



**SİFCON İLE ÜRETİLEN YOL BETONLARININ
EĞİLME VE BASINÇ DAYANIMININ
TAGUCHİ METODU İLE OPTİMİZASYONU**

Muhammed Ziya BİNGÖL

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Ulaştırma Bilim Dalı
Yrd. Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK
2017
Her Hakkı Saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SİFCON İLE ÜRETİLEN YOL BETONLARININ EĞİLME VE
BASINÇ DAYANIMININ TAGUCHİ METODU İLE
OPTİMİZASYONU**

Muhammed Ziya BİNGÖL

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI
Ulaştırma Bilim Dalı**

**ERZURUM
2017**

Her Hakkı Saklıdır



**T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TEZ ONAY FORMU

**SİFCON İLE ÜRETİLEN YOL BETONLARININ EĞİLME VE BASINÇ
DAYANIMININ TAGUCHİ METODU İLE OPTİMİZASYONU**

Yrd. Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK'ın danışmanlığında Muhammed Ziya BİNGÖL tarafından hazırlanan bu çalışma çalışma .10.../..07../..2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı – Ulaştırma Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Perviz Ahmedzade

İmza :

Üye : Prof. Dr. Mahir Gökdağ

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. O. Ünsal Bayrak

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 20.../..07../..2017. tarih ve .29. ./ . 37. nolu kararı
ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SIFCON İLE ÜRETİLEN YOL BETONLARININ EĞİLME VE BASINÇ DAYANIMININ TAGUCHİ METODU İLE OPTİMİZASYONU

Muhammed Ziya BİNGÖL

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Ulaştırma Bilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK

SIFCON (Çimento Bulamacı Emdirilmiş Lifli Beton) çimento, su, süper akışkanlaştırıcı, silis dumanı ve çok ince kumdan oluşan bir bulamacın sertleşmesiyle oluşan bir matris içinde hacimce yüksek oranlarda (%5–20) çelik tel ile takviye edilmiş kompozittir. Yüksek dayanımlı betonlardan en önemli farkı kırılma sırasında sünek davranış göstermesidir. Yüksek dayanımlı betonlarda dayanım arttıkça malzeme gevrekliği artarken SIFCON, gösterdiği düşük geçirimsizlik, yüksek durabilite, dayanım ve süneklik özellikleri ve yüksek oranda çelik tel içeriği ile sünek davranış göstermektedir. Çelik lifli betonlarda lif içeriği %2- %3 aralığında olmasına karşın SIFCON'da yaklaşık 10 kat fazla lif kullanılabilmekte ve yüksek süneklik elde edilmektedir. Bu özel beton türü patlamaya karşı dayanıklı askeri yapılarda, endüstriyel zeminlerde, hava alanlarında ve köprü ayaklarında kullanılması önerilir.

Bu çalışmada, SIFCON ile üretilen betonların rijit üst yapılarda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, çelik liflerin narinliği, lif oranı, su / bağlayıcı oranı ve silis dumanı parametre olarak alınarak bunların basınç ve eğilme mukavemetleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada 40, 55, 65, 80 narinlik ve %3, 6, 9, 12 oranlarında çelik lif, 0,30, 0,35, 0,40, 0,45 oranlarında su/bağlayıcı ve %0, 5, 10, 15 oranlarında silis dumanı karışım değişkenleri olarak belirlenmiştir. Deney tasarımı Taguchi Metodu kullanılarak yapılmış olup 28 günlük basınç ve eğilme mukavemetlerini veren karışım değişkenleri ve seviyeleri belirlenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda SIFCON ile üretilen betonların basınç ve eğilme mukavemetleri üzerindeki en önemli parametrenin lifin narinliği olduğu belirlenmiştir. Mineral katkı malzemesi olan silis dumanının basınç ve eğilme mukavemetleri üzerindeki olumlu etkileri deneysel olarak gözlemlenmiştir. Beton yollarda karşılaşılan en büyük sorunun eğilme dayanımı olması nedeni ile SIFCON ile kullanılan betonların rijit üst yapılarda kullanılabilirliği belirlenmiştir.

2017, 56 sayfa

Anahtar Kelimeler: SIFCON, yol betonu, çelik lif, Taguchi Metodu

ABSTRACT

Master Thesis

OPTIMISATION OF COMPRESSIVE AND FLEXURAL STRENGTH OF CONCRETE PAVEMENTS PRODUCED WITH SIFCON

Muhammed Ziya BİNGÖL

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Department of Transportation

Supervisor: Assist. Yrd. Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK

SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Reinforced Concrete) is a composite which occurs during the hardening of the matrix phase, consists of cement, water, silica fume, fine sand and water reducing plasticizer, and reinforced with high volume steel fiber (5–20%). The main difference from the high strength concrete (HSC) is the ductile behavior at failure. However the brittleness increases with the strength increase in HSC, SIFCON has a ductile behavior because of the high volume fiber content, low permeability, high durability. Despite fiber content is 2-3% in fiber reinforced concrete, fiber content may be ten times more in SIFCON and ductility is gained. This concrete is suggested to be used in military buildings against explosion, industrial grounds, airports and bridge feet. In this study, usage of SIFCON as a rigid road pavement is investigated. For this reason slenderness of the fibers, fiber ratio, w/c ratio and silica fume ratio are chosen as parameters and effects of the parameters on the compressive and flexural strength are investigated. Slenderness of fibers were 40, 55, 65, 80, fiber ratios were 3%, 6%, 9%, 12%, w/c ratios were 0,30, 0,35, 0,40, 0,45 and silica fume ratios were 0%, 5%, 10%, 15% during this study. Experimental design is made by Taguchi Method and mix variables and levels are determined which gave the compressive and flexural strength values for 28 days.

As a result of the study it is determined that fiber slenderness is the most important parameter on the compressive and flexural strength of SIFCON. Positive effect of silica fume, which is a mineral additive, on compressive and flexural strength is observed experimentally. The main problem on concrete roads is flexural strength so as a result of this study it is concluded that SIFCON may be used as a rigid road pavement because of its high flexural strength.

2017, 56 pages

Keywords: SIFCON, road concrete, steel fiber, Taguchi Method

TEŞEKKÜR

T.C. Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi ve Mekaniği Laboratuvarında; yapılan bu tez çalışmasında, danışmanlığımı yürüten, her zaman ilgi ve desteğini gördüğüm Sayın Yrd. Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK' a, çalışma süresince her türlü desteği sağlayan Sayın Doç. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL 'e çalışmalarında kullanılmak üzere malzemeleri temin eden; Kemerli Metal Sanayii ve Ticaret A.Ş, ve Aşkale Çimento Sanayi T.A.Ş.' ye, ayrıca Sayın Yrd. Doç. Dr. Halim Ferit BAYATA' ya teşekkür ederim.

Ayrıca bana her türlü desteği veren; çalışmam boyunca gösterdikleri sabır ve desteklerinden dolayı aileme ve değerli dostum Nurullah SOYLU' ya teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

M. Ziya BİNGÖL

Haziran, 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Beton Yollar	2
1.2. Beton Yollarda Çelik Donatı Kullanımı.....	3
1.3. Beton Kaplamalarda Oluşan Gerilmeler	4
1.4. Beton	8
2. KAYNAK ÖZETLERİ	12
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	22
3.1. Materyal.....	22
3.1.1. Çimento	22
3.1.2. Karışım suyu.....	23
3.1.3. Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi	24
3.1.4. Silis dumanı.....	24
3.1.5. Betonda kullanılan çelik lifler	25
3.1.6. Agregas	26
3.1.7. Diğer malzemeler	28
3.1.7.a. Deneylerde kullanılan aletler.....	28
3.2. Yöntem	31
3.2.1. Agregas deneylerinde uygulanan yöntemler.....	31
3.2.2. SIFCON karışım hesapları	32
3.2.3. SIFCON üretiminde izlenen sıra	34
3.2.4. Basınç ve eğilme dayanımı tayini yöntemi	35
3.2.5. Taguchi metodu.....	36
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	40

4.1. Basınç Dayanımı Deneyi Bulguları.....	40
4.2. Basınç Mukavemeti Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	42
4.3. Eğilme Dayanımı Deneyi Bulguları	46
4.4. Eğilme Mukavemeti Deneyi Bulguları.....	48
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	52
KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ	57



SİMGELER DİZİNİ

b,d	Numunenin en kesiti
DF_{MSe}	Hata kareler ortalamasının serbestlik derecesi toplamı
e_i	i. deneydeki rastsal hata
F	Eğilme dayanımı
F	F tablosu değeri
L	Mesnetler arası açıklık
m	Ortalama tahmininde kullanılan parametrelerin serbestlik derecesi
n	Bir deney kombinasyonunda yapılan tekrar sayısı
n	Yapılan doğrulama deneylerinin tekrar sayısı
P	En büyük yük
S/N	Performans istatistiği
X_i	Deneydeki parametre-seviye kombinasyonunun sabit etkisi
Y_i	i. Deneyin performans istatistiği
α	Hata seviyesi
μ	Performans değerinin genel ortalaması

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Üstyapı kaplamaları yükü nasıl iletir	1
Şekil 1.2. Beton yol kesiti ve yapı elemanları	3
Şekil 1.3. Kaplamaya etki eden yüklerin konumları.....	5
Şekil 1.4. Yükleme noktalarına göre beton plakta oluşan gerilmeler	6
Şekil 2.1. Asfalt ve beton yollardaki durma mesafesi mukayesesi.....	13
Şekil 2.2. Kaplamalarda gece görüş rahatlığı	13
Şekil 2.3. SIFCON ceket ile güçlendirme.....	20
Şekil 2.4. Güçlendirilmiş kirişlerin tipik yük – sehim eğrisi	20
Şekil 3.1. Deneyde kullanılan çelik lifler	26
Şekil 3.2. Granülometri eğrisi	27
Şekil 3.3. Betonyer.....	29
Şekil 3.4. Kalıplar	29
Şekil 3.5. Pres	30
Şekil 3.6. Su kürü havuz	30
Şekil 3.7. Çelik liflerin önceden kalıba yerleştirilmesi.....	35
Şekil 3.8. Kalıba yerleştirilmiş çelik lifler	35
Şekil 4.1. Lif oranı performans istatistikleri	42
Şekil 4.2. Su/bağlayıcı oranı performans istatistikleri	43
Şekil 4.3. Narinlik performans istatistikleri.....	44
Şekil 4.4. Küp numune için hazırlanmış %12 lif oranında ve 80 narinlikteki çelik lifler.....	44
Şekil 4.5. Silis dumanı oranı performans istatistikleri	45
Şekil 4.5. Narinlik istatistikleri	48
Şekil 4.6. Lif oranı istatistikleri	49
Şekil 4.7. Su/bağlayıcı oranı istatistikleri	50
Şekil 4.8. Silis dumanı oranı istatistikleri	50

ÇİZELGELER DİZİNİ

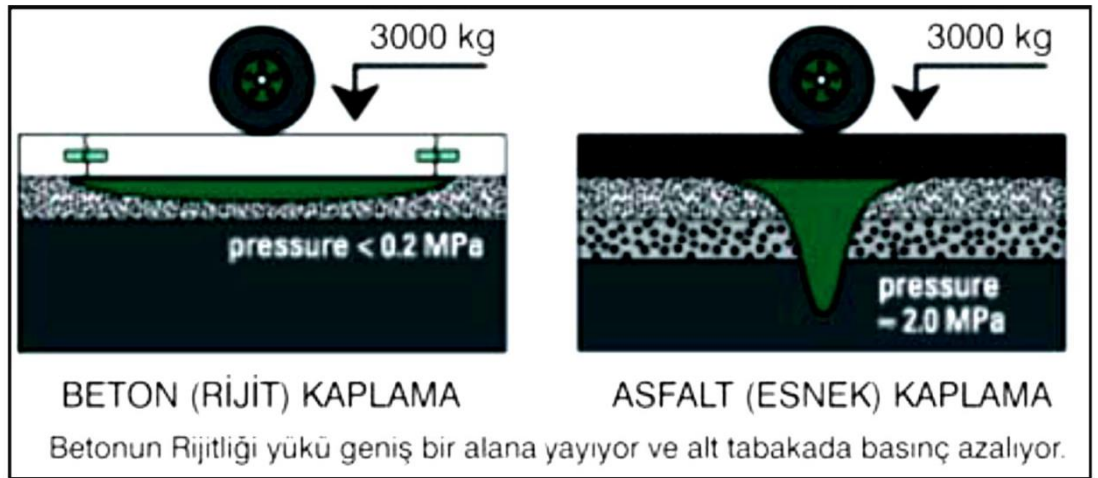
Çizelge 1.1. Yapı betonlarının bazı özelliklerine ait tipik değerler	9
Çizelge 3.1. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri	22
Çizelge 3.2. Çimentonun kimyasal özellikleri	23
Çizelge 3.3. Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesine ait özellikler.....	24
Çizelge 3.4. Silis dumanının kimyasal bileşimi ve elek analizi.....	25
Çizelge 3.5. Çelik lifin teknik özellikleri.....	26
Çizelge 3.6. Karışım oranlarını gösteren tablo	33
Çizelge 3.7. SIFCON için malzeme miktarları	33
Çizelge 3.8. L16 ortagonal dizisi	39
Çizelge 3.9. Parametre ve seviyeler	39
Çizelge 4.1. Taze beton basınç deneyi sonuçları	40
Çizelge 4.2. S/N etkileri çizelgesi.....	41
Çizelge 4.3. Performans tahminleri çizelgesi	41
Çizelge 4.4. Taze beton deney sonuçları	46
Çizelge 4.5. Ortalama S/N etkileri	47
Çizelge 4.6. Performans tahminleri	47

1. GİRİŞ

Yol üstyapısı projelendirilirken proje süresi boyunca, üzerinden geçecek trafiği, büyük deformasyon ve çatlamalara maruz kalmadan güvenli bir şekilde taşıyabilecek üstyapının toplam kalınlığının ve tabakaların tek tek kalınlıklarının hesaplanması, kullanılacak malzemelerin saptanması hedeflenmektedir. Genel olarak yol üstyapılarında esnek ve rijit üstyapı tipleri kullanılmaktadır (Umar ve Ağar 1991).

Esnek üstyapılar aşınma, binder, temel ve alt temel tabakalarından oluşmakta olup temel ve alt temel genellikle granüler malzeme ile yapılmaktadır. Rijit üst yapılar ise taban zemini üzerine tek veya iki tabaka halinde dökülen beton plaktan oluşur.

Rijit olan beton kaplama, elastik bir zemine oturan kiriş gibi çalışır ve üzerine gelen yükleri çok daha geniş bir alana yayarak taban zeminine iletir. Beton yolun taşıma gücü taban zeminine bağlı olmadığı için rijit üstyapı olan beton kaplama zayıf taban zeminleri üstünde esnek üstyapılara göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Dayanma bakımından her türlü etkiye karşı koyacak şekilde hazırlanabilir. Asfalt kaplamalar ise üzerlerine gelen yükleri bir alt tabakaya yayarak iletirler (Şekil 1.1) (Arslan vd 2007).

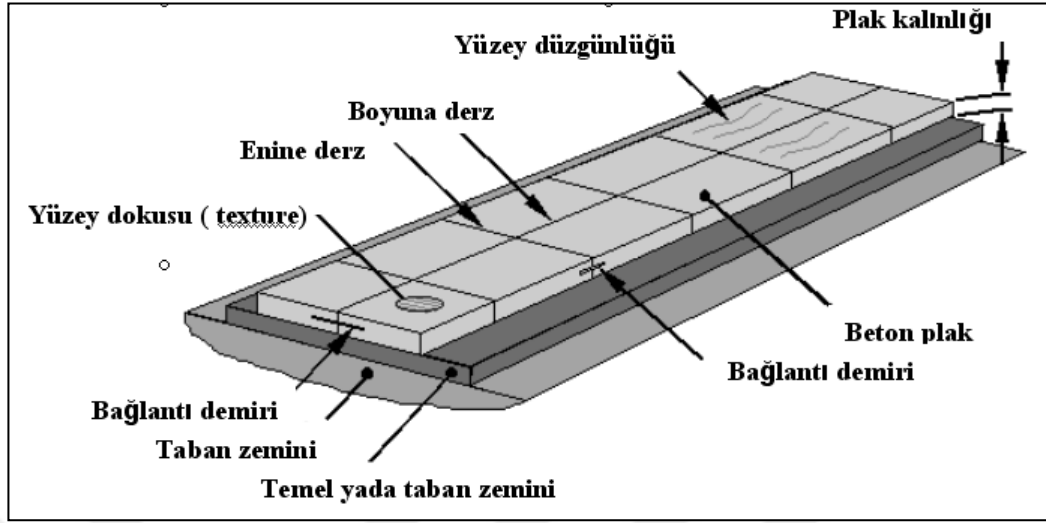


Şekil 1.1. Üstyapı kaplamaları yükü nasıl iletir (Arslan 2007)

Yol kaplaması olarak betonun görevi, trafikten gelen şiddetli tekil yükleri tabana iletmek ve bu sırada tabanın deforme olmamasını sağlamaktır. Bu durum, betonun rijitliğinden yararlanmak sonucunu doğurur. Beton, çekme direnci düşük bir yapı malzemesidir. Betonda deformasyonlarla gerilmeler arasındaki bağıntılar lineer değildir. Bir tekerlek yükü, beton plak üzerinden geçerken, çekme, basınç ve eğilme gerilmeleri oluşur. Tekerlek geçtikten sonra gerilmeler yön değiştirerek kaybolur. Özellikle yoğun kamyon trafiği taşıyan bir yolda bu gerilme değişimleri kısa zaman aralıkları ile sürekli olarak kendini gösterir. Bu durumda, beton plakta çekme ve basınç arasında sürekli değişen gerilmeler oluşur. Bu da zamanla malzemenin yorulmasına neden olur. Dolayısıyla bu tip gerilmelerin, betonun direncinin sürekli çok altında olması gerekir (Umar ve Ağar 1991; Ağar vd 1998).

