olmadığından, lifler asit ortamı altında bozulmuştur. Kaufmann (2014), sülfürik asitin betonda önemli bir bozulmaya neden olduğunu ifade etmiştir. Kim, Boyd, Kim ve Lee (2015), pH seviyesi düşük çözeltilerin çimento esaslı malzemelerin artık mukavemetini önemli ölçüde azalttığı belirtilmişlerdir.

EAFC ve UK, HLB karışımlarına, hem doğal kaynak tüketimini hem de lif ilavesi nedeniyle artan maliyetleri azaltma fikri ile eklenmiştir. Bu parametrelerin ikili etkileşiminin kalan mukavemetin korunmasında pozitif etki sağladığı görülmüştür (Şekil 4.36d). EAFC ve UK sırasıyla %100 ve %40 oranlarında yer değiştirildiğinde HLB numunelerin basınç dayanım kaybı artmıştır. Ancak, ideal oranlarda yer değiştirilerek bu olumsuz etkinin terse döndürülmesinin mümkün olduğu görülmüştür. Yani, EAFC %100 yer değiştirilerek kullanılırsa UK yer değiştirme oranı %10 olmalıdır ve bu durumda basınç kaybı oranının %65'ten %25'e düşebileceği görülmüştür (Şekil 4.36d). Bu sonuç literatür çalışmalarından elde edilen bulgular ile de örtüşmektedir (Salman, Frayyeh ve Zghair, 2018). Senff, Labrincha, Ferreira, Hotza ve Repette (2009), puzolanların çimento esaslı malzemelerin davranışını ve mikroyapısını iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

Literatür çalışmalarından bilindiği gibi (Ergün, Kürklü, Serhat ve Mansour, 2013), bağlayıcı dozajı çimento hamuru ve agrega ara yüzünün daha güçlü olması ile doğru orantılıdır. Bu bilgi HLB için de geçerlidir. Betonlar hizmet ömürleri boyunca asit saldırısına maruz kaldıklarında dayanım kaybına mutlaka uğrarlar. HLB numunelerin asit saldırısına karşı basınç dayanımı kaybı, hem D hem de UK'nın birlikte artırılması ile azaltılabilir. Çevik, Alzeebaree, Humur, Niş ve Gülşan (2018) ve Alzeebaree ve diğerleri (2019), UK katkılı jeopolimer betonların düşük kalsiyum içermesinden ve UK'nın dolgu etkisinden dolayı asidik ortamda üstün performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Bağlayıcı dozajı yüksek (400 kg/m^3) bile olsa, UK'nın % 40 gibi büyük oranlarda çimento ile yer değiştirilmesi ile hem performansın iyileştirilebileceği hem de üretim maliyetinin azaltılabileceği düşünülmektedir. Agrega tipi (EAFC) tek başına önemli bir parametre olmasa da, ÇL ve EAFC'nin ikili etkileşiminin basınç dayanımı kaybı üzerinde azaltıcı bir etkisi olmuştur (Şekil 4.36e,f).



Şekil 4.36. Bağımsız değişkenlerin H_2SO_4 atağı karşısında HLB numunelerin basınç dayanımı değişimine etkisi



Şekil 4.37. Bağımsız değişkenlerin H_2SO_4 atağı karşısında HLB numunelerin ağırlık değişimine etkisi

H_2SO_4 çözeltisinde 400 gün bekletilen HLB numunelerde basınç dayanımı kaybının yanı sıra ağırlık kaybı da gözlenmiştir. Bu durumun nedeni yukarıda detayları verilen reaksiyonlar ile açıklanmıştır (Monteny ve diğerleri, 2000). Ürünlerin hacimsel genleşmesi nedeniyle iç gerilim oluşur ve betonda genleşme meydana gelir ve farklı boyutlarda çatlaklar oluşur (Monteny, Belie, Vincke, Verstraete ve Taerwe, 2001). Betonda aşınma

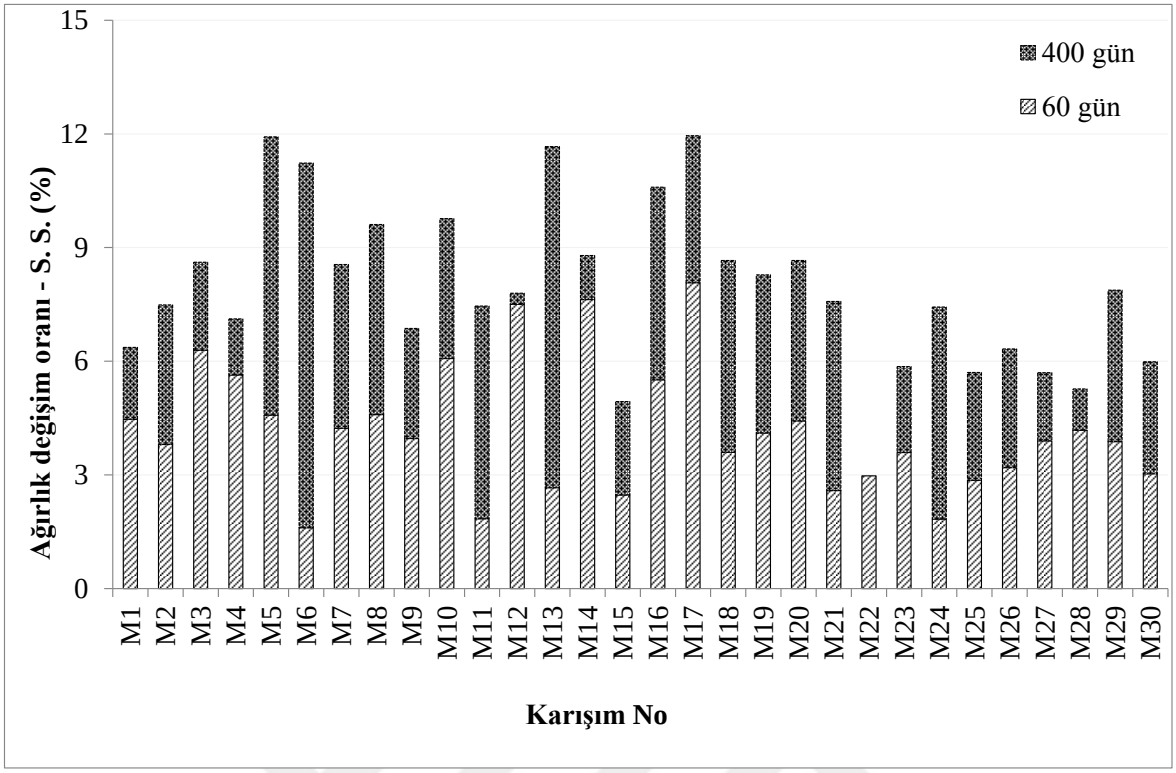
başlar ve beton yüzeyi dökülür (Lee, Hooton, Jung, Park ve Choi, 2008; Schmidt, Lothenbach, Romer, Neuenschwander ve Scrivener, 2009).

Çizelge 4.12 incelendiğinde, HLB'lerin asit saldırısına karşı kütle kaybına neden olan istatistiksel olarak önemli parametrelerin ve ikili etkileşimlerin olduğu görülmektedir. CEL ve SL'nin bireysel etkileri diğer parametrelerden daha yüksektir (sırasıyla %5 ve %4,9). CEL ve SL, ÇL ve PL'den farklı olarak kütle kaybını artırmıştır (Şekil 4.37a-d). Bu bulguyu destekleyen literatür çalışmaları da mevcuttur (Hadigheh, Gravina ve Smith, 2017). Çizelge 4.12'deki etki oranlarından da anlaşılacağı üzere, tüm lifler artık kütle üzerinde bir etkiye sahiptir. Doğru lif seçimi ile ağırlık kaybının %20'den %5'e düşebileceği belirlenmiştir.

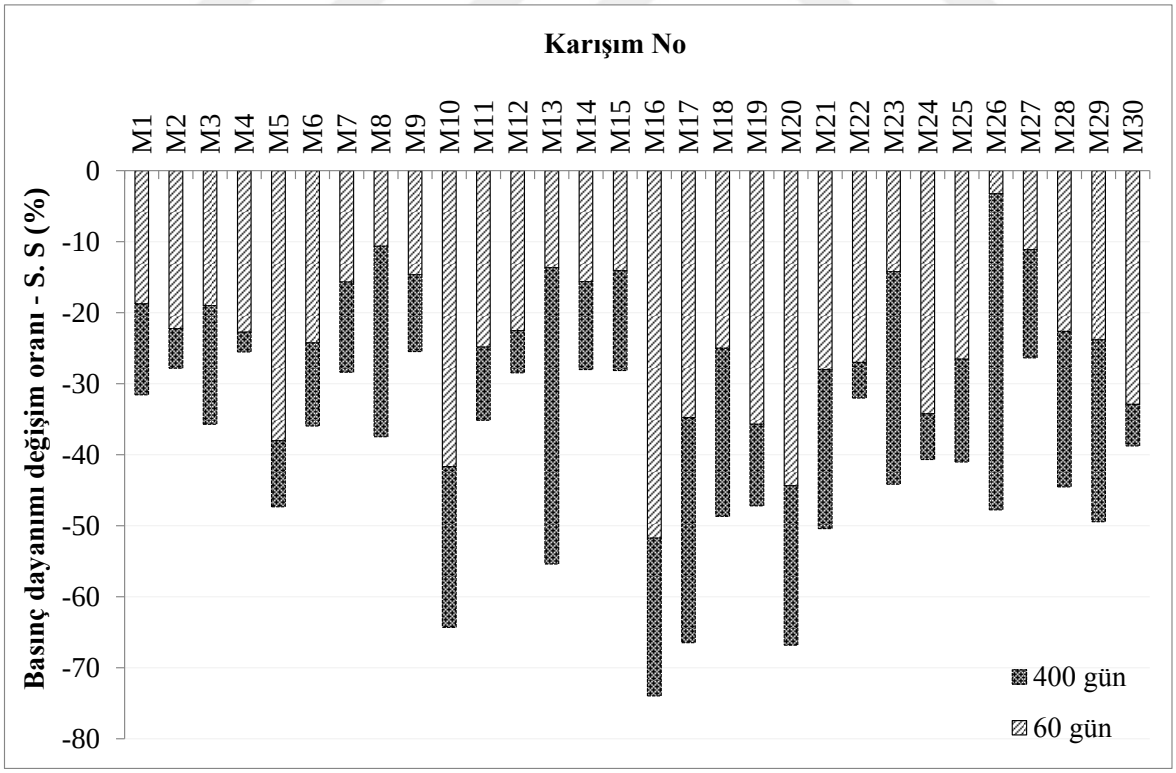
Bağımsız değişkenlerin ikili etkileşimlerinin de kütle değişimini neredeyse aynı oranda etkilediği gözlenmiştir. Şekil 4.36e ve Şekil 4.36f'de bu etkileşimler, kontur grafik formu olarak ifade edilmiştir. Ağırlıkça %10'dan fazla UK ikamesi ve %0,25 CEL ilavesi ile ağırlık kaybının %-1,6'ya düşürülebileceği belirlenmiştir (Şekil 4.37e). UK ikamesi ile yukarıda ifade edilen reaksiyonlarda CaO ve $Ca(OH)_2$ miktarı azaltılarak bozunma olayı yavaşlatılabilir (Hadigheh, Gravina ve Smith, 2017).

4.6.2. Sülfat direnci

HLB numuneler %5 konsantrasyonda hazırlanan sülfat (Na_2SO_4) çözeltisinden kısa ve uzun dönem performanslarını belirlemek için 60 ve 400 gün sonra çıkarılarak ağırlık değişimleri ile basınç dayanımı değişim oranları belirlenmiştir. Deney sonuçları Çizelge 4.10'da verilmiştir. Sülfat çözeltisine bırakılmadan önce belirlenen ağırlık ve basınç dayanımı değerleri referans alınarak değişim oranları yüzde cinsinden hesaplanmıştır. HLB numunelerinin ağırlık ve basınç dayanımı değişim oranları sırasıyla Şekil 4.38 ve Şekil 4.39'da gösterilmiştir. Her sütunun alt sınırı, belirttiği zaman dilimine ait oranı ifade etmektedir. Örneğin Şekil 4.37'de 60 ve 400 gün sonunda M1 numunesinin ağırlığının sırası ile %4,5 ve %6,4 oranında arttığı gösterilmiştir. 400 gün sonunda ağırlık artışının en fazla olduğu numune M17 (%12) iken en az olan numune M15 (%4,9)'dir. 400 gün sonra basınç dayanımı kaybı en fazla olan numune M16 (%74,4) iken en az olan numune M4 (%25,5)'dir.



Şekil 4.38. Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen HLB numunelerin zamana bağlı ağırlık değişimi



Şekil 4.39. Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen HLB numunelerin zamana bağlı basınç dayanımı değişimi

Sülfat atağı, farklı bozulma mekanizmaları nedeniyle hem kimyasal hem de fiziksel saldırı olarak gruplandırılabilir. Sülfat iyonlarının çimentonun $CaO(H)_2$ ve trikalsiyum alüminat (C_3A) gibi bileşenleri ile reaksiyonları neticesinde alçıtaşı ve kalsiyum sülfo alüminat oluşur. Oluşan bu ürünlerin hacmi yerlerini aldıkları bileşenlerinkinden daha fazladır. Meydana gelen bu hacim artışı betonda genleşme yaratarak çatlamalara ve dağılmaya sebep olur. Sülfat iyonlarının (Na_2SO_4), $Ca(OH)_2$ ve C_3A ile yapmış olduğu reaksiyonlar Eş. (4.21) ve Eş. (4.22)'de verilmiştir. Eş. (4.21) sonucunda katı fazın hacmi %124 artış göstermektedir. Suyun sürekli yıkama etkisi ile $Ca(OH)_2$ bünyeden tamamen ayrılabilir. NaOH'ın birikmesiyle reaksiyon dengeye ulaşınca SO_3'ün bir kısmı alçı taşına dönüşür. Eş. (4.22) sonucunda kalsiyum sülfat yalnızca trikalsiyum alüminat ile reaksiyona girerek kalsiyum sülfoalüminat oluşturur. Bu reaksiyon sonucunda katı fazın hacmi %227 artar. Etrenjit adı verilen tuz fazla miktarda hidrat suyu içerdiğinden çok büyük hacim kaplar. Tuzların genleşmesi ile beton patlar ve parçalanır. Çimento hamuru ile agrega arasındaki arayüzeyin zayıflaması ile betonun dayanımı düşer. Sülfat saldırısına uğrayan betonda köşe ve kenarlarında çatlak ve dökülmeler meydana gelmeye başlar ve beton kolayca dökülür (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2010). 400 gün sülfat atağına maruz kalmış HLB numuneye yük uygulamadan önceki görüntüsü Resim 4.2'de gösterilmiştir.

$$Ca(OH)_2 + Na_2SO_4.\ 10\ H_2O \rightarrow CaSO_4.\ 2\ H_2O + 2\ NaOH + 8\ H_2O \quad (4.21)$$

$$2(3CaO.\ Al_2O_3.\ 12H_2O) + 3(Na_2SO_4.\ 10H_2O) \rightarrow 3CaO.\ Al_2O_3.\ 3CaSO_4.\ 31H_2O + 2Al(OH)_3 + 6NaOH + 17H_2O \quad (4.22)$$



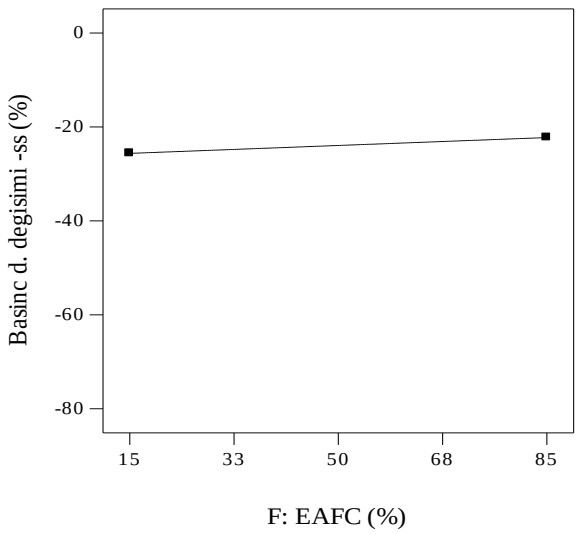
Resim 4.2. 400 gün sülfat atağına maruz bırakılan M4 numunesinin görüntüsü

HLB numunelerin Na_2SO_4 atağı karşısında basınç dayanımı ve ağırlık değişimi oranlarını hangi parametrelerin etkilediğini belirlemek için deney sonuçları üzerinde varyans analizi yapılmıştır. Hem ağırlık hem de basınç dayanımını temsil eden 2FI regresyon modelleri oluşturulmuş ve istatistiksel analizi Çizelge 4.12'de verilmiştir. Eş. (4.23) ve Eş. (4.24)'de regresyon modelleri verilmiştir.

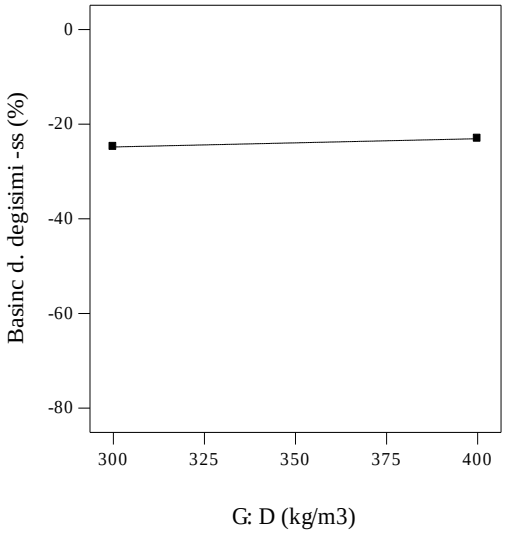
Ağırlık değişim oranı - S. S. (%) = +4,47 + 1735,645*ÇL + 332,56*CEL - 2864,12*SL + 1037,88*PL + 4284,42*ÇL * CEL + 1522,51*ÇL*SL - 2627,73*ÇL*PL - 29,79*ÇL*UK + 10,65*ÇL*EAFC - 5,73*ÇL*D - 656,03*CEL*SL + 6614,35*CEL*PL - 17,38*CEL*UK - 39,14*CEL*EAFC + 1,48*CEL*D - 9302,09*SL*PL - 13,98*SL*UK + 28,58*SL*EAFC + 8,89*SL*D + 55,77*PL*UK - 4,67*PL*D + 0,03*UK*EAFC (4.23)

Basınç dayanımı değişim oranı - S. S. (%) = -33,86 - 31945,72*ÇL - 5890,62*CEL +39163,75*SL - 4379,77*PL + 2,86*UK + 9,03*EAFC - 0,091*D - 48112,89*ÇL*CEL - 27732,95*ÇL*SL + 31389,44*ÇL*PL + 467,57*ÇL*UK - 148,82*ÇL*EAFC + 98,22*ÇL*D + 7146,46*CEL*SL - $1,08*10^5$*CEL*PL + 251,96*CEL*UK + 558,52*CEL*EAFC - 17,13*CEL*D + $1,46*10^5$*SL* PL + 62,74*SL*UK - 470,47*SL*EAFC - 103,94*SL*D - 686,84*PL*UK + 56,30*PL*EAFC + 23,71*PL*D- 0,34*UK*EAFC (4.24)

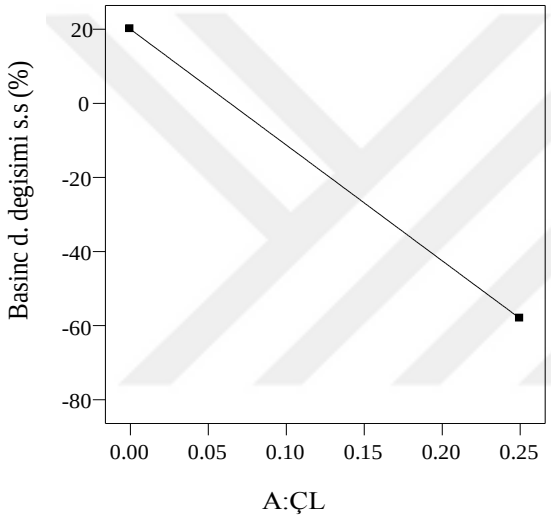
ANOVA'ya göre, bağımsız değişkenlerin bireysel ve ikili etkileşimlerin etkileri ve HlLB'lerin sülfat saldırısına karşı basınç dayanımı varyasyonu üzerindeki etkileri Şekil 4.40'da gösterilmiştir. EAFC ikame oranı ve bağlayıcı dozajı sırasıyla %0-%100 ve 300 kg/m^3 – 400 kg/m^3 arasında değiştiğinde önemli bir farkın olmadığı görülmüştür (Şekil 4.40 a,b). Çizelge 4.12 incelendiğinde, D ve EAFC'nin etki oranlarının çok düşük (%0,03 ve %0,02) olduğu ve bu değerlerin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı görülmüştür. Ancak ÇL miktarı, HLB numunelerin basınç dayanımı kaybının azalmasını desteklemiştir (Şekil 4.40c). PL katkısı ise artık mukavemeti azaltıcı etki yapmıştır (Şekil 4.40d). Şekil 4.40b'de görüldüğü gibi bağlayıcı dozajı CEL ve SL ile birlikte kullanılan HLB'ler için sülfat saldırısına karşı önemli bir etkiye sahip değildir (Şekil 4.40e,f) çünkü basınç dayanımı varyasyonundan diğer bileşenler sorumlu olmuştur.


