

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇELİK LİFLERİN HAFİF BETONLARIN DAYANIMLARI
ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

105313

Oğuz Akın DÜZGÜN

Yönetici: Prof. Dr. Rüstem GÜL

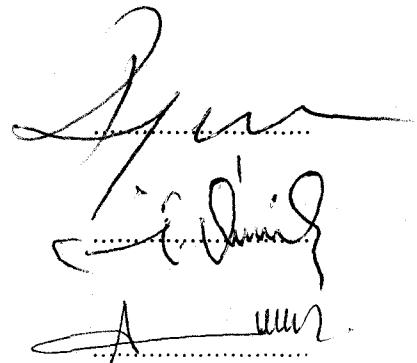
105313

Yüksek Lisans Tezi

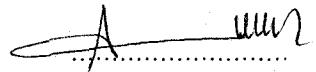
T.C. YÜKSEK ÖĞRETİM KURULU
DOKTORANTASYON MERKEZİ

JURİ ÜYELERİ

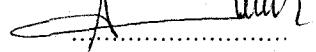
Prof.Dr.Rüstem GÜL



Prof.Dr.İbrahim ÖRÜNG



Yrd.Doç.Dr.Ayla AMİL



24.08.2001 tarihinde **24/204** kararla kurulan jürimiz işbu **Y.Lisans**
tezini **25.09.2001** tarihinde kabul etmiştir.

ÖZET

Hafif agregat kullanılarak üretilen betonlar; hafiflik, depreme karşı dayanıklılık, ekonomi, ısı ve ses izolasyonu ve ateşe karşı dayanıklılık gibi üstün özelliklere sahip betonlardır. Ayrıca betona lif ilave edilmesinin betonun özellikleri üzerinde olumlu etkilerinin olduğu bilinen bir husustur. Türkiye'nin zengin hafif agregat rezervleri de göz önünde bulundurulduğunda hafif betonlarda lif kullanılmasının betonun özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesinin gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Yukarıda kısaca belirtilen nedenlerden dolayı bu çalışmada, dozaj (300 kg/m^3) sabit tutulmuş, normal agregat hacimce % 25, % 50, % 75 ve % 100 oranlarında azaltılarak yerine Van'ın Erciş ilçesinden ve Erzurum'un Pasinler ilçesinden temin edilen pomza ilave edilmiştir. Elde edilen her bir karışımı da yine hacimce % 0, % 0.5, % 1.0 ve % 1.5 oranlarında, 60 mm uzunluğunda ve 0.80 mm çapında çengelli çelik lif ilave edilerek $3 \pm 1 \text{ cm}$ sabit çökme değerine sahip betonlar üretilmiştir. Üretilen betonların her birinin taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri belirlenmiş ve daha sonra kontrol numunelerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmak suretiyle pomza ile üretilen hafif beton karışımımlarına çelik lif ilave edilmesinin betonun özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek amaçlanmıştır. Pomzanın başta Erzurum ve Van olmak üzere Doğu Anadolu Bölgesinin bir çok yerinde, özellikle briket yapımında kullanılması bu malzemenin hafif agregat olarak tercih edilmesinde etkili olmuştur.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar, karışımındaki çelik lif oranının artmasının betonun birim ağırlığını fazla etkilemediğini, fakat basınç mukavemetini, çekme mukavemetini, eğilme mukavemetini, elastisite modülünü, ve deformasyon yapabilme kabiliyetini artırdığını göstermiştir. Sonuç olarak hafif agregatlı betonlarda çelik lif kullanılmasıyla, bir yapı elemanında aranan hafiflik, ısı ve ses izolasyonu, ve mukavemet gibi özellikler aynı anda sağlanmış olur. Böylelikle yapının ağırlığı azaltılarak daha ekonomik çözümler gerçekleştirmek mümkün olur.



SUMMARY

Concretes, made up from lightweight aggregates, have superior properties such as lightness, economy, sound and thermal insulation, and resistance to earthquake and, resistance to fire. Furthermore it is known that addition of steel fibers into the concrete affects its properties affirmatively. When we take into account the rich lightweight aggregate resources in Turkey, investigating the effects of fiber addition on the properties of the lightweight concrete arises as a need.

Because of the reasons mentioned above in this study, the dosage was taken constant at 300 kg/m³, natural aggregate was reduced 25, 50, 75, and 100 % by volume and then pumice from Erciş, Van, and from Pasinler, Erzurum was used instead of natural aggregate. 60 mm in length and 0.8 mm in diameter hooked-end steel fibers were added into the each mix in the ratio of 0, 0.5, 1.0, and 1.5 % by volume and concretes, which have 3 ± 1 cm constant slump, were produced. The properties of fresh and hardened concretes were determined and then these were compared with the control specimens. By this way investigating the effect of adding steel fibers on the concrete properties was aimed. The reason of preferring pumice as lightweight aggregate in this study is the use of pumice in East Anatolian Region widely especially in briquet production.

The test results obtained in this study have indicated that the increase in steel fiber ratio in the mixes doesn't affect the unit weight significantly, but increases compressive strength, splitting – tensile strength, flexural strength, modulus of elasticity, and deformation capability. As a result by using steel fiber in lightweight aggregate concretes the properties, which are desirable in a structural member such as lightness, sound and thermal insulation, and strength can be obtained at the same time. Thus more economic solutions may be possible by reducing dead loads.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her safhasında ilgi, teşvik ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Rüstem GÜL' e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, fikirlerinden ve dokümanlarından faydalandığım sayın Arş. Gör. Dr. Ramazan DEMİRBOĞA'ya, sayın Arş. Gör. Remzi ŞAHİN'e, sayın Arş. Gör. A. Cüneyt AYDIN'a, özellikle deneysel çalışmalar safhasında kıymetli vakitlerini ve yardımlarını esirgemeyen sayın Arş. Gör. O. Ünsal BAYRAK'a, sayın Arş. Gör. A. Ferhat BİNGÖL'e, sayın Nihat ARIFOĞLU'ya, sayın Yenal VANGÖLÜ'ye, malzeme özelliklerinin tayininde yardımlarını esirgemeyen sayın Arş. Gör. Murat YEŞİLYURT'a ve sayın Arş. Gör. M. Emin ARZUTUĞ'a, çalışmada kullanılan çelik liflerin temininde her türlü kolaylığı gösteren sayın Mehmet YERLİKAYA'ya ve BEKSA Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasına, başta İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri ve Tatbiki Mekanik Laboratuarı personeli olmak üzere çalışmada emeği geçen herkese teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
SUMMARY	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	5
2. 1. Hafif Agregalar, Hafif Betonlar ve Çelik Lifli Betonların Genel Özellikleri	5
2. 1. 1. Hafif Agregaların Genel Özellikleri	5
2. 1. 1. a. En Büyük Tane Boyutu	6
2. 1. 1. b. Tane Şekli ve Yüzey Yapısı	6
2. 1. 1. c. Özgül Ağırlık ve Dayanıklılık (Sağlamlık)	7
2. 1. 1. d. Birim Ağırlık	7
2. 1. 1. e. Boşluk Oranı ve Su Emme	8
2. 1. 1. f. Granülometrik Bileşim ve İncelik Modülü	8
2. 1. 1. g. Dona Dayanıklılık	9
2. 1. 1. h. Zararlı Maddeler	9
2. 1. 2. Hafif Betonların Genel Özellikleri	10
2. 1. 2. 1. Hafif Betonların Sınıflandırılması	11
2. 1. 2. 1. a. Taşıyıcı Hafif Betonlar	11
2. 1. 2. 1. b. Yarı Taşıyıcı Hafif Betonlar	11
2. 1. 2. 1. c. Yalıtım Özelliği Olan Hafif Betonlar	11
2. 1. 2. 2. Hafif Betonlarda Karışım Oranlarının Belirlenmesi ve Betonun Üretimi ..	13
2. 1. 2. 3. Taze Beton Özellikleri	14
2. 1. 2. 3. a. Birim Ağırlık	14
2. 1. 2. 3. b. İşlenebilirlik	15
2. 1. 2. 3. c. Hava Miktarı	15

Sayfa

2. 1. 2. 4. Sertleşmiş Beton Özellikleri	15
2. 1. 2. 4. a. Kuru Birim Ağırlık	15
2. 1. 2. 4. b. Basınç ve Çekme Mukavemeti	16
2. 1. 2. 4. c. Elastisite Modülü ve Poisson Oranı	16
2. 1. 2. 4. d. Isı İletkenlik	17
2. 1. 2. 4. e. Su Emme	17
2. 1. 3. Çelik Lifli Betonların Genel Özellikleri	17
2. 1. 3. 1. Çelik Lifli Betonların Karışım Esasları ve Üretim Teknikleri	20
2. 1. 3. 2. Çelik Liflerin Beton İçerisindeki Davranışı	22
2. 1. 3. 3. Çelik Lifli Betonların Özellikleri	23
2. 1. 3. 3. a. Taze Beton Özellikleri	24
2. 1. 3. 3. b. Sertleşmiş Beton Özellikleri	24
2. 1. 3. 4. Çelik Lifli Betonların Tipik Kullanım Alanları	26
2. 2. Hafif Betonlar ve Çelik Lifli Betonlar ile İlgili Yapılan Bazı Çalışmalar	29
 3. KULLANILAN MALZEMEMLER	37
3. 1. Doğal Hafif Agrega	37
3. 2. Normal Agrega	37
3. 3. Çelik Lif	37
3. 4. Çimento	38
3. 5. Karışım Suyu	39
3. 6. Diğer Malzemeler	39
 4. METOD	40
4. 1. Agrega Deneylerinde Uygulanan Yöntemler	40
4. 2. Beton Seçeneklerinin Belirlenmesi	42
4. 3. Karışım Hesapları	43
4. 4. Betonun Üretilmesi	52
4. 5. Taze Beton Deneylerinde Uygulanan Yöntemler	53

Sayfa

4. 6. Sertleşmiş Beton Deneylerinde Uygulanan Yöntemler	54
4. 7. Sonuçların Değerlendirilmesinde Kullanılan Metod	61
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI	63
5. 1. Agrega Deneyleri Sonuçları	63
5. 1. a. Elek Analizi Deneyi	63
5. 1. b. Gevşek Birim Ağırlık Deneyi	67
5. 1. c. Organik Madde Tayini Deneyi	67
5. 1. d. İnce Madde Oranı Tayini	68
5. 1. e. Sülfat Miktarı Tayini Deneyi	69
5. 1. f. Klorür Miktarı Tayini Deneyi	69
5. 1. g. Dona Dayanıklılık Deneyi	70
5. 1. h. Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini Deneyi	70
5. 1. i. Özgül Ağırlık Faktörü Tayini Deneyi	71
5. 2. Taze ve Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları	71
6. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	73
6. 1. Agrega Deneyleri ile İlgili Değerlendirmeler	73
6. 2. Beton Deneyleri ile İlgili Değerlendirmeler	76
6. 2. 1. Taze Beton Deneyleri ile İlgili Değerlendirmeler	76
6. 2. 2. Sertleşmiş Beton Deneyleri ile İlgili Değerlendirmeler	79
6. 2. 2. 1. Çelik Lif ve Hafif Agreganın Betonun Birim Ağırlığına Etkisi	82
6. 2. 2. 2. Sonuçların Basınç Mukavemeti Açısından Değerlendirilmesi	87
6. 2. 2. 2. a. Çelik Lif ve Hafif Agrega Oranının Mukavemet Üzerindeki Etkisi	87
6. 2. 2. 2. b. Basınç Mukavemeti – Birim Ağırlık İlişkisi	92
6. 2. 2. 2. c. Basınç Mukavemeti – Elastisite Modülü İlişkisi	93
6. 2. 2. 2. d. Gerilme – Şekil Değiştirme (Deformasyon) İlişkisi	95
6. 2. 2. 3. Sonuçların Yarmada-Çekme Mukavemeti Açısından Değerlendirilmesi	96
6. 2. 2. 4. Sonuçların Eğilme Mukavemeti Açısından Değerlendirilmesi	100

Sayfa

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	104
KAYNAKLAR	106

1. GİRİŞ

Beton, genel olarak çimento, su, agregat, ve gerektiğinde katkı maddelerinin homojen olarak karıştırılmasından oluşan, başlangıçta plastik kıvamda olup, zamanla sertleşerek mukavemet kazanan bir yapı malzemesidir.

İlk olarak 1824'de Portland çimentosunun bulunması betonda yeni gelişmeleri de beraberinde getirmiştir. Özellikle 1850'li yıllarda Coignet ve Monier (1) tarafından yapılan çalışmalarda beton içeresine çelik çubuklar yerleştirmek suretiyle yeni bir malzeme elde edilmiştir. Betonarme denilen bu malzeme, yapı malzemesi olan betonun uygulama alanlarını oldukça genişletmiştir. Beton özellikle yük altındaki davranışını, ekonomik oluşu ve kolay işlenebilirliği nedeniyle diğer yapı malzemelerine oranla çok büyük kullanım alanı bularak, dünyada en yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesi haline gelmiştir (2). Buna karşılık, betonun yüksek ısısı dayanamaması, gerekli tedbirlerin alınmamasıyla ısısı ve rutubeti geçirmesi, sökülp tekrar kullanılma imkanından yoksun olması, tamirinin zor veya olanaksız olması betonun mahzurlu taraflarını oluşturmaktadır (3, 4).

Normal betonların bu mahzurlu taraflarını giderebilmek, daha ekonomik ve kullanışlı betonlar elde etmek için yeni betonlar üretme yoluna gidilmiştir (5). Bu amaçla üretilmiş beton türlerinden birisi de hafif betonlardır.

Hafif beton üretimindeki asıl amaç ısi izolasyonu bakımından gerekli malzeme elde etmektir. Ancak malzemenin hafif oluşu asıl amaca paralel olarak daha pek çok yararlar sağlar (3, 6). Hafif betonların yapılarda kullanılmasıyla yapıların tüm ağırlığında önemli bir azalma sağlanır. Yükün azalmasıyla taşıyıcı elemanların kesit boyutlarını küçültmek mümkün olur. Ayrıca temel ile ilgili problemler çok daha kolay çözümlenir. Bütün bunların sonucunda da yapının maliyeti azalmış olur. Fakat hafif betonlar asıl olarak betonarme yapıların depreme dayanıklılığını artırması bakımından yararlı işlev görürmektedir. Hafif betonların kullanılmasıyla, yapının kendi ağırlığının azalmasından dolayı deprem sırasında daha küçük dinamik kuvvetler oluşur. Bu dinamik kuvvetlerin küçük olması yapıda oluşturdukları gerilmelerin de küçülmesine neden olur. Böylelikle depreme karşı dayanıklılık da artmış olur (7).

Ancak hafif betonların bu faydalarının yanı sıra boşluk oranının fazlalığı, mukavemetinin geleneksel betona göre daha düşük olması, yüksek rötre göstermesi ve yerlestirmede daha fazla özen istemesi gibi sakıncalı tarafları da bulunmaktadır. Fakat yeterli basınç mukavemetinin sağlanması şartıyla hafif betonlar geleneksel betonların yerine kullanılabilmektedir. Böylece hafif betonların düşük birim ağırlığı ve yüksek ısı yalıtımı gibi üstün özelliklerinden yararlanılmaktadır (8).

Hafif betonların taşıyıcı amaçlı kullanımını ancak ikinci dünya savaşından sonra yaygınlaşmıştır. Gelişmiş ülkelerde çok katlı binaların yapımı hızlandıça, hafif beton için uygulamaya yönelik girişimlerde artmıştır. Zamanla görülmüştür ki, ölü yükün tasarımda ana belirleyici faktör olduğu yapıarda (uzun açıklıklı viyadükler, köprüler gibi), hafif beton kullanımının sayısız avantajları ortaya çıkmaktadır. Günümüzde gelişmiş ülkelerde hafif beton kabuklu çatı sistemlerinde, gökdelenlerde, ön gerilimli betonlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bilindiği gibi Türkiye'nin büyük bir bölümü deprem kuşağı içerisinde yer almaktadır. Sadece bu durum bile Türkiye'de taşıyıcı hafif beton kullanımının yaygınlaştırılması için yeterli bir sebeptir (9).

Türkiye dünyanın en zengin ve kaliteli hafif agregat yataklarına sahiptir ve yüzölçümünün yaklaşık beşte birini volkanik kayaçlar oluşturmaktadır (10). MTA Genel Müdürlüğü yaptığı çalışmalarda Türkiye'de yaklaşık 2.8 milyar m³ (görünür + muhtemel + mümkün) pomza rezervinin bulunduğu bilidirmektedir. Bu rezervin de genellikle Nevşehir, Kayseri, Ağrı, Kars, Van, Bitlis, Isparta, Burdur ve Muğla illerinde yataklanma gösterdiği belirtilmektedir (11). Ülkemizde atıl durumda bulunan bu kaynağın hafif beton üretiminde kullanılarak değerlendirilmesi, enerji sorununun giderek önem kazandığı günümüzde toplumsal refahı artırmak açısından oldukça önemlidir.

Çeşitli yapısal uygulamalar için basınç etkisi altındaki mekanik davranışını elverişli olan yapı malzemelerinin çekme ve eğilme etkisi altındaki davranışçı çoğu zaman uygun olmamaktadır. Bu tür malzemelerin uygun olmayan mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi yapı mühendislerinin uğraşlarının başında gelmiştir (12).

Bilindiği gibi betonarme betonundaki donatıların yapı elemanları içerisindeki yerlerinin ve miktarının tespiti işlemi, buna ilave olarak da bu donatıların yapım sırasında yerleştirilmesi işlemi inşaat süresini ve maliyeti etkileyen faktörlerdendir. Özellikle zaman kaybından dolayı araştırmacılar daha avantajlı yapı malzemeleri arama yoluna gitmişlerdir. Başka bir deyişle hem basınç, hem çekme ve hem de eğilme mukavemeti yüksek olan ve salt metal yapı malzemelerinden daha ekonomik olan farklı bir yapı malzemesi aranmaya başlanmıştır. Bu arayışlar neticesinde lifli beton teknolojileri ortaya çıkmış ve gelişmiştir (12).

Gerçekte 4500 yıl öncesinden beri yapı malzemesi olarak kullanılan saman takviyeli kıl harçının (kerpiç) esin kaynağı olduğu lifli betonlarla (12) ilgili ilk çalışmalar 1962'de A.B.D.'de James Romualdi tarafından yapılmıştır. Bu araştırmaların ümit verici sonuçları bir çok araştırmacıyı bu konuya yöneltmiştir. Bu araştırmacıların, çalışmaları neticesinde lifli beton, geleneksel betona göre üstün özellikleri deneyelik çalışmalarla ispatlanmış bir yapı malzemesi olarak ortaya çıkmıştır (13).

Lifli betonların üretilmesindeki ana amaç malzemenin eğilme mukavemeti, tokluğu, darbe mukavemeti gibi zayıf mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelikir (10).

Bugüne kadar lifli betonlar üzerinde bir çok araştırma yapılmış ve liflerin betonun mekanik özellikleri üzerinde çok olumlu sonuçlar verdiği deneylerle ispatlanmıştır. Özellikle liflerin betonun eğilme mukavemetinde önemli bir artış sağladığı deneylerle belirlenmiştir (14).

Hafif inşaat malzemelerinin deprem, ekonomi, ısı ve ses izolasyonu, ateşe karşı dayanıklılık gibi bir çok problemi birlikte halletmesi ve bu hafif malzemelerin başında gelen pomzanın bölgemizde büyük miktarda bulunması, betona lif ilave edilmesinin betonun özellikleri üzerindeki olumlu etkileri, hafif beton karışımılarına lif ilave edilmesinin betonun özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılmasının gerekliliğini göstermektedir.

Yukarıda kısaca belirtilen nedenlerden dolayı bu çalışmada dozaj (300 kg/m^3)'de sabit tutularak normal agrega farklı oranlarda (hacimce % 25, % 50, % 75, ve % 100)

azaltılarak yerine Van'ın Erciş ilçesinden ve Erzurum'un Pasinler ilçesinden temin edilen pomza ilave edilmiştir. Elde edilen her bir karışımı da belirli oranlarda (hacimce % 0, % 0.5, % 1.0, ve % 1.5) çengelli çelik lif ilave edilerek toplam 16 grup karışım elde edilmiştir. Bu karışımların her bir özelliği için üç numuneden elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınmıştır. Bu çalışmada, üretilen numunelerin işlenebilirlik, birim ağırlık gibi taze haldeki özellikleri ile 7 ve 28 günlük basınç mukavemeti, çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, ve kuru birim ağırlık gibi sertleşmiş haldeki özellikleri belirlenmiştir. Sonuç olarak bu çalışmanın temel amacı; pomza ile üretilen hafif beton karışımılarına çelik lif ilave edilmesinin betonun özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek ve bazı öneriler getirmektir. Pomzanın başta Erzurum ve Van olmak üzere Doğu Anadolu Bölgesi'nin bir çok yerinde özellikle briket yapımında kullanılması bu malzemenin hafif agregat olarak tercih edilmesinde etkili olmuştur.

Türkiye topraklarının % 92'sinin deprem kuşağı içerisinde bulunması, nüfusun % 96'sının da bu kuşağa giren bölgelerde yaşaması bu konu üzerinde önemle eğilmenin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde hafif agregalar, hafif betonlar, çelik lifli betonların genel özelliklerinden, ve bu konuya ilgili yapılmış çalışmalardan bahsedilmiştir.

2. 1. Hafif Agregalar, Hafif Betonlar ve Çelik Lifli Betonların Genel Özellikleri

2. 1. 1. Hafif Agregaların Genel Özellikleri

Beton üretiminde kullanılan hafif agreya; su, çimento ve gerektiğinde katkı maddeleriyle karıştırılarak hafif beton imalinde kullanılan, gevşek birim ağırlığı en fazla 1200 kg/m^3 olan kırılmış veya kırılmamış gözenekli inorganik agregadır (15).

Hafif agregalar genel olarak doğal ve yapay olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar (8, 15, 16). Bu iki grubu da beş gruba ayırmak mümkündür (14, 16, 17):

- Doğal hafif agregalar: pomza, volkanik cüruf, diatomit ve tuf
- Doğal malzemelerden üretilen yapay hafif agregalar: genleştirilmiş kıl, şist, arduvaz ve perlit
- Endüstriyel atıklardan oluşan hafif agregalar: yüksek fırın cürufu, uçucu kül
- Endüstriyel atıkların işlenmesiyle üretilen hafif agregalar: genleştirilmiş cüruf
- Organik kökenli hafif agregalar: bitki ve ağaç parçacıkları

Günümüzde beton imalinde kullanılan çimentonun standartlaştırılmış olması ve suyun kalitesine de bağlı olarak beton özelliklerine etki edeceğinin bilinmesi nedeniyle beton kalitesini etkileyen faktörlerden agreya özelliklerinin öncelikle belirlenmesi gereklidir. Aksi halde özellikleri tam olarak bilinmeyen bir agre ile üretilerek betondan istenilen faydanın sağlanması mümkün olmaz (5).

Hafif agregalar normal agregalara oranla daha yüksek su emme, daha düşük ısı iletimi, daha düşük mukavemet ve birim ağırlık değerlerine sahiptirler (8).

Hafif beton üretimi bakımından hafif agregaların en önemli özellikleri granülometri bileşimi, birim ağırlığı, tane şekli ve yüzey yapısı ile su emme oranıdır (8).

2. 1. 1. a. En Büyük Tane Boyutu

Betonu oluşturacak agreGANın en büyük tane büyÜklÜgü, betonun kullanılaçğı yapı elemanının cinsi ve en dar kesitinin boyutu dikkate alınarak seçildiğinden (18) ve ayrıca en büyük agrega boyutu betonun işlenebilirliğini, iri – ince agrega oranını, çimento miktarını ve betonun mukavemetini etkilediğinden (5, 19) oldukça önemli bir parametredir. Hafif aggregaların maksimum tane boyutları normal aggregaların tane boyutlarına göre daha küçÜktür. En büyük tane boyutları genellikle 10 mm ile 19 mm arasında değişmektedir (16, 19).

2. 1. 1. b. Tane Şekli ve Yüzey Yapısı

Beton üretiminde kullanılacak aggregaların küreye yakın, yani her yönde yaklaşık aynı boyutta olan geometrik bir şekle sahip olması istenir. Böylece aynı agrega yiğini daha iyi bir şekilde yerleşir ve taneler arasındaki boşluk en aza iner (6). İstenen bu geometriden farklı olan taneler kusurlu taneler sınıfına girmektedir. Bu kusurlu tanelerin karışımında fazla miktarda olması agreGANın, dolayısıyla da betonun kompasitesini önemli derecede azaltır (7).

Agregalar ile çimento hamuru arasında kuvvetli bir aderansın olması betonun mukavemetinin artmasına neden olmaktadır. Agrega tanesi ile çimento hamuru arasında oluşan aderansa en çok etki eden agrega yüzeyinin pürüzlülüğüdür. Pürüzlülük fazla ise çimento hamuru ile agrega taneleri arasında geniş bir temas yüzeyi oluşur, ve böylece agreGANın yüzeyinde bulunan girinti ve çıkışılara çimento hamurunun girmesi aderansı artırır. Bu nedenle betonda kullanılan aggregaların yüzey yapılarının pürüzlü olması istenir (7).

Hafif aggregaların tane şekli ve yüzey yapısı, aggregaların kaynaklarına ve üretim şeKillerine bağlı olarak oldukça değişiklik göstermektedir. Tane şeKilleri kübik, sivri, küresel, köşeli veya düzensiz olabilmektedirler. Yüzey yapıları ise küçük gözenekli ve oldukça düzensiz büyük gözenekler arasında değişir. (5, 16, 19).

2. 1. 1. c. Özgül Ağırlık ve Dayanıklılık (Sağlamlık)

Bir agreganın özgül ağırlığı; agrega ağırlığının, gerçek eşdeğer su hacminin ağırlığına oranıdır (20). Agregaların özgül ağırlıkları jeolojik kökenlerine bağlı olarak değişir (3, 6). Hafif aggregaların özgül ağırlıkları boşluklu bir yapıya sahip olmalarından dolayı normal aggregaların özgül ağırlıklarından daha küçük değerler almaktadır (19). Normal aggregaların özgül ağırlıkları genellikle $2.2 - 2.7 \text{ kg/dm}^3$ arasında değişirken (7, 20) hafif aggregaların özgül ağırlıkları normal aggregaların özgül ağırlıklarının yaklaşık $1/3 - 2/3$ 'ü arasında değişmektedir (19).

Dayanıklılık (Sağlamlık); agreyanın hava tesirlerine, özellikle donma – çözülmeye, kuruma ve ıslanmaya, aşındırıcı etkilere ve su hareketlerine karşı göstermiş olduğu dirençtir. Dayanıklılık agreyanın gözenekli oluşuna, su emme oranına ve gözenek yapısına bağlıdır. Çünkü agreyanın su emmesi yüksek olduğunda donma anında agreya içindeki suyun hacminin genişlemesi için yeterli miktarda boşluk olmayacağından agreyanın bünyesinde çatlama, parçalanma veya ufalanma meydana gelecektir (5).

2. 1. 1. d. Birim Ağırlık

Belirli bir hacmi dolduran agrega ağırlığının bu hacme oranı birim ağırlık olarak tanımlanmaktadır. Agregaların birim ağırlık değerlerinin yüksek veya düşük olması; agreyanın granülometrisi, kusurlu madde yüzdesi, yerleştirme şekli, agreyanın özgül ağırlığı ve agreyanın su içeriği gibi bir çok faktöre bağlıdır. Granülometrisi düzgün, kusurlu malzeme oranı az, özgül ağırlığı fazla ve iyi yerleştirilmiş aggregaların birim ağırlıkları da fazla olur (7, 8, 20).

Agregaların özgül ağırlık değerleri agreyanın jeolojik kökenine bağlıken, birim ağırlık değerleri üzerinde kökenden çok agreyanın şekli etkili olur. Yuvarlak, nispeten küresel aggregalarda yerleşme daha iyi olduğundan birim ağırlık değeri de yüksek olur (3, 6).

Beton üretiminde kullanılacak hafif aggregaların gevşek birim ağırlıkları ince, iri ve karışık haldeki aggregalar için sırasıyla 1200 kg/m^3 , 1000 kg/m^3 , ve 1100 kg/m^3 'den fazla olmaması gerekmektedir (15).

2. 1. 1. e. Boşluk Oranı ve Su Emme

Agrega taneleri içindeki boşluklar aggrega özelliğini önemli derecede etkiler. Hafif tanelerin boşluk oranı en önemli özelliklerinden birisidir. Boşluk oranı arttıkça aggrega hafifleşir (8).

Normal ve hafif agregalar arasındaki en önemli fark, hafif aggregaların boşluklu yapısı nedeniyle daha fazla oranda su emmesidir. Normal aggregaların su emme oranları kuru ağırlıklarının % 1 – 2’si iken, hafif aggregalarda bu oran % 5 – 20’si arasında değişmektedir (16, 19).

Beton üretimi sırasında karışımı ilave edilen hafif aggrega şayet kuru ise karıştırma esnasında eklenen suyu hızla emerek işlenebilirliği oldukça düşürebilmektedir (17). Bu nedenle hafif aggrega karışımı ilave edilmeden önce bir ön ıslatma işlemine tabi tutulmalıdır (5, 21).

Zhang ve Gjorv (1991), Avrupa’da oldukça fazla kullanılan hafif aggrega türlerinden olan genleştirilmiş kil ve sinterlenmiş uçucu kül üzerinde yaptıkları 30 dakikalık su emme deneylerinde su emmenin önemli bir kısmının (yaklaşık % 60’ı) genellikle ilk iki dakika içinde gerçekleştiğini belirlemiştir (22).

2. 1. 1. f. Granülometrik Bileşim ve İncelik Modülü

Agregayı oluşturan taneler değişik boyutlardadır. Ancak bir aggrega örneğinde belirli büyüklüklerdeki taneler daima belirli miktarlarda bulunur. Granülometri bileşimi, aggrega içinde boyutları belirli limitler içinde kalan tanelerin ne oranında olduğunu gösterir (20). Aggrega granülometrisi üretilen betonun özellikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir (8).

Beton üretiminde kullanılacak aggreganın boyutsal dağılımı, üretilmek istenen beton için gereken nitelikleri sağlamalıdır. Bu amaçla kullanılmadan önce aggreganın granülometrik bileşiminin deneylerle saptanıp, belirli sınırlar içinde kalıp, kalmadığı kontrol edilmelidir (20). Granülometrik bileşimi iyi yapılmış bir aggregadan üretilerek

betonda boşluk oranı minimuma iner ve boşlukları doldurmak için daha az çimento kullanılır (5, 16).

Granülometrik bileşim üzerine yapılan çalışmaların sonucunda ideal granülometri eğrileri bulunmuştur. İdeal granülometrinin amacı, gerçekleştirilebildiği oranda minimum boşluklu bir agrega karışımı elde etmektir. Fakat doğadaki agregalar ham durumda bu ideal granülometrilere uymadıklarından bu doğal aggregaları belirli oranlarda karıştırarak ideal granülometrilere yaklaşımak gereklidir (6).

Agregaların granülometrik bileşimini daha pratik şekilde gösteren bir diğer karakteristik de incelik modülüdür. Fakat incelik modülü aggreganın granülometrik bileşimini yeterli derecede belirten bir karakteristik olmadığından, bize ancak aggreganın granülometrik bileşimi hakkında kaba bir fikir vermektedir. Bir agrega yığınında taneler inceleşikçe incelik modülünün değeri küçülür, taneler irileşikçe incelik modülünün değeri büyür (5, 7, 20).

2. 1. 1. g. Dona Dayanıklılık

Üretilen betonun donma olayı sonucunda parçalanmasında en önemli rol aggrega taneleri tarafından oynanmaktadır. Agregaların donma etkisi altında parçalanmaları bu malzeme ile üretilen betonların don etkisinden zarar görmesine neden olmaktadır. Böyle bir durumun olmaması için beton üretiminde kullanılacak aggregaların donma etkisine karşı dayanıklı olması gereklidir ki bu da ancak deneylerle anlaşılır (7, 20).

Bir aggreganın boşluk oranı ve su emme oranı ne kadar yüksekse, o aggreganın donma etkisine karşı dayanıklılığı da o derece düşüktür (7).

2. 1. 1. h. Zararlı Maddeler

Agregalar içinde bulunan zararlı maddeler, çimento hamuru ile aggrega arasındaki aderansı bozan, betonun sertleşmesine zarar veren, betonun mukavemetini azaltan ve parçalanmasına neden olan veya donatının korozyona karşı korunmasını engelleyen maddelerdir (3).

Bu zararlı maddeleri; organik kökenli maddeler, sülfatlar, ince maddeler (kil, silt vb.), donatiya zarar veren maddeler (nitratlar, halojenürler vb.), betonun sertleşmesine engel olan maddeler, ve alkali-agrega reaksiyonuna neden olan maddeler (aktif silis) olarak özetlemek mümkündür (3, 5, 7).

İçinde bu türden zararlı maddeler bulunan agregaların beton üretiminde kullanılması betonda onarılması mümkün olmayan arızalar meydana getirebilir. Bu nedenle küçük, büyük her çeşit yapıda, içlerinde bu tür zararlı maddelerin bulunmadığı veya zararsız oranda olduğu bilinen agregalar kullanılmalıdır (7, 20).

2. 1. 2. Hafif Betonların Genel Özellikleri

Hafif betonlar, mukavemetin yanı sıra hafiflik, ısı yalımı gibi özelliklerin de arandığı yerlerde kullanılan (3, 8), kuru birim ağırlıkları 1850 kg/m^3 'den az olan betonlardır (19). Ancak bazı ülkelerin standartlarında ve uluslararası standartlarda hafif betonların kuru birim ağırlıklarının 2000 kg/m^3 'e kadar çıkabileceği bildirilmiştir (23).

Hafif betonlar, kullanılan hammaddeye ve yapım tekniğine bağlı olarak başlıca üç yöntemle üretilabilirler (8, 14, 16, 17):

- Karışında normal agregaların (kum, çakıl, kırımtaş) yerine daha boşluklu yapıya sahip olan doğal yada yapay hafif agregaların kullanılmasıyla üretilen hafif agregali betonlar. Bu yöntem günümüzde hafif beton üretiminde kullanılan en yaygın yöntemdir (17).
- Beton ya da harç kütlesi içinde fiziksel veya kimyasal metodlarla büyük miktarda boşluk oluşturularak üretilen köpüklü veya gaz beton gibi isimler alan betonlar.
- Betonun ince agregasını çıkarmak suretiyle üretilen ince agregasız betonlar.

Göründüğü gibi günümüzde oldukça çok kullanılan hafif betonların üretilmesi için beton içerisinde boşluk oluşturmak genel bir kuraldır. Bu boşluk oluşturma işlemi hafif betonun üretim yöntemine göre ya harç içinde, ya iri agrega taneleri arasında ya da agreganın içinde yapılmaktadır (14).

2. 1. 2. 1. Hafif Betonların Sınıflandırılması

Hafif betonların sınıflandırılması betonun birim ağırlığına ve basınç mukavemetine göre yapılmaktadır. Ancak ülkelerin standartlarındaki farklılıktan dolayı hafif betonların birim ağırlıklarına göre sınıflandırılması ülkeden ülkeye değişiklik göstermektedir (14). Şekil 2. 1'de hafif betonların 28 günlük birim ağırlıklarına ve basınç mukavemetlerine göre sınıflandırılması görülmektedir (16, 17, 19).

Genellikle hafif betonları; taşıyıcı hafif betonlar, yarı – taşıyıcı hafif betonlar ve yalıtım özelliği olan hafif betonlar olmak üzere üç ana gruba ayırmak mümkündür (14, 28).