1.1. Beton Yollar

Beton yollar Portland çimentosundan yapılmış olup tabakalı beton plak vasıtasıyla yükleri taban zeminine dağıtan üst yapı tipidir. Rijit üstyapıların eğilme direnci yüksek olup taban zemini üzerine yapılan beton plakalardan oluşmaktadırlar. Sürekli donatının kullanılmadığı beton yollarda enine ve boyuna genleşme derzleri konulur (Şekil 1.2). Beton kaplama ile taban zemini arasında yapılan kaplama alt tabakasının görevi ise don, pompaj, şişme-büzülme olaylarına karşı kaplamayı korumaktır. Elastisite modülü taban zemininkine göre çok büyük olan beton kaplama elastik zemine oturan bir kiriş şeklinde çalışır. Üzerine gelen yükleri çok daha geniş bir alana yayarak taban zeminine iletir. Taban zemininin farklı sebeplerden çökmesi durumunda temas halinde iken taşıyıcı eleman vazifesi gören rijit plak, taban zemininin deformasyonuna uymaz. Temas halinde olmayan rijit beton plak, bu kısımlarda kiriş gibi çalışmaya başlar. Betonun düşük olan çekme basıncının aşılması sonucunda kaplama kırılır. Beton yollar bir veya iki tabaka halinde dökülürler. Yol kaplaması olarak betonun görevi, trafikten gelen şiddetli tekil yükleri tabana iletmek ve bu sırada tabanın deforme olmamasını sağlamaktır. Beton, çekme direnci düşük, deformasyonlar ile gerilmeler arasında bağlantıları doğrusal olmayan bir malzemedir (Ağar vd 1998).



Şekil 1.2. Beton yol kesiti ve yapı elemanları

Beton yol teknolojisinde yaşanan hazır beton, kayar kalıp, geçirimli beton, lifli beton, ön gerilmeli beton, sürekli betonarme gibi yenilikler ve hızlı gelişmelerle beton kaplama, günümüzün modern yolları için asfalt kaplamalara karşı önemli bir alternatif haline gelmiştir.

1.2. Beton Yollarda Çelik Donatı Kullanımı

Beton yollarda çelik donatı tek tel çubuklar veya hasır şeklinde uygulanmaktadır. Hasır açıklıkları kare veya dikdörtgen olmakla birlikte hasırlar beton plağın tam boyutlarında veya şeritler halinde serilirler.

Çelik donatıların başlıca görevi oluşan çatlakların büyümesini engellemek ve çatlayarak birkaç parça haline gelen plakları bir arada tutmaktır. Ayrıca donatı rötreyi plağın bütün uzunluğuna yayarak derzlere gelen gerilmeyi düşürür, daha az genişleme hacmine ihtiyaç olur.

Donatısız plaklarda kırılma ve geniş çatlaklar gözlemlenirken donatılı plaklarda kılcal ve normal çatlaklar gözlemlenmiştir.

Gerilmeler plakların köşe noktalarında daha fazla olduğu için köşeler kuvvetlendirilmelidir. Ayrıca plağın üst kısmında rötre gerilmelerinin maksimuma ulaşması ve yüzeyde oluşan çatlakların durdurulması için hasır donatı plak yüzeyine yakın serilmelidir (Umar vd 1991)

1.3. Beton Kaplamalarda Oluşan Gerilmeler

Genellikle beton kaplamalar geniş ve ince plaklardan imal edilirler. Beton kaplamaların tasarımları betonun mekanik karakteristiklerine (basınç, eğilmede çekme, yorulma vb. mukavemetlerine) göre tasarlanır. Çevre ve trafik etkilerinden oluşan gerilmelere geniş ve ince plaklarla karşı koyarlar. Bu gerilmeler;

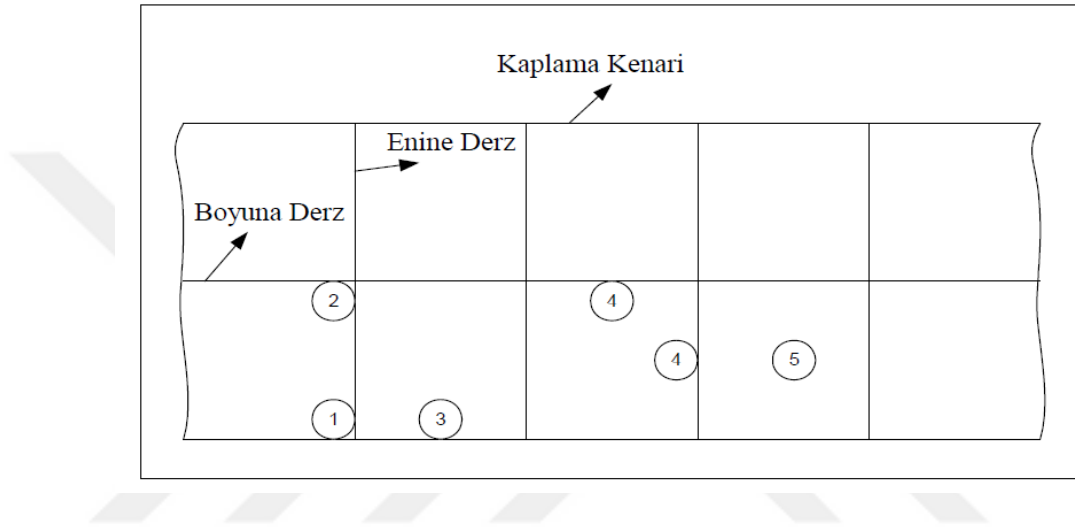
- Trafik yükleri
- Periyodik sıcaklık değişimleri (burkulma (curling)– kıvrılma, büzülme, genleşme vb.)
- Periyodik hacimsel değişimler (don kabarması, oturma vb.)
- Plak ile temel arasındaki yatay sürtünme
- Plaklar arasındaki düşey sürtünme ve yük transferi

benzeri nedenlerden dolayı değişen şiddetlerde oluşmaktadır. Beton kaplama kalınlığının dizaynında;

- Trafik (dingil yükü ve tekerrür sayısı)
- Taban zemininin rijitliği
- İklim
- Betonun mekanik özellikleri
- Yolun ekonomik hizmet ömrü
- Yoldan beklenen hizmet kalitesi

gibi faktörler dikkate alınmalıdır (Ağar vd 1998; Tunç 2001).

Değişen teker yükleri beton plakların farklı bölgelerinden geçerken farklı eğilme gerilmeleri oluşturmaktadır. Şekil 1.3'te beton plağın farklı bölgelerine etki eden yükler görülmektedir. Beton plağın köşesine yük etkimesi halinde en kritik gerilmeler oluşurken plağın ortasına etkiyen yükler en düşük gerilmeleri oluşturmaktadır (Tunç 2001).



Şekil 1.3. Kaplamaya etki eden yüklerin konumları

Şekil 1.3'te, beton plakta oluşan maksimum eğilme-çekme gerilmesi 1 no'lu noktadaki teker yükü ile oluşurken, aynı teker yüküne sahip 2, 3, 4 ve 5 no'lu noktalardaki gerilmeler giderek azalmaktadır. Bir beton kaplama plağı üzerine etki eden teker yükü:

- Teker yükünün pozisyonu
- Teker yükünün büyüklüğü
- Teker yükünün etki alanı temas alanı

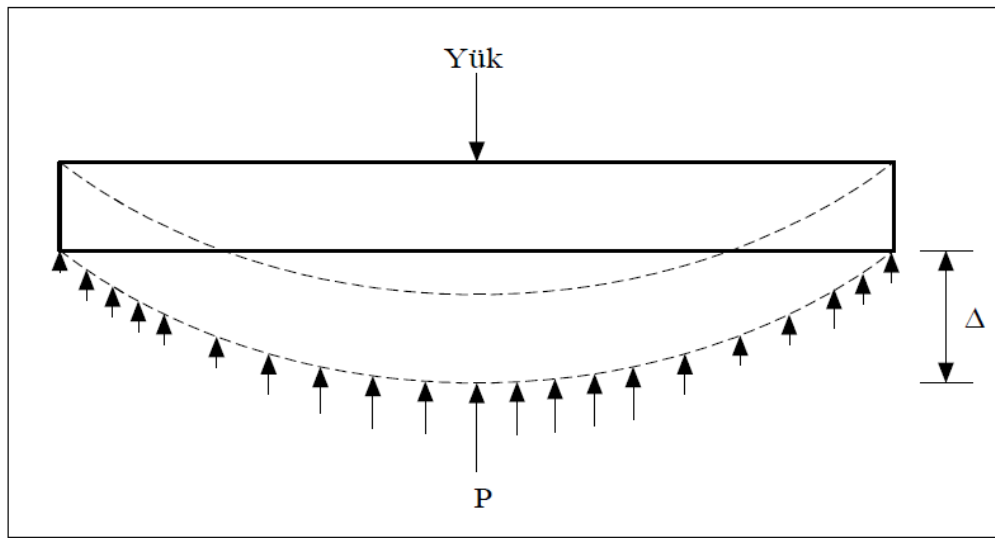
gibi parametrelere bağlı olarak konkav şekilde deforme olmasına neden olur.

Beton plağın deformasyona karşı direnci:

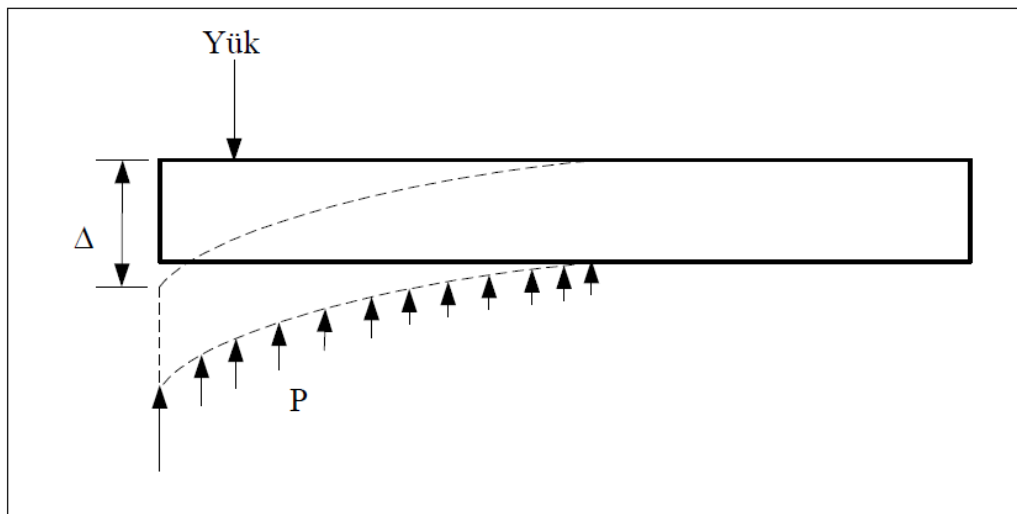
- Zeminin rijitliğine

- Beton plağın eğilme rijitliğine bağlı olarak değişir (Tunç 2001).

Zemin yatak katsayısı, birim alana gelen yükün zeminde meydana getirdiği çökme miktarıdır. Beton kaplama dizaynında zemin rijitliği, plaka yükleme deneyi ile elde edilen yatak katsayısı ile tanımlanır. Trafik yükü etkisi altındaki beton plakta oluşan çökme ve zemin reaksiyon basıncı Şekil 1.4'te görülmektedir (Tunç 2001).



a) Yükün plağa ortadan etkimesi



b) Yükün plak kenar ve köşesine etkimesi

Şekil 1.4. Yükleme noktalarına göre beton plakta oluşan gerilmeler

Isı farklılıkları beton plaklarda bükülmeye neden olmaktadır. Beton plağın alt ve üst yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı 30°C 'ye kadar çıkabilmektedir. Gündüz saatlerinde sıcaklığın yükselmesi ile birlikte üst yüzey alt yüzeyden daha sıcak olup ısınacaktır. Bu durumda kabaran plağın üst kısmında çekme gerilmesi oluşurken alt kısmında basınç gerilmesi oluşacaktır. Gece gerçekleşen soğuma sırasında ise alt yüzey daha sıcak olacak ve beton plak kenarları yükselerek ortası çukur olacaktır. Basınç gerilmeleri üst kısımda çekme gerilmeleri ise alt kısımda oluşacaktır. Benzer gerilmeler nem farklılığında da gözlenmektedir (Ağar 1998).

Sonuç olarak beton kaplamalarda oluşan gerilmeler;

- Teker yükü ve lastik basıncı
- Tekerlerin ara mesafesi
- Teker yükünün plaktaki yükleme noktası (köşe, kenar veya orta)
- Zeminin reaksiyonu (yatak katsayısı)
- Çevresel etkilerden (ısı, rutubet) ötürü beton plakta burulma
- Burulmanın (curling) yönüne (dış bükey, iç bükey) göre teker yükünün plaka üzerindeki yükleme yeri gibi nedenlere bağlı olduğundan belirlenmesi oldukça karmaşıktır. Beton kaplamalardaki gerilmelerin belirlenmesinde kullanılan yöntemlerde zeminin, her noktasında reaksiyon gösterdiği ancak reaksiyonun büyüklüğünün defleksiyonla (çökme veya eğilme şekil değiştirmesi) arttığı kabul edilmektedir. Beton plak büküldüğünde (curling) yani kenarları yukarı veya aşağı kıvrıldığında zeminin desteği beton plakta süreklilik göstermemektedir. Ayrıca tekrar eden yükler altında zeminde ya da temel tabakasında oluşan kalıcı deformasyonlar, beton plak ile zemin arasındaki teması azaltmaktadır. Sıcaklık farkı nedeniyle oluşan bükülmeler (curling) ve zemindeki kalıcı deformasyonlar sonucu oluşan hacim değişiklikleri, beton kaplamada oluşan gerilmeleri artırmaktadır (Tunç 2001).

Beton kaplamalarda;

- Beton plakaya etki eden yükün büyüklüğüne

- Zemin yatak katsayısına (veya zemin reaksiyon modülü)
- Beton plakların bükülme (curling) halinde yükleme şartlarına

bağlı olarak oluşan gerilmelerin bileşkesi göz önüne alınmalıdır. Diğer taraftan kritik gerilmeler;

- Beton plak yukarı doğru kıvrık iken köşe yüklemesinde
- Beton plak aşağı doğru kıvrık iken orta yüklemesinde

meydana gelmekte ve gerilme yükün miktarı ile artmaktadır. Dolayısıyla yükten dolayı meydana gelen gerilmeler ile sıcaklıktan dolayı meydana gelen gerilmelerin bileşkesi göz önüne alınmalıdır (Tunç 2001).

1.4. Beton

Beton; agrega, çimento, su ve gerektiğinde bazı katkı maddelerinin birlikte karıştırılması ile elde edilen bir yapı malzemesidir (Erdoğan 2003).

Betonda kullanılan agrega minerallerden oluşan taneli malzemeler olup kum, çakıl, kırmataş, normal ağırlıklı betonda en çok kullanılan agregalardır. Türk standartlarına göre elendiğinde 4.0 mm göz açıklıklı kare elekten geçen agrega “ince agrega” üstünde kalan agregaya ise “iri agrega” denilmektedir.

Betondaki bağlayıcı malzeme çimentodur. Çimento su ile karıştırıldığında bağlayıcılık özelliği ortaya çıkar ve bu karışıma çimento hamuru denir. Çimento hamuru agrega tanelerini sarar, agrega taneleri arasındaki boşlukları doldurur ve bağlayıcılık özelliği ile agrega tanelerini bir arada tutar. İçerisinde iri agrega bulunmayan sadece ince agrega bulunan betona harç denir.

