

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN ÇELİK LİF DONATILI
BETONLARIN MEKANİK DAVRANIŞINA SU/İNCE
MALZEME ORANI ve LİF DAYANIMININ ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Alihan DİNÇ**

**Anabilim Dalı: İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Programı: YAPI MÜHENDİSLİĞİ**

HAZİRAN 2007

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN ÇELİK LİF DONATILI
BETONLARIN MEKANİK DAVRANIŞINA SU/İNCE
MALZEME ORANI ve LİF DAYANIMININ ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş.Müh. Alihan DİNÇ
501031177**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Haziran 2007**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Halit Yaşa ERSOY (MSÜ)
Doç. Dr. Yılmaz AKKAYA (İTÜ)**

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında tezi yöneten ve değerli bilgileriyle destek olan sayın hocam Prof. Dr. Mehmet Ali Taşdemir' e, çalışmalarında ilgi ve yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Yılmaz Akkaya' ya, gerek deney aşamasındaki yardımları ve gerekse bilgileriyle bu çalışmada büyük emeği olan Araş. Gör. Cengiz Şengül'e, çalışmalarım sırasındaki ilgilerinden dolayı Araş. Gör. Bekir Pekmezci ve Araş. Gör. Anıl Doğan'a, tezdeki çalışma arkadaşım Burak Yılmaz'a, çalışmalarım sırasındaki yardımları dolayısıyla İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanlarına ve ayrıca gösterdikleri sevgi, destek ve üstün sabırlarından dolayı aileme teşekkür ederim.

Mayıs, 2007

Alihan DİNÇ

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	3
2.1. Yüksek Performanslı Betonlar	4
2.1.1. Homojen dağılı ultra incelikteki taneler içeren yoğunlaştırılmış sistemler (DSP)	8
2.1.2. Büyük boşluklardan arındırılmış (MDF) çimento hamuru	8
2.1.3. Reaktif ppudra betonu (RPC)	8
2.1.4. Çimento hamuru enjekte edilmiş lif donatılı beton (SIFCON)	9
2.1.5. Kendiliğinden yerleşen çelik lifli betonlar	9
2.2. Kendiliğinden Yerleşen Çelik Lifli Betonların Taze Beton Özellikleri	13
2.2.1. Çökme- yayılma deneyi	14
2.2.2. U-Kutusu testi	15
2.2.3. V-Hunisi testi	15
2.3. Kendiliğinden Yerleşen Betonda Malzeme Özellikleri	16
2.3.1. Mineral katkı kullanımının beton özelliklerine etkisi	17
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	27
3.1. Karışımlarda Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	27
3.1.1. Çimento	27
3.1.2. Silis unu	28
3.1.3. Silis dumanı	29
3.1.4. Agregalar	29
3.1.5. Akışkanlaştırıcı katkı	31
3.1.6. Çelik lifler	31
3.2. Beton Karışımları	32
3.3. Üretimde İzlenen Sıra	35
3.4. Numune Şekil ve Boyutları	35
3.5. Numune Kodlarının Belirlenmesi:	36
4. DENEY SONUÇLARININ İNCELENMESİ	37
4.1. Taze Beton Deney Sonuçları	37
4.1.1. Birim ağırlık deneyi	37
4.1.2. Çökme-yayılma deneyi	38
4.1.3. Kısıtlanmış yayılma deneyi	39
4.1.4. V-funnel deneyi	41
4.1.5. U-Box deneyi	44

4.2.	Sertleşmiş Beton Deneyleri	46
4.2.1.	RILEM kırılma enerjisi deneyinden elde edilen sonuçlar	46
4.2.2.	Silindir basınç deneyi	49
4.2.3.	Yarma-çekme deneyi	49
4.3.	Sertleşmiş Beton Deneylerinin Sonuç ve Değerlendirmeleri	50
4.3.1.	Silindir basınç deneyi sonuç ve değerlendirme	50
4.3.2.	Yarma çekme deneyi sonuç ve değerlendirme	53
4.3.3.	RILEM kırılma enerjisi deney sonuçları ve değerlendirme	54
5.	GENEL SONUÇLAR	60
	KAYNAKLAR	62
	EKLER	65
	ÖZGEÇMİŞ	73

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1 :Çimento bileşenleri reaksiyon hızı, açığa çıkan ısı ve nihai dayanıma katkıları	6
Tablo 2.2 :Tipik silis dumanının kimyasal bileşimi	21
Tablo 3.1 :Portland çimentosunun fiziksel özellikleri ve basınç dayanımı.....	28
Tablo 3.2 :Portland çimentonun kimyasal özellikleri	28
Tablo 3.3 :Silis ununun kimyasal özellikleri.....	29
Tablo 3.4 :Silis ununun fiziksel özellikleri	29
Tablo 3.5 :Agregaların fiziksel özellikleri	30
Tablo 3.6 :İnce beyaz ve sarı kum elek analizi sonuçları	30
Tablo 3.7 :Agregaların elek analizi sonuçları.....	30
Tablo 3.8 :Beyaz ve sarı ince kum özgül ağırlıkları (g/cm ³).....	31
Tablo 3.9 :Kullanılan süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri.....	31
Tablo 3.10 :1 m ³ için teorik beton bileşimleri ve özellikleri	34
Tablo 4.1 :1m ³ betondaki gerçek miktarlar	37
Tablo 4.2 :Çökme-yayılma testi sonuçları	38
Tablo 4.3 :Kısıtlanmış yayılma testi sonuçları	40
Tablo 4.4 :V- funnel test sonuçları	42
Tablo 4.5 :U-box test sonuçları	44
Tablo 4.6 :Silindir basınç deneyi sonuçları	50
Tablo 4.7 :Yarma-çekme deney sonuçları.....	53
Tablo 4.8 :Kırılma Enerjileri, net eğilme dayanımları ve karakteristik boy değerleri	54

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	:Çökme-Yayılma Testi Deney Düzeneği .	14
Şekil 2.2	:U-Kutusu Deney Düzeneği	15
Şekil 2.3	:V- Hunisi Deney Düzeneği	16
Şekil 2.4	:Uçucu kül parçacıkları	18
Şekil 2.5	:Yüksek fırın curufu tanecikleri	18
Şekil 2-7	:Çimento tanesi ve silis dumanı etkileşimi	21
Şekil 3.1	:Beton karışımının granülometrisi ve referans eğrileri	33
Şekil 3.2	:Numune Şekil ve Boyutları	35
Şekil 3.3	:Numunelerin alındığı kalıplar	36
Şekil 4.1	:Çökme yayılma deney uygulaması	38
Şekil 4.2	:Numunelerin Çökme-Yayılma Testi T50 süreleri	39
Şekil 4.3	:Kısıtlanmış yayılma deney düzeneği	40
Şekil 4.4	:Kısıtlanmış yayılma testi deney sonuçları	41
Şekil 4.5	:V - funnel test aleti	42
Şekil 4.6	:Lifsiz V-Funnel testi deney sonuçları	43
Şekil 4.7	:Lifli V-Funnel testi deney sonuçları	43
Şekil 4.8	:U-box deney aleti	44
Şekil 4.9	:Lifli-Lifsiz U-Box durma süreleri	45
Şekil 4.10	:Lifli-Lifsiz h1/h2 oranları	45
Şekil 4.11	:RILEM kırılma enerjisi deney düzeneği	47
Şekil 4.12	:Yük-Sehim grafiği ve kırılma enerjisi	48
Şekil 4.13	:Lifsiz-Lifli basınç dayanımı grafiği	51
Şekil 4.14	:Lifsiz-Lifli basınç elastisite modülü grafiği	52
Şekil 4.16	:Yüksek dayanımlı lif içeren ve lifsiz numunelerde eğilme-çekme ve yarma çekme dayanımları	55
Şekil 4.17	:Lifsiz numunelerde özgül kırılma enerjisi grafiği	57
Şekil 4.18	:Lifsiz-Lifli özgül kırılma enerjisi grafiği	58
Şekil A.1	:N0-0,24 kodlu numunelerin yük deplasman ilişkisi	66
Şekil A.2	:N0-0,31 kodlu numunelerin yük deplasman ilişkisi	66
Şekil A.3	:N0-0,38 kodlu numunelerin yük deplasman ilişkisi	67
Şekil A.4	:N0-0,45 kodlu numunelerin yük deplasman ilişkisi	67
Şekil A.5	:N0-0,63 kodlu numunelerin yük deplasman ilişkisi	68
Şekil A.6	:N2-0,24 kodlu numunelerin yük deplasman ilişkisi	68
Şekil A.7	:N2-031 kodlu numunelerin yük deplasman ilişkisi	69
Şekil A.8	:N2-038 kodlu numunelerin yük deplasman ilişkisi	69
Şekil A.9	:N2-0,45 kodlu numunelerin yük deplasman ilişkisi	70
Şekil A.10	:N2-0,63 kodlu numunelerin yük deplasman ilişkisi	70
Şekil A.11	:0,24 su / çimento oranlı numunelerin ortalama yük deplasman ilişkisi	71
Şekil A.12	:0,31 su / çimento oranlı numunelerin ortalama yük deplasman ilişkisi	71

Şekil A.13 : su / çimento oranlı numunelerin ortalama yük	
deplasman ilişkisi	72
Şekil A.14 : 0,45 su / çimento oranlı numunelerin ortalama yük	
deplasman ilişkisi.....	72
Şekil A.15 : 0,63 su / çimento oranlı numunelerin ortalama yük	
deplasman ilişkisi.....	73

KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN ÇELİK LİF DONATILI BETONLARIN MEKANİK DAVRANIŞINA SU/İNCE MALZEME ORANI ve LİF DAYANIMININ ETKİSİ

ÖZET

Günümüzde ihtiyaçlara cevap verebilmek için uzun yıllardır kullanılan normal betonların yanında özel amaçlar doğrultusunda tasarlanan yüksek performanslı özel betonlar da geniş kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Performansın anlamı sadece dayanımda artış değil, yapının hizmet süresi boyunca dış etkiler altında dayanım ve diğer işlevlerini koruyabilmesi özelliğidir. Yüksek performanslı beton (YPB) normal betonda kullanılan ana hammaddelere ek olarak çeşitli oranlarda mineral ve kimyasal katkıların eklenmesiyle yüksek oranda işlenebilirlik, durabilite, dayanım ve bunlara ek olarak ayrıca belirtilen spesifik özellikleri taşıyan beton olarak tanımlanmaktadır.

Yüksek performanslı beton özellikle boşluksuz ve geçirimsizlik özelliğiyle durabilite koşulunu da sağlayan yüksek dayanımlı betondur. Betonda kalıcılık büyük ölçüde geçirimsizliğe bağlıdır. Betonun geçirimsizliğindeki en büyük etkenler de dışa açık ve sürekli boşluklar ve çatlaklardır. Akıcı kıvamı sayesinde herhangi bir vibrasyon gerektirmeden kendi ağırlığı altında hareket edebilen ve döküldüğü kalıbı dolduran, yeni jenerasyon süper akışkanlaştırıcı katkıların çeşitli oranlarda beton karışımına eklenmesiyle oluşturulan ve yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen beton olarak bilinen betonlar en sık donatılı bölgelerde ve en dar kesitlerde bile ayrılmadan kendi kendine yayılarak yerleşmesi, zor ve karmaşık kalıplarda bile yüksek akıcılığı ve boşluk doldurma yeteneği sayesinde ilerlemesi, işçilikten ve zamandan tasarruf sağlaması ile gittikçe yaygın kullanım alanı bulmaktadır.