2. 1. 2. 1. a. Taşıyıcı Hafif Betonlar

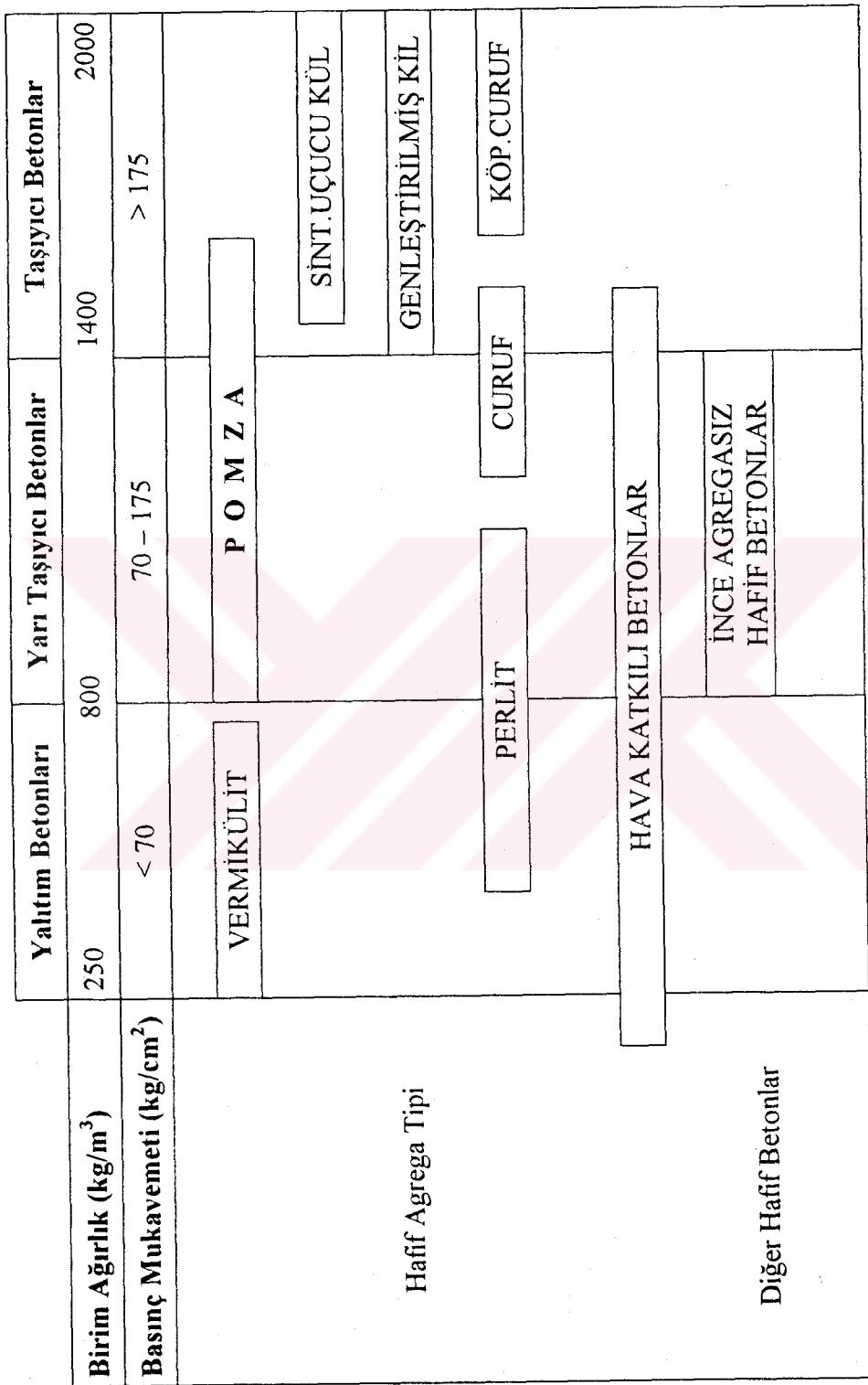
Taşıyıcı hafif betonlar; 28 günlük basınç mukavemeti en az 175 kg/cm^2 olan, ve kuru birim ağırlığı 1850 kg/m^3 'den az olan betonlardır (7, 19). Bu tür betonların betonarme yapılarda kullanılmasıyla ölü yükün % 25 gibi bir ölçüde azalması sağlanmaktadır. Bu nedenle inşaat sektöründe taşıyıcı hafif betonları kullanma eğilimi giderek artmaktadır. Böyle bir malzemeye yönelmenin başlıca nedeni, yapının ölü yükünün azalmasından dolayı depreme karşı dayanıklılığın artması, taşıyıcı elemanların kesitlerinin küçülmesi, ve böylece işin maliyetinin düşmesidir (7).

2. 1. 2. 1. b. Yarı Taşıyıcı Hafif Betonlar

Yarı taşıyıcı hafif betonlar 28 günlük basınç mukavemeti $70 - 175 \text{ kg/cm}^2$ arasında değişen betonlardır (19). Bu betonlar genellikle yapıların iç ve dış duvar bölmelerinde kullanılmaktadır (17).

2. 1. 2. 1. c. Yalıtım Özelliği Olan Hafif Betonlar

28 günlük basınç mukavemeti $7 - 70 \text{ kg/cm}^2$ arasında değişen betonlardır. Birim ağırlıkları 800 kg/m^3 'den düşük olan bu betonlar sadece yalıtım amaçlı kullanılmaktadır (17, 19). Isı iletkenlikleri normal betonun ısı iletkenliğinden 20 kat daha düşüktür (17).



Şekil 2. 1. Hafif Betonların Sınıflandırılması

2. 1. 2. 2. Hafif Betonlarda Karışım Oranlarının Belirlenmesi ve Betonun Üretilimi

Beton karışım oranlarının belirlenmesi kısaca beton ya da harç karışımına ilave edilecek bileşenlerin en ekonomik olarak seçilmesi işlemidir (24).

Normal betonların karışım oranlarının belirlenmesine ilişkin genel kurallar hafif beton karışımı için de geçerli olsa bile uygulamada izlenen ayrıntılar bakımından farklılıklar bulunmaktadır (8).

Hafif agregali betonların karışım oranlarının belirlenmesinde en önemli sorun su/cimento oranını denetim altında tutabilmektir. Agregaların su emmeleri çok yüksek olduğundan, az suyla üretilen veya özellikle önceden su emdirilmeyen agregalarla üretilen betonlarda agregalar betonun tüm suyunu emerek ağ şeklinde rötre çatıklärının oluşmasına neden olurlar. Bu olayı betonu ıslak ortamda saklayarak önlemek de mümkün değildir (3, 6, 20).

Bu sebeplerden dolayı hafif agregali beton karışımı şart koşulan kıvamda; cimento dozu esasına göre bir seri deney karışımı yapılarak belirlenmelidir. Ayrıca betonların karışım hesabı yapılırken betonun kullanılacağı yapı elemanının boyutları, istenilen mukavemet ve karşılaşacağı etkiler gözönünde bulundurulmalıdır (25).

Amerikan Beton Enstitüsü hafif betonların karışım oranlarının belirlenmesinde iki temel prensibin geçerli olduğunu bildirmiştir (26):

- Ağırlık Metodu (Özgül Ağırlık Faktörü Yöntemi); bu metod önceden seçilen çökme değerine göre su ve cimentonun ağırlıklarının tahmin edilmesi esasına dayanmaktadır. Agreganın ağırlığı ise hesapla bulunur.
- Hacimsel Metod; bu metoda ise agreganın kuru ve gevşek hacmi ile cimentonun hacmi tahmin edilir. Su miktarı ise karışım hazırlanırken deneysel olarak bulunur.

Günümüzde ise hafif beton karışım hesaplarında özgül ağırlık faktörü yöntemi kabul edilmiş olup, gerek ASTM standartlarında, gerekse TSE standartlarında hesap metodu olarak verilmiştir (21, 25, 26).

Hafif agregalı betonların üretilmesi agregaların yoğunluğu, tane şekli ve yüzey yapısı ile su emme özelliklerindeki değişiklikler nedeniyle normal betonlardan biraz farklıdır (5).

Üretim aşamasında betonun diğer malzemeleri betoniyere konulmadan önce hafif agregalar karışım suyunun 1/3'ü ile yaklaşık bir dakikalık bir ön karıştırma yapılarak mümkün olduğu kadar uniform nemli bir agrega elde edilmeye çalışılmalıdır. Havada yeterli nemliliği bulunan agregaların karışımı başlamadan önce ayrıca nemlendirilmesine gerek yoktur. Karıştırma için de şayet betoniyer kullanılsaksa homojen bir karışım elde edebilmek için düşey eksenli betoniyerler tercih edilmelidir (21).

Üretilen betona sıcaklık ve nem miktarındaki değişimler nedeniyle bünyede oluşabilecek gerilimleri azaltmak için kür uygulanmalıdır. Beton dökümü için en uygun sıcaklık 15 – 25 °C arasındadır. Soğuk havalarda sıfır derecenin üzerinde beton dökümü gerçekleştirilmelidir. Çünkü yeni dökülen betonlar don etkisinde kaldığında kazanabileceği mukavemetin ancak yarısını kazanabilmektedir. Sıcak havalarda beton dökümü sırasında ise betonun güneşlenmeden ve aşırı sıcaklık artışından korunması gereklidir (8).

2. 1. 2. 3. Taze Beton Özellikleri

Taze beton, betonun karıştırma işlemi bittiğinden sonra sahip olduğu işlenebilirliğini herhangi bir değişiklik olmadan koruyabildiği süre içindeki halidir (24). Bu bölümde hafif betonların taze halde iken sahip olduğu bazı özelliklerden bahsedilmiştir.

2. 1. 2. 3. a. Birim Ağırlık

Hafif betonların taze haldeki birim ağırlıkları, agregaların granülometrik bileşimi, su emme oranı, hava oranı ve agregaların özgül ağırlıklarındaki farklılık gibi bir çok faktörün etkisi altındadır. Kuru hafif agrega kullanılarak üretilen beton başlangıçta nemli hafif agrega ile üretilen betona oranla daha düşük taze birim ağırlığı sahiptir. (5, 16).

2. 1. 2. 3. b. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik; betonun ayırmadan yerleştirilip sıkıştırılarak istenen görünüşe sahip olabilmesidir (24). Başka bir ifade ile işlenebilirlik taze betonun kalibine kolaylıkla yerleştirilebilmeye kabiliyetidir.

Betonun işlenebilme özelliği; su oranına, agreganın granülometrik bileşimine, tanelerin boyutuna ve çimento oranı gibi etkenlere bağlı olarak değişiklik gösterir. Özellikle agregaların tane şekli ve su emme gibi özelliklerinin karışımının işlenebilirlikleri üzerinde önemli etkileri vardır. Hafif agrega tanelerinin köşeli ve pürüzlü yüzeyleri beton karışımının genellikle zayıf bir işlenebilme özelliğine sahip olmasına neden olur (8).

2. 1. 2. 3. c. Hava Miktarı

Hava miktarı; betonlardaki kapalı agrega boşlukları haricinde mevcut hava hacminin betonun tüm hacmine oranının yüzde olarak ifadesidir (24).

Hafif betonların çoğu genellikle % 2 – 4 oranında hava içerirse de bu oran işlenebilme ve sağlamlık üzerinde olumlu yönde etkiye sahip değildir. İyi bir işlenebilme için uygun hava miktarı genellikle % 4 – 8 oranında olmalıdır (8, 25).

2. 1. 2. 4. Sertleşmiş Beton Özellikleri

Bu bölümde sertleşmiş hafif betonların sahip oldukları bazı özelliklerden bahsedilmiştir.

2. 1. 2. 4. a. Kuru Birim Ağırlık

Betonların birim ağırlığı sertleşme süresine ve nem durumuna göre farklı değerler alır. Birim ağırlık değerindeki değişiklikler betonun başta mekanik ve termik özellikleri olmak üzere tüm özelliklerini etkiler. Birim ağırlığın artması betonun mekanik özelliklerini artırırken ısı yalıtkanlık özelliğini azaltır (27). Hafif agregalı betonlar genellikle 1850 kg/m^3 'den daha düşük birim ağırlığa sahip betonlardır (8, 19).

2. 1. 2. 4. b. Basınç ve Çekme Mukavemeti

Betonun tek eksenli basınç kuvveti altındaki davranışları bir çok karakteristik yardımıyla ifade edilebilmektedir. Bunlardan en önemlisi basınç mukavemetidir. Yapıarda bu karakteristiğin mümkün oldukça büyük değerler almasına çalışılmaktadır (7).

Hafif betonları basınç mukavemetlerine göre, yapısal hafif betonlar, orta derecede dayanıklı hafif betonlar ve düşük dayanıklı yalıtım veya dolgu betonları olmak üzere üç gruba ayırmak mümkündür (8, 16, 17, 19).

Hafif betonların çekme mukavemeti ise normal betonlardaki değerlere göre biraz düşüktür. Hafif betonların çekme mukavemeti eşit basınç mukavemetli normal betonun çekme mukavemetinin yaklaşık % 70 – 100’ü arasında değişebilir (8, 16). Ayrıca havada kurumuş hafif betonların çekme mukavemeti genellikle nem kürü uygulanmış hafif betonların çekme mukavemetinden küçüktür (8).

Hafif betonlarda çekme mukavemetinin basınç mukavemetine oranı normal betonlardaki değerlerden fazladır. Normal betonların çekme mukavemeti basınç mukavemetinin yaklaşık 1/10’u iken hafif betonlarda bu oran 1/4’e kadar yükselbilmektedir (8).

2. 1. 2. 4. c. Elastisite Modülü ve Poisson Oranı

Hafif betonların elastisite modülleri basınç mukavemetine, agregat çeşidine ve katılmışsa kum miktarına bağlı olarak 9.9×10^4 – 2.1×10^5 kg/cm² arasında değişen değerler alabilmektedirler (8). Genel olarak hafif betonların elastisite modüllerinin aynı basınç mukavemetine sahip normal betonların elastisite modüllerinden yaklaşık olarak % 20 – 50 oranlarında daha düşük olduğu söylenebilir (8, 16). Tamamen hafif agregat kullanılarak üretilen betonlarda bu düşüş % 50 – 75 oranlarına kadar çıkmaktadır (19). Hafif ve normal betonların poisson oranları ise yaklaşık olarak aynıdır. Bu değer agregatın çeşidine, nem durumuna ve betonun yaşına bağlı olarak genellikle 0.17 – 0.23 arasında değişir. Genellikle uygulamada bu değer 0.2 olarak kabul edilebilir (19).

2. 1. 2. 4. d. Isı İletkenlik

Hafif betonların en belirgin özelliklerinden birisi de kullanıldığı yerlerde normal betonlara kıyasla daha iyi ısı izolasyonu sağladığıdır (28). Bir malzemenin ısı iletkenliği, o malzemenin boşluk yapısının bir fonksiyonudur (27).

Hafif agregalarla üretilen betonların özellikleri agreganın mineralojik yapısına, granülometrik bileşimine, çimento miktarına ve su / çimento oranı gibi bir çok faktöre bağlıdır. Sertleşmiş betonların birim ağırlığı, su emmesi, mukavemeti, ve ısı yalıtımı birbirleriyle ilişkili olan özelliklerdir. Genel olarak betonun ısı iletkenliği birim ağırlığı ve nem içeriği ile doğru, ısı izolasyonu ile ters orantılıdır (7, 8, 27, 28).

2. 1. 2. 4. e. Su Emme

Betonun boşluklarında bulunan su, mekanik ve ısisal özellikleri olumsuz yönde etkilediği için betonların hiç su emmemesi veya çok az su emmesi istenir. Betonun su emmesi agreganın su emme kapasitesine ve aggrega/çimento oranına bağlıdır (27). Hafif agregalar boşluklu yapıları nedeniyle yüksek su emme oranına sahip olduklarından, hafif betonların su emmesi de yüksektir. Genel olarak hafif betonlar ağırlıklarının % 30'undan fazla su emerler (28). Bazı hafif betonlar normal betonlara göre iki kat daha fazla su emme özelliğine sahiptirler (19).

2. 1. 3. Çelik Lifli Betonların Genel Özellikleri

Genel olarak aggrega, çimento ve su gibi temel bileşenler ile üretilmiş kompozit bir malzeme olan beton karışımılarına belirli oranlarda lif katılmasıyla elde edilen malzemeye lifli beton denilmektedir. Yalnızca çimento ve liflerden oluşan kompozit malzemeler de lifli beton teriminin kapsamı içerisinde girmektedir. Betonun özelliklerini iyileştirmek amacıyla taze beton içerisinde ilave edilen lifler, değişik malzemelerden üretilmiştir (2).

Tablo 2.1'de değişik malzemelerden üretilmiş lifler ve bu liflere ait bazı özellikler bulunmaktadır (29, 30).

Tablo 2. 1. Çeşitli Lif Türlerinin Tipik Özellikleri

Lifin türü	Lifin Çapı (mm)	Özgül Kütle (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (kg/cm ²), (x 10)	Elastisite Modülü (kg/cm ²), (x 10)	Maksimum Uzama (%)
Akrilik	0.02 – 0.35	1.1	0.2 – 0.4	2	1.1
Asbest	0.0015 – 0.02	3.2	0.6 – 1.0	83 – 138	1 – 2
Pamuk	0.2 – 0.6	1.5	0.4 – 0.7	4.8	3 – 10
Cam	0.005 – 0.15	2.5	1.0 – 2.6	70 – 80	1.5 – 3.5
Grafit	0.008 – 0.009	1.9	1.0 – 2.6	230 – 415	0.5 – 1.0
Naylon	0.02 – 0.40	1.1	0.76 – 0.82	4.1	16 – 20
Polyester	0.02 – 0.40	1.4	0.72 – 0.86	8.3	11 – 13
Polipropilen	0.02 – 0.40	0.95	0.55 – 0.76	3.5	15 – 25
Suni İpek	0.02 – 0.38	1.5	0.4 – 0.6	6.9	10 – 25
Taş Yünü	0.01 – 0.8	2.7	0.5 – 0.76	~ 0.6	0.5 – 0.7
Celik	0.1 – 1.0	7.84	0.3 – 2.0	200	0.5 – 3.5
Çimento Matrisi	-	1.5 – 2.5	0.003 – 0.007	10 - 45	0.02

Liflerin kesin tanımı yapılamamaktadır. Lifleri tanımlayan öğeler lifin sahip olduğu mekanik özellikler ile onun sayısal bir parametre gibi ifade edilmesini sağlayan lifin çekme gerilmesi, geometrik yapısı ve görünüm oranı gibi biçimsel özellikleridir (2). Ancak lifleri tanımlayan en uygun sayısal parametre görünüm oranıdır. Görünüm oranı, lif boyunun lif çapına bölünmesiyle elde edilir. Şayet en kesit dairesel değilse o zaman lifin en kesit alanına eşdeğer alana sahip dairenin çapı esas alınarak görünüm oranı hesaplanır (14, 30, 31, 32).

Çelik lifli beton; içerisinde aralıklarla dağıtılmış küçük çelik teller bulunan ince veya ince ile kaba agrega ve cimento kullanılarak üretilmiş kompozit bir malzemedir. Çelik lifler puzolanlar ve normal betona ilave edilen katkı maddeleri ile de ortak olarak kullanılabilirlerdir (12, 30, 33).

Lifli beton uygulamalarında kullanılan çelik lifler birbirinden farklı, değişik yöntemlerle üretilmektedirler (2, 32):

- soğukta çekilmiş tellerin kesilmesi yöntemi
- sıcak çekme yöntemi
- çelik plakaların kesilmesi yöntemi
- çelik tellerin öğütülmesi yöntemi

Çelik lifler düşük karbonlu çelik olan C 1008'den üretilmeleridir. En önemli özellikleri yüksek ve üniform çekme gerilmesine karşılık düşük uzama değerleridir. Çekme gerilmeleri ortalama olarak 12000 kg/cm^2 olup, elastik limitleri % 0.2'nin altındadır. Lifli beton üretiminde kullanılan çelik liflerin çapları genellikle 0.13 – 1.0 mm arasında olup, uzunluk/çap oranları (görünüm oranları) ise 30 – 150 arasında değişmektedir. Lif boyları ise 13 mm'den 70 mm'ye kadar değişmektedir (2).

Betona çelik lif ilave etmekle betonun çekme mukavemetini, tokluğununu, eğilme mukavemetini, yorulma mukavemetini, parçalanma ve kırılmaya karşı dayanıklılığını, darbe etkilerine karşı dayanımını ve deformasyon yapabilme yeteneği gibi teknik özelliklerini artırmak mümkündür (12, 14, 33 – 40). Betonun bu tür özelliklerindeki performans artışı; betonun karışım oranlarına, liflerin karışım içerisindeki dağılımlarına

(yerleşim yönlerine), özellikle liflerin geometrik şekline ve miktarına bağlıdır (2, 31, 39, 41). Bu nedenle bir çok değişik geometrik formda çelik lif üretilmiştir ve kullanılmaktadır. 1970'li yıllarda sadece düz çelik lifler kullanılırken sonraları üreticiler uçları çengelli, kıvrımlı, yüzey pürüzlülüğü artırılmış, özel deformasyonlar verilmiş ve daha değişik geometrilerde çelik lifler üretilmişlerdir. Ancak araştırmalar göstermiştir ki, betonun özellikleri üzerindeki en büyük iyileştirmeyi düz çelik lifler ve ucu çengelli lifler sağlamaktadır. Çelik lifli betonları daha ekonomik hale getirmek için değişik üretim metotları denenmiş ve sonuçta dairesel kesitli olmayan (yarım daire, dikdörtgen ve düzensiz en kesitli gibi) çeşitli tipte lifler de üretilmiştir (12, 31, 32).

Çelik lifli beton uygulamalarında genellikle yüzeyi kaplanmamış çelik teller kullanılır. Bu tellerin tek sakıncası, özellikle yerleştirme işleminde vibratör kullanılmıyorsa açıkta kalan tellerin paslanarak yüzeyde kırmızı pas lekeleri meydana getirmesidir. Bu nedenle aşın paslanmanın olabileceği ortamlarda yada estetiğin gözönünde bulundurulduğu durumlarda galvanizlenmiş liflerin kullanılması daha uygundur. Isıya dayanıklı ve su ile doğrudan temas eden betonlarda ise paslanmaz çelik liflerin kullanılması tavsiye edilir. Bu liflerin teknik özellikleri diğerleri ile aynı olup, sadece korozyona karşı daha dirençlidirler (2).

2. 1. 3. 1. Çelik Lifli Betonların Karışım Esasları ve Üretim Teknikleri

Çelik lifli betonların karışım esasları, lifli beton uygulamalarının başarılı olabilmesi için yani üretilen betondan istenilen performansın elde edilebilmesi için dikkat edilmesi gereken en önemli süreçtir. Normal betonlarda uyulması gereken kurallar lifli betonlarda da geçerli olsa bile gerek karışım hesaplarının tasarlanmasında gerekse çelik liflerin betonda kullanılması sonucu elde edilen malzemenin yeni karıştırma ve taşınma tekniklerini zorunlu kılması nedeniyle değişiklik göstermektedir (2).

Çelik lifli betonlar üretilmeden önce, yapının hangi kısımlarında kullanılacağı, hangi etkiler altında kalacağı önceden tespit edilmelidir. Yani beton hangi etkilere maruz kalacaksa ona göre tasarım kriterleri (lif tipi seçimi, uzunluk/çap oranı, lif geometrisi, çimento miktarı, aggrega vs.) belirlenmelidir (2).

Lifli betonların mukavemetleri üzerinde liflerle beton arasındaki aderansın ve betonun boşluk durumunun önemli bir etkisi olduğundan betonun özelliklerini iyileştirmek amacıyla bir takım sınırlamalar ve öneriler getirilmiştir (2, 42):

- Çimento miktarı en az 250 kg/m^3 olmalıdır.
- Karışımındaki ince agrega miktarı toplam agrega miktarının en az % 45 – 55'i olmalıdır.
- En büyük tane çapı doğal agrega için 28 mm, kırma agrega için 32 mm olmalıdır.
- Betonun işlenebilirliğini artırmak için akışkanlaştırıcı katkılar kullanılabilir.
- Karışımın yoğunluğunu ve kompasitesini artırmak için uçucu kül veya silis dumani kullanılmasında fayda vardır.

Lifli betonların özellikleri üzerinde lif geometrisinin de önemli bir etkisi vardır. Günümüzdeki çelik lifli beton uygulamalarında çok değişik geometrilerde çelik lif kullanılmasına rağmen en fazla düz ve çengelli çelik lifler kullanılmaktadır (2, 12, 32).

Betona ilave edilen liflerin görünüm oranları (uzunluk/çap oranı) ve miktarı da betonun performansını etkiler. Teorik olarak liflerin görünüm oranı ve miktarı ne kadar yüksekse betonun darbe etkilerine karşı dayanıklılığı, tokluğu ve düktilitesi gibi teknik özellikleri de o kadar yüksektir. Fakat ne yazık ki lif görünüm oranı ve miktarının yüksek olması karıştırma ve yerleştirme aşamalarında zorluk çıkarmaktadır. Bu yüzden çelik lifli betonlarda kullanılabilecek lif miktarının sınır değerleri vardır (32). Çelik liflerin beton içerisine katılma oranı hacimsel olarak % 0.5 – 2.5 arasında olabilmektedir. Ancak yapılan araştırmalar göstermiştir ki optimum fayda bu oranın % 1 – 2 olması halinde sağlanmaktadır. Bu değerden daha az katılması halinde, normal beton özelliği üzerinde çok büyük bir olumlu gelişme sağlanamamaktadır. Daha yüksek oranda katılması durumunda ise betonun işlenebilirliğini zorlaştırmasından ve liflerin daha fazla topaklaşmasından dolayı normal betonun basınç mukavemetinden daha düşük bir değer elde edilmektedir (12). Betona ilave edilen çelik liflerin görünüm oranlarının (uzunluk/çap oranı) 100'den büyük olması işlenebilirliği olumsuz yönde etkilediğinden, betonun teknik özelliklerini iyileştirmesi bakımından görünüm oranının 100'den küçük olması gerekmektedir (2, 31).

Betonda kullanılacak liflerin seçiminde dikkat edilmesi gereken bir diğer husus da lif boyunun maksimum agrega çapının en az 1.5 – 2 katı olması zorunluluğudur (2).

Çelik lifli beton uygulamalarında agrega seçimi yapılırken lfsiz betonların hazırlanmasındaki esaslar göz önünde bulundurulmalıdır. Yani fiziksel özellikleri iyi, düzgün tane dağılımına sahip agrega kullanılmalıdır (2).

Çelik lifli beton karışımlarının hazırlanması esnasında en sık karşılaşılan problemler; çelik liflerin bir araya gelip topaklanarak işlenebilirliği zorlaştırmaları ve karışım sırasında liflerin eğilerek deform olmalarıdır. Bu tür problemlerin ortaya çıkmasından dolayı aşağıdaki önlemlerin alınması gereklidir (2, 42):

- Homojen bir beton karışımı elde etmek için lfsiz betonlarda dikkat edilmesi gereken kurallara uyulmalıdır.
- İşlenebilirliği artırmak için akışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılmalıdır.
- Çelik lifli betonun karıştırılmasını kolaylaştmak ve gerekli olduğunda lif miktarını artırmayı sağlamak için ince agrega miktarı artırılmalıdır.
- Taze betonda homojen lif dağılımı gözle kontrol edilmelidir. Birbirine yapışık lif demetleri halinde betona katılan lifler tek tek ayrılmaya kadar karıştırma işlemi devam ettirilip, üniform bir dağılım sağlanmalıdır.

2. 1. 3. 2. Çelik Liflerin Beton İçerisindeki Davranışı

Genellikle çelik lifler kullandıkları betondaki donatıları destekleyici bir rol oynarlar. Çelik lifler aynı zamanda betonda oluşan çatlakların ilerlemesini sınırlar, yorulma, darbe, rötre veya ısisal gerilmeler gibi etkenlere karşı betonun direncini artırır (31). Bu nedenle çelik liflerin beton içerisindeki davranışları ile betonda kullanılan donatının işlevi hiçbir zaman birbirine karıştırmamalıdır. Birçok yerde donatı ve çelik lif belli bir yere kadar aynı işlevi görebilirler. Fakat bunlar arasındaki en önemli fark beton içerisindeki liflerin fonksiyonları ve buradaki çatlakların kontrolünü nasıl ve ne zaman yaptıklarıdır (2, 12).

Statik hesaplar yapılrken çelik lifler eğilme momentini alan çubuk veya hasır donatı gibi görülmeliidir. Çelik lifleri betonun yapısını değiştiren ve onu sünek davranışa zorlayan bir malzeme olarak görebiliriz. Çelik lifli betonun özelliği onun artırılmış elastikiyet ve enerji tutma yeteneğidir (2). Yani normal betonların yük – deformasyon

eğrisinde maksimum yükten sonra yükün azalma hızı çok yüksek ve yapabileceği deformasyonun çok düşük olmasına karşılık çelik lifli betonlarda çelik lifler yük altında sünek bir davranış gösterdiklerinden maksimum yükten sonra da belli deformasyona kadar yük taşıyabilirler. İşte bu nedenle çelik lifli betonlarda maksimum yükten sonra artan deformasyon neticesinde yükün azalma hızı çok düşük olup, yük – deformasyon eğrisinde maksimum yükten sonra azalan bir kuyruk kısmı oluşmaktadır. Dolayısıyla liflerin betondan ayrılması ve böylece betonun göçmesi için gereken enerji de oldukça büyütür. Başka bir ifade ile betonun deformasyon yapma kabiliyeti oldukça fazladır (2, 12).

Çekme gerilmeleri, bir çatlaktan pek çok çatlağın yayılmasına sebep olarak betonda göçmeye neden olur. Çatlak gelişimine karşı betonun direncini ve düktilitesini artırmak için betonun liflerle güçlendirilmesi etkili bir yoldur (12, 43). İşte çelik liflerde en büyük etkiyi çatlakların ilk oluşum anında, çatlaklarındaki gerilmeleri kendi üzerine ve sağlam alanlara transfer ederek işlevlerini yerine getirirler. Lifsiz betonlarda ise betona herhangi bir gerilme uygulandığında oluşan mikro çatlaklar gerilmenin artmasıyla çeşitli yönlere doğru yayılarak bir süre sonra betonda göçmeye neden olurlar (2).

Soroushian ve Lee (1990), yaptıkları çalışmada lifsiz betonun çekme mukavemetinin çok düşük olduğunu, betonun çekme mukavemetini artırmadan bir yolunun betonda meydana gelen iç kusurların (mesela mikro çatlakların) yayılmasını engellemek olduğunu, bunun da betona homojen bir şekilde çelik lif ilave etmekle mümkün olabileceğini belirtmişlerdir (43).

2. 1. 3. 3. Çelik Lifli Betonların Özellikleri

Normal beton içeresine değişik miktarlarda ve belli özelliklere sahip çelik liflerin katılmasıyla elde edilen lifli beton teknik olarak normal betonun zayıf olan bir çok özelliğini iyileştirerek performansını artırır. Ancak performanstan bu iyileşmeler normal betonlarda olduğu gibi agrega cinsi ve granülometrik dağılımı, çimento cinsi ve miktarı, su/çimento oranı gibi faktörlere bağlıdır. Bunların yanı sıra kullanılan çelik

liflerin şekli, teknik özellikleri, miktarı ve beton içerisindeki yönetimleri de sonuçlar üzerinde etkilidir (2, 31, 39, 41).

2. 1. 3. 3. a. Taze Beton Özellikleri

Betona ilave edilen çelik lifler betonun taze haldeki özelliklerini değiştirmektedir. Taze beton özelliklerinden bahsedildiğinde ilk akla gelen betonun taşınması, yerleştirilmesi ve sıkıştırılma aşamalarında en etkili özellik olan betonun işlenebilirliğidir. Yapılan tüm çalışmalar betona lif ilave edilmesinin işlenebilirliği olumsuz yönde etkilediğini göstermiştir (2). Bu olumsuz etki üzerindeki en önemli parametreler betona ilave edilen liflerin geometrisi, miktarı ve görünüm oranı (uzunluk/çap oranı)'dır (2, 44). Bu önemli parametrelerin dışında liflerin betona katılması, karıştırma teknikleri ve lifli betonların karışım hesaplarının tasarlanması da taze beton özelliklerini önemli ölçüde etkiler (2). Bu hususların taze beton özelliklerini olumsuz yönde etkilememesi için Bölüm 2. 1. 3. 1.'de bahsedilen ilkelere riayet edilmelidir.

Swamy ve Jojagha (1982), yaptıkları bir çalışmada, hafif agregat olarak sinterlenmiş uçucu kül (Lytag), normal agregat olarak doğal kum, ayrıca farklı geometrilere (düz, kıvrımlı, çengelli ve palet şeklinde) ve farklı görünüm (uzunluk/çap) oranına (50 ve 100) sahip çelik lifleri kullanarak ürettikleri çelik lifli hafif beton karışımlarında lif tipinin betonun işlenebilirliği üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak betona ilave edilen liflerin görünüm oranlarının ve geometrilerinin betonun işlenebilirliğini önemli ölçüde etkilediğini belirlemiştir. Çalışmada ayrıca kullanılan farklı geometrilere sahip lif türlerinden işlenebilirliği en fazla çengelli liflerin, en az da düz liflerin etkilediği bildirilmiştir (44).

2. 1. 3. 3. b. Sertleşmiş Beton Özellikleri

Bilindiği gibi betonun çekme mukavemeti, basınç mukavemetine göre oldukça küçüktür. Betona belirli oranda çelik lif ilave edilmesiyle betonun başta çekme mukavemeti olmak üzere bir çok teknik özelliklerinde gözle görülebilir bir iyileşme sağlanmaktadır (12, 33 - 40).

Çelik lifli beton, basınç düktilitesi gösterir. Yani beton taşıma gücüne eriştiği halde yük taşıma özelliği vardır. Ayrıca yapılan çalışmalar çelik lifli betonun kesme, burulma ve yorulmaya karşı mukavemeti fazla, çatlamalar, dökülme, parçalanma ve dağılmalar az olduğunu göstermiştir (12, 35).

Sharma (1986), çelik lifli beton kırışların kesme kuvvetleri altındaki davranışlarını incelemiştir. Boyları 50 mm ve çapları 0.6 mm olan düşük karbonlu çengelli çelik lifleri kullanarak ve 28 günlük silindir basınç mukavemetini ortalama 450 kg/cm^2 değerinde tutarak hazırladığı iki grup (etriyesiz ve etriyeli) kırış numune üzerinde yaptığı deneyler sonucunda ilk gruptaki lıfsız numunelerin kesme mukavemetleri ortalama 22 kg/cm^2 iken lifli numunelerin kesme mukavemetlerinin % 38'lik bir artısla 30.3 kg/cm^2 olduğunu, ikinci gruptaki lıfsız numunelerin kesme mukavemetleri ise ortalama 29.7 kg/cm^2 iken lifli numunelerin kesme mukavemetlerinin % 29'luk bir artısla 38.2 kg/cm^2 olduğunu belirlemiştir (45).

Nanni (1990), çelik lifli betonların burulma mukavemeti üzerine yaptığı çalışmada ise betona çelik lif ilave edilmesinin hem etriyeli hem de etriyesiz kırışların burulma mukavemetini normal betona göre yaklaşık % 60 oranında artırdığını belirtmektedir (46).

Yapılan araştırmalar betona ilave edilen çelik liflerin basınç ve çekme mukavemetleri üzerinde de etkisi olduğunu bildirmiştir. Bu etkinin olumlu veya olumsuz olması liflerin beton içerisindeki dağılımına bağlıdır. Yani yükleme eksenine dik olan lifler mukavemet üzerinde herhangi bir etki etmezken, liflerin yükleme eksenine paralellikleri arttıkça mukavemet üzerindeki olumlu etkileri de artmaktadır (2, 39, 41, 43).

Betonun çekme ve basınç mukavemetinin yanında kırılma enerjisi de oldukça önemli bir malzeme parametresidir. Çelik lifli beton, özellikle maksimum yükten sonra oldukça yüksek bir düktilité gösterir. Bu nedenle lif oranı arttıkça kırılma enerjisi de artış göstermektedir. Çelik lifli betonların bu tür özelliklerini ortaya koymak üzere literatürde bir çok ampirik tanımlama yapılmıştır. Bunlardan en önemlisi Barr 'in geliştirdiği topluk indeksi tanımlamasıdır. Lifli betonun gerilme-birim boy değişimi eğrisinin ilk kırılma

yüküne kadar olan kısmının altında kalan alanın, eğri altındaki toplam alana oranı tokluk indeksi olarak tanımlanmıştır (12).

Barr ve Noor (1983), su/çimento oranını (0.46) sabit tutarak lif miktarının (hacimce % 0.03, 0.15, 0.3, 0.6, ve 0.9) çelik lifli betonların tokluk indeksi (betonun enerji emme kapasitesi) üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla yaptıkları çalışmada betonun yük – deformasyon eğrisi altındaki alandan hesap edilen topluğun çelik lifli betonların en önemli özelliklerinden birisi olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan deneylerde lif miktarının artmasıyla topluğun arttığı belirlenmiştir. Nitekim lif miktarının hacimce % 0.03'den % 0.9'a çıkması topluğu (betonun enerji emme kapasitesini) % 100 oranında artırdığı görülmüştür (47).

2. 1. 3. 4. Çelik Lifli Betonların Tipik Kullanım Alanları

Genellikle, yapısal uygulamalarda çelik lifli beton sadece kırılmayı önlemek için kullanılmaz, aynı zamanda betonun dinamik yükleme veya darbe mukavemetini artırmak ve malzemenin dökülme, parçalanma ve dağılmmasını önlemek için de betona çelik lif ilave edilmektedir (31, 33, 35).