Basinc d. degisimi -ss (%)
0
-20
-40
-60
-80
15
33
50
68
85
F: EAFC (%)

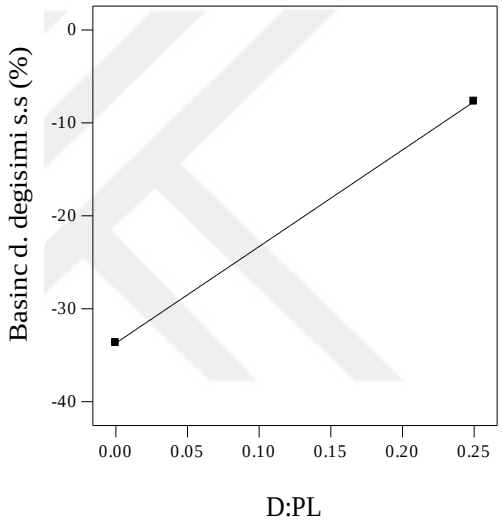
a


Basinc d. degisimi -ss (%)
0
-20
-40
-60
-80
300
325
350
375
400
G: D (kg/m3)

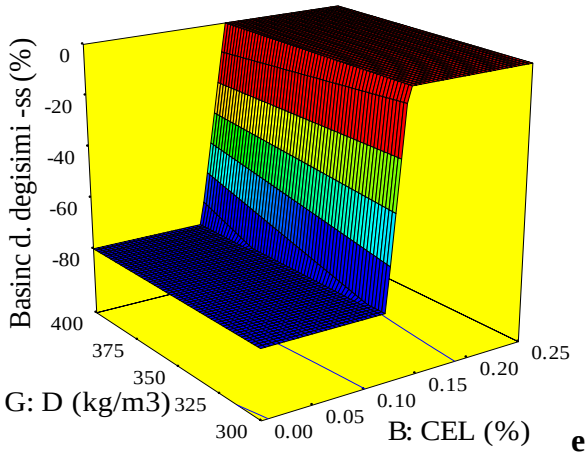
b


Basinc d. degisimi s.s (%)
20
0
-20
-40
-60
-80
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
0.25
A:ÇL

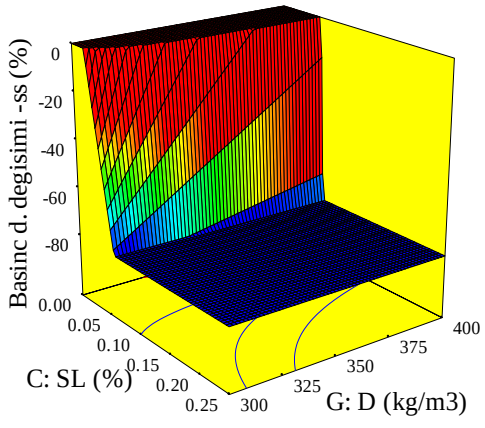
c


Basinc d. degisimi s.s (%)
0
-10
-20
-30
-40
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
0.25
D:PL

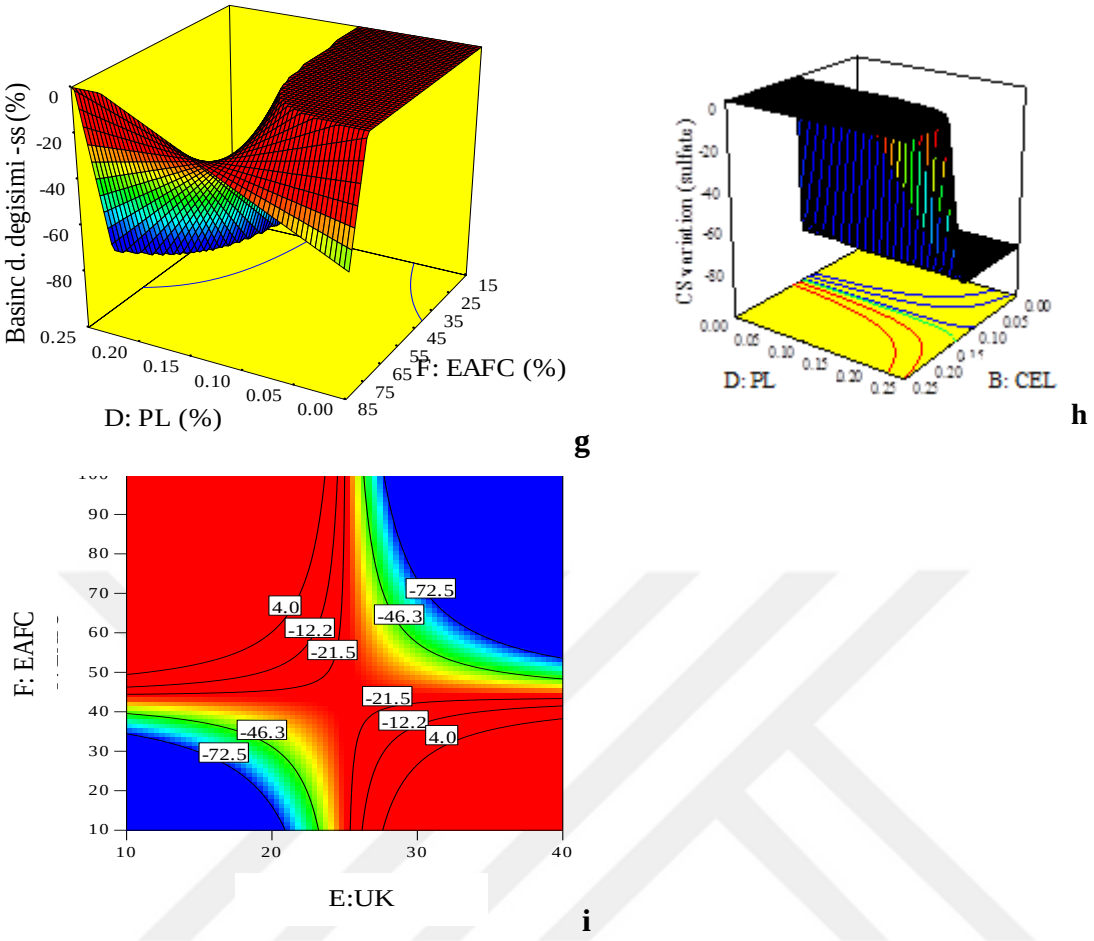
d


Basinc d. degisimi -ss (%)
0
-20
-40
-60
-80
400
375
350
325
300
G: D (kg/m3)
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
0.25
B: CEL (%)

e


Basinc d. degisimi -ss (%)
0
-20
-40
-60
-80
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
0.25
C: SL (%)
300
325
350
375
400
G: D (kg/m3)

f



Şekil 4.40. Bağımsız değişkenlerin Na_2SO_4 atağı karşısında HLB numunelerin basınç dayanımı değişimine etkisi

Şekil 4.40i'de gösterildiği gibi, basınç dayanımı kaybını en aza indirmek için UK'nın çimento ile %25 oranında ve EAFC'nin de DKA ile %40- %50 oranlarında ikame edilmesi uygun olabilmektedir. Najjar, Nehdi, Soliman ve Azabi, (2017), UK'nın kısmi ikamesi ile sülfat saldırısına karşı yeterli direnç sağlanabileceğini belirtmişlerdir.

Bağımsız değişkenlerin sülfat saldırısına maruz kalan betonların basınç dayanımı değişim oranına olan ikili etkileşimleri Şekil 4.40e-i'de gösterilmiştir. CEL kullanım oranı %10'u aştığında HLB'lerin sülfat saldırısına karşı basınç dayanım kaybı azalmaya başlamıştır (Şekil 4.40e, h). Dolayısıyla CEL, dayanım kaybını önleyen önemli bir liftir. Anandaraj, Rooby, Awoyera ve Gobinath (2019), CEL katkılı betonların zararlı etkisi bulunan ortamda uzun servis ömrüne sahip olabileceğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde PL, dayanım kaybını önleme noktasında etkili bir lif türüdür (Şekil 4.40d). Yapılan bir çalışmada hem CEL hem de PL katkılı betonların sülfat atağı karşısında iyi bir performans

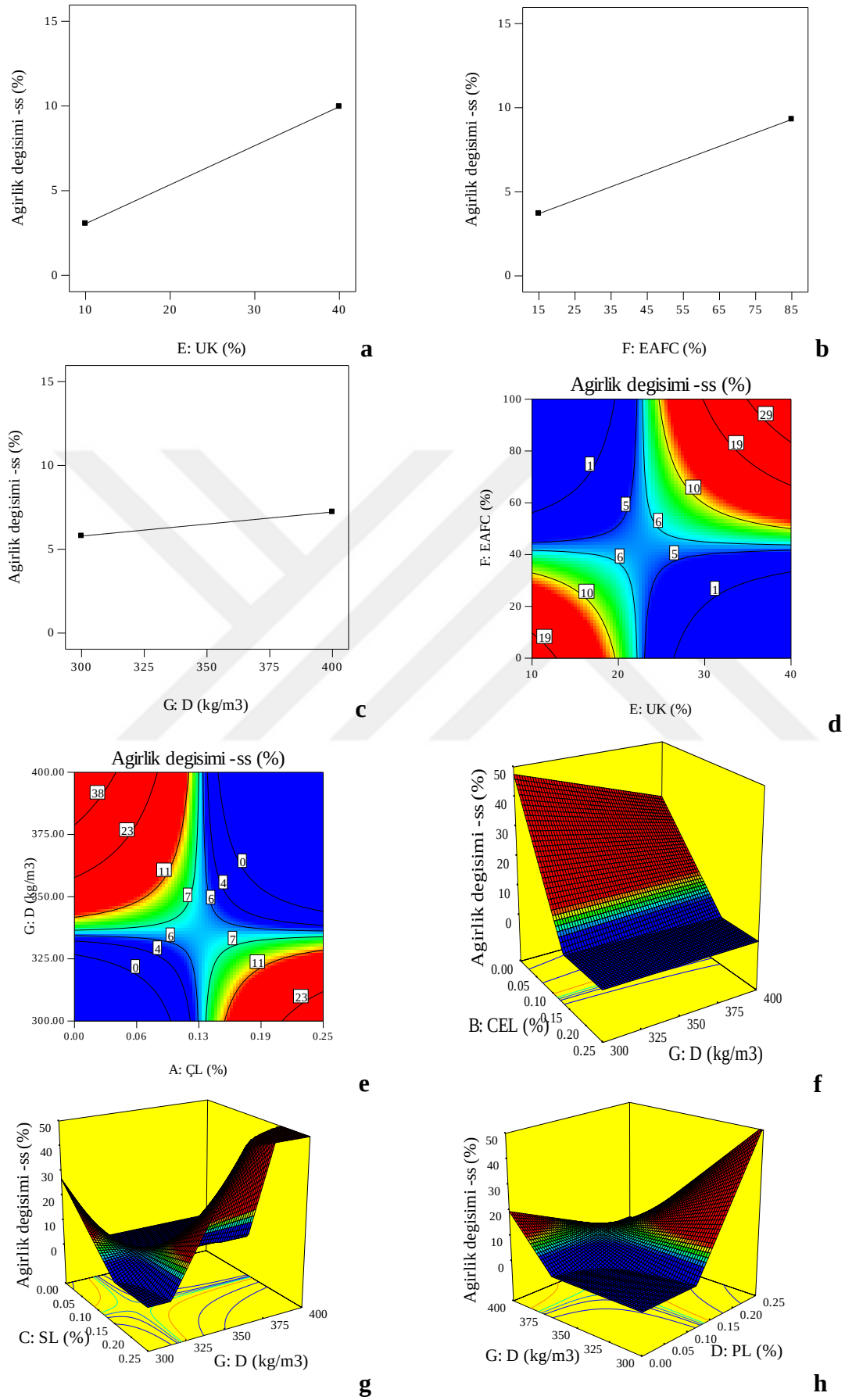
gösterdiği ifade edilmiştir. CEL katkılı betonların ise PL katkılı betonlara göre dayanıklılığının daha iyi olduğu ifade edilmiştir (Ranjith, Venkatasubramani ve Sreevidya, 2017). Sülfat saldırısına maruz kalan betonlarda EAFC kullanımı pozitif sonuçlar sağlayabilir (Şekil 4.40g). SL oranı %0,1'den fazla olan betonların basınç dayanımının azaldığı belirlenmiştir (Şekil 4.40f). Bu durumun nedeni olarak SL'nin sülfat etkisine karşı dayanıklı olmayan bir yapıda olması düşünülmüştür.

Bağımsız değişkenlerin HLB numunelerin sülfat saldırısına karşı ağırlık değişimi üzerindeki bireysel ve ikili etkileşimleri Şekil 4.40'da gösterilmiştir. Test sonuçları incelendiğinde (Şekil 4.38), sülfata maruz kalan tüm HLB numunelerinde ağırlık artışı olduğu görülmüştür. Bu ağırlık artışının temel nedeni, literatür çalışmalarında Na_2SO_4 çözeltisi ile çimento partikülleri arasındaki reaksiyonların bir sonucu olarak etrenjit oluşumu olarak belirtilmiştir. Ürün olarak meydana gelen alçı taşı ve etrenjit hacimce artışa neden olur ve beton yoğunluğunu azaltır (Soroka, 1979). Yoğunluğun azalmasına karşın kütledeki artış oransal olarak daha yüksek olduğundan sonuca ağırlık artışı olarak yansımaktadır (Attiogbe, 1988).

UK, EAFC ve D'nin bireysel etkileri sırasıyla Şekil 4.40a-c'de gösterilmiştir. UK ikame oranı %10'dan %40'a yükseldikçe, ağırlık değişimi %3'ten %10'a yükselmiştir. Benzer şekilde EAFC ikame oranı %0'dan %100'e yükseldiğinde ağırlık değişimi %3''ten %12'ye yükselmiştir. D 300 kg/m^3'ten 400 kg/m^3'e yükseldiğinde ağırlık değişimi %5,5'ten %7,5'e yükselmiştir.

Hem EAFC hem de UK ikame oranı birlikte arttırıldığında, ikili etkileşimleri nedeniyle ağırlık varyasyon oranı %45'e yükselmiştir (Şekil 4.41d). Bağlayıcı dozajı yüksek olan HLB'lere ÇL eklenmesi, sülfat saldırısı altında numunelerin ağırlık varyasyonunu en az seviyede tutmak için etkili bir çözüm olurken düşük dozajlı HLB'lerde tek başına yeterli olamamıştır (Şekil 4.41e).

Bağlayıcı dozajından bağımsız olarak CEL katkı oranı %0,15'ten (eşik değeri) yüksek olduğu durumda HLB numunelerin ağırlık değişimi sınırlandırılmıştır (Şekil 4.41f). Bağlayıcı dozajı düşük bile olsa SL katkısının eşik değeri (%0,1) geçtiği durumda sülfat saldırısına karşı kütle varyasyonunun sınırlandırılmasına yardımcı olduğu gözlenmiştir.

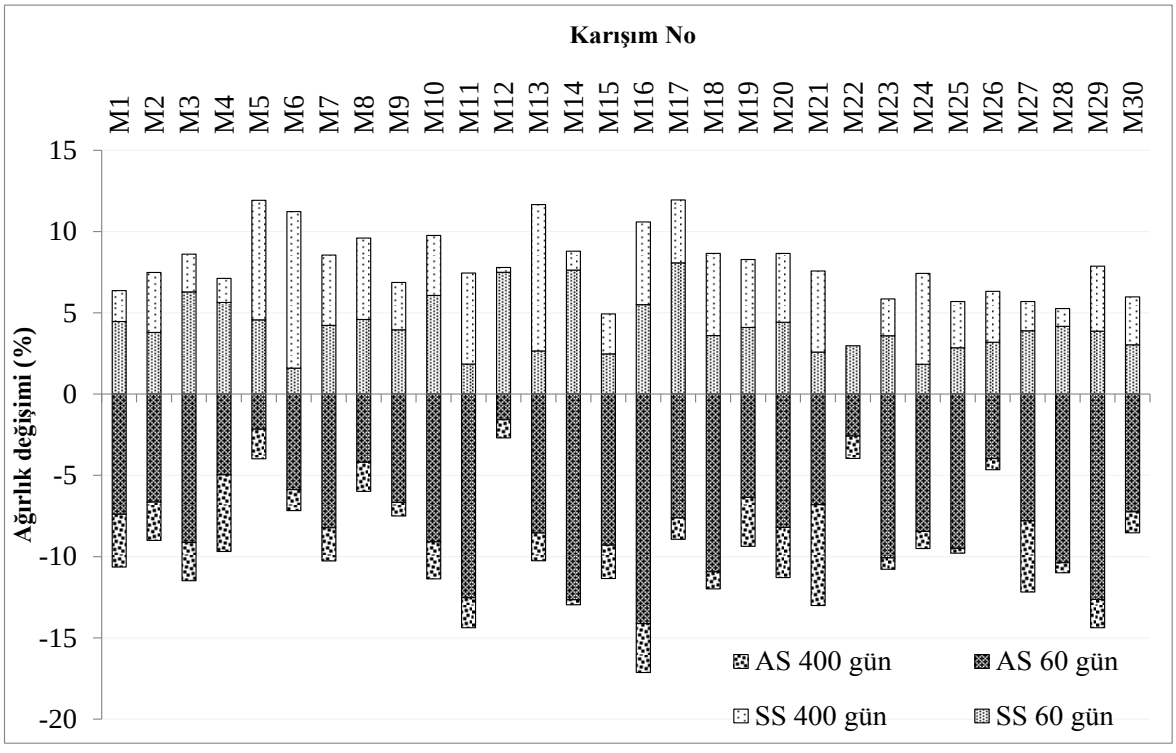


Şekil 4.41. Bağımsız değişkenlerin Na_2SO_4 atağı karşısında HLB numunelerin ağırlık değişimine etkisi

Yukarıda açıklanan sülfat atağı mekanizması paralelinde, 400 günlük sülfat atağından sonra bağlayıcı dozajı artmasına rağmen ağırlık değişimi artmıştır (Şekil 4.41g). Ancak ağırlık değişimini minimum seviyede tutamak için HLB'lerde bağlayıcı dozajının 375 kg/m^3 ile sınırlandırılması ve PL'nin %0,15'i aşmayacak oranlarda kullanımı ile ağırlık varyasyonu kontrol altında tutulabilir ve istenmeyen ağırlık değişimlerinin meydana gelmesi önlenebilir (Şekil 4.41h).

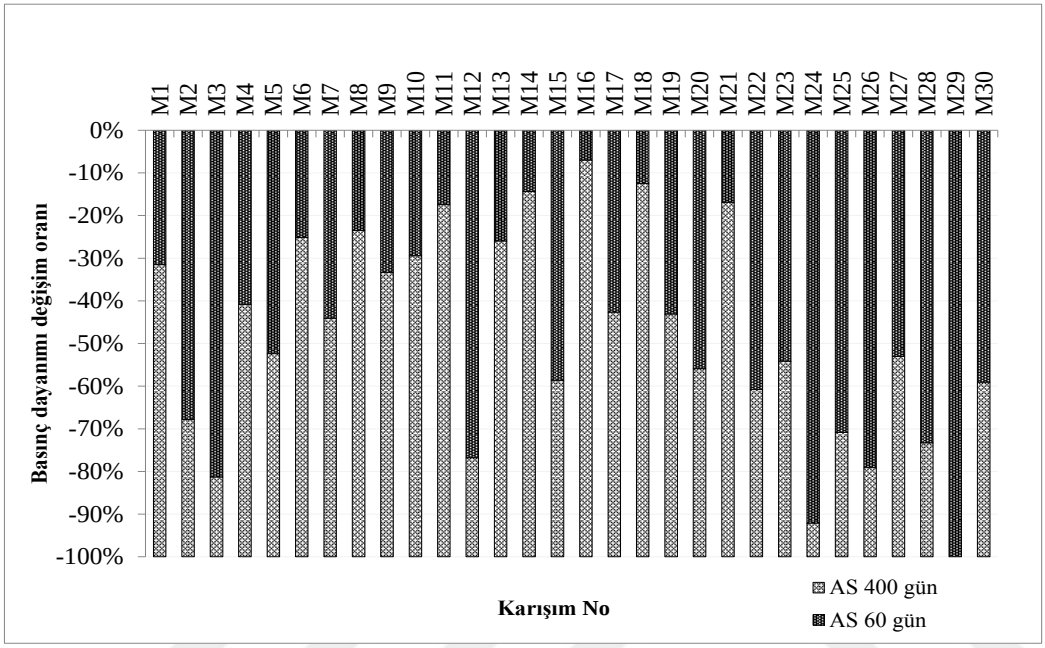
4.6.3. Asit ve sülfat dirençlerinin karşılaştırılması

60 ve 400 gün sonra %5 konsantrasyonda hazırlanan asit (H_2SO_4) ve sülfat (Na_2SO_4) çözeltilerindeki HLB örneklerinin ağırlık değişim oranları Şekil 4.42'de karşılaştırılmıştır. 60 ve 400 gün sonunda asit atağına maruz kalan HLB numunelerin ağırlıklarında azalma meydana gelirken, sülfat atağına maruz kalan numunelerde ağırlık artışı gözlenmiştir. H_2SO_4 ve Na_2SO_4 çözeltilerine maruziyet süresi arttıkça, ağırlık değişim oranları da artmıştır. Bununla birlikte, kütle değişim oranlarının pozitif ve negatif büyüklükleri neredeyse benzer bulunmuştur. Bu durumda hem asit hem de sülfat atağının HLB'lerin zararlı ortamlara dirençlerini olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir.