Çağımızın en popüler yapı malzemesi olan beton günlük yaşantımızda evlerimizden yollarımıza, su yapılarından, enerji santrallerine kadar nerdeyse bütün yapılarda karşımıza çıkmaktadır.

Genel olarak normal betonlar ve özel betonlar olarak iki sınıfa ayrılmaktadır.

Normal betonlar basınç dayanımı 20 MPa ile 50 MPa arasında olan betonlardır. Maliyeti yüksek olmayan basit yapıların inşasında kullanılmaktadırlar.

Özel betonlar ise normal betonların fiziksel, kimyasal veya mekanik özelliklerinde amaca uygun olarak iyileştirme yapılması ile elde edilen betonlardır. Yüksek dayanımlı betonlar, mineral katkılı betonlar, kendiliğinden yerleşen betonlar, hafif betonlar, lifli betonlar, polimer betonlar, püskürtme betonlar, ultra yüksek dayanımlı betonlar, reaktif pudra betonu ve çimento enjekte edilmiş lif donatılı beton (SİFCON) örnek olarak verilebilir (Taşdemir vd 2004).

Çizelge 1.1. Yapı betonlarının bazı özelliklerine ait tipik değerler (Erdoğan 2003)

Özellikler	Tipik Değerler
Basınç Dayanımı	35 Mpa
Eğilme Dayanımı	6 Mpa
Çekme Dayanımı	3 Mpa
Elastiklik Modülü	28000 Mpa
Poisson Oranı	0,2
Kırılmadaki Çekme Birim Def.	0,001
Isısal Genleşme Katsayısı	$10 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Rötre (büzülme) Birim Def.	%0,05-0,1
Normal Ağırlıklı Beton	2300 kg/m ³
Hafif Beton	1800 kg/m ³

Betonun basınç dayanımının yüksek olmasına karşın çekme ve eğilme dayanımının düşük olması olumsuz özellikleridir. Yukarıdaki çizelgede 28 günlük silindir basınç dayanımı 35 MPa olan bir beton için çekme dayanımının 3 MPa, eğilme dayanımının 6 MPa olduğu görülmektedir.

Diğer bir taraftan dayanımın artması gevrekliğin artmasına sebep olmaktadır. 1960'lı yılların başında betona lif katılarak süneklik kazandırılmaya başlanmıştır. Lif takviyesi ile betonun çekme dayanımı, çatlak direnci, aşınma ve darbe dayanımı, tokluk gibi mekanik özellikleri arttırılmıştır. Kullanılan lifler, çelik, cam ve polipropilenden yapılmaktadır. Betonlarda kullanılan lifler, çekme ve eğilme dayanımını arttırmakta, rötre çatlaklarını ise azaltmaktadır. Lifli betonun en önemli mekanik özelliklerinden birisi, tokluk olarak da adlandırılan enerji yutabilme kapasitesidir (Çivici 2006).

Betonda meydana gelen gevreklik problemini çözmek ve betonun eğilme dayanımını arttırmak amacıyla ultra yüksek performanslı beton üretilmiştir. Ultra yüksek dayanımlı betonlar üretilirken, yüksek dayanımlı betonlardan farklı olarak betona lif katılmış, tane dağılımı değiştirilerek yeniden düzenlenmiş, puzolanik aktivite arttırılmış ve farklı üretim ile kür işlemine tabi tutulmuştur. SIFCON, ultra yüksek performanslı betonların özelliklerine sahip olmasının yanı sıra ince taneli malzemeden oluşmakta ve yüksek oranda lif içermektedir (Canbay 2014).

SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete - Çimento Bulamacı Emdirilmiş Lifli Beton) çimento, su, süper akışkanlaştırıcı, silis dumanı ve çok ince kumdan oluşan bir bulamacın sertleşmesiyle oluşan bir matris içinde hacimce yüksek oranlarda (%5–20) çelik tel ile takviye edilmiş kompozittir. Yüksek dayanımlı betonlardan en önemli farkı kırılma sırasında sünek davranış göstermeleridir. Yüksek dayanımlı betonlarda dayanım arttıkça malzeme gevrekliği artarken SIFCON, gösterdiği düşük geçirimsizlik, yüksek durabilite, dayanım ve süneklik özellikleri ve yüksek oranda çelik tel içeriği ile sünek davranış göstermektedir. Çelik lifli betonlarda lif içeriği %2-%3 aralığında olmasına karşın SIFCON' da yaklaşık 10 kat fazla lif kullanılabilmekte ve yüksek süneklik elde edilmektedir (Taşdemir ve Bayramov 2002).

Çalışmamızda rijit yol üst yapılarında SIFCON kullanımı ile eğilme ve basınç dayanımının arttırılması üzerine çalışılmıştır. Lif oranı, narinlik, su/çimento oranı ve silis dumanının dayanım üzerindeki etkileri Taguchi Metodu kullanılarak araştırılmıştır.



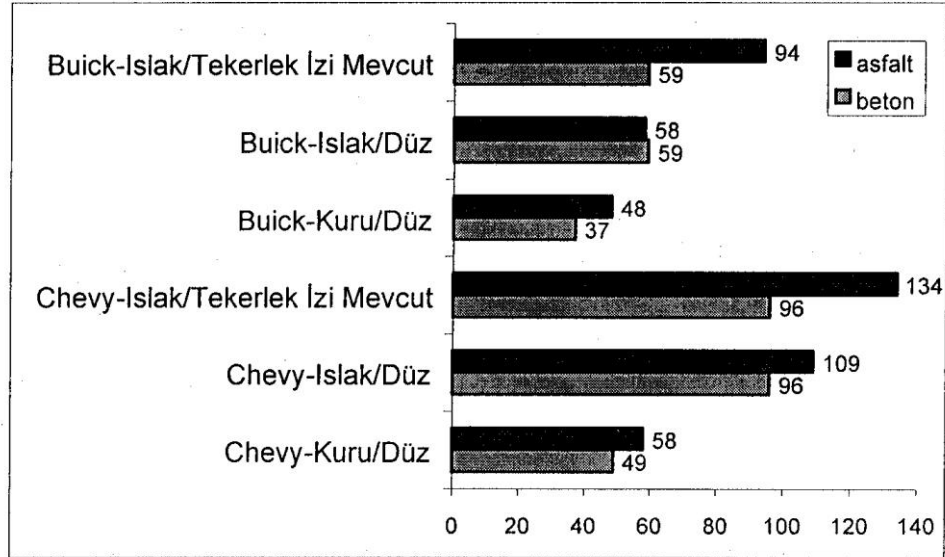
2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yol üstyapısı, trafikten gelen yükleri daha geniş alanlara yayarak yolun altyapısına iletir. Üstyapı, trafik yüklerini, taban zemininin taşıma gücünü aşmayacak bir düzeye indirerek iletirken, kendi içinde de tahrip olmamalıdır. (Ağar vd., 1998). Diğer bir taraftan kavşaklar otobüs şeritleri gibi yerlerdeki bozulmuş asfalt yolların üzerine çok ince beton kaplamanın uygulanması (whitetopping) en önemli çözüm yolu olarak tespit edilmiştir (Karpuz 2008).

Rijit ve esnek üstyapıların trafik yükünü tabana iletme şekilleri farklıdır. Beton kaplama asfalt kaplamalara göre yükü çok daha geniş bir alana yayar ve taban zeminine iletir. Beton yolun taşıma gücünün taban zeminine bağlı olmaması nedeni ile zayıf zeminlerde esnek üstyapılara göre daha avantajlıdır. Esnek kaplamalar üzerindeki yükü bir alt tabakaya daha dar bir alana yansıtırlar. Yük kaplamadan temele, temelden alt temele ve alt temelden zemine iletilirken her tabakada daha geniş alana yayılmaktadır. Dolayısıyla taban zemini zayıfsa ve çeşitli gerilmeler altında deforme oluyorsa, asfalt kaplama da deforme olan bu profili izlemekte ve yolun üstünde şekil değişiklikleri, ondülasyonlar görülmektedir. Bu yüzden, ağır trafik altındaki yollarda, beton yol uygulaması, dayanıklılığı sebebiyle çok daha uygun olmaktadır. Esnek kaplamaların tasarımında kaplamayı oluşturan tüm tabakaların toplam yapısal dayanımı dikkate alınmaktadır. Tabakalı esnek üstyapılar rijit kaplamalara kıyasla daha kalındır (Ağar vd 1996).

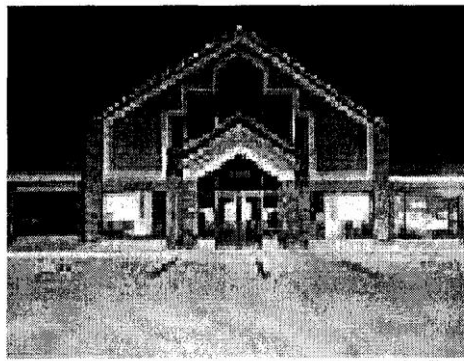
Esnek kaplamaların bağlayıcısı olan asfalt yüksek oranda ithal edilirken beton bağlayıcısı olan çimento yurt genelinde üretilmektedir. Sıcak karışımli kaplamalarda zeminin kuru olması ve hava şartlarının müsait olması (15°C üstü) olması gerekirken beton kaplamalarda zeminin ıslak oluşu imalatı etkilemediği gibi gerekli önlemler alınarak anormal hava şartlarında dahi imalat yapılabilir (Yeğınobalı 2002).

Ünal (2003) tarafından bildirildiğine göre Illinois Üniversitesinde yapılan araştırmada iki farklı otomobilin 100km/s hız ile giderken asfalt ve beton kaplamadaki fren mesafeleri mukayese edilmiştir (Anonim 2002)



Şekil 2.1. Asfalt ve beton yollardaki durma mesafesi mukayesesi

Şekil 2.2’de doğal olarak açık renkli olan beton, taşıt farları veya yol lambalarından çıkan ışığı, siyah renkli asfalttan daha iyi yansıttığı ve geceleri çok daha iyi görüş kolaylığı sağladığı görülmektedir (Yeğinobalı 2002).



Beton



Asfalt

Şekil 2.2. Kaplamalarda gece görüş rahatlığı

AASHTO Amerikan Devlet Karayolu ve Taşımacılık İdareleri Birliği tarafından beton ve asfalt yollara göre mevsimsel şartlarda hasarını incelemek için Kanada’da yapılan bir araştırmada, bahar hava şartlarında asfalt yolların yüzde 61’i bozulurken aynı hava şartlarında beton bozulma oranı sadece yüzde 5,5 olarak tespit edilmiştir. Diğer bir taraftan beton yollarda yaz aylarında erime riski yokken kışın buz çözücü tuzlardan dolayı yıpranması daha azdır (Ağar vd 1998).

Beton yolların dezavantajı olarak açık rengi nedeniyle göz kamaşmasına neden olması, derzler ve kaplama yüzeyindeki ince kanalların özensiz yapılması durumunda sürüş konforunun azalması sıralanabilir (Karpuz 2008).

Asfalt ve beton yolların hizmet ömrü maliyeti esasına göre mukayesesinde ilk maliyete ek olarak hizmet ömrü boyunca bakım ve onarım aralıkları ve maliyetleri, aydınlatma masrafları, taşıtların yakıt tüketimleri gibi etkenler ve çevresel faktörler dikkate alınır. Yapılan çalışmalar neticesinde trafik hacmi yüksek yollarda ilk maliyetin yüksek olması durumunda bile yaşam döngüsü sonunda asfalt yolların beton yollara göre daha maliyetli olduğu ortaya çıkmaktadır. Günlük ticari taşıt yükünün 5.000’den fazla olması durumunda beton yol tercih edilmektedir (Tunç 2001).

Yollarda bağlayıcıların kullanımı M.Ö. 1. YY’ da Romalıların taşları birbirine bağlamak için kullandıkları doğal puzolan ve kireçten oluşan bağlayıcının kullanılması ile başlamıştır. Zaman içerisinde beton yollardaki önemli gelişmeleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz :

- 1865 İskoçya’da ilk beton yol denemelerinin yapılması
- 1880 Avustralya’da ilk beton yolların yapılması
- 1891 Ohio’da Amerika’nın, ilk beton yolunun yapılması
- 1913 Arkansas’ta Amerika’nın ilk beton otoyolunun yapılması
- 1914 Amerika’da 3.500 km beton yol yapımının tamamlanması ve yol yapımında “Silindirle Sıkıştırılan Beton Yollar” ın kullanılmaya başlanması
- 1924 Fransa’da beton yol yapımına başlanması

- 1930 Almanya’da 4.000 km uzunluğunda beton otoyol yapımına başlanması ve yine aynı yıl içerisinde Avrupa ülkelerinde de beton yol yapımına başlanması
- 1950 Kayar kalıp kullanılmaya başlanıyor
- 1960 – 70 ABD ve Kanada’da beton yol yapımı yoğunlaşıyor; ABD’de 70.000 km beton yol yapılıyor (Ağar vd 1998).

1961 yılının Mart ayında kurulan "Beton Yollar İçin Teknik Şartname Komisyonu" ile Türkiye’deki beton yollar alanında ilk çalışma başlatılmıştır. Komisyonun amacı beton yollar konusunda ileri gelen ülkelerin şartnamelerini inceleyerek ülkemizde uygulanabilir bir şartname hazırlamaktır. Fakat "Karayollarımızda Beton Kaplamalar Hakkında Ekonomik Kıyaslamalar" adlı raporda (Apak ve Bekaroğlu 1961), o yıllarda çimento üretiminin yetersizliği ve mevcut trafik hacminin düşük olması nedenleri ile Türkiye’de beton yolların henüz ekonomik olmadığı belirtilmektedir (Atalay 1962).

Shah ve Rangan’ın (1971) çelik çubuklar ile hazırlanan betonlar ile farklı narinlikteki liflerin rastgele karıştırıldığı betonların mukavemetlerini incelemişlerdir. Lifli betonların çekme, basınç ve eğilme altında çatlak oluşumundan sonra dayanımlarının daha fazla olduğu ve çatlama sonrasında ise lif özelliğine bağlı olarak dayanımın değiştiğini belirtmişlerdir.

Ezeldin ve Balaguru (1992) basınç dayanımları 35 MPa - 84 MPa arasındaki betonların gerilme - şekil değiştirmeleri eğrileri üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada 30 kg/m³, 45 kg/m³, 60 kg/m³ hacimsel oranlar ve 60, 75, 100 narinlik oranları kullanılmıştır. Çelik lifli betonlarda basınç dayanımının ve maksimum dayanıma karşılık gelen şekil değişiminin arttığı gözlenmiştir.

Balendran et al. (2001) çelik lifin, betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırdıkları çalışmalarında çelik lifli ve lifsiz betonlarda hafif agrega ve kireç taşı kullanmışlardır. Beton dayanımları 90 MPa – 115 MPa aralığında dizayn edilmiş ve lif oranı %1 olarak alınmıştır. Değişken boyutlardaki numuneler üzerinde yapılan yarmada çekme deneyi, üç noktalı eğilme deneyi ve basınç deneyleri sonrasında düşük

miktardaki lifin, basınç dayanımında etkisinin az olduğu buna karşın çekme ve eğilme dayanımında önemli katkısı olduğu saptanmıştır.

Altoubat *et al.* (2006) “Beton Yolların Yapısal Liflerle Dizaynı İçin Basitleştirilmiş Yöntem” isimli makalelerinde; beton yollarda parçalı makro liflerin eklenmesi durumunda eğilme kapasitesinin arttığını belirtmişlerdir.

Aslan vd (2007) farklı dizayn edilmiş beton blokları vakumlu ve vakumsuz olarak üretmişlerdir. Yüzey sertliği ve beton yoğunluğu deneyleri Schmidt çekici ve radyoaktif yöntemle test edilmiştir. Ayrıca karot numuneler üzerinde ise; basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, statik elastisite modülü, yarmada çekme dayanımı, beton yoğunluğu, görünür boşluk oranı, ultra ses geçiş hızı, kapiler su emme ve aşınma dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuç olarak lifli betonların fiziksel özelliklerde üstünlük gösterdiği, vakum ile üretilen betonların özellikle üst yüzeyinde malzeme özelliklerinin daha iyi olduğu saptanmıştır. Beton yol kaplamaları açısında değerlendirmelerinde ise çelik lifli betonların en iyi sonuç verdiği ve vakum ile üretilen betonların yüzey özelliklerinde önemli derecede iyileşme olduğu saptanmıştır.