Kirişlerde, kolonlarda ve kat dösemelerinde olduğu gibi diğer yapı elemanlarında da eğilme veya çekme kuvvetleri meydana gelir. Bu basınç, eğilme ve çekme kuvvetlerinin birlikte oluşturduğu gerilmelerden dolayı yapı elemanlarının donatı ile birlikte çelik lifler ile kuvvetlendirilmesi mukavemeti oldukça önemdede artırılabilir (12).

Aşağıda çelik lifli betonun kullanım alanlarından bazı örnekler verilmiştir:

- Endüstri Yapılarında

Çelik lifli beton endüstri yapılarında darbe rıjitliğini sağlamak, ısisal ve dinamik etkilere karşı dayanıklılığı artırmak için kullanılmaktadır (12).

Tatnall ve Kuitenhrouw (1992), yaptıkları araştırmada çelik liflerin Avrupa'daki endüstriyel yapı inşaatlarının çoğunda geleneksel donatılamadan yerine başarıyla uygulandığını bildirmişlerdir (48).

- Hidrolik Yapılarda

Barajlar, kanallar, dirlendirme havuzları ve dolu savaklarda plak yerine veya aşınmaları engellemek amacıyla, kaplama olarak kullanılır (33).

- Yol Döşemelerinde

Beton yol uygulamalarında kaplama kalınlığının daha ince olmasının istediği durumlarda çelik lifli betonlar kullanılır (33). Günümüzde çelik lifli betonlar yollarda, otobanlarda, köprülerde ve hava alanlarında başarıyla kullanılmaktadır (13, 35, 40).

- Püskürtme Beton (Shotcrete) Uygulamalarında

Püskürtme beton karışımı genellikle yüksek çimento yüzdesiyle hazırlanan karışımlardır. Bu da çoğunlukla rötre çatlaklarına neden olmaktadır. Üstelik püskürtme beton uygulaması yapılan eğri yüzeyler çatlamaya çok büyük eğilim gösterirler ve bu tür yüzeylerin kur edilmesi çok zor olmaktadır. İşte çelik lifler hem ıslak hem de kuru püskürtme beton uygulamalarında çatlak kontrolü için ekonomik ve de pratik bir çözüm sunmaktadır. Bu nedenle çelik lifli püskürtme beton uygulaması barajların tamirinde, tünelerde, su kemerlerinde, iskelelerde, kanallarda, dolu savaklarda ve bu tür yapılarda başarıyla kullanılmaktadır (13).

- Ateşe Dayanıklı Beton Yapılarda

Büyük sıcaklık farklılıklarını ile karşı karşıya kalabilecek, termal ve mekanik şok tehlikesi olan ve aynı zamanda yük taşıyacak olan yapılarda da çelik lifli beton kullanılmaktadır (2).

- Şev Stabilitesinin Sağlanması

Çelik lifli beton ayrıca karayollarını ve demiryollarını kesen, yer üstündeki kaya veya topraktan oluşan dik şevelerin veya toprak setlerin stabilitesinin sağlanmasında kullanılır (33).

- İnce Kabuk Yapılarda

Lifli betonun üstün nitelikleri kesit kalınlıklarının azaltılmasını mümkün hale getirdiğinden, ince kabuk yapılarda, kubbelerde, katlanmış plaklarda ve çeşitli mimari nedenlerle ince olması gereken yapı elemanlarında kullanılmaktadır (12, 33).

- Patlamaya Karşı Dayanıklı Olması Gereken Yapılarda

Genellikle normal donatı çubukları ile birlikte kullanıldığından, güç santralleri ve askeri tesislerin yapımında çok uygun bir kullanım arz etmektedir. Özellikle çok önemli askeri tesislerin yapımında bu özelliğinden dolayı kullanımı tercih edilmektedir. Uzun yillardan beri Amerikan askeri tesis yapım şartnamelerinde yer almaktır ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (12).

- Ön Yapılmış Beton Elemanlarda

Ön yapımlı beton üreticileri çatlak oluşmasını ve yayılmasını engellemek, betonun yük altında daha elastik davranışını sağlamak, betonun dağılıp ufalanmasını azaltmak, ve betonun korozyona karşı performansını artırmak için çelik lifli betonları kullanırlar (13).

- Çok Yüksek Mukavemetli Betonlarda

Günümüzde yüksek mukavemetli betonlara ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu betonların normal mukavemetli olanlara göre olumsuz tarafı göçme sırasında bağıl olarak az enerji yutmalarıdır. Böylece gevrek davranış gösteren yüksek mukavemetli betonların yerini sünekliği artırılmış yüksek performansa sahip ultra yüksek mukavemetli betonların [ultra yüksek mukavemetli betonlar; 28 günlük basınç mukavemeti 2000 kg/cm^2 'den fazla olan betonlardır (49).] olması söz konusu olmaktadır. Ultra yüksek mukavemetli çimento esaslı kompozitlerin üretiminde ince agregat ve çimentoya ilave olarak 0.15 mm çapında ve 5 – 10 mm boyunda kısa kesilmiş çelik tel, silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcı katkılar kullanılmaktadır. Bu kompozitleri üremekle betonda en zayıf halka olarak bilinen agregat – çimento hamuru arasındaki boşluklar ve harçtaki kusurlar minimum yapılmaktır ve gevrek davranışa sahip bu çok yüksek mukavemetli betona kısa kesilmiş ince çelik tellerle sünek davranış özelliği kazandırılmaktadır (50).

- Depreme Dayanıklı Yapılarda

Çelik lifli betonlarla inşa edilen süneklik düzeyi yüksek betonarme yapılarının deprem kuvvetleri altındaki davranışı olumlu yönde değişecektir. Ülkemizin deprem kuşağında olduğu göz önüne alındığında gevrek bir malzeme olduğu bilinen betonun bu zayıf yönünü iyileştirmenin önemli olduğu açık bir gerçekdir. Bu yapıların dinamik etkilere karşı enerji emme yeteneği geleneksel yapılara göre daha yüksek olduğundan bu tür etkiler sonucu meydana gelebilecek yapısal hasarlar en alt düzeye indirilecektir. Çelik

liflerin betonda kullanılmasının önemi karşı karşıya bulunduğuımız depremin yapılarda meydana getirdiği hasarlar incelendiğinde daha iyi anlaşılacaktır (39).

Vondran (1992), yaptığı çalışmada deprem sırasında normal betonlarda ilk olarak donatı etrafındaki betonlar dökülüp, ufalanıp yapısal bütünlüğü ve rijitliği bozmasına rağmen çelik lifli betonun daha düktıl olmasından dolayı betonu kırmak için daha fazla enerjiye ihtiyaç olduğunu bildirmiştir (13).

2. 2. Hafif Betonlar ve Çelik Lifli Betonlar ile İlgili Yapılan Bazı Çalışmalar

Swamy ve Jojagha (1982), uçucu kül kökenli hafif agregat ve çapları 0.418 mm – 0.76 mm arasında, boyları da 25 – 50 mm arasında değişen farklı geometrilere sahip çelik lifleri kullanarak üretikleri çelik lifli taşıyıcı hafif betonların ağırlık düşürme deney düzeneği kullanarak betonun darbe etkilerine karşı dayanıklılığını araştırmışlardır. Yapılan çalışma neticesinde numunelerin basınç mukavemetleri arttıkça darbe etkisine karşı dayanıklılığın da arttığı görülmüştür. Çalışmada betonların darbe etkisine karşı dayanıklılığının liflerin şekli, geometrisi, lifin uzun veya kısa olması ve lif görünüm (uzunluk/çap) oranı gibi parametrelere bağlı olduğu belirlenmiştir. Nitekim en düşük darbe mukavemeti 25 mm uzunlığında ve görünüm oranı 60 olan kıvrımlı liflerden üretilmiş numunelerden elde edilmiş, en yüksek darbe mukavemeti ise 50 mm uzunlığında ve görünüm oranı 70 – 100 olan çengelli liflerden üretilmiş numunelerden elde edilmiştir (51).

Gopalaratnam ve Shah (1985), darbe etkisine maruz kalan çelik lifli betonun özelliklerini incelemişler ve darbe yüklerine maruz kalan betonun kırılmaya karşı direncini artırın metotlardan birisinin de betona lif ilave etmek olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında, üretikleri numunelerin dinamik davranışını incelemek üzere darbe deneyleri için hazırlanmış Charpy adı verilen düzeneği kullanmışlardır. Yapılan deneyler sonunda lif hacminin % 1.5 oranına çıkması betonun basınç mukavemetini yaklaşık % 35 artırdığı belirlenmiştir. Eğilme mukavemeti deneylerinde ise kontrol betonlarındaki değerlere göre % 0.5 oranında lifli numunelerde % 79, % 1.5 oranında lifli numunelerde ise % 111 artış kaydedilmiştir (34).

Kosa ve Naaman (1990), çelik lifli betonda lif korozyonu ve bu korozyonun betonun mukavemeti ve tokluğu (betonun enerji emme kapasitesi) üzerindeki etkilerini araştırmışlar ve yaptıkları araştırmada korozyonun betondaki donatıları fazla etkilememesine rağmen çelik liflerde ciddi zararlara yol açabileceğini vurgulamışlardır. Üç farklı sıcaklıktaki ($20, 50, 80^{\circ}\text{C}$) % 3.5'luk sodyum klorit çözeltisi kullanarak yaptıkları korozyon deneyleri boyunca çelik lifli beton numunelerin yüzeylerinde hiçbir çatlak belirlenmemiştir. Fakat numune yüzeylerinde açık turuncudan koyu kahverengiye kadar değişen renklenmeler gözlenmiştir. Deneylerde korozyona maruz bırakılan numunelerin lif çapında % 70'lere varan azalmalar meydana gelmiştir. Lif çapındaki bu azalmaların numunelerin eğilme ve çekme deneylerindeki maksimum mukavemette ve dolayısı ile toklukta dikkate değer azalmaya neden olduğu belirlenmiştir. Yani deneylerde kullanılan numunelerin mekanik özelliklerinin lif çapındaki azalmayla doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir (52).

Zhang ve Gjorv (1991), hafif agrega olarak genleştirilmiş kil ve sinterlenmiş uçucu kül kullanarak ürettikleri yüksek mukavemetli hafif betonlar üzerinde yaptıkları çalışmada çimento miktarının artırılmasının veya hafif agrega yerine kısmen doğal kum kullanılmasının basınç mukavemetini fazla etkilemediğini, betonun mukavemetini etkileyen en önemli parametrenin agrega mukavemeti olduğunu belirlemiştir. Çalışmada hafif agrega kullanılarak üretilen betonlardan 1000 kg/cm^2 'den daha fazla bir basınç mukavemeti değeri elde etmenin mümkün olacağı vurgulanmıştır (53).

Wafa ve Ashour (1992), yüksek mukavemetli beton içeresine çelik liflerin ilavesinin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlar ve yaptıkları deneysel çalışma sonucunda çelik liflerin hacimce % 1.5 oranına kadar karışma ilavesinin işlenebilirliği fazla etkilemediğini, fakat daha fazla karıştırma süresinin gerektiğini belirlemiştir. Ayrıca yüksek mukavemetli beton çok gevrek olmasına karşılık bu betona çelik liflerin ilavesinin betonun deformasyon yapma kabiliyetini ve tokluğunu (enerji emme kapasitesi) artırdığı belirlenmiştir. Lif ilavesi ayrıca çatlak genişliğini azaltmış ve böylece betonun deformasyona karşı direncini artırmıştır. Betona % 1.5 oranında lif katılması basınç mukavemetini % 4.6 oranında, eğilme mukavemetini % 67 oranında, ve çekme mukavemetini de % 159.8 oranında artırmıştır (54).

Balaguru ve Dipsia (1993), yaptıkları çalışmada çelik liflerin 90 kg/m^3 oranına kadar karışımı kolayca ilave edilebileceğini, 0.35 oranında su / çimento oranında ve çimento ağırlığının % 15'i kadar silis dumansı ilavesiyle oldukça işlenebilir çelik lifli beton elde edilebileceğini, liflerin ilavesinin basınç mukavemetinde % 20, çekme mukavemetinde % 160, elastisite modülünde % 80, eğilme mukavemetinde % 90 ve kesme mukavemetinde % 80 oranlarında artış sağladığını ve sonuç olarak liflerin ilavesiyle yalnızca yüksek basınç mukavemetine değil, aynı zamanda yüksek eğilme, kesme mukavemetine, yüksek elastisite modülüne ve iyi bir düktiliteye sahip çelik lifli yarı hafif beton elde etmenin mümkün olacağı sonucuna varmışlardır (55).

Yıldırım (1994), hafif agrega olarak pomza kullanılarak üretilmiş hafif ve yarı hafif betonlarda çelik lif kullanmanın betonun özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Sonuçta çelik liflerin işlenebilirliği olumsuz yönde etkilemesine rağmen lif oranının hacimce % 1.5'e çıkmasıyla basınç mukavemetinde % 16 – 23, çekme mukavemetinde % 170 – 175, ve eğilme mukavemetinde ise % 265 – 300 oranlarında artış sağlandığı belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca hafif ve yarı hafif betonlarda çelik lif kullanılarak normal betonların mukavemetine yaklaşıldığını dolayısıyla yapının ağırlığı azaltılarak ekonomik çözümlerin gerçekleştirilebileceği vurgulanmıştır (14).

Torrenti ve Djebri (1995), çelik lifli betonların iki eksenli basınç yükleri altındaki davranışını incelemiştir. Çalışmada düzensiz en kesitli demir lif ve çengelli çelik lif olmak üzere iki farklı tür lif kullanarak ürettikleri numunelere iki eksenli basınç yükü uygulamışlardır. Sonuçta liflerin betondaki yerleşim yönlerinin betonun mukavemetini etkilediğini, lifli betonların kontrol betonlarına göre daha sünük davranışını belirlemiştir. Çelik lifli betonlarda kırılma, yükleme yönüyle $20 - 45^\circ$ açı yapan kesme çatlakları şeklinde oluşmuştur, Demir lifli betonlardaki kırılma ise yükleme yönüne paralel çatlakların oluşmasıyla meydana gelmiştir (56).

Chenku ve Guofan (1995), yaptıkları çalışmada maksimum tane çapı 20 ve 40 mm olan agrega, ve 25, 35, ve 45 mm uzunluğunda çelik lif kullanarak ürettikleri betonların mekanik özelliklerini ve yorulma etkisi altındaki davranışını incelemiştir. Numunelerin basınç mukavemetleri lif ilavesiyle en fazla % 20 oranında artmıştır. Maksimum tane çapının artmasının basınç mukavemetine etkisi ise dikkate alınmayacak

kadar az olduğu belirlenmiştir. Betonların çekme mukavemetleri ise kontrol betonlarına kıyasla lif miktarına da bağlı olarak en fazla % 58 oranında artmıştır. Yorulma deneylerinde de lifli betonlar kontrol betonlarına kıyasla oldukça iyi bir performans göstermişlerdir (40).

Balaguru ve Foden (1996), su / çimento oranını (0.35) ve maksimum agregat boyutunu (19 mm) sabit tutarak ürettikleri 1650 kg/m^3 birim ağırlığındaki hafif betonlar üzerinde yaptıkları çalışmada çelik liflerin karışımı 90 kg/m^3 oranına kadar kolaylıkla ilave edilebildiğini belirlemiştir. Ayrıca bu çelik liflerin hafif betonun birim ağırlığını 100 kg/m^3 oranında artırmasına ve işlenebilirliği olumsuz yönde etkilemesine rağmen basınç mukavemetini yaklaşık % 30 oranında, elastisite modülünü % 30 oranında, eğilme ve çekme mukavemetlerinde ise % 100'den fazla artış sağladığını, sonuç olarak betona silis dumanı ve akişkanlaştırıcı katkılar da ilave etmek suretiyle çelik lifli hafif betondan 420 kg/cm^2 değerinde basınç mukavemeti, ve 65 kg/cm^2 değerinde eğilme ve çekme mukavemeti elde edilmesinin mümkün olabileceğini belirtmişlerdir (57).

Gül ve arkadaşları (1997), Erciş – Kocapınar yöresinden temin edilen pomzanın hafif beton üretiminde kullanılabilirliği üzerine yaptıkları çalışmada karışımındaki toplam agregat hacmine % 25, 50, 75 ve 100 oranlarında normal agregat ilave ederek, 300 kg/m^3 dozajlı, üç farklı çökme değerli (3, 5, ve 7 cm) betonlar üretmişlerdir. Daha sonra % 75 normal, % 25 hafif agregatlı karışılarda dozaj $200, 250, 350$ ve 500 kg/m^3 şeklinde değiştirilerek dozajın betona etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, bu hafif aggreganın hem yalıtılmama amaçlı hem de taşıyıcı olarak kullanılmasında bir sakınca olmadığı görülmüştür (58).

Boratav ve Yeğinobalı (1997), yaptıkları çalışmada hafif agregat kullanarak elde ettikleri 1900 kg/m^3 birim ağırlığındaki yüksek mukavemetli hafif betona lif ilave ederek bu liflerin hafif beton üzerindeki etkilerini araştırmışlar ve hafif betonlarda görülen kırılganlığın çelik lif kullanılmasıyla azaldığını, ayrıca lifsiz numunelerin maksimum basınç gerilmesine ulaştığında patlarcasına kırıldığını bunun yanında çelik lif içeren numunelerde ise gerilme deformasyon eğrisinde maksimum gerilmeden sonra alçalan bir kuyruk kısmı oluştugundan kırılmanın daha uyarıcı bir süre içerisinde olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada ayrıca çelik lifli numunelerin ısı iletkenliğinin normal

betonun ısı iletkenliğinden yaklaşık % 45 oranında düşük olduğunu, 60 kg/m^3 miktارında çelik lif kullanılmasıyla çekme mukavemetinde % 80, eğilme mukavemetinde ise % 15 oranlarında artış sağlandığını belirtilmiştir (9).

Çelik ve Eren (1997), yüksek mukavemetli beton karışımı içeresine 60, 75 ve 83 görünüm (uzunluk/çap) oranlarına sahip, hacimce % 0.5, % 1, % 2 oranlarında çelik lif ilave ederek bu çelik liflerin yüksek mukavemetli beton üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla yaptıkları çalışmada lif hacmi ve lif görünüm oranı arttıkça betonun işlenebilirliğinin ve beton içindeki hava miktarının azaldığını belirlemiştir. Çalışmada ayrıca çelik liflerin yüksek mukavemetli betona ilavesiyle basınç mukavemetinde % 28.27'lik, çekme mukavemetinde ise % 129.91'lik artış sağlandığı bildirilmiştir (59).

Gao ve arkadaşları (1997), yaptıkları çalışmada yüksek mukavemetli hafif beton karışımıçlarına çelik lif ilave edilmesinin betonun mekanik özelliklerini üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla maksimum tane çapı 15 mm olan hafif agrega (genleştirmiş kil), dikdörtgen en kesitli ve 20, 25, 30 mm uzunluğundaki çelik lif, ve naftalin kökenli akışkanlaştırıcı katkı kullanarak üretikleri betonlar üzerinde yapılan deneyler sonunda betona çelik lif ilave edilmesinin basınç mukavemetini yaklaşık % 20 oranında, çekme mukavemetini % 80, ve eğilme mukavemetini ise % 90 oranında artırdığı tespit edilmiştir (37).

Al-Khaiat ve Haque (1998), kür şartlarının hafif betonların erken yaştaki mukavemetleri ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla uçucu kül kökenli hafif agrega kullanarak üretikleri hafif betonları dört farklı kür rejimine (1 günlük hava kürü, 3 günlük kirece doygun su kürü, 7 günlük kirece doygun su kürü, ve 28 günlük kirece doygun su kürü) tabi tutmuşlardır. Kürden sonra numunelerin tümü 28. ve 91. günde deneye tabi tutulmuştur. Çalışmanın sonunda 28 gün küre tabi tutulan numunelerin basınç mukavemetleri 510 (28. gün) – 560 (91. gün) kg/cm^2 arasında değiştiği belirlenmiştir. 1 ve 3 gün kür edilen numunelerin 28 günlük basınç mukavemetleri ile 28 gün kür edilen numunelerin 28 günlük basınç mukavemetleri arasında pek fark olmamasına rağmen, 91 günlük basınç mukavemetleri 28 gün kür edilen numunelere göre % 12 – 16 oranlarında düşük olduğu belirlenmiştir. 7 gün kür

edilen numunelerin mukavemetleri ile 28 gün kür edilen numunelerin mukavemetleri arasında ise bir fark olmadığı tespit edilmiştir (60).

Toutanji ve Bayasi (1998), yaptıkları çalışmada kür şartlarının ve karışimdaki çelik lif dağılıminin betonun eğilme ve basınç mukavemetleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu amaçla maksimum tane çapı 19 mm olan normal agregat, 0.8 mm çapında ve 51 mm uzunluğunda çelik lif, akışkanlaştırıcı katkı kullanarak ürettikleri betonları üç farklı kür rejimine (normal su kürü, buhar kürü, ve hava kürü) tabi tutmuşlardır. Yapılan deneyler neticesinde su kürüne kıyasla buhar kürünün numunelerin basınç mukavemetini % 22 oranında artırdığı, eğilme mukavemetini değiştirmediği, hava kürünün ise basınç mukavemetini % 15, eğilme mukavemetini de % 70 oranında azalttığı sonucuna varmışlardır. Çalışmada ayrıca eğilme deneylerine tabi tutulan numunelerin kalıba yerleştirme yönüne dik olarak yüklenmesiyle elde edilen sonuçların, kalıba yerleştirme yönüne paralel olarak yüklenmesiyle elde edilen sonuçlardan yaklaşık % 14 – 30 arasında düşük olduğu görülmüştür (41).

Pigeon ve Cantin (1998), yaptıkları çalışmada çelik lifli betonların 0 °C'den düşük sıcaklıklardaki mekanik davranışlarını incelemiştir. Bu nedenle çelik lif, akışkanlaştırıcı katkı, silis dumanı kullanarak ürettikleri betonları 20, -10, ve -20 °C'de deneye tabi tutmuşlardır. Sonuç olarak sürekli 0 °C'den düşük sıcaklıklarda bulunan betonların boşluklarındaki suyun donması neticesinde boşluk oranının azaldığı ve böylece betonun mukavemetinin ve yük taşıma kapasitesinin arttığı tespit edilmiştir (61).

Sancak ve Ünal (1999), pomzanın hafif agregat olarak kullanılmasıyla elde edilen karışımlara ilave edilen liflerin tipinin ve miktarının betonun özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla 0.6 mm çapında, 40 mm uzunluğunda ve 0.5 mm çapında, 30 mm uzunluğunda iki farklı çengelli çelik lifi hacimce % 0.5, 1, ve 1.5 oranlarında betona ilave ederek ürettikleri hafif betonlar üzerinde yaptıkları deneyler sonucunda lif miktarının artmasının karışımın işlenebilirliğini azalttığını, karışimdaki lif ve hafif agregat miktarının üretilen numunelerin su emme ve kompositelerini olumsuz yönde etkilediğini, karışımı ilave edilen liflerin basınç mukavemetini en fazla % 20 oranında artırdığını ve uzun liflerin kısa liflere oranla işlenebilirliği daha fazla etkilemesi ve

beton içerisinde fazla oranda boşluk oluşturması nedeniyle basınç mukavemetini kısa liflere kıyasla daha az (yaklaşık % 8) etkilediğini tespit etmişlerdir (10).

Nataraja ve arkadaşları (1999), yaptıkları çalışmada betona 39, 58, ve 78 kg/m³ oranlarında kıvrımlı çelik lif ilave edilmesinin betonun basınç yükleri altındaki davranışları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sonuçta betona lif ilave edilmesinin lıfsız numunelere kıyasla basınç mukavemetini yaklaşık % 15 – 18 oranlarında artırıldığı, gerilme – deformasyon eğrisinde, yük maksimuma ulaştığında betonun yaptığı deformasyonu da % 44 – 76 oranlarında artırıldığı belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca gerilme – deformasyon eğrisinin maksimum yükten sonraki kısmın eğiminin betondaki lif miktarının artmasıyla azaldığı böyledikle betonun topluğunun (enerji emme kapasitesi) arttığı belirtilmiştir (35).

Almansa ve Cánovas (1999), yaptıkları çalışmada normal ve çelik lifli betonların darbe yükleri altındaki davranışını incelemiştir. Bu amaçla çapı 0.5 mm ve uzunluğu 50 mm olan çengelli çelik lif kullanarak ürettikleri 60 x 60 cm boyutlarındaki beton levhaları (mermi fırlatmak suretiyle) darbe yüklerine maruz bırakılmışlardır. Çalışmanın sonucunda betonun darbe etkisiyle zarar görmemesi için bir analitik model önerilmiştir. Bu modele göre lifli betonların darbe yüklerinden etkilenmemesi için minimum beton kalınlığının \geq (1,2 . lif boyu) olması gerekmektedir. Yapılan darbe deneylerinde normal betonlara fırlatılan mermiler beton kalınlığının % 45 – 50'sine kadar saplanırken, lifli betonlarda % 60'lara varan bir iyileşme görülmüştür (62).

Luo ve arkadaşları (2000), çelik lifli betonların darbe yükleri altındaki davranışını incelemek amacıyla yaptıkları çalışmada, ürettikleri yüksek mukavemetli donatılı beton (donatıların çapı 6 mm) ve çelik lifli beton (kullanılan liflerin uzunluk/çap oranı 60 ve 35) numuneler üzerinde yaptıkları darbe deneyleri sonucunda donatılı betonların darbe etkisiyle parçalandıkları buna karşılık lifli betonların parçalanmadan kaldıkları belirtilmiştir. Bunun nedeninin lifli betonların darbe etkisiyle betonda oluşan çatlakların ilerlemesini engellemesi ve betonu daha sünek bir davranışa zorlaması olabileceği bildirilmiştir. Çalışmada ayrıca uzunluk/çap oranı 35 olan liflerin kullanıldığı betonlarda oluşan çatlakların, uzunluk/çap oranı 60 olan liflerin kullanıldığı betonlarda

oluşan çatlaklara kıyasla daha geniş olduğu tespit edilmiş ve böylelikle lifin geometrik şeklinin de betonun darbe mukavemeti üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır (63).

Ding ve Kusterle (2000), yaptıkları çalışmada erken yaşlardaki (9 – 81 saatlik) çelik lifli betonların basınç yükleri altındaki davranışlarını incelemiştir. Yaptıkları deneysel çalışma sonunda betona lif ilave edilmesinin betona erken yaşlarda bile daha sünec bir davranış kazandırdığı belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca betona çelik lif ilavesinin normal betona kıyasla basınç mukavemetini 9. – 81. saatler arasında yaklaşık % 2 – 34 oranlarında artırdığı belirtilmiştir. Sonuç olarak betona lif ilave edilmesinin sadece uzun sürelerde değil, çok kısa bir zamanda bile mukavemet üzerinde oldukça etkili olduğu vurgulanmıştır (36).



3. KULLANILAN MALZEMELER

Bu bölümde, deneysel çalışmalarında kullanılan doğal hafif agrega, normal agrega, çelik lif, çimento, karışım suyu ve deneylerde kullanılan diğer malzemeler hakkında bilgi verilmiştir.

3. 1. Doğal Hafif Agrega

Çalışmada doğal hafif agrega olarak Van'ın Erciş ilçesinden ve Erzurum'un Pasinler ilçesinden temin edilen volkanik kökenli, beyaz renkli pomza taşı kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalarında kullanılan hafif agrega, metod bölümünde de belirtildiği gibi ocağın özelliklerini tamamen yansıtacak şekilde farklı yerlerden alınmıştır. Ocaktan alınan bu hafif agrega doğal durumuyla gevşek yapıda olup, küçük tane boyutuna sahip olduğundan laboratuarda kırma parçalama gibi mekanik işlemler uygulanmamıştır.

Deneylerde kullanılmak üzere Erciş ve Pasinler pomzasından toplam 3 m^3 alınmış ve laboratuarda özellikleri tayin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Araştırma Sonuçları bölümünde verilmiştir.

3. 2. Normal Agrega

Üretilen betonlarda normal agrega olarak Erzurum şehir merkezine 5 km uzaklıkta bulunan Dutçu mevkiiinin doğal kırılmamış agregası kullanılmıştır. Agrega dere malzemesi olup, piyasaya sürülmeden önce yıkandırılmıştır.

Bu malzemeden, deneylerde kullanılmak üzere yaklaşık 2 m^3 alınmış ve bazı özellikleri tayin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Araştırma Sonuçları bölümünde verilmiştir.

3. 3. Çelik Lif

Deneysel çalışmalarında BEKAERT firmasının üretmiş olduğu 60 mm uzunluğunda ve 0.8 mm çapında Dramix marka çengelli çelik lif kullanılmıştır. Bu çelik liflerin özgül

ağırlığı 7.85 g/cm^3 olup, lifler birbirine yapışık demetler halinde bulunmaktadır. Beton üretimi sırasında bu lif kümeleri su ile karşılaşıklarında lifler birbirlerinden ayrılarak tek lif halinde karışım içerisinde homojen bir dağılım göstermektedirler.

3. 4. Çimento

Bu çalışmada, Aşkale Çimento Fabrikasının 2000 yılı Haziran ayında üretilmiş olduğu Normal Portland Çimentosu (PÇ 32.5) kullanılmıştır. Bu çimentonun yine aynı fabrikada yaptırılan fiziksel, mekanik ve kimyasal analizlerinin sonuçları Tablo 3. 1 ve 3. 2'de verilmiştir.

Tablo 3. 1. Çimentonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Özgül Kütle (g/ml)		3.03
Litre Kütlesi (g/l)		1180
Priz Başlangıcı (saat)		3.00
Priz Sonu (saat)		3.30
Hacim Genişlemesi	Soğukta (mm)	3
	Sıcakta (mm)	1
	Toplam (mm)	4
Basınç Mukavemeti (N/mm ²)	1 gün	9.4
	2 gün	15.6

Tablo 3. 2. Çimentonun Kimyasal Özellikleri

Kimyasal Bileşen	Oran (%)
SiO ₂	25.92
Al ₂ O ₃	6.88
Fe ₂ O ₃	3.96
CaO	53.28
MgO	3.21
SO ₃	2.83
Kızdırma Kaybı	2.84
Çözünmeyen Kalıntı	7.72
Serbest CaO	0.35
Tayin Edilemeyen	0.84

3. 5. Karışım Suyu

Beton üretiminde kullanılacak suyun temiz olması ve betona olumsuz bir etki yapmaması gerekmektedir. İçilebilir sular beton üretiminde karışım suyu olarak kullanılabilirler (6). Çalışmada karışım suyu olarak sıcaklığı yaklaşık 18°C olan Atatürk Üniversitesi içme suyu kullanılmıştır.

3. 6. Diğer Malzemeler

Beton numunelerin su kürü aşamasında kirece doygun su ortamının sağlanması için söndürülülmüş torba kireç, numunelerin kalıplara yapışmasını engellemek amacıyla ince motor yağı ve sertleşmiş numunelerin başlıklanması amacıyla da kükürt kullanılmıştır.



4. METOD

Bu bölümde, hem hafif hem de normal agregat özelliklerini belirlemek için uygulanan yöntemler ile bu agregatlarla üretilen beton karışımımlarına ilişkin seçeneklerin tespiti, karışım oranlarının belirlenmesi, beton üretimi, taze ve sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde kullanılan yöntem açıklanmıştır.

Deneysel çalışma boyunca gerek agregat deneylerinde gerekse beton deneylerinin yapılmasında TSE (Türk Standartları Enstitüsü) standartları göz önünde bulundurulmuş ve bu standartlar titizlikle uygulanmaya çalışılmıştır.

Agregat deneylerinden bir kısmı Atatürk Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü Araştırma Laboratuvarında, diğer bir kısmı ve beton deneylerinin tümü aynı fakültenin İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi ve Tatbiki Mekanik Laboratuvarında yapılmıştır.

Deneylerden elde edilen sonuçlar Araştırma Sonuçları bölümünde topluca verilmiştir.

4. 1. Agregat Deneylerinde Uygulanan Yöntemler

Agregat ocakları belirli bir geometriye sahip olmadıklarından gerek hafif agreganın gerekse normal agreganın ocaktan alınmasına son derece özen gösterilmiş ve ocağın bütün özelliklerini yansıtacak şekilde numune alınmıştır. Ayrıca numune alınan yerlerde agreganın yanılıcı bir şekilde tane sınıflarına ayrılmış veya toplanmış olmamasına, renk ve yapı değişikliği bulunmamasına dikkat edilmiştir (64).

Ocaklardan alınan numuneler daha sonra laboratuara getirilerek deney numunesi hazırlanmıştır. Deney numunesi hazırlama işleminde dörde bölme (çeyrekleme) yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemin gereği olarak yiğinin her tarafını temsil edecek şekilde alınan örnekler iyice karıştırıldıktan sonra düz bir zemin üzerinde taban çapı yüksekliğinin yaklaşık dört katı olacak şekilde kesik koni olarak biçimlendirilmiştir. Daha sonra bu alan bir malanın kenarı ile dört eşit parçaya ayrılmış ve karşılıklı iki

parçası atılıp geriye kalan parçalar bir araya getirilip harmanlandıktan sonra yeni bir dairesel alan oluşturulmuştur. Küçültme işlemine bu şekilde devam edilerek her bir agrega deneyi için gereken mikarda numune alınmıştır (64).

Agrega deneyleri ilgili standartlarda belirtilen sayıda yapılmış, elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınıp, agreganın özelliği olarak verilmiştir. Deneyler yapılırken aggrega içeresine dışarıdan girmiş bütün organik ve inorganik maddeler ayıklanmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmada hem hafif hem de normal aggrega kullanıldığından aggrega deneyleri her iki tür aggrega üzerinde de yapılmıştır. Fakat çalışmanın asıl konusunu hafif aggrega oluşturduğundan TS 1114 – 1986’de (15) belirtilen bütün deneyler yapılmış, normal aggrega için ise yanlışca elek analizi, özgül ağırlık, su emme ve ince madde oranı tayini deneyleri yapılmıştır.

Elek analizi deneyinde; toplama kabı, TS 1227’ye uygun 0.25 mm, 0.50 mm, 1 mm, 2 mm göz açıklıklı kare gözlü tel elekler ile, TS 1226’ya uygun 4 mm, 8 mm ve 16 mm göz açıklıklı kare delikli tel elekler kullanılarak TS 3530 – 1980’a (65) göre deney yapılmıştır.

Birim ağırlık deneyinde, hacmi bilinen standart birim ağırlık kabı kullanılmıştır. Fakat hafif aggregaların darbelere karşı dayanıksız olması nedeniyle şisleme esnasında aggregaların kırılma ihtimalinden dolayı sıkışık birim ağırlık deneyi yapılmamış, sadece gevşek birim ağırlık deneyi ile yetinilmiştir (15). Birim ağırlık deneyi TS 3529 – 1980’a (66) göre yapılmıştır.

Organik kökenli madde tayini deneyinde ise % 3'lük NaOH (sodyum hidroksit) çözeltisi kullanılarak TS 3673 – 1982’e (67) uygun olarak yapılmıştır.

Bu deneylerden başka; sülfat miktarı tayini deneyi TS 3674 – 1981’deki (68), klorür miktarı tayini deneyi (çeliğe zarar veren maddeler deneyi) TS 3732 – 1982’deki (69), özgül ağırlık ve su emme oranı tayini deneyi TS 3526 – 1980’deki (70), ince madde oranı deneyi TS 3527 – 1980’deki (71), ve dona dayanıklılık tayini deneyi ise TS 3655 – 1981’deki (72) esaslara göre yapılmıştır.

Beton karışım hesaplarında kullanılan hafif agregaların özgül ağırlık faktörü değerleri her bir tane sınıfı için ayrı ayrı TS 3234 – 1978’deki (21) ve TS 2511 – 1977’deki (25) hükümlere göre piknometre yöntemiyle hesaplanmıştır. Piknometre olarak 1000 ml’lik cam mezür kullanılmış ve 10 dakikalık su emme süresi esas alınmıştır.

4. 2. Beton Seçeneklerinin Belirlenmesi

Bu bölümde üretilcek beton gruplarında kullanılacak agregaların granülometri eğrisinin belirlenmesi ve karışım oranlarının tespitinde izlenen yol açıklanmıştır.