Bu tez çalışmasında sabit hacimsel 0,52 su / pudra oranına sahip 5 farklı karışım üretilmiştir. Bu karışımlarda farklı su / çimento oranları mevcut olup, çimento ile benzer inceliğe sahip olan silis unu çimento ile hacimce ikame edilerek kullanılmıştır. Üretimlerde su / çimento oranları 0,24 – 0,31 – 0,38- 0,45 – 0,63'tür. Karışımlarda azalan çimento miktarına karşılık aynı hacimde çimento inceliğinde öğütülmüş silis unu eklenmiş, böylece toplam ince malzeme hacminin sabit kalması sağlanmıştır. Karışımlarda, toplam su miktarının 200 kg/m³ değerinde sabit olmasından dolayı su/ince malzeme oranı sabit kalırken azalan çimento miktarı ile birlikte su/çimento oranı artırılmıştır. Daha sonra benzer karışımlar tekrar üretilmiş ve bu KYB' lere çekme dayanımı 2250 MPa olan çelik lifler hacimce %1 oranında eklenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda su/ince malzeme oranı sabitken artan su/çimento miktarının yalın ve lifli betonların gerek taze haldeki özelliklerini ve gerekse sertleşmiş haldeki mekanik davranışlarını nasıl etkilediği araştırılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda 0,52 sabit hacimsel su/pudra oranlı lifsiz karışımlarda su/çimento miktarının 0,24'den 0,38 değerine artmasına ve çimento dozajının 833 kg/m³ den 526 kg/m³ değerine azalmasına karşın basınç mukavemetlerinde belirgin bir düşüş gözlenmemiştir. Lif ilavesinin dayanımdan çok yutulan enerjiyi arttırdığı görülmüştür. lif ilavesi genel anlamda işlenebilirliği olumsuz etkilememektedir.

THE EFFECT OF WATER/POWDER MATERIAL RATIO AND FIBER STRENGTH ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF FIBER REINFORCED SELF-COMPACTING CONCRETE

SUMMARY

Apart from the normal concrete to fulfill the necessities, specially designed high performance concrete has started to find a place for use towards special application purposes. Performance does not only mean increase in strength rather it also encompasses the quality of preserving the strength and other functions under external effects during the service life of the structure. High performance concrete can be defined as a concrete with high workability, durability and strength along with predetermined specific characteristics due to addition of different mineral and chemical additives apart from the major ingredients of normal concrete.

High performance concrete provides durability with its specific properties of compaction and impermeability. The stability of concrete is mainly dependent on its impermeability. The major factors affecting the impermeability of concrete are the continuous external cavities and cracks. With the addition of new generation super-plasticizers in different ratios, high performance self compacting concrete can move under their weight without needing any vibration and can fill the mould where they are poured due to their consistency. It is mostly used in regions of high reinforcement and narrow cross sections where it settles down due to self expansion. Due to its properties of high flow and filling capability it can be poured in the most complex and difficult moulds. Its provision of time and labor saving has won it an increasingly common application area.

Under the scope of this thesis five different mixtures of constant water/powder volumetric ratio of 0.52 have been prepared. Along with different water/cement ratios in these mixtures silica powder with fineness equal to that of cement has been added volumetrically. The water cement ratios in the preparations were 0, 24 – 0, 31 – 0, 38- 0, 45 – 0, 63. The decreasing amount of cement in the mixtures has been complemented by addition of ground silica powder thus keeping the volume of fine matter constant in the mixtures. The total water content of 200 kg/m³ has been constant thus providing constant water/fine material ratio but increasing water/cement ratio because of decrease in cement amount. Later on these mixtures were prepared again and 2250 MPa tensile strength steel fibers were added to these high performance concretes in a 1% volumetric ratio. By keeping constant water to fine aggregate ratio, the effects of increasing water cement ratio on the behavior of fresh and hardened plain and reinforced concrete have been investigated in the experiments.

Experiments showed that, with constant water/powder ratio of 0,52, the compressive strength of concretes with and without steel fibers did not change significantly even though the water/cement ratio was increased from 0,24 to 0,38 and the cement dosage was decreased from 833 kg/m³ and 526 kg/m³. Addition of steel fibers affected the ductility of concrete rather than the strength and the fresh concrete

properties. Generally, addition of steel fibers affected workability of concrete negatively

1. GİRİŞ

Akıcı kıvamı sayesinde kendi ağırlığı altında hareket edebilen vibrasyon gerektirmeden döküldüğü kalıbı dolduran kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB) ilk kez 1980'li yıllarda Japonya'da suda ayrılmayan beton üretimi amacı ile geliştirilmiştir.[1] KYB sayesinde kompleks yapıdaki dar kesitli kalıplarda, sık donatılı bölgelerde herhangi bir segregasyon problemi yaşanmadan yerleştirme imkanı doğmuştur. Bu sayede de boşluksuz, geçirimsizliği düşük ve dolayısıyla durabilitesi yüksek beton uygulamaları artmıştır. Kendiliğinden yerleşen beton kullanımı ayrıca vibratör kullanılmaması yüzünden nitelikli personel tasarrufu, enerji tasarrufu, döküm ve inşa hızının artması, gürültü probleminin azaltılması gibi pek çok avantajı da beraberinde getirmektedir.[1]

KYB üretiminde önemli etkenlerin başında betondaki mikrofiller kullanımı gelmektedir. Silis unu, uçucu kül, silis dumanı, kireçtaşı pudrası, yüksek fırın curufu gibi puzolanik yada inert mikrofiller malzemeler iri taneler arası sürtünmeyi azaltarak akıcılığı arttırmakta aynı zamanda boşluk dolduruculuk etkileri ile yoğunluğu ve geçirimsizliliği arttırırken mukavemete de önemli katkı sağlamaktadırlar. Bu malzemeler betonun hem reolojik özelliklerini hem de dayanımlarını olumlu yönde etkilemektedir.[2,3,4]

Betonda akıcılık su miktarının artırılmasıyla sağlandığı takdirde segregasyon problemi açığa çıkmaktadır. Bunun için KYB üretiminde kullanılan yüksek oranda yeni nesil süper-akışkanlaştırıcı katkıları, çimento tanelerini yayararak taneler arasındaki sürtünmeyi azaltıp su miktarında azalmayla birlikte mukavemetten ödün vermeden akıcılık ve vizkositenin korunmasını ve segregasyonun önlenmesini sağlamaktadırlar. [5]

Çelik lifler betonda mekanik özellikleri iyileştirmek amacı ile kullanılmaktadır. Çelik lifler matriste oluşan çatlaklar üzerinde köprü vazifesi görmekte ve çatlak ilerlemesini yavaşlatmaktadır. Oluşan çatlakların ani olarak yayılmasını engelleyerek de betonun sünek davranış göstermesini, dolayısıyla enerji yutma kapasitelerini

arttırmaktadır. Çelik liflerden beklenen performans lif miktarı, lif boyu, lif narinlik oranı ve lif geometrisine bağlıdır. [5,6]

Bu tez çalışmasında sabit hacimsel 0,52 su / pudra oranına sahip 5 farklı karışım üretilmiştir. Bu karışımlarda farklı su / çimento oranları mevcut olup, çimento ile benzer inceliğe sahip olan silis unu çimento ile hacimce ikame edilerek kullanılmıştır. Üretimlerde su / çimento oranları 0,24 – 0,31 – 0,38- 0,45 – 0,63’ tür. Karışımlarda azalan çimento miktarına karşılık aynı hacimde çimento inceliğinde öğütülmüş silis unu eklenmiş, böylece toplam ince malzeme hacminin sabit kalması sağlanmıştır. Karışımlarda, toplam su miktarının 200 kg/m³ değerinde tutulmuş olmasından dolayı su/ince malzeme oranı sabit kalırken azalan çimento miktarı ile birlikte su/çimento oranı arttırılmıştır. Daha sonra çekme dayanımı 2250 MPa olan çelik lifler hacimce %1 oranında eklenerek aynı karışımlar tekrar üretilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda su/ince malzeme oranı sabitken, artan su / çimento miktarının ve kullanılan çelik liflerin betonun reolojik özelliklerini ve sertleşmiş haldeki mekanik davranışlarını nasıl etkilediği araştırılmıştır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Beton; çimento, agrega, su ve gerektiğinde katkı maddelerinden oluşan, oranları belirli esaslara göre ayarlanan, istenen şekil ve boyutta kalıplar içine boşluksuz olarak yerleştirmek ve uygun bakım koşulları altında sertleştirmek yolu ile elde edilen kompozit bir malzemedir.

Eski çağlardan itibaren insanoğlu taşları birbiri üzerine dizerek basit yapılar oluşturmaya başlamıştır. Ancak bu taşların bir arada tutulması ihtiyacı bağlayıcı maddelerin araştırılmasını teşvik etmiştir. Daha neolitik çağlarda bu tarz çalışmaların yapıldığı bilinmektedir. Kalkerli malzemelerin kullanılması alçıtaşı yada jipsin ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 180^0 C civarında pişirilerek toz malzemeye dönüşmesiyle elde edilen alçı ile başlar. Pek çok bilim adamı, Mısır piramitlerinden Keops'un yapımında alçının bulunduğu harçların kullanıldığını savunmaktadırlar. Diğer bir bağlayıcı da insanoğlunun çok uzun süre kullandığı kireçtir. Kireçtaşının (CaCO_3) $900\text{-}1000^0 \text{ C}$ civarında yakılması ile sönmemiş kireç (CaO) oluşur. CaO ise su ile birleşerek sönmüş kireci (Ca(OH)_2) açığa çıkarmaktadır. Sönmüş kireç karbonatlaşma ile su kaybederek tekrar CaCO_3 oluşur. Eski Yunanlı ve Romalıların kireci bağlayıcı madde olarak kullandıkları bilinmektedir. Yine eski Yunanlı ve Romalılar Avrupa'daki çeşitli volkanik aktiviteler sonucu oluşmuş, su içinde priz yapabilen tüfleri ilk doğal puzolan olarak kullanmışlardır. Puzolan ismi de Romalıların Pozzuoli kasabasının toprağını puzolan olarak kullanmaları sonucu ortaya çıkmıştır. Aynı şekilde pişmiş kilin öğütülerek kireçle karıştırılması ile elde edilen 'Horasan harcı' da benzer özellikler taşır. Yukarıda da bahsedildiği gibi kireçle beraber sulu ortamda bağlayıcılık özelliği kazanan puzolanik malzemeler SiO_2 ve belirli miktarda Al_2O_3 içerirler. [7,8,9]

Beton teknolojisinde asıl gelişmeler 1800'lü yılların başında James Parker, Vicat, James Frost ve sonuçta da 1824 yılında Portland çimentosunun patentini alan Joseph Aspdin sayesinde başlamıştır. Johnson ise 1835'te pişirme sıcaklığını 1400^0 C derecelere çıkarılarak efektif çimento üretimini sağlayan kişi olmuştur. Buna göre günümüz Portland çimentosu kalker, kil, demir oksit karışımının $1400\text{-}1500^0 \text{ C}$ 'ye

kadar döner fırınlarda ısıtılarak ceviz büyüklüğünde klinkerler oluşturulması ve % 3-4 oranında priz geciktirici olarak alçı taşı eklendikten sonra çok ince şekilde öğütülmesi sonucu meydana gelir. Geleneksel Portland çimentosuna ek olarak çeşitli miktarlarda yüksek fırın curufu, uçucu kül, silis dumanı gibi puzolanik malzemeler eklenerek katkılı çimentolar da üretilmektedir. [7,9]

2.1. Yüksek Performanslı Betonlar

Betonarme yapılar genellikle yüz yılın ötesinde servis verebilecek şekilde düşünülerek projelendirilirler. Aynı zamanda yapının ömrü içerisinde iç ve dış etkilerle bozulma nedenlerinin bilinmesi ve bunlara karşı gereken önlemlerin alınması gerekmektedir. Burada betonun kalıcılığı önemli rol oynamaktadır. Üretilen betonlardan ortak beklenti işlenebilir olmaları, hedeflenen dayanıma sahip olmaları, iç ve dış etkilere karşı dayanıklı (durabil) olmalarıdır. Durabilite yani kalıcılık, hizmet süresi boyunca bir yapının içinde bulunacağı dış etkiler altında dayanım ve diğer işlevlerini koruyabilmesi özelliğidir. [7]