Akter vd (2002), 1992’den sonra yapılmış 21 beton yol kaplamasının yüzeylerini incelemiş ve eğilme dayanımının aşınma dayanımını etkilediğini belirtmişlerdir.

Puyan (2003), beton yolların esnek kaplamalardan farklarını incelemiş, yollarda çatlakların sebepleri ve kontrol altına alınması için yöntemleri araştırmıştır. Çatlakların önlenmesi konusunda çelik liflerin kullanılmasını tavsiye etmiştir.

Ünal (2003), çelik tel ve polipropilen lif içerikli beton yolların mekaniksel özelliklerini araştırdığı çalışmada 30 ± 10 mm çökmeye sahip ve su/çimento oranını 0,47 olan beton kullanmıştır. 65 narinliğe sahip olan çelik lifler 20 kg/m^3 ve 40 kg/m^3 oranında, polipropilen lifler ise 300 g/m^3 ve 600 g/m^3 oranında kullanılmıştır. Değişken parametreler olan çelik tel ve polipropilen lif oranlarının betonun basınç, eğilme dayanımına, aşınma, donma – çözülme ve kuruma – büzülme direncine olan etkisi

araştırılmıştır. Çelik tel kullanılan numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarının, elastisite modülü, aşınma, kuruma – büzülme, donma -çözülme direncinin daha fazla olduğu gözlenerek diğer incelenen beton gruplarına kıyasla yol kaplaması için daha ideal olduğu saptanmıştır.

Yaka (2011), yapmış olduğu çalışmada C25 betona 20 g/m^3 ve 40 g/m^3 oranlarında çelik lifler ilave ederek yol betonları üretmiş ve betonların basınç ve eğilme dayanımlarını incelemiştir. Çalışma sonunda uygun lif oranının laboratuvar ortamında belirlenmesiyle hazırlanacak beton karışımların mekanik özelliklerinin artacağı ve gevrekliğe karşı ilave donatı sistemi sağlayacağı ve beton yollarda lifli beton kullanımının arttırılması gerektiği belirtilmiştir.

Topçu İ.B. ve Boğa A.R (2005) uçucu kül ve çelik liflerin kullanımının beton ve beton borularda kullanımının mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Beton numunelerin dozajı 300, 350 ve 400 olarak alınmış, karışım ağırlığını %0,4'ü çelik lif ilave edilmiş ve çimento oranının %15'i oranında ilave uçucu kül kullanılmıştır. Lif ve uçucu kül kullanılan numunelerde %16 basınç , %54 çekme, %100 eğilme ve %130 tepe basınç yükünde artış gözlenmiştir.

Can vd (2009) beton yol kaplamalarında lif katkılı betonların aşınma direnci üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Numuneler $100 \times 200 \times 20 \text{ cm}$ ölçülerinde hazırlanmış olup alınan karot numuneleri üzerinde ASTM C 944-99'as göre aşınma dayanımı deneyleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda numunelerin aşınma dirençleri büyükten küçüğe doğru çelik lifli, polipropilen ve lifsiz beton şeklinde gözlenmiştir.

Ünal vd (2006) çelik lif katkısının betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırdıkları çalışmada farklı tip ve oranda lif kullanarak betonun basınç ve eğilme dayanımını incelemişlerdir. Lifli betonların normal betonlara göre basınç altında gerilme –şekil değiştirme yeteneğinin ve eğilme dayanımının arttığı gözlenmiştir. Sünekliği artan betonun deprem bölgelerinde kullanılmasının can ve mal güvenliğini sağlayacağı belirtilmiştir.

Edis (2007) beton ve asfalt yolların maliyet yönünden analizini yaptığı çalışmada sathi kaplamanın kısa vadede sorunları çözmesine rağmen milli ekonomiye zarar verdiğini ve beton kaplamanın yapılamadığı durumlarda sıcak karışım asfaltın tercih edilmesi gerektiğini belirtmiştir.

Toktay vd (1991), polipropilen ve çelik lifli yüksek dayanımlı betonların çekme ve basınç dayanımlarını incelemişlerdir. Polipropilen lif uzunluğunu 20 mm ve oran olarak 1 kg/m^3 almışlardır. Çelik liflerde ise 30 mm uzunluğundaki 0,4 mm çapındaki lifler beton hacminin %1.5'i olacak şekilde alınmıştır. Beton matrisi su/çimento oranı 0.25 ve çökmesi 2-3 cm olacak şekilde ayarlanmıştır. Beton tokluğu açısından sonuçlar irdelendiğinde kontrol numuneler ile polipropilen lifli numunelerin yakın değerler vermesine karşın çelik lifin yüksek dayanımlı betonların tokluğuna önemli bir katkısı olduğu belirtilmiştir. Çekme dayanımını polipropilen lifler %13 artırırken çelik lifler %35 oranında arttırmıştır. Polipropilen liflerin ve çelik liflerin basınç dayanımına katkısı olmadığı belirtilmiş olup çelik lifin sünekliği olumlu etkilediği belirtilmiştir.

Şimşek vd (2005) çelik lifli betonlarda silis dumanının dayanıma etkisini araştırdıkları çalışmada, silis dumanını %0, 2.5, 5 ve 10 oranlarında çimento ile yer değiştirmişlerdir. Beton sınıfı C25 olarak alınmış olup su/çimento oranı 0.50 seçilmiştir. Orta noktadan yüklemeli eğilme deneylerinde, çelik lifli betonlarda %10 silis dumanı katılması durumunda eğilme dayanımında 28 günde %23.5, 90 günde %30.8 ve 120 günde de %18.3'ük bir artış sağlamıştır. Lifsiz betonlara silis dumanı katılması durumunda ise maksimum eğilme dayanımı %2.5 oranındaki silis dumanı katılmasında görülmüş, %5 ve 10 oranlarında ise azalma görülmüştür.

Lankard (1985), SIFCON'un lifsiz ve az oranda lifli betonlara göre eğilme dayanımı ve basınç dayanımını mukayese etmiştir. Çalışma sonunda SIFCON'un her iki özelliğinin lifsiz ve düşük oranlı lifli betona göre oldukça yüksek olduğunu belirtmiştir.

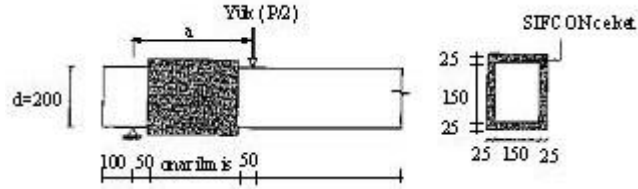
An Yan *et al.* (2002) SIFCON'un mekanik özelliklerini dijital görüntü analizleri ile deneysel olarak araştırmışlardır. SIFCON'un yüzey çatlak modellerini karakterize

etmek için çatlak boyutu parametre olarak kullanılmıştır. Lif oranı olarak %0, 4, 6, 8,10 kullanılmıştır. Lif oranı arttıkça basınç ve eğilme dayanımlarının iyileştiği ve lif oranı değişimine bağlı olarak çatlak boyutu ve mekanik özelliklerde değişim olduğu gözlenmiştir.

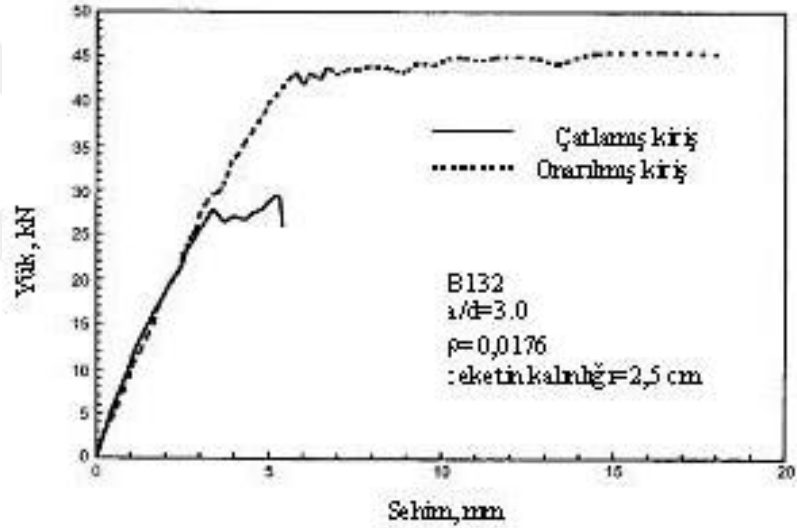
Svermova ve Bartos'un (2002) vibrasyona gerek kalmadan kendiliğinden yerleşen beton üzerine araştırma yapmışlardır. Çalışmada su/bağlayıcı oranı ve süper akışkanlaştırıcı oranları değişken olarak alınmış, karışımında ayrıca kireç taşı pudrası, kum ve doğal bir polisakkarit olan Welan Gum kullanılmıştır. Harcın reolojisini ölçmek için Mini yayılma deneyi, Lombardi plaka kohezyon deneyi, J kutusu deneyi ve bünyedeki suyun ayrışma (included bleeding test) deneyi yapılmıştır. Sonuç olarak basınç deneyi yapılmıştır. Numuneler basınç deneyine tabi tutulmuştur. Araştırma sonucunda kum oranının çimento bulamaçlarının reolojik davranışları üzerinde önemli katkısı olmasına rağmen basınç dayanımlarına etkisi olmadığı gözlenmiştir. Su/çimento oranının, süper akışkanlaştırıcı ve kireç taşı pudrası dozajının artışı mini slump deney sonuçlarına artışa neden olsa da plaka kohezyon deneyi ve J kutusu deney sonuçlarında azalmaya neden olmuştur. Su/çimento, kireçtaşı pudrası, kum ve akışkanlaştırıcı oranları arttıkça basınçta artış gözlenmiştir. Çalışmada sıra dışı mekanik özellikleri olan SIFCON'un normal ve özel yapılarda kullanılması gerektiği vurgulanmış olup SIFCON'un uygulamalarında kolaylık sağladığı belirtilmiştir.

Yerlikaya (2003) yaptığı çalışmada çelik tel donatılı betonların deprem etkisi altındaki davranışlarını incelemiş ve yapıların sünek davranış göstermesinde önemli faktör olan kolon – kiriş birleşim bölgesinin önemini vurgulanmıştır. Çelik tellerin kolon-kiriş birleşim bölgelerinde sargı donatısı yerine kullanılabileceği, kullanıldığı durumda betonun daha sünek davrandığı, daha büyük enerji yutma yeteneğine sahip olduğu ve birleşim bölgesinde betonun parçalanıp dağılmasını engellediği belirtilmiştir. Araştırmada kayma donatısı yetersizi kirişlerin çevresine SIFCON levhalar sarılarak güçlendirilmiş ve testler sonrası SIFCON ile onarılan kirişlerin çatlamış kirişlerden daha fazla yük taşıdığı belirtilmiştir. Çalışma sonucu olarak kirişlerin reaktif pudra

betonu ve SIFCON ile güçlendirilmesinin daha ekonomik ve hızlı olduğu belirtilmektedir.



Şekil 2.3. SIFCON ceket ile güçlendirme



Şekil 2.4. Güçlendirilmiş kirişlerin tipik yük – sehim eğrisi

Yazıcı vd (2005) uçucu kül ve lif oranının değişimine bağlı olarak SIFCON' un mekanik değişimlerini incelemişlerdir. Çalışmada çimento %20, 40 ve 60 oranlarında uçucu kül ile çimento yer değiştirilmiştir. Narinlikleri 55 olan lifler %2-6-10 oranlarında kullanılmıştır. Sonuçların karşılaştırılması için %0 çelik lif ve %0 uçucu kül içerikli şahit numuneler hazırlanmıştır. Kullanılan uçucu kül oranının artması ile birlikte mekanik özelliklerin ve lif oranının artmasıyla da eğilme dayanımının arttığı saptanmıştır. Lif oranının %10 ve çimento yerine kullanılan uçucu kül oranının %60 olması durumunda 55 MPa eğilme, 130 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır. Ulaşılan

%42,3'lük eğilme /basınç dayanımı oranı çelik lif kullanılmayan ve aynı miktar uçucu kül kullanılan numunelerde %12,7 olarak bulunmuştur. Çelik lif oranının artması tüm karışımlarda eğilmeyi arttırmıştır.

Bulutlar (2006) yaptığı çalışmada SIFCON'un elastisite modülü, yarma –çekme dayanımını, net eğilme dayanımını ve kırılma enerjisi gibi mekanik özelliklerinin çelik lif içeriği ve dayanımı ile değişimini incelemiştir. Çalışmada üç farklı tip çelik lif %5 - 10 oranlarında kullanılmıştır. Su /bağlayıcı oranı %25 olan karışımlarda silis dumanı çimento ağırlığının %20 oranında kullanılmış ve polikarboksilik eter esaslı akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Araştırma sonuçlarında hacimce %5 ve %10 oranında çelik lif içeren SIFCON numunelerinin kırılma enerjisi, karakteristik boy ve net eğilme dayanımı başta olmak üzere basınç dayanımı, elastisite modülü ve yarmada çekme dayanımlarında çelik lif içermeyen numunelere göre artış sağladığı ve bu artışların karışımda kullanılan çelik lif tiplerine ve yüzdelere göre değişiklik gösterdiği belirtilmiştir.

Sharma ve Singh (2008), tarafından yapılan çalışmada numunelerde %5, %7, %8, %9 oranlarında çelik lif kullanılmış ve çalışma sonucunda; yük deformasyon davranışı, düktilite ile ilgili parametreler, max moment kapasitesi ve kırık karakteristikleri incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde SIFCON levhaların çekme gerilmelerinin ve düktilitelerinin lifsiz betona göre yüksek olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak SIFCON levhalar mukavemet ve süneklikte lifsiz betonlara göre daha iyi performans göstermiştir.

Rao et al. (2010) sınırlandırılmış SIFCON levhaların eğilme ve kesme darbe dayanımını araştırmışlardır. Çalışmada farklı lif yüzdeleri kullanılmış ayrıca normal lifli beton ve lifsiz beton levhalarda üretilerek deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda SIFCON levhaların kontrol numunelere göre enerji yutma kapasitelerinin ve dayanımlarının yüksek olduğu daha düktil davrandığı belirlenmiştir. Kullanılan en yüksek oran olan %12 lif oranının en yüksek performans gösterdiği belirtilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada farklı oranlarda (hacimce %3, %6, %9, %12) ve farklı narinliklerde (40, 55, 65, 80) çelik lifler, farklı oranlarda su/çimento (0,3, 0,35, 0,40, 0,45) ve farklı oranlarda silis dumanı (0, %5, %10, %15) kullanılarak üretilmiş SIFCON'un, rijit yol üst yapılarında eğilme ve basınç dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmalarda Taguchi Metodu kullanılarak eğilme ve basınç dayanımlarını maksimize eden optimum karışım oranları belirlenmiştir.

3.1. Materyal

Bu bölümün, SIFCON üretiminde kullanılan agrega, çimento, çelik lif, su azaltıcı yeni nesil süper akışkanlaştırıcı katkı malzemeleri ile deneylerde kullanılan alet ve cihazların genel özellikleri açıklanacaktır.

3.1.1. Çimento

Bu çalışmada, Aşkale Çimento Fabrikasının 2015 yılında üretmiş olduğu portland çimentosu (PÇ 42,5) kullanılmıştır. Bu çimentonun yine aynı fabrikada yaptırılan fiziksel, mekanik ve kimyasal analizlerinin sonuçları Çizelge 3.1. ve Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Özgül Kütle (g/mL)		3,13
Litre kütlesi (g/L)		1110
Priz Başlangıcı (saat)		2,10
Priz Sonu (saat)		3,15
Hacim Genleşmesi (mm)		3
Basınç dayanımı (MPa)	2 gün	23,5
	7 gün	35,3
	28 gün	47,0
Eğilme dayanımı(MPa)	2 gün	5,0
	7 gün	6,2

	28 gün	7,7
--	--------	-----

Çizelge 3.2. Çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşen	Oran (%)
SiO ₂	19,94
Al ₂ O ₃	5,28
Fe ₂ O ₃	3,45
CaO	62,62
MgO	2,62
SO ₃	2,46
Kızdırma Kaybı	1,99
Na ₂ O	0,23
K ₂ O	0,83
Cl	0,0107
Tayin Edilemeyen	0,08
Toplam	100
Serbest CaO	0,51
Çözünmeyen Kalıntı	0,70
Fe ₂ O ₃	3,45

3.1.2. Karışım suyu

Beton karışımında kullanılan çimentonun bağlayıcılık özelliği, büyük ölçüde çimentonun kalsiyum silikat bileşenleri ile karışım suyu arasındaki kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan kalsiyum silika hidrat (C-S-H) jel ürünlerinin oluşumuna dayanmaktadır. Karışım suyunda bulunan yabancı maddeler hidratasyon ürünlerinin oluşum hızını ve miktarını etkileyebileceğinden, çimento hamurunun katılaşma süresini ve bağlayıcılık özelliğini de etkileyeceklerdir.