Şekil 5. 1 ve Şekil 5. 2 incelendiğinde hem hafif hem de normal agreyanın granülometri eğrilerinin bazı noktalarda TS 706’da verilen standart değerleri aştığı görülmektedir. Agrega granülometrisinin de betonun özellikleri üzerinde etkisi olduğundan (3, 20), deneysel çalışma boyunca ayarlanmış tek tip granülometri eğrisi kullanma yoluna gidilmiştir. Eğrinin belirlenmesinde ise TS 2511 – 1977’de (25) ve TS 10514 – 1992 ‘de (42) bildirilen ince agrega oranları esas alınmıştır. TS 2511 – 1977’ye göre, en büyük tane boyutu 16 mm olan agrega için ince agrega yüzdesi, hacim olarak % 40 - % 60 arasında olmalıdır. TS 10514 – 1992’ye göre ise çelik lifli betonlarda bulunması gereken ince agrega yüzdesi en az % 40 – 45 olmalıdır.

Bu çalışmada ise ince agrega oranı olarak % 50 değeri seçilerek sürekli bir granülometri eğrisine sahip karışımlar yapılmıştır. Buna göre 0 – 2 mm tane sınıfı için % 30, 2 – 4 tane sınıfı için % 20, 4 – 8 ve 8 – 16 mm tane sınıfları için % 25 oranları seçilmiştir. Seçilen bu granülometri eğrisi de TS 706’da maksimum agrega çapı 16 mm için verilen standart eğrilerde uygun bölge olarak belirtilen 3. bölgeye düşmektedir (Şekil 5. 2).

Ancak Pasinler pomzası Erciş pomzasına oranla daha fazla ince aggregaya sahip olmasından dolayı tüm çalışma boyunca hafif ince agrega olarak Pasinler pomzası, hafif iri agrega olarak da Erciş pomzası kullanılmıştır.

Çalışmada ayarlanmış granülometri eğrisi kullanıldığından agregalar karışma doğal halleriyle değil de belli tane sınıflarına ayrılmış olarak ilave edilmişlerdir. Ayırma işlemi hem hafif hem de normal agreyanın 16 mm, 8 mm, 4 mm ve 2 mm

açıklığındaki eleklerden elenmesiyle gerçekleştirilmiş olup, elenen Pasinler pomzası 0 – 2 ve 2 – 4; Erciş pomzası 4 – 8 ve 8 – 16; normal agrega ise 0 – 2, 2 – 4, 4 – 8 ve 8 – 16 tane sınıflarına ayrılarak, ayrı ayrı bölmelerde muhafaza edilmiştir (Şekil 4. 1).

Çalışmada maksimum agrega boyutu (16 mm), dozaj (300 kg/m^3), hava miktarı (% 3) ve çökme değeri (3 ± 1) sabit tutularak sürekli granülometriye sahip karışımlar üretilmiştir. Bu karışımlara toplam agrega hacmine oranla % 25, % 50, % 75 ve % 100 oranlarında pomza her bir tane sınıfı için ayrı ayrı olmak üzere ilave edilmiştir. Bu karışımların her biri için de hacimce % 0, % 0.5, % 1 ve % 1.5 oranlarında (2, 12) çelik lif ilave edilerek toplam 16 grup beton üretilmiştir.

Üretilen bu beton gruplarında kullanılan çelik lif hepsinde aynı tip olup, 60 mm uzunluğunda ve 0.80 mm çapında çengelli çelik lif kullanılmıştır.

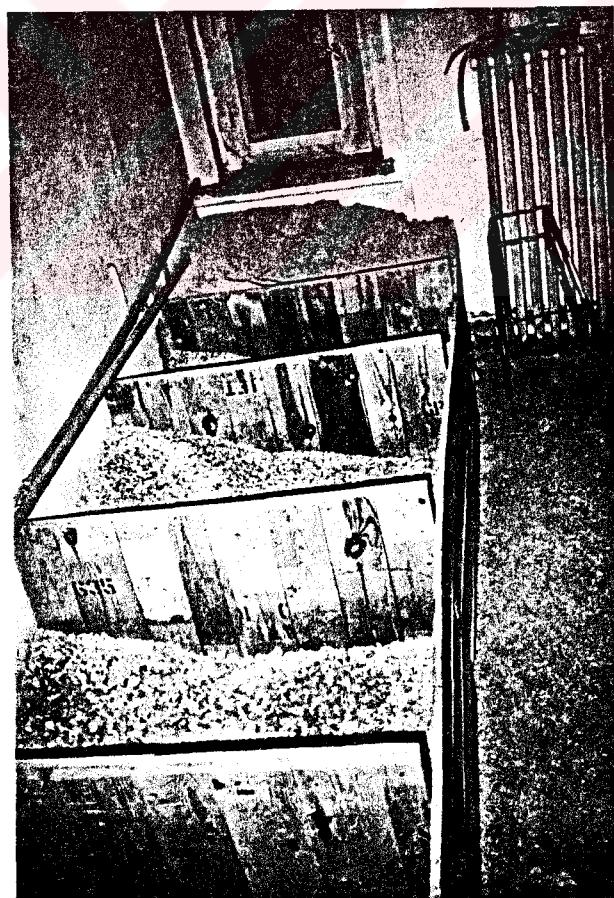
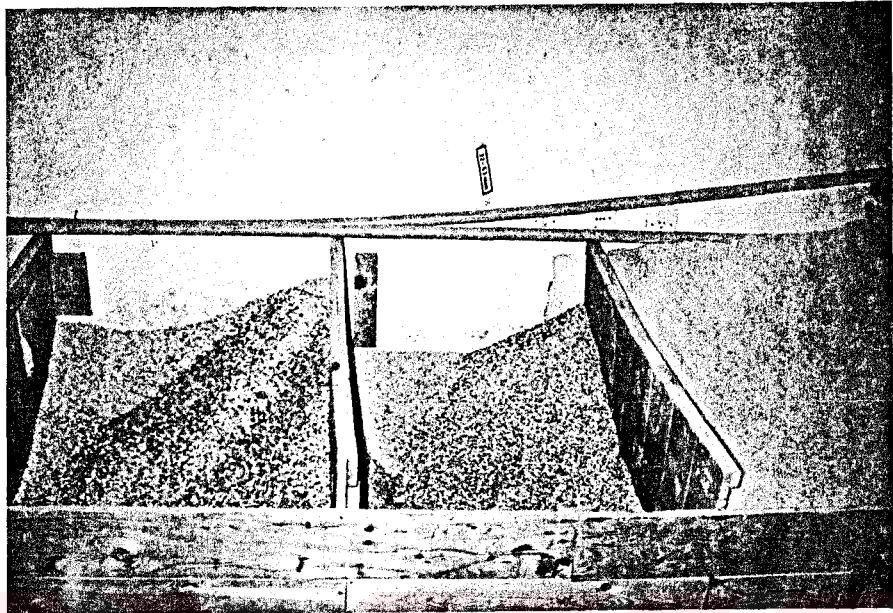
Bu beton gruplarının her biri için yarısı 7 günlük, yarısı da 28 günlük olmak üzere toplam 12 adet $15 \times 30 \text{ cm}$ boyutlu silindirik numuneler, 6 adet de $15 \times 15 \times 50 \text{ cm}$ boyutlu prizmatik numuneler üretilmiştir. Üretilen silindirik numunelerin yarısı tek eksenli basınç deneyinde, diğer yarısı yarmada çekme deneyinde ve eğilme deneyi için de prizmatik numuneler kullanılarak hafif agregalı betonlarda çelik lif kullanılmasının etkisi araştırılmıştır.

4. 3. Karışım Hesapları

Karışım hesaplarının belirlenmesinde TS 2511 – 1977, TS 3234 – 1978 ve TS 802 – 1985'den faydalanılmıştır.

Genellikle hafif agregalı betonların net su/çimento oranı karışım hesaplarına esas olabilecek yeterli doğrulukta belirlenemediğinden hafif agregalı beton karışımları şart koşulan kıvamdaki çimento dozu esasına göre bir seri ön deney yapılarak hesaplanmıştır (25).

Seçilen kıvamı verecek net su miktarı, yeterlik deneyi ile saptanmalıdır. Seçilen kıvama göre gerekli su miktarı $200 - 300 \text{ kg/m}^3$ arasında değişir. Kullanılan doğal hafif agrega



Şekil 4. 1. Agregaların Tane Sınıflarına Ayrılmış Hali

fazla gözenekli yapıya sahip olduğundan ve çok miktarda su emdiğinden gerekli suyun saptanması için deneme karışımıları yapılmıştır. $200 - 300 \text{ kg/m}^3$ arasında seçilen su miktarıyla hazırlanan bu deneme karışımılarına seçilen kıvama erişinceye kadar su eklerek (veya azaltılarak) karışımıma girecek net su miktarları hesaplanmıştır (21).

Bu şekilde bulunan su miktarlarına çimento ağırlığının özgül ağırlığına bölünmesiyle elde edilen çimento hacmi, bütün karışımalar için % 3 olan hava hacmi (5) ve lif kullandığımda lif hacmi eklenmiş ve 1000 dm^3 'den çıkarılarak toplam agrega hacmi bulunmuştur. Böylece elde edilen agrega hacmi önce hafif ve normal agrega oranlarına, daha sonra da tane sınıflarına ayrılmıştır.

Karışma giren aggregaların ağırlıkları ise, hafif agrega hacimlerinin özgül ağırlık faktörleriyle, normal agrega hacimlerinin ise özgül ağırlık ve nem yüzdesiyle çarpılmasıyla elde edilmiştir.

Pomzanın özgül ağırlık ve su emme değerlerini yeterli bir şekilde belirlemektedeki zorluklardan dolayı, bu değerleri bilmeyi gerektirmeyen bir yöntem kullanmak gereklidir. Bunun için aggregaların özgül ağırlıkları yerine değişik nem durumlarındaki özgül ağırlık faktörü kavramı geliştirilmiştir. Özgül ağırlık faktörü özgül ağırlıktan farklı, ancak hesaplarda özgül ağırlık gibi kullanılabilen sayısal bir büyüklüktür. Özgül ağırlık faktörü değeri piknometre yöntemiyle hesaplanabileceği gibi, doğrudan deneme karışımılarıyla da hesaplanabilir (21, 25). Bu çalışmada doğal hafif aggregaların özgül ağırlık faktörleri 10 dakikalık su emme esasına göre piknometre yöntemiyle hesaplanmıştır.

Hafif aggregalar için özgül ağırlık faktörleri ile normal aggregalar için özgül ağırlık ve nem yüzdesi her bir tane sınıfı için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Ancak normal aggreganın özgül ağırlığı her bir tane sınıfı için belirlendiğinde yoğunlukları arasında hesapta etkili olacak düzeyde farklılık tespit edilmediğinden (18) 0 – 2 ve 2 – 4 tane sınıfları için ince, 4 – 8 ve 8 – 16 tane sınıfları için iri olmak üzere yalnızca iki farklı özgül ağırlık değeri kullanılmıştır.

Karışım hesaplarında kullanılan hafif agreganın özgül ağırlık faktörü değerleri ve normal agreganın nem içeriği değerleri Tablo 4. 1'de verilmiştir.

Tablo 4. 1. Agregaların Özgül Ağırlık Faktörleri ve Nem İçerikleri

Tane Sınıfı	Pomza Özgül Ağırlık F.	Normal Agrega Nem İçeriği (%)
0 - 2	1.74	1.45
2 - 4	1.49	1.02
4 - 8	1.06	1.01
8 - 16	0.96	0.87

Karışimdaki malzeme miktarları, karışma ağırlık olarak konularak yeterli hacimde deney numuneleri üretilmiştir. Deney numunelerinin hacimleri ise muhtemel malzeme zayıatından dolayı kullanılacak her bir beton kalibinin hacminin % 10 fazlası alınarak belirlenmiştir (5, 8).

Betonların üretiminde seçilen çökme değerine ulaşmak için sadece su miktarları ayarlanmıştır. Daha sonra artırılan veya azaltılan su miktarına göre karışımlara girecek gerçek malzeme miktarları belirlenmiştir. 1 m³ beton için her bir karışma girecek gerçek malzeme miktarları Tablo 4. 2, Tablo 4. 3, Tablo 4. 4 ve Tablo 4. 5'de topluca verilmiştir.

Tablolarda verilen değerlerin hesaplanmasında izlenen yol, % 1.0 lif, % 25 pomza + % 75 normal agrega, 3 ± 1 çökme değerli ve 300 kg/m³ dozlu beton örneği üzerinde aşağıda açıklanmıştır.

Normal agreganın özgül ağırlıkları ince agrega (0 - 2 ve 2 - 4) için 2.28 kg/dm³, iri agrega (4 - 8 ve 8 - 16) için 2.45 kg/dm³ olarak, nem içeriği değerleri ise 0 - 2 için 1.45, 2 - 4 için 1.02, 4 - 8 için 1.01, 8 - 16 için 0.87 olarak hesaplanmıştır.

Pomzanın 10 dakikalık su emme esasına göre özgül ağırlık faktörleri de 0 - 2 için 1.74, 2 - 4 için 1.49, 4 - 8 için 1.06, 8 - 16 için 0.96 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4. 2. Lif Oranı % 0 olan Beton Karışımlarında Kullanılan Malzeme Miktarları

Hafif Agrega Oranları (%)	25	50	75	100
	Hacim (dm ³)	Ağırlık (kg)	Hacim (dm ³)	Ağırlık (kg)
Teorik Dozaj	99	300	99	300
Gerçek Dozaj	95.677	289.80	95.149	288.30
Su	227.70	227.70	249.86	249.86
Hava	30	-	30	-
Çelik Lif	-	-	-	-
Pomza	0 - 2	48.613	84.587	93.839
	2 - 4	32.409	48.290	62.560
	4 - 8	40.511	42.942	78.20
	8 - 16	40.511	38.890	78.20
Ağrega Zemir	0 - 2	145.840	337.337	93.839
	2 - 4	97.227	223.938	62.560
	4 - 8	121.533	300.764	78.20
	8 - 16	121.533	300.349	78.20

Tablo 4. 3. Lif Oranı % 0.5 olan Beton Karışımlarındaki Kullanılan Malzeme Miktarları

Hafif Agrega Oranları (%)	25	50	75	100
	Hacim (dm ³)	Ağırlık (kg)	Hacim (dm ³)	Ağırlık (kg)
Teonik Dozaj	99	300	99	300
Gerçek Dozaj	98.812	299.4	98.772	299.28
Su	221.556	221.556	241.818	241.818
Hava	30	-	30	-
Çelik Lif	4.99	39.172	4.99	39.156
Pomza	0 - 2	48.352	84.132	93.672
	2 - 4	32.236	48.031	62.449
	4 - 8	40.294	42.712	78.061
	8 - 16	40.294	38.682	78.061
Agregat Norma	0 - 2	145.058	335.527	93.672
	2 - 4	96.705	222.737	62.449
	4 - 8	120.881	299.150	78.061
	8 - 16	120.881	298.734	78.061

Tablo 4. Lif Oranı % 1.0 olan Beton Karışımlarında Kullanılan Malzeme Miktarları

Hafif Agrega Oranları (%)	25	50	75	100
	Hacim (dm ³)	Ağırlık (kg)	Hacim (dm ³)	Ağırlık (kg)
Teorik Dozaj	99	300	99	300
Gerçek Dozaj	97.723	296.100	98.911	299.700
Su	225.362	225.362	250.710	250.710
Hava	30	-	30	-
Çelik Lif	9.870	77.480	9.989	78.420
Pomza	0 - 2	47.819	83.205	91.558
	2 - 4	31.880	47.501	61.038
	4 - 8	39.850	42.242	76.298
	8 - 16	39.850	38.256	76.298
Agregat Normal	0 - 2	143.458	331.828	91.558
	2 - 4	95.638	220.279	61.038
	4 - 8	119.548	295.852	76.298
	8 - 16	119.548	295.441	76.298

Tablo 4. 5. Lif Oranı % 1.5 olan Beton Karışımlarında Kullanılan Malzeme Miktarları

Hafif Agrega Oranları (%)	25			50			75			100		
	Hacim (dm ³)	Ağırlık (kg)	Hacim (dm ³)	Ağırlık (kg)	Hacim (dm ³)	Ağırlık (kg)	Hacim (dm ³)	Ağırlık (kg)	Hacim (dm ³)	Ağırlık (kg)	Hacim (dm ³)	Ağırlık (kg)
Teorik Dozaj	99	300	99	300	99	300	99	300	99	300	99	300
Gerçek Dozaj	98.317	297.900	98.218	297.600	98.119	297.300	98.119	297.300	98.119	297.300	98.119	297.300
Su	230.780	230.780	255.899	255.899	266.618	266.618	266.618	266.618	277.098	277.098	277.098	277.098
Hava	30	-	30	-	30	-	30	-	30	-	30	-
Çelik Lif	14.895	116.926	14.880	116.808	14.865	116.690	14.865	116.690	14.865	116.690	14.865	116.690
Pomza	0 - 2	46.993	81.768	90.172	156.899	132.890	231.228	231.228	174.215	174.215	303.134	303.134
	2 - 4	31.329	46.680	60.115	89.571	88.593	132.004	132.004	116.143	116.143	173.053	173.053
	4 - 8	39.161	41.511	75.143	79.652	110.742	117.386	117.386	145.178	145.178	153.889	153.889
	8 - 16	39.161	37.595	75.143	72.137	110.742	106.312	106.312	145.178	145.178	139.371	139.371
	0 - 2	140.979	326.093	90.172	208.573	44.593	103.146	103.146	-	-	-	-
Ağrega Normal	2 - 4	93.985	216.473	60.115	138.458	29.531	68.017	68.017	-	-	-	-
	4 - 8	117.483	290.740	75.143	185.959	36.914	91.354	91.354	-	-	-	-
	8 - 16	117.483	290.337	75.143	185.702	36.914	91.227	91.227	-	-	-	-

Su miktarı TS 3234 – 1978’den (21) hareketle 215 kg olarak seçilmiştir.

Buna göre 1 m³’deki beton bileşenleri aşağıdaki gibi olacaktır:

Çimento Hacmi	$300/3.03 = 99 \text{ dm}^3$
Su	215 dm^3
Hava	30 dm^3
Çelik Lif	10 dm^3
Toplam Agrega Hacmi	$1000 - (99.01+215+30+10) = 645.99 \text{ dm}^3$
- Pomza Hacmi (%25)	161.498 dm^3
- Normal Agrega Hacmi (%75)	484.492 dm^3

Tane sınıflarına göre aggrega hacmi oranları ;

	Pomza (dm ³)	Normal Agrega (dm ³)
0 – 2 (% 30)	48.449	145.348
2 – 4 (% 20)	32.300	96.898
4 – 8 (% 25)	40.375	121.123
8 – 16 (% 25)	40.375	121.123

Karışma girecek ağırlıklar ;

	Pomza (kg)	Normal Agrega (kg)
0 – 2 (% 30)	$48.449 \times 1.74 = 84.301$	$145.348 \times 2.28 \times 1.0145 = 336.199$
2 – 4 (% 20)	$32.300 \times 1.49 = 48.127$	$96.8980 \times 2.28 \times 1.0102 = 223.181$
4 – 8 (% 25)	$40.375 \times 1.06 = 42.798$	$121.123 \times 2.45 \times 1.0101 = 299.749$
8 – 16 (% 25)	$40.375 \times 0.96 = 38.760$	$121.123 \times 2.45 \times 1.0087 = 299.333$

Bu miktarlardan 6 dm³ için malzeme alınıp karışım yapılmıştır. Karışım sonucu çökme değeri düşük çıktığinden 6 dm³’luk karışımı 80 ml su ilave edilerek istenen çökme değeri olan 3 cm elde edilmiştir. Buna göre;

1 m³ için ilave edilen su miktarı = $(0.080 / 6) \times 1000 = 13.33 \text{ dm}^3$ olur.

Bu durumda karışımının yeni hacmi $1000 + 13.33 = 1013.33 \text{ dm}^3$ olmaktadır. Karışımı tekrar 1000 dm^3 'e indirmek için bütün bileşenler (hava hariç) $1000 / 1013.33 = 0.987$ ile çarpılmalıdır. Buna göre karışıma girecek net oranlar aşağıdaki gibi olur.

MALZEME	HACİM (dm^3)	AĞIRLIK (kg)
Çimento	$99 \times 0.987 = 97.723$	$300 \times 0.987 = 296.1$
Su	$(215 + 13.33) \times 0.987 = 225.362$	225.362
Hava	30	-
Çelik Lif	$10 \times 0.987 = 9.87$	$78.500 \times 0.987 = 77.480$
AGREGA		
• POMZA		
0 – 2	$48.449 \times 0.987 = 47.819$	$84.301 \times 0.987 = 83.205$
2 – 4	$32.300 \times 0.987 = 31.880$	$48.127 \times 0.987 = 47.501$
4 – 8	$40.375 \times 0.987 = 39.850$	$42.798 \times 0.987 = 42.242$
8 – 16	$40.375 \times 0.987 = 39.850$	$38.760 \times 0.987 = 38.256$
• NORMAL AGREGA		
0 – 2	$145.348 \times 0.987 = 143.458$	$336.199 \times 0.987 = 331.828$
2 – 4	$96.898 \times 0.987 = 95.638$	$223.181 \times 0.987 = 220.279$
4 – 8	$121.123 \times 0.987 = 119.548$	$299.749 \times 0.987 = 295.852$
8 – 16	$121.123 \times 0.987 = 119.548$	$299.333 \times 0.987 = 295.441$
TOPLAM	1000 dm^3	1953.55 kg

4. 4. Betonun Üretilmesi

Karışım oranları belirlenen malzemeler 0.001 g hassasiyetli terazide tartıldıktan sonra betoniyere ilk önce hafif agregat olmak üzere konulmuştur. Hafif agregadan sonra, şayet karışım % 100 pomza ise karışım suyunun 1/3'ü, değil ise karışımındaki hafif agregat oranına göre daha az oranlarda su ilave edilerek yaklaşık 1 dakika karıştırılmıştır (5, 21). Bu ön ıslatmadan sonra betoniyere sırasıyla normal agregat ilave edilecekse normal agregat, çimento, geriye kalan karışım suyu ve lif ilave edilecekse lif konularak yaklaşık 1.5 dakika daha karıştırılmıştır. Ardından 1 dakikalık dınlendirme süresinden sonra 1 dakika daha karıştırılarak betonlar üretilmiştir.

Ancak çelik lifli betonların karıştırılma aşamasında liflerin bir araya gelip topaklaşarak karışımı güçlendirmesi ve karışım sırasında liflerin eğilerek deform olması lifli betonlarda en çok karşılaşılan problemler olduğundan (2) bu tür problemlerin ortaya

çıkmasını engellemek ve homojen, iyi bir beton karışımı elde etmek için liflerin betona karışımı ilavesi esnasında ilgili standartlar (42) titizlikle uygulanmaya çalışılmıştır. Nitekim çelik lifler TS 10514 – 1992’de belirtildiği gibi karışımı yavaş yavaş ilave edilmiş ve taze betonda homojen lif dağılımı kontrol gözle kontrol edilmiştir. Birbirine yapışık demetler halinde karışımı katılan lifler tek tek ayrılmaya kadar karıştırma işlemi devam ettirilmiştir ve üniform bir dağılım sağlanmıştır.

Beton üretiminde laboratuar tipi, düşey eksenli, yaklaşık 60 dm³ tambur hacimli betoniyer kullanılmıştır. Betoniyere malzeme konulmadan önce iç yüzeyleri ve kanaatları beton kalıntılarından veya yağılanmadan ileri gelen yağ birikintilerinden temizlenerek ıslak bezle hafifçe nemlendirilmiştir (21).

Betoniyere bir defada en fazla 25 dm³’luk malzeme konulup karıştırıldıktan sonra mala ile agreba karışmasına izin verilmeden alınarak taze beton deneyleri yapılmış ve daha sonra 15 x 30 cm boyutlu silindirik ve 15 x 15 x 50 cm boyutlu prizmatik numuneler üretilmiştir.

4. 5. Taze Beton Deneylerinde Uygulanan Yöntemler

Üretilen betonlardan TS 2940 – 1978’de (73) belirtilen numune alma metodları uygulanarak taze beton deneyleri yapılmıştır. Bu standart gereğince karıştırma işleminin bitiminden sonra en fazla 15 dakika içinde taze beton deneyleri tamamlanmıştır.

Taze beton deneylerine kıvam deneyi ile başlanmıştır. Bu deneyin yapılmasında TS 2871 – 1977’de (74) belirtilen yöntemler ve standart çökme hunisi kullanılmıştır. Deneye başlamadan önce çökme hunisinin iç kısmı ıslak bir bezle silinmiş ve düz, nemli ve su emmez bir yüzey üzerine yerleştirilmiştir.

Taze beton huniye üç tabaka halinde ve her tabaka huninin yaklaşık üçte birini dolduracak şekilde yerleştirilmiştir. Her tabaka 16 mm çapında ve 60 cm uzunluğundaki şişleme çubuğu ile 25'er defa kenarlardan ortaya doğru dairesel olarak düşey bir şekilde şişlenmiştir. Daha sonra huni yavaşça düşey olarak yukarı doğru çekilerek yığının yanına konulmuştur. En sonunda huninin üst yüzeyi ile taze betonun üst yüzeyi

arasındaki yükseklik farkı okunarak betonun çökme değeri bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar Araştırma Sonuçları bölümündeki Tablo 5. 12'de topluca verilmiştir.

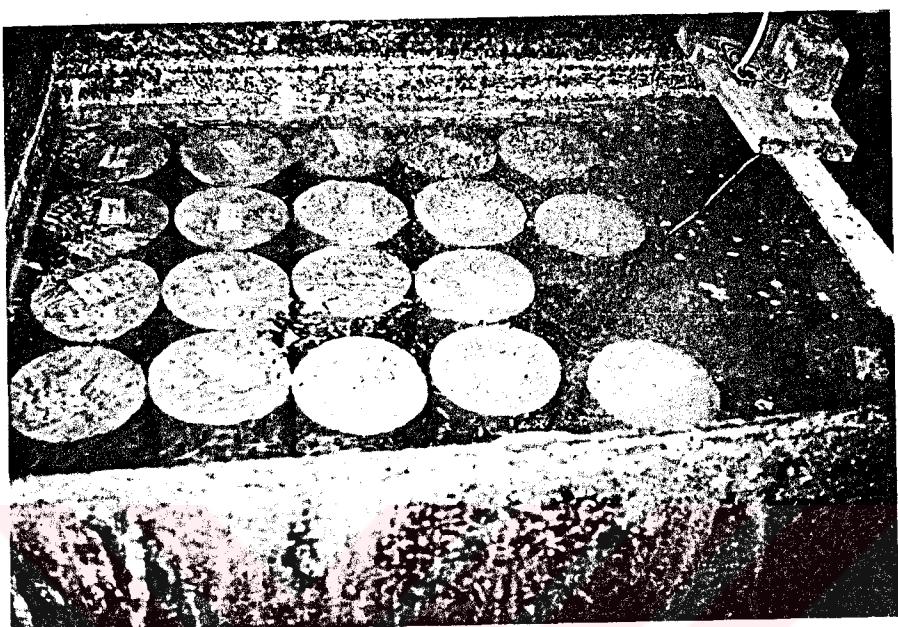
Bu şekilde taze betonların çökme değerleri bulunduktan sonra birim ağırlıkları hesaplanmıştır. Birim ağırlığın bulunmasında ise hacmi bilinen standart birim ağırlık kabı kullanılmıştır. Taze beton bu kaba doldurulduğundan sonra iyice sıkıştırılarak tariştirılmıştır. Kabın darası da bu ağırlıktan çıkarılarak betonun ağırlığı bulunmuştur. Daha sonra betonun ağırlığı kabın hacmine bölünerek taze betonun birim ağırlığı belirlenmiştir (3, 5, 21). Elde edilen sonuçlar karışım hesaplarından elde edilen teorik birim ağırlık değerleriyle birlikte Tablo 5. 12'de topluca verilmiştir.

Bu yöntemlerle çökme değeri ve birim ağırlığı belirlenen taze beton tekrar harmana katılıp karıştırılarak (8) 15 x 30 cm boyutundaki silindir ve 15 x 15 x 50 cm boyutundaki prizmatik kalıplara doldurulmuştur. Silindir kalıplara doldurma işlemi üç tabaka halinde yapılmış olup, her tabaka şişleme çubuğu ile 25'er defa şişlenmiştir. Aynı şekilde prizmatik kalıplar da iki tabaka halinde doldurulmuş olup, yine 25'er defa şişlenmiştir. Doldurma işlemi sırasında hafif iri agregaların ayrışarak farklı yoğunluktaki tabakalar oluşturma ihtimaline karşı vibratör kullanılmamıştır (6, 21). Doldurma işlemi bittikten sonra kalıpların yüzeyleri mala ile düzeltilmiş ve taze betonda nem kaybını önlemek amacıyla kalıpların üst tarafı naylon bir örtü ile örtülmüş sarsıntısız bir yerde sertleşmeye bırakılmıştır.

Bu şekilde 24 saat boyunca kalıpta bekleyen numuneler 24 saatin sonunda kalıptan çıkarılmış ve daha önceden hazırlanmış, sıcaklığı $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ olan, kirece doygun su ihtiyaca eden kür havuzunda su kürü uygulanmıştır (Şekil 4. 2). Numuneler kırılmadan bir gün önce kür havuzundan çıkarılıp, bir gün de laboratuar şartlarında bekletilerek sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır (5, 8, 10, 14, 55, 57).

4. 6. Sertleşmiş Beton Deneylerinde Uygulanan Yöntemler

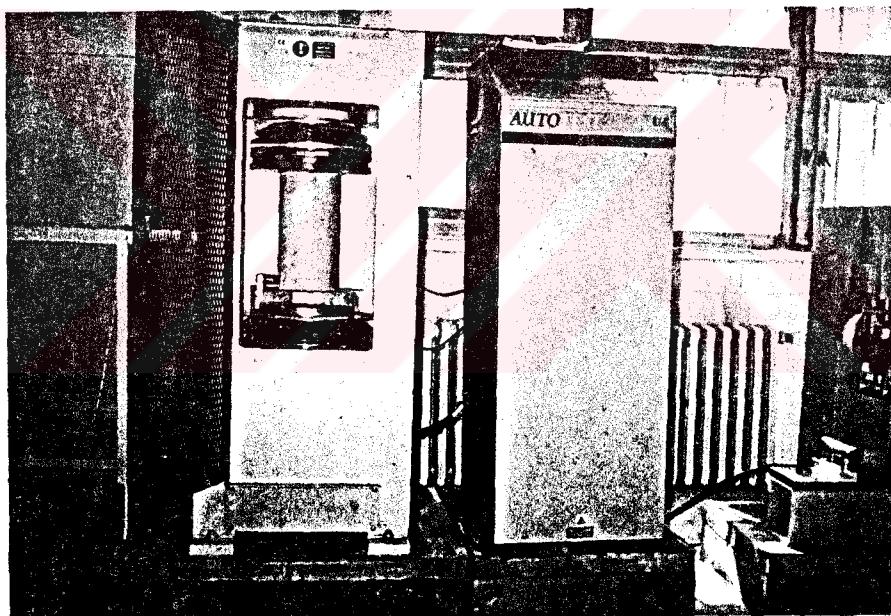
Sertleşmiş beton deneyleri ilk olarak 7 günlük numuneler üzerinde yapılmıştır. 6. günde kür havuzundan çıkarılan numuneler bir gün de laboratuar ortamında bekletilerek deneylere başlanmıştır.



Şekil 4. 2. Kür Havuzu ve Su Kürü Uygulanan Numuneler

Bu şekilde hava kurusu durumuna gelen numunelerden basınç mukavemeti tayininde kullanılacak numunelerin boyutları 1 mm hassasiyetle ölçülerek yükün etki edeceği alan hesaplanmıştır (75).

Bu işleminden sonra numune yüzeylerinin pres tablasına tam yapışması dolayısıyla da yükün bütün alana üniform olarak yayılması için başlıklanmıştır. Başlıklama işleminde TS 3114 – 1990'den (75) hareketle kükürt kullanılmıştır. Başlıklama işlemi bittikten sonra numuneler en az iki saat sertleşmeye bırakılarak basınç mukavemeti tayini deneyi yapılmıştır (Şekil 4. 3). Numunelerin basınç mukavemetlerinin hesaplanmasında TS 3114 – 1990'deki (75) yöntemler göz önünde bulundurulmuştur.



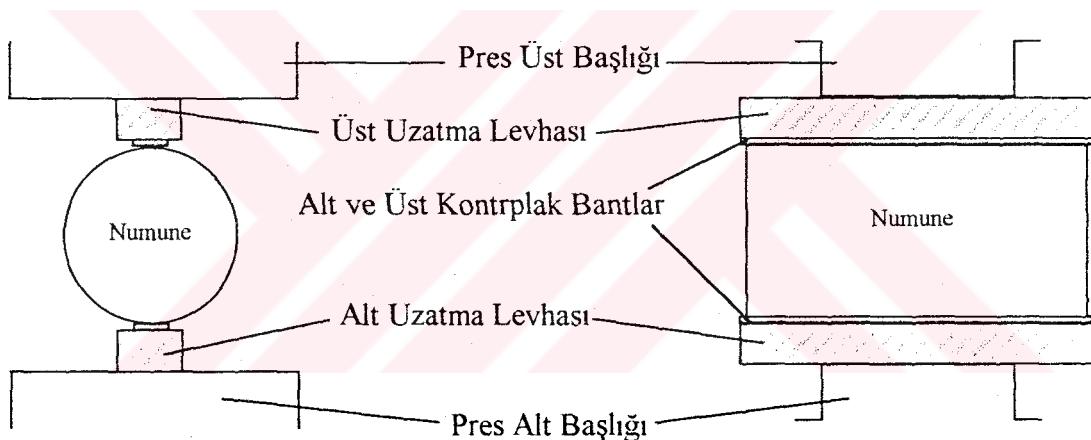
Şekil 4. 3. Basınç Mukavemeti Tayini Deneyinin Yapılması

Beton zamana bağlı olarak şekil değiştirme gösteren bir malzeme olduğundan, yükleme hızı, betonun basınç mukavemeti üzerinde etkili bir parametredir (20). Bu nedenle tüm numuneler sabit bir yükleme hızı ($2.5 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$) altında deneye tabi tutulmuşlardır. TS 3114 – 1990'de (75) belirtildiğine göre yükleme hızı $1.5 - 3.5 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$ arasında olabilmektedir.

Numunelerin basınç mukavemetleri hesaplandıktan sonra üretilen diğer silindir numuneler üzerinde TS 3129 – 1978'daki (76) ve ASTM C 496 – 96'daki (77) yöntemler uygulanarak yarmada çekme deneyi yapılmıştır.

Bu deneyde ilk olarak numunelerin çapları ve yükseklikleri 0.1 mm hassasiyetle ölçülmüştür. Daha sonra TS 3129 – 1978'da ve ASTM C 496 – 96'da belirtildiği gibi numunelerin silindir çap çizgileri belirlenmiştir.

Bu işlemlerin ardından TS 3129 – 1978'daki ve ASTM C 496 – 96'daki yöntemler uyarınca kontrplak bantlar ve uzatma levhaları ile birlikte prese yerleştirilen numuneler üzerinde yarmada çekme deneyi uygulanmıştır (Şekil 4. 4).



Şekil 4. 4. Yarmada Çekme Deney Düzeneginin Şematik Olarak Gösterilmesi

Bu deneyde de tüm numuneler sabit bir yükleme hızı ($2.5 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$) altında deneye tabi tutulmuşlardır (76).