Betonarme yapıların servis ömürlerinin yüz yılı aşabilmesi sadece taşıyıcı sistemin doğru projelendirilmesi ile mümkün olamamaktadır. Aynı zamanda yapıya uzun dönemde etkiyecek çevre şartlarının bilinmesi ve malzeme seçimlerinin buna göre yapılması ile kalıcılık sağlanabilmektedir. Bu yüzden betonun tasarımında dayanım yanında durabiliteye göre tasarım da ön plana çıkmaktadır. Yüksek performanslı beton özellikle boşluksuz ve geçirimsizlik özelliğiyle durabilite koşulunu da sağlayan yüksek dayanımlı betondur. Yüksek performanslı beton (YPB), normal betonda kullanılan ana hammaddelere ek olarak çeşitli oranlarda mineral ve kimyasal katkıların eklenmesiyle proje de istenen işlenebilirlik, durabilite, dayanım ve bunlara ek olarak ayrıca belirtilen spesifik özellikleri taşıyan beton olarak tanımlanmaktadır. Yüksek performans kriterleri geleneksel betonların karşılayamadığı özellikler ile segregasyon problemi yaşanmadan yerleştirme ve sıkıştırma, uzun dönemde istenen dayanımın korunması ve dış etkilere dayanıklılık, erken yaşta istenen mukavemetin sağlanabilmesi, tokluk ve hacimsel sabitlik olarak sıralanabilir. [3, 10]

Betonda kalıcılık büyük ölçüde geçirimsizliğe bağlıdır. Betonun geçirimsizliğindeki en büyük etkenler de dışa açık ve sürekli boşluklar ve çatlaklardır. Betondaki bu boşluklar; reaksiyona girmeyen fazla suyun terleme-buharlaşma olayları, yetersiz sıkıştırma, yetersiz kür ve benzeri nedenlerle oluşur. Durabilitede en önemli etken

boşluk oranı ve yapısı olsa da sülfat etkisine karşı çimento cinsi ve içeriği, alkali agrega reaksiyonunda agreganın yapısı, donma-çözülme olayında beton içerisindeki hava miktarı gibi diğer değişkenlerde göz önünde tutulmalıdır.

Betonun durabiliteye göre tasarımı maksimum su/çimento oranı ile minimum çimento dozajına göre yapılmaktadır. Çimento, betonda bağlayıcılık özelliği yanında dolduruculuk özelliği ve işlenebilirliğe katkısıyla da önemli rol oynamaktadır. Betonun mukavemet ve geçirimsizliğini belirleyen en önemli etkenin su/çimento oranı olduğu doğrudur da bunların yanında diğer malzeme özelliklerinin göz ardı edilmemesi gerekir. Genelde erken dayanım sağlamak ve böylece erken kalıp sökmek ve inşaat hızını arttırmak için çimentonun inceliği arttırılırken bileşimdeki C_3S oranı da fazlaştırılmaktadır. Böylece çok daha düşük çimento dozajlarıyla istenen mukavemetler sağlanırken, beton 28 günlük süre sonunda nihai dayanımının büyük kısmını almaktadır. Geleneksel malzemelerle betonda çimento dozajı 250 kg/m^3 su/çimento dozajı 0,6 mertebelerinde 35 MPa dayanıma ulaşmak mümkün olabilmiştir. Bu dayanım açısından olumlu bir durum gibi görünürken bu betonların boşluk oranının çok yüksek olduğu ve geçirimsizliğin düşük olmasıyla da durabilitesinin yetersiz kaldığı görülmüştür. Tablo 2.1’ de çimento bileşenlerinin çeşitli özelliklere katkısı gösterilmiştir. C_3S ve C_2S hidratasyonda mukavemeti sağlayan ana unsurlardır. C_3S daha hızlı reaksiyona girer ve C_2S ’e oranla daha yüksek ısı ve Ca(OH)_2 açığa çıkarır. Ca(OH)_2 bileşeni suda çözünür ve boşluk oluşumuna neden olur. Bu da C-S-H sürekliliğini bozarak boşluklu bir yapı oluşmasına ve geçirimsizliğin artmasına yol açar. C_3S erken yaş dayanımını arttırırken, betonun uzun dönem dayanımı nispeten düşük kalmaktadır. Ayrıca çimento inceliği yükseldikçe ve C_3S oranı arttıkça hidratasyon ısısı artacak ve özellikle kütle betonlarında yüksek hidratasyon ısısı soğuma esnasında iç ve dış kesimlerde büyük farklar oluşmasına ve sonuçta çatlamlar meydana gelmesine sebep olacaktır. Yüksek performanslı betonlarda yüksek işlenebilirlik için, bağlayıcı olarak ve mikro boşlukları doldurarak da mukavemeti ve durabiliteyi arttırmak amacıyla yalnızca yüksek miktarda çimento kullanımı ekonomik değildir. Ayrıca bir ton çimento üretimi için yaklaşık 5.5 GJ enerji harcanırken, bunun sonucunda yaklaşık 1 ton CO_2 gazı açığa çıkmaktadır. Yüksek orandaki CO_2 gazının sera gazı etkisiyle küresel ısınmaya neden olduğu bilinmektedir. Burada çimentonun kullanımı hem beton tekniği ve maliyet hem de çevrenin korunması ve kaynakların optimum

kullanımı bakımından önemlidir. Bunun için çimento yanında reaktif veya inert malzemeler kullanılması çeşitli avantajlar sağlayabilmektedir. [7,10,11,12]

Tablo 2.1: Çimento bileşenleri reaksiyon hızı, açığa çıkan ısı ve nihai dayanıma katkıları [10]

Çimento bileşeni	Reaksiyon Hızı	Hidratasyon ısısı	Nihai dayanım katkısı
Trikalsiyum Silikat (C_3S)	Orta	Orta	İyi
Dikalsiyum Silikat (C_2S)	Yavaş	Düşük	İyi
Trikalsiyum Aluminat (C_3A)	Hızlı	Yüksek	Zayıf
Tetrakalsiyum Aluminoferrat (C_4AF)	Yavaş	Düşük	Zayıf

Günümüzde ihtiyaçlara cevap verebilmek için uzun yıllardır kullanılan normal betonların yanında özel amaçlar doğrultusunda tasarlanan yüksek performanslı özel betonlar da geniş kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Bu özel betonlar da kimi zaman dayanım ön plana çıkarken kimi zamanda yüksek işlenebilirlik ve kendiliğinden yerleşebilme, yeterli süneklik ve tokluğun sağlanması, donatı korozyonunu önleme, asit etkisine dayanıklılık, donma-çözülme ve aşınma gibi fiziksel etkilere karşı koyabilme gücü ön plana çıkmaktadır. Mekanik ve fiziksel özelliklerin çok çeşitli olması ve betondan farklı beklentiler net bir sınıflandırma sisteminin oluşmasını zorlaştırmaktadır.

Basınç dayanımlarına göre betonlar;

- Düşük dayanımlı betonlar: Basınç dayanımları 20 MPa' dan düşük olanlar,
- Normal dayanımlı betonlar: Basınç dayanımları 20-40 MPa arası olanlar,
- Yüksek dayanımlı betonlar: Basınç dayanımları 40 MPa'dan yüksek olanlar şeklinde sınıflandırılabilir. [13]

Ancak gelişen beton teknolojisi ile yüksek performans tanımı ve sınırları hızla değişmektedir. Dayanımları 500-600 MPa bulan özel betonlar üretilmektedir. Betonların sınıflandırılmasında basınç dayanımı tek şart değildir. Kullanılan malzeme tipi ve miktarına, ayrıca kullanım alanlarına göre de çeşitli özel betonlar mevcuttur.

Günümüzde hazır beton sektöründe üretilen genel amaçlı normal betonlardan da beklentiler artmış, nitelikli akışkanlaştırıcılar ve mikrofiller malzemeler, fiberler konvansiyonel uygulamalarda da kullanılır olmuştur. Bu yönelim de yüksek dayanım ve yüksek performans tanımlarının değişime açık olduğunun göstergesidir.

Normal betonlar ekonomik olmaları, üretimlerindeki kolaylık, içerdiği malzemelere kolay ulaşım, özel şartlar gerektirmeyen her ortamda kullanılabilir olmaları, hakkında daha fazla bilgi ve tecrübe bulunması gibi pek çok nedenlerle günümüzde ve muhtemelen gelecekte de geniş bir kullanım alanı bulunan genel amaçlı betonlardır. Basınç dayanımları 20-40 MPa arasında değişmektedir.

Oluşan ihtiyaca göre normal betonlara kıyasla dayanım, işlenebilirlik, süneklik, yoğunluk, kimyasal ve fiziksel dış etkilere dayanıklılık gibi niteliklerinin geliştirilmesiyle ortaya çıkmış özel betonlar mevcuttur. Normal betonlarda kullanılan su, çimento, agrega gibi malzemelere ek olarak puzolanik malzemeler, boşluk doldurucu mikrofiller malzemeler, çeşitli amaçlar için tasarlanmış kimyasal katkılar, fiberler bu yüksek performanslı özel betonların üretilmesinde kullanılmaktadır. [3]

Su, çimento, agrega gibi ana bileşenler tüm betonlardaki ortak malzemelerdir. Yüksek performanslı betonların üretiminde homojenlik ve işlenebilirliğin maksimum olması için iri agrega muhtevası ve en büyük dane çapı düşük tutulmaktadır. Maksimum dane boyutu 20 mm civarında tercih edilmektedir. Yüksek performanslı betonlarda kullanılan agregalar fiziksel ve kimyasal olarak yeterince dayanıklı olmalıdır ve sınırlayıcı faktör olmamalıdır. İri agrega oranındaki azalma ince malzeme miktarındaki artış ile karşılanmaktadır. Pudra olarak isimlendirilen ve dane boyutu 125 mikrondan (0,125 mm) küçük malzemelerin kullanımını taze ve sertleşmiş halde beton özelliklerini geliştirmektedir. [2,3,10]

Yüksek performanslı betonların ortaya çıkmasında;

- Yeni nesil süper-akışkanlaştırıcılar ile işlenebilirlikte kayıp olmadan mukavemetlerde artış sağlanabileceği,
- Reaktif olan yada olmayan silis dumanı, uçucu kül, kuartz tozu, yüksek fırın curufu gibi mikrofiller malzemelerin mukavemet, geçirimsizlik ve durabiliteye katkılarının anlaşılması,
- Çeşitli fiberlerin kompozitlerde kullanılarak dayanım, süneklik, tokluk gibi özellikleri iyileştirdiğinin ispatlanması etkili olmuştur. [14]

Özellikle işlenebilirlik, basınç ve eğilme dayanımları, enerji yutma kapasiteleri ve süneklik şartları göz önünde tutularak üretilen yüksek performanslı kompozitlerin başlıcaları; lif donatılı kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB), yoğunlaştırılmış çimento ve ultra ince tane içeren malzemeler (DSP), büyük boşluklardan arındırılmış (MDF) çimento hamuru, reaktif pudra betonu (RPC), çimento hamuru enjekte edilmiş lif donatılı beton (SIFCON)'dur.