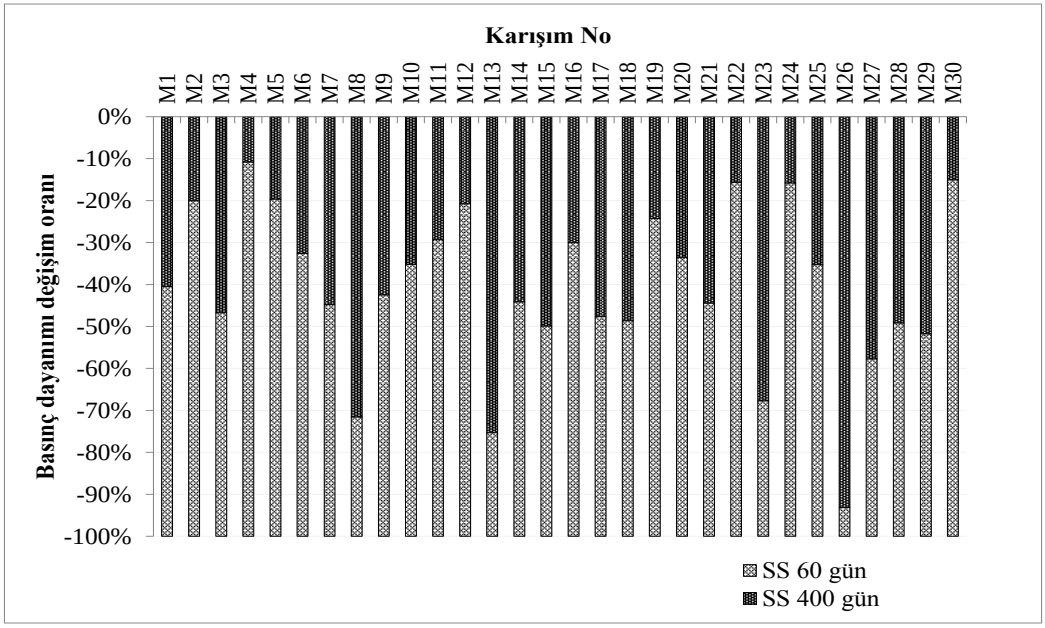


Şekil 4.42. H_2SO_4 ve Na_2SO_4 çözeltilerindeki HLB numunelerin ağırlık değişim oranlarının karşılaştırılması

HLB numunelerin her birinin ayrı ayrı basınç dayanımı kaybının 400 gün sonunda %100 olduğu kabul edildiğinde, ilk 60 günde ve kalan 340 günde kısa ve uzun dönemde ne kadarının meydana geldiği yüzde oran olarak sırası ile asit ve sülfat saldırısı için Şekil 4.43 ve Şekil 4.44'de gösterilmiştir.



Şekil 4.43. HLB numunelerin H_2SO_4 atağı süresince dayanım kaybı oranlarının karşılaştırılması

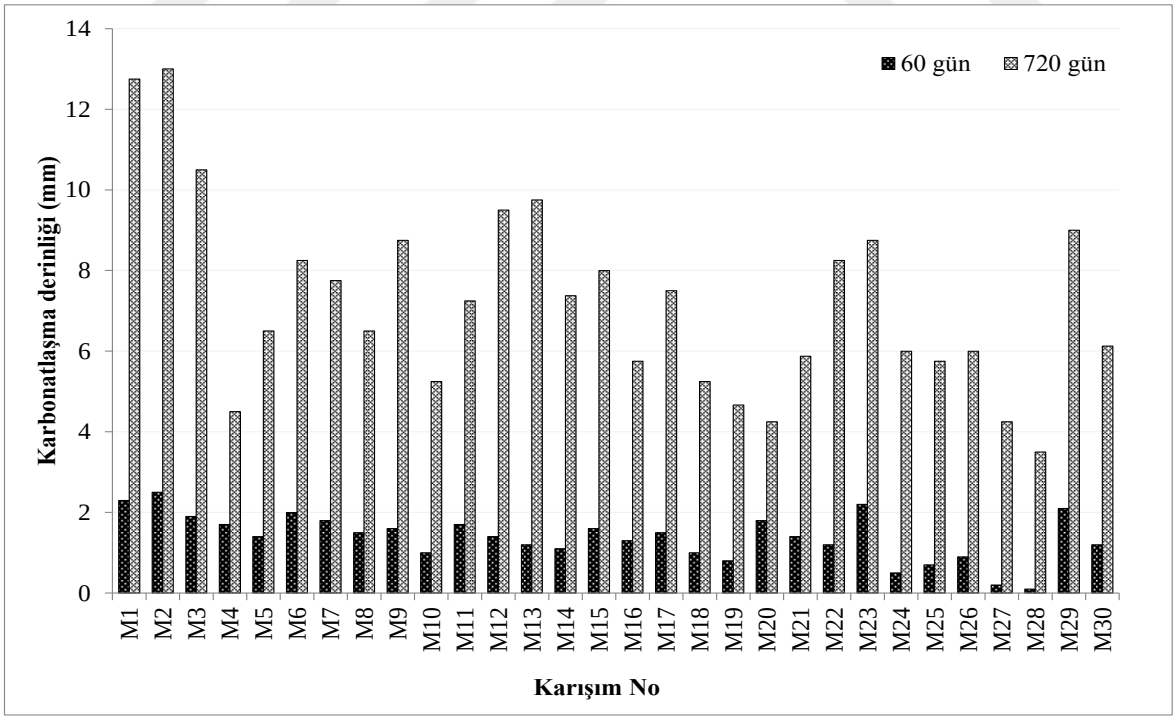


Şekil 4.44. HLB numunelerin Na_2SO_4 atağı süresince dayanım kaybı oranlarının karşılaştırılması

Bazı numunelerde meydana gelen toplam dayanım kaybının büyük bir bölümü ilk 60 günde gerçekleşmişken bazı numunelerde uzun vadede gerçekleştiği tespit edilmiştir. Buradan her HLB karışımının içeriğine bağlı olarak asit ve sülfat atağına karşı farklı direnç gösterdiği anlaşılmıştır.

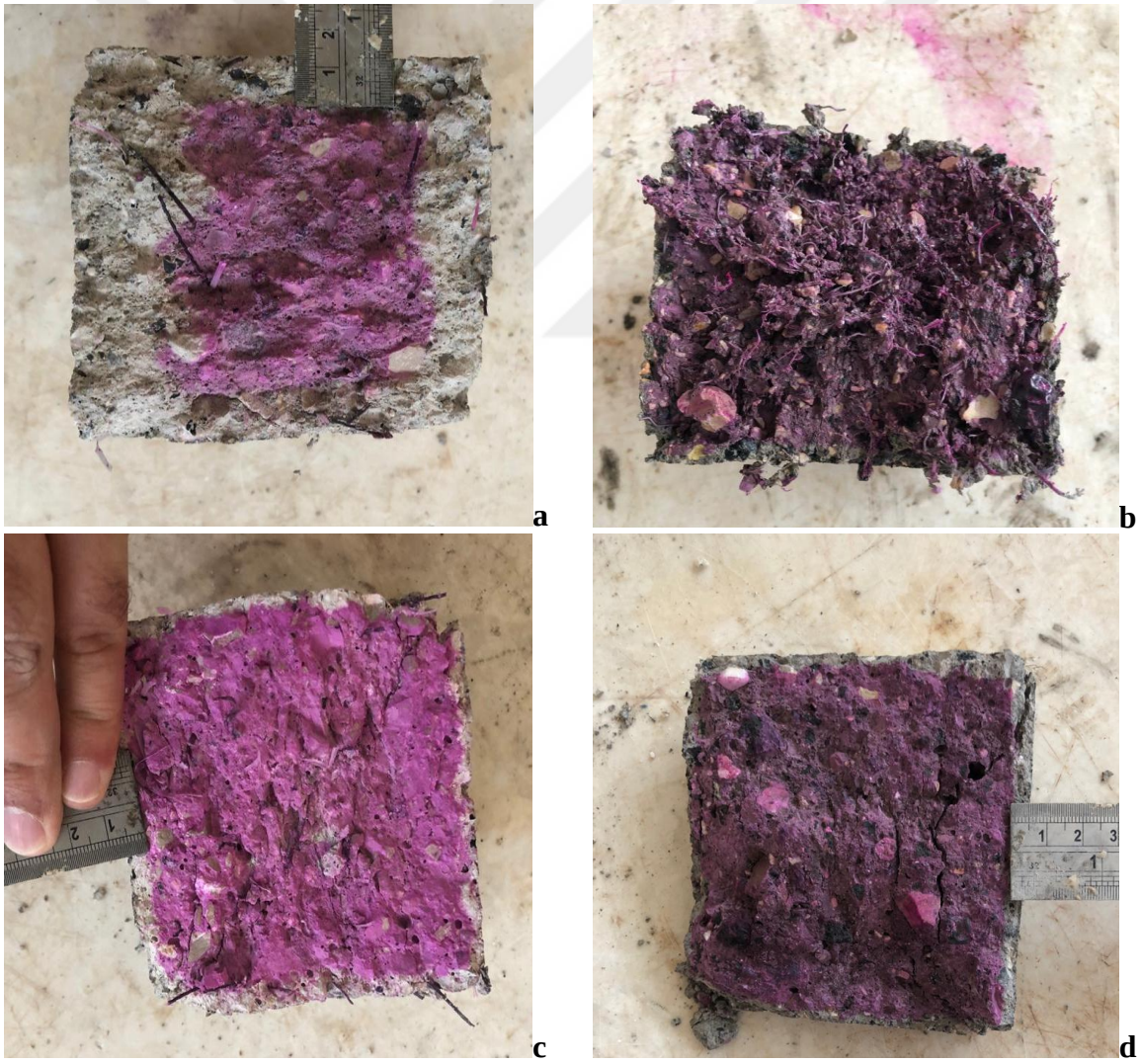
4.6.4. Karbonatlaşma derinliği (KD)

Çizelge 3.5'teki üretim şartlarına bağlı kalarak HLB numuneler üretilip bir gün sonra kalıptan çıkarılarak 28 gün su kürü uygulanmıştır. Su küründen çıkarılan numuneler deney gününe kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir. HLB numunelerden kesit çıkarılıp üzerine saf alkol ile hazırlanan fenolftalein çözeltisi püskürtülerek 60 ve 720 günlük KD ölçülmüş ve deney sonuçları Çizelge 4.11'de verilmiştir. Şekil 4.45'de HLB numunelerin 60 ve 720 günlük KD karşılaştırılmıştır. 60 gün sonra KD en az olan HLB numune M28 (0,1 mm) ve en fazla olan numune M2 (2,5 mm)'dir. 720 gün sonra ölçülen KD en az ve en çok olan numuneler de yine aynı numunelerdir ve sırası ile 3,5 mm ve 13 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.45. HLB numunelerin 60 ve 720 günlük karbonatlaşma derinlikleri

Resim 4.3'de farklı HLB numunelerin karbonatlaşmış kesitinin resimleri gösterilmiştir. Bu HLB numunelerin içerikleri incelendiğinde KD çok düşük olan M28 kodlu HLB'nin bağlayıcı dozajı, EAFC ve UK ikame oranlarının aynı ancak lif içeriğinin oldukça yoğun olduğu (%2) ve her lif türünden bulunduğu görülmüştür. Buradan KD üzerinde liflerin hibritlenmesi ve lif oranının etkisi açıkça anlaşılabilmektedir. Ancak daha detaylı incelemek ve değişkenlerin etkisini belirleyebilmek için deney sonuçları kullanılarak 2FI regresyon modeli oluşturulmuş ve istatistiksel olarak önemli olmayan parametreler denklemden çıkarılıp Eş. (4.25)'te verilmiştir. Deney sonuçları üzerinde ANOVA yapılarak hangi parametrelerin KD'yi istatistiksel olarak önemli oranda etkilediği tespit edilmiştir. Deney sonuçlarının istatistiksel analizi Çizelge 4.13'de verilmiştir.



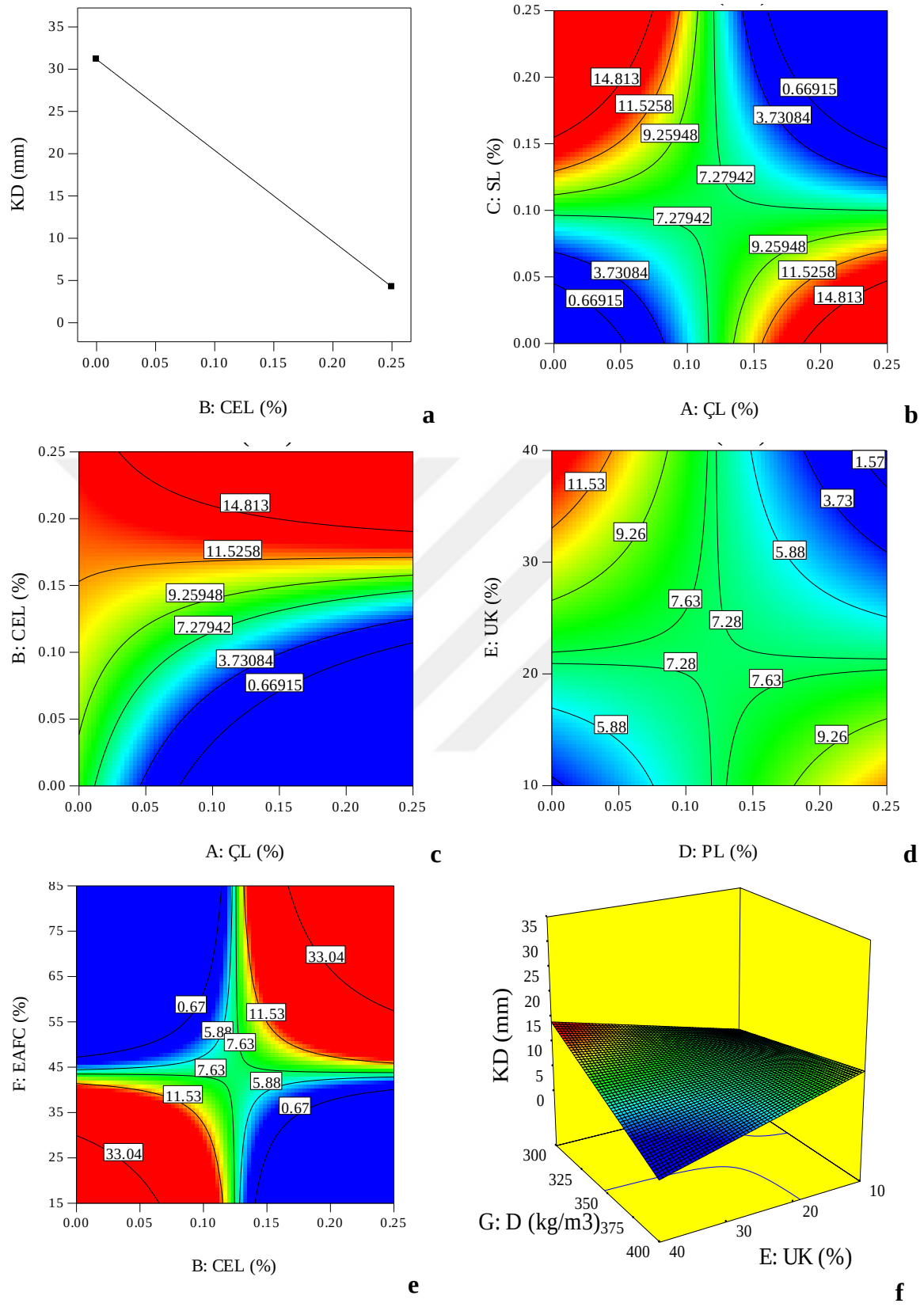
Resim 4.3. Farklı HLB numunelere ait karbonatlaşmış kesitler a) M2 b) M28 c) M4 d) M20

Çizelge 4.13 incelendiğinde KD'ye etki eden parametrelerin %95 güvenlik düzeyinde istatistiksel olarak önemli olup olmadığı anlaşılmaktadır. Bağımsız değişkenlerin bireysel etkilerinden sadece CEL'nin önemli ve etki ağırlığının %6,4 olduğu görülmüştür. Demek ki HLB numunelerin KD'lerini farklılaştıran parametrelerden bir tanesi CEL miktarıdır. Önemli olan diğer parametreler ise faktörlerin ikili etkileşimleridir. ÇL, CEL, SL ve PL'nin diğer faktörlerle ikili etkileşimleri de KD üzerinde etkili birer parametredir. Bu faktörlerin KD üzerindeki etkisi Şekil 4.46'da gösterilmiştir.

Tek başına CEL katkısı HLB numunelerde KD'nin artmasını önleyici etki yapmıştır (Şekil 4.46a). Literatür çalışmalarında da benzer liflerin KD'yi azalttığına dair bulgular mevcuttur (Wang, Xu, Meng ve Peng, 2020). Ancak ÇL ile birlikte kullanılacaksa KD'yi sınırlandırmak için %0,1 eşik değerinin üzerinde kullanılmamalıdır (Şekil 4.46c). ÇL, SL ve PL tek başına kullanıldığında istatistiksel olarak önemli bir etki yapmamaktadır. Fakat sınırlı oranlarda ikili kullanımları KD'yi kontrol altına alabilmek için uygun olabilir. Şekil 4.46b'den görüleceği üzere ekonomik bir çözüm olması adına her iki lif türünün de %0,1 oranlarında hibritlenmesi ile KD sınırlandırılabilir. PL katkılı HLB'lerde UK katkısı ile önemli bir faydanın sağlanabileceği görülmüştür. Yani yüksek oranda PL katkılı betonlarda %40'a varan oranlarda UK ikamesi ile KD sınırlandırılabilir (Şekil 4.46d).

Literatür çalışmalarında UK ikamesi ile bağlayıcı hamurdaki CaO içeriğinin azlamasına bağlı olarak KD'nin azaldığı belirtilmiştir (Zhao, Sun, Wu ve Gao, 2018). EAFC ikamesi ile de KD'nin azaltılabileceği ancak beraberinde CEL takviyesinin yapılması gerektiği görülmüştür (Şekil 4.46e). Bağlayıcı dozajının yüksek olması, daha yoğun bir içyapını oluşmasını ve diğer beton bileşenlerinin daha iyi sarılmasını sağlar. Bu nedenle D ne kadar yüksek olursa KD o ölçüde azalır. Fakat ekonomik bir çözüm olması için UK ikamesinin de bu noktada yarar sağladığı görülmüştür (Şekil 4.46f).

Karbonatlaşma derinliği (mm) = -542,39*CEL + 601,07*ÇL*CEL-1085,1*ÇL*SL + 13,51*ÇL*UK - 2,15*ÇL*EAFC + 4,58*ÇL*D - 4801,44*CEL*PL + 5,72*CEL*UK + 14,95*CEL*EAFC + 0,87*CEL*D + 5268,10*SL*PL - 13,54*SL*UK - 19,9*SL*EAFC + 7,11*PL*EAFC - 4,62*PL*D (4.25)



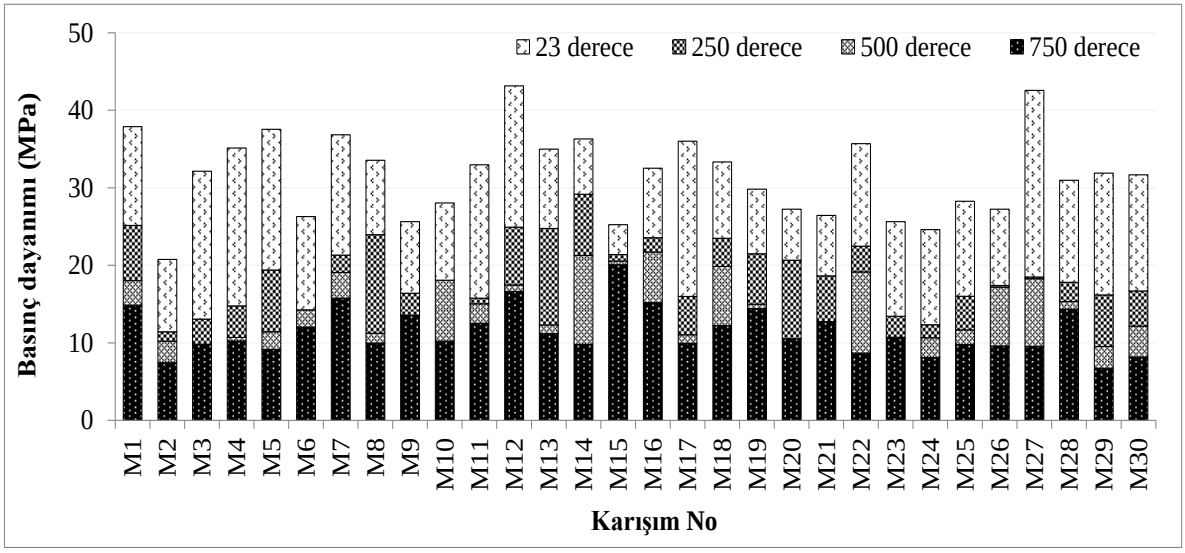
Şekil 4.46. Bağımsız değişkenlerin HLB numunelerdeki karbonatlaşma derinliği üzerine etkisi

4.6.5. Yüksek sıcaklık etkisinde dayanım değişimi ve rezonans frekansı ölçümü

HLB numuneler iki saat boyunca yüksek sıcaklıklara (250 °C, 500 °C ve 750 °C) maruz bırakıldıktan sonra laboratuvar sıcaklığına dönmesi beklenmiştir. HLB numunelerin yüksek sıcaklık uygulamasından önce ve sonra rezonans frekansı (RF) ölçümleri ile basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.