Yüklemeye, numuneler kırılıncaya kadar devam edilmiş ve kırılma anındaki maksimum yük presten okunarak TS 3129 – 1978'de (76) ve ASTM C 496 – 96'da (77) verilen aşağıdaki formülle numunelerin yarmada çekme mukavemetleri hesaplanmıştır.

$$\sigma_{y\varphi} = \frac{2P}{\pi d h}$$

Burada;

σ_y ; Numunelerin yarmada çekme mukavemeti, (kg/cm^2)

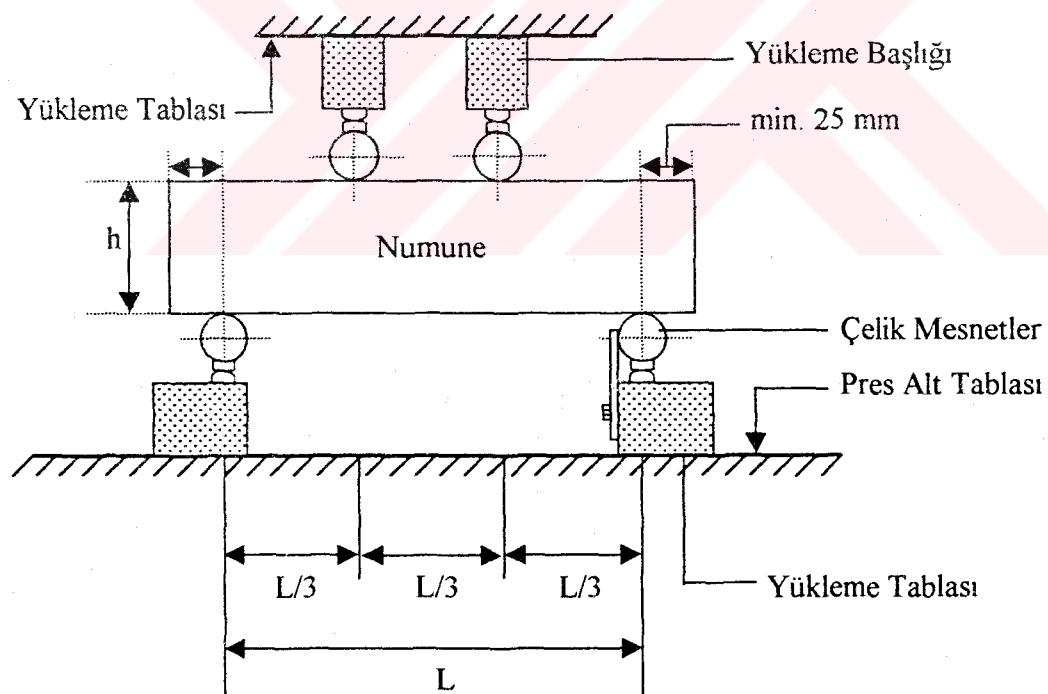
P ; Kırılma anındaki maksimum yük, (kg)

d ; Silindirin ölçülen çapı, (cm)

h ; Silindirin ölçülen uzunluğu, (cm)

Üretilen prizmatik numuneler üzerinde ise TS 3284 – 1979’e (78), ASTM C 78 – 94’e (79), ve TS 10515 – 1992’e (80) uygun olarak üçte bir noktalarından yüklenmiş basit kiriş metodu ile betonların eğilme mukavemetleri tayin edilmiştir.

Deneye başlamadan önce ilk olarak pres tablasındaki mesnetlerin açıklıklarını üretilen numunelerin boyutlarına göre ayarlanmış ve daha sonra numuneler Şekil 4. 5’de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 4. 5. Eğilme Deneyi Düzeneginin Şematik Olarak Gösterilmesi

Bu şekilde prese yerleştirilen numuneler yüklemeye tabi tutulmuştur. Yükleme işlemine numuneler kırılincaya kadar devam edilmiş olup, kırılma anındaki maksimum yük

presten okunarak TS 3284 – 1979’de (78), ASTM C 78 – 94’de (79), ve TS 10515 – 1992’de (80) verilen formülle numunelerin eğilme mukavemetleri hesaplanmıştır.

$$\sigma_e = \frac{PL}{bh^2}$$

Burada;

σ_e ; Numunelerin eğilme mukavemeti, (kg/cm^2)

P ; Kırılma anında presten okunan maksimum yük, (kg)

L ; Yükleme tablasındaki mesnetlerin açıklığı, (cm)

b ; Kırılma kesitinin ortalama genişliği, (cm)

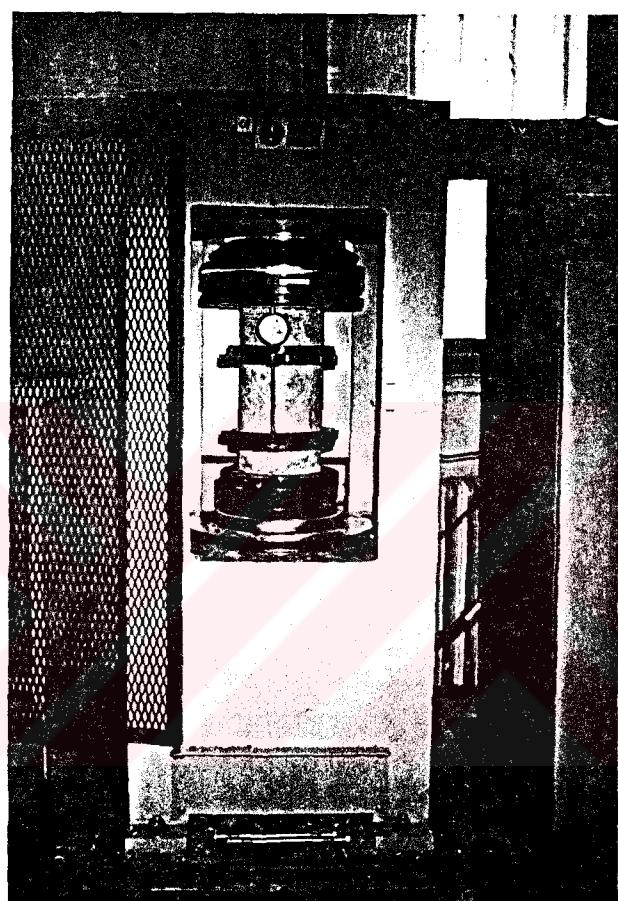
h ; Kırılma kesitinin ortalama yüksekliği, (cm)

28 günlük numuneler üzerinde yapılan sertleşmiş beton deneylerine ise ilk olarak betonun 28 günlük birim hacim ağırlık deneyi yapılarak başlanmıştır. 27. günde kür havuzundan çıkarılan numuneler bir gün de laboratuar ortamında bekletildikten sonra yüzeylerinde kalan sular silinerek tartılmışlardır. Daha sonra boyutları hassas bir şekilde ölçülerek hacimleri hesaplanmış ve numunelerin ağırlıklarının hacimlerine bölünmesiyle birim hacim ağırlık değerleri hesaplanmıştır (75).

Bu deneyden sonra 7 günlük numunelerde uygulanan yöntemler aynen uygulanarak TS 3114 – 1990’deki (75) hükümlere uygun olarak betonların 28 günlük basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Basınç mukavemeti deneyi için hazırlanan numuneler üzerinde beton kırılma yüküne erişmeden önce ASTM C 469 – 94’de (81) belirtildiği gibi elastisite modülleri tayin edilmiştir. Elastisite modülünün belirlenmesinde Şekil 4. 6’da görüldüğü gibi kompressometre kullanılmış, toplam kısalma ise bu kompressometreye yerleştirilen bir ekstansometre ile belirlenmiştir. Kullanılan bu ekstansometre ise 0.002 mm en küçük bölmeli olup 1.2 mm’ye kadar olan kısalmaları ölçebilmektedir.

Elastisite modülü hesaplanırken deneye kullanılabilecek üç silindir numuneden ilki üzerinde kırılma yükü bulunmuş, diğer iki numune üzerinde bu yükün yaklaşık 1/3’üne kadar ikişer defa yüklenip boşaltılarak kısalmalar tespit edilmiştir. Daha sonra bu

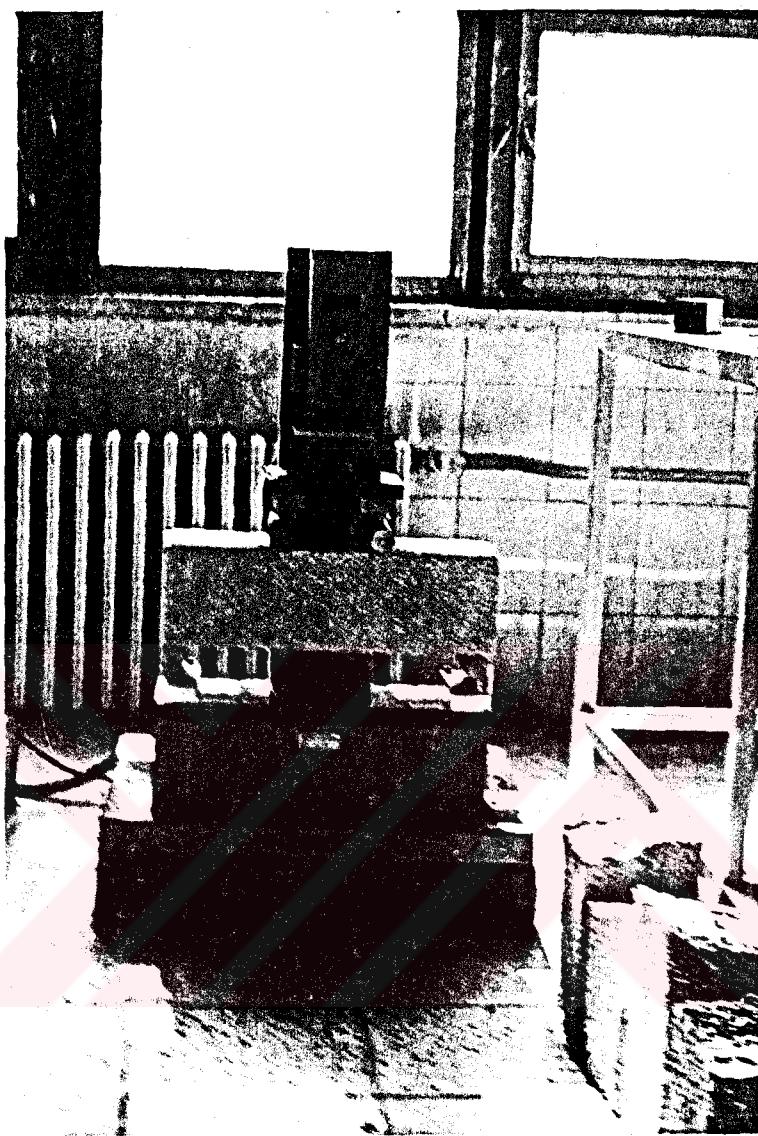
kısalmalardan hareketle numunelerin gerilme – şekil değiştirme ($\sigma - \epsilon$) diyagramları ile elastisite modülleri tayin edilmiştir (80).



Şekil 4. 6. Numunelerin Elastisite Modüllerinin Tayini

Geriye kalan diğer silindirik numuneler üzerinde de 7 günlük numunelerde uygulanan yöntemler aynen uygulanarak betonların yarmada çekme mukavemetleri hesaplanmıştır.

Prizmatik numunelerin 28 günlük eğilme mukavemetlerinin hesaplanması ise yine 7 günlük numunelere uygulanan yöntemler kullanılarak Şekil 4. 7'de görüldüğü gibi betonlar üzerinde eğilme mukavemeti tayini deneyi yapılmıştır.



Şekil 4. 7. Eğilme Mukavemeti Tayini Deneyinden Bir Görüntü

Sertleşmiş beton deneylerinde numunelerin basınç, yarmada çekme ve eğilme mukavemetlerinin belirlenmesinde ELE marka AUTOTEST 3000 tipinde hidrolik pres kullanılmıştır.

4. 7. Sonuçların Değerlendirilmesinde Kullanılan Metod

Bu çalışmada, normal ve hafif agrega kullanılarak üretilen beton karışımılarına çelik lif ilave edilmesinin hafif agregalı betonların özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması

amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda deneylerden elde edilen sonuçlar en güvenilir metodlardan birisi olan karşılaştırma metodu ile değerlendirilmiştir. Sonuçların değerlendirilmesinde lif eklenmemiş numunelerle, karışımın mutlak hacmi sabit kalması şartıyla betona hacimce % 0.5, % 1.0, ve % 1.5 oranlarında çelik lif ilave edilerek üretilen numunelerin özellikleri karşılaştırılmıştır. Aynı şekilde betondaki normal agregat, hacimce % 25, 50, 75, ve 100 oranlarında azaltılarak yerine pomza ilave etmek suretiyle üretilen betonların özellikleri de kendi aralarında karşılaştırılmıştır.

Bir sonraki bölümde deneylerden elde edilen sonuçlar topluca verilmekte ve Sonuçların Değerlendirilmesi bölümünde de detaylı bir şekilde tartışılmaktadır.

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

Bu bölümde agrega ve beton deneylerinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Sonuçlar tablo ve şekiller ile desteklenerek daha da anlaşılır hale getirilmiş, ilgili standartlardaki veriler de eklenerek kıyaslama imkanı sağlanmıştır.

5. 1. Agrega Deneyleri Sonuçları

5. 1. a. Elek Analizi Deneyi

Standart kare açıklıklı eleklerle etüv kurusu durumundaki numuneler üzerinde yapılan elek analizi deneyi sonucunda karışık agrega için elde edilen tane dağılımına ait değerler yiğilişli ağırlık yüzdesi olarak verilmiştir.

Normal agrega için elde edilen elek analizi deneyi sonuçları Tablo 5. 1.'de, granülometri eğrisi de TS 706'da verilen standart eğrilerle birlikte Şekil 5.. 1.'de, verilmiştir. Hafif agrega için elde edilen sonuçlar ise Tablo 5. 2 ve Tablo 5. 3 de, gronülometri eğrileri de standart eğrilerle (5) birlikte Şekil 5. 2'de verilmiştir.

Tablo 5. 1. Normal Agreganın elek analizi deneyi sonuçları

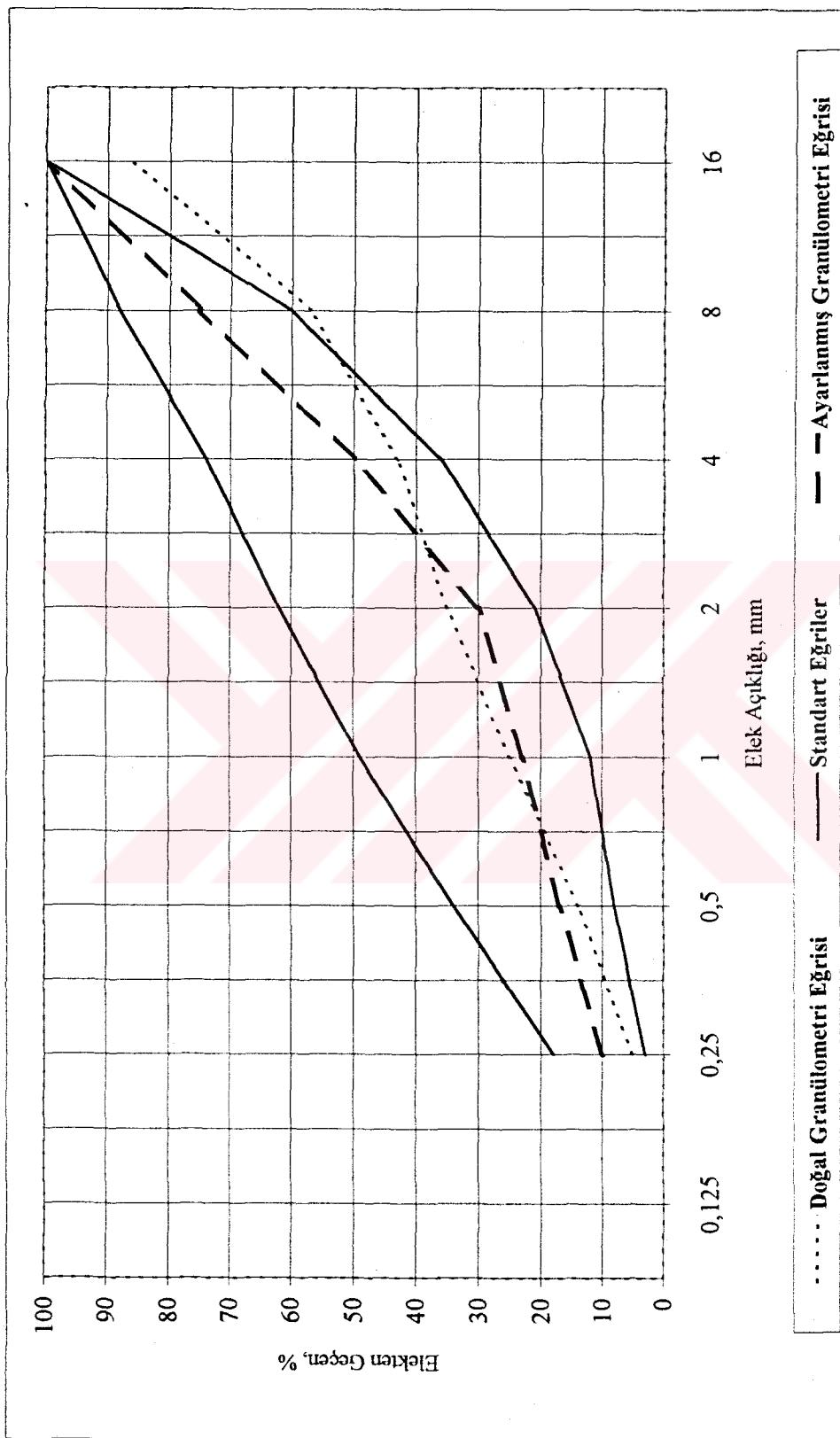
Elek Açıklığı (mm)	Elek Üzerinde Kalan (g)	Kümülatif Toplam (g)	% Kalan	% Geçen
16	330.07	330.07	14	86
8	681.53	1011.60	43	57
4	347.10	1358.70	57	43
2	207.03	1565.73	65	35
1	220.08	1785.81	75	25
0.50	263.40	2049.21	86	14
0.25	200.57	2249.78	95	5
Elek Altı	127.86	2377.64	100	0
İncelik Modülü : 4.35				

Tablo 5. 2. Pasinler pomzasının elek analizi deneyi sonuçları

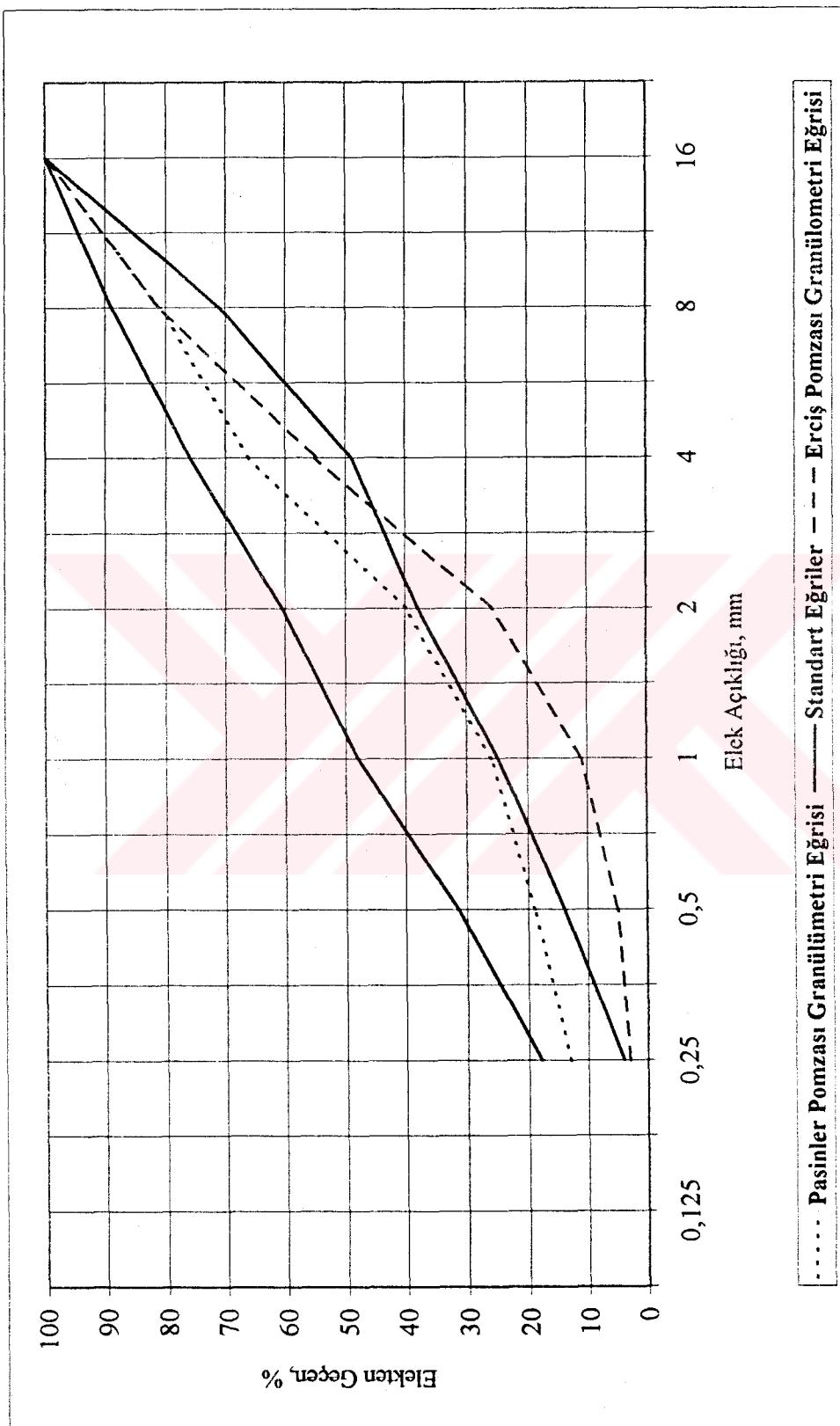
Elek Açıklığı (mm)	Elek Üzerinde Kalan (g)	Kümülatif Toplam (g)	% Kalan	% Geçen
16	15.87	15.87	0.8	99.2
8	168.37	184.24	9	81
4	503.36	687.60	34	66
2	522.34	1209.94	60	40
1	285.53	1495.47	74	26
0.50	146.46	1641.93	81	19
0.25	117.59	1759.52	87	13
Elek Altı	266.16	2025.68	100	0
İncelik Modülü : 3.46				

Tablo 5. 3. Erciş – Kocapınar pomzasının elek analizi deneyi sonuçları

Elek Açıklığı (mm)	Elek Üzerinde Kalan (g)	Kümülatif Toplam (g)	% Kalan	% Geçen
16	5.45	5.45	0.3	99.7
8	166.91	172.36	9	81
4	727.16	899.52	45	55
2	567.96	1467.48	74	26
1	310.71	1778.19	89	11
0.50	111.98	1890.17	95	5
0.25	31.91	1922.08	97	3
Elek Altı	65.24	1987.32	100	0
İncelik Modülü : 4.09				



Şekil 5. 1 Normal Agrega ve Ayarlanmış Granülometri Eğrisi



Şekil 5. 2 Hafif Agregaların Granüometri Eğrisi

5. 1. b. Gevşek Birim Ağırlık Deneyi

Standart birim ağırlık kabının kullanıldığı bu deneyde Pasinler ve Erciş yörelerinden temin edilen hafif agreganın hem karışık haldeki birim ağırlıkları hem de hesaplamalar için gerekli olduğundan her tane sınıfının birim ağırlıkları ayrı ayrı bulunmuştur. Agregalar deney sırasında doğal halde olup hava kurusu durumundadır. Deneylerde bulunan ortalama sonuçlar Tablo 5. 4'de verilmiştir.

Tablo 5. 4. Hafif Agrega için Gevşek Birim Ağırlık Deneyi Sonuçları

	Pasinler Pomzası	Erciş Pomzası	Tane Sınıfları			
			0 – 2	2 – 4	4 – 8	8 - 16
Ölçü Kabı Boş Ağırlığı (w_1), g	6671	6671	6671	6671	6671	6671
Ölçü Kabı Hacmi (v), cm^3	2148	2148	2148	2148	2148	2148
Kap + Numune Ağırlığı (w_2), g	8118	7953	8480	8220	7745	7577
Numune Ağırlığı ($w_2 - w_1$), g	1447	1282	1809	1549	1074	906
G. Birim Ağ. ($w_2 - w_1$)/ v , kg/m^3	674	597	842	721	500	422
TS 1114 – 1986'e göre hafif agregaların birim ağırlıkları en fazla iri agrega için 1000 kg/m^3 , ince agrega için 1200 kg/m^3 , karışık agrega için ise 1100 kg/m^3 olmalıdır.						

5. 1. c. Organik Madde Tayini Deneyi

Hem Pasinler hem de Erciş hafif agregalarından TS 707'ye (64) uygun olarak alınan malzemenin 8 mm göz açıklıklı kare gözlü tel elektrotelenmesi sonucu geçen malzeme üzerinde yapılan organik madde tayini deneyinde ölçü silindirlerindeki malzeme üzerinde kalan sıvılarda herhangi bir renk değişimi gözlenmemiştir. Yani sıvı renksizdir. TS 3673 – 1982'ye (67) göre sıvının renksiz veya açık sarı olması durumunda zararlı oranda organik madde bulunmadığına, koyu sarı, kahve rengi veya kırmızımsı bir renk alması durumunda ise zararlı organik madde bulunduğuna karar verilir.

5. 1. d. İnce Madde Oranı Tayini

Bu deney hem Pasinler, hem Erciş hem de normal agrega için ayrı ayrı yapılmıştır. Hafif ve normal agreganın ince ve iri kısımları için yapılan bu deneyde bulunan ortalama sonuçlar; normal agrega için Tablo 5. 5 ve Tablo 5. 6'da, hafif agrega için ise Tablo 5. 7'de verilmiştir. Bu deneyde hafif agrega ve normal iri agrega için yıkama yöntemi, normal ince agrega için ise çökeltme yöntemi kullanılmıştır.

Tablo 5. 5. Normal İnce Agrega İçin İnce Madde Oranı Tayini Deney Sonuçları

Numunenin Kuru Ağırlığı (w), g	24 Saat Sonra Çökelen Malzeme Yüksekliği (h), cm	Ölçü Silindiri Kesit Alanı (A), cm ²	İnce Malzeme Oranı (m), %
990.95	0.58	19.635	1.03

TS 706 – 1980'e göre beton agregalarında ince madde oranı ince agrega için % 4.0'den küçük olmalıdır

Tablo 5. 6. Normal İri Agrega İçin İnce Madde Oranı Tayini Deney Sonuçları

Deney Öncesi Kuru Ağırlık (w ₁), g	Deney Sonrası Kuru Ağırlık (w ₂), g	İnce Madde Oranı (m), %
2552.41	2543.37	0.354

TS 706 – 1980'e göre beton agregalarında ince madde oranı iri agrega için % 2.0'den küçük olmalıdır.

Tablo 5. 7. Hafif Agrega İçin İnce Madde Oranı Tayini Deney Sonuçları

		Deney Öncesi Kuru Ağırlık (w ₁), g	Deney Sonrası Kuru Ağırlık (w ₂), g	İnce Madde Oranı (m), %
Pasinler Pomzası	İri	978.91	954.81	2.46
	İnce	970.12	924.35	4.7
Erciş Pomzası	İri	913.03	892.67	2.2
	İnce	914.10	873.53	4.4

TS 1114 – 1986'e göre hafif agregalarda ince madde oranı iri agrega için % 3.0'den, ince agrega için ise % 5.0 'den küçük olmalıdır.

5. 1. e. Sülfat Miktarı Tayini Deneyi

Derişik HCl (Hidroklorik Asit) ve BaCl₂ (Baryum Klorür) çözeltisi kullanılarak TS 3674 – 1981'e (68) uygun olarak yapılan beton agregalarında sülfat miktarı tayini deneyinde bulunan ortalama sonuçlar ve TS 1114 – 1986'de (15) önerilen oran Tablo 5. 8'de verilmiştir.

Tablo 5. 8. Sülfat Miktarı Tayini Deney Sonuçları

	0.09 mm Elekten Geçen Numune Miktarı (w ₀), g	Platin Krozenin Ağırlığındaki Artma (w ₁), g	Agreganın Sülfat Miktarı (s), %
Erciş Pomzası	1.0143	0.0005	0.0169
Pasinler Pomzası	0.0015	0.0016	0.0548
TS 1114 – 1986'e göre beton agregalarındaki sülfat miktarı % 1'den küçük olmalıdır			

5. 1. f. Klorür Miktarı Tayini Deneyi (Çeliğe Zarar Veren Maddelerin Tayini)

Potasium Kromat İndikatörü (K₂CrO₄) ve Gümüş Nitrat (AgNO₃) çözeltisi kullanılarak TS 3732 – 1982'ye (69) uygun olarak yapılan beton agregalarında klorür miktarı tayini deneyinde bulunan ortalama sonuçlar ve TS 1114 – 1986'de (15) önerilen oran Tablo 5. 9'da verilmiştir.

Tablo 5. 9. Klorür Miktarı Tayini Deney Sonuçları

	0.09 mm Elekten Geçen Numune Miktarı (A), g	Harcanan Gümüş Nitrat (S), ml	Damitik Su İçin Harcanan Gümüş Nitrat (B), ml	Agreganın Klorür Miktarı (c), %
Erciş Pomzası	1.0110	0.35	0.25	0.175
Pasinler Pomzası	1.0105	0.30	0.25	0.09
TS 1114 – 1986'e göre beton agregalarındaki klorür miktarı betonarme betonunda % 0.40'dan, öngerilmeli betonda ise % 0.20'den fazla olmamalıdır.				

5. 1. g. Dona Dayanıklılık Deneyi

Hafif agreganın dona dayanıklılığı TS 3655 – 1981’de (72) belirtilen “Dona Dayanıklılığın Kimyasal Yöntemle Tayini” yöntemine göre yapılmıştır. Reaktif olarak Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$) çözeltisi kullanılan bu deneyde elde edilen sonuçlar ve TS 1114 – 1986’de (15) öngörülen değer Tablo 5. 10’da gösterilmiştir.

Tablo 5. 10. Dona Dayanıklılık Tayini Deney Sonuçları

	İlk Etüv Kurusu Ağırlık (G_1), g	Elek Üzerinde Kalan Kısmın Etüv Kurusu Ağırlığı (G_2), g	Don Kaybı Oranı (D), %
Erciş Pomzası	431.31	387.68	10.12
Pasinler Pomzası	477.41	427.43	10.47
TS 1114 – 1986’e göre kimyasal metodun uygulanması durumunda kullanılan reaktif $MgSO_4$ ise don kaybı % 27’den fazla olmamalıdır.			

5. 1. h. Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini Deneyi

Hem hafif agrega hem de normal agrega için yapılan bu deneyde kuru özgül ağırlık, doygun kuru yüzey özgül ağırlık, görünen özgül ağırlık ve su emme oranları tayini iri ve ince agrega için ayrı ayrı yapılmıştır. TS 3526 – 1980’ya (70) göre yapılan bu deneyde elde edilen sonuçlar Tablo 5. 11’de verilmiştir.

Tablo 5. 11. Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini Deney Sonuçları

Özellik	Erciş Pomzası		Pasinler Pomzası		Normal Agrega	
	İnce	İri	İnce	İri	İnce	İri
Kuru Özgül Ağırlık (γ_k), kg/dm ³	0.81	0.76	1.21	0.79	2.28	2.45
Kuru Yüzey Doygun Özgül Ağırlık (γ_d)	1.05	1.06	1.44	1.10	2.32	2.52
Görünen Özgül Ağırlık (γ_g), kg/dm ³	1.07	1.09	1.58	1.14	2.38	2.64
Su Emme Oranı (m), %	30.7	40.7	19.3	39.4	1.90	2.90

5. 1. i. Özgül Ağırlık Faktörü Tayini Deneyi

Özgül ağırlık faktörü, hafif agregalı betonların karışım hesapları için gerekli bir parametre olduğundan bu çalışmada agrega özelliğini yansıtan bir deney olarak görülmemiş yalnızca karışım hesapları için gerekli olan bir değer olarak ele alınmıştır. Bu nedenle hafif agreganın her bir tane sınıfı için ayrı ayrı elde edilen özgül ağırlık faktörü değerleri Metod bölümündeki Tablo 4. 1'de topluca verilmiştir.

5. 2. Taze ve Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

Metod bölümünde anlatıldığı şekilde üretilmiş beton numuneleri üzerinde yapılan taze ve sertleşmiş beton deneylerinin sonuçları Tablo 5. 12 ve Tablo 5. 13'de topluca verilmiştir.

Tablo 5. 12 Taze Beton Deney Sonuçları

Lif (%)	Pomza (%)	Su/Çim.	Teorik Çökme (cm)	Ölçülen Çökme (cm)	Birim Ağırlık (Teorik), kg/m ³	Birim Ağırlık (Ölçülen), kg/m ³
0	25	0.786	3 ± 1	3.0	1894.60	2011.17
	50	0.867	3 ± 1	3.0	1700.55	1815.64
	75	0.875	3 ± 1	3.5	1530.18	1596.83
	100	0.916	3 ± 1	4.0	1364.26	1452.51
0.5	25	0.740	3 ± 1	3.0	1929.83	2043.76
	50	0.808	3 ± 1	2.5	1740.58	1857.54
	75	0.843	3 ± 1	2.5	1567.63	1634.10
	100	0.892	3 ± 1	3.0	1399.82	1489.76
1.0	25	0.761	3 ± 1	3.5	1953.55	2071.70
	50	0.837	3 ± 1	3.0	1762.95	1883.15
	75	0.884	3 ± 1	3.0	1593.10	1662.01
	100	0.930	3 ± 1	3.0	1425.75	1517.69
1.5	25	0.775	3 ± 1	2.5	1976.80	2094.97
	50	0.860	3 ± 1	2.5	1787.26	1908.75
	75	0.897	3 ± 1	3.0	1621.28	1689.94
	100	0.932	3 ± 1	3.0	1460.54	1554.93

Tablo 5. 13. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

Çelik Lif Oranı (%)	Pomza Oranı (%)	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Basınç Mukavemeti (kg/cm ²)		Elastisite Modülü (kg/cm ²)	Yarmada-Çekme Mukavemeti (kg/cm ²)	Eğilme Mukavemeti (kg/cm ²)
			7 Günlük	28 Günlük			
0	25	2026.64	131.1	198.5	105300	12.7	20.9
	50	1837.68	104.9	163.1	92040	10.6	16.7
	75	1631.39	88.6	138.7	77800	8.9	14.1
	100	1453.14	65.7	110.8	68430	7.4	11.9
	25	2084.06	138.5	204.3	109540	16.4	25.7
	50	1896.48	110.7	169.6	94140	12.2	19.9
0.5	75	1698.37	96.6	145.2	80650	10.2	16.4
	100	1498.14	74.3	121.1	70760	8.0	13.4
	25	2098.56	141.3	212.6	111790	20.8	31.1
	50	1914.41	115.3	177.4	100360	14.9	23.5
1.0	75	1709.12	101.2	152.1	86390	11.6	19.2
	100	1547.92	81.3	128.3	74760	10.4	16.2
	25	2139.93	147.5	219.2	116050	21.4	33.7
	50	1956.61	117.2	184.1	107870	15.5	25.1
	100	1577.21	85.6	134.2	88070	11.9	18.8

6. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde, deneylerle belirlenen normal ve hafif agregalara ilişkin sonuçlar değerlendirilmekte, bununla birlikte bu başlık altında çeşitli oranlarda pomzanın normal agrega ile değiştirilmesiyle üretilen karışımların her birine hacimce % 0, % 0.5, % 1.0, ve % 1.5 oranlarında çelik lif ilave edilmesiyle üretilen betonların taze ve sertleşmiş durumlarındaki birim ağırlıkları, basınc, yarmada-çekme, eğilme mukavemetleri ve bu özelliklerin birbirlerine etkileri değerlendirilmiştir.

6. 1. Agrega Deneyleri ile İlgili Değerlendirmeler

Yapılan çalışmada kullanılan Pasinler hafif agregasının gevşek birim ağırlığı; ince agrega için 782 kg/m^3 , karışık agrega için 674 kg/m^3 , Erciş hafif agregasının gevşek birim ağırlığı ise; iri agrega için 461 kg/m^3 , karışık agrega için 597 kg/m^3 olarak tespit edilmiştir. Buna karşılık TS 1114 – 1986'da (15) ise hafif agregaların gevşek birim ağırlıklarının ince agrega için 1200 kg/m^3 , iri agrega için 1000 kg/m^3 ve karışık agrega için ise 1100 kg/m^3 değerlerinden büyük olamayacağı bildirilmiştir. Bu da hem Pasinler hem de Erciş agregasının hafif agrega sınıfına girdiğini göstermektedir.

Agregalar üzerinde yapılan elek analizi deneyi sonucunda doğal granülometri eğrilerinin bazı noktalarda standart limitleri aştığı Şekil 5. 1 ve Şekil 5. 2'de görülmektedir. Granülometri eğrilerinin standart limitlerin dışına çıkışının üretilen betonlarda istenmeyen sonuçları ortaya çıkarabileceği düşüncesiyle deneylerde hem hafif agrega hem de normal agrega doğal haliyle kullanılmamış, bunun yerine standart limitler arasına düşürülen ayarlanmış tek tip granülometri eğrisi kullanılmıştır.

Normal agreganın elek analizi deneyi sonucunda içerisinde % 43 oranında ince agrega, ve % 57 oranında iri agrega bulunması standart eğrilerin dışına çıkışına neden olmaktadır. Bu değerlerden ve incelik modülünün 4.35 olmasından da anlaşılacağı gibi agrega içerisindeki iri agrega oranı oldukça fazladır.