Çalışmada karma suyu olarak Atatürk Üniversitesi içme suyu kullanılmıştır.

3.1.3. Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi

Akışkanlaştırıcı katkı maddesi olarak BASF firmasının ürettiği MasterGlenium® ACE 450 adlı ürün kullanılmıştır. Bu ürün betonun karma suyunu yüksek oranda azaltarak erken ve son dayanımını artıran veya aynı miktarda su ile betona yüksek oranda akışkanlık özelliği kazandıran süper akışkanlaştırıcı katkı maddesidir. Su azaltıcı özelliği olarak katkısız betona göre 1 günlük dayanımı %40, 28 günlük dayanımı ise %15 artırmaktadır. Karışıma çimento ve silis toplam ağırlığının %1,5'i kadar katılmıştır. Dona ve geçirimsizliğe karşı etkilidir. Karışımında kullanılan suyun dozaja bağlı olarak %20'nin üzerinde azaltır. Süper akışkanlaştırıcı katkının bazı özellikleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesine ait özellikler

Adı	BASF MasterGlenium® ACE 450
Tipi	Polikarboksilik Eter Esaslı
Renk	Kahverengi, homojen ve sıvı
Yoğunluk (kg/m ³)	1089±20
pH Değeri	Yaklaşık 5-7
Alkali İçeriği	≤ 3.00
Klor İyon İçeriği %	≤ 0.10

3.1.4. Silis dumanı

SD; silisyum ve silisyum alaşımlarının elektrik ark fırınlarından, üretim sırasında açığa çıkan dumanın bacalarda filtre edilerek tutulan, çimentodan 30–100 kat daha ince, yaklaşık %90 oranında amorf silis içeren endüstriyel bir atıktır. Silis dumanı (SD), çok ince cam gibi parçacıklardan ibaret olup 20,000 m²/kg yüzey alanına sahiptir.

SD, beton dayanımı ve agrega-çimento aderansını önemli ölçüde arttırmakla birlikte, çözücü tuzları içeren kimyasal maddelere ve sülfata karşı da dayanıklılığı arttırmıştır. Segregasyon, terleme, hidrasyon ısısı, geçirimsizlik, alkali agrega reaksiyonlarını azalttığı belirtilmiştir (Demirboğa 1999).

Beton içindeki boşlukları doldurduğundan SD, yüksek dayanım ve düşük permeabilite sağlamaktadır. Permeabilitenin düşmesi, betonun suya doygunluğunu azaltacağından, donmaya karşı iyi bir dayanım sağlayacaktır.

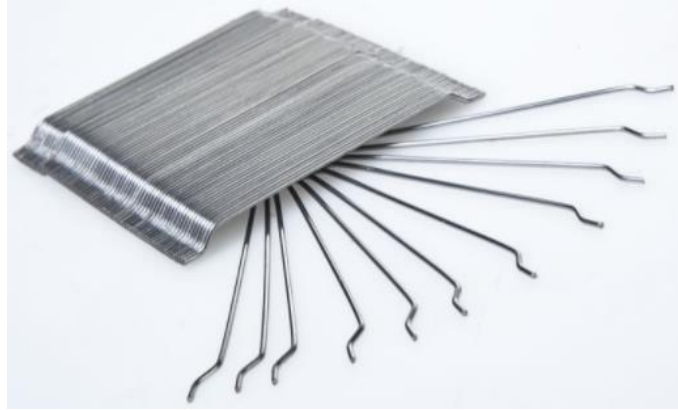
Antalya Elektrometalürji İşletmesinde Silico Ferrochrom üretimi esnasında baca gazları ile beraber ortamı terk eden tozlar elektro filtrede toplanmaktadır. Tozların toplanmasının ilk amacı çevre kirliliğini önlemek içindir. Bu çalışmada söz konusu tesisten sağlanan SD kullanılmıştır. SD'nin kimyasal bileşimi Çizelge 3.7.'de verilmiştir. Karışımlarda çimento ağırlığının %0, %0,5, %10 ve %15'i oranlarında kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. Silis dumanının kimyasal bileşimi ve elek analizi

Kimyasal Bileşim		Elek Analizi	
Madde	Miktar (%)	mm	Kalan (%)
Cr ₂ O ₃		+0,250	0,3 – 1
SiO ₂	85–95	+0,125	0,8 – 2,5
Fe ₂ O ₃	0,5–1,0	+0,074	0,5 – 2,5
Al ₂ O ₃	1,0–3,0	+0,044	1,0 – 7,5
MgO	1,0–2,0	+0,038	3,0 – 7,0
CaO	0,8–1,2	-0,038	92 – 80
C	0,5–1,0		
S	0,1–0,3		
Kızdırma Kaybı	0,5–1,0		

3.1.5. Betonda kullanılan çelik lifler

Kemerli Metal Sanayii ve Ticaret Anonim Şirketinden temin edilen KMX 40/30 BG, KMX 55/30 BG, KMX 65/35 BG ve KMX 80/60 BG tipi iki ucu kancalı, soğuk çekilmiş çelik lifler kullanılmıştır. Kullanılan çelik lifle ilgili teknik özellikler Çizelge 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Deneyde kullanılan çelik lifler

Çizelge 3.5. Çelik lifin teknik özellikleri

Lif Tipi	KMX 40/30 BG	KMX 55/30 BG	KMX 65/35 BG	KMX 80/60 BG
Boy (mm)	30	30	35	60
Çap (mm)	0,75	0,55	0,55	0,75
Narinlik (l/d)	40	55	65	80
Min. Çekme Day. (N/mm ²)	1200	1500	1500	1200
Birim Adet (lif/kg)	9000	16750	14530	4580

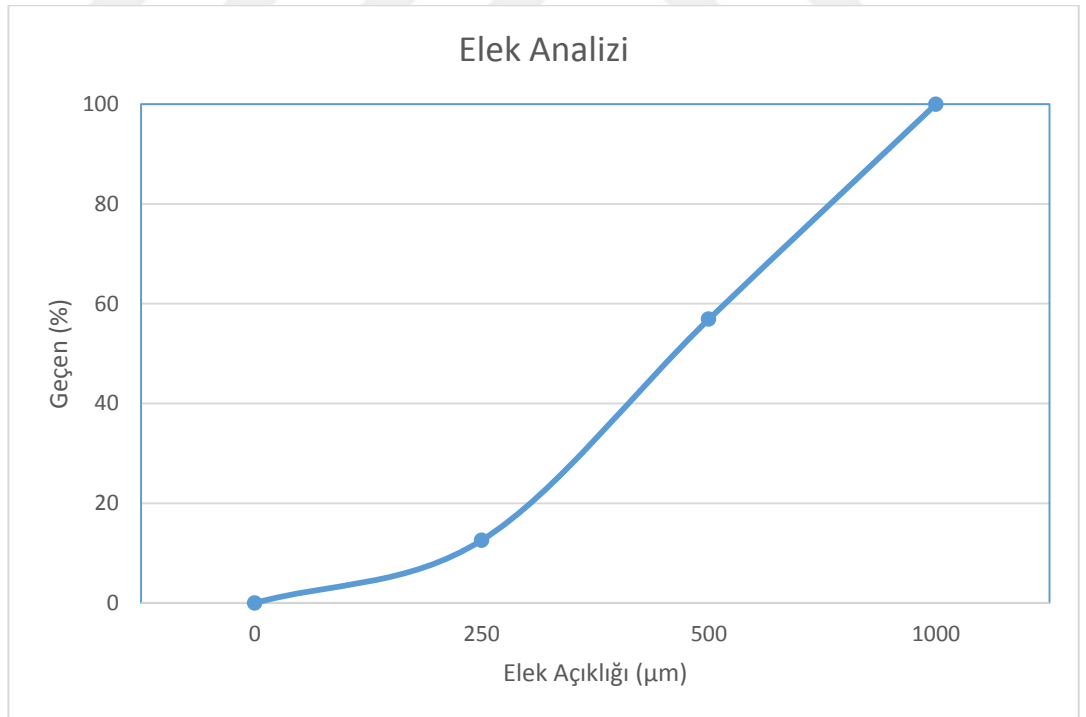
3.1.6. Agregalar

Betonun ana iskeletini oluşturan, toplam hacmin yaklaşık %60-80 oranlarında yer işgal eden mineral kökenli, taneli malzeme, agregalar olarak isimlendirilir. Agregalar elde edilmesine göre doğal ve yapay agregalar olarak ikiye ayrılır. Agregalar; suyun etkisi altında yumuşamamalı, dağılmamalı, çimentonun bileşenleri ile birlikte zararlı bileşikler meydana getirmemeli ve donatının korozyona karşı korunmasını tehlikeye düşürmemelidir.

Yıldız (2006), agregalarda aranan en önemli özellikleri aşağıdaki şekilde belirtmiştir:

- Sert, dayanıklı ve boşluksuz olmalı,
- Zayıf taneler içermemeli (deniz kabuğu, odun, kömür vb.),
- Basınca ve aşınmaya mukavemetli olmalı,
- Toz, toprak ve betona zarar verebilecek maddeler içermemeli,
- Yassı ve uzun taneler içermemeli,
- Çimento ile zararlı reaksiyona girmemeli,
- Agregada silt ve kil olmamalıdır.

SIFCON matrisinin en büyük özelliklerinden birinin de işlenebilirliğinin yüksek olması nedeniyle çalışmada max. dane çapı 1 mm olarak belirlenmiştir. Erzurum ili sınırları içerisindeki Horasan mevkiinden temin edilen yıkanmış agrega dere malzemesi olup max. agrega tane çapı 1 mm dir. Deneylerde kullanılan agreganın granülometri eğrisi Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Granülometri eğrisi

3.1.7. Diğer malzemeler

Beton numunelerinin kuru için kirece doymun su ortamının sağlanmasında sndrlmş torba kireç kullanılmış ve numunelerin kalıplardan kolayca çıkmasını sağlamak için kalıplara ince motor yağı srlmştir.

3.1.7.a. Deneylerde kullanılan aletler

Çalışmanın bu bölümünde deneylerde kullanılan aletler ve bu aletlerin özellikleri tanıtılacaktır.

1. Elekler

Deneylerde TS1227 ISO 3310-1 (2007)'ye uygun toplama kabı ile TS1226 ISO 3310-2 (2009)'ya uygun 1 mm göz açıklıklı kare delikli tel elek kullanılmıştır.

2. Betonyer

Deneysel çalışmalardaki numune betonlarının karılması işleminde, ELE firmasının ürettiği 135⁰ aı ile manevra yapabilen 60 dm³ kapasiteli, 25 devir/dakika karıştırma hızına sahip, düşey eksenli laboratuvar tipi betonyer kullanılmıştır (şekil 3.3).



Şekil 3.3. Betonyer

3. Kalıplar

Deneysel çalışmalar kapsamında sertleştirilmiş plastikten imal edilmiş, 15x15x15 cm boyutlarında küp kalıplar ve 7x7x28 cm boyutlarında prizmatik kalıplar kullanılmıştır. (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Kalıplar

4. Pres

Sertleşmiş beton numunelerinin basınç dayanımını belirlemek amacıyla, kapasitesi 300 ton olan, ELE marka AUTOTEST 3000 modeli hidrolik pres kullanılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Pres

5. Su kürü havuzu

Yapılan deneysel çalışmalarda kirece doymun durumdaki suyu $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de sabit tutulabilen, çevrim pompalı tam dijital su kürü havuzu kullanılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Su kürü havuz

3.2. Yöntem

Bu bölümde, agrega özelliklerinin belirlenmesinde uygulanan yöntemler, SIFCON üretiminde karışım seçeneklerinin belirlenmesi ve beton numunelerine uygulanan deney yöntemleri açıklanmıştır.

3.2.1. Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler

Deneylerde kullanılmak üzere laboratuvara getirilen yıkanmış ve elenmiş dere agregaları üzerinde yapılacak agrega deneyleri için numune alınması işleminde, TS EN 1097-3 (1999)'da belirtilen dörde bölerek küçültme (çeyrekleme) metodu kullanılmıştır. Bu metot gereği, laboratuardaki malzemenin tümünü temsil etmesi için yığının her tarafından alınan örnekler düz bir zemin üzerine her tarafı eşit ve çapı yüksekliğinin dört katı olan bir daire oluşturacak şekilde serilmiştir. Daha sonra bu dairesel yığın kürekle dörde bölünmüş, karşılıklı iki parçası atılıp, deneyler için yeterli miktarda örnek kalıncaya kadar çeyrekleme işlemine devam edilmiştir. Yapılan deneyde yıkanmış ve kurutulmuş malzeme elek takımına dökülmüştür. Elek takımı, TS EN 1227 ISO 3310-1 (2007) ve TS EN 1227 ISO 3310-2 (2009)'ye uygun toplama kabı, 0.25 mm, 0.5 mm, 1 mm, göz açıklıklı kare delikli düzenlenmiş elekler, tava ve kapaktan ibarettir.

Malzeme kaybına meydan vermemek için elek takımı tava ve kapak kullanılarak makine ile sarsılmıştır. Daha sonra sırayla büyük göz açıklıklı elekten başlamak üzere altına tava ve üzerine kapak konularak her bir elek takımından ayrılarak, elle tek tek eleme işlemine devam edilmiştir. Her elekten geçen malzeme elek setinde bulunan bir sonraki elek üzerine konularak işleme devam edilmiştir. Standartta göre eleme işlemi esnasında, bir dakika süre içerisinde elek üstü malzemede kütlece %1'den daha fazla değişiklik olmuyorsa eleme işleminin tamamlandığı kabul edilebilir. En büyük göz açıklığına sahip elek üzerinde kalan kısım tartılıp, kütlesi %1 hassasiyette R_1 olarak kayıt edilmiştir. Altındaki elekte kalan kısım için aynı işleme devam edilmiş ve kütlesi R_2 olarak kayıt edilmiştir. Elek takımındaki bütün eleklerde aynı işleme devam edilerek her bir elek üzerinde kalan numunelerin kütlesi $R_3, R_4 \dots R_i$ kayıt altına alınarak tartma

işlemine devam edilmiştir. Tavada kalan malzemede tartılıp kütlesi P olarak kayıt edilmiştir. Her bir elek fraksiyonunun kütlesi (R_i), orijinal kuru kütlenin (M_1) yüzdesi olarak hesaplanmıştır.

3.2.2. SIFCON karışım hesapları

Çalışmada, doğal dere agregası, Aşkale Çimento Fabrikasından temin edilen CEM I 42,5 R tipi çimento, ve BASF firmasınca üretilmiş olan polikarboksilik eter esaslı klor içermeyen yüksek oranda su azaltıcı özelliğine sahip yeni nesil süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi BASF MasterGlenium® ACE 450 ve Antalya Elektrometalürji İşletmesinden temin edilen silis dumanı kullanılmıştır.

SIFCON matrisi için standart bir karışım hesabı bulunmamaktadır. Matrisin lifler arasında tıkanmalara mahal vermeden ilerlemesi ve boşluksuz yapıyı sağlamak için gerekli akıcılığa sahip olması gerekmektedir. Bunun için de ince agrega kullanılması önem taşımaktadır.

Literatür taraması sonrası çalışmamız için karışım hesapları belirlenmiştir. Çimento dozajı sabit tutulmuş, silis dumanı, su/çimento oranı ve kullanılacak agrega miktarı değişken belirlenmiştir.

Çimento dozajı 800 kg sabit belirlenmiş, silis dumanı ise çimento ağırlığının %0, %5, %10 ve %15'i oranlarında kullanılmıştır.

Çelik lif hacimce %3, %6, %9 ve %12 oranlarında kullanılmış ve akışkanlaştırıcı kimyasal katkı tüm numuneler için sabit tutularak %1,5 oranında kullanılmıştır.

Çalışmada tüm sabit ve değişkenlere bağlı olarak toplam 16 grup numune hazırlanmıştır. Grupların içeriği Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Karışım oranlarını gösteren tablo

Grup No	Lif oranı	Narinlik	w/c	Silis
1	3%	40N	0,3	0
2	3%	55N	0,35	0,05
3	3%	65N	0,4	0,1
4	3%	80N	0,45	0,15
5	6%	40N	0,35	0,1
6	6%	55N	0,3	0,15
7	6%	65N	0,45	0
8	6%	80N	0,4	0,05
9	9%	40N	0,4	0,15
10	9%	55N	0,45	0,1
11	9%	65N	0,3	0,05
12	9%	80N	0,35	0
13	12%	40N	0,45	0,05
14	12%	55N	0,4	0
15	12%	65N	0,35	0,15
16	12%	80N	0,3	0,1

Yukarıda verilen oranlara bağlı olarak her bir grubun 1 m³ beton için malzeme miktarları çizelge 3.7’de verilmiştir.