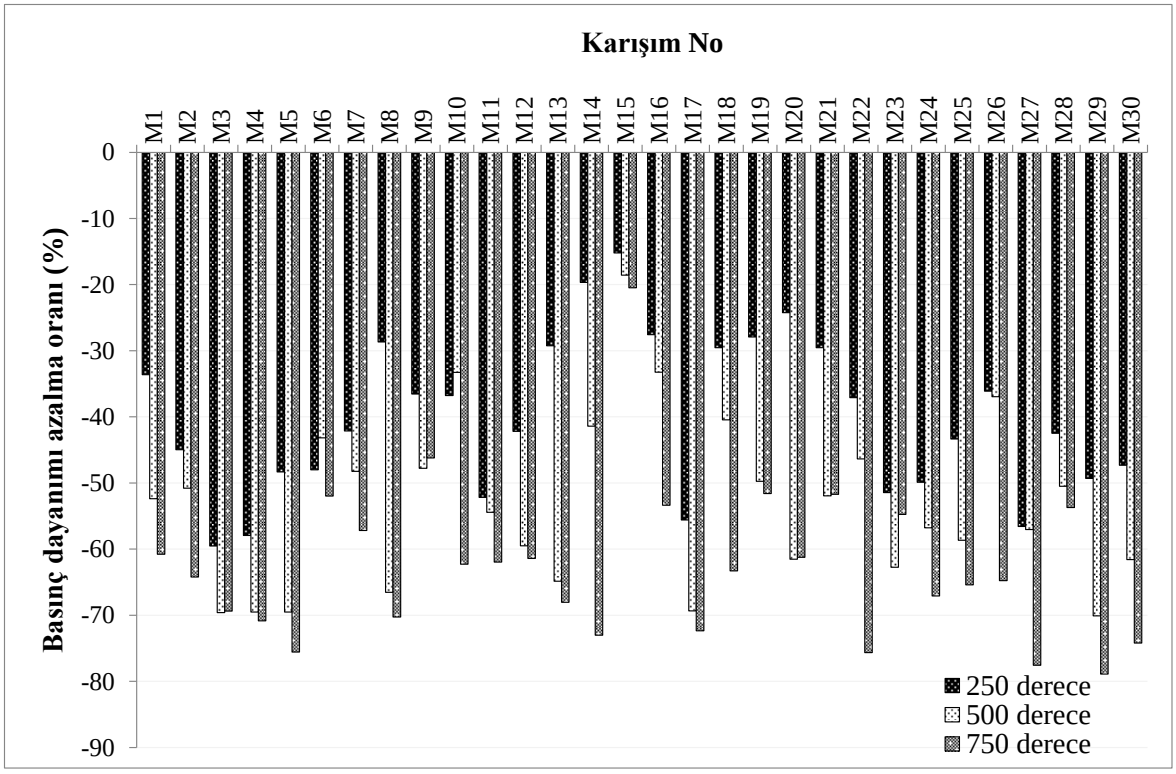
HLB numunelerin maruz kalınan sıcaklık seviyesine göre basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.11'de verilmiş ve Şekil 4.47'de gösterilmiştir.

Şekil 4.47'de farklı gösterilen her sütunun üst seviyesi o sıcaklık değerindeki nihai dayanımı ifade etmektedir. Örneğin, M1 numunesinin 23 °C, 250 °C, 500 °C ve 750°C'den sonra basınç dayanımı değerleri sırası ile 37,9 MPa, 25,2 MPa, 18 MPa ve 14,9 MPa'dır. Şekil 4.47'den görüldüğü üzere, istisnasız olarak tüm HLB numunelerin basınç dayanımları sıcaklık seviyesine bağlı olarak azalmıştır. Bazı araştırmacılar belirli bir sıcaklık değerinden sonra lifli betonlardaki basınç dayanımı kaybının lifsiz betonlara nazaran daha az olduğunu belirtmişlerdir. Mukavemet kaybının önemli bir kısmının 600 °C'yi aştıktan sonra meydana geldiğini ve basınç dayanımındaki azalma oranının lifsiz betonlarda %70, lif katkılı betonlarda ise %60 olduğunu ifade etmişlerdir (Sahani, Samanta ve Singharoy, 2019).



Şekil 4.47. Yüksek sıcaklık etkisinden sonra HLB numunelerin basınç dayanımları

Sıcaklık seviyesine göre basınç dayanımındaki azalma 23 °C'deki değerler referans alınarak oranlanıp, her sıcaklık seviyesindeki dayanım değişimi oransal olarak Şekil 4.48'de gösterilmiştir. Sıcaklık derecesi arttıkça HLB numunelerin basınç dayanımları da azalmıştır. Dayanım kaybı en fazla ve en az olan HLB'ler sırası ile M29 (%78,9) ve M15 (%20,5)'dir. M29 karışımının bağlayıcı dozajı 400 kg/m^3 iken M15 karışımının bağlayıcı dozajı 300 kg/m^3'tür. Karışımdaki çimento miktarı yüksek ise bünyede bulunan $Ca(OH)_2$ miktarı da yüksektir. Yüksek sıcaklık etkisi ile $Ca(OH)_2$'deki suyun buharlaşması ile oluşan CaO'nun ve açığa çıkan suyun genleşmeye neden olması neticesinde çatlamaların meydana geldiği belirlenmiştir (Khan, Shariq, Akhtar ve Masood, 2019).

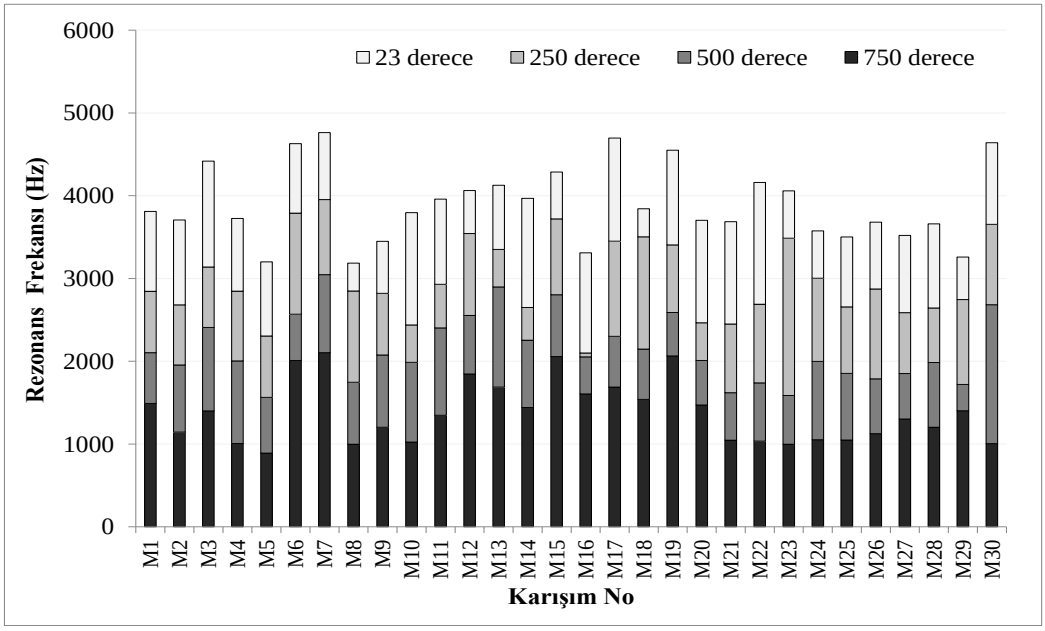


Şekil 4.48. Yüksek sıcaklık etkisinden sonra HLB numunelerin basınç dayanımı değişim oranı

Çatlaklı betonun dayanımının azaldığı bilinen bir gerçektir. Ayrca, UK'nın bünyesinde bulunan CaO oranı çimentodan daha az olduğundan karışımdaki UK miktarı arttıkça çimento miktarının azalması neticesinde bünyede bulunan $Ca(OH)_2$ miktarı da azalmış ve sıcaklık ile kaybolan su miktarı da azalmıştır. Aynı zamanda UK, $Ca(OH)_2$'i C-S-H jeline çevirdiği için dayanım kaybı azalmıştır. Yani UK ikame oranı arttıkça betonların yüksek sıcaklık etkisinde dayanım kaybı da azalmıştır. Bu bulgu literatür çalışmaları ile de uyum

içerisindedir. Rais, Shariq, Masood, Umar ve Alam (2019), taramalı elektron mikroskopisi kullanılarak 500 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklara maruz kalan harç numunelerinin morfolojik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışma sonunda %10 UK içeren harç numunelerin 500 °C'ye maruz kaldığında performansının daha iyi olduğunu ve UK oranı arttıkça dayanım kaybının azaldığını belirtmişlerdir. Novak ve Kohoutková (2017), hibrit elyaf takviyelerin, sıcaklık artışına bağlı betonların artık mukavemeti üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir.

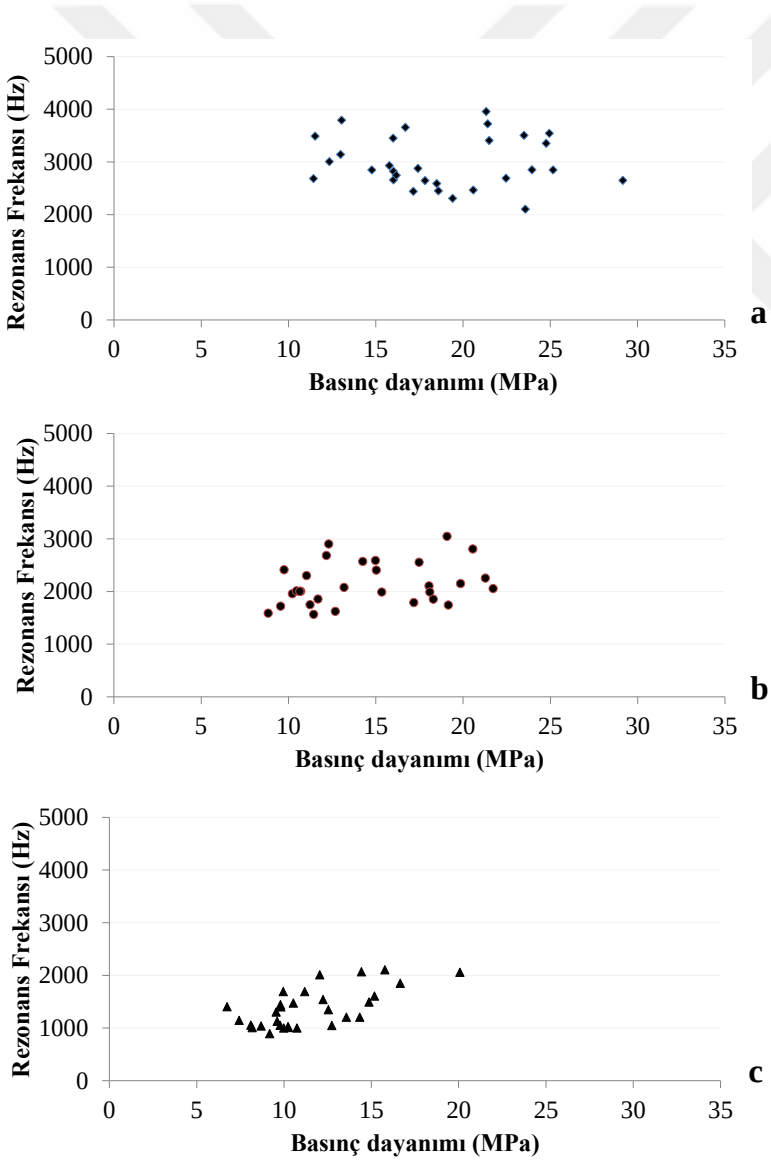
HLB'ler yüksek sıcaklık uygulanıp laboratuvar şartlarına döndükten sonra RF değerleri ölçülmüş ve sıcaklık seviyesine bağlı olarak okunan değerler Şekil 4.49'da her sütunun en üst sınırı belirtilen sıcaklık değerindeki RF olacak şekilde gösterilmiştir. Maruz kalınan sıcaklık seviyesi arttıkça RF değerlerinde azalma gözlenmiştir. Örneğin, 23 °C, 250 °C, 500 °C ve 750 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra M1 örneğinin RF değerleri, sırasıyla 3810 Hz, 2845 Hz, 2104 Hz, 1490 Hz olarak ifade edilmiştir. 23 °C'deki RF değerleri dikkate alındığında en yüksek RF'ye sahip HLB'nin M7 olduğu görülmektedir (Şekil 4.49). M7'nin içeriği incelendiğinde ÇL katkı oranının %0,75 olduğu görülmektedir (tüm karışımlar dikkate alındığında ÇL katkı oranı en yüksektir). Bu durumda RF'nin ÇL oranından doğrudan etkilendiği ve ANOVA ile etki oranının %7 ile istatistiksel olarak anlamlı olduğu söylenebilir (Çizelge 4.6).



Şekil 4.49. Yüksek sıcaklık etkisine bağlı HLB numunelerin rezonans frekansı değerleri

Bu bulgular literatür çalışmaları ile de uyumludur. Khalil, Abbas ve Nasser (2019), RF'nin çelik lif miktarındaki artışa bağlı olarak bir miktar arttığını belirtmişlerdir. ÇL içeriği %0,5 iken RF'de maksimum artış kaydedildiğini ifade edilmiştir.

Yüksek sıcaklık uygulamasının HLB numunelerin basınç dayanımı ile RF üzerine olan etkisinin karşılaştırılması Şekil 4.50'de yapılmıştır. Sıcaklık 250 °C'den 750 °C'ye yükseldikçe HLB numunelerin hem basınç dayanımları hem de RF değerleri benzer şekilde azalma göstermiştir. Bu durumun temel nedeni HLB'lerin yüksek sıcaklık altında içyapılarının bozulmasına bağlı olarak matrisin boşluklu bir hale gelmiş olmasıdır (Rais, Shariq, Masood, Umar ve Alam, 2019).

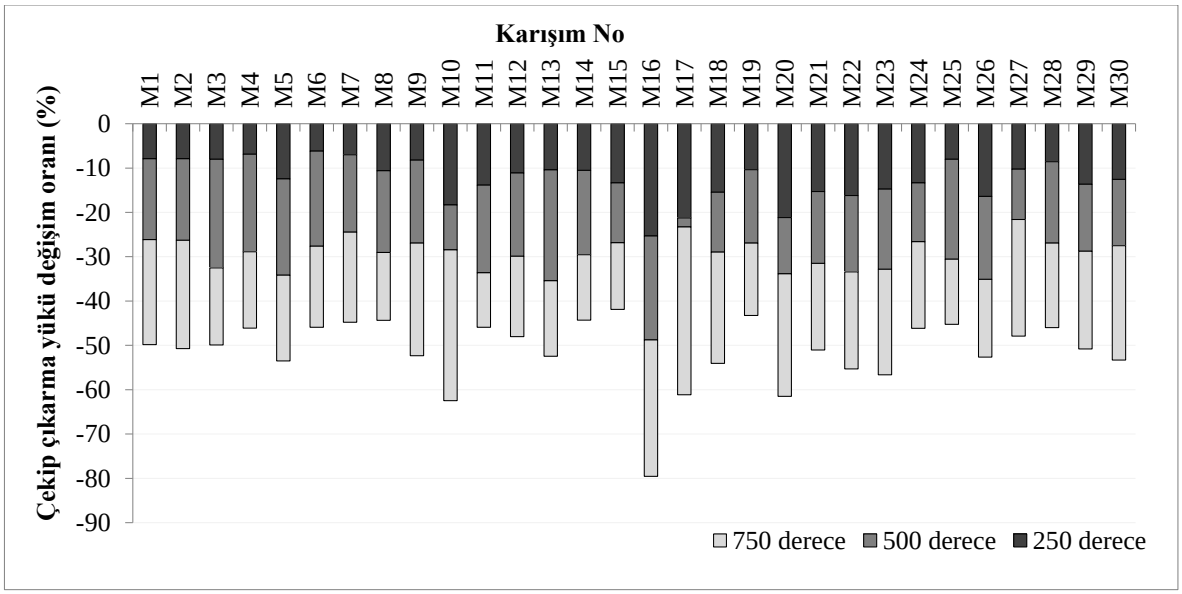


Şekil 4.50. HLB numunelerin yüksek sıcaklık etkisinden sonra basınç dayanımı ve rezonans frekansı ilişkisi a)250 °C b)500 °C c)750 °C

4.6.6. Yüksek sıcaklık etkisinde donatı-beton aderansı değişimi

Liflerin ve hibrit mekanizmasına dâhil olan diğer malzemelerin (UK ve EAFC) kullanıldığı HLB numunelerin yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra donatı ile olan adreransının ne oranda değiştiği belirlenmiştir. Uygulanan sıcaklık seviyesine bağlı olarak HLB numunelere uygulanan çekip çıkarma yükü değerleri Çizelge 4.11'de verilmiştir. 23°C'deki değerleri referans olarak seçilip değişim oranları Şekil 4.51'de gösterilmiştir. 750 °C sıcaklık uygulamasından sonra M16 numunesinin çekip çıkarma yükü değeri %79,56 azalmıştır. M16 numunesinin içeriği incelendiğinde bağlayıcı dozajının en düşük (260 kg/m^3) olduğu görülmüştür. Bu HLB'nin 23°C'deki çekip çıkarma yük değerinin de en düşük olduğu görülmüştür.

Düşük bağlayıcı dozajlı numunelerin dayanım ve aderans özellikleri de gelişmiş değildir. Basınç dayanımı ile benzer şekilde yüksek sıcaklık altında betonun içyapısı bozulup boşluk ve çatlak miktarı artmaktadır. Bu durumun sonucunda beton ile donatı arasındaki bağlarda zayıflama meydana gelmiştir (Chen Z, Tang, Zhou X, Zhou J ve Chen J, 2020). Bağlayıcı hamurun zayıflamasının yanı sıra HLB'lerde bulunan ve erime noktası, uygulanan sıcaklık seviyesinden düşük olan sentetik ve propilen liflerin erimesi neticesinde donatıyı saran ve ilave sürtünme kuvveti yaratan etkinin ortadan kalkması ile donatının sıyrılma yükü azalmıştır.



Şekil 4.51. HLB numunelerin yüksek sıcaklık seviyesine göre çekip çıkarma yükü azalma oranları

4.7. Çoklu Objektifli Optimizasyon

HLB'lerin mekanik, geçirimlilik, durabilite özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneylerin sonuçları kullanılarak regresyon modelleri oluşturulmuş ve belirlenen şartlar altında her farklı performans grubu (mekanik özellikler, geçirimlilik özellikleri gibi) ayrı ayrı ve bütün olarak düşünülerek grup içi ve gruplar arası (tüm özelliklerin etkilendiği) ÇOO çalışması yapılmıştır.

4.7.1. Mekanik özelliklere göre optimizasyon

HLB üretim şartlarında belirtilen bağımsız değişkenler, aşınma oranını minimize etmek; eğilme dayanımı, deplasman miktarı, basınç dayanımı, çekip çıkarma yükü ve rezonans frekansı değerlerinin maksimize etmek için optimize edilmiştir. Optimizasyon çalışmasına dâhil edilen tüm değişkenlerin eşit oranda etki etmesi istenildiğinden önem faktörü de eşit ağırlıkta (1 ile 5 arasında değişen değerlerdedir ve bu çalışmada hepsinde 3 olacak şekilde seçilmiştir) etki ettirilmiştir. Design Expert 7.0.3 programı yardımı ile tepkileri eşzamanlı olarak optimize etmek için sayısal bir optimizasyon tekniği ile erişilebilme ihtimali (dj) elde edilmiştir (Balcikanli ve Ozbay, 2016; Bankir, Sevim, 2020). Her tepki ve her bağımsız değişken için alt ve üst değerler tanımlanmış ve kısıtlar Çizelge 4.14'te verilmiştir.