Pasinler hafif agregasının da içerisinde % 66 oranında ince agrega, ve % 34 oranında iri agrega bulunduğu belirlenmiştir. İncelik modülünün de 3.46 olması agrega içerisindeki

ince agrega oranının fazla olduğunu göstermektedir. Erciş hafif agregasında ise % 55 oranında ince agrega, ve % 45 oranında iri agrega bulunduğu belirlenmiştir. Ancak 4 mm'den küçük her bir elekten geçen malzeme yüzdesi standartlarda belirtilen alt sınırdan oldukça düşük olduğundan bu noktalarda Tablo 5. 2'den de görülebileceği gibi standartların dışına çıkmaktadır. İri agrega yüzdesinin % 45 ve incelik modülünün 4.09 olması bu agreganın Pasinler hafif agregasına oranla daha fazla iri agregaya sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle Metod bölümünde de belirtildiği gibi tüm çalışma boyunca hafif ince agrega olarak Pasinler hafif agregası ve hafif iri agrega olarak da Erciş hafif agregası kullanılmıştır.

Beton üretiminde kullanılacak aggregalarda bulunmaması gereken zararlı maddeler ilgili standartlarca belirlenmiştir. Bu çalışmada özellikle hafif agrega üzerinde yapılan zararlı madde tayinlerinde elde edilen sonuçları şu şekilde değerlendirmek mümkündür;

Hafif agrega üzerinde TS 3673 – 1982'ye (67) uygun olarak yapılan organik madde tayini deneyi sonucunda ölçü silindirlerindeki sivilarda herhangi bir renk değişimi gözlenmediğinden hafif agregada betona zarar verecek oranda organik madde bulunmadığına karar verilmiştir.

Sülfat miktarı tayini deneyinde ise hafif aggregalardaki sülfat miktarı TS 1114 – 1986'da (15) belirtilen % 1.0 değerinin oldukça altındadır. Bu da hafif agreganın betona zarar verebilecek oranda sülfat (SO_3) içermediğini göstermektedir.

Çalışmada kullanılan hafif agreganın donatılı betonlarda kullanılmasında ise herhangi bir sakınca bulunmamaktadır. Çünkü TS 1114 – 1986'da (15) agrega içerisindeki çeliğe zarar veren klorür miktarının normal betonarme betonunda % 0.40, ön gerilmeli betonda ise % 0.20 değerini geçemeyeceği bildirilirken, Pasinler hafif agregası içindeki klorür miktarı % 0.09, Erciş hafif agregası içindeki klorür miktarı da % 0.175 olarak belirlenmiştir. Fakat Erciş hafif agregasındaki klorür miktarı ön gerilmeli beton için sınır değer olan % 0.20 değerine çok yakın olduğundan ön gerilmeli beton uygulamalarında bu durum göz önünde bulundurulmalıdır.

Beton üretiminde kullanılacak agregalarda aranan özelliklerden birisi de don etkisine karşı dayanıklı olmasıdır. Hafif agrega üzerinde kimyasal yöntemle yapılan dona dayanıklılık deneyinde elde edilen don kaybı değerleri Erciş hafif agregası için % 10.12, ve Pasinler hafif agregası için % 10.47'dir. Bu değerler TS 1114 – 1986'da (15) bildirilen maksimum don kaybı değeri olan (kullanılan reaktif MgSO₄ ise) % 27'den oldukça düşük olması çalışmada kullanılan her iki yörenin hafif agregasının da Doğu Anadolu Bölgesi gibi donma – çözülme etkisinde bulunan bölgelerde kullanılabilceğini göstermektedir.

Hem normal hem de hafif agrega üzerinde yapılan ince madde oranı tayini deneyinde normal aggregadaki ince madde oranı ince agrega için % 1.03, iri agrega için % 0.354 olarak tespit edilmiştir. Bu değerlerin TS 706 – 1980'de verilen sınır değerlerinden (ince agrega için % 4, iri agrega için % 2) oldukça düşük değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum normal aggregadaki ince madde oranının betona zarar verebilecek seviyede olmadığını göstermektedir. Öte yandan hafif aggregadaki ince madde oranı ilgili standartta verilen değerlere oldukça yakındır. Nitekim TS 1114 – 1986'da (15) ince madde oranının; ince agrega için % 5'den, iri agrega için % 3'den fazla olmaması gerektiği belirtilmesine rağmen Pasinler hafif agregasının ince madde oranı; iri agrega için % 2.46, ince agrega için % 4.7 ve Erciş hafif agregasının ince madde oranı; iri agrega için % 2.2, ince agrega için % 4.4 olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar bu yörelerin agregasıyla beton üretileceği zaman gerekli tedbirlerin alınması gerektiğini göstermektedir. Çünkü beton aggregalarında ince maddelerin (kil-silt) fazla miktarda olması, agrega taneleri ile çimento hamuru arasındaki aderansın zayıflamasına ve çimentonun prizini geciktirmesine neden olduğundan sakıncalı bir durumdur (7).

Hafif aggregaların su emme oranı ise normal aggreganın su emme oranına göre oldukça yüksektir. Normal aggreganın su emme oranı; ince agrega için % 1.90, iri agrega için % 2.90 olarak belirlenmesine rağmen Pasinler hafif agregasının su emme oranı; ince agrega için % 19.3, iri agrega için % 39.4, ve Erciş hafif agregasının su emme oranı ise; ince agrega için % 30.7, iri agrega için % 40.7 olarak bulunmuştur. Buna karşılık TS 3234 – 1978'de (21) ince ve iri pomzanın su emmelerinin sırasıyla % 20 ve % 30

civarında olduğu belirtilmektedir. Bu değerlerden de anlaşılabileceği gibi hafif agregalar normal agregalara göre daha fazla su emme özelliğine sahiptirler. Bunun nedeni, agregaların su emme oranlarının boşluk oranlarıyla doğru orantılı olmasıdır (28). Yani bir agreganın boşluk oranı ne kadar fazla ise su emme oranı da o kadar fazladır.

Hafif agregalardaki bu yüksek su emme özelliği, karışma konulmadan önce bir ön ıslatmaya tabi tutulmalarını gerektirir. Aksi halde karışım suyunun bir kısmını emip hidrasyon ve işlenebilirliğe zarar verebilirler (8).

Sonuç olarak bu çalışmada kullanılan hem normal agrega, hem Erciş pomzası, hem de Pasinler pomzasının genel özelliklerinin standartların önerdiği sınırların içerisinde kaldığı ve hafif beton üretiminde kullanılabileceği söylenebilir.

6. 2. Beton Deneyleri ile İlgili Değerlendirmeler

Bu bölümde beton deneylerinden elde edilen sonuçlar taze ve sertleşmiş beton için aynı ayrı değerlendirilmiştir.

Betonla ilgili değerlendirmeler yapılırken, özellikle betonun birim ağırlığı, mekanik özellikleri ve çelik liflerin mekanik özellikler üzerindeki etkisi üzerinde durulmuştur.

Bu değerlendirmelerde kullanılan grafikler EXCEL programında çizilmiş, deneysel verilerin istatistik hesaplarında ise SPSS 9.0 programından yararlanılmıştır.

6. 2. 1. Taze Beton Deneyleri ile İlgili Değerlendirmeler

Bu bölümde, hafif betonlara çelik lif ilave edilmesinin etkisi, işlenebilirlik ve birim ağırlık açısından değerlendirilmiştir.

Çalışmada taze beton karışımı üzerinde yapılan deneylerde lif miktarının artmasıyla karışımın işlenebilirlik özelliğinde önemli oranda azalma olduğu gözlenmiştir. Ancak Karışım Hesapları bölümünde bahsedildiği gibi 3 ± 1 cm olan sabit çökme değerini sağlamak için su miktarında yapılan ayarlamalar bu problemi nispeten ortadan

kaldırmıştır. İşlenebilirlikteki bu değişikliğe lif ilavesiyle beton içindeki iç sürtünmelerin artmasının neden olduğu düşünülebilir (14).

Hacimce % 25 oranında hafif agregat içeren ve çelik lif ilave edilmemiş betonun birim ağırlığı 2011.17 kg/m^3 olmasına karşılık bu betona yine hacimce % 0.5, % 1.0 ve % 1.5 oranlarında çelik lif ilave edildiğinde birim ağırlık değerleri sırasıyla 2043.76, 2071.70 ve 2094.97 kg/m^3 olmaktadır. Birim ağırlıktaki artışlar ise yine sırasıyla % 1.6, % 3.0, ve % 4.2'dir.

Hacimce % 50 oranında hafif agregat içeren betonların birim ağırlıkları ise hacimce % 0 oranında lif için 1815.64 kg/m^3 , % 0.5 oranında lif için 1857.54 kg/m^3 , % 1.0 oranında lif için 1883.15 kg/m^3 , ve % 1.5 oranında lif için 1908.75 kg/m^3 olarak hesaplanmıştır. Bu gruptaki betonların birim ağırlıklarındaki artış ise sırasıyla % 2.3, % 3.7, ve % 5.1'dir.

İçerisine hacimce % 75 oranında pomza ilave edilmiş olan karışımlara hacimce % 0.5, % 1.0 ve % 1.5 oranlarında çelik lif ilave edilmesi lif oranı % 0 olan betona kıyasla birim ağırlığı sırasıyla % 2.3, % 4.1, ve % 5.8 oranlarında artırmıştır.

Tamamen hafif agregat kullanılarak üretilen karışımlara ise hacimce % 0.5, % 1.0 ve % 1.5 oranlarında çelik lif ilave edilmesi, taze betonun birim ağırlığını hiç lif ilave edilmemiş karışımlara kıyasla sırasıyla % 2.6, % 4.5 ve % 7.1 oranlarında artırmıştır.

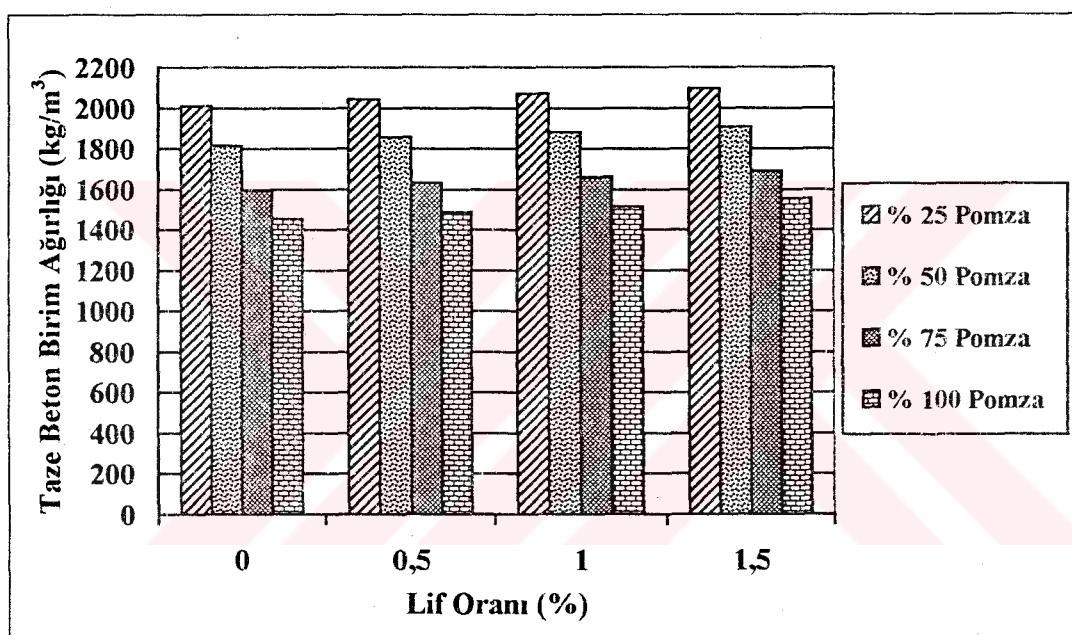
Bu sonuçlar Tablo 6. 1 ve Tablo 6. 2'de topluca verilmiş ve Şekil 6. 1'de de grafikle gösterilmiştir.

Tablo 6. 1. Lif Oranlarına Göre Karışımların Taze Beton Birim Ağırlıkları (kg/m^3)

Lif Oranı (%)	Hafif Agregat Oranı (%)			
	25	50	75	100
0,0	2011,17	1815,64	1596,83	1452,51
0,5	2043,76	1857,54	1634,10	1489,76
1,0	2071,70	1883,15	1662,01	1517,69
1,5	2094,97	1908,75	1689,94	1554,93

Tablo 6. 2. Lifsiz Karışımlara Kiyasla Taze Betonun Birim Ağırlığındaki Artışlar (%)

Lif Oranı (%)	Hafif Agrega Oranı (%)			
	25	50	75	100
0,5	1.6	2.3	2.3	2.6
1,0	3.0	3.7	4.1	4.5
1,5	4.2	5.1	5.8	7.1



Şekil 6. 1. Lif Oranı – Taze Beton Birim Ağırlığı Arasındaki İlişki

Bu değerlerden de anlaşılabileceği gibi hafif agregali betonlara çelik lif ilave edilmesi taze betonun birim ağırlığını artırmaktadır. Bu artış, çalışmada üretilen karışımlar için % 1.6 - % 7.1 arasında değişmektedir.

Tablo 6. 1'deki değerlerin çift yönlü varyans analizi yapılacak olursa Tablo 6. 3'de de görüldüğü gibi hesaplanan F değerlerinin ilgili tabloda verilen F değerlerinden oldukça büyük olduğu görülecektir. Varyans analizi gereğince $F_{hesap} > F_{tablō}$ olduğunda ilk hipotezler ki burada birim ağırlıkla çelik lif oranı ve birim ağırlıkla hafif agrega oranı arasında ilişkinin olmadığı şeklindeki reddedilir. Bu da birim ağırlıkla hem lif oranı

hem de hafif agrega oranı arasında ilişkinin var olduğunu, yapılan regresyon analizi sonucunda da birim ağırlığın hem lif oranı hem de hafif agrega oranı arasında doğrusal bir ilişki olduğu, lif oranının (x_1) değerinin pozitif olması nedeniyle birim ağırlığa (y) olumlu yönde, hafif agrega oranının (x_2) değerinin negatif olması nedeniyle de birim ağırlığa (y) olumsuz yönde etkisi olduğu % 99 güven seviyesinde görülmektedir.

Tablo 6. 3. Taze Beton Birim Ağırlığı Değerlerinin İstatistik Hesapları

	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	Hesaplanan F Değeri (F_h)	Tablo F Değeri (F_t)
Lif Oranı için	18911.15	3	6303.72	464.25	6.99**
Pomza Oranı için	708202.2	3	236067.4	17385.64	6.99**
Hata	122.205	9	13.578	-	-

Regresyon Denklemi ; $y = 61.335.x_1 - 7.502.x_2 + 2190.67$
Korelasyon Katsayısı ; $r = 0.997$
Hipotezler;

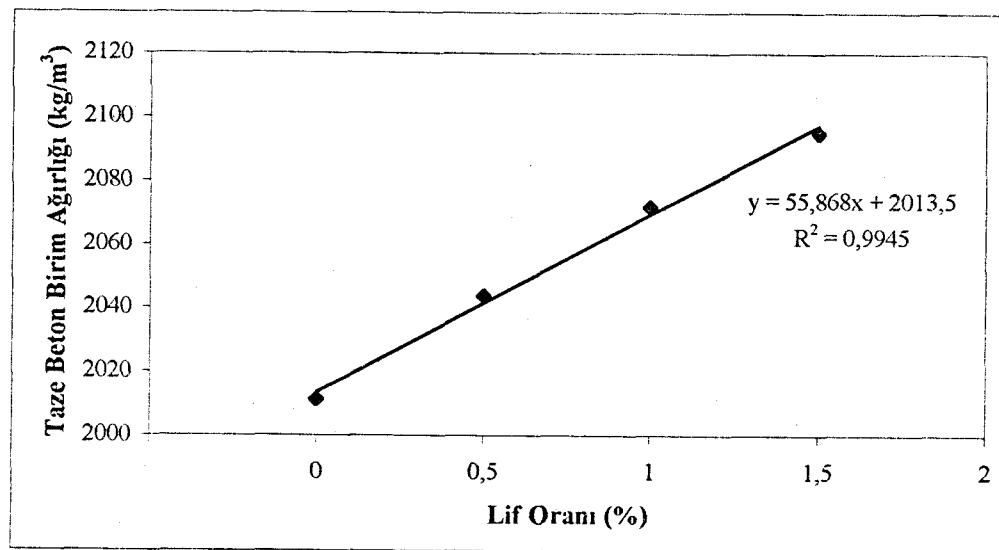
- $H_0 = \text{Çelik liflerin taze beton birim ağırlığına etkisi yoktur} -- \text{red}$
 $H_1 = \text{Çelik liflerin taze beton birim ağırlığına etkisi vardır}$
- $H_0 = \text{Hafif agrega oranının taze beton birim ağırlığına etkisi yoktur} -- \text{red}$
 $H_1 = \text{Hafif agrega oranının taze beton birim ağırlığına etkisi vardır}$

** $P = 0.01$ ihtimal seviyesinde önemli

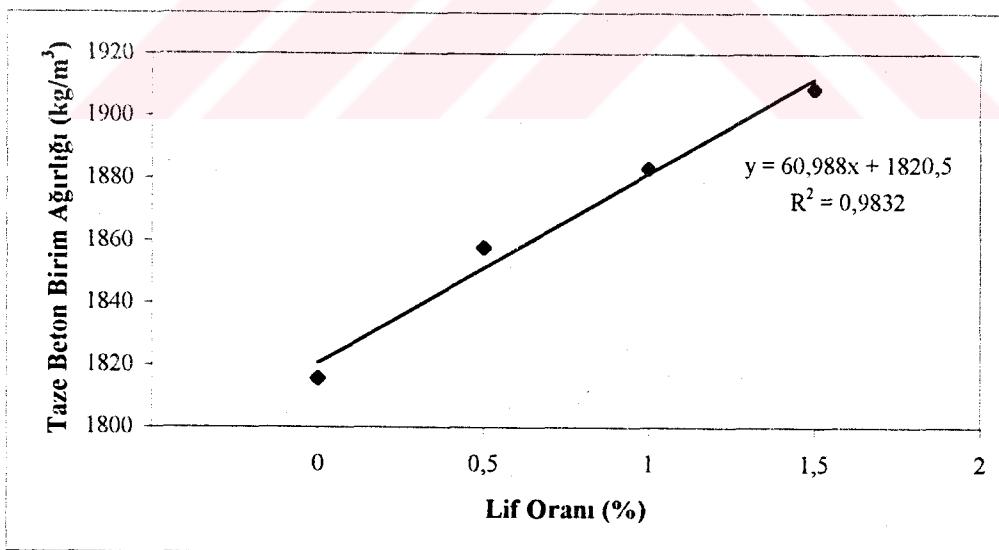
Karışımındaki çelik lif oranının artmasıyla taze beton birim ağırlığının arttığı farklı bir gösterimle Şekil 6. 2, Şekil 6. 3, Şekil 6. 4 ve Şekil 6. 5'den de görülmektedir.

6. 2. 2. Sertleşmiş Beton Deneyleri ile İlgili Değerlendirmeler

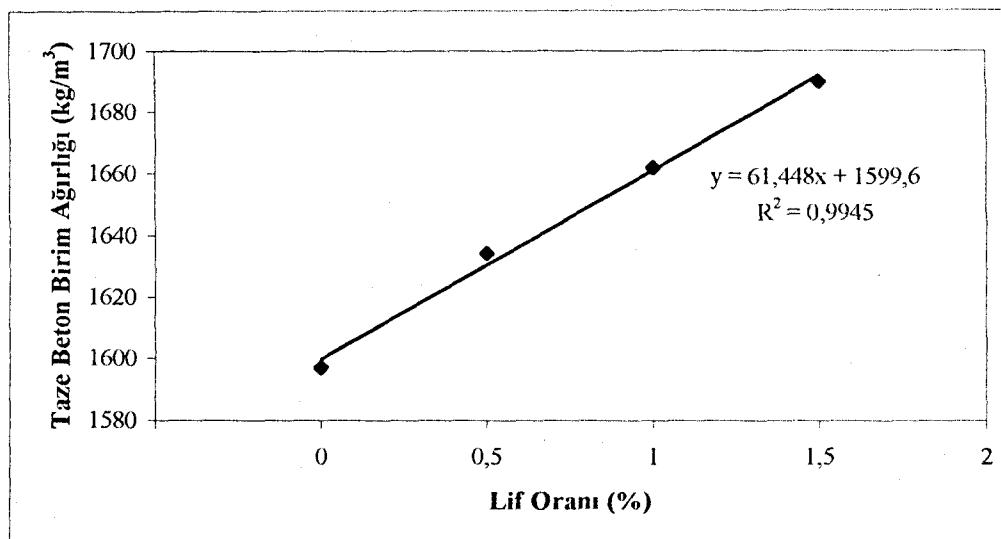
Bu bölümde, hafif beton karışımılarına çelik lif ilave edilmesiyle üretilen beton numunelerin 28 günlük birim ağırlık, basınç mukavemeti, yarmada-çekme mukavemeti, ve eğilme mukavemeti üzerinde durulmuştur. Sonuçların değerlendirilmesinde hafif agrega ve lif oranlarının değişmesinin bu özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir.



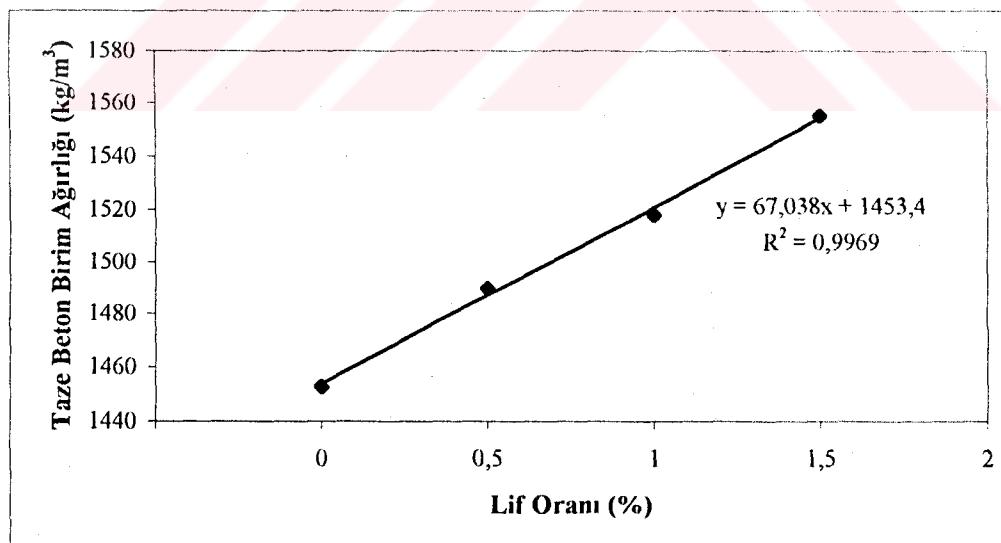
Şekil 6. 2. Hafif Agrega Oranı % 25 Olan Karışımında Birim Ağırlık-Lif Oranı İlişkisi



Şekil 6. 3. Hafif Agrega Oranı % 50 Olan Karışımında Birim Ağırlık-Lif Oranı İlişkisi



Şekil 6. 4. Hafif Agrega Oranı % 75 Olan Karışımında Birim Ağırlık-Lif Oranı İlişkisi



Şekil 6. 5. Hafif Agrega Oranı % 100 Olan Karışımında Birim Ağırlık-Lif Oranı İlişkisi

6. 2. 2. 1. Çelik Lif ve Hafif Agreganın Betonun Birim Ağırlığına Etkisi

Çalışmada üretilen betonların 28 günlük birim ağırlık değerlerinin çelik lif ve hafif aggrega ilavesiyle nasıl değiştiğini şu şekilde açıklamak mümkündür;

Hacimce % 25 oranında hafif aggrega içeren ve çelik lif ilave edilmemiş betonun birim ağırlığı 2026.64 kg/m^3 olmasına karşılık bu betona yine hacimce % 0.5, % 1.0 ve % 1.5 oranlarında çelik lif ilave edildiğinde birim ağırlık değerleri sırasıyla 2084.06, 2098.56 ve 2139.93 kg/m^3 olmaktadır. Birim ağırlıktaki artışlar ise yine sırasıyla % 2.8, % 3.6, ve % 5.6'dır.

Hacimce % 50 oranında hafif aggrega içeren betonların birim ağırlıkları ise hacimce % 0 oranında lif için 1837.68 kg/m^3 , % 0.5 oranında lif için 1896.48 kg/m^3 , % 1.0 oranında lif için 1914.41 kg/m^3 , ve % 1.5 oranında lif için 1956.61 kg/m^3 olarak hesaplanmıştır. Bu gruptaki betonların birim ağırlıklarındaki artış ise sırasıyla % 3.2, % 4.2, ve % 6.5'dir.

İçerisine hacimce % 75 oranında pomza ilave edilmiş olan karışımlara hacimce % 0.5, % 1.0 ve % 1.5 oranlarında çelik lif ilave edilmesi lif oranı % 0 olan betona kıyasla birim ağırlığı sırasıyla % 4.1, % 4.8, ve % 5.9 oranlarında artırmıştır.

Tamamen hafif aggrega kullanılarak üretilen karışımlara ise hacimce % 0.5, % 1.0 ve % 1.5 oranlarında çelik lif ilave edilmesi, sertleşmiş betonun birim ağırlığını hiç lif ilave edilmemiş karışımlara kıyasla sırasıyla % 3.1, % 6.5 ve % 8.5 oranlarında artırmıştır.

Bu sonuçlar Tablo 6. 4 ve Tablo 6. 5'de topluca verilmiş ve Şekil 6. 6'da da grafikle gösterilmiştir.

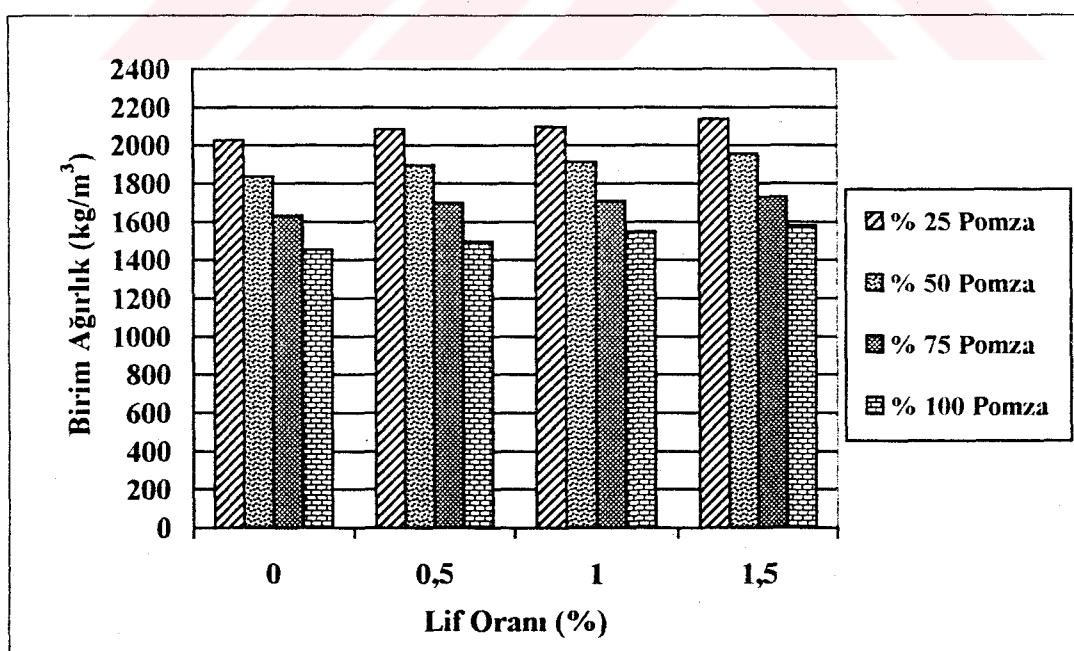
Bu değerlerden de anlaşılabileceği gibi hafif aggregalı betonlara çelik lif ilave edilmesi sertleşmiş betonun birim ağırlığını bir miktar artırmaktadır. Bu artış çalışmada üretilen betonlar için % 2.8 - % 8.5 arasında değişmektedir. Betonlara çelik lif ilave edilmesiyle birim ağırlık değerindeki artışın nedeninin çelik liflerin özgül ağırlıklarının oldukça yüksek olmasıyla ilişkili olduğu düşünülebilir.

Tablo 6. 4. Lif Oranlarına Göre Sertleşmiş Beton Birim Ağırlıkları (kg/m^3)

Lif Oranı (%)	Hafif Agrega Oranı (%)			
	25	50	75	100
0,0	2026.64	1837.68	1631.39	1453.14
0,5	2084.06	1896.48	1698.37	1498.14
1,0	2098.56	1914.41	1709.12	1547.92
1,5	2139.93	1956.61	1728.24	1577.21

Tablo 6. 5. Lifsiz Karışımlara Kiyasla Birim Ağırlıktaki Artışlar (%)

Lif Oranı (%)	Hafif Agrega Oranı (%)			
	25	50	75	100
0,5	2.8	3.2	4.1	3.1
1,0	3.6	4.2	4.8	6.5
1,5	5.6	6.5	5.9	8.5



Şekil 6. 6. Lif Oranı – Birim Ağırlık İlişkisi

Diğer taraftan lif oranı % 0, % 0.5, % 1.0, ve % 1.5 olan betonlar kendi aralarında değerlendirildiğinde hafif agregat oranı hacimce % 25'den % 100'e çıkması betonların birim ağırlıklarını % 9 - % 28 oranları arasında düşürmektedir. Birim ağırlıktaki bu azalma hafif agreganın özgül ağırlığının normal agreganın özgül ağırlığından küçük olmasına açıklanabilir.

Tablo 6. 4'deki değerlerin varyans analizi yapılacak olursa Tablo 6. 6'da da görüldüğü gibi hesaplanan F değerlerinin tablolarda verilen F değerlerinden oldukça büyük olduğu görülecektir. Varyans analizi gereğince $F_h > F_t$ olduğunda ilk hipotezler ki burada birim ağırlıkla çelik lif oranı ve birim ağırlıkla hafif agregat oranı arasında ilişkinin olmadığı şeklindeki reddedilir. Bu da birim ağırlıkla hem lif oranı hem de hafif agregat oranı arasında ilişkinin var olduğunu göstermektedir. Yapılan regresyon analizi sonucunda da birim ağırlığın hem lif oranı hem de hafif agregat oranı arasında

$$y = 72.619 \cdot x_1 - 7.656 \cdot x_2 + 2223.93 \quad (r = 0.998)$$

şeklinde doğrusal bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Burada lif oranı (x_1) değerinin pozitif olması nedeniyle birim ağırlığı (y) artırıcı yönde, hafif agregat oranı (x_2) değerinin negatif olması nedeniyle de birim ağırlığı (y) azaltıcı yönde etkisi olduğu % 99 güven seviyesinde görülmektedir.

Tablo 6. 6. Sertleşmiş Beton Birim Ağırlık Değerlerinin İstatistik Hesapları

	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	Hesaplanan F Değeri (F_h)	Tablo F Değeri (F_t)
Lif Oranı için	27325.82	3	9108.61	93.091	6.99**
Pomza Oranı için	733661.7	3	244553.9	2499.35	6.99**
Hata	880.617	9	97.846	-	-

$$\text{Regresyon Denklemi ; } y = 72.619 \cdot x_1 - 7.656 \cdot x_2 + 2223.93$$

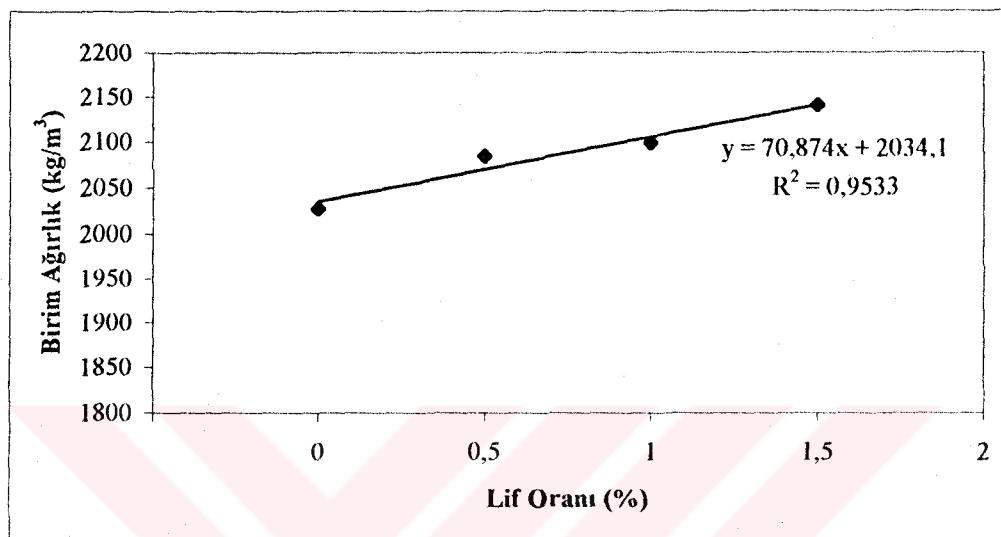
$$\text{Korelasyon Katsayısı ; } r = 0.998$$

Hipotezler;

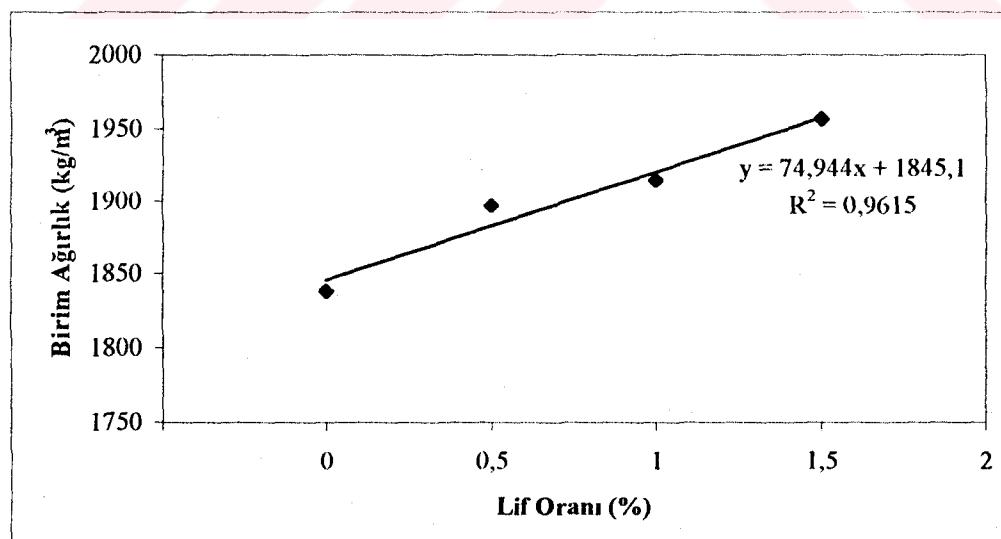
1. H_0 = Çelik liflerin sertleşmiş beton birim ağırlığına etkisi yoktur -- red
 H_1 = Çelik liflerin sertleşmiş beton birim ağırlığına etkisi vardır
2. H_0 = Hafif agregat oranının sertleşmiş beton birim ağırlığına etkisi yoktur -- red
 H_1 = Hafif agregat oranının sertleşmiş beton birim ağırlığına etkisi vardır

** P = 0.01 ihtimal seviyesinde önemli

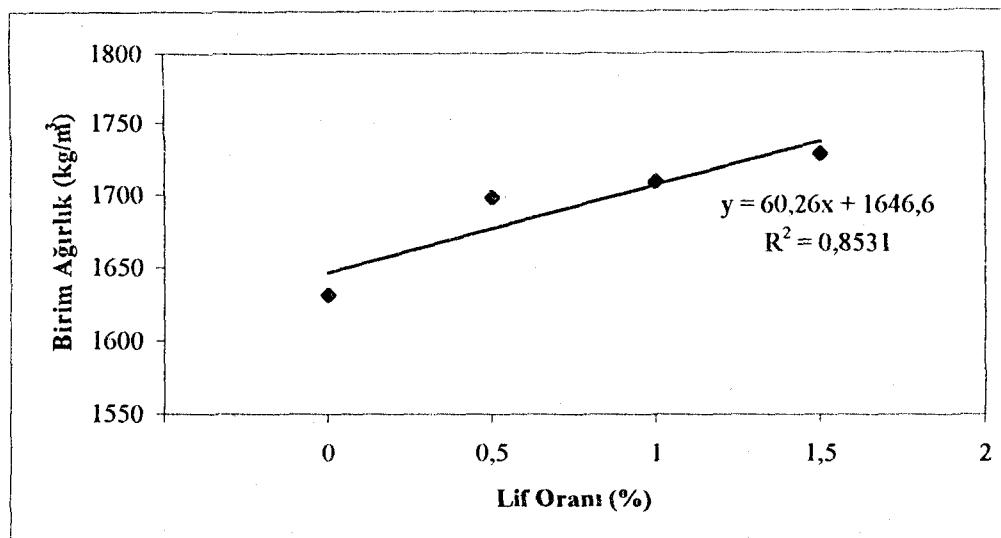
Karışımındaki çelik lif oranının artmasının betonun birim ağırlığını artttirdiği farklı bir gösterimle Şekil 6. 7, Şekil 6. 8, Şekil 6. 9 ve Şekil 6. 10'dan da görülmektedir.