2.1.1. Homojen Dağılı Ultra İncelikteki Taneler İçeren Yoğunlaştırılmış Sistemler (DSP)

DSP (Densified Small Particles) kompozitler ilk olarak Danimarka'daki Aalborg Portland çimento fabrikası tarafından üretilmiştir. Çimento taneleri arasındaki boşlukları dolduran yüksek inceliğe sahip silis dumanı, çimento ve silis dumanının topaklanmasını önleyen yüksek miktarda süper-akışkanlaştırıcı, agrega olarak da basınç dayanımını 270 MPa'ya kadar ulaştırabilen 16 mm çapta kalsine olmuş boksit yada basınç dayanımını 130 MPa'ya ulaştıran granit kullanılmaktadır. [4,10]

2.1.2. Büyük Boşluklardan Arındırılmış (MDF) Çimento Hamuru

1980'li yıllarda İngiliz araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. (Imperial Chemical Industries ICI). MDF (Macro Defect Free) Portland veya Yüksek Alüminli çimentoların, karıştırma ve döküm esnasında herhangi bir topaklanma oluşmaması için suda çözünen bir polimer ile birleştirilmesi ile oluşturulan kompozitlerdir. Yerleşme ve sertleşme sırasında çimento hidrate olurken, polimerler dehidrate olarak çimento taneciklerinin hareketini kolaylaştırırlar. Böylece boşluk oranı minimuma indirilerek yoğunluk ve dayanım arttırılmaktadır. Basınç dayanımları 200 MPa civarındadır. [4]

2.1.3. Reaktif Pudra Betonu (RPC)

Reaktif Pudra Betonu 1990'lı yılların başlarında Fransa'da geliştirilmiştir. Su/çimento oranı 0,15 olacak şekilde çimento, kum, silis dumanı, çelik lif ve süper-akışkanlaştırıcıların kullanılmasıyla üretilirler. Kum olarak genelde öğütülmüş kuartz tozu kullanılmaktadır. Reaktiviteyi arttırmak için üretimin ardından ısıtma işlemi tabi tutulurlar. Su/çimento oranının çok düşük olmasına rağmen, kullanılan süper-akışkanlaştırıcı miktarının önemli ölçüde arttırılması ile karıştırma, dökme ve vibrasyon işlemleri normal betonlarda olduğu gibi yapılabilir. Bu betonlar iri

agrega bulundurmaz ve maksimum dane çapı 0,3 mm seviyesindedir. Çelik lif oranı özel istisnalar dışında çimento hacminin %5'i kadardır. Karışımında ve üretiminde özel prensipleri olan bu malzeme çeliğin alternatifi olabilecek bir malzemedir. Üstün fiziksel ve mekanik özellikleri nedeni ile askeri yapılarda ve nükleer atıkların saklanması için kullanılabilirler. Basınç dayanımları 200 ile 800 MPa, çekme dayanımları 25 ile 150 MPa arasında bir değer alırken, kırılma enerjileri 30000 - 40000 J/m²'ye ulaşabilmektedir. [2, 4]

2.1.4. Çimento hamuru enjekte edilmiş lif donatılı beton (SIFCON)

SIFCON (Slurry Infiltrated Fibered Concrete) hacmen % 20'ye varan oranda çelik tel içeren sünek bir betondur. Kullanılan diğer malzemeler su, çimento, süper-akışkanlaştırıcı, ince kum ve bunlara ek olarak silis dumanı yada uçucu küldür. SIFCON uygulamalarında lifler önce yerleştirilir, daha sonra hamur üste dökülerek vibrasyon uygulanır. Lif oranını artması ile süneklik önemli derece de artmakta, kırılma enerjileri normal betonlarla karşılaştırıldığında 1300 kata kadar çıkmaktadır. Performansları kullanılan lif oranına, lifin çap-boy-şekil gibi fiziksel özelliklerine ve kalıptaki yönelmeleri ile vibrasyonun süresine bağlıdır. SIFCON sismik ve darbe etkilerine mahsur kalacak yapılarla birlikte nükleer santrallerde radyasyondan koruyucu olarak kullanılabildiği gibi yüksek binalarda da kullanılabilir. [4,14]

2.1.5. Kendiliğinden yerleşen çelik lifli betonlar

Betonun yapı malzemesi olarak artan önemi ile birlikte yapı malzemesi bilimiyle uğraşan bilim adamları beton bileşenlerinin ve bir bütün olarak betonun daha iyi bir performans göstermesi için çok sayıda araştırma yapmakta, gerek betonun ana bileşen miktarlarının değişimi gerek çeşitli katkı maddelerinin eklenmesiyle farklı özelliklerde ve farklı ihtiyaçlara cevap veren beton türlerinin üzerinde çalışmaktadırlar. Klasik betonlar genel olarak su, çimento ve agregadan oluşan yapı elemanlarıdır. Bunlara çeşitli miktar ve yapılarda kimyasal ve mineral katkıların da eklenmesiyle çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere özel beton tipleri üretilmektedir.[15] Bu beton tiplerinden biri de akıcı kıvamı sayesinde herhangi bir vibrasyon gerektirmeden kendi ağırlığı altında hareket edebilen ve döküldüğü kalıbı dolduran, akışın yeni jenerasyon süper akışkanlaştırıcı katkıların çeşitli oranlarda beton karışımına eklenmesiyle sağlandığı yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen beton (self compacting concrete SCC) olarak bilinen betonlardır.[3]

Kendiliğinden yerleşen betonların bazı avantajları gürültü probleminin ortadan kalkması, kolay pompalanması, su/çimento oranının düşük olması, en sık donatılı bölgelerde ve en dar kesitlerde bile ayrışmadan kendi kendine yayılarak yerleşmesi, zor ve karmaşık kalıplarda yüksek akıcılığı ve boşluk doldurma yeteneği sayesinde ilerlemesi, işçilikten ve zamandan tasarruf sağlaması olarak sayılabilir. [16]

Özellikle ülkemizde yaşanan depremlerden sonra yapılarda dar kesitli yoğun donatılı perdelerin uygulaması yaygınlaşmış ve bu alanlarda vibratör kullanımı zorlaşmıştır. Vibratör uygulamasındaki bu zorluk inşaat sahalarında betona su ekleme tehlikesini arttırmaktadır. KYB bu yapılarda güvenilirlik ve yapısal performans anlamında da önem kazanmıştır.

Japonya’da, 1980’li yıllarda nitelikli eleman sayısında azalma, yapılarda kalıcılık şartlarının daha da ön plana çıkması ve daha kompleks yapılar üretilmeye başlaması ile yüksek performanslı beton ihtiyacının ortaya çıktığı fark edilmiştir. Betonun kalitesini malzeme, dizayn, kür gibi değişkenlerin yanında diğer önemli bir faktör olarak da nitelikli işçiler belirlemektedir. Ancak bu elemanların sayısının yıllar içinde yetersiz kalması ve dar, kompleks kesitlerde yerleştirme problemleri betonun yerleşme ve sıkıştırma işlemlerinin sorgulanmasına neden olmuştur. Bu problemlere karşı alınabilecek önlemlerden başında yerleşme ve sıkışma işlemlerinin herhangi bir dış etkene bağlı olmadan betonun kendi özellikleri ile sağlanmasıdır. Bu amaçla Japonya’da 1988 yılında piyasadaki mevcut malzemelerle KYB prototipi üretilmiştir. Ozawa ve Okamura bu beton tekniğini geliştirirken, iri agrega muhtevası ve maksimum dane çapını sınırlandırmayı, düşük su / pudra oranında çalışmayı ve süper-akışkanlaştırıcı kullanımını 3 temel faktör olarak kabul etmişlerdir. Durabilite şartları göz önüne alınarak geliştirilmiş kendiliğinden yerleşen betonlar ilk ortaya çıktığında KYB adı yerine “yüksek performanslı beton” olarak adlandırılmış ama aynı dönemde Profesör Aitein tarafından yüksek performans tanımının yüksek dayanım ve durabilite şartlarının ortak olarak sağlandığı betonlar olarak genelleştirilmesi ile yüksek performanslı betonların bir cinsi olarak “kendiliğinden yerleşen” veya “kendiliğinden sıkışan beton” olarak tanımlanmıştır. Ozawa ve Okamura tarafından tasarlanan bu beton taze halde iken kendiliğinden yerleşen özellik gösterirken, erken yaşlarda iç etkilere, serleştikten sonra da çevre şartlarına dayanıklı idi. Bu çalışma da elde edilen bulgular pek çok bilim adamının dikkatini çekmiş, bu konuda çok daha kapsamlı çalışmalar başlamıştır.[2,17] Bu betonlarda

kullanılan malzemeler genel kullanım amaçlı normal betonların ana bileşenleri ile benzer özellikler göstermekteyken, artık genel amaçlı kimi betonlarda da kullanılan uçucu kül, silis unu veya buna ek olarak silis dumanı gibi puzolanik yada inert mikrofiller malzemeler KYB'ların vazgeçilmez bileşenleridir. Bunların yanında KYB'larda yeni nesil süper-akışkanlaştırıcılar sayesinde taze beton yüksek oranda akışkanlık kazanmaktadır. [18]

Taze beton yerine yerleşirken iri agregaların beton içinde çarpışma ve sürtünmesi iç gerilmeleri arttırmakta bu da betonun akış enerjisini önemli şekilde düşürmektedir. Özellikle yoğun donatılı bölgelerde ve dar kesitlerde iri agregaların sürtünme ve çarpışması artmakta ve blokaj tehlikesi meydana gelmektedir. KYB üretiminde önemli etkenlerden bir tanesi betondaki mikrofiller kullanımıdır. Mikrofiller malzemelerin kullanılması ile birlikte iri agregalar arasındaki mesafe artmaktadır. Silis unu, silis dumanı, uçucu kül gibi mikrofiller malzemeler iri taneler arası sürtünmeyi azaltarak akıcılığı arttırmakta, viskoziteyi belli değerlerde tutarak ayrışma tehlikesini düşürmekte aynı zamanda boşluk dolduruculuk etkileri ile yoğunluğu ve geçirimsizliliği artırırken mukavemete de önemli katkı sağlamaktadırlar. Bu malzemeler betonun hem reolojik özelliklerini hem de dayanımlarını olumlu yönde etkilemektedir. Shi ve diğerlerinin yaptığı araştırmada çimentonun kısmi oranda silis dumanı ile yer değiştirdiği durumlarda akıcılığın arttığını ve silis dumanı ile süper-akışkanlaştırıcı kullanımının akışındaki homojenlik ve ayrışmanın önlenmesi için çifte etki sergilediği ortaya çıkmıştır. [16,17]

Özellikle yoğun donatılı bölgelerde betonun blokaj ve segregasyonunu engellemek için vizkozitenin de yüksek olması gerekmektedir. Ganma Üniversitesi'nde Profesör Hashimoto tarafından geliştirilen deneyde bağlayıcı olarak saydam bir polimer kullanılmış ve agregaların hareketleri incelenmiştir. Sonuçta dar kesitlerde akışın bloke olmasının nedeninin iri agreganın teması olduğu anlaşılmıştır. [17] Genel olarak kendiliğinden yerleşen betonun kararlılığına ve blokajına etki eden iri agrega hacmi ve agregada maksimum tane çapı düşük tutulurken iri agrega hacmindeki bu düşüş ince agrega ve mikrofiller malzeme muhtevastaki artış ile karşılanır. [18,19]

Geleneksel beton endüstrisinde mukavemet şartı göz önüne alındığından, su / çimento oranından yola çıkılarak karışım dizaynları yapılmaktadır. KYB'ların karışım dizayn yaklaşımları daha farklıdır. Ozawa ve Okamura hazır beton santralleri için hazırladıkları KYB karışım oranı dizaynına göre beton içindeki iri agrega

miktarı toplam katı hacminin % 50'si değerinde ve ince agregâ miktarı harç fazının % 40'ı değerinde sabitlenirken, pudra özeliğine bağılı olarak su/pudra oranının da hacimce 0.9–1.0 aralığında olacağını öngörmüşlerdir. Burada ince ve kaba agregâ oranları sabitlenerek değışken sayısı düşürölür ve süper-akışkanlaştırıcı dozajı, su / pudra oranının gerçek değeri kendiliğinden yerleşme özellikleri sağlanacak şekilde deneylerle deneme-yanılma metodu ile bulunmaktadır. Bu yaklaşıma göre su / pudra oranı bulunduğunda zaten su / çimento oranı istenen mukavemeti sağlayacak kadar düşük çıkmaktadır.Yani kendiliğinden yerleşen betonlar günümüzdeki sıradan yapılar için yeterli mukavemeti kolayca sağlamaktadır. [17]