Bu kısıtlara göre nümerik olarak optimizasyon çalışması yapılmış ve erişilebilme ihtimali 0,820 ile 0,510 arasında değişen farklı optimum çözümler önerilmiştir. Erişilebilme ihtimali en yüksek olan üç optimum çözüm seçilmiş ve beklenen sonuçlar Çizelge 4.14'te verilmiştir. Çoklu objektifli optimizasyon çalışmasına göre erişilebilme ihtimali (0,82) en yüksek olan optimum üretim şartları %,25 çelik lif, %0,23 cam elyaf lif, %0,25 sentetik lif, %0,25 polipropilen lif, %13 UK, %80 EAFC ve 393 kg/m^3 bağlayıcı dozajı olarak belirlenmiştir.

Bu koşullara göre üretilen HLB numunelerin eğilme dayanımının 6,9 MPa, eğilmede maksimum deplasman değerinin 15 mm, yarmada çekme dayanımının 4,13 MPa, 28 günlük basınç dayanımının 50 MPa, donatı çekip çıkarma yükünün 670 kg ve aşınma oranının %0,42 olacağı tahmin edilmiştir.

Çizelge 4.14. Mekanik özellikler için optimum HLB üretim şartları ve beklenen deney sonuçları

Bağımsız değişkenler ve tepkiler	Hedef	Alt limit	Üst limit	Önem faktörü	Optimum şartlar ve beklenen deney sonuçları		
					1	2	3
ÇL (%)	Aralıkta	0	0,25	3	0,25	0,24	0,25
CEL (%)	Aralıkta	0	0,25	3	0,23	0,23	0,23
SL (%)	Aralıkta	0	0,25	3	0,25	0,25	0,24
PL (%)	Aralıkta	0	0,25	3	0,25	0,21	0,23
UK ikame oranı (%)	Aralıkta	10	40	3	13	17	22
EAFC ikame oranı (%)	Aralıkta	15	85	3	80	43	46
Bağlayıcı dozajı (kg/m3)	Aralıkta	300	400	3	393	400	400
Eğilme dayanımı (MPa)	Maksimum	2,11	6,22	3	6,9	10,3	6,2
Eğilme maksimum deplasman (mm)	Maksimum	10,48	19,99	3	15	15,2	15,1
Yarmada çekme dayanımı (MPa)	Maksimum	1,77	5,93	3	4,13	4	3,91
28 günlük basınç dayanımı (MPa)	Maksimum	20,77	43,15	3	50	43	43
Çekip çıkarma yükü (kg)	Maksimum	226,44	908,87	3	670	667	674
Aşınma oranı (%)	Minimum	0,36	0,50	3	0,42	0,41	0,41
Erişilebilme ihtimali (%)	-	-	-	-	82	80,3	80,2

4.7.2. Fiziksel ve geçirimlilik özelliklerine göre optimizasyon

HLB üretim şartlarında belirtilen bağımsız değişkenler, su emme kapasitesini, kılcal su emme kapasitesini ve hızlı klor geçirimliliğini minimize etmek; ultrasonik dalga hızı, rezonans frekansı ve basınç dayanımı değerlerini maksimize etmek için nümerik olarak optimize edilmiştir. Her tepki ve her bağımsız değişken için alt ve üst değerler tanımlanmış ve kısıtlar Çizelge 4.15'te verilmiştir.

Bu kısıtlara göre optimizasyon çalışması yapılmış ve erişilebilme ihtimali 0,847 ile 0,406 arasında değişen farklı optimum çözümler önerilmiştir. Erişilebilme ihtimali en yüksek olan üç optimum çözüm seçilmiş ve beklenen sonuçlar Çizelge 4.15'te verilmiştir. Çoklu objektifli optimizasyon çalışmasına göre erişilebilme ihtimali (0,847) en yüksek olan optimum üretim şartları %0,20 çelik elyaf, %0,13 cam elyaf, %0,14 sentetik elyaf, %0,25 polipropilen elyaf, %36 uçucu kül ikame oranı, %15 EAFC ikame oranı ve 350 kg/m^3 bağlayıcı dozajı olarak belirlenmiştir.

Bu koşullara göre üretilen HLB numunelerin 28 günlük basınç dayanımının 43 MPa, su emme kapasitesinin % 4,41, kılcal su emme katsayısının 0,011 cm^2/s, hızlı klor geçirimliliğinin 2929 c, ultrasonik dalga hızının 3255 m/s ve rezonans frekansı değerinin 3902 Hz olacağı tahmin edilmiştir.

Çizelge 4.15. Fiziksel ve geçirimlilik özellikleri için optimum HLB üretim şartları ve beklenen deney sonuçları

Bağımsız değişkenler ve tepkiler	**Hedef**	**Alt limit**	**Üst limit**	**Önem faktörü**	**Optimum şartlar ve beklenen deney sonuçları**		
					1	**2**	**3**
ÇL (%)	Aralıkta	0	0,25	3	0,20	0,11	0,09
CEL (%)	Aralıkta	0	0,25	3	0,13	0,00	0,00
SL (%)	Aralıkta	0	0,25	3	0,14	0,00	0,00
PL (%)	Aralıkta	0	0,25	3	0,25	0,06	0,05
UK ikame oranı (%)	Aralıkta	10	40	3	36	25	20
EAFC ikame oranı (%)	Aralıkta	15	85	3	15	23	34
Bağlayıcı dozajı (kg/m^3)	Aralıkta	300	400	3	350	300	300
28 günlük basınç dayanımı (MPa)	Maksimum	20,77	43,15	3	43	56	43
Su emme kapasitesi (%)	Minimum	4,40	9,78	5	4,41	4,39	4,40
Kılcal su emme katsayısı (cm^2/s)	Minimum	0,0076	0,0447	3	0,011	0,010	0,011
Hızlı klor geçirimliliği (c)	Minimum	2583	5193	3	2929	3214	3213
Ultrasonik dalga hızı (m/s)	Maksimum	2786	4230	1	3255	3115	3130
Rezonans frekansı (Hz)	Maksimum	3187	4763	1	3902	3810	3702
Erişilebilme ihtimali (%)	-	-	-	-	84,7	80,4	79,3

Önem faktörü 1 ile 5 arasında değerlendirilmiştir.

4.7.3. Durabilite özelliklerine göre optimizasyon

HLB üretim şartlarında belirtilen bağımsız değişkenler, asit (H_2SO_4) atağında ağırlık, dayanım kaybı ile sülfat atağında basınç dayanımı kaybı değerleri ve yüksek sıcaklık etkisinde dayanım ve aderans kaybı oranları negatif olduğundan maksimize etmek (en büyük orana yaklaştırmak), sülfat (Na_2SO_4) atağında ağırlık değişim değeri ve karbonatlaşma derinliğini minimize etmek ve basınç dayanımı değerini maksimize etmek için nümerik olarak optimize edilmiştir. Her tepki ve her bağımsız değişken için alt ve üst değerler tanımlanmış ve kısıtlar Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Bu kısıtlara göre optimizasyon çalışması yapılmış ve erişilebilme ihtimali • 31, 131, 1330,759 ile 0,353 arasında değişen farklı optimum çözümler önerilmiştir. Erişilebilme ihtimali en yüksek olan üç optimum çözüm seçilmiş ve beklenen sonuçlar Çizelge 4.16'da verilmiştir. Çoklu objektifli optimizasyon çalışmasına göre erişilebilme ihtimali (0,759) en yüksek olan optimum üretim şartları %0,13 çelik lif, %0,21 cam elyaf lif, %0,17 sentetik lif, %0,02 polipropilen lif, %10 UK, %73 EAFC ve 330 kg/m^3 bağlayıcı dozajı olarak belirlenmiştir.

Bu koşullara göre üretilen HLB numunelerin basınç dayanımı kaybının 400 gün sonra asit atağı sonucunda %34, sülfat atağı sonucunda %27 olacağı, ağırlık kaybının ise her iki durum için %5 olacağı tahmin edilmiştir. Yüksek sıcaklık altında basınç dayanımı ve aderans kaybının sırası ile %60,5 ve %35,5 olacağı tahmin edilmiştir.

Çizelge 4.16. Durabilite özellikleri için optimum HLB üretim şartları ve beklenen deney sonuçları

Bağımsız değişkenler ve tepkiler	**Hedef**	**Alt limit**	**Üst limit**	**Önem faktörü**	**Optimum şartlar ve beklenen deney sonuçları**		
					1	**2**	**3**
ÇL (%)	Aralıkta	0	0,25	3	0,13	0,22	0,07
CEL (%)	Aralıkta	0	0,25	3	0,21	0,24	0,00
SL (%)	Aralıkta	0	0,25	3	0,17	0,17	0,02
PL (%)	Aralıkta	0	0,25	3	0,02	0,04	0,22
UK ikame oranı (%)	Aralıkta	10	40	3	10	20	17
EAFC ikame oranı (%)	Aralıkta	15	85	3	73	69	60
Bağlayıcı dozajı (kg/m^3)	Aralıkta	300	400	3	330	317	350
Ağırlık değişim oranı –A.S. (%)	Maksimum	-19,12	-3,86	3	-5	-4	-8
Ağırlık değişim oranı –S.S. (%)	Minimum	4,93	11,95	3	5	4	5
Basınç dayanımı değişim –A.S. (%)	Maksimum	-66,6	-18,36	3	-34	-48,7	-39
Basınç dayanımı değişim –S.S. (%)	Maksimum	-73,9	-25,4	3	-27	-27	-27
Yük. Sıc. basınç dayanım kaybı (%)	Maksimum	-78,87	-20,47	3	-60,5	-53,3	-61
Yük. Sıc. aderans kaybı (%)	Maksimum	-79,56	-41,87	3	-35,5	-35,8	-36
Erişilebilme ihtimali (%)	-	-	-	-	75,9	73,9	71,2

Önem faktörü 1 ile 5 arasında değerlendirilmiştir.

4.7.4. Genel özelliklere göre optimizasyon

HLB üretim şartlarında belirtilen bağımsız değişkenler Çizelge 4.17'de belirtilen hedefler doğrultusunda nümerik olarak optimize edilmiştir. HLB'lerin genel özellikleri düşünülerek seçilmiş her tepki ve her bağımsız değişken için alt ve üst değerler tanımlanmış ve kısıtlar Çizelge 4.17'de verilmiştir.

Bu kısıtlara göre optimizasyon çalışması yapılmış ve erişilebilme ihtimali • 31, 131, 1330,760 ile 0,472 arasında değişen farklı optimum çözümler önerilmiştir. Erişilebilme ihtimali en yüksek olan üç optimum çözüm seçilmiş ve beklenen sonuçlar Çizelge 4.17'de verilmiştir. Erişilebilme ihtimali (0,76) en yüksek olan optimum üretim şartları %0,11 çelik elyaf, %0 cam elyaf, %0,04 sentetik elyaf, %0,25 polipropilen elyaf, %27 uçucu kül ikame oranı, %40 EAFC ikame oranı ve 393 kg/m^3 bağlayıcı dozajı olarak belirlenmiştir.

Bu koşullara göre üretilen HLB numunelerin çökme değerinin 10 cm, eğilme dayanımının 5,3 MPa, eğilmede maksimum deplasmanın 15,04 mm, 720 günlük basınç dayanımının 51,2 MPa, çekip çıkarma yükünün 466,67 kg, hızlı klor geçirimliliğinin 1076 c, kılcal su emme katsayısının 0,013 cm^2/s, su emme kapasitesinin %3,09, aşınma oranının 0,42, asit ve sülfat atağından sonra basınç dayanımı kaybının sırasıyla %32 ve %25, karbonatlaşma derinliğinin 7,21 mm olacağı tahmin edilmiştir.

Çizelge 4.17. Genel özellikler için optimum HLB üretim şartları ve beklenen deney sonuçları

Bağımsız değişkenler ve tepkiler	**Hedef**	**Alt limit**	**Üst limit**	**Önem faktörü**	**Optimum şartlar ve beklenen deney sonuçları**		
					1	**2**	**3**
ÇL (%)	Aralıkta	0	0,25	3	0,11	0,08	0,03
CEL (%)	Aralıkta	0	0,25	3	0,00	0,01	0,00
SL (%)	Aralıkta	0	0,25	3	0,04	0,00	0,00
PL (%)	Aralıkta	0	0,25	3	0,25	0,24	0,20
UK ikame oranı (%)	Aralıkta	10	40	3	27	20	15
EAFC ikame oranı (%)	Aralıkta	15	85	3	40	67	55
Bağlayıcı dozajı (kg/m^3)	Aralıkta	300	400	3	393	400	390
Eğilme dayanımı (MPa)	Maksimum	2,1	6,2	3	5,3	6,2	6,3
Eğilme maksimum deplasman (mm)	Maksimum	10,48	19,99	3	15,04	14,99	15,35
720 günlük basınç dayanımı (MPa)	Maksimum	26	47	3	51,2	41,2	41,0
Çekipçıkarma yükü (kg)	Maksimum	226,44	908,87	3	466,67	458,43	407
Hızlı klor geçirimliliği (c)	Minimum	2583	5193	3	1076	966	496
Kılcal su emme katsayısı (cm^2/s)	Minimum	0,0076	0,0447	3	0,013	0,015	0,012
Su emme kapasitesi (%)	Minimum	4,40	9,78	3	3,09	3,87	4,4
Aşınma oranı (%)	Minimum	0,36	0,50	3	0,42	0,42	0,42
Basınç dayanımı değişim –A.S. (%)	Maksimum	-66,6	-18,36	3	-32	-29	-33
Basınç dayanımı değişim –S.S. (%)	Maksimum	-73,9	-25,4	3	-25	-23	-25
Çökme değeri (cm)	Maksimum	1	16	3	10	10	11
Karbonatlaşma derinliği (mm)	Minimum	3,5	13	3	7,21	7,21	7,21
Erişilebilme ihtimali (%)	-	-	-	-	76,0	75,8	73,0

Önem faktörü 1 ile 5 arasında değerlendirilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Tepki Yüzeyi Yöntemi kullanılarak üretilen hibrit lifli betonların (HLB) performans optimizasyonu yapılmıştır. Çelik, cam elyaf, sentetik ve polipropilen lif hacimce katılım oranı, uçucu külün (UK) çimento ile ağırlıkça ikame oranı, elektrik ark fırın cüruf agregasının (EAFC) doğal kırma taş agrega ile ağırlıkça ikame oranı ve bağlayıcı dozajı deneysel tasarımın bağımsız değişkenleri olarak tanımlanmış ve yedi faktörlü bir deney tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Her lif türü toplam beton hacminin %0 ile %0,75'i arasında değişen oranlarda kullanılarak, UK, çimentonun ağırlıkça %0 ile %40' arasında yer değiştirilerek, EAFC, doğal kırma taş agrega ile ağırlıkça %0 ile %100 arasında yer değiştirilerek merkezi kompozit tasarım yöntemi ile HLB tasarımı yapılmıştır. HLB üretimlerinde su/bağlayıcı oranı 0,5 olarak seçilmiş ve 30 farklı karışım tasarlanmıştır. Süper akışkanlaştırıcı katkı ile tüm HLB'lerin çökme değerinin 160-210 mm olması sağlanmıştır. Üretilen HLB'lerin mekanik, geçirimlilik, durabilite ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir.

400 gün boyunca %5 konsantrasyonda hazırlanan H_2SO_4 ve Na_2SO_4 çözeltilerinde bekletilen HLB numunelerin ağırlık ve dayanım değişimleri incelenmiştir. Belirlenen değişim oranları varyans analizi yardımıyla karakterize edilmiş ve değişimleri tanımlayan 2FI regresyon modelleri oluşturulmuştur. Ağırlık ve basınç dayanımı varyasyonlarını minimize etmek için çoklu objektifli optimizasyon çalışması yapılmıştır. Deney sonuçlarının varyans analizi (ANOVA) yapılarak bağımsız değişkenlerin % 95 güvenlik düzeyinde istatistiksel olarak etki ağırlıkları belirlenmiştir. Ayrıca HLB numunelerin yüksek sıcaklık (250°C, 500°C ve 750 °C) altında dayanım ve aderans kaybı belirlenmiştir. Deney tasarımındaki bağımsız ve bağımlı değişkenler (deney sonuçları) arasındaki ilişkileri temsil eden korelasyon katsayıları yüksek olan regresyon modelleri oluşturulmuş ve bu modeller kullanılarak belirlenen kısıtlar altında her bir özellik grubu için ayrı ayrı ve tüm özellikler için bir tane olmak üzere çoklu objektifli optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. İstenen özelliklerde HLB üretimi için bağımsız değişkenlerin optimum üretim şartları belirlenmiştir. Deneysel çalışma ve istatistiksel analiz sonuçlarına göre aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

1. Uygun kompozit tasarım yöntemi ile malzeme, işçilik ve zamandan tasarruf sağlanarak daha çok veriye ulaşmanın mümkün olduğu belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçların varyans analizi ile uygun regresyon modelleri elde edilmiştir.

2. Çelik, cam elyaf, sentetik ve polipropilen liflerin hibridizasyonu ile liflerin kendine has özellikleri birleştirilerek üstün performanslı HLB'ler üretilmiş mekanik, geçirimlilik, fiziksel ve durabilite özellikleri iyileştirilmiştir. HLB'deki agrega sistemi EAFC ile bağlayıcı hamur da UK ile hibritlenerek daha çevre dostu ve ekonomik beton üretimi gerçekleştirilmiştir.

3. HLB'lerin çökme değerini etkileyen en önemli parametrenin %33,6 etki oranıyla cam elyaf lif olduğu belirlenmiştir.

4. İstatistiksel analiz sonuçları, liflerin hibritlenmesi ile üretilen betonların eğilme dayanımının tek tür lif ile üretilen betonların eğilme dayanımına kıyasla daha yüksek olduğunu göstermiştir. Eğilme dayanımını temsil eden 2FI regresyon modeli oluşturulmuş, ANOVA sonucuna göre eğilme dayanımını etkileyen en önemli parametrelerin toplam lif hacmi ve lif türü olduğu anlaşılmıştır. Piyasa uygulamalarında en yaygın kullanılan çelik ve polipropilen liflerin birlikte kullanılma durumu için kritik oranlar belirlenmiştir. Eğilme performansı yüksek betonlar için çelik lif oranı %0,15'i aşmayan ve polipropilen lif oranı %0,1'den fazla olan karışımlar yapılmalıdır.

5. Her lif türünün eşit ve az miktarda (%0,25) kullanılması ile üretilen HLB'lerin eğilme dayanımı, tokluk ve enerji yutma kapasitesi değerlerinin arttığı görülmüştür. Betonların deplasman yapma yeteneğinin yüksek olması istenirse tek tip lif kullanmak yerine lif oranı hacimce %1'i aşmayan çelik, cam elyaf, sentetik ve polipropilen lifler birlikte kullanılarak beton üretimi yapılması daha etkili bir çözüm olacaktır.

6. HLB numunelerin yarmada çekme dayanımını etkileyen en önemli parametrenin lif türü olduğu belirlenmiştir. En etkili bağımsız değişkenlerin sırası ile cam elyaf (ρ=%36,6), sentetik (ρ=%27,8), çelik (ρ=%25,6), ve polipropilen (ρ=%3,7) lifler olduğu tespit edilmiştir. Çekme mukavemeti yüksek olan cam elyaf lifin boyu diğerlerine nazaran kısa olduğundan beton içinde yük aktarımı yapan lif telinin

sayıca fazla olması ile daha fazla çekme yükü aktardığı tespit edilmiştir. Liflerin narinlik oranının ve çekme mukavemetinin betonun yarmada çekme dayanımını karakterize eden en önemli parametreler olduğu tespit edilmiştir.

7. Deney tasarımına uygun üretilen HLB numunelerin 28, 180, 360 ve 720 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Karışımın içeriğine bağlı olarak 28 günlük basınç dayanımları 20,8 MPa ile 43,1 MPa aralığında değişmiştir. Deneysel veriler ile 2FI regresyon modeli oluşturulmuş ve ANOVA sonuçlarına göre tüm lif tiplerinin, EAFC agregasının ve bağlayıcı dozajın basınç dayanımı üzerindeki etkilerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir. Lif türlerinin hepsi basınç dayanımına olumlu katkı sağlamıştır. UK ve EAFC ikame oranı ve bağlayıcı dozajı arttıkça basınç dayanımı artmıştır.

8. Bağlayıcı dozajı 350 kg/m^3'ü aştıktan sonra HLB'lerin basınç dayanımında önemli artış olduğu görülmüştür. Basınç dayanımını artırmak için bağlayıcı dozajının sınırlandırıldığı (300 kg/m^3) HLB'lerde UK miktarı artırılmalı ve dozajı yüksek olan (400 kg/m^3) HLB'lerde UK miktarı sınırlandırılmalıdır.

9. Basınç dayanımını etkileyen bağımsız değişkenlerin ikili etkileşimleri incelenmiş ve UK oranı fazla olan HLB'lerin zamana bağlı dayanım artış oranının 180. ve 360. günlerde en yüksek olduğu (M2, M15 ve M28 numunelerinin sırası ile %10,51, %33,5 ve %25,7) belirlenmiştir. UK içeren matris ile liflerin uzun vadede iyi bir bağlanma mekanizması kurduğu belirlenmiştir.