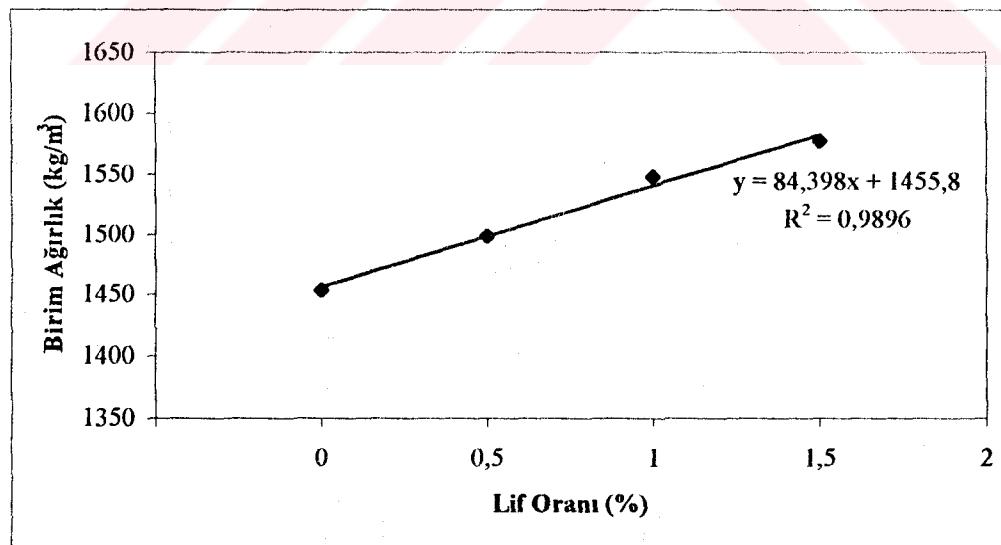
Şekil 6. 7. Hafif Agrega Oranı % 25 Olan Betonlarda Birim Ağırlık-Lif Oranı İlişkisi



Şekil 6. 8. Hafif Agrega Oranı % 50 Olan Betonlarda Birim Ağırlık-Lif Oranı İlişkisi



Şekil 6. 9. Hafif Agrega Oranı % 75 Olan Betonlarda Birim Ağırlık-Lif Oranı İlişkisi



Şekil 6. 10. Hafif Agrega Oranı % 100 Olan Betonlarda Birim Ağırlık-Lif Oranı İlişkisi

6. 2. 2. 2. Sonuçların Basınç Mukavemeti Açısından Değerlendirilmesi

Bu bölümde, hafif agregat ve çelik lif oranının basınç mukavemeti üzerindeki etkileriyle birlikte, çalışmada elde edilen basınç mukavemeti değerleriyle hem birim ağırlık değerleri hem de elastisite modülü değerleri arasındaki ilişki açıklanmıştır.

6. 2. 2. 2. a. Çelik Lif ve Hafif Agregat Oranının Mukavemet Üzerindeki Etkisi

Çalışmada farklı lif oranlarına sahip betonlar için elde edilen basınç mukavemeti değerleri Tablo 6. 7.'de topluca gösterilmiştir.

Tablo 6. 7. Lif Oranlarına Göre Betonların 28 Günlük Basınç Mukavemetleri (kg/cm^2)

Lif Oranı (%)	Hafif Agregat Oranı (%)			
	25	50	75	100
0,0	198.5	163.1	138.7	110.8
0,5	204.3	169.6	145.2	121.1
1,0	212.6	177.4	152.1	128.3
1,5	219.2	184.1	157.4	134.2

Tablodan da görülebileceği gibi karışımındaki çelik lif miktarı arttıkça betonun basınç mukavemetinde de artış olmaktadır. Basınç mukavemetindeki bu artışlar hacimce % 25 hafif agregat içeren karışımlarda lif oranının % 0.5, % 1.0 ve % 1.5 olması durumunda sırasıyla % 2.9, % 7.1 ve % 10.4 oranlarında olduğu görülmüştür.

Hacimce % 50 oranında hafif agregat içeren betonların basınç mukavemeti ise çelik lif oranının % 1.5'a çıkmasıyla lıfsız betona kıyasla % 12.9 oranında artmıştır.

İçerisinde hacimce % 25 oranında normal agregat ve % 75 oranında hafif agregat bulunan betonların basınç mukavemeti değeri lif oranı % 0 olan beton için $138.7 \text{ kg}/\text{cm}^2$, % 0.5 oranında lif içeren beton için $145.2 \text{ kg}/\text{cm}^2$, % 1.0 lif oranına sahip beton için $152.1 \text{ kg}/\text{cm}^2$, ve hacimce % 1.5 lif oranına sahip beton için $157.4 \text{ kg}/\text{cm}^2$ olarak bulunmuştur.

Basınç mukavemetlerindeki artışlar ise lfsiz betonlara kıyasla sırasıyla % 4.7, % 9.7 ve % 13.5 olarak hesaplanmıştır.

Tamamen hafif agregat kullanılarak üretilmiş betonların basınç mukavemetleri ise lif oranının % 0.5, % 1.0, ve % 1.5 olması durumunda lfsiz betona kıyasla sırasıyla % 9.3, % 15.8 ve % 21.1 oranlarında artış göstermiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 6. 8'de topluca verilmektedir.

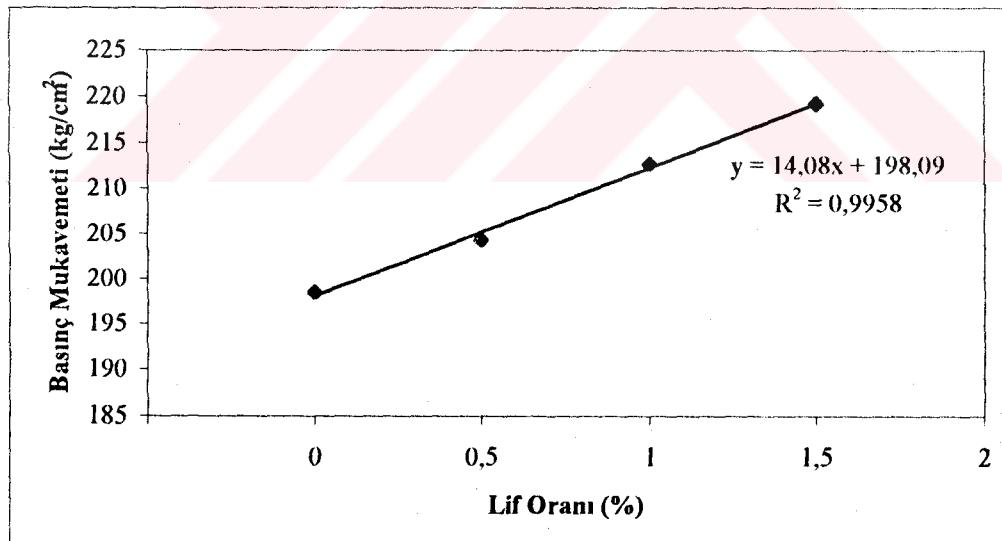
Tablo 6. 8. Lfsiz Karışımlara Kıyasla Basınç Mukavemetindeki Artışlar (%)

Lif Oranı (%)	Hafif Agregat Oranı (%)			
	25	50	75	100
0,5	2.9	4.0	4.7	9.3
1,0	7.1	8.8	9.7	15.8
1,5	10.4	12.9	13.5	21.1

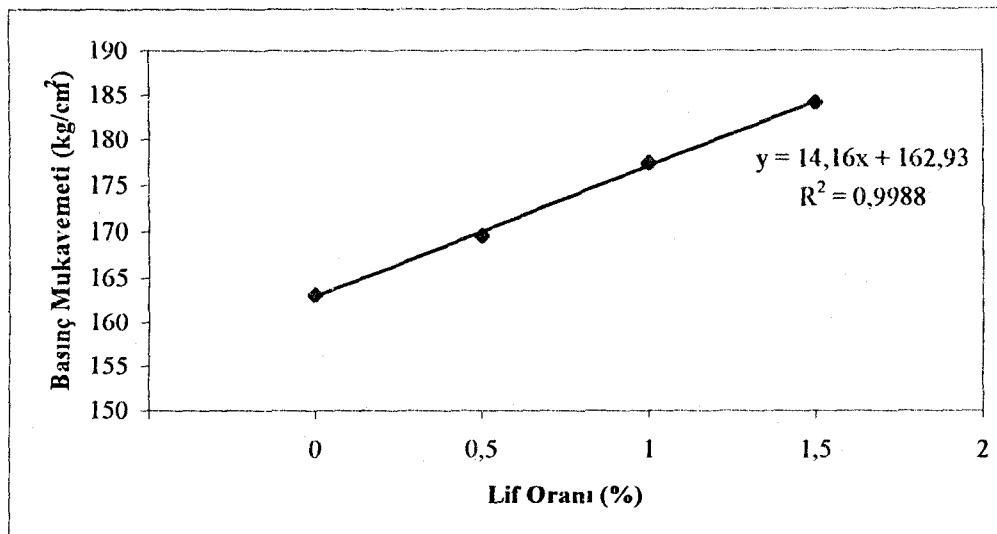
Bu değerlerden hareketle hafif agregatlı betonlara çelik lif ilave edilmesinin betonun basınç mukavemetini artırdığını söylemek mümkündür. Bu çalışmada lfsiz betonlara hacimce % 0.5 ile % 1.5 arasında çelik lif ilave edilmesiyle % 2.9 - % 21.1 oranları arasında bir mukavemet artışı olduğu görülmüştür. Daha önceden yapılmış çalışmalarında da betona lif ilave edilmesiyle basınç mukavemetinde % 30'lara varan bir artış sağlandığı belirlenmiştir (10, 14, 35, 37, 40, 55, 57, 59). Benzer sonuçlar bu çalışmada da elde edilmiştir. Basınç mukavemetindeki bu artıya beton içerisindeki liflerin, yük uygulandığında betonda oluşan çatlakları kendi üzerlerine ve sağlam alanlara transfer ederek ilerlemelerini engellemesi ve liflerin beton içerisindeki yönelimlerinin neden olduğu bildirilmiştir. Özellikle liflerin beton içerisindeki yönelimleri betonun basınç mukavemeti üzerinde oldukça etkilidir. Yani yükleme düzlemine dik olan lifler mukavemet üzerinde pek etkili değilken, liflerin yükleme düzlemine paralellikleri arttıkça betonun mukavemeti üzerindeki olumlu etkileri de artmaktadır. Bunların yanı sıra betondaki lif miktarının artması da basınç mukavemetini artırmaktadır (2, 12, 14, 37, 43, 55).

Mukavemet açısından taşıyıcı hafif betonlar TS 4834 – 1986’de (24) belirtildiğine göre en az BS 14 beton sınıfına giren betonlardır. TS 500 – 1984’e (82) göre ise BS 14 beton sınıfına 28 günlük karakteristik basınç mukavemeti 140 kg/cm^2 olan betonlar girmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre % 100 hafif agregalı betonlar ve % 75 hafif aggrega içeren lfsiz beton hariç diğer bütün betonlar taşıyıcı hafif beton grubuna girmektedir. Buradan tüm lif oranları için hacimce % 25, % 50, ve % 75 (bu grubun lfsiz betonu hariç) oranlarında hafif aggrega içeren betonların taşıyıcı hafif beton olarak kullanılabileceği sonucuna varılabilir.

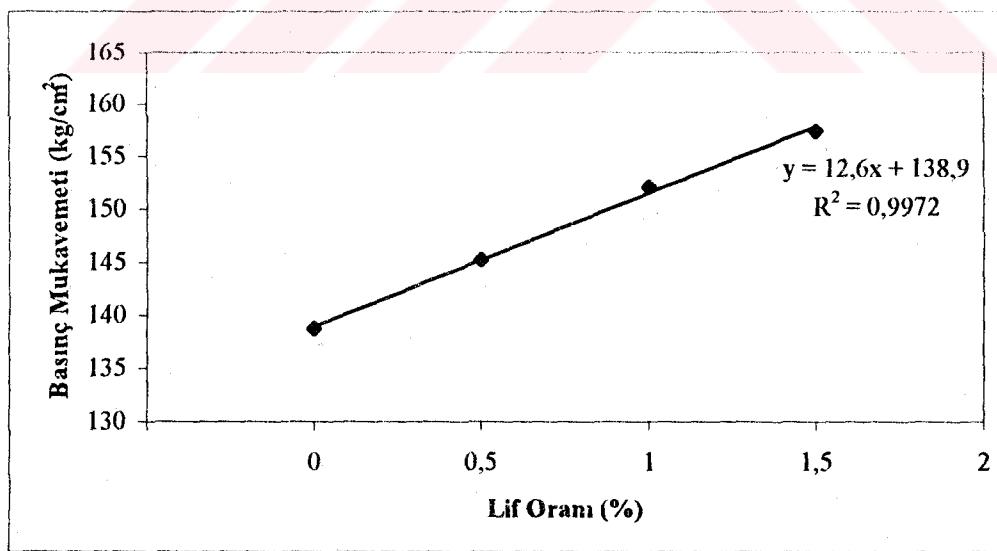
Çelik liflerin betonun basınç mukavemetini nasıl etkilediğini farklı bir gösterimle Şekil 6. 11, Şekil 6. 12, Şekil 6. 13, ve Şekil 6. 14’den de görmek mümkündür.



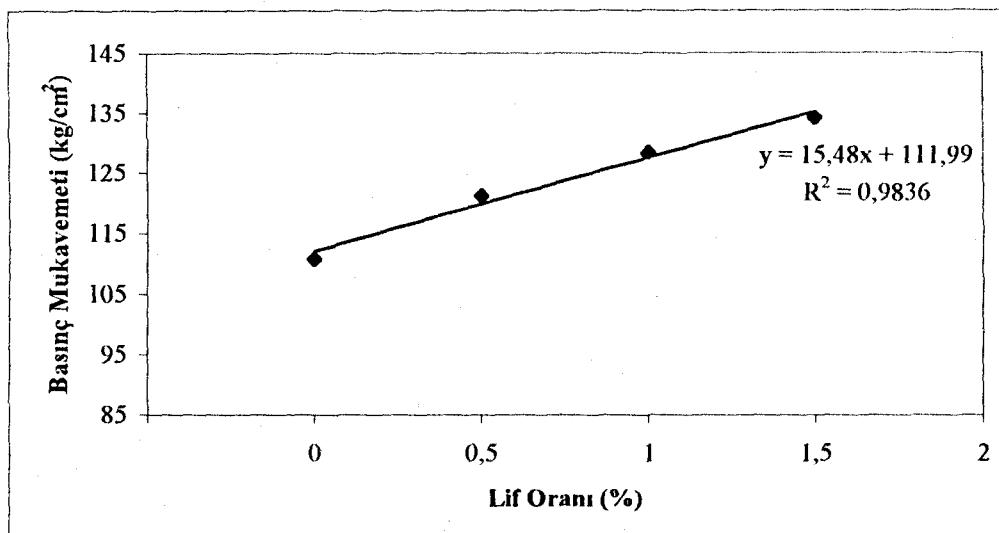
Şekil 6. 11. Hafif Agrega Oranı % 25 Olan Betonlarda Lif Oranı-Basınç Mukavemeti İlişkisi



Şekil 6. 12. Hafif Agrega Oranı % 50 Olan Betonlarda Lif Oranı-Basınç Mukavemeti İlişkisi



Şekil 6. 13. Hafif Agrega Oranı % 75 Olan Betonlarda Lif Oranı-Basınç Mukavemeti İlişkisi



Şekil 6. 14. Hafif Agrega Oranı % 100 Olan Betonlarda Lif Oranı-Basınç Mukavemeti İlişkisi

Diğer taraftan lif oranı % 0, % 0.5, % 1.0, ve % 1.5 olan betonlar kendi aralarında değerlendirildiğinde hafif agrega oranının hacimce % 25'den % 100'e çıkması betonların basınç mukavemetini % 16 - % 44 oranları arasında düşürmektedir. Basınç mukavemetindeki bu azalmaya, normal agreganın belirli oranlarda hafif agrega ile değiştirilmesinin neden olduğu düşünülebilir. Çünkü bir aggreganın boşluk oranı ne kadar fazla ise aggreganın mekanik özellikleri de o kadar zayıftır. Mekanik özellikleri zayıf olan aggregaların kullanılmasıyla üretilen betonların basınç mukavemetlerinin de düşük olması beklenir (20). Normal aggregalara kıyasla hafif aggregaların boşluk oranları yüksek, ve dolayısıyla tanelerin basınç mukavemetlerinin düşük olduğu bilinmektedir.

Yapılan çalışmada üretilen betonların basınç mukavemeti değerleri incelendiğinde çelik lif oranının artmasının basınç mukavemetini artırıcı yönde, hafif agrega oranının artmasının da basınç mukavemetini azaltıcı yönde etkisi olduğu görülecektir. Yapılan regresyon analizi sonucunda betonun basınç mukavemetinin hem çelik lif oranı hem de hafif agrega oranı arasında

$$y = 14.080.x_1 - 1.121.x_2 + 223.065 \quad (r = 0.996)$$

şeklinde doğrusal bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Denklemdeki x_1 bilinmeyeni çelik lif oranını, x_2 bilinmeyeni hafif agregat oranını, ve y bilinmeyeni de basınç mukavemetini göstermektedir.

6. 2. 2. b. Basınç Mukavemeti – Birim Ağırlık İlişkisi

Tablo 5. 13'ün incelenmesiyle görülecektir ki bütün karışımında betonun birim ağırlığı arttıkça basınç mukavemeti de artmıştır. Bu da birim ağırlığın basınç mukavemetini etkileyen önemli bir parametre olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan hafif agregalı betonların mukavemetlerinin normal betonlardan düşük olması da birim ağırlığın bir sonucudur.

Çalışmada elde edilen birim ağırlık değerleri incelendiğinde tüm lif oranları için % 25 hafif agregat içeren betonlar hariç diğer tüm betonların hafif beton grubuna girebileceği belirlenmiştir. % 25 hafif agregat içeren betonların birim ağırlıkları ise normal betonların birim ağırlık değerlerine oldukça yakındır. Bu nedenle hacimce % 25 hafif agregat içeren betonlar hafif beton grubuna girmez, fakat önemli değişikliklere neden olabilir.

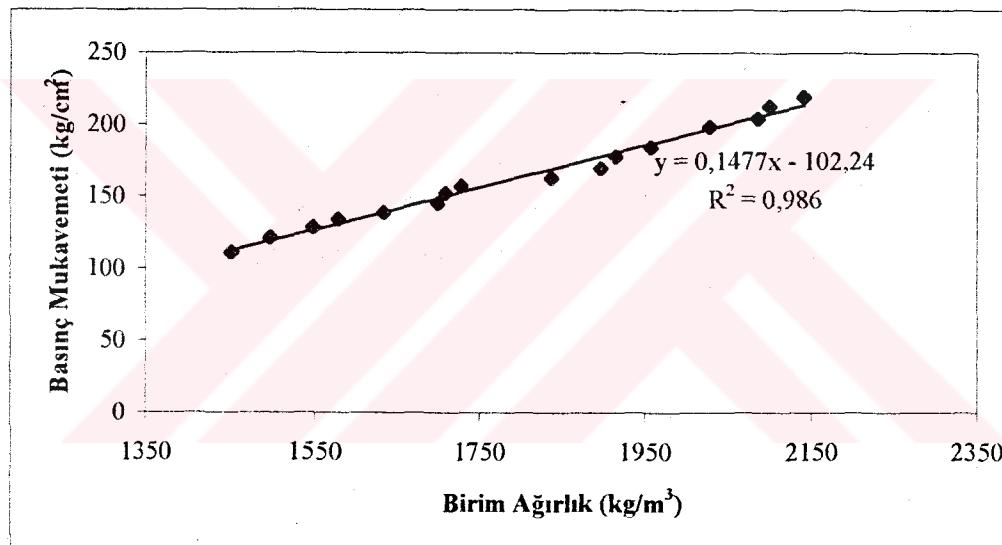
Diğer taraftan taşıyıcı hafif betonların basınç mukavemetlerinin en az 140 kg/cm^2 olmaları istendiğinden (24) beton grupları bu açıdan da analiz edilecek olursa % 100 hafif agregalı betonlar ve % 75 hafif agregalı lifsiz beton hariç diğer tüm betonlar bu sınırın üzerinde olduğu görülür. Tablo 6. 9'da betonların birim ağırlık ve basınç mukavemeti değerleri görülmektedir. Tablodaki ilk değerler betonun basınç mukavemetini, ikinci değerler ise birim ağırlık değerlerini göstermektedir.

Tablo 6. 9. Betonların Basınç Mukavemeti (kg/cm^2) ve Birim Ağırlık (kg/m^3) Değerleri

Lif Oranı (%)	Hafif Agregat Oranı (%)							
	25		50		75		100	
0.0	198.5	2026.64	163.1	1837.68	138.7	1631.39	110.8	1453.14
0.5	204.3	2084.06	169.6	1896.48	145.2	1698.37	121.1	1498.14
1.0	212.6	2098.56	177.4	1914.41	152.1	1709.12	128.3	1547.92
1.5	219.2	2139.93	184.1	1956.61	157.4	1728.24	134.2	1577.21

Basınç mukavemeti değerleri ile birim ağırlık değerleri birleştirilecek olursa tüm lif oranları için hacimce % 25, % 50, ve % 75 (bu grubun lıfsız betonu hariç) hafif agregat içeren betonlar taşıyıcı hafif beton grubuna girmektedir. Bu grupların dışında kalan betonların ise yarı taşıyıcı hafif beton grubuna girdiğini söylemek mümkündür.

Çalışmalarda elde edilen değerler yardımıyla elde edilen betonun birim ağırlığı ile basınç mukavemeti arasındaki ilişki grafik olarak regresyon denklemi ile birlikte Şekil 6. 15'de gösterilmiştir.



Şekil 6. 15. Betonlardaki Birim Ağırlık – Basınç Mukavemeti İlişkisi

6. 2. 2. c. Basınç Mukavemeti – Elastisite Modülü İlişkisi

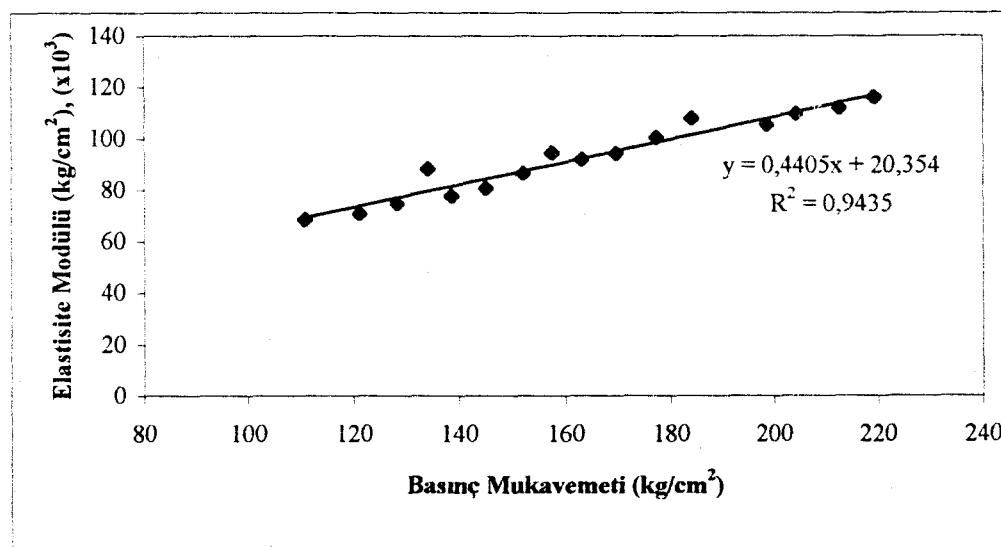
Çalışmalarda üretilen betonların elastisite modülü değerleri Tablo 6. 10'da topluca verilmiştir. Tablodaki değerler incelendiğinde hafif agregatlı betonlara hacimce % 0.5 – % 1.5 oranları arasında çelik lif ilave edilmesinin betonun elastisite modülünü yaklaşık % 2.3 - % 28.7 oranları arasında artırdığı görülecektir. Bilindiği gibi betonun basınç mukavemetini etkileyen bütün etkenler elastisite modülünü de etkiler (1). Bundan dolayı betona çelik lif ilavesiyle elastisite modülünün artmasını nedeni aynen basınç

mukavemetinde olduğu gibi liflerin yük uygulandığında betonda oluşan çatlakların ilerlemelerini engellemesi ve beton içerisindeki yönlendirmeidir. Yani yükleme düzleme dik olan lifler elastisite modülü üzerinde pek etkili değilken, yükleme düzleme paralellikleri arttıkça elastisite modülünü de artırmaktadırlar. Bunların yanı sıra betondaki lif miktarının artması da elastisite modülünü artırmaktadır (2, 12, 14, 37, 43, 55).

Tablo 6. 10. Lif Oranlarına Göre Betonların Elastisite Modülleri (kg/cm^2)

Lif Oranı (%)	Hafif Agrega Oranı (%)			
	25	50	75	100
0,0	105300	92040	77800	68430
0,5	109540	94140	80650	70760
1,0	111790	100360	86390	74760
1,5	116050	107870	94430	88070

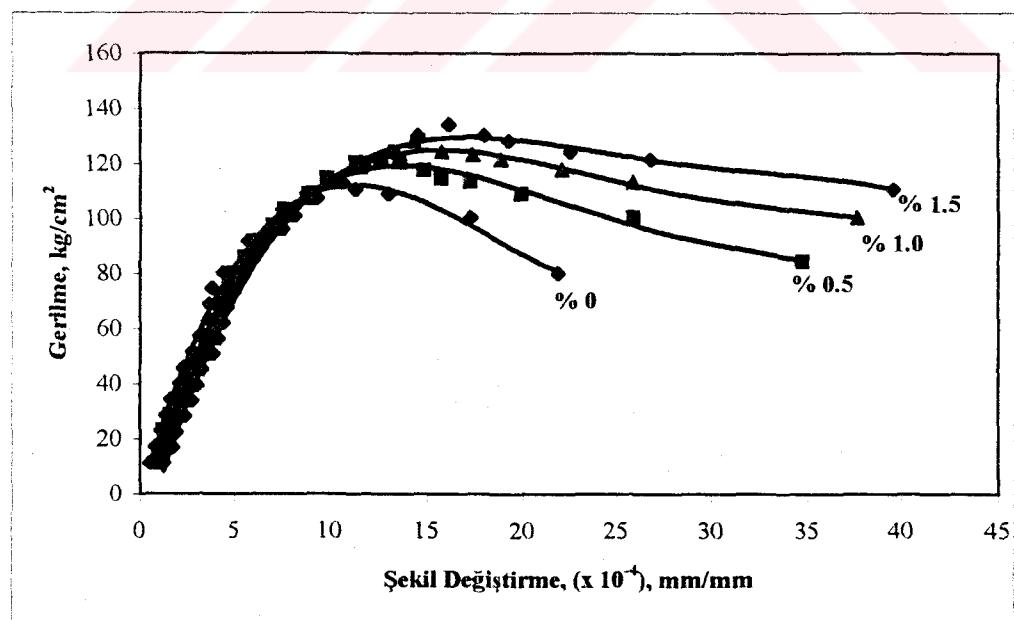
Tablo 5. 13'de verilen basınç mukavemeti ve elastisite modülü değerleri incelendiğinde, üretilen betonların basınç mukavemetlerinin artması ile elastisite modüllerinin arttığı, azalmasıyla da azaldığı görülmektedir. Bu durum Şekil 6. 16'da grafikle gösterilmiştir.



Şekil 6. 16. Basınç Mukavemeti – Elastisite Modülü İlişkisi

6. 2. 2. d. Gerilme – Şekil Değiştirme (Deformasyon) İlişkileri

Şekil 6. 17'de farklı oranlarda çelik lif ihtiaya eden betonlara ait gerilme – şekil değiştirme eğrileri görülmektedir. Şekilden de görülebileceği üzere karışımıma lif ilave edilmesi, betonun maksimum gerilmeye yaptığı deformasyonu artırmaktadır. Bu artış betondaki lif miktarıyla doğru orantılıdır. Nitekim en büyük şekil değiştirme hacimce % 1.5 oranında çelik lif içeren betonda meydana gelmiştir. Yapılan çalışmada ayrıca betona lif ilave edilmesinin betonun gerilme – şekil değiştirme eğrisinin maksimum yükten sonraki kuyruk kısmında oldukça etkili olduğu tespit edilmiş, ve kuyruk kısmının eğiminin karışımındaki lif miktarının artmasıyla azaldığı belirlenmiştir. Buradan betona çelik lif ilave edilmesinin betonun deformasyon yapabilme yeteneğini, ve bununla birlikte gerilme – şekil değiştirme eğrisinin altındaki alandan hesaplanan tokluğu (enerji emme kapasitesi) artırdığı sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak hafif betonlarda görülen kırılganlık özelliğinin lif kullanılmasıyla azaldığı, ve betona daha sünnek bir davranış kazandırdığı görülmüştür.



Şekil 6. 17. Karışımındaki Lif Hacminin % 0, % 0.5, % 1.0, ve % 1.5 Olması Durumunda Betonun Gerilme – Şekil Değiştirme Eğrileri (% 100 Pomza için)

6. 2. 2. 3. Sonuçların Yarmada-Çekme Mukavemeti Açısından Değerlendirilmesi

Değişik oranlarda çelik lif ve hafif agregat kullanılarak üretilmiş standart silindir numuneler üzerinde yapılan yarmada-çekme deneyinden elde edilen sonuçlar Tablo 6. 11'de topluca verilmiştir.

Tablodaki değerler incelendiğinde % 25 oranında hafif agregat içeren karışımlara hacimce % 0.5, % 1, ve % 1,5 lif ilave etmenin lifsiz betona kıyasla betonun yarmada çekme mukavemetini sırasıyla % 23, % 48.8, ve % 61 oranlarında artıldığı belirlenmiştir.

Yine aynı şekilde % 50 oranında hafif agregat içeren karışımlara yukarıda belirtilen oranlarda çelik lif ilave etmek betonun yarmada-çekme mukavemetini sırasıyla % 19.2, % 40.7, ve % 50.3 oranlarında artırmıştır.

% 75 oranında hafif agregat içeren betonlara çelik lif ilave edilmesi ise betonun yarmada-çekme mukavemetini % 0.5 lif için % 16.3, % 1.0 lif için % 36.2, % 1.5 lif için % 58.9 oranlarında artırmıştır.

Tamamen hafif agregat kullanılarak üretilmiş betonların yarmada-çekme mukavemetleri ise lif oranlarına göre sırasıyla % 12.6, % 36.1, ve % 58 oranlarında artmıştır.

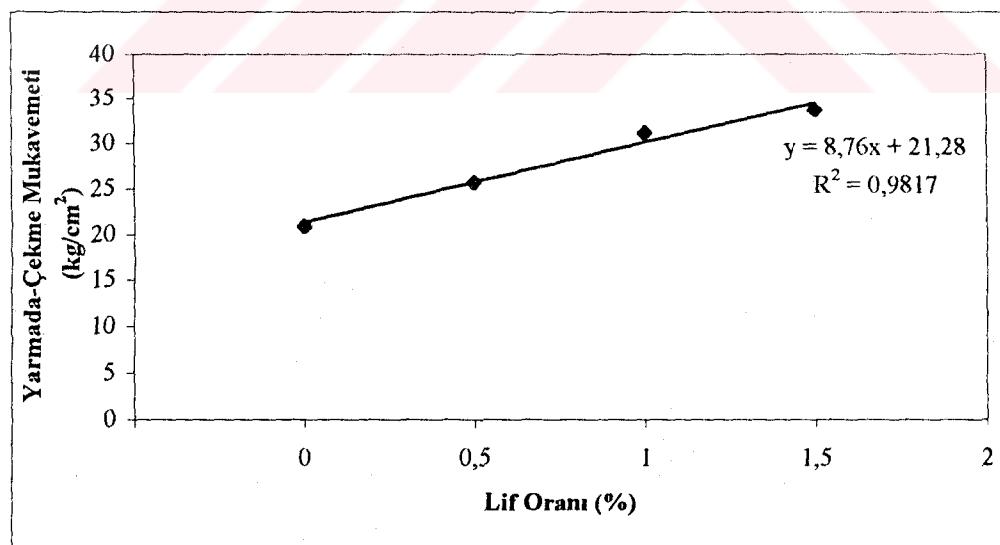
Tablo 6. 11. Lif Oranlarına Göre Betonların Yarmada-Çekme Mukavemetleri (kg/cm^2)

Lif Oranı (%)	Hafif Agregat Oranı (%)			
	25	50	75	100
0,0	20.9	16.7	14.1	11.9
0,5	25.7	19.9	16.4	13.4
1,0	31.1	23.5	19.2	16.2
1,5	33.7	25.1	22.4	18.8

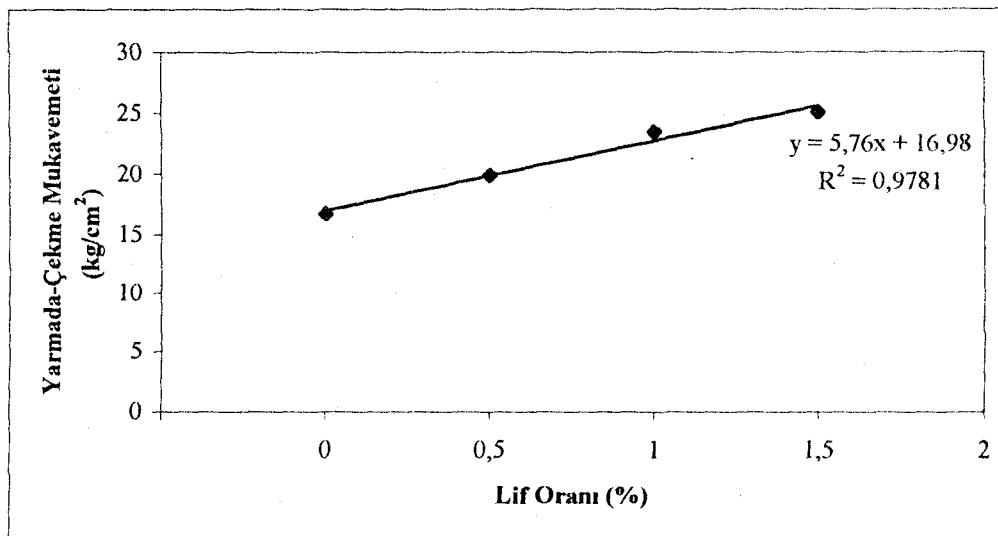
Bu sonuçlardan hareketle hafif agregatlı betonlara çelik lif ilave edilmesinin betonun yarmada-çekme mukavemetini önemli oranlarda arttığını söylemek mümkündür. Bu

çalışmada lifsiz betonlara hacimce % 0.5 ile % 1.5 arasında çelik lif ilave edilmesiyle betonların yarmada-çekme mukavemetlerinin % 12.6 - % 61 oranları arasında arttığı görülmüştür. Buradan; deney esnasında basınç altındaki silindir numunede oluşan çekme kuvvetlerinin hemen hepsinin çelik lifler tarafından karşılanması nedeniyle betonun yarmada-çekme mukavemetinde artış olduğu sonucuna varılabilir (14). Bunun yanı sıra çeliğin yüksek çekme mukavemetine sahip olması, liflerin çatıtlakların ilerlemesini engellemesi, lif – beton arasındaki aderansın kuvvetli olması, liflerin betondaki yönelimleri, liflerin geometrisi [diğer lif geometrilerine kıyasla betonun özellikleri üzerinde en büyük iyileştirmeyi çengelli çelik lifler yapmaktadır (12, 32)], ve lif miktarının artması betonun çekme mukavemetini artıran faktörlerdir (2, 12, 37, 43, 55).