EFNARC'ın (European Federation of National Trade Associations) tavsiye ettiğı dizayn da ise su / pudra oranı hacimce 0,8-1,1, toplam pudra dozajı 400-600 kg/m³, iri agregâ muhtevâsı karışım hacminin %28-38'i, 200 kg/m³'ten az su oranı ve geri kalan hacmi tamamlayacak miktarda ince malzeme kullanımını öngörülmektedir. [2]

Vibrasyon yapılmadığından kalıba daha kolay ve kısa zamanda yerleştiğı için işçilik, ekipman ve zaman açısından büyük üstünlükler sağlayan kendiliğinden yerleşen betonlar özel projeler de tercih edilen beton türü haline gelmiştir. Japonya' da Akashi-Kaikyo Köprüsü'nün ankrajı için şantiye sahası yanında kurulan bir tesiste hazırlanan kendiliğinden yerleşen beton 200 m'lik borularla sahaya taşınmış ve maksimum agregâ boyutu 40 mm olmasına ve beton 3 m yükseklikten dökölmesine rağmen herhangi bir segregasyon gözlemlenmemiştir. Bu yapının 2,5 senede bitirilmesi öngörülmüşken yapı 2 sene de tamamlanmıştır. Yine Japonya'da Osaka petrol şirketinin büyük gaz tankı duvarları inşasında kendiliğinden yerleşen beton kullanılması ile kalıp yükseklikleri arttırılarak kalıp sayısı 14'ten 10'a, işçi sayısı 150'den 50'ye, yapım süresi de 22 aydan 20 aya düşürölmüştür. [17]

Çimento esaslı kompozitlerin çekme dayanımları ve kırılma enerjileri düşük ve kırılmaları gevrekliir. Özellikle yüksek dayanımlı yalın betonların gevrekliğı oldukça yüksektir. Liflerin görevi gerilme altındaki matriste çatlak gelişimini engellemek ve geciktirmektir. Çelik lifler ouşan çatlakların hızlı ve kontrolsüz gelişimini kontrol altına alır ve ani göçme riskini ortadan kaldırır. Çatlak yayılmasını önemli bir şekilde kontrol eden lifler kendiliğinden yerleşen betonların mekanik özelliklerini ve uygulama alanlarını da genişletmektedir. Ancak lif takviyesi ile lifin miktarı, narinlik oranı, geometrisine bağılı olarak işlenebilirlik olumsuz yönde etkilenebilmektedir. Bu yüzden kendiliğinden yerleşen betonlarda lif kullanımı daha dikkatli dizayn yapılmasını zorunlu kılmaktadır. [4,20]

2.2. Kendiliğinden Yerleşen Çelik Lifli Betonların Taze Beton Özellikleri

Kendiliğinden yerleşen betonları diğer yüksek performanslı betonlardan ayıran başlıca etken taze betonun özelliğidir. KYB'ler taze haldeyken kendi ağırlığı ile deforme olma, doldurma, segregasyon direnci, dar kesitlerden ve sık donatılı bölgelerden geçiş ve düzgün yüzey sonlandırma yeteneği taşımalıdır. [3,21,22]

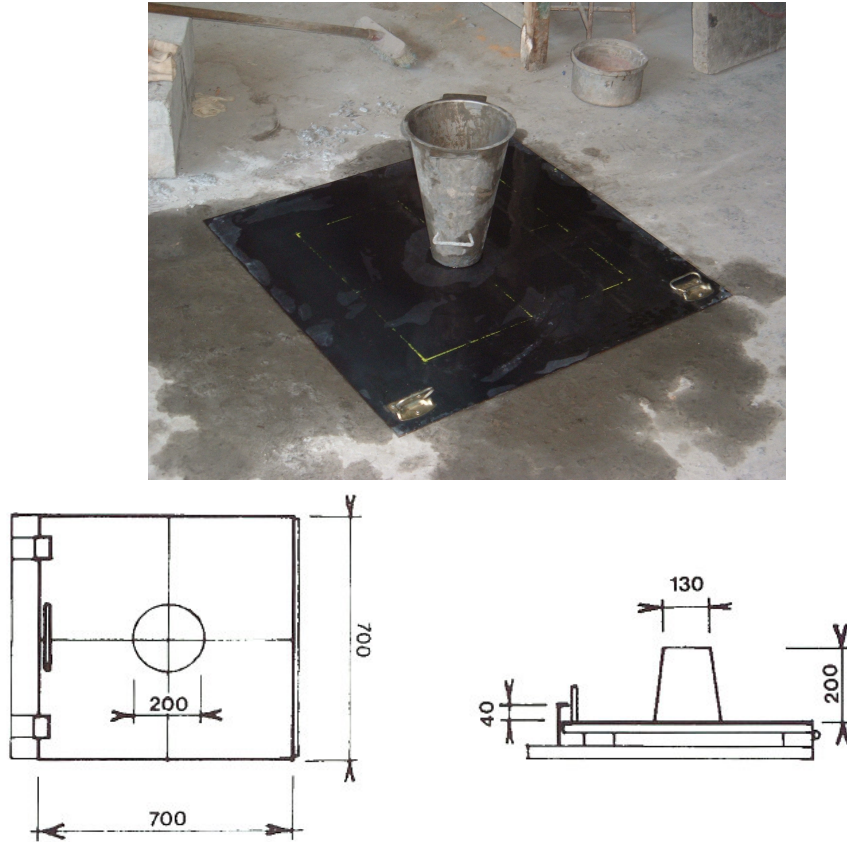
İdeal akışkan özelliğini tanımlamak üzere geliştirilen Newtonian modelinde kayma eşiği sıfırdır ve gerilme ile şekil değiştirme lineerdir. İçinde floküler malzemeler bulunan taze beton ise Bingham modeline uymaktadır. Bu yaklaşıma göre taze betonda akış belirli bir kayma eşiğini (τ_0) aşınca başlar ve gerilme ile deformasyon yine lineer olarak devam eder. Kendiliğinden yerleşebilmede amaç kayma eşiğini minimuma indirerek Newtonian modeline yaklaşımdır. Su eklenmesi kayma eşiğini düşürürken vizkoziteyi de azaltmaktadır. Ancak KYB'da doldurma yeteneği taze betonun deformasyon yeteneğine yani taneler arası sürtünmenin ve serbest suyun azlığına ve vizkozitenin yüksekliğine bağlıdır. Aynı şekilde serbest suyun azlığı, terlemenin önlenmesi ve ayrıca iri agrega miktarı ve maksimum dane çapının düşük tutulması ve gradasyonun sürekliliği ayrışmaya karşı direnci de sağlamaktadır. Geçiş yeteneği yine maksimum dane çapının ve iri agrega muhtevasının düşük tutulması ve vizkozitenin yüksek olması ile sağlanabilmektedir. [3 21,23]

İşlenebilirlik kavramı geleneksel betonda karıştırma ve yerleştirme işlemlerinin en az enerji ile yapılabilmesini ve bu esnada ayrışma ve boşluk oluşmamasını temsil eden bir terimdir. Betonun işlenebilirliği, beton üretildikten sonra ölçülebilen ilk özelliklerindendir ve beton hakkında uygulamaya yönelik pek çok fikir verir. İşlenebilirlik bir taze beton özelliği olup, betonun homojenliğini kaybetmeden karıştırılabilirliğini, yerleştirilmesini, sıkıştırılabilirliğini, pompalanabilirliğini ve akışkanlığını gösteren kolektif bir değerdir. Genel olarak KYB'lerin bu özelliklerini tanımlayan, işlenebilirlik özelliklerini ölçen ve çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilen pek çok deney yöntemi vardır. Çökme -yayılma deneyi, V-Hunisi Deneyi, U-Kutusu Deneyi, L-Kutusu Deneyi, Doldurma Kutusu deneyi, J-Ring Deneyi, Orimet Testi, Compaction Test (Sıkıştırma Deneyi) bunlardan bazılarıdır. [5,24] Bu çalışmada çökme- yayılma deneyi, U-Kutusu testi, V-Hunisi testi üzerinde durulmuştur.

2.2.1. Çökme- yayılma deneyi

İşlenebilirliğin ölçüldüğü en basit test çökme (slump) deneyidir. Bu test, basit olduğundan sahada yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Geleneksel betonun akıcılık ve yayılma yeteneklerinin belirlenmesinde kullanılan bu deney yöntemi, kendiliğinden yerleşen betonlar için de uygulanabilmektedir ancak burada çökme değil yayılma ölçülmektedir. Bu deney doldurma yeteneğini yani kendiliğinden yayılma ve deformasyon kabiliyetinin ölçüldüğü bir deney şeklidir. [24,25]

Şekil 2.1' de çökme-yayılma deney düzeneği gösterilmiştir. Yayılma tablasının yüzeyi nemlendirildikten sonra merkezine Abram's konisi düz yada ters olarak yerleştirilir ve koniye beton doldurulduktan sonra, koni tablaya dik olarak çekilir ve 50 cm çapındaki daireye yayılma süresi (T_{50}) belirlenir. Bu esnada betonda yayılma esnasında ayrışma olup olmadığı gözlemle incelenir. Daha sonra tabla üzerinde yayılma tamamlandığında birbirine dik iki yöndeki çap ölçülerek ortalaması alınır. Yayılma değeri için standart bir değer belirlenmemiş olup bu değerin 60 cm üzerinde olması gerektiği bildirilmiştir. [24,25]

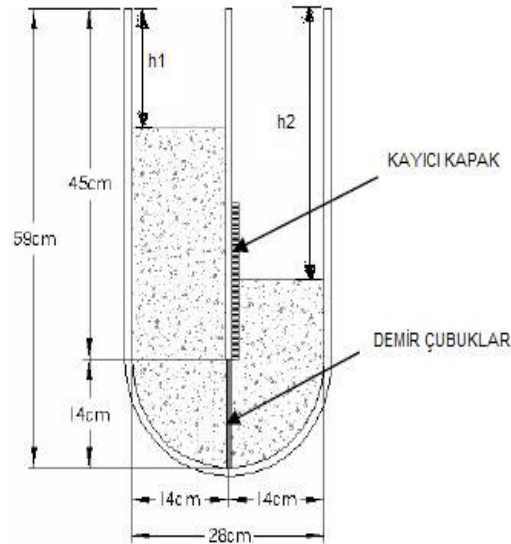


Şekil 2.1: Çökme-Yayılma Testi Deney Düzeneği [25]

2.2.2. U-Kutusu Testi

Japonya’da Taisei şirketinin ar-ge merkezinde geliştirilen U-box deneyi, taze betonun kendi ağırlığı altında şekil değiştirme, doldurma ve donatılar arasından geçme yeteneğinin birlikte ölçüldüğü bir deney yöntemidir. “U” şeklindeki düzenek, tabanda bir kapakla ikiye ayrılmıştır. Bu alt kısımda belli aralıklarla donatılar vardır.