10. HLB numuneler yüksek sıcaklığa (750°C) maruz kaldıktan sonra en yüksek mukavemet kaybı M29 (%78,9), en az mukavemet kaybı M15 (%20,5) numunesinde gözlenmiştir. M29 karışımının bağlayıcı dozajı 400 kg/m^3 iken M15 karışımının bağlayıcı dozajı 300 kg/m^3'tür. Karışımdaki çimento miktarı yüksek ise bünyede bulunan $Ca(OH)_2$ miktarı da yüksektir. Yüksek sıcaklık etkisi ile $Ca(OH)_2$'deki suyun buharlaşması ile oluşan CaO'nun ve açığa çıkan suyun genleşmeye neden olması neticesinde çatlamaların meydana geldiği ve dayanımın azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, karışımdaki UK miktarı arttıkça çimento miktarının azalması neticesinde bünyede bulunan $Ca(OH)_2$ miktarı da azaldığından sıcaklık ile

kaybolan su miktarı azalmıştır. Yani UK ikame oranı arttıkça betonların yüksek sıcaklık etkisinde dayanım kaybı da azalmıştır.

11. Toplam lif içeriği maksimum %2 olarak üretilen M28 numunesinde donatı çekip çıkarma yükü kontrol numunesine göre %75,1 fazla iken toplam lif içeriği %1 olan M3 numunesinde %73,9'dur. Lif türünden bağımsız olarak aşırı miktarda lif kullanımı sonucunda beton, kalıba düzgün bir şekilde yerleştirilememiş ve donatı ile beton arasında boşluk kalmıştır. Donatı ile betonun bağlanma yüzeyi azaldığından çekme yüklerine uygulanan sürtünme kuvveti neticesinde uygulanan çekip çıkarma yükünde kayda değer bir artış sağlanamamıştır. Yani lif katkı oranının eşik değeri geçmesi ile donatı-beton aderansında öenmli bir değişiklik görülmemiştir.

12. Çelik lif miktarı arttıkça HLB numunelerde ölçülen rezonans frekansı değerinin arttığı, sentetik lif miktarı arttıkça rezonans frekansı değerinin azaldığı belirlenmiştir. Korelasyonu yüksek kuadratik regresyon modeli oluşturulmuş ve etki ağırlığı (ρ = %9,2) en yüksek olan parametrenin sentetik lif-EAFC ikame oranı ikili etkileşimi olduğu belirlenmiştir. Verici uçtan çıkan frekans dalgalarının liflere denk gelmesi ile dalga yönlerinin değiştiği ve lif yapısına bağlı olarak dalga hızının değişmesi ile rezonans frekansı değerlerinin azalıp arttığı belirlenmiştir. Bu nedenle HLB'lerin kalite ölçümlerinde rezonans frekansı verilerinin tek başına yeterli olmadığı ve tercih edilen bir deney yöntemi olmaması gerektiği kanaatine varılmıştır.

13. HLB numunelerin ultrasonik dalga hızını (UDH) etkileyen istatistiksel olarak anlamlı parametrelerin çelik, cam elyaf ve polipropilen lifler olduğu belirlenmiştir. Lifler beton içerisinde rastgele dağıldığından ultrasonik ses dalgalarının liflere çarpıp yön değiştirmesi neticesinde UDH'nin beton numunenin bir yüzeyinden diğerine varış süresi artmıştır. Bu nedenle UDH ölçümleri ile HLB numunelerin boşluk miktarı ve kalitesi hakkında doğru tespitlerin yapılamayacağı kanaatine varılmıştır.

14. HLB numunelerin basınç dayanımı arttıkça aşınma direncinin de arttığı belirlenmiştir. Deney sonuçlarının varyans analizine göre doğrusal bir regresyon

modeli elde edilmiş ve HLB numunelerin aşınma oranını etkileyen istatistiksel olarak en önemli parametrelerin bağlayıcı dozajı (%ρ = 95,7) ve UK ikame oranı (%ρ = 4,3) olduğu tespit edilmiştir. Ancak UK ikame oranı ile bağlayıcı dozajının ikili etkileşiminin aşınma oranı üzerinde etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

15. HLB numunelerinin ağırlık değişimi, asit saldırısına maruz kaldıktan sonra negatif iken, sülfat saldırısına maruz kalan numunelerde pozitif yönde olmuştur. Ancak değişim oranlarının çok yakın olduğu görülmüştür.

16. Asit ortamında bulunacak betonların asit atağına karşı direncini artırmak için çelik ve polipropilen liflerin kullanılmasının yararlı olacağı ancak sentetik liflerin kullanılmaması gerektiği tespit edilmiştir.

17. Sülfatlı ortamlarda hizmet verecek beton elemanlarda hacimce %0,25'i aşmayacak şekilde çelik, cam elyaf ve polipropilen lif kullanılmasının uygun olduğu ancak sentetik lif kullanılmaması gerektiği belirlenmiştir. Çelik, cam elyaf ve polipropilen lifler sülfat atağı karşısında HLB'lere direnç kazandırdığı ancak sentetik liflerin beton parçacıklarını bir arada tutma noktasında yetersiz kaldığı belirlenmiştir.

18. Beton üretiminde ağırlıkça %22 oranında UK'nın çimento ile yer değiştirilmesi ile asit ve sülfat atağı karşısında meydana gelen ağırlık kaybının %11,3 ile sınırlandırıldığı belirlenmiştir. EAFC, doğal kırma taş agrega ile ağırlıkça %50'ye varan oranlarda yer değiştirilerek basınç dayanımı kaybı minimum seviyede olduğu belirlenmiştir. Böylece üretiminde ilave enerji gerektirmeyen malzemeler kullanılarak lif katkısı ile artan maliyet azaltılabilir ve daha çevre dostu bir yapı malzemesi üretilebilir.

19. HLB numunelerin hızlı klor geçirimliliğini etkileyen en önemli parametrelerin etki ağırlıkları sırasıyla %91,8 ve %8,2 olan bağlayıcı dozajı ve çelik lif içeriği olduğu belirlenmiştir. HLB'lerdeki çelik lif oranı % 0,25'e yükseldiğinde klor geçirimliliği 4180c'den 3850c'ye gerilemiştir. ASTM C1202'de belirtilen sınıflandırmaya göre tez çalışması kapsamında üretilen 30 karışımdan 13 tanesinin orta derecede 17 tanesinin ise yüksek derecede klor iyon geçirimlilik sınıfında olduğu tespit edilmiştir.

20. HLB numunelerin su emme ve kılcal yolla su emme miktarını azaltmak için sırasıyla %85 ve %20 oranlarında doğal kırma taş agrega yerine EAFC; çimento yerine UK kullanılabileceği belirlenmiştir.

21. HLB'lerin aşınma oranını minimize etmek, eğilme dayanımı, deplasman miktarı, basınç dayanımı, çekip çıkarma yükü ve rezonans frekansı değerlerini maksimize etmek için yapılan çoklu objektifli optimizasyon çalışmasına göre erişilebilme ihtimali %82 ile en yüksek olan optimum üretim şartları %0,25 çelik lif, %0,23 cam elyaf lif, %0,25 sentetik lif, %0,25 polipropilen lif, %13 UK, %80 EAFC ve 393 kg/m^3 bağlayıcı dozajı olarak belirlenmiştir. Bu koşullara göre üretilen HLB numunelerin eğilme dayanımının 6,9 MPa, eğilmede deplasman değerinin 15 mm, yarmada çekme dayanımının 4,13 MPa, 28 günlük basınç dayanımının 50 MPa, donatı çekip çıkarma yükünün 670 kg ve aşınma oranının %0,42 olacağı tahmin edilmiştir.

22. HLB'lerin asit ve sülfat atağında basınç dayanımı ve ağırlık varyasyonunu, yüksek sıcaklık altında dayanım ve aderans kaybını, karbonatlaşma derinliğini minimize etmek ve 28 günlük basınç dayanımını maksimize etmek için yapılan çoklu objektifli optimizasyon çalışmasına göre erişilebilme ihtimali %75,9 ile en yüksek olan optimum üretim şartları %0,13 çelik lif, %0,21 cam elyaf lif, %0,17 sentetik lif, %0,02 polipropilen lif, %10 UK, %73 EAFC ve 330 kg/m^3 bağlayıcı dozajı olarak belirlenmiştir. Bu koşullara göre üretilen HLB numunelerin basınç dayanımı kaybının 400 gün sonra asit atağı sonucunda %34, sülfat atağı sonucunda %27 olacağı, ağırlık kaybının ise her iki durum için %5 olacağı tahmin edilmiştir. Yüksek sıcaklık altında basınç dayanımı ve aderans kaybının sırası ile %60,5 ve %35,5 olacağı tahmin edilmiştir.

23. HLB'lerin su emme kapasitesini, kılcal su emme katsayısını ve hızlı klor geçirimliliğini minimize etmek, ultrasonik dalga hızı, rezonans frekansı ve basınç dayanımı değerlerini maksimize için yapılan çoklu objektifli optimizasyon çalışmasına göre erişilebilme ihtimali %84,7 ile en yüksek olan optimum üretim şartları %0,20 çelik lif, %0,13 cam elyaf, %0,14 sentetik lif, %0,25 polipropilen elyaf, %36 uçucu kül ikame oranı, %15 EAFC ikame oranı ve 350 kg/m^3 bağlayıcı dozajı olarak belirlenmiştir. Bu koşullara göre üretilen HLB numunelerin 28 günlük

basınç dayanımının 43 MPa, su emme kapasitesinin % 4,41, kılcal su emme katsayısının 0,011 cm^2/s, hızlı klor geçirimliliğinin 2929 c, ultrasonik dalga hızının 3255 m/s ve rezonans frekansı değerinin 3902 Hz olacağı tahmin edilmiştir.

24. HLB'lerin mekanik, geçirimlilik, fiziksel ve durabilite özellikleri dikkate alınarak ideal bir beton üretimi için yapılan çoklu objektifli optimizasyon çalışmasında çökme değeri, eğilme dayanımı, eğilmede deplasman, 720 günlük basınç dayanımı, çekip çıkarma yükü maksimize edilmiş; hızlı klor geçirimliliği, kılcal su emme katsayısı, su emme kapasitesi, aşınma oranı, asit ve sülfat atağından sonra basınç dayanımı kaybı ve karbonatlaşma derinliği minimize edilmiştir. Erişilebilme ihtimali %76 ile en yüksek olan optimum üretim şartları %0,11 çelik elyaf, %0 cam elyaf, %0,04 sentetik elyaf, %0,25 polipropilen elyaf, %27 uçucu kül ikame oranı, %40 EAFC ikame oranı ve 393 kg/m^3 bağlayıcı dozajı olarak belirlenmiştir. Bu koşullara göre üretilen HLB numunelerin çökme değerinin 10 cm, eğilme dayanımının 5,3 MPa, eğilmede deplasman değerinin 15,04 mm, 720 günlük basınç dayanımının 51,2 MPa, çekip çıkarma yükünün 466,67 kg, hızlı klor geçirimliliğinin 1076 c, kılcal su emme katsayısının 0,013 cm^2/s, su emme kapasitesinin %3,09, aşınma oranının 0,42, asit ve sülfat atağından sonra basınç dayanımı kaybının sırasıyla %32 ve %25, karbonatlaşma derinliğinin 7,21 mm olacağı tahmin edilmiştir.

25. İleriki çalışmalarda, her bir malzemenin kendine has özellikleri kullanılarak hibrit sistemler kurulup, beton sektörüne olumlu katkılar sağlanabilir. Lif türleri ve diğer katkı malzemeleri, beton bileşenlerinin çoklu etkileşimleri dikkate alınarak seçilmelidir. Hem ekolojik hem ekonomik çözümler üretmek için yan ürünlerin hibrit sistemlere dahil edilmesiyle optimum çözümler üretilebilir.

KAYNAKLAR

Aarthi, K. ve Arunachalam, K. (2018). Durability studies on fibre reinforced self-compacting concrete with sustainable wastes. *Journal of Cleaner Production*, 174, 247-255.

Abou El-Mal, H. S. S., Sherbini, A. S. ve Sallam, H. E. M. (2015). Mode II fracture toughness of hybrid FRCs. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 9(4), 475-486.

Abdelbary, A. ve Mohamed, A. R. (2018). Investigating Abrasion Resistance of Interlocking Blocks Incorporating Steel Slag Aggregate. *ACI Materials Journal*, 115(1), 47-54.

Afroz, M., Venkatesan, S. ve Patnaikuni, I. (2019). Effects of hybrid fibers on the development of high volume fly ash cement composite, *Construction and Building Materials*, 215, 984-997. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.083.

Ahmed, S. F., Maalej, M. ve Paramasivam, P. (2007). Analytical model for tensile strain hardening and multiple cracking behavior of hybrid fiber-engineered cementitious composites. *Journal of materials in civil engineering*, 19(7), 527-539.

Algin, Z. ve Ozen, M. (2018). The properties of chopped basalt fibre reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 186, 678-685.

Akça, K. R., Çakır, Ö. Ve Ipek, M. (2015). Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 98, 620-630. 23.

Akinpelu, M. A., Odeyemi, S. O., Olafusi, O. S., ve Muhammed, F. Z. (2019). Evaluation of splitting tensile and compressive strength relationship of self-compacting concrete. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 31(1), 19-25.

Altun, M. G. ve Oltulu, M. (2020). Effect of different types of fiber utilizatıon on mechanical properties of recycled aggregate concrete containing silica fume. *Journal of Green Building*, 15(1), 119-136.

Alzeebaree, R., Çevik, A., Nematollahi, B., Sanjayan, J., Mohammedameen, A. ve Gülşan, M. E. (2019). Mechanical properties and durability of unconfined and confined geopolymer concrete with fiber reinforced polymers exposed to sulfuric acid. *Construction and Building Materials*, 215, 1015-1032.

Anandaraj, S., Rooby, J., Awoyera, P. O. ve Gobinath, R. (2019). Structural distress in glass fibre-reinforced concrete under loading and exposure to aggressive environments. *Construction and building materials*, 197, 862-870.

Anto, J., Vigneshkannan, S., Devananth, R. ve Manju, S. (2020). Experimental investigation on strength properties of Recron fibre with fly ash in concrete. *Materials Today*, 21, 806-810.

Arribas, I., Vegas, I., San-Jose, J. T. ve Manso, J. M. (2014). Durability studies on steelmaking slag concretes. *Materials & design*, 63, 168-176.

ASTM C 1609/C 1690M–05 (2006). Standard test method for flexural performance of fiber reinforced concrete (using beam with third-point loading*), American Society of Testing and Materials*, 1–8.

ASTM C 805, (1994). Standart Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, *Annual Book of ASTM Standarts*.

ASTM C 39, (1994). Standart test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. *Annual Book of ASTM Standarts*.

ASTM C1161, (2002). Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM C 1202-97, (1997). Standard test method for electrical ındication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. *Annual Book of ASTM Standarts*.

ASTM C 597-02, (1994). Standart test method for pulse velocity through concrete. *Annual Book of ASTM Standarts*.

ASTM C 215, (2003). Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM C 1202-97, (1997). Standard test method for electrical ındication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. *Annual Book of ASTM Standarts*.

ASTM C 642, (2013). Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

Attiogbe, E. K. ve Rizkalla, S. H. (1988). Response of concrete to sulfuric acid attack. ACI materials journal, 85(6), 481-488.

Badagha, D. ve Modhera, C. D. (2015). An Experimental Approach to Investigate Effects of Curing Regimes on Mechanical Properties and Durability of Different Fibrous Mortars. *In Advances in Structural Engineering*, 1917-1929.

Balçıkanlı, M. (2016). Alkalilerle aktive edilmiş çimentosuz cüruflu betonların mekanik ve geçirimlilik özellikleri ve üretim optimizasyonu, Yüksek lisans tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü,* Hatay.

Balcikanli, M. ve Ozbay, E. (2016). Optimum design of alkali activated slag concretes for the low oxygen/chloride ion permeability and thermal conductivity, Composites Part B, 91, 243-256. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.01.047.

Bankir, M. B. Ve Sevim, U. K. (2020). Performance optimization of hybrid fiber concretes against acid and sulfate attack. *Journal of Building Engineering*, 101443.

Baradan, B., Yazici, H., & Ün, H. (2010). Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), *Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları*, İstanbul.

Banthia, N. ve Gupta, R. (2004). Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): Fiber synergy in high strength matrices, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 37(274), 707–716. https://doi.org/10.1617/14095.

Banthia, N. ve Sappakittipakorn, M. (2007). Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. *Cement and concrete research*, 37(9), 1366-1372.

Baradan, B., Yazici, H., ve Aydin, S. (2012). Beton. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.*

Bassuoni, M. T. ve Nehdi, M. L. (2007). Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction. *Cement and Concrete Research*, 37(7), 1070-1084.

Beaucour, A. L., Pliya, P., Faleschini, F., Njinwoua, R., Pellegrino, C. ve Noumowé, A. (2020). Influence of elevated temperature on properties of radiation shielding concrete with electric arc furnace slag as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 256.

Benli, A., Karataş, M. ve Gurses, E. (2017). Effect of sea water and $MgSO_4$ solution on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with fly ash/silica fume. *Construction and Building Materials*, 146, 464-474.

Bhatty, J. I. ve Taylor, P. C. (2006). Sulfate resistance of concrete using blended cements or supplementary cementitious materials, *Portland Cement Association*. (No. PCA R&D Serial No. 2916a).

Bingöl, A. F., ve Balaneji, H. H. (2019). Determination of sulfate resistance of concretes containing silica fume and fly ash. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 43(1), 219-230.

Binici, H., Yardim, Y., Aksogan, O., Resatoglu, R., Dincer, A. ve Karrpuz, A. (2020). Durability properties of concretes made with sand and cement size basalt. *Sustainable Materials and Technologies*, 23.

Bolat, H., Şimşek, O., Çullu, M., Durmuş, G. Ve Can, Ö. (2014). The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete. *Composites Part B: Engineering*, 61, 191-198.

Bravo, M., De Brito, J., Pontes, J. ve Evangelista, L. (2015). Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Construction and Building Materials*, 77, 357-369.

Cao, Q., Cheng, Y., Cao, M. ve Gao, Q. (2017). Workability, strength and shrinkage of fiber reinforced expansive self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 131, 178-185.

Cao, Y., Liu, M. ve Wu, Y. F. (2020). Effect of low strain rate on the axial behavior of concrete in CFRP-confined circular cylinders. *Construction and Building Materials*, 255.

Chasioti, S. G. ve Vecchio, F. J. (2017). Shear behavior and crack control characteristics of hybrid steel fiber-reinforced concrete panels. *ACI Structural Journal*, 114(1), 209.

Chen, B. ve Liu, J. (2005). Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 913-917.

Chen, Z., Tang, J., Zhou, X., Zhou, J. ve Chen, J. (2020). Interfacial Bond Behavior of High Strength Concrete Filled Steel Tube after Exposure to Elevated Temperatures and Cooled by Fire Hydrant. *Materials*, 13(1), 150.

Cominoli, L., Meda, A. ve Plizzari, G. A. (2007). Fracture properties of high-strength hybrid fiber-reinforced concrete. *In Advances in Construction Materials* 139-146.

Çevik, A., Alzeebaree, R., Humur, G., Niş, A. ve Gülşan, M. E. (2018). Effect of nano-silica on the chemical durability and mechanical performance of fly ash based geopolymer concrete. *Ceramics International*, 44(11), 12253-12264.

De Brito, J., Ferreira, J., Pacheco, J., Soares, D. ve Guerreiro, M. (2016). Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete. *Journal of Building Engineering*, 6, 1-16.

Deng, F., Ding, X., Chi, Y., Xu, L. ve Wang,L. (2018). The pull-out behavior of straight and hooked-end steel fiber from hybrid fiber reinforced cementitious composite: Experimental study and analytical modeling, *Composite Structures*, 206, 693-712. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.066.

Devi, K., Aggarwal, P. ve Saini, B. (2019). Admixtures Used in Self-Compacting Concrete: A Review. Iranian Journal of Science and Technology, *Transactions of Civil Engineering*, 1-27.

Dhaher, A. S., Daoud, S. F. ve Al-Attar, T. S. (2018). Workability of Hybrid Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete. *Engineering and Technology Journal*, 36(2 Part (A) Engineering), 111-116.

Dhonde, H. B., Mo, Y. L., Hsu, T. T. Ve Vogel, J. (2007). Fresh and hardened properties of self-consolidating fiber-reinforced concrete. *ACI materials journal*, 104(5), 491.

Durham, M. G. ve Kellner, D. M. (2012). Media and cultural studies: Keyworks. *John Wiley & Sons*.

Fan, J., Shen, A., Guo, Y., Zhao, M., Yang, X. ve Wang, X. (2020). Evaluation of the shrinkage and fracture properties of hybrid Fiber-Reinforced SAP modified concrete. *Construction and Building Materials*, 256.

Dinakar, P., Babu, K. G. ve Santhanam, M. (2008). Durability properties of high volume fly ash self-compacting concretes. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 880-886.

Dong, M., Feng, W., Elchalakani, M., Li, G. K., Karrech, A., ve Sheikh, M. N. (2020). Material and glass-fibre-reinforced polymer bond properties of geopolymer concrete. *Magazine of Concrete Research*, 72(10), 509-525.