Tüm seriler için karışıma giren malzeme miktarları hesaplanmış ve karışımlar hazırlanmıştır. Karışıma giren malzeme miktarları Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. SIFCON için malzeme miktarları (1 m³ beton için)

Grup No	Lif (kg)	Agrega (kg)	Çimento (kg)	Silis D. (kg)	Su (kg)	Akışkanlaştırıcı (kg)
1	240	940,05	800,00	0,00	240,00	12,00
2	240	938,39	800,00	40,00	294,00	12,60
3	240	936,65	800,00	80,00	352,00	13,20
4	240	934,80	800,00	120,00	414,00	13,80
5	480	937,70	800,00	80,00	308,00	13,20
6	480	938,12	800,00	120,00	276,00	13,80
7	480	937,17	800,00	0,00	360,00	12,00
8	480	937,39	800,00	40,00	336,00	12,60

Çizelge 3.7. (devam)

9	720	935,91	800,00	120,00	368,00	13,80
10	720	935,59	800,00	80,00	396,00	13,20
11	720	939,40	800,00	40,00	252,00	12,60
12	720	939,09	800,00	0,00	280,00	12,00
13	960	936,38	800,00	40,00	378,00	12,60
14	960	938,13	800,00	0,00	320,00	12,00
15	960	937,01	800,00	120,00	322,00	13,80
16	960	938,76	800,00	80,00	264,00	13,20

SIFCON matrisi hazırlanırken numune karışımları ağırlık olarak hesaplanmıştır.

Karışımındaki malzeme miktarları, karışıma ağırlık olarak konularak deney numuneleri üretilmiştir. 16 seri grup için toplam 48 numune hazırlanarak deneyler yapılmıştır.

3.2.3. SIFCON üretiminde izlenen sıra

Numuneler hazırlanırken daha önceden belirlenmiş ağırlıklara göre malzemeler hassas terazide tartımlar yapılarak hazırlanmıştır. Kalıplar numunelerin kolayca çıkarılabilmesi için yağlanmıştır. Lifler hazırlanan kalıplara ağırlıklarına göre yerleştirilmiştir. Önce çimento ve silis karıştırılmış daha sonra agrega eklenerek karıştırılmaya devam edilmiştir. Su ve akışkanlaştırıcı farklı bir kapta karıştırılarak daha önce hazırlanan agrega, silis dumanı, çimento karışımına eklenmiştir. Hazırlanan SIFCON matrisi daha önce numune kaplarına yerleştirilen liflerin üzerine vibrasyon uygulanarak emdirilmiştir.



Şekil 3.7. Çelik liflerin önceden kalıba yerleştirilmesi



Şekil 3.8. Kalıba yerleştirilmiş çelik lifler

3.2.4. Basınç ve eğilme dayanımı tayini yöntemi

Basınç dayanımları tüm numunelerde su kürü sonrası 28. günde belirlenmiştir. Beton zamana bağlı olarak şekil değiştirme gösteren bir malzeme olduğundan, yükleme hızı,

betonun basınç mukavemeti üzerinde etkili bir parametredir (Baradan 1991). Bu nedenle tüm numuneler sabit bir yükleme hızı altında deneye tabi tutulmuşlardır. TS EN 12390-3 (2010)'e bu değer 0,2 MPa/s ile 1,0 MPa/s arasında olmalıdır. Beton numunelerin kırılması işlemi, yükleme hızı 0,4 MPa/s seçilerek yapılmıştır.

Lif hacimleri, narinlik oranları, su/çimento oranları ve silis dumanı oranları farklı olan numunelerin basınç dayanımları bulunarak bu değişkenlerin basınç dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Betonun eğilme dayanımı tayini TS EN 12390-5 (2002) ve TS 10515 (1992) standartlarına göre bu deney metodunda açıklığın orta noktasından beton numunelerde basit kiriş metodu ile yapılmıştır. Eğilme dayanımları tayini için 70x70x280 mm'lik kiriş numuneleri üretilmiştir. Eğilme dayanımı, aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$F=3PL/2bd^2$$

F: Eğilme dayanımı, MPa

P: En büyük yük, N

L: Mesnetler arası açıklık, mm

b,d: Numunenin en kesiti, mm

3.2.5. Taguchi metodu

Geleneksel deney tasarımında, bir faktör değiştirilirken diğer bütün faktörler sabit tutulur. Deney tasarımındaki faktör ve seviyeler arttıkça yapılacak deney sayısı da artacaktır. Dolayısıyla böyle bir tasarımın pratikte yapılması çok mümkün olmayacaktır. Aynı zamanda, faktörler arasında iç etkileşimin olması durumunda, geleneksel deney tasarımına göre bulunan optimum şartlar, gerçek optimum şartlar olmayabilir. Deney

tasarım tekniklerinden biri olan Taguchi Metodu sistematik dizaynlarda optimizasyon için başarılı bir şekilde uygulanmaktadır (Bayrak 2007).

Taguchi metodu yüksek kalite sistemlerinin tasarımı için kullanılan iyi bir araçtır. Bu metod performans ve kalite tasarımlarını optimize etmek için sistematik bir yaklaşım sağlar. Bu yöntem kullanılarak yapılacak optimizasyonlar 8 adımda gerçekleştirilir.

1. Değerlendirilecek parametrelerin belirlenmesi
2. Bu parametrelere ait seviyelerin ve mümkün olan iç etkileşimlerin belirlenmesi
3. Uygun orthogonal dizisinin belirlenmesi
4. Ortogonal diziye dayanarak deney sonuçlarının metoda uyarlanması
5. Performans istatistiklerinin hesaplanması
6. Performans karakteristikleri kullanılarak sonuçların varyans analizi ile değerlendirilmesi
7. Optimum seviyelerin seçilmesi
8. Sonuçların doğrulanması

Taguchi tasarımında optimizasyon kriteri olarak performans istatistiği (S/N) kullanılmaktadır. En büyük – en iyi, nominal – en iyi ve en küçük – en iyi olmak üzere üç çeşit performans istatistiği vardır. Deneylerden elde edilen veriler kullanılarak S/N değerleri, en büyük en iyi (the bigger the better) performans istatistiği S/N baz alınarak (3.1) eşitliğine göre hesaplanmıştır.

$$S / N_L = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right] \quad (3.1)$$

Burada;

S/N_L : Performans istatistiği

n : Bir deney kombinasyonunda yapılan tekrar sayısı

Y_i : i. deneyin performans istatistiğidir.

SN_L'yi maksimum yapan parametre seviyeleri optimumdur. Ancak Taguchi Metoduna optimum parametre seviyelerini veren deney yapılmamış olabilir. Dolayısıyla optimum şartlara karşılık gelen performans değeri aşağıdaki modelden yararlanılarak tahmin edilebilir.

$$Y_t = \mu + X_i + e_i \quad (3.2)$$

Burada;

- μ : Performans değerinin genel ortalaması,
- X_i : Deneydeki parametre-seviye kombinasyonun sabit etkisidir.
- e_i : i. deneydeki rastsal hata

DeneySEL sonuçlara bağlı olarak hesaplanan bu Y_t değeri bir nokta tahminidir. Dolayısıyla yapılan doğrulama deneylerinin sonuçlarının anlamlı olup olmadıklarını belirleyebilmek için belirli bir hata seviyesinde güven aralığı oluşturulmalıdır. Seçilen hata seviyesindeki güven aralığını ise,

$$\mu \pm \sqrt{F_{\alpha;1,DF_{MSe}} MS_e \left[\frac{1+m}{N} + \frac{1}{n_i} \right]} \quad (3.3)$$

bağıntısıyla hesaplanır (Ross 1988).

Burada;

- F : Tablo değeri,
- α : Hata seviyesini,
- DF_{MSe} : Hata kareler ortalamasının serbestlik derecesi toplamını,
- m : Ortalama tahmininde kullanılan parametrelerin serbestlik dereceleri
- n_i : Yapılan doğrulama deneylerinin tekrar sayısını göstermektedir.

Bu çalışmada L16 ortogonal dizisi seçilmiştir. Buna göre oluşturulan deney planı, çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8. L16 ortogonal dizisi

Deney No	Narinlik (l/d)	Lif (%)	w/c	SF (%)
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

Bu deney planında kullanılan parametre ve seviyeleri Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Parametre ve seviyeler

Narinlik (l/d)	Lif (%)	w/c	SF (%)
40	3	0,30	0
55	6	0,35	5
65	9	0,40	10
80	12	0,45	15

Bu deney planına göre üretilen basınç ve eğilme deney sonuçları bir sonraki bölümde detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde basınç ve eğilme deneylerinden elde edilen sonuçlar Taguchi Metoduna göre değerlendirilerek verilmiştir. Bu sonuçlar, çizelge ve grafiklerle desteklenerek daha anlaşılabilir bir hale getirilmiştir. Ayrıca sonuçlar, literatür ve ilgili standartlarla verilerle de karşılaştırma imkanı sağlanmıştır.

4.1. Basınç Dayanımı Deneyi Bulguları

Metot bölümünde anlatıldığı gibi üretilen numuneler üzerinde yapılan taze beton deneylerinin sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Taze beton basınç deneyi sonuçları

Deney No	Narinlik (l/d)	Lif %	w/c	Silis Dumanı %	Basınç Mukavemeti MPa	Performans İstatistiği (S/N)
1	40	3	0,3	0	59,69	35,518
2	40	6	0,35	5	51,22	34,189
3	40	9	0,4	10	62,91	35,974
4	40	12	0,45	15	53,27	34,529
5	55	3	0,35	10	79,49	38,006
6	55	6	0,3	15	77,63	37,800
7	55	9	0,45	0	59,63	35,509
8	55	12	0,4	5	73,76	37,356
9	65	3	0,4	15	70,82	37,003
10	65	6	0,45	10	58,81	35,389
11	65	9	0,3	5	44,00	32,869
12	65	12	0,35	0	24,14	27,655
13	80	3	0,45	5	62,46	35,911
14	80	6	0,4	0	20,83	26,374
15	80	9	0,35	15	14,85	23,435
16	80	12	0,3	10	20,40	26,193
					ORTALAMA	33,357

Çizelge 4.1'deki performans istatistikleri kullanılarak elde edilen ortalama S/N etkilei Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. S/N etkileri çizelgesi

Ortalama S/N Etkileri				
	Narinlik (l/d)	Lif (%)	w/c	SF (%)
1. Seviye	35,052	36,609	33,095	31,264
2. Seviye	37,168	33,438	30,821	35,081
3. Seviye	33,229	31,947	34,176	33,890
4. Seviye	27,978	31,433	35,335	33,191

Ortalama S/N etkileri kullanılarak basınç mukavemetini maksimum yapan koşullar ve performans tahminleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

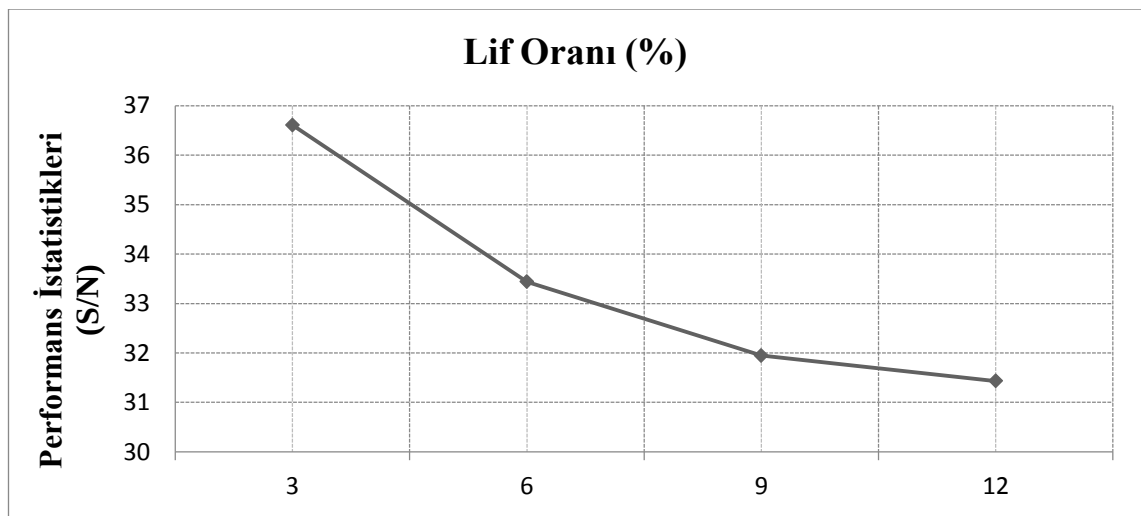
Çizelge 4.3. Performans tahminleri çizelgesi

Faktörler	Seviyeler	Parametrelerin S/N'e olan Katkısı
Narinlik	2	3,811
Lif	1	3,253
Su/Bağlayıcı	4	1,978
Silis Dumanı	2	1,724
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		10,766
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		33,357
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N)		44,123
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (MPa)		43,270 / 145,72
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		41,674 - 46,5713

Çizelge 4.3'te optimum seviyelerin 2, 1, 4, 2 olduğu görülmektedir. Bununla birlikte basınç mukavemeti üzerine en çok etkisi olan parametrenin narinlik olduğu, bunu sırasıyla, lif oranı, su/bağlayıcı oranı ve silis dumanı oranı izlemektedir. Deney planına çizelge 4.3'e bakıldığında optimum seviyedeki kombinasyonun olmadığı görülmektedir. Sonucu doğruluğunu %95 güven aralığında test etmek gerekmektedir. Bu amaçla optimum seviyeleri içeren karışım numunesi dökülmüş ve 145,72 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Bu sonuca karşılık gelen S/N değeri 43,27'dir. %95 güven seviyesinde bu değerin 41,67 ile 46,57 arasında olması gerekmektedir. Yapılan doğrulama deneyi sonucu optimum seviyeler %95 güven seviyesinde doğru olduğu söylenebilir (Çizelge 4.3).

4.2. Basınç Mukavemeti Sonuçlarının Değerlendirilmesi

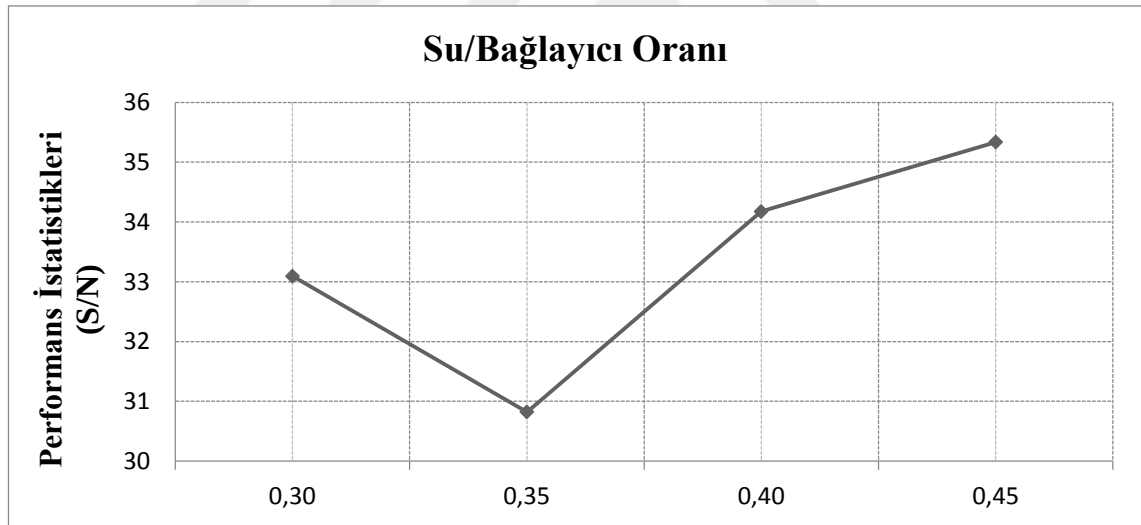
Sonuçlara incelendiğinde, 28 günlük basınç mukavemetlerinde 55 narinlik oranı (2. seviye), %3 lif oranı (1. seviye), 0,45 su/bağlayıcı oranı (4. seviye) ve %5 silis dumanı oranında (2. seviye) maksimum mukavemetin elde edildiği görülmektedir. Farklı karışım oranlarındaki her bir numune grubu üzerinde yapılan basınç deneylerinde, parametrelerin mukavemet üzerine etkileri Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Lif oranı performans istatistikleri