Deneyde beton, bir bölüme doldurulduktan sonra aradaki bölme açılır ve beton ağırlığıyla alttan diğer bölüme doğru geçer. Hareketin tamamlanma süresi ve bu süre sonunda düzeneğin her iki kolundaki beton yüzeyine olan mesafeler ölçülür. Betonun U-box düzeneğine konulan taraftaki yüksekliği h_1 , hareketin sonlandığı diğer koldaki yükseklikte h_2 olarak gösterilir ve h_1/h_2 oranı hesaplanır. İşlenebilirliği yüksek betonlarda bu hareket süresin kısa ve h_1/h_2 oranının 1'e yakın olması beklenmektedir. [17,26]

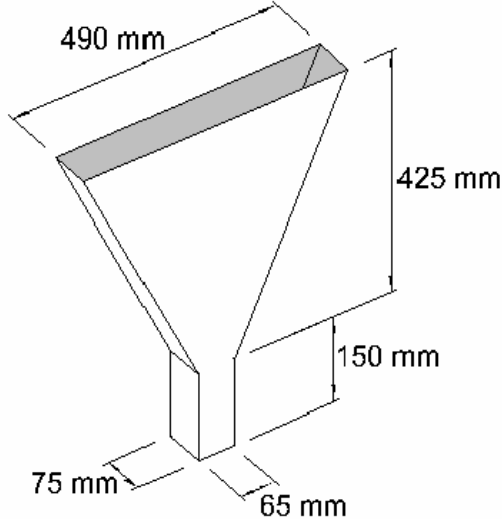


Şekil 2.2: U-Kutusu Deney Düzenegi [26]

2.2.3. V-Hunisi Testi

İlk olarak Ozawa tarafından geliştirilen V hunisi deneyi KYB' nin dar bir kesitten kendi ağırlığı altında geçiş yeteneği hakkında fikir vermesi amacıyla kullanılmaktadır. V şeklinde 12 litre hacimli üst ve alt ağızları dikdörtgen kesitli bir huniden oluşan bu düzenekte betonun çıkış yapacağı alt ağızda bir kapak mevcuttur. Düzenegın yüzeyi nemlendirildikten sonra üst yüzeye kadar beton ile doldurulur. Kapağın açılması ile süre çalıştırılır ve akış alt ağızdan devam ederken herhangi bir tıkanma olup olmadığı gözlemlenir. Üsten bakıldığında alt ağızda ışık görülmesi ile

süre durdurulur ve deney sonuçlanır. Bu deneyde maksimum agrega boyutunun 25 mm'nin altında olması tavsiye edilir[17,25]. Şekil 2.3'de V-Hunisi testi deney düzeneği yer almaktadır.



Şekil 2.3: V- Hunisi Deney Düzeneği [26]

2.3. Kendiliğinden Yerleşen Betonda Malzeme Özellikleri

Beton endüstrisinde yüksek performansın anlamı gerekli ve belirlenen ihtiyaçlara cevap verebilmek için beton bileşiminin düzenlenmesi şekline dönüşmüştür. Bu betonlardan kendiliğinden yerleşen betonların kendine özgü malzeme ve karışım özellikleri mevcuttur. Bu betonların davranışı karışımdaki malzeme özelliklerine karşı son derece hassastır. Bu yüzden dizaynı geleneksel betonlara göre daha fazla dikkat ve gözlem gerektirmektedir.

Yüksek dayanım ve dayanıklılıkta boşluksuz ve geçirimsiz beton elde etmek için su/çimento oranı en önemli değişkendir. Bunun yanında çimento dozajının tayininde su oranıyla birlikte maksimum agrega boyutu da göz önüne alınmaktadır.

$$\text{Çimento dozajı} = 550 / D^{1/5} \quad (2.1)$$

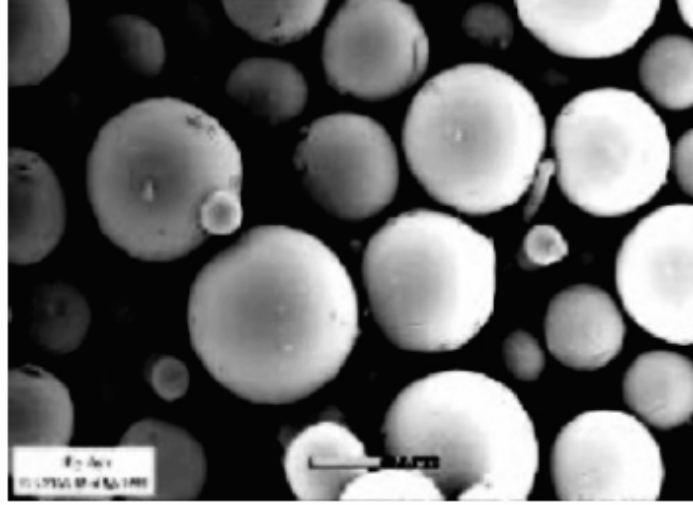
Burada D maksimum agreaga boyutunu göstermektedir. Bu formülde agrega yığınındaki boşluk miktarının en büyük tane boyutuna bağlı olduğu söylenebilir. Buradan çıkarılacak sonuç maksimum agrega boyutu büyüdükçe agrega yığınının boşluğu azalmaktadır. Çimento dozajı da yukarda gösterildiği gibi maksimum dane boyutunun fonksiyonudur ve dane boyutu küçülüp boşluk arttıkça gereken çimento

dozajı artmaktadır.[7] Burada minimum çimento dozajı kavramı gündeme gelmektedir. Günümüzde çeşitli mineral ve kimyasal katkılarla çok düşük çimento dozajlarıyla istenen mukavemetler yakalanırken bu durum durabilite açısından tehlike arz etmeye başlamıştır. Çünkü betonda ince yapıdaki çimento tanelerinin boşluk doldurucu etkisi de çok önemli yer tutmaktadır. Boşluk dolduruculuk etkisi için çimento dozajını çok yüksek tutmak maliyeti arttırması bakımından kaçınılan bir yaklaşımdır. Boşluk dolduruculuk özellikleri göz önüne alınarak çimento ile benzer inceliğe sahip yada çok daha ince puzolanik yada inert malzemelerin çimento ile ikame edilmesi konusunda çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Kassel Üniversitesi'nde yapılan bir çalışmada, sabit hacimsel su/pudra oranında, su/çimento oranı 0,20' den 0,40' a kadar arttırılmış, çimento dozajı ise 900 kg/m³ değerinden 470 kg/m³ değerine kadar azaltılmış ve sonuçta basınç dayanımının aynı seviyede kaldığı görülmüştür. Yine benzer bir çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi'nde yapılmış sabit 0.51 hacimsel su/ince malzeme oranında su/çimento oranı 0.22'den 0.33 değerine kadar artmasına ve çimento dozajı 900 kg/m³ değerinden 650 kg/m³ değerine kadar azalmasına rağmen basınç mukavemetlerinde önemli bir azalma görülmemiştir. [2,5]

2.3.1. Mineral katkı kullanımının Beton Özelliklerine Etkisi

Betonda en sık kullanılan mineral katkılar uçucu kül, yüksek fırın curufu, silis dumanı, silis unu ve kireçtaşı tozudur. Silis dumanı, yüksek fırın curufu, uçucu kül boşluk dolduruculuk yanında puzolanik etki de gösteren malzemelerdir.

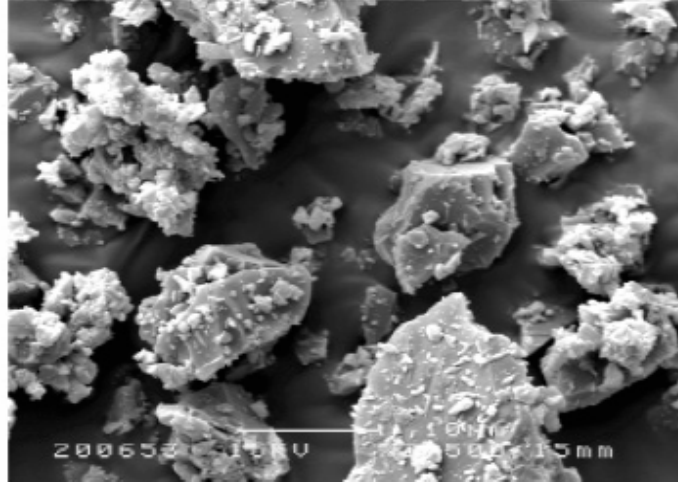
Uçucu kül, termik santrallerde yanan kömür sonucu baca filtrelerinde biriken külün toplanması ile elde edilen atık bir maddedir. Kömür fırın içerisinde iken uçucu maddeler ve karbon büyük ölçüde yanar ancak kömür bünyesindeki kil, kuartz gibi malzemeler yüksek sıcaklıkta erimiş halde kalır. Bu atık maddeler soğuk ortama geçtiklerinde ise hızla soğuyarak küresel katı parçacıklara dönüşürler. Bunların çoğu gaz ve buharla birlikte baca filtrelerinden geçirilir ve elektrostatik yöntemlerle filtrelerden toplanır. Dane dağılımı olarak ise % 50 oranında parçacık 20 µm'den küçüktür. [10] Şekil 2.4'de uçucu kül parçacıkları gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Uçucu kül parçacıkları [10]

Uçucu kül maliyetinin çimentoya oranla düşük olması ve daha düşük hidratasyon ısıyı yayması, boşluk doldurucu ve puzolanik özellik göstermesiyle ve işlenebilirliğe katkısı ile yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Ancak çimentoya oranla erken dayanımı düşüktür, fiziksel ve kimyasal yapısı çok değişkenlik gösterebilmektedir. Beton içerisinde çimento ağırlığının %15'i mertebesinde kullanılmaktadır. [10]

Yüksek fırın curufu demir endüstrisinin yan ürünüdür. Silikat ve alüminatlar bakımından son derece zengindirler.



Şekil 2.5: Yüksek fırın curufu tanecikleri [10]

Yüksek fırın curufunun kullanım amaçları, uçucu küllere benzer özellikler taşır. Karışım esnasında parçacıklarının düzgün ve yoğun oluşu nedeni ile su emmesi düşüktür. Beton karışımlarında çimento ağırlığının %15 - %30 oranında kullanılırlar. Fiziksel ve kimyasal yapıları uçucu küller kadar değişkenlik göstermez dolayısıyla daha güvenilirlerdir. [10]

Bu mikrofiller malzemelerin inceliği puzolanik bakımdan çok önemlidir. Puzolanik etki ile kireci bağlar mukavemete katkıda bulunup geçirimsizliği arttırmırlar. Betonun uzun süreli mukavemetine katkı sağlarlar. Puzolanik malzeme kullanımının puzolan yüzdesine de bağlı olarak erken dayanımı nispeten düşürürken uzun süreli mukavemetleri arttırdıkları bilinmektedir.

Yüksek fırın curufu, uçucu kül, silis dumanı gibi malzemelerin kullanılması ekolojik denge ve sürdürülebilir kalkınma için de önemli unsurlardır. Çimento üretimi ve CO₂ salınımı azaltılırken, endüstriyel yan ürünler beton özelliklerini geliştirmek için kullanılabilirlerdir. [12]

2.3.1.1 Silis unu kullanımının Beton Özelliklerine Etkisi

Öğütülmüş kuartz (Silis Unu) seramik endüstrisinde kullanılan bir malzemedir. Tane boyutu çimento (30 µm) tane boyutlarına yakındır. [5] Betonda boşluk dolduruculuk etkisi ile ön plana çıkmaktadır. Çoğu gevrek malzeme de olduğu gibi dayanım ve dayanıklılık boşluk oranı ile ters orantılıdır. [2,5]

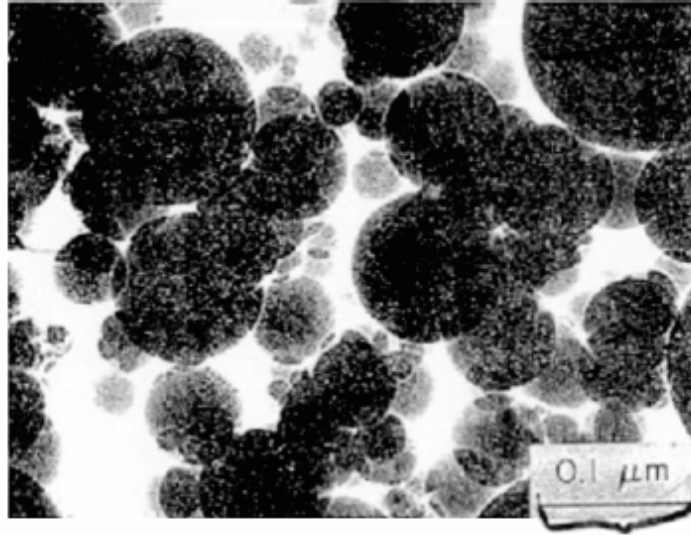
$$f_c = f_{co} e^{-kp} \quad (2.2)$$

Formülde f_c dayanımı, f_{co} sıfır boşluk oranındaki ideal dayanımı, p poroziteyi, k ise deneysel sabit sayıyı göstermektedir. Buradan görülebileceği üzere boşluk oranının düşmesi ile dayanım artmaktadır. Su/çimento oranı betonun kılcal boşluk yapısını belirleyen başlıca faktördür, burada çimento bağlayıcılık dışında boşluk dolduruculuk özelliği de göstermektedir. Çimentonun boşluk doldurucu etkisini karşılamak için kullanılan benzer incelikteki silis unu, betondaki boşluk miktarı ve boşluklar arası bağlantıları azaltarak hamur fazın yoğunluğuna katkı sağlarken reolojik özellikleri de geliştirmektedir. Bu ince malzemenin katılması ile agregalar arası mesafe artmakta dolayısı ile içsel sürtünme azalmakta ve akış enerjisi daha fazla korunabilmektedir.