Ercikdi, B., Kesimal, A., Cihangir, F., Deveci, H. ve İ. Alp. (2009). Cemented paste backfill of sulphide-rich tailings: Importance of binder type and dosage, *Cement and Concrete Composites*, 31(4), 268-274..

Ergün, A., Kürklü, G., Serhat, B. M. ve Mansour, M. Y. (2013). The effect of cement dosage on mechanical properties of concrete exposed to high temperatures. *Fire safety journal*, 55, 160-167.

Falade, F., ve Iqbal, T. (2019). Compressive strength Prediction recycled aggregate incorporated concrete using adaptive neuro-fuzzy system and multiple linear regression. *International Journal of Civil, Environmental and Agricultural Engineering*, 1(1), 19-24.

Faleschini, F., Fernández-Ruíz, M. A., Zanini, M. A., Brunelli, K., Pellegrino, C. ve Hernández-Montes, E. (2015). High performance concrete with electric arc furnace slag as aggregate: mechanical and durability properties. *Construction and Building Materials*, 101, 113-121.

Fall, M. ve Benzaazoua, M. (2005). Modeling the effect of sulphate on strength development of paste backfill and binder mixture optimization, *Cement and Concrete Research*, 35(2), 301-314.

Feldman, D. ve Zheng, Z. (1993). Synthetic fibres for fibre concrete composites. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 305.

Fenu, L., Forni, D., Cadoni, E., (2016). Dynamic behavior of cement mortars reinforced with glass and basalt fibers, *Composites Part B*, 92, 142–150.

Figueiredo, A. D. D. ve Ceccato, M. R. (2015). Workability analysis of steel fiber reinforced concrete using slump and Ve-Be test. *Materials Research*, 18(6), 1284-1290.

Frazão, C., Camões, A., Barros, J. ve Gonçalves, D. (2015). Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 80, 155-166.

Gao, D., Zhang, L., Zhao, J. ve You, P. (2020). Durability of steel fibre-reinforced recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 232.

Gebretsadik, B. T. (2013). Ultrasonic Pulse Velocity Investigation of Steel Fiber Reinforced Self-Compacted Concrete, Yüksek lisans tezi, *Arba Minch University*,

Ethiopia.

Gencel, O., Gok, M. S. ve Brostow, W. (2011). Effect of metallic aggregate and cement content on abrasion resistance behaviour of concrete. *Materials Research Innovations*, 15(2), 116-123. https://doi.org/10.1179/143307511X12998222918877.

Gencel, O., Brostow, W., Datashvili, T. ve Thedford, M. (2011). Workability and mechanical performance of steel fiber-reinforced self-compacting concrete with fly ash. *Composite interfaces*, 18(2), 169-184.

Gencel, O., Ozel, C., Brostow, W. ve Martinez-Barrera, G. (2011). Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibres. *Materials Research Innovations*, 15(3), 216-225.

Glavind, M. ve Aarre, T. (1990). High-strength concrete with increased fracture-toughness. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 211.

Gunantara, N. (2018). A review of multi-objective optimization: Methods and its applications. *Cogent Engineering*, 5(1), 1502242.

Gupta, M. ve Kumar, M. (2019). Effect of nano silica and coir fiber on compressive strength and abrasion resistance of concrete, *Construction and Building Materials*, 226, 44-50. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.232.

Hadigheh, S. A., Gravina, R. J. ve Smith, S. T. (2017). Effect of acid attack on FRP-to-concrete bonded interfaces. *Construction and Building Materials*, 152, 285-303.

Heckert, N. A., Filliben, J. J., Croarkin, C. M., Hembree, B., Guthrie, W. F., Tobias, P. ve Prinz, J. (2002). Handbook 151: NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods.

Hejazi, S. M., Abtahi, S. M. ve Safaie, F. (2016). Investigation of thermal stress distribution in fiber-reinforced roller compacted concrete pavements. *Journal of Industrial Textiles*, 45(5), 896-914.

Hedjazi, S., ve Castillo, D. (2020). Relationships among compressive strength and UPV of concrete reinforced with different types of fibers. *Heliyon*, 6(3), e03646.

Hilles, M.M. ve Ziara, M.M., (2018). Mechanical behavior of high strength concrete reinforced with glass fiber reinforced polymer, *J. Eng. Res. Technol*., 5 (3), 58–67. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.003.

Hossain, K. M. A, Lachemi, M. (2006). Performance of volcanic ash and pumice based blended cement concrete in mixed sulfate environment, *Cement and Concrete Research*, 36(6), 1123-1133. https://doi.org/10.1680/adcr.2006.18.2.71.

Huang, L., Xu, L., Chi, Y., & Xu, H. (2015). Experimental investigation on the seismic performance of steel–polypropylene hybrid fiber reinforced concrete columns. *Construction and Building Materials*, 87, 16-27.

Isa, M. N., Pilakoutas, K., Guadagnini, M. ve Angelakopoulos, H. (2020). Mechanical performance of affordable and eco-efficient ultra-high performance concrete (UHPC) containing recycled tyre steel fibres. *Construction and Building Materials*, 255.

Iskhakov, I. ve Ribakov, Y. (2019). Transverse Deformations and Structural Phenomenon as Indicators of Steel Fibred High-Strength Concrete Nonlinear Behavior. *Advances in Materials Science and Engineering*, 9147849.

Ismail, M. K., Hassan, A. A. Ve Lachemi, M. (2018). Effect of Fiber Type on Impact and Abrasion Resistance of Engineered Cementitious Composite. *ACI Materials Journal*, 115(6).

İnternet: Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Sektörel Uygulama Klavuzu, URL: https://cygm.csb.gov.tr/kilavuz-ve-rehberler-i-429. Son Erişim Tarihi: 23.07.2020.

İnternet: Türkiye Hazır Beton Birliği. URL: https://www.thbb.org/media/422739/thbb-istatistikler-2019.pdf, Son Erişim Tarihi: 23.07.2020.

Jafarifar, N., Pilakoutas, K. ve Bennett, T. (2016). The effect of shrinkage cracks on the load bearing capacity of steel-fibre-reinforced roller-compacted-concrete pavements. *Materials and structures*, 49(6), 2329-2347.

Jiang, Y., Ling, T. C. ve Shi, M. (2020). Strength enhancement of artificial aggregate prepared with waste concrete powder and its impact on concrete properties. *Journal of Cleaner Production*, 257.

Jiang, H., Yi, H., Yilmaz, E., Liu, S. ve Qiu, J. (2020). Ultrasonic evaluation of strength properties of cemented paste backfill: effects of mineral admixture and curing temperature, *Ultrasonics*, 100, 105983. https://doi.org/10.1016/j.ultras.2019.105983.

Junior, A. N., Ferreira, S. R., Toledo, F., R., Fairbairn, D. ve Dweck, J. (2019). Effect of early age curing carbonation on the mechanical properties and durability of high initial strength Portland cement and lime-pozolan composites reinforced with long sisal fibres, *Composites Part B: Engineering*, 163, 351-362.

Karahan, O., Durak, U., İlkentapar, S., Atabey, İ. İ. ve Atiş, C. D. (2019). Resistance of polypropylene fibered mortar to elevated temperature under different cooling regimes. *Revista de la Construcción. Journal of Construction*, 18(2), 386-397.

Kaufmann, J. P. (2014). Durability performance of fiber reinforced shotcrete in aggressive environment. *In World Tunnelling Congress*, Brasil.

Khademi, F., Akbari, M., ve Jamal, S. M. (2016). Predictia Rezistentei La Compresiune A Betonului Prin Testare Upv (Ultrasonic Pulse Velocity) Si Modelare Cu Retele Neuronale Artificiale/Prediction of Concrete Compressive Strength Using Ultrasonic Pulse Velocity Test and Artificial Neural Network Modeling. *Revista Romana de Materiale*, 46(3), 343.

Khalil, W. I., Abbas, W. A., Nasser, I. F. (2019). Dynamic modulus of elasticity of geopolymer lightweight aggregate concrete, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 518 (2) 022023.

Khan, M. S., Shariq, M., Akhtar, S. ve Masood, A. (2019). Performance of high-volume fly ash concrete after exposure to elevated temperature. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 1-14.

Kılıç, A., Teymen, A., Özdemir, O., ve Atiş, C. D. (2019). Estimation of Compressive Strength of Concrete Using Physico-Mechanical Properties of Aggregate Rock. *Iranian Journal of Science and Technology*, Transactions of Civil Engineering, 43(1), 171-178.

Kızılkanat, A. B., Kabay, N., Akyüncü, V., Chowdhury, S. ve Akça, A.H., (2015). Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: an experimental study, *Construction and Building Materials*, 100, 218–224.

Kim, B., Boyd, A. J., Kim, H. S. ve Lee, S. H. (2015). Steel and synthetic types of fibre reinforced concrete exposed to chemical erosion. *Construction and Building Materials*, 93, 720-728.

Kim, D. J., Park, S. H., Ryu, G. S. ve Koh, K. T. (2011). Comparative flexural behavior of hybrid ultra high performance fiber reinforced concrete with different macro fibers. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4144-4155.

Köksal, F., Altun, F., Yiğit, İ. ve Şahin, Y. (2008). Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes. *Construction and building materials*, 22(8), 1874-1880.

Köksal, F., Şahin, Y., Gencel, O., ve Yiğit, İ. (2013). Fracture energy-based optimisation of steel fibre reinforced concretes. *Engineering Fracture Mechanics*, 107, 29-37.

Kuder, K. G. ve Shah, S. P. (2010). Processing of high-performance fiber-reinforced cement-based composites, *Construction and Building Materials*, 24 (2) 181–186.

Kurtoglu, A. E., Alzeebaree, R., Aljumaili, O., Nis, A., Gulsan, M. E., Humur, G. ve Cevik, A. (2018). Mechanical and durability properties of fly ash and slag based geopolymer concrete. *Advances in concrete construction*, 6(4), 345.

Kumar, B., Sinha, S., ve Chakravarty, H. (2019). Study of Effect of Nano-Silica on Strength and Durability Characteristics of High Volume Fly Ash Concrete for Pavement Construction. *Civil Engineering Journal*, 5(6), 1341-1352.

Larissa, C. D. A., dos Anjos, M. A., de Sá, M. V., de Souza, N. S. ve de Farias, E. C. (2020). Effect of high temperatures on self-compacting concrete with high levels of sugarcane bagasse ash and metakaolin. *Construction and Building Materials*, 248, 118715.

Larsen, I. L. Ve Thorstensen, R. T. (2020). The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 256.

Lau, A. ve Anson, M., (2006). Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete, Cem Concr Res, 36(9) 1698–1707.

Lawler, J. S., Zampini, D. ve Shah, S. P. (2002). Permeability of cracked hybrid fiber-reinforced mortar under load. *Materials Journal*, 99(4), 379-385.

Lee, S. T., Hooton, R. D., Jung, H. S., Park, D. H. ve Choi, C. S. (2008). Effect of limestone filler on the deterioration of mortars and pastes exposed to sulfate solutions at ambient temperature. *Cement and concrete research*, 38(1), 68-76.

Lee, Y. J., Kim, H. G., Kim, M. J., Kim, D. H., Kim, D. S. Ve Kim, K. H. (2020). Bond performance of reinforced concrete beams with electric arc furnace slag aggregates. *Construction and Building Materials*, 244.

Lee, Y. J., Kim, H. G., Park, J. H., Lee, K. S. ve Kim, K. H. (2020). Flexural behaviour prediction for RC beams in consideration of compressive stress distribution of concrete with electric arc furnace oxidising slag aggregates. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24(5), 689-708.

Leung, H. Y., Kim, J., Nadeem, A., Jaganathan, J. ve Anwar, M. P. (2016). Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume. *Construction and Building Materials*, 113, 369-375.

Liu, F., Ding, W. ve Qiao, Y. (2019). An experimental investigation on the integral waterproofing capacity of polypropylene fiber concrete with fly ash and slag powder. *Construction and Building Materials*, 212, 675-686.

Liu, J., Jia, Y. ve Wang, J. (2019). Calculation of chloride ion diffusion in glass and polypropylene fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 215, 875-885.

Ma, Z., Liu, M., Duan, Z., Liang, C. ve Wu, H. (2020). Effects of active waste powder obtained from C&D waste on the microproperties and water permeability of concrete. *Journal of Cleaner Production*, 257.

Madhkhan, M., Azizkhani, R. ve Harchegani, M. T. (2012). Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements. *Construction and Building materials*, 26(1), 102-112.

Madhkhan, M., Katirai, R., (2019). Effect of pozzolanic materials on mechanical properties and aging of glass fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 225, 146-158. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.128.

Marchand, J., Samson, E., Maltais,Y. ve Beaudoin, J. J. (2002). Theoretical analysis of the effect of weak sodium sulfate solutions on the durability of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 24(3-4), 317-329..

Marcos-Meson, V., Fischer, G., Edvardsen, C., Skovhus, T. L. ve Michel, A. (2019). Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) exposed to acid attack–A literature review. *Construction and Building Materials*, 200, 490-501.

Martinie, L., Rossi, P. ve Roussel, N. (2010). Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction. Cement and concrete research, 40(2), 226-234.

Mazaheripour, H., Ghanbarpour, S., Mirmoradi, S. H. ve Hosseinpour, I. (2011). The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. Construction and Building Materials, 25(1), 351-358.

Mehdipour, I., Vahdani, M., Libre, N. A. ve Shekarchi, M. (2013). Relationship between workability and mechanical properties of fibre-reinforced self-consolidating mortar. Magazine of concrete research, 65(17), 1011-1022.

Mendes, S. E., Oliveira, R. L., Cremonez, C., Pereira, E., Pereira, E. ve Medeiros-Junior, R. A. (2020). Mixture Design of Concrete Using Ultrasonic Pulse Velocity. *International Journal of Civil Engineering*, 18(1), 113-122.

Miao, C., Mu, R., Tian, Q. ve Sun, W. (2002). Effect of sulfate solution on the frost resistance of concrete with and without steel fiber reinforcement. *Cement and Concrete Research*, 32(1), 31-34.

Mo, K. H., Yap, K. K. Q., Alengaram, U. J. ve Jumaat, M. Z. (2014). The effect of steel fibres on the enhancement of flexural and compressive toughness and fracture characteristics of oil palm shell concrete. *Construction and Building Materials*, 55, 20-28.

Mohammedameen, A., Gülşan, M. E., Alzeebaree, R., Çevik, A. ve Niş, A. (2019). Mechanical and durability performance of FRP confined and unconfined strain hardening cementitious composites exposed to sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 207, 158-173.

Monteny, J., Vincke, E., Beeldens, A., De Belie, N., Taerwe, L., Van Gemert, D. ve Verstraete, W. (2000). Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cement and Concrete Research*, 30(4), 623-634.

Monteny, J., De Belie, N., Vincke, E., Verstraete, W. ve Taerwe, L. (2001). Chemical and microbiological tests to simulate sulfuric acid corrosion of polymer-modified concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(9), 1359-1365.

Myers, R. H., Montgomery, D. C. ve Anderson-Cook, C. M. (2016). Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. *John Wiley & Sons*.

Murthi, P., Poongodi, K., Awoyera, P. O., Gobinath, R., Raja, K. T. Ve Olalusi, O. B. (2020). Fresh properties of self-compacting concrete incorporating electric arc furnace oxidizing slag (EAFOS) as coarse aggregate. *SN Applied Sciences*, 2(4), 1-8.

Najjar, M. F., Nehdi, M. L., Soliman, A. M. ve Azabi, T. M. (2017). Damage mechanisms of two-stage concrete exposed to chemical and physical sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 137, 141-152.

Nematzadeh, M. ve Fallah-Valukolaee, S. (2017). Erosion resistance of high-strength concrete containing forta-ferro fibers against sulfuric acid attack with an optimum design. *Construction and Building Materials*, 154, 675-686.

Nepomuceno, M. ve Bernardo, L. F. (2019). Evaluation of Self-Compacting Concrete Strength with Non-Destructive Tests for Concrete Structures. *Applied Sciences*, 9(23), 5109.

Nie, Q., Zhou, C., Shu, X., He, Q. ve Huang, B. (2014). Chemical, mechanical, and durability properties of concrete with local mineral admixtures under sulfate environment in Northwest China. *Materials*, 7(5), 3772-3785.

Niu, D. ve Wang, Y. (2013). Neutralization of steel fiber reinforced concrete under multiple influential factors. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 7(03), 1350015.

Novák, J., Kohoutková, A. (2017). Fire response of hybrid fiber reinforced concrete to high temperature, Procedia Engineering, 172, 784-790.

Özdemir, A. (2002). Bazı yapı malzemelerin kapiler su emme potansiyelleri. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 26(1), 19-32.

Öztürk, M., Akgol, O., Sevim, U. K., Karaaslan, M., Demirci, M. Ve Unal, E. (2018). Experimental work on mechanical, electromagnetic and microwave shielding effectiveness properties of mortar containing electric arc furnace slag. *Construction and Building Materials*, 165, 58-63.

Pacheco, F., Christ, R., Quinino, U. Ve Tutikian, B. F. (2018). Effects of fiber hybridization in advanced cementitious composites durability in humid and aggressive environments. *Matéria*, 23(3).

Pakravan, H. R., Latifi, M. ve Jamshidi, M. (2017). Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review, *Construction and Building Materials*, 142, 280-294. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.059.

Pakravan, H. R., Latifi, M. ve Jamshidi, M. (2017). Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review. *Construction and building materials*, 142, 280-294.

Palankar, N., Shankar, A. R. ve Mithun, B. M. (2016). Durability studies on eco-friendly concrete mixes incorporating steel slag as coarse aggregates. *Journal of cleaner production*, 129, 437-448..

Parampalli, A., Eskridge, K., Smith, L., Meagher, M., Mowry, M. ve Subramanian, A., (2007). Development of serum-free media in CHO-DG44 cells using a central composite statistical design. *Cytothecnology*,54,57-68.

Park, S. H., Kim, D. J., Ryu, G. S. ve Koh, K. T. (2012). Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 34(2), 172-184.

Portland Cement Association, (2004). Frost durability of roller compacted concrete pavements. 135-150.

Pourbaba, M., Asefi, E., Sadaghian, H. ve Mirmiran, A. (2018). Effect of age on the compressive strength of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 175, 402-410.

Prakash, R., Thenmozhi, R. ve Raman, S. N. (2019). Mechanical characterisation and flexural performance of eco-friendly concrete produced with fly ash as cement replacement and coconut shell coarse aggregate. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, 18(2), 131-148.

Prakash, R., Thenmozhi, R., Raman, S. N. ve Subramanian, C. (2020). Fibre reinforced concrete containing waste coconut shell aggregate, fly ash and polypropylene fibre. *Revista Facultad de Ingenieria Universidad de Antioquia*, (94).

Rais, M. S., Shariq, M., A., Masood, A. ve Umar, M. Alam, M. (2019). An experimental and analytical investigation into age-dependent strength of fly ash mortar at elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 222 (2019) 300-311. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.167.

Ranjith, S., Venkatasubramani, R. Ve Sreevidya, V. (2017). Comparative study on durability properties of engineered cementitious composites with polypropylene fiber and glass fiber. *Archives of Civil Engineering*, 63(4), 83-101.

Rashad, A. M., Bai, Y. P., Basheer, A. M., Milestone, N. B., Collier, N. (2013). Hydration and properties of sodium sulfate activated slag, *Cement and Concrete Composites*, 3(7), 20-29. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.12.010.

Rashad, A. M., Seleem, H. E. D. H., Shaheen, A. F. (2014). Effect of silica fume and slag on compressive strength and abrasion resistance of HVFA concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8(1), 69-81. https://doi.org/10.1007/s40069-013-0051-2.

Rawlings, J. O., Pantula, S. G., ve Dickey, D. A. (2001). Applied regression analysis: a research tool. *Springer Science & Business Media*.

Roque, A. J., Rodrigues, G. M.ve da Silva, P. F, 2020. Re‐cycling of construction and demolition waste and steel slag: characterization of the durability. *Journal of Material Cycles and Waste Management.*

Sabet, F. A., Libre, N. A. ve Shekarchi, M. (2013). Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash. *Construction and Building Materials*, 44, 175-184.

Sahani, A. K., Samanta, A. K. ve Singharoy, D. K. (2019). Mechanical behaviour of fire-exposed fibre-reinforced sustainable concrete, *Journal of Structural Fire Engineering*, 10(4), 482-503. https://doi.org/10.1108/JSFE-11-2018-0035.

Salim, S. (2020). Fracture and Permeability Properties of Artificial Fly Ash and Slag aggregate Concretes at Different Water-to-Cement Ratios. *Journal of Material Science and Technology Research*, 7, 11-29.

Salman, M., Frayyeh, Q. Ve Zghair, L. (2018). Performance of self-compacting concrete containing hybrid fibers in aggressive environment. *In MATEC Web of Conferences*, 162, 2009, EDP Sciences.

Santamaría, A., Ortega-López, V., Skaf, M., Chica, J. A.ve Manso, J. M. (2020). The study of properties and behavior of self compacting concrete containing Electric Arc Furnace Slag (EAFS) as aggregate. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(1), 231-243.