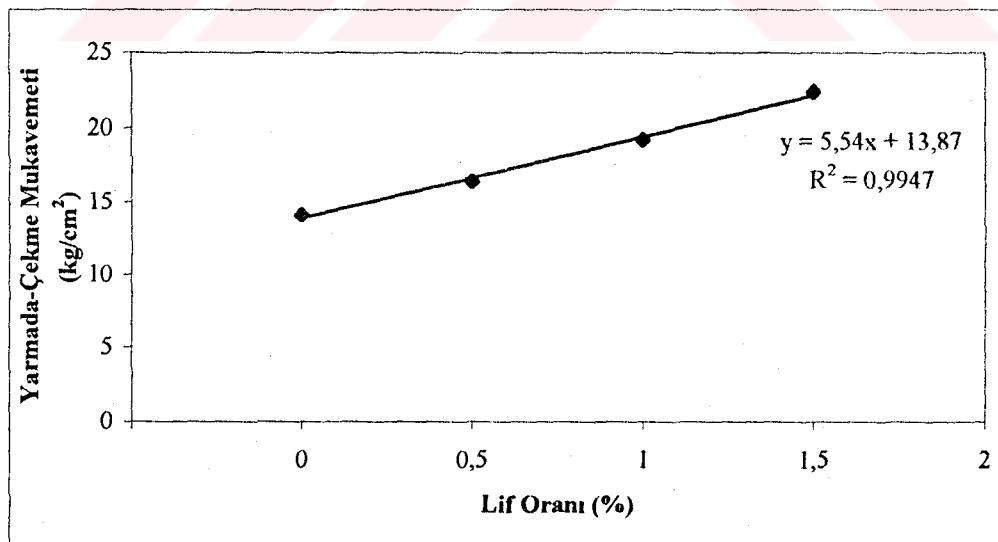
Lif oranının artmasının betonun yarmada-çekme mukavemetini artırdığını Şekil 6. 18, Şekil 6. 19, Şekil 6. 20, ve Şekil 6. 21'den de görmek mümkündür.



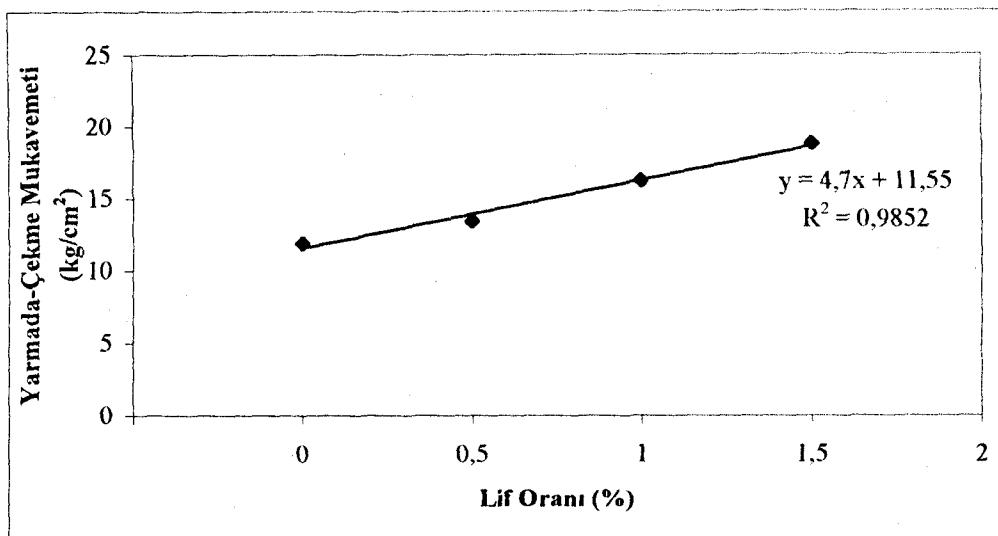
Şekil 6. 18. % 25 Hafif Agrega İçeren Betonlarda Lif Oranı-Yarmada Çekme Mukavemeti İlişkisi



Şekil 6. 19. % 50 Hafif Agrega İçeren Betonlarda Lif Oranı-Yarmada Çekme Mukavemeti İlişkisi

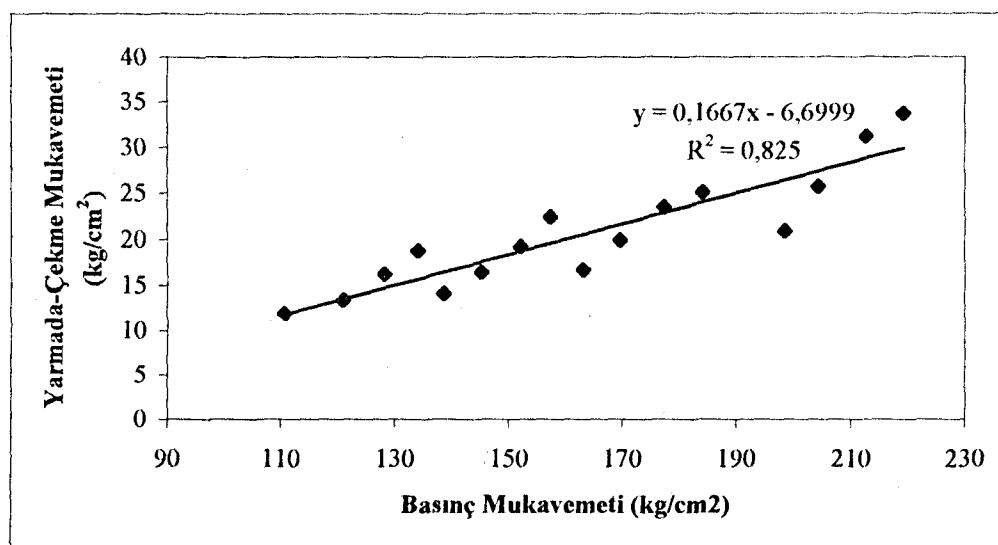


Şekil 6. 20. % 75 Hafif Agrega İçeren Betonlarda Lif Oranı-Yarmada Çekme Mukavemeti İlişkisi



Şekil 6. 21. % 100 Hafif Agrega İçeren Betonlarda Lif Oranı-Yarmada Çekme Mukavemeti İlişkisi

Tablo 5. 13'de verilen sertleşmiş beton deney sonuçları incelendiğinde üretilen tüm betonlarda basınç mukavemeti arttıkça yarmada-çekme mukavemetlerinin de arttığı görülecektir. Üretilen betonların basınç mukavemetleri ile yarmada-çekme mukavemetleri arasındaki ilişki Şekil 6. 22'de gösterilmiştir.



Şekil 6. 22. Basınç Mukavemeti – Yarmada Çekme Mukavemeti İlişkisi

6. 2. 2. 4. Sonuçların Eğilme Mukavemeti Açısından Değerlendirilmesi

Her bir beton grubu için üretilen prizmatik numuneler yapılan eğilme deneyinden elde edilen sonuçlar Tablo 6. 12'de topluca verilmiştir.

Tablo 6. 12. Lif Oranlarına Göre Betonların Eğilme Mukavemetleri (kg/cm^2)

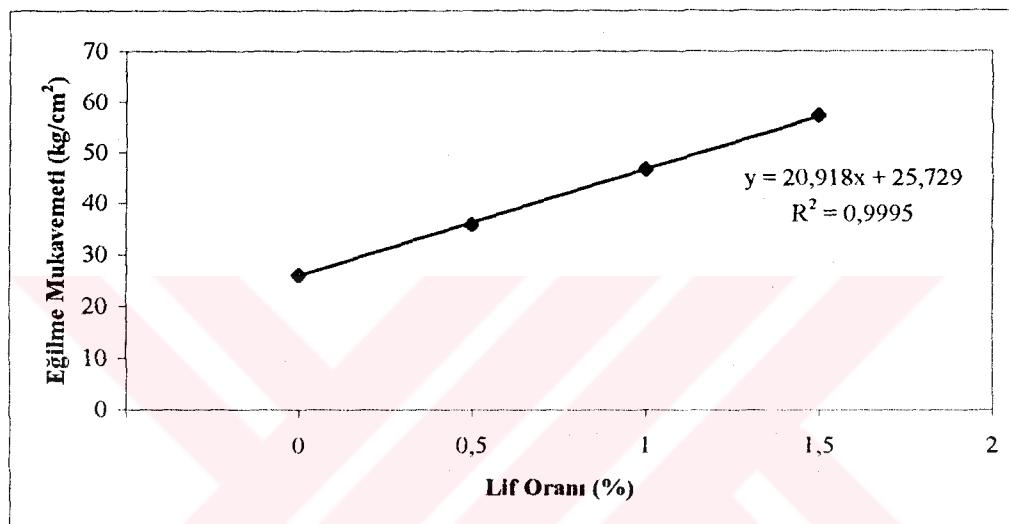
Lif Oranı (%)	Hafif Agrega Oranı (%)			
	25	50	75	100
0,0	26.01	21.87	19.71	16.75
0,5	35.80	27.62	22.94	20.43
1,0	46.58	35.67	30.21	27.15
1,5	57.28	43.05	34.46	30.34

Tablodaki değerler incelendiğinde hafif agregalı betonlara hacimce % 0.5, % 1.0, ve % 1.5 oranlarında çelik lif ilave etmek betonun eğilme mukavemetini % 25 pomza içeren betonlarda sırasıyla % 37.6, % 79.1, % 120.2 oranlarında; % 50 pomza içeren betonlarda sırasıyla % 26.3, % 63.1, % 96.8 oranlarında; % 75 pomza içeren betonlarda sırasıyla % 16.4, % 53.3, % 74.8 oranlarında; % 100 pomza içeren betonlarda ise sırasıyla % 22.0, % 62.1, % 81.1 oranlarında artırdığı görülecektir.

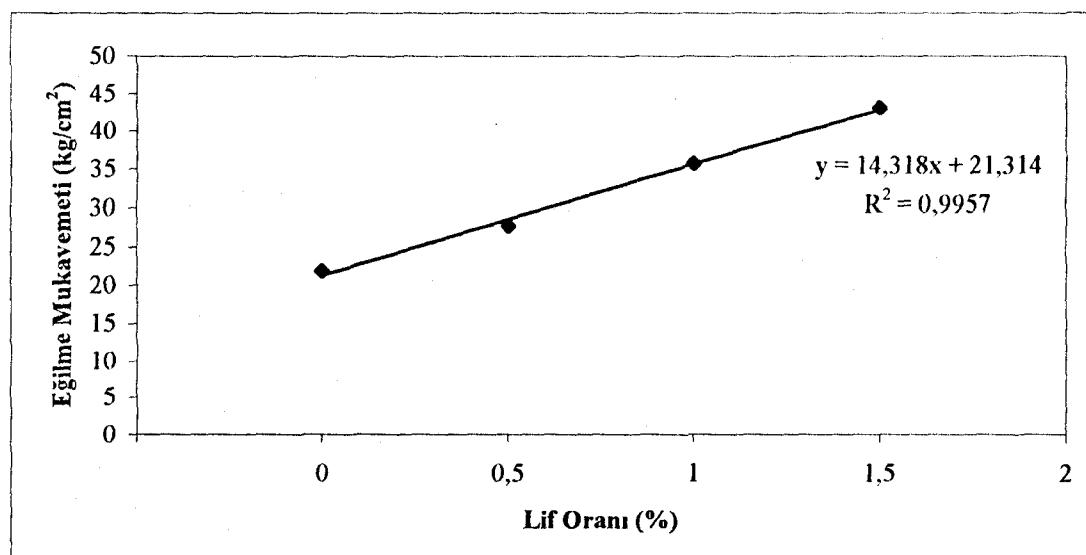
Yarmada-çekme mukavemeti sonuçları incelendiğinde betonun çekme mukavemetinin çelik lif ilavesiyle arttığı görülecektir. Benzer şekilde eğilme deneyinden elde edilen sonuçlardan hareketle hafif agregalı betonların lifle takviyesinin mukavemet artırmada etkili olduğunu söylemek mümkündür. Betona çelik lif ilave edilmesiyle eğilme mukavemetinde sağlanan artış aynen yarmada çekme mukavemetinde olduğu gibi liflerin çatlakların ilerlemelerini engellemesi, beton içerisindeki yönelikleri, çeliğin yüksek çekme mukavemetine sahip olması, lif – beton arasındaki aderansın kuvvetli olması, liflerin geometrisi [diğer lif geometrilerine kıyasla betonun özellikleri üzerinde en büyük iyileştirmeyi çengelli çelik lifler yapmaktadır (12, 32)], ve lif miktarının artması betonun eğilme mukavemetini artıran faktörlerdir (2, 12, 14, 37, 43, 55).

Çelik lifli betonlar üzerinde daha önceden yapılmış çalışmalarda da betonlara çelik lif ilave edilmesinin betonun eğilme mukavemetinde % 100'den fazla artış sağlanabildiği belirtilmiştir (14, 34, 57, 59). Benzer sonuçlar bu çalışmada da elde edilmiştir.

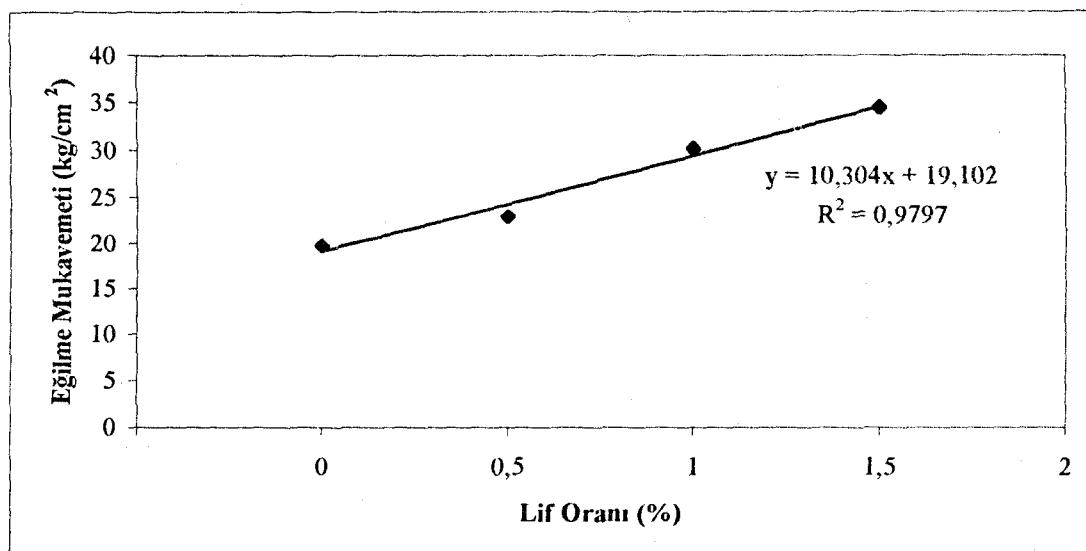
Lif oranının artmasının betonun eğilme mukavemetini artırdığını Şekil 6. 23, Şekil 6. 24, Şekil 6. 25, ve Şekil 6. 26'den de görmek mümkündür.



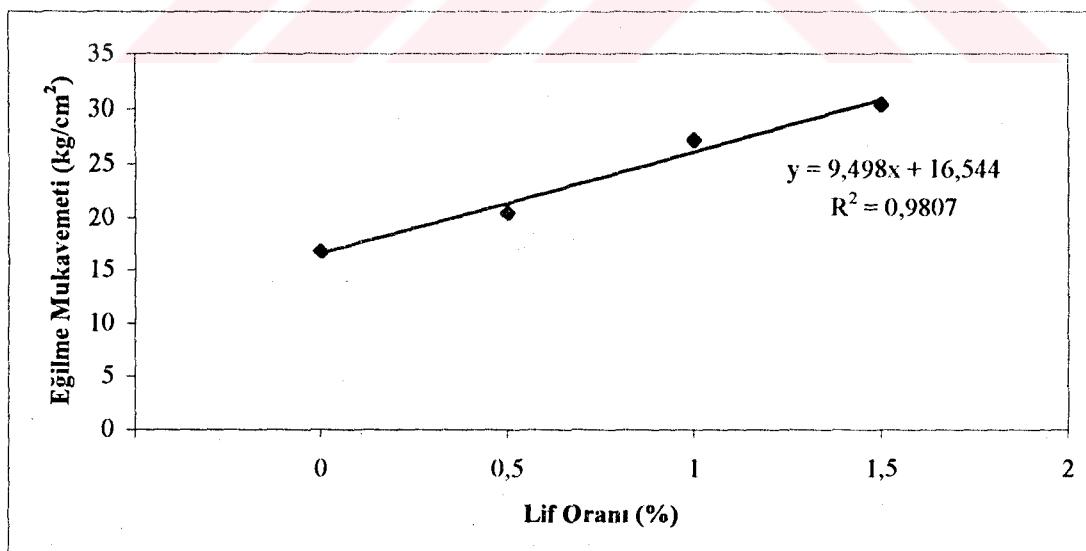
Şekil 6. 23. % 25 Hafif Agrega İçeren Betonlarda Lif Oranı – Eğilme Mukavemeti İlişkisi



Şekil 6. 24. % 50 Hafif Agrega İçeren Betonlarda Lif Oranı – Eğilme Mukavemeti İlişkisi

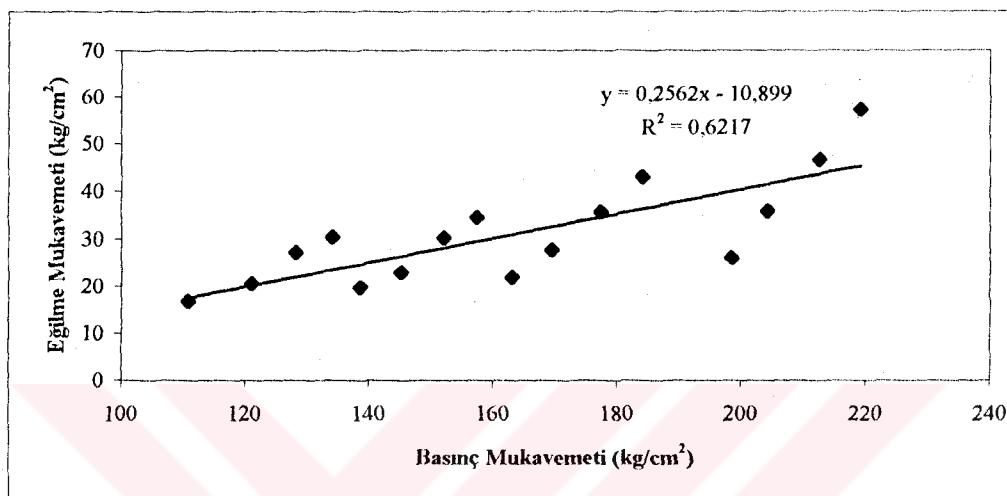


Şekil 6. 25. % 75 Hafif Agrega İçeren Betonlarda Lif Oranı – Eğilme Mukavemeti İlişkisi



Şekil 6. 26. % 100 Hafif Agrega İçeren Betonlarda Lif Oranı – Eğilme Mukavemeti İlişkisi

Tablo 5. 13'deki sertleşmiş beton deney sonuçları incelendiğinde basınç mukavemeti arttıkça eğilme mukavemetlerinin de arttığı görülecektir. Üretilen betonların basınç mukavemetleri ile eğilme mukavemetleri arasındaki ilişki Şekil 6. 27'da gösterilmiştir.



Şekil 6. 27. Basınç Mukavemeti – Eğilme Mukavemeti İlişkisi

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Hafif agregalı betonlara çelik lif ilave edilerek üretilen betonlara ait elde edilen sonuçların toplu olarak değerlendirilmesi neticesinde çalışmanın tümünden çıkarılacak bazı sonuçlar ve öneriler aşağıda özetlenmektedir:

1. Çalışmada kullanılan hafif agrega beton için zararlı olabilecek yabancı madde bakımından genel olarak iyi durumda olduğundan herhangi bir iyileştirme işlemine gerek yoktur. Ancak agrega granülometrisi standart limitleri bazı noktalarda aşığından, kaliteli beton üretimi istendiğinde agrega elenmelidir. Bu durum ilk bakışta ek maliyet ve zaman istediginden dezavantaj gibi görünse de uygun tane dağılımına sahip agregalarla üretilen betonların mukavemetlerinin, dolayısı ile kalitesinin çok daha iyi olacağı bilinen bir husustur.
2. Üretilen betonlarda karışımı giren çelik lif oranının artmasıyla 28 günlük birim ağırlıklarının da arttığı görülmüştür. Betona hacimce % 0.5 - % 1.5 oranları arasında çelik lif ilave etmekle birim ağırlığın % 2.8 - % 8.5 oranlarında arttığı belirlenmiştir.
3. Karışındaki normal agrega hacimce % 25, 50, 75, ve 100 oranlarında azaltılarak yerine pomza ilave etmek her bir lif grubu için betonun birim ağırlığını % 9 - % 28 oranlarında azaltmıştır.
4. Karışma hacimce % 0.5 - % 1.5 oranları arasında çelik lif ilave etmek lfsiz betonlara kıyasla basınç mukavemetini % 2.9 - % 21.1 oranlarında artırmıştır. Her bir lif grubu da kendi arasında değerlendirildiğinde karışında % 25 - % 100 oranları arasında pomza kullanılması basınç mukavemetini % 16 - % 44 oranlarında düşürdüğü belirlenmiştir.
5. Üretilen betonlarda hacimce % 0.5 - % 1.5 oranlarında çelik lif kullanılması betonun yarmada çekme mukavemetini % 12.6 - % 61 oranlarında; eğilme mukavemetini ise % 16.4 - % 120.2 oranlarında artırılmıştır.
6. Hafif agregalı betonlara çelik lif ilave etmek betonun işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle işlenebilirlik kaybının önlenmesi açısından beton üretiminde akişkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılmasında fayda vardır.

7. Hafif agregalı beton elemanlarda çelik lif kullanılarak, bu elemanların taşıyıcı ve yarı taşıyıcı hafif beton olması sağlanabilir.
8. Hafif betonlarda görülen kırılganlık özelliği çelik lif kullanılarak ortadan kaldırılabilir. Böylece betona daha sünek bir davranış kazandırılabilir.
9. Normal agregaya belirli oranlarda hafif agrega ilave edilmesi sonucu birim ağırlıkta görülen azalmadan dolayı yapı elemanlarının kesitleri küçülür ve yapının kendi ağırlığında azalmalar meydana gelir. Böylelikle yapı maliyetinde azalma sağlanır. Öte yandan betona çelik lif ilave edilmesi mukavemette önemli artışlara neden olmaktadır. Sonuç olarak bir yapı elemanında hem hafif agrega hem de çelik liflerin aynı anda kullanılması yapı elemanlarında istenen hafiflik, ısı ve ses izolasyonu, ve mukavemet gibi özelliklerin aynı anda sağlanmasına neden olur.
10. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Erciş ve Pasinler pomzası kullanılarak üretilen betonlara çelik lif ilave edilmesinin yapılarda emniyet, ekonomi, ve estetik bakımından büyük faydalar sağlayabileceğini göstermektedir.
11. Hafif agrega olarak pomza kullanılması, pomza rezervi bakımından oldukça zengin durumda bulunan Türkiye'nin bir yeraltı kaynağı değerlendirilmiş olacaktır.
12. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda pomza kullanılarak üretilen çelik lifli hafif betonların ısı iletkenlik, donma – çözülme, rötre, sünme, yanın etkisi altındaki davranışları gibi özelliklerinin ve daha uzun süreli mekanik özelliklerinin incelenmesinde fayda vardır.

KAYNAKLAR

1. Ersoy, U., 1987, Betonarme, Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı. Evrim Yayınevi ve Ticaret Ltd. Şti. yayını, İstanbul, (üçüncü baskı), Cilt 1, s 1 – 61.
2. Uğurlu, A., 1994, Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton. T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, DSİ Bölge Müdürlüğü, Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, Ankara, MLZ – 878, s 175.
3. Ekmekyapar, T., ve Örung, İ., 1993, İnşaat Malzeme Bilgisi. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ofset Tesisi, Erzurum, s 224.
4. Güner, M.,S., ve Süme, V., 1999, Yapı Malzemesi ve Beton. Bakanlar Matbaacılık Ltd. Şti. yayını, Erzurum, s 329.
5. Şahin, R., 1996, Kocapınar pomzası ile üretilen hafif betonun mukavemetinin araştırılması. Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, (yayınlanmamış).
6. Akman, S., 1990, Yapı Malzemeleri. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi yayını, İstanbul, (ikinci baskı), s 162.
7. Postacıoğlu, B., 1987, Beton (Agregalar, Beton). Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul, Cilt 2, s 404.
8. Turgutalp, Ü., 1978, Sarıkamış yöresi doğal hafif agregasyıyla üretilen betonların tarımsal yapılarda kullanılabilme olanakları üzerine bir araştırma. Doçentlik Tezi, Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Erzurum, (yayınlanmamış).
9. Boratav, S. S., ve Yeğinobalı, A., 1997, Lif takviyeli yüksek dayanıklı hafif beton. İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler, III. Teknik Kongre, Bildiriler Kitabı, O.D.T.Ü., Ankara, 255 – 266.
10. Sancak, E., ve Ünal, O., 1999, Çelik liflerin hafif betonlarda kullanılması üzerine bir araştırma. Çelik Tel Donatılı Betonlar Sempozyumu, İstanbul.
11. TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 1989, Madencilik. Ankara, Cilt 28, Sayı 2, s 64 – 65.
12. Aslan, A., ve Aydın, A. C., 1999, Lifli betonların genel özellikleri. Hazır Beton Dergisi, Yıl 6, Sayı 36, s 67 – 75.
13. Vondran, G. L., 1992, Applications of steel fiber reinforced concrete. ACI Compilation 27, American Concrete Institute, p 14 – 19.

14. Yıldırım, M. A., 1994, Hafif ve yarı hafif betonlarda çelik lif kullanılmasının etkisi. Yüksek lisans tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
15. Türk Standartları Enstitüsü, 1986, Hafif Agregalar – Beton İçin. TS 1114, Ankara.
16. Öztok, İ., 1997, High strength lightweight natural aggregate concrete. M. S. Thesis in Civil Engineering, M.E.T.U., Ankara.
17. Arefi, A., 1993, High strength pumice concrete. M. S. Thesis in Civil Engineering, M.E.T.U., Ankara.
18. Türk Standartları Enstitüsü, 1985, Beton Karışım Hesap Esasları. TS 802, Ankara.
19. American Concrete Institute, 1967, Guide for structural lightweight aggregate concrete. ACI Journal, p 433 – 468.
20. Baradan, B., 1994, Yapı Malzemeleri II. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik – Mimarlık Fakültesi yayını, İzmir, (üçüncü baskı), s 153.
21. Türk Standartları Enstitüsü, 1978, Bimsbeton Yapım Kuralları, Karışım Hesabı ve Deney Metotları. TS 3234, Ankara.
22. Zhang, M. H., and Gjorv, O. D., 1991, Characteristics of lightweight aggregates for high – strength concrete. ACI Materials Journal, v.88, 2, p 150 – 158.
23. EuroLightCon, 1998, Definitions and International Consensus Report, Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete, BE96 – 3942/ME/R1, p 71.
24. Türk Standartları Enstitüsü, 1986, Beton ile İlgili Terimler. TS 4834, Ankara.
25. Türk Standartları Enstitüsü, 1977, Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları. TS 2511, Ankara.
26. American Concrete Institute, 1991, Standard practice for selecting proportions for structural lightweight concrete. ACI 211.2 – 91, p 14.
27. Urhan, S., 1993, Hafif ve çok hafif betonların karakteristik özellikleri ve teknik kapasiteleri. Türkiye Mühendislik Haberleri, sayı 369, s 34 – 40.
28. Demirboğa, R., 1999, Silis dumani ve uçucu külün perlit ve pomza ile üretilen hafif beton özelliklerini üzerindeki etkilerinin incelenmesi. Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, (yayınlanmamış).
29. Mobasher, B., 1999, Fiber reinforced cementitious composites. Center for Advanced Cement Based Materials, Northwestern University, p 83.

30. American Concrete Institute, 1982, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete. ACI Committee 544 – 1R, p 22.
31. American Concrete Institute, 1988, Design considerations for steel fiber reinforced concrete. ACI Committee 544 – 4R, ACI Structural Journal, p 18.
32. Morgan, D. R., 1992, Steel fiber reinforced shotcrete for support of underground openings in Canada. ACI Compilation 27, American Concrete Institute, p 20 – 28.
33. American Concrete Institute, 1984, Guide for specifying, mixing, placing and finishing steel fiber reinforced concrete. ACI Committee 544 – 3R, ACI Structural Journal, p 9.
34. Gopalaratnam, V. S., and Shah, S. P., 1985, Properties of steel fiber reinforced concrete subjected to impact loading. ACI Journal, p 117 – 126.
35. Nataraja, M. C., Dhang, N., Gupta, A. P., 1999, Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression. Cement and Concrete Composites, 21, p 383 – 390.
36. Ding, Y., Kusterle, W., 2000, Compressive stress-strain relationship of steel fibre-reinforced concrete at early age. Cement and Concrete Research, 30, p 1573 – 1579.
37. Gao, J., Sun, W., Morino, K., 1997, Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high strength, lightweight concrete. Cement and Concrete Composites, 19, p 307 – 313.
38. Eren, Ö., and Çelik, T., 1997, Effect of silica fume and steel fibers on some properties of high-strength concrete. Construction and Building Materials, v. 11, p 373 – 382.
39. Yılmaz, K., ve Cavga, Ş., 1999, Agrega granülometrisindeki değişimin çelik tel takviyeli betonların performansı üzerine etkileri. Çelik Tel Donatılı Betonlar Sempozyumu, İstanbul.
40. Chenkui, H., and Guofan, Z., 1995, Properties of steel fibre reinforced concrete containing larger coarse aggregate. Cement and Concrete Composites, 17, p 199 – 206.

41. Toutanji, H., and Bayasi, Z., 1998, Effects of manufacturing techniques on the flexural behavior of steel fiber-reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 28, 1, p 115 – 124.
42. Türk Standartları Enstitüsü, 1992, Beton-Çelik Tel Takviyeli-Çelik Telleri Betona Karıştırma ve Kontrol Kuralları, TS 10514, Ankara.
43. Soroushian, P., and Lee, C. D., 1990, Tensile strength of steel fiber reinforced concrete: correlation with some measures of fiber spacing. *ACI Materials Journal*, v.87, p 541 – 546.
44. Swamy, R. N., and Jojagha, A. H., 1982, Workability of steel fibre reinforced lightweight aggregate concrete. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, v. 4, 2, p 103 – 109.
45. Sharma, A. K., 1985, Shear strength of steel fiber reinforced concrete beams. *ACI Journal*, p 624 – 628.
46. Nanni, A., 1990, Design for torsion using steel fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, v.87, 6, p 556 – 564.
47. Barr, B., and Noor, M. R., 1983, The toughness index of steel fiber reinforced concrete. *ACI Journal*, p 622 – 629.
48. Tatnall, P. C., and Kuitenhoubwer, L., 1992, Steel fiber reinforced concrete in industrial floors. *ACI Compilation 27*, American Concrete Institute, p 3 – 7.
49. Arıoğlu, E., Arıoğlu, N., Arıoğlu, E., 1999, Evaluation of the engineering properties of the very high strength concrete produced at the Yapı Merkezi Inc.-Turkey, 5'th International Symposium on utilization of high strength/high performance concrete, Norway.
50. Taşdemir, M. A., 1999, Çelik tel takviyeli yüksek dayanıklı betonların mekanik davranışları. *Çelik Tel Donatılı Betonlar Sempozyumu*, İstanbul.
51. Swamy, R. N., and Jojagha, A. H., 1982, Impact resistance of steel fibre reinforced lightweight concrete. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, v. 4, 4, p 209 – 220.
52. Kosa, K., and Naaman, A. E., 1990, Corrosion of steel fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, v. 87, p 27 – 37.
53. Zhang, M. H., and Gjorv, O. E., 1991, Mechanical properties of high – strength lightweight concrete. *ACI Materials Journal*, v.88, 3, p 240 – 247.

54. Wafa, F. F., and Ashour, S. A., 1992, Mechanical properties of high – strength fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, v. 89, 5, p 449 – 455.
55. Balaguru, P., and Dipsia, M. G., 1993, Properties of fiber reinforced high – strength semilightweight concrete. *ACI Materials Journal*, v. 90, 5, p 399 – 405.
56. Torrenti, J. M., and Djebri, B., 1995, Behaviour of steel fibre-reinforced concretes under biaxial compression loads. *Cement and Concrete Composites*, 17, p 261 – 266.
57. Balaguru, P., and Foden, A., 1996, Properties of fiber reinforced structural lightweight concrete. *ACI Structural Journal*, v. 93, 1, p 62 – 78.
58. Gül, R., Şahin, R., ve Demirboğa, R., 1997, Kocapınar pomzası ile üretilen hafif betonun mukavemetinin araştırılması, *İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler*, III. Teknik Kongre, Bildiriler Kitabı, O.D.T.Ü., Ankara, 903 – 912.
59. Çelik, T., ve Eren, Ö., 1997, Çengelli çelik liflerin yüksek mukavemetli betona etkisi. *İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler*, III. Teknik Kongre, Bildiriler Kitabı, O.D.T.Ü., Ankara, 267 – 276.
60. Al-Khaiat, H., and Haque, M. N., 1998, Effect of initial curing on early strength and physical properties of a lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 28, 6, 859 – 866.
61. Pigeon, M., and Cantin, R., 1998, Flexural properties of steel fiber-reinforced concretes at low temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 20, p 365 – 375.
62. Almansa, E. M., Cánovas, M. F., 1999, Behaviour of normal and steel fiber-reinforced concrete under impact of small projectiles. *Cement and Concrete Research*, 29, p 1807 – 1814.
63. Luo, X., Sun, W., Chan, S. Y. N., 2000, Characteristics of high-performance steel fiber reinforced concrete subject to high velocity impact. *Cement and Concrete Research*, 30, p 907 – 914.
64. Türk Standartları Enstitüsü, 1980, Beton Agregalarından Numune Alma ve Deney Numunesi Hazırlama Yöntemi. TS 707, Ankara.
65. Türk Standartları Enstitüsü, 1980, Beton Agregalarının Tane Büyüklüğü Dağılımının Tayini (Granülometrik Birleşim Tayini). TS 3530, Ankara.

66. Türk Standartları Enstitüsü, 1980, Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini. TS 3529, Ankara.
67. Türk Standartları Enstitüsü, 1982, Beton Agregalarında Organik Kökenli Madde Tayini Deney Metodu. TS 3673, Ankara.
68. Türk Standartları Enstitüsü, 1981, Beton Agregalarında Sülfat Miktarı Tayin Metodu. TS 3674, Ankara.
69. Türk Standartları Enstitüsü, 1982, Beton Agregalarında Klorür Miktarı Tayini Metodu. TS 3732, Ankara.
70. Türk Standartları Enstitüsü, 1980, Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini. TS 3526, Ankara.
71. Türk Standartları Enstitüsü, 1980, Beton Agregalarında İnce Madde Oranı Tayini. TS 3527, Ankara.
72. Türk Standartları Enstitüsü, 1981, Beton Agregalarında Dona Dayanıklılık Tayini. TS 3655, Ankara.
73. Türk Standartları Enstitüsü, 1978, Taze Betondan Numune Alma Metotları. TS 2940, Ankara.
74. Türk Standartları Enstitüsü, 1977, Taze Beton Kivam Deneyi. TS 2871, Ankara.
75. Türk Standartları Enstitüsü, 1990, Beton Basınç Mukavemeti Tayini. TS 3114, Ankara.
76. Türk Standartları Enstitüsü, 1978, Betonda Yarmada Çekme Dayanımı Tayini Deneyi (Silindir Yarma Metodu). TS 3129, Ankara.
77. A.S.T.M., 1998, Standart test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. ASTM C 496 – 96, 1998 ASTM Annual Book (Concrete and Aggregates), p 265 – 268.
78. Türk Standartları Enstitüsü, 1979, Betonun Eğilmede Çekme Dayanımı Tayini Deneyi (üçtebir noktalarından yüklenmiş basit kırış metodu ile). TS 3284, Ankara.
79. A.S.T.M., 1998, Standart test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading). ASTM C 78 – 94, 1998 ASTM Annual Book (Concrete and Aggregates), p 31 – 33.
80. Türk Standartları Enstitüsü, 1992, Beton-Çelik Tel Takviyeli-Eğilme Mukavemeti Deney Metodu. TS 10515, Ankara

81. A.S.T.M., 1998, Standart test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression. ASTM C 469 – 94, 1998 ASTM Annual Book (Concrete and Aggregates), p 240 – 243.
82. Türk Standartları Enstitüsü, 1984, Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları. TS 500, Ankara.

T.C. YÜZSEKLİĞİNDİRİM KURULU
BETONARME YAPILARI MERKEZİ