Agrega ve matris ara yüzeyi betonun en zayıf bölgesidir. Betonun performansı bu arayüzeyin aderansına bağlıdır. Özel betonlarda kullanılan mikrofiller malzeme bu bölgedeki boşlukları doldurmakta ve yoğunluğunu artırmaktadır. Bu durum, betonun basınç, çekme, eğilme dayanımı gibi özelliklerini gelişmesine yol açmaktadır. Dolduruculuk sağlayan mikrofiller malzemeler suyun ve onun taşıdığı kimyasalların betonda taşınımını yada betona girişini engelleyerek dırabiliteyi olumlu yönde etkilemektedir. Ayrıca betonda matris-agrega ara yüzünün güçlenmesinden dolayı geçirimsizlik artmakta ve betonun durabilitesi artmaktadır.

2.3.1.2 Silis Dumanının Beton Özelliklerine Etkisi

Silis dumanı ile ilgili ilk çalışmalar 1950'lerde Norveç'te başlamış olup, 1980' den sonra ise silis dumanı dünyada yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Silis dumanı silikon ve ferro-silisyum alaşım endüstrisinin yan ürünüdür. Yüksek sıcaklıktaki fırınlarda ($T \geq 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$) kuvarsitin silikona indirgenmesi sonucu elde edilir. Oluşan SiO buharı düşük sıcaklıklarda yoğunlaştırılarak tane boyutu küçük ($<1\mu\text{m}$) ve küresel parçacıklar oluşturulur.[10] Şekil 2.6'da silis dumanı parçacıkları görülmektedir.



Şekil 2.6: Silis dumanı parçacıkları [10]

Silis dumanının dane dağılımı $0,05\text{ }\mu\text{m}$ 'den küçük % 20, $0,10\text{ }\mu\text{m}$ 'den küçük % 70, $0,20\text{ }\mu\text{m}$ 'den küçük % 95 ve $0,50\text{ }\mu\text{m}$ 'den küçük % 99 şeklindedir. Çok ince yapısı sayesinde çimento taneleri arasındaki boşlukları bile doldurabilir. Hayli reaktif bir pozolan karakteri taşıyan silis dumanı, 100 MPa üzerinde dayanım hedeflenen beton

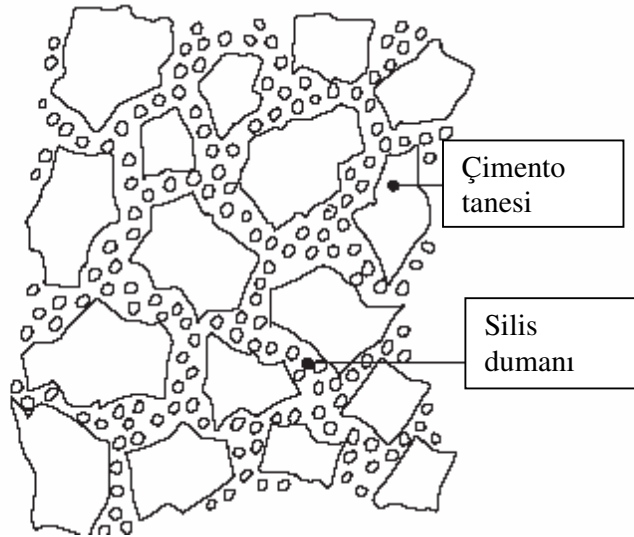
üretiminde yaygın olarak tercih edilen bir mineral katkıdır. Silis dumanının başlıca özellikleri; %85'ten %98'e kadar SiO_2 içeriği (ortalama değer $\geq$ %92), 0,1-0,2 μ tane büyüklüğü, küresel tane şekli, amorf yapısıdır. [10]

Silis dumanının çok ince taneli olmasıyla birlikte boşlukları doldurucu bir etki sergiler. Ultra incelikteki silis dumanı çimento-agrega arayüzeyindeki büyük boşlukları doldurarak yoğunluğu artırır. Yüksek inceliği sayesinde çimento taneleri arasında kalabilecek kapiler boşlukları da doldurma yeteneği vardır. Boşluk miktarının ve sürekliliğinin azalması ile betonun geçirgenliği düşer, dış etkilere karşı dayanıklılığı artar. Servis ömrü boyunca proje mukavemetinin korunması mümkün olur. [27,28] Tablo 2.2'de silis dumanının kimyasal bileşimi verilmiştir.

Tablo 2.2: Tipik Silis Dumanının Kimyasal Bileşimi [27]

Kimyasal Bileşen	Ağırlıkça Yüzde	Kimyasal Bileşen	Ağırlıkça Yüzde
SiO_2	93	MgO	0,6
Al_2O_3	0,4	SO_3	0,3
Fe_2O_3	0,8	Alkali	0,96
CaO	0,6		

Silis dumanının tane boyutu 0.1 μm ile 0.2 μm arasında değişmekteyken, çimento taneciklerinin ortalama boyutu yaklaşık 30 μm mertebesinde dir. Tane boyutları arasındaki bu fark ve silis dumanının yüksek aktiviteye sahip olması beton içerisindeki boşlukları doldurma kabiliyeti sonucunda, agrega ile çimento arayüzeyinde homojenlik artmakta ve boşluk oranı azalmaktadır. [28,29].

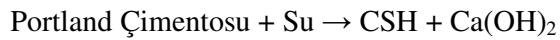


Şekil 2-7: çimento tanesi ve silis dumanı etkileşimi [30]

Silis dumanı betonun vizkozitesini arttırarak betonun reolojik özelliklerini de geliştirir. Betonda ince malzemelerin miktarının artırılması betonun akışı esnasındaki içsel sürtünme açısından önemlidir. Böylece iri agregaların yer değiştirmesi ve birbirine teması ile gerçekleşecek enerji kaybı ve sık donatılı bölgelerde ve dar kesitlerde oluşacak agrega kenetlenmesi ve blokaj riski de azaltılır. Bununla beraber silis dumanı ve benzeri ince malzemelerin kullanımı ile oluşan yoğun yapı nedeni ile betonda segregasyon ihtimali de azalmaktadır. [31]

Silis dumanının diğer önemli bir özelliği de puzolanik karaktere sahip olmasıdır. Beton yapısındaki zayıf unsurlardan biri serbest Ca(OH)_2 molekülleridir. Çimentonun hidratasyonu sırasında Ca(OH)_2 ' de açığa çıkmaktadır. Silis dumanı gibi puzolanik malzemeler Ca(OH)_2 moleküllerini CSH molekülüne dönüştürecek puzolanik etkiyi gerçekleştirirler ve CSH jelinin sürekliliğini sağlarlar. Puzolanlar, rötrenin ve yüksek hidratasyon ısısının açığa çıkmasını engelleyerek yüksek miktarda bağlayıcı kullanılmasına izin veren malzemelerdir. Bu puzolanlardan biri olan silis dumanı, betonun basınç, çekme, eğilme dayanımı gibi özelliklerini iyileştirmesinin yanı sıra yoğunluğunu arttırmaktadır.

Puzolanik malzemeler yeterli incelikte iseler sulu ortamda kireçle CSH jeli oluştururlar. Böylece ortamda bulunan mevcut serbest suyun bir kısmı da bağlanmış olur.



Beton içerisindeki malzemelerin çimento ile bağlanabilmesi için tüm yüzeyinin ince bir su filmi ile çevrelenmiş olması gerekir. Kullanılan malzemelerin tane boyutu küçüldükçe toplam yüzeyi artacak dolayısı ile betonun su ihtiyacını da arttıracaktır. Yüksek inceliğe sahip silis dumanı çok yüksek su ihtiyacına sahiptir. Fazla su, su/çimento oranını yükselteceğinden silis dumanı ile beton üretebilmek için nitelikli süper-akışkanlaştırıcılar kullanılmalıdır. [32,33] Ayrıca silis dumanının ortamda bulunması beton içinde bulunan alkalileri hızla bağlamasından dolayı aktif silis içeren agregalarla muhtemel bir alkali-silika reaksiyonunu engelleyebilmektedir. [30,34]

Daha önce yapılan bir araştırmada silis dumanı ve aynı incelikte puzalonik özelliği bulunmayan, sadece boşluk doldurma yeteneği bulunan karbon siyahı mikrofiller olarak kullanılmıştır. Bu deneylerde amaç silis dumanının sahip olduğu dolduruculuk ve puzolanik etkinin dayanıma olan katkısını değerlendirmektir. Deneyler sonucunda dayanıma olan katkı söz konusu olduğunda dolduruculuk etkisinin, puzalonik etkiye göre daha fazla katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Ancak dikkat edilmesi gereken nokta, silis dumanı kullanımı betonun gevrekliğini de önemli derecede arttırmaktadır. [35,36]

Literatürde KYB'lar yüksek oranda pudra kullanılan KYB ve vizkozite düzenleyici ajan kullanılan KYB'lar olarak ayrılabilir. Yüksek oranda pudra kullanılan tip KYB'larda düşük su oranı ve ince malzemenin fazlalığı ile yüksek vizkozitede ve segregasyona dirençli daha durabil beton üretmek mümkündür. İkinci kategoride ise süper-akışkanlaştırıcıya ek olarak vizkozite düzenleyici suda çözünen organik yada inorganik ajanlar kullanılır. Bu tip betonlarda vizkozitenin artması için su oranını çok düşürmek ve pudra oranını çok yüksek değerlere çıkarmak gerekmez. [32]

2.3.1.3 Çelik lif kullanımının beton özelliklerine etkisi

Çimento esaslı kompozitlerin çekme dayanımları ve kırılma enerjileri düşük ve kırılmaları gevreklerdir. Özellikle yüksek dayanımlı betonların gevrekliği oldukça yüksektir.[10] Liflerin görevi gerilme altındaki matriste çatlak gelişimini engellemek ve geciktirmektir. Oluşan çatlakların hızlı ve kontrolsüz gelişimini kontrol altına alır ve ani göçme riskini ortadan kaldırır. Çatlak üzerinde köprü vazifesi görerek çatlağın ilerleyişini durdurur ve gerilmeyi çatlamamış kısımdaki matris ve liflere iletir. [4]

Lif genel tanımla bir boyutu diğerine göre çok büyük olan malzeme olarak tanımlanabilir. Betonda kullanılan lifler çelik, polimerik (akrilik, polipropilen, naylon), asbest, karbon, cam ve çeşitli doğal fiberlerdir.[10,36]

Polipropilen lifler betonda genelde plastik rötre çatlaklarının önlenmesinde kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıkta bu lifler eriyerek beton içerisinde boşluklar bırakır. Bu da betonun yangına karşı dayanıklılığını artırır.