Schmidt, T., Lothenbach, B., Romer, M., Neuenschwander, J. ve Scrivener, K. (2009). Physical and microstructural aspects of sulfate attack on ordinary and limestone blended Portland cements. *Cement and Concrete Research*, 39(12), 1111-1121.

Senff, L., Labrincha, J. A., Ferreira, V. M., Hotza, D. ve Repette, W. L. (2009). Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2487-2491.

Shehab, H. K., Eisa, A. S. ve Wahba, A. M. (2016). Mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete with full and partial cement replacement. *Construction and building materials*, 126, 560-565.

Singh, N. K. ve Rai, B. (2018). A review of fiber synergy in hybrid fiber reinforced concrete. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 8(2), 41-50.

Singh, N. K., ve Rai, B. (Baskıda). Assessment of synergetic effect on microscopic and mechanical properties of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete. *Structural Concrete*.

Sohail, M. G., Alnahhal, W., Taha, A. ve Abdelaal, K. (2020). Sustainable alternative aggregates: Characterization and influence on mechanical behavior of basalt fiber reinforced concrete. Construction and Building Materials, 255.

Soltanzadeh, F., Barros, J. A., ve Santos, R. F. C. (2015). High performance fiber reinforced concrete for the shear reinforcement: experimental and numerical research. *Construction and Building Materials*, 77, 94-109.

Song, P. S., Wu, J. C., Hwang, S. ve Sheu, B. C. (2005). Statistical analysis of impact strength and strength reliability of steel-polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 19(1), 1–9.

Soroka I. (1979). Portland Cement Paste and Concrete, *Macmillan Press*, London, 151-57.

Spanish Development Ministry, (2009). EHE-08 instrucción de hormigón estructural, *Ministerio de Fonmento*, Spain.

Sunil, B. M., Manjunatha, L. S. ve Yaragal, S. C. (2017). Durability studies on concrete with partial replacement of cement and fine aggregates by fly ash and tailing material. *Advances in concrete construction*, 5(6), 671.

Swedish Standards Institute, (2014). Fibre Concrete Design of Fibre Concrete Structures, Sweden, SS 812310.

Şahmaran, M., Yurtseven, A. ve Yaman, I. O. (2005). Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete. *Building and Environment*, 40(12), 1672-1677.

Tamayo, P., Pacheco, J., Thomas, C., de Brito, J. Ve Rico, J. (2020). Mechanical and Durability Properties of Concrete with Coarse Recycled Aggregate Produced with Electric Arc Furnace Slag Concrete. *Applied Sciences*, 10(1), 216.

Tawfiq K., Jamshid A. ve Rodolfo R. (1999). Fatigue cracking of polypropylene fiber reinforced concrete, *Materials Journal*, 96 (2), 226-233.

Truong, G. T., Son, M. K. ve Choi, K. K. (2019). Mechanical performance and durability of latex-modified fiber-reinforced concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 17(2), 79-92.

TS EN 206, (2014). Beton- Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

TS 2824 EN 1338, (2005). Zemin döşemesi için beton kaplama blokları - Gerekli şartlar ve deney metotları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

TS EN 12350-6, (2019). Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 6: Yoğunluk, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

TS EN 14630, (2012). Beton yapılar - Koruma ve tamir için mamul ve sistemler - Deney yöntemleri - Sertleşmiş betonda karbonatlaşma derinliğinin fenolftaleyn yöntemi ile tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

Turhan, E. Y. (2003). Beton. Ankara Syf, 183.

Turk, K. ve Karatas, M. (2011). Abrasion resistance and mechanical properties of self-compacting concrete with different dosages of fly ash/silica fume, 18 (1), 49-60. http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/11206.

Turker, H. T., Ozbay, E., Balcıkanlı, M. (2016). Pullout capacity development of cast in place anchors with embedded studs, *Construction and Building Materials*, 102, 39-43. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.166.

Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., & Yeğinobalı, A. (2003). Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri. *TÇMB*, Ankara.

Ulas, M. A., Alyamac, K. E. ve Ulucan, Z. C. (2019). Influence of Aggregate Gradation on the Workability, Mechanical Properties and Cost of Steel Fiber–Reinforced Concrete. *Advances in Civil Engineering Materials*, 8(3), 209-223.

Vandewalle, L. (2007). Hybrid fibre concrete: is there a synergetic effect?. *In Advances in Construction Materials*, 219-228.

Wang, Q., Sun, W., Guo, L., Gu, C. ve Zong, J. (2018). Modeling chloride diffusion coefficient of steel fiber reinforced concrete under bending load. *Advances in Civil Engineering*, special issue.

Wang, T., Xu, J., Meng, B., & Peng, G. (2020). Experimental study on the effect of carbon nanofiber content on the durability of concrete. *Construction and Building Materials*, 250, 118891.

Wang, Z., Zuo, J., Liu, C., Zhang, Z. ve Han, Y. (2019). Stress–Strain Properties and Gas Permeability Evolution of Hybrid Fiber Engineered Cementitious Composites in the Process of Compression. *Materials*, 12(9), 1382.

Xu, L., Deng, F. ve Chi, Y. (2017). Nano-mechanical behavior of the interfacial transition zone between steel-polypropylene fiber and cement paste, *Construction and Building Materials*, 145, 619-638. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.035.

Xue, G., Yilmaz, E., Song, W. ve Cao, S. (2019). Mechanical, flexural and microstructural properties of cement-tailings matrix composites: Effects of fiber type and dosage, *Composites Part B: Engineering*, 172, 131-142.

Yahyaei, B., Asadollahfardi, G. ve Salehi, A. M. (2020). Workability, mechanical, and durability properties of self-compacting concrete using the treated wastewater. *Structural Concrete*, 1-12.

Yalçın, M., (2009). Çelik lif donatılı betonların performansa dayalı tasarımı ve optimizasyonu. Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Yao, W., Li, J. ve Wu, K. (2003). Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction. *Cement and concrete research*, 33(1), 27-30.

Ye, Y., Liu, J., Zhang, Z., Wang, Z., ve Peng, Q. (Baskıda). Experimental Study of High-Strength Steel Fiber Lightweight Aggregate Concrete on Mechanical Properties and Toughness Index. *Advances in Materials Science and Engineering*.

Yehia, S., Douba, A., Abdullahi, O. ve Farrag, S. (2016). Mechanical and durability evaluation of fiber-reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 121, 120-133.

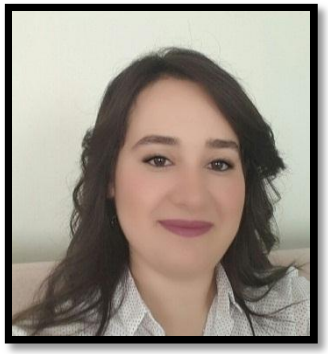
Zakaria, M. ve Cabrera, J. G. (1996). Performance and durability of concrete made with demolition waste and artificial fly ash-clay aggregates. *Waste Management*, 16(1-3), 151-158.

Zhang, M. H. ve Li, H. (2011). Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement. *Construction and Building Materials*, 25(2), 608-616.

Zhao, H., Sun, W., Wu, X. ve Gao, B. (2018). The effect of the material factors on the concrete resistance against carbonation. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(4), 1265-1274.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler



Soyadı, adı : BALÇIKANLI BANKİR, Müzeyyen

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 28.10.1989, Malatya

Medeni hali : Evli

Telefon : 0 (326) 613 56 00- 4152

Faks : 0 (326) 613 56 13

e-mail : muzeyyen.balcikanli@iste.edu.tr

Eğitim

Derece	**Eğitim Birimi**	**Mezuniyet Tarihi**
Doktora	İskenderun Teknik Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2020
Yüksek lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2016
Lisans	Gaziantep Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2012
Lise	Malatya Anadolu Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012-2013	AÇIL MİMARLIK LTD. ŞTİ.	Mühendis
2013-2016	MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ	Araştırma Görevlisi
2016-Halen	İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Projeler

Alkali ile aktive edilmiş çimentosuz cüruflu betonların üretim optimizasyonu ve yapısal davranışlarının belirlenmesi, Tübitak projesi, Bursiyer, 2015-2016, Proje No: 2223787.

Alkali ile aktive edilmiş çimentosuz cüruflu betonların mekanik ve geçirimlilik özellikleri ve üretim optimizasyonu, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel arastırma projesi, Araştırmacı, 18/03/2015 - 4/01/2016, Proje No: 2465485.

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

Bankir, M. B. ve Sevim, U. K. (2020). Performance optimization of hybrid fiber concrete according to mechanical properties. *Construction and Building Materials,* 261, 119952.

Bankir, M. B. ve Sevim, U. K. (2020). Performance optimization of hybrid fiber concretes against acid and sulfate attack. *Journal of Building Engineering*, 101443.

Balçıkanlı Bankir, M., Öztürk M., Sevım U. K. ve Depcı T. (2020).Effect of n-$CaCO_3$ on fresh, hardened properties and acid resistance of granulated blast furnace slag added mortar. *Journal of Building Engineering*, 29, 101209 (Yayın No: 6235079).

Sevim, U. K. Öztürk M., Öntürk S. ve Balçıkanlı Bankir M. (2019). Utilization of boron waste borogypsum in mortar. *Journal of Building Engineering*, 22, 496-503. Doi: 10.1016/j.jobe.2019.01.015 (Yayın No: 4831435)

Öztürk M., Balçıkanlı Bankir M., Bölükbası Ö. S. ve Sevim U. K. (2019). Alkali activation of electric arc furnace slag: Mechanical properties and micro analyzes. *Journal of Building Engineering*, 21(9), 97-105., Doi: 10.1016/j.jobe.2018.10.005 (Yayın No: 4607715).

Öztürk M., Cansız Ö. F., Sevim U. K. ve Balçıkanlı Bankir, M. (2018). MLR ANN approaches for prediction of compressive strength of alkali activated EAFS. *Computers and Concrete*, 21(5), 559-567. Doi: 10.12989/cac.2018.21.5.559 (Yayın No:4351352).

Sevim U. K., Öztürk M., Balçıkanlı Bankir M. ve Aydin U. (2017). Utilization of Colemanite waste in Concrete Design. *Utilization of Colemanite waste in Concrete Design* (Yayın No: 3839774).

Balçıkanlı Bankir M., Türker H. T., Özbay E., Karahan O., Atıs C. D. (2017). Identifying the bond and abrasion behavior of alkali activated concretes by central composite design method. *Construction and Building Materials*, 132, 196-209. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.034 (Yayın No: 4094061)

Türker H. T., Özbay E. ve Balçıkanlı M. (2016). Pullout capacity development of cast in place anchors with embedded studs. *Construction and Building Materials*, 102, 39-43., Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.166 (Yayın No: 2867698).

Balçıkanlı M. ve Özbay E. (2016). Optimum design of alkali activated slag concretes for the low oxygen chloride ion permeability and thermal conductivity. *Composites Part B-Engineering*, (91), 243-256., Doi: 10.1016/j.compositesb.2016.01.047.

Türker H. T., Balçıkanlı M., Durmus I. H., Özbay E. ve Erdemir M. (2016). Microstructural alteration of alkali activated slag mortars depend on exposed high temperature level. *Construction and Building Materials*, 104, 169-180. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.070 (Yayın No: 2867696).

Yıldırım G., Sahmaran M., Balçıkanlı M., Özbay E., Mohamed L. (2015). Influence of cracking and healing on the gas permeability of cementitious composites. *Construction and Building Materials*, (85), 217-226. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.095 (Yayın No: 2147197).

Özbay E., Türker H. T., Balçıkanlı M. ve Mohamed L. (2015). Effect of Fiber Types and Elevated Temperatures onthe Bond Characteristic of Fiber Reinforced Concretes. *International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 9(5), 470-474. (Yayın No: 2162212).

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

Balçıkanlı Bankir, M., Sevim U. K. (2019). Elevated Temperature Effect on Bond Strength of Geopolymer Concretes. *Cilicia International Symposium on Engineering And Technology*, 531-534. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5902292).

Balçıkanlı Bankir, M., Sevim U. K.(2019). Investıgatıon of Fully Environmentally Friendly Waste Aggregated Alkali Activated Mortars. *Cilicia International Symposium on Engineering and Technology*, (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5944766).

Balçıkanlı Bankir M., Öztürk M., Sevim U. K. (2018). Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Farklı Kombinasyonlarının Betonun Mekanik ve Aderans Özelliklerine Olan Etkisinin Arastırılması. *5. Uluslararası Multidisipliner Avrasya Kongresi*, 1, 296- 302, Barselona. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4519411).

Balçıkanlı Bankir M., Öztürk M., Sevim U. K. (2018). Alkalilerle Aktive Edilen Çevre Dostu Elektrik Ark Fırın Cüruflu Harçların Yüksek Sıcaklık Performansının Incelenmesi. *5. Uluslararası Multidisipliner Avrasya Kongresi*, 1, 290-295, Barselona. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:4519497).

Balçıkanlı Bankir, M.,Öztürk M, Sevim U. K. ve Bankir Ş. (2018). Polipropilen ve Elyaf Liflerin Ikili Hibrit Kombinasyonunun Uçucu Kül Katkılı Harçların Taze ve Sertlesmis Haldeki Özelliklerine Etkisi. *5. Uluslararası Multidisipliner Avrasya Kongresi*, Barseolona, 1, 224-231. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4519373).

Öztürk M., Sevim U. K., Balçıkanlı Bankir M. ve Bölükbası Ö. S.(2017). Alkalilerle Aktive Edilmis Elektrik Ark Ocagı Cürufunun Mekanik ve Mikro Yapı Özellikleri. *International Advanced Researches Engineering Congress,* Osmaniye, 1911-1914. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3745945).

Balçıkanlı Bankir M., Öztürk M., Sevim U. K. (2017). Kolemanit ve Borojipsin Alkali Aktivasyonu. *International Advanced Researches Engineering Congress,* Osmaniye, 2012-2016. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3745996).

Öztürk M., Sevim U. K., Balçıkanlı Bankir M. ve Bölükbası Ö. S. (2017). Elektrik Ark Ocagı Cürufunun Dogal Agregaya Alternatif Olarak Kullanılması. *International Advanced Researches Engineering Congress*, Osmaniye, 1907-1910. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3745903).

Öztürk M., Balçıkanlı Bankir M., Sevim U. K., Bölükbası Ö. S. (2017). Elektrik Ark Ocagı Curufu Katkılı Harçların İncelenmesi, *2nd International Mediterranean Science and Engineering Congress,* Adana. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3747962).

Arsoy A., Sevim U. K., Balçıkanlı Bankir M., Öztürk M. Bölükbası Ö. S. (2017). Alkali Aktive Elektrik Ark Fırını Cürufunun BetonÖzelliklerine Etkisi, *2nd International Mediterranean Science and Engineering Congress*, Adana. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3748019).

Balçıkanlı M., Özbay E., Türker H. T., Karahan O., Atıs C. D. (2016). Optimum Design of Alkali Activated Slag Concretes for Low Chloride Ion Permeability and Water Absorption Capacity. *18th International Conference on Concrete Engineering and Technology*, 3(11), 1617, Roma. (Özet Bildiri/)(Yayın No:3214150).

Balçıkanlı M., Özaslan S., Şahin O., Uzal B., Özbay E. (2016). Effect of nano $CaCO_3$ Addition on the Nano Mechanical Properties of Cement Paste. *18th International Conference on Concrete Engineering and Technology*, Roma. 3(11), 1616 (Özet Bildiri/)(Yayın No:3214112).

Balçıkanlı M., Atasever M., Özbay E. (2016). Uçucu Kül Cüruf ve Silis Dumani Malzemelerinin Tekli Ikili ve Üçlü Karişimları ile Çimentosuz Beton Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi, *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress,* 1, 604-609, Adana. Doi: OF-273-199 (Tam Metin Bildiri/)(Yayın No:2867699).

Özbay E., Balçıkanlı M. ve Türker H. T. Durmus I. H., Erdemır, M. (2016). Alkalilerle Aktive Edilmis Cüruflu Harçların Yüksek Sıcaklıga Baglı Olarak Mikro Yapısal Degisimi. *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress,* 1, 610-617, Adana. Doi: OF-273-200 (Tam Metin Bildiri/)(Yayın No:2867701).

Balçıkanlı M., Özbay E., Arslan M., Mohamed L. (2015). Combined Effects of Temperature and Waiting Time on The Rheology of ECC. 17. *Ermco Congress*, İstanbul. (Tam Metin Bildiri/)(Yayın No:2149663).

Özbay E., Türker H. T. ve Balçıkanlı M. (2015). Effect of Fiber Types and Elevated Temperatures on the Bond Characteristic of Fiber Reinforced Concretes. *XVII. International Conference on Civil, Structural and Construction Engineering*, 17(5), 227-232. (Tam Metin Bildiri/)(Yayın No:2148285).

Bölükbası Ö. S., Balçıkanlı M., Özbay E. (2015). Demir çelik fabrikalarında oluşan çamur malzemesinin beton üretiminde kullanılabilirliginin araştırılması. *2nd International Iron and Steel Symposium* (IISS'15)(Yayın No:2148872).

Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

Balçıkanlı M., Özbay E. ve Türker H. T. (2015). Alkalilerle aktive edilmis harçların çekip çıkarma ve asınma dırençlerının belırlenmesı. *Nigde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(2), 87-98. (Kontrol No: 2150174)

Öztürk M., Sevim U. K., Balçıkanlı Bankir, M.,Bölükbası Ö. S. (2019). Investigation of mechanical and microstructural performance of alkali activated electrical arc furnace slag mortars. *Internatıonal Advanced Researches and Engıneerıng Journal*, 3(1), 55-59. (Yayın No: 5066094).

Hobiler

Bağlama çalmak, Seyahat etmek, Ailemle vakit geçirmek

DİZİN

A

Asit· 2, 7, 14, 18, 20
Agrega · 2, 4, 7, 16, 25, 51, 140
Aderans· 7, 36, 39, 47, 79 , 133
ANOVA· 7, 50, 55, 68 ,77, 80

B

Beton · 1, 3, 17, 29, 103, 142
Basınç · 1, 8, 64, 130
Bağlayıcı · 1, 7, 9, 31, 96, 133
Bağımlı değişken· 6, 31, 52, 103
Bağımsız değişken· 7, 32, 58,113

C

Cam elyaf · 2, 6, 13, 22, 24, 144
Coulomb· 45

Ç

Çatlak ·1, 10, 23, 75, 130
Çekip çıkarma· 7, 76, 105
Çekme · 1, 8, 13, 71, 72, 134
Çelik lif· 2, 6, 10, 12, 20, 22, 145
Çimento· 3, 17, 27, 56, 112
Çökme·7, 35, 52, 53, 141

D

Donatı · 1, 7, 23, 41, 76, 133
Design expert · 28, 31, 134
Deplasman·7, 36, 57, 146
Durabilite·2 ,16, 46, 139
Dayanıklılık·2 ,5, 17, 91
Dozaj·7, 32, 34, 65, 96

E

Enerji · 2, 5, 67, 144
Elektrrik ark fırın cürufu · 3, 24
Eğilme · 10, 38, 67, 134
Eşik değer · 69, 137, 143
Erişilebilme· 31
Etki ağırlığı·55, 69, 84, 143

F

Fiziksel · 6,14, 45, 135

G

Geçirimlilik · 5, 17, 81, 83, 134
Gerilme · 2, 8, 75
Genleşme ·1, 8, 109, 117

H

Hibrit · 3, 11 ,15 ,50 ,133
Hata · 30, 83, 108
Hacimce ·10 , 16, 140
HLB · 22, 53, 98, 143
Hz · 44, 82, 87, 131

İ

İşlenebilirlik · 9, 10, 86
İkame · 16, 18, 89, 121
İstatistiksel · 7, 30, 55

K

Kompozit · 6, 28, 29, 141
Klor · 7, 42, 89, 136
Kimyasal · 1, 27, 79
Kuadratik · 50, 63, 86, 96, 143
Korelasyon · 52, 83, 86
Karbonatlaşma · 7, 46, 49, 105

L

Lif · 2, 22, 23, 24
Lineer · 50, 55

M

Merkezi kompozit · 6, 28, 140
Mukavemet · 8, 23, 141
Mekanik ·5, 10, 36, 57
Maksimum · 10, 20, 29
Minimum · 29, 13, 136

N

Narinlik · 9, 10 ,24, 142

O

Optimizasyon · 29, 30, 133
Optimum · 7 ,30, 135

Ö

Önemli · 52, 72, 80, 96

P

Polipropilen · 3, 6, 23, 145
Performans · 1, 15, 32, 141
Pull out · 57, 60, 76

R

Regresyon · 7, 30, 50, 55
Rezonans · 7, 43, 136

S

Su emme · 7, 26, 45
Sentetik · 2, 23
Sülfat · 18, 45, 115
Sıcaklık · 44, 48, 129

Ş

Şekil · 4, 22, 72, 113

T

Tepki yüzeyi · 10, 29, 140
Tasarım 6, 28, 31

U

Uçucu kül · 5, 26
Ultrasonik · 43, 83, 1336

V

Varyans · 50, 143

Y

Yer değiştirme· 6, 32, 101
Yük· 2, 38, 76



TEKNOVERSİTE

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

teknoversite AYRICALIĞINDASINIZ

İSTE