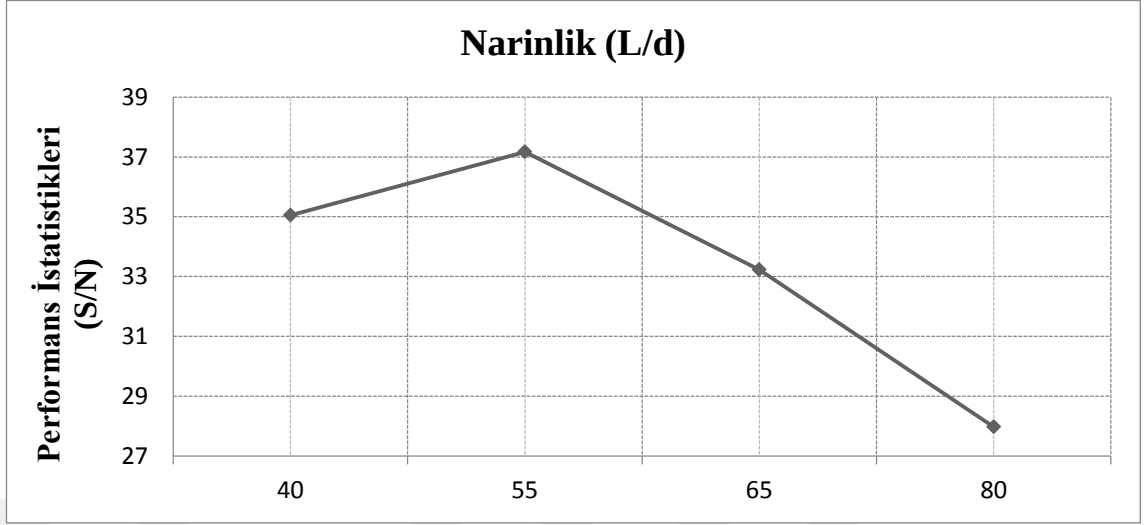
Lif oranının artması SIFCON matrisinin lif içerisine tam olarak emdirilememesine ve bu sebeple boşlukların oluşmasına neden olmuştur. Dolayısıyla lif oranının artmasıyla basınç mukavemetinde azalma meydana gelmiştir. Acun 2000; Yıldırım; 2002 yaptıkları çalışmalarda benzer olarak çelik lif oranının artmasıyla basınç mukavemetinde azalma bulmuşlardır. Yine Aslan (1993), yaptığı çalışmada lif oranının artması ile basınç dayanımının ± 25 gibi bir artış veya azalma sağladığı, bazı araştırmalarda ise liflerin basınç dayanımına bir etkisi olmadığını söylemiştir.

Yaka (2011) Lif miktarının basınç dayanımı üzerindeki etkileri hem olumlu hem de olumsuz yönde olduğunu belirtmiştir. Sebep olarak, betona ilave edilen liflerin betonun işlenebilirliğini azalttığı veya beton içerisindeki dağılımının ve yöneliminin etkisi sonucu olabileceğini belirtmiştir.



Şekil 4.2. Su/bağlayıcı oranı performans istatistikleri

Su/bağlayıcı oranının artmasıyla matrisin işlenebilirliği artmış ve boşluklar azalmıştır. Bu nedenle basınç mukavemetinde artış gözlenmiştir.

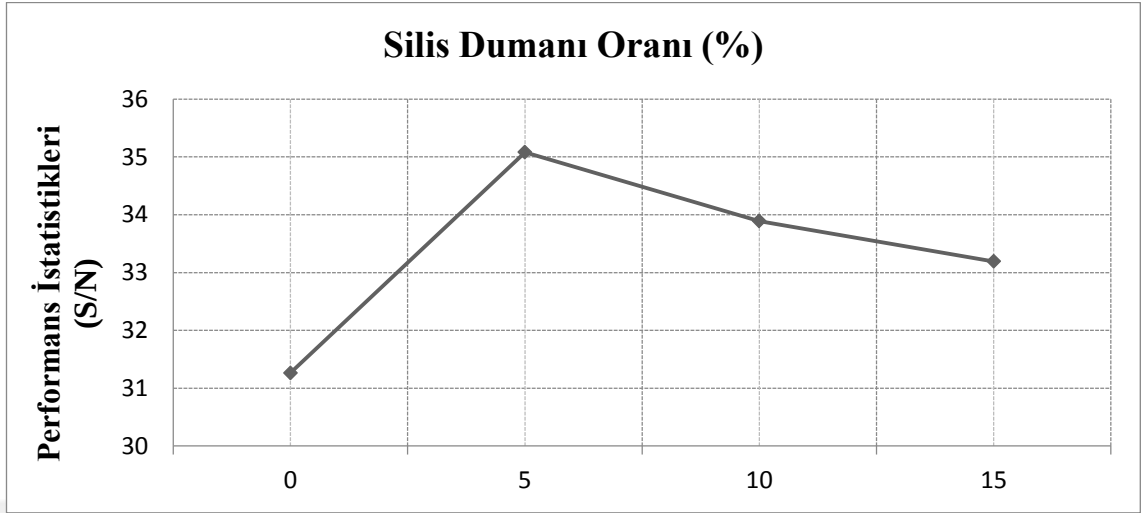


Şekil 4.3. Narinlik performans istatistikleri

Optimum durumda narinliğin 2, seviyesi olan 55 narinlikte basınç mukavemeti maksimum olmuştur. Bu narinlikten sonra işlenebilirliğin azalması nedeniyle boşluklar artmış ve basınç mukavemetinde düşme gözlenmiştir. Şekil 4.4'te %12 lif oranında ve 80 narinlikteki çelik liflerin matris emdirilmeden önceki durumu görülmektedir.



Şekil 4.4. Küp numune için hazırlanmış %12 lif oranında ve 80 narinlikteki çelik lifler



Şekil 4.5. Silis dumanı oranı performans istatistikleri

Optimum şartlarda silis dumanının 2. Seviyesi olan %5 bulunmuştur. Silis dumanının karışım içerisinde bulunması basınç mukavemetine arttığı bilinen bir durumdur (Mak and Tori 1995; Xu and Chung 1999). Ancak çimentodan daha ince bir malzeme olan silis dumanı karışımındaki su ihtiyacını artırarak işlenebilirliği azaltmaktadır. Şekil 4.5'ten görüldüğü üzere silis dumanının tüm seviyeleri kontrol numunesinden yüksek basınç mukavemetine sahiptir. Bunu yanında silis dumanının diğer seviyeleri kendi içlerinde karşılaştırıldığında %5 silis dumanı oranında en yüksek basınç mukavemeti elde edilmiş olmasına karşın %15 silis dumanı oranında ise en düşük basınç mukavemeti elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak yukarıda açıklandığı gibi çok ince malzeme olan silis dumanının karışımındaki su ihtiyacının artırarak işlenebilirliği azaltması, boşlukların artması dolayısıyla basınç mukavemetinin azalması şeklinde söylenebilir. Bayrak (2002) çalışmasında silis dumanının çok yüksek puzolanik aktiviteye sahip olduğunu, puzolanik aktivitesi, yüksek silis içeriği ve çok ince tane yapısından dolayı su ihtiyacının fazla olduğunu belirtmiştir.

Silis dumanı çok ince yapısından dolayı boşlukları azaltarak ve puzolanik özelliklerinden dolayı basınç mukavemetini önemli ölçüde arttırmaktadır. Fakat herhangi bir su azaltıcı katkı malzemesi kullanılmaz ise karışımın su ihtiyacı artacaktır. Bu durumda istenen akıcılığı elde etmek için daha fazla su gerekebilir.

4.3. Eğilme Dayanımı Deneyi Bulguları

Metot bölümünde anlatıldığı gibi üretilen numuneler üzerinde yapılan taze beton deneylerinin sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Taze beton deney sonuçları

Deney No	Narinlik (l/d)	Lif %	Su / Bağlayıcı	Silis Dumanı %	Eğilme Mukavemeti MPa	Performans İstatistiği (S/N)
1	40	3	0,3	0	7,23	17,177
2	40	6	0,35	5	10,95	20,784
3	40	9	0,4	10	10,75	20,632
4	40	12	0,45	15	14,79	23,401
5	55	3	0,35	10	18,04	25,122
6	55	6	0,3	15	20,56	26,260
7	55	9	0,45	0	19,14	25,639
8	55	12	0,4	5	22,31	26,970
9	65	3	0,4	15	18,79	25,479
10	65	6	0,45	10	23,13	27,285
11	65	9	0,3	5	21,89	26,803
12	65	12	0,35	0	17,73	24,972
13	80	3	0,45	5	24,94	27,939
14	80	6	0,4	0	16,65	24,426
15	80	9	0,35	15	19,09	25,614
16	80	12	0,3	10	26,63	28,509
					ORTALAMA	24,813

Çizelge 4.4'deki performans istatistikleri kullanılarak elde edilen ortalama S/N etkileri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Ortalama S/N etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	Narinlik	LİF %	W/C	SF (%)
1. Seviye	20,498	23,929	24,687	23,053
2. Seviye	25,998	24,689	24,123	25,624
3. Seviye	26,135	24,672	24,376	25,387
4. Seviye	26,622	25,963	26,066	25,188

Ortalama S/N etkileri kullanılarak eğilme mukavemetini maksimum yapan koşullar ve performans tahminleri Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Performans tahminleri

Faktörler	Seviyeler	Parametrelerin S/N’e olan Katkısı
Narinlik	4	1,809
Lif	4	1,150
Su/Bağlayıcı	4	1,253
Silis Dumanı	2	0,811
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		5,022
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		24,813
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N)		29,835
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (MPa)		29,98 / 31,58
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		28,456 - 31,22

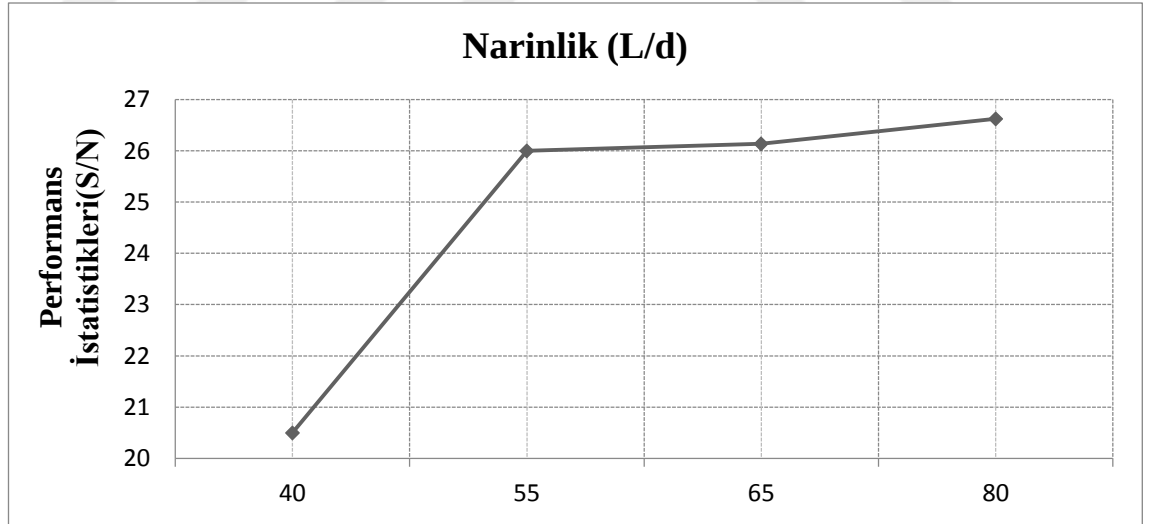
Çizelge 4.6’da optimum seviyelerin 4,4,4,2 olduğu görülmektedir. Bununla birlikte eğilme mukavemeti üzerine en çok etkisi olan parametrenin narinlik olduğu, bunu sırasıyla su/bağlayıcı oranı, lif oranı ve silis dumanı oranı izlemektedir. Deney planına bakıldığında Çizelge 4.6’da optimum seviyedeki kombinasyonun olmadığı

görülmektedir. Sonucu doğruluğunu %95 güven aralığında test etmek gerekmektedir. Bu amaçla optimum seviyeleri içeren karışım numunesi dökülmüş ve 31,58 MPa eğilme dayanımı elde edilmiştir. Bu sonuca karşılık gelen S/N değeri 29,98'dir. %95 güven seviyesinde bu değerin 28,46 ile 31,22 arasında olması gerekmektedir. Yapılan doğrulama deneyi sonucu optimum seviyeler %95 güven seviyesinde doğru olduğu söylenebilir (Çizelge 4.6).

Eğilme Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Sonuçlar incelendiğinde, 28 günlük eğilme mukavemetlerinde 80 narinlik oranı (4. seviye), %12 lif oranı (4. seviye), 0,45 su/bağlayıcı oranı (4. seviye) ve %5 silis dumanı oranında (2. seviye) maksimum mukavemetin elde edildiği görülmektedir.

4.4. Eğilme Mukavemeti Deneyi Bulguları

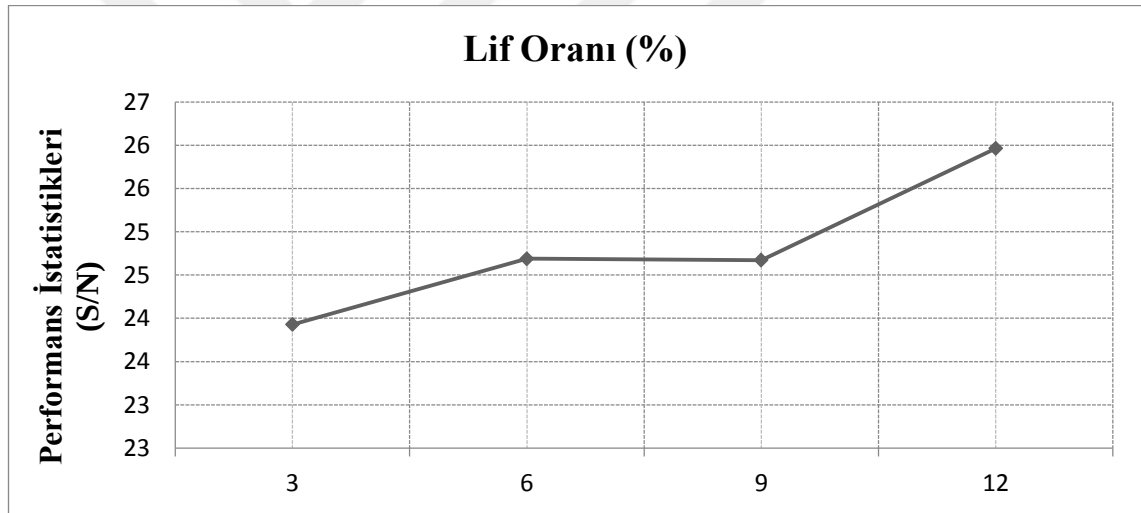


Şekil 4.5. Narinlik istatistikleri

Numunelere yapılan deneyler sonucu narinlik arttıkça eğilme mukavemetinin belirgin şekilde arttığı gözlenmiştir. Literatürde, Taşdemir vd (2012) Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı üzerine yaptıkları çalışmada çelik telin narinliği arttıkça

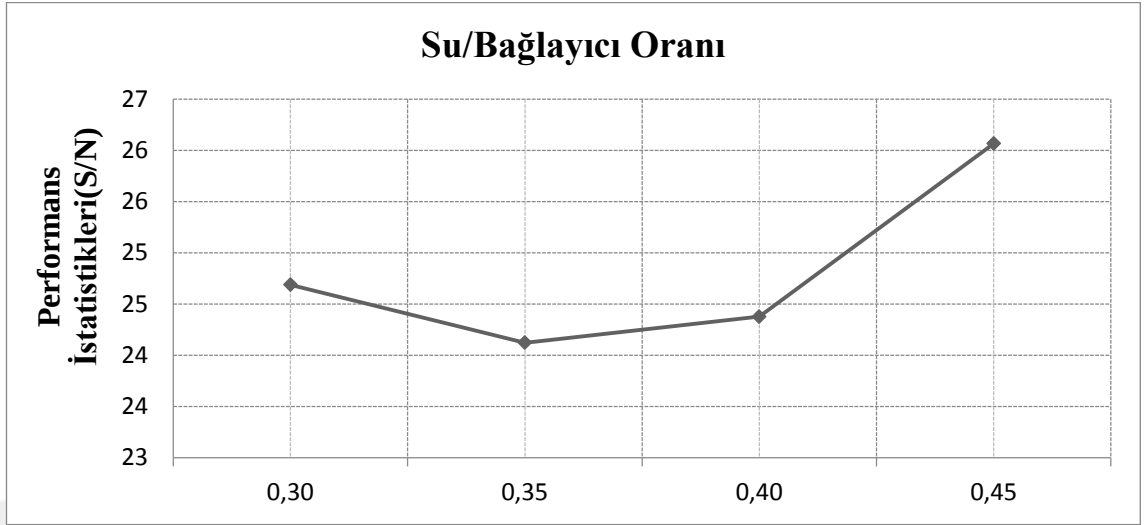
daha yüksek eşdeğer eğilme dayanımı değerleri elde edildiği bulmuşlardır. Bunun nedeni olarak, çelik telin narinliği ve içeriğinin artmasıyla yüksek kırılma enerjisine sahip olacağı ve sonuçta yüksek süneklikten dolayı eğilme mukavemetinin artacağı söylenebilir (Bayramov vd 2002; Bulutlar 2006; Bedirhanoğlu vd 2007; Taşdemir vd 2012; M.A. vd 2013).

SIFCON'un mukavemetinin normal betonlara göre yüksek olmasının sebebi ince taneli yapısı sayesinde lifler ile güçlü bir aderans yaparak çelik liflerin yüksek mukavemete sahip SIFCON içerisinden sıyrılmasının güçleştirilmesi ve buna bağlı olarak eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu değerinin artmasıdır (Canbay 2014).



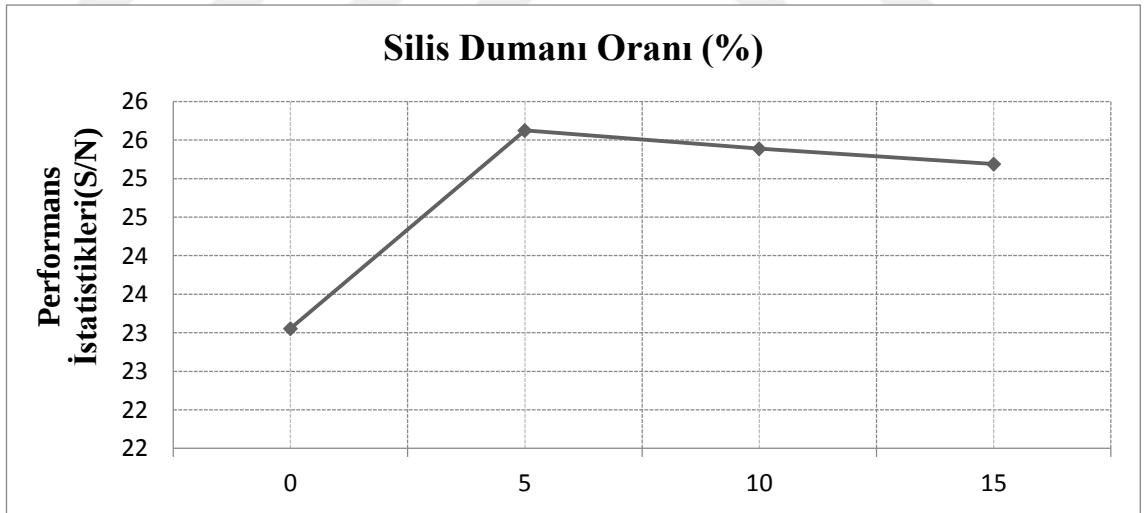
Şekil 4.6. Lif oranı istatistikleri

Yollarda meydana gelen gerilmeler için basınç mukavemetinden ziyade eğilme mukavemeti daha fazla önem kazanmaktadır. Çünkü plaklar halinde dökülen beton yollarda doğal zeminin çökmesi durumunda plak bir kiriş gibi çalışarak gelen yüklere karşı koymaktadır. Optimum şartlarda maksimum eğilme mukavemetine %12'lik lif oranı durumunda ulaşılmıştır. SIFCON'un en belirgin özelliği eğilme durumundaki davranışdır. Yolum tamamına yakınında eğilme yüküne maruz kalır. SIFCON'un üretim tekniği itibarıyla yapısında bulundurduğu yüksek lif oranı eğilme mukavemetinin yüksek olmasının en belirgin sebebidir (Bulutlar 2006).



Şekil 4.7. Su/bağlayıcı oranı istatistikleri

Su/bağlayıcı oranının artmasıyla matrisin işlenebilirliği artmış ve boşluklar azalmıştır. Bu nedenle eğilme mukavemetinde artış gözlenmiştir.



Şekil 4.8. Silis dumanı oranı istatistikleri

Silis dumanının ince olması nedeni ile matrisin emdirilmesini sağlamış ve boşluk oranını düşürerek boşlukları azaltmıştır. Bu nedenle eğilme mukavemetinde artış gözlenmiştir. Silis dumanının %5'ten fazla kullanılması durumunda daha fazla su gerektiği için sağladığı fayda nötrlenmiştir. %5 kullanım sonrası silis dumanının

kullanılması eğilme mukavemetini çok fazla etkilemediği gözlenmiştir. %5' ten sonra kullanımı mukavemeti çok fazla düşürmemesi nedeni ile atık malzeme olan silis dumanının kullanılması maliyet açısından avantaj sağlayacaktır.



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Beton yollar, yüksek yük taşıma kapasitesi ve düşük bakım masraflarından dolayı ağır trafik yüklerine maruz olan havaalanları ve otoban ağları gibi yollarda giderek artan bir kullanım alanı bulmaktadır. Yol kaplaması olarak kullanılan betonun görevi trafikten gelen şiddetli tekil yükleri tabana iletme ve bu sırada tabanın deforme olmamasını sağlamaktır. Bir tekerlek yükü beton plaktan geçerken çekme, basınç ve eğilme gerilmeleri oluşur. Beton basınca dayanıklı ancak eğilmeye karşı zayıf bir yapı malzemesidir. Eğilme dayanımını artırmak için birçok çalışma yapılmıştır. SIFCON'un eğilme mukavemetinin yüksek olmasından dolayı çalışmamızda beton yol kaplamalarının SIFCON ile üretilmesi irdelenmiştir. Bunun için 4 farklı narinlikte ve oranda çelik lif, 4 farklı su/bağlayıcı oranı ve 4 farklı oranda silis dumanı kullanılarak yol betonları üretilmiştir. Deney tasarımı olarak Taguchi Metodu kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Maksimum basınç mukavemeti (optimum şartlarda) 146 MPa ile 55 narinlik değerinde bulunmuştur.
- Narinlik oranının artması ile basınç mukavemetinde azalma belirlenmiştir.
- Lif oranının artması matrisin emilimini zorlaştırdığından basınç mukavemetinde azalma meydana gelmiştir.
- Su/bağlayıcı oranının artması işlenebilirliği artırdığından yoğun lif içeriğine sahip SIFCON'un basınç mukavemetinin artmasına neden olmuştur.
- Silis dumanı eklenmesinin basınç mukavemeti üzerine olumlu etkisi gözlemlenmiştir. Ancak %5 in üzerindeki oranlarda basınç mukavemetinde nispeten azalma görülmüştür. Bu da %5 - %15 arasında silis dumanı eklenmesinin basınç mukavemetinden bir parça ödün vererek benzer sonuçlar alınacağı anlamına gelmektedir.
- Basınç mukavemeti üzerine en etkili parametrenin lifin narinliği olduğu, en az etkisi olan parametrenin ise silis dumanı katkısı olduğu belirlenmiştir.

- Maksimum eğilme mukavemeti (optimum şartlarda) 32 MPa ile 80 narinlik değerinde bulunmuştur.
- Narinlik oranının artması ile eğilme mukavemetini arttırmıştır.
- Lif oranının artması eğilme mukavemetinde artma meydana getirmiştir.
- Su/bağlayıcı oranının artması işlenebilirliği artırdığından yoğun lif içeriğine sahip SIFCON' un eğilme mukavemetinin artmasına neden olmuştur.
- Silis dumanı eklenmesinin eğilme mukavemeti üzerine olumlu etkisi gözlemlenmiştir. Ancak %5 in üzerindeki oranlarda basınç mukavemetinde nispeten azalma görülmüştür. Bu da %5 - %15 arasında silis dumanı eklenmesinin basınç mukavemetinden bir parça ödün vererek benzer sonuçlar alınacağı anlamına gelmektedir.
- Eğilme mukavemeti üzerine en etkili parametrenin lifin narinliği olduğu, en az etkisi olan parametrenin ise silis dumanı katkısı olduğu belirlenmiştir.
- SIFCON ile üretilen yol betonlarının tasarımında Taguchi Metodunun kullanılabilirliği, sonuçların mevcut literatürle örtüşmesi neticesinde söylenebilir.

Beton yolların tasarımında trafik, iklim koşulları, taban zemininin taşıma gücü, beton plağın mekanik özellikleri gibi faktörler dikkate alınmaktadır. Bu çalışmada sadece trafik yüklerine dikkat edilerek basınç ve eğilme gerilmeleri belirlenmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda iklim şartlarına bağlı olarak gelişen termal yükler dikkate alınarak ısı iletkenlik ve donma çözülme gibi parametreler dikkate alınarak araştırmalar yapılabilir.

Yapılan deneysel çalışmalarda SIFCON matrisinin boşluk yapısını azaltmak için işlenebilirliğinin önemi anlaşılmış olup kullanılacak agrega boyutunun azaltılması yönünde araştırmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Acun, S., 2000, Yüksek dayanımlı beton üretiminde dizayn parametresi olarak lifsel katkıların irdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 153s.
- Ağar, E., Süttaş, İ. ve Öztaş, G. 1996. "Asfalt Kaplama İle Beton Yol Karşılaştırılması" THBB Hazır Beton Dergisi, Beton Yollar Özel Eki, 38-44
- Ağar, E., Süttaş, İ. ve Öztaş, G., 1998. Beton Yollar, 1. Baskı, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, 339, İstanbul
- Akter, M., Hossain, M., Boyer J. ve Parcells W. J., 2002. Factors Affecting Rapid Roughness Progression on Portland Cement Concrete Pavements in Kansas, TRB,1809.
- Altoubat, S. A., Roesler, J.R., Lange, D. A., Rieder, K. A., 2006 "Simplified Method for Concrete Pavement Design with Discrete Structural Fibers" Construction and Building Materials,
- Apak D., Bekaroglu N.,1961. "Karayollarımızda Beton Kaplamalar Hakkında Ekonomik Kıyaslamalar"., Karayolları Teknik Bülteni, s,101-117.,
- Arslan A., 1993, Çelik lifli betonların özellikleri ve kullanım potansiyeli, Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi, 369, 29-30
- Arslan, M., Subaşı, S., Durmuş, G., Can, Ö., Yıldız, K., 2007 Beton Yol Kaplamalarında Alternatif Beton ve Yapım Yöntemi Araştırmaları, Gazi Üniversitesi, Ankara,
- Atalay F ., 1962 "Her sınıf Trafiği Taşıyan Yol ve Caddelere Ait Beton Kaplamaları İçin Proje Esasları", T.C. Bayındırlık Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları No: 106, s. 71
- Balendran R.V., Zhou F.P., Nadeem A., ve Leung. A.Y.T. "In uence of steel "bres on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete"Building and Environment 37, pp. 1361 – 1367, 2002
- Baradan, B., Yazıcı H. ve Ün H., 2002. Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite). Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, Yayın no 298, 282s, İzmir.
- Bayrak, O.Ü., 2007. Rijit Üstyapı Tasarımına Yeni Bir Yaklaşım. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Bedirhanoglu, İ., İlki, A., Candan, Y., Taşdemir M.A. 2007.Çelik Lif İçeriği, Sıcak Kür ve Lif Korozyonunun Çimento Esaslı Yüksek Performanslı Kompozitlerin Mekanik Davranışına Etkisi
- Bulutlar, Y.A., 2006 Çelik Tel İçeriğinin ve Dayanımının Sifcon'un Mekanik Davranışına Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Can, Ö., Durmuş, G., Subaşı, S., Yıldız, K. ve Arslan, M., 2009, Lif katkılı betonların aşınma direnci üzerindeki etkileri, 5.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük.
- Canbay M., 2014. Çelik Ve Polipropilen Lıfların Yalın ve Konbinasyonlu Olarak Sifcon'da Kullanılması Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Çivici, F., 2006. Çelik Lif Donatılı Betonun Eğilme Tokluğu, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12, 2, sf. 183-188.
- Demirboğa, R., 1999. Silis dumanı ve uçucu külün perlit ve pomza ile üretilen hafif betonun özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Edis, E., 2007, Asfalt ve beton kaplamalı yolların maliyet yönünden karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya, 85s.
- Erdoğan, T.Y., 2003. Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş., Ankara
- Ezeldin, A., S., Balaguru, P., N., Normal and High Strenght Fiber - Reinforced Concrete Under Compression, Journal of Materials in Civil Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, s.178, 1988
- <http://www.cement.ca/cement.csf>
- Karpuz O. , 2008. Beton Yol Karışımındaki İnce Agreganın Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Lankard, D.R., 1985. Preparation, Properties and Applications of Concrete - Based Composites Containing 5% to 20% Steel Fiber, Steel Fiber Concrete, US-Sweden Joint Seminar, pp. 199-217.
- Macit, S., 2009. Beton Yol İnşaatında Kendiliğinden Yerleşen Beton'un Kullanılması Üzerine Bir Araştırma Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon
- Puyan, M.S. ,2003. Beton yollarda Çatlak Denetimi. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne
- Rao H. S., Ghorpade V.G., Ramana N.V., Ganeswar K., 2010. Response of SIFCON two – way slabs under impact loading. International Journal of Impact Engineering, (37), 452–458
- Shah, S., P., Rangan, B., V., Fiber Reinforced Concrete Properties, ACI Journal, s. 126-135, 1971
- Sharma, H.K., Singh, V.P., 2008 Performance Characteristics Sifcon Plates. 2nd IASME / WSEAS International Conference on GEOLOGY and SEISMOLOGY (GES'08), Cambridge, UK,
- Svermova, L. ve Bartos, P.J.M., 2002. Development of insitu SIFCON for connections in precast concrete and seismic resistant structures. 27th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES, Singapore.
- Şimşek, O., Erdal, M. ve Sancak, E., 2005, Silis dumanının çelik lifli betonun eğilme dayanımına etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(2), 211-215,
- Taşdemir, M. A., Bayramov, F., Kocatürk, A.N., Yerlikaya, M., 2004 Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelismeler, Beton2004 Kongresi, İstanbul, sf. 1-34
- Taşdemir, M.A., Bayramov, F. , 2002. Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı. İTÜ Dergisi, Cilt 1 (Sayı 2), 125 – 144.
- Taşdemir, M.A., Şengül, Ö. ve Şengül, C., 2013 “Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı”, Beton 2013, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, s. 1 – 28

- Tokyay, M., Ramyar, K. ve Turanlı, L., 1991, Polipropilen ve çelik lifli yüksek dayanımlı betonların basınç ve çekme yükleri altındaki davranışları, 2. *Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, s.303-311.
- Topçu, İ.B. ve Boğa, A.R., 2005, Uçucu kül ve çelik liflerin beton ve beton borularda kullanımı, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 18(2), 1-14,
- Tunç,A., 2001. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayınları, İstanbul
- Umar, F., Açar, E., 1991. Yol Üstyapısı, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası Yayını, İstanbul.
- Ünal, O., Uygunoğlu, T. ve Gençel O., 2006, Çelik liflerin beton basınç ve eğilme özelliklerine etkisi, *Pamukkale Üniversitesi ve Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1), 23-30,
- Ünal. B, 2003 Çelik Tel Ve Polipropilen Lif İçerikli Beton Yolların Mekaniksel Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri
- Yaka S, 2011. Konya Bölgesi Agregaları İle Çelik Lif Kullanarak Üretilen Yol Betonlarının Mekanik Özelliklerinin incelenmesi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya
- Yan, A., Wu, K., Zhang, X. , 2002 *Cement and Concrete Research* 32 (2002) s.1371–1375
- Yazıcı. H, Yiğitler Aydın.S, Baradan. B, 2005 Autoclaved SIFCON with high volume Class C fly ash binder phase, *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 481 – 486
- Yeğinobalı,A. , 2002 Niçin Beton Yol ? , Çinemto ve Beton Dünyası Dergisi, 6.sayıAnonim, 2002. Cement Association of Canada Web Sitesi,
- Yerlikaya, M., 2003. “Çelik Tel Donatılı Betonların Deprem Etkisi Altında Davranışları”, Kocaeli Deprem Sempozyumu Bildiriler Kitabı. Sf. 302-304.
- Yıldız, E., 2006.Farklı Tipteki Puzolanların Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

Erzurum’da 1981 yılında doğdu. İlk, orta, lise eğitimini Erzurum’da tamamladı. 2000 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2004 yılında mezun oldu. 2012 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Özel sektörde çalışmaya devam etmektedir.