Lifli betonların ilk kullanımı 1960'lı yıllara uzanmaktadır. Günümüzde genel amaçlı normal betonlarda da beton özelliklerini geliştirmek için kullanım alanı gittikçe artmaktadır. Bu fiberlerin kullanım amacı betonun basınç mukavemetini arttırmak

değil sünekliğini, şekil değiştirme kapasitesini, kırılma enerjisini arttırmak ve rötire çatlaklarını önlemektir.

Çelik lifler betonda mekanik özellikleri iyileştirmek amacı ile kullanılmaktadır. Çimento esaslı malzemeler de çelik lif çimento hamuru arasındaki ilişki gevrek matris sünek lif ilişkisidir. Betonun çekme dayanımı ve şekil değiştirme kapasitesi düşüktür. Genelde liflerin kırılma uzaması matriste çatlak oluşması esnasındaki şekil değiştirmeden çok daha büyüktür. Bu yüzden lif kopma dayanımına ulaşmadan matris çatlar ve lif ana taşıyıcı rolü üstlenir, çatlakların ani olarak yayılmasını engelleyerek betonun sünek davranış göstermesini sağlayan lifler, yüksek deformasyon değerlerinde dahi betonun yük taşıyabilmesini sağlamakta ve enerji yutma kapasitelerini arttırmaktadır.

Lif ve matris arasındaki elastisite modülü farkından dolayı gerilme altında lif yüzeyi boyunca kayma gerilmeleri oluşur. Bununla birlikte lifler de matrisin aktardığı gerilmeleri taşır. Çatlak oluşumu başladıktan sonra ana taşıyıcı olarak liflerin yük taşıyabilmesi ve lifler arasında yük transferi için lif-matris aderansının çok iyi olması gerekir. Matris taşıma kapasitesinin aşılması ile en zayıf noktasında çatlak oluşumu başlamaktadır. Çatlak oluşumunu geciktiren lifler çatlak oluşuktan sonra köprü vazifesi görerek gerilmeleri sağlam bölümlere aktarmaktadır. Matris bu noktada lifleri bir arada tutan, lifler arası yük transferini gerçekleştiren ve lifleri dış etkilere koruyan bir görev üstlenir. Gerilmelerin artması ile lif-matris aderansına ve lif özelliklerine bağlı olarak lif sıyrılması veya lif kopması gözlenir. Aderansın artırılması için kancalı uçlu lifler kullanılabilir. [36]

Çelik liflerden beklenen performans lif miktarı, lif boyu, lif narinlik oranı ve lif geometrisine bağlı olmakla birlikte lif dayanımından ve lif-matris aderansından da önemli derecede etkilenmektedir. Lif narinlik oranı, lif uzunluğunun lifin kesit alanına eşit dairenin çapına bölümüdür. Kullanılan lifin dayanımının artması ile yeterli aderans sağlandığı takdirde sıyrılma ile gerçekleşen göçme davranışı sonucu, düşük dayanımlı liflerin kullanıldığı duruma göre daha fazla enerji yutulmasına izin vermektedir. Çelik liflerin çekme gerilmelerini karşılamada maksimum verimli olması için geleneksel betonarme teknolojisinde olduğu gibi gerilme doğrultusunda yönlendirilmeleri gerekir. Ancak küçük ve çok sayıda lifin kullanıldığı lifli beton uygulamalarında bu pratikte pek mümkün görülmemektedir. Uygulanan en etkin

yöntem liflerin matris içinde homojen dağılımı ile sürekliliğin sağlanması olabilir, lif yönlenmesi rastlantısalıdır.

Yapılan araştırmalar düz lifler kullanıldığında kanca uçlu liflere göre daha yüksek lif miktarına erişmenin mümkün olduğunu göstermektedir. Bunun en önemli nedeni işlenebilirliğin düz lifler kullanıldığında artmış olmasıdır. Aynı zamanda artan narinlik ile işlenebilirlik azaldığı için lif miktarı da azalmaktadır. Bu nedenlerden dolayı lif miktarının belirlenmesi sırasında lif geometrisi, narinlik oranı gibi parametreler göz önüne alınarak optimizasyon yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır [8,16]. Aynı zamanda betona lif eklenmesi, betonda daha çok kusur oluşturmaları, karışım ve yerleştirmede güçlüklerle neden olması, beton özellikleri üzerinde zayıflatıcı etki de gösterebilmektedir. Bu etki daha çok basınç dayanımında görülür.[36]

2.3.1.4 Kimyasal Katkı Kullanımının Beton Özelliklerine Etkisi

Kimyasal katkı maddeleri genel anlamda betondan beklenen özelliklere bağlı olarak betonun taze yada sertleşmiş haldeki özelliklerini geliştiren kimyasal maddelerdir. Genelde hava sürükleyen, korozyon direncini artıran, priz hızlandıran yada geciktiren, suyu azaltan akışkanlaştırıcı katkıları kullanılmaktadır.

Eski çağlarda Romalıların kendi karışımlarında süt, kan gibi organik maddeleri muhtemelen işlenebilirliği arttırmak için kullandıkları bilinmektedir. Modern katkıları 1930'lu yıllardan itibaren geliştirilmeye başlanmış bunlardan bu çalışmada kullanılan süper-akışkanlaştırıcı katkıların geliştirilmesi 1960'ları bulmuştur. [2]

Kimyasal katkılardan en yaygın olarak kullanılan ve kendiliğinden yerleşen betonlarla birlikte pek çok yüksek performanslı betonda da faydalanan akışkanlaştırıcı katkıları betonun reolojik ve sertleşmiş haldeki özelliklerini geliştirmektedir. Segregasyonu önleyerek iyi bir yerleşmenin sağlanmasını sağladıkları gibi azalan su ile birlikte su/çimento oranını düşürerek boşluk miktarını azaltır ve dayanım ve dayanıklılık özelliklerini olumlu şekilde etkilerler. Bu katkıları etkinlik derecelerine göre normal akışkanlaştırıcılar, orta derecede su azaltıcı akışkanlaştırıcılar ve süper akışkanlaştırıcılar olmak üzere 3 ana grupta incelenebilir. Çimento tanelerine adsorbe olan yani yüzeyini kaplayan ve betonun iç sürtünmesini azaltarak işlenebilirlik özelliğini arttıran bu sentetik, yüksek molekül ağırlıklı, suda çözülebilen polimerlerin etki mekanizmaları:

- Çimento tanelerinin su ile teması sonucu oluşan Ca^{++} iyonları yüzeyine yapışarak yeterli itme kuvveti oluşturan negatif yükleme oluşturmak ve iç sürtünmeyi azaltmak,
- Parçacıklar ve sıvı faz arasında bağı arttırmak,
- Sterik etki adı verilen etki ile çimento tane yüzeylerine yapışarak ve uzun polimer zincirleri oluşturarak parçacıklar arası çekimi azaltan bir etki oluşturmak ve bu etki sayesinde çimento tanelerini daha homojen dağıtarak çimento etkinliğini artırılmak şeklindedir.[2]

Süper-akışkanlaştırıcılar başlıca 4 grupta incelenebilir. Bunlardan ilki melamin bazlı süper-akışkanlaştırıcılardır. Bunlar ticari olarak geliştirilen ilk süper-akışkanlaştırıcı katkılardır. Katı madde oranı % 22 seviyesindedir.[10] Naftalin bazlı süper-akışkanlaştırıcılar sodyum veya kalsiyum tuzları şeklinde hazırlanmışlardır. Sodyum tuzları kullanılan versiyonları daha ucuz olması nedeniyle daha çok tercih edilen cinsidir. Naftalin bazlı süper-akışkanlaştırıcılar genelde melamin bazlılardan daha düşük fiyatlardır. 3. çeşit ise linyosülfonat bazlı süper-akışkanlaştırıcılardır. Akışkanlaştırma özellikleri diğer iki süperakışkanlaştırıcıya oranla nispeten düşüktür. Polikarboksil bazlı süper-akışkanlaştırıcılar ise diğerlerinden akışkanlığı daha uzun süre korumasıyla ayrılmaktadır. Son dönemde yeni nesil süper-akışkanlaştırıcıların ortaya çıkması ile yüksek performanslı betonların üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bu betonların akışkanlıkları kendiliğinden yerleşen betonların gelişmesine olanak sağlamaktadır. Burada dikkat edilecek başlıca nokta her çimento cinsi için bu akışkanlaştırıcıların etki mekanizmalarının değişken olabilmesidir. Yapılan araştırmalar kendiliğinden yerleşebilme özelliğini sağlayabilmede en etkin akışkanlaştırıcıların polikarboksil grubu olduğunu göstermiştir. [10]

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışması kapsamında, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda hacimce sabit 0,52 su/pudra oranlı 5 adet karışım üretilmiştir. Sırasıyla 0,24, 0,31, 0,38, 0,45 ve 0,63 su/çimento oranlarına sahip bu karışımlarda çimento ile benzer (0-45 μ) dane boyutuna sahip silis unu ikameli olarak kullanılmış böylece azalan çimento dozajı ile artan silis unu muhtevası sayesinde su/pudra oranı sabit tutulmuştur. Daha sonra bu karışımlara ek olarak yine aynı su/çimento oranlarında 1 m³'de 78 kg olacak şekilde orta ve yüksek dayanımlı çelik lifler kullanılarak 10 adet daha karışım üretilerek toplamda 15 adet karışım elde edilmiştir. Karışımlarda, çimentonun yanı sıra bağlayıcı silis dumanı da kullanılmıştır. Silis dumanı dozajı sabit ve 1 m³'de 67 kg olarak kullanılmıştır. Akışkanlığı sağlamak için polikarboksilik eter esaslı yeni nesil süper-akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır.

Akışkanlaştırıcı katkı maddesi, üretim sırasında yapılan kendiliğinden yerleşen beton deneylerine bağlı olarak ve segregasyon oluşmamasına dikkat edilerek her üretim için ayrı miktarda kullanılmıştır. Bu çalışmada bahsedilen 15 karışımdan lifsiz ve yüksek dayanımlı life sahip karışımlar olarak toplamda 10 karışımın taze ve sertleşmiş beton özellikleri incelenmiştir.

3.1. Karışımlarda Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

3.1.1. Çimento

Üretimlerde Nuh Çimento Fabrikası'na ait CEM I 42,5 tipinde çimento kullanılmıştır. Üretici firmadan temin edilen basınç dayanımı ve fiziksel özellikleri ile kimyasal özellikleri sırasıyla tablo 3.1 ve Tablo 3.2 verilmiştir.

Tablo 3.1: Portland Çimentosunun Fiziksel Özellikleri ve Basınç Dayanımı

Özgül Ağırlık (gr/cm ³)		3,17
Priz Süresi	Başlangıç	03:05
Hacim Sabitliği (mm)		2
Özgül Yüzey (cm ² /gr)		3700
Basınç Dayanımı (N/mm ²)		Gün
		2
		28
		27,0
		59,0

Tablo 3.2: Portland Çimentonun Kimyasal Özellikleri

	Analiz Sonuçları (%)	Standartlar (%)
MgO	1,10	maks. % 5,0
Cl	0,10	maks. %0,1
SO ₃	2,50	maks. % 3,5
Çözünmeyen Kalıntı	0,70	maks. % 1,5
Kızdırma Kaybı	1,90	maks. % 5
Serbest Kireç	1,00	

3.1.2. Silis unu

Deneylerde çimento ile hacimce ikame olacak şekilde seramik endüstrisi hammadesi olan öğütülmüş silis unu kullanılmıştır. Kullanılan silis ununun dane boyutu (0-45) mikron arası değişmekte olup özgül ağırlığı 2,60'tır. Silis ununun kimyasal özellikleri tablo 3.3'de verilmiştir. Ayrıca tablo 3.4'de silis ununun fiziksel özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 3.3: Silis Ununun Kimyasal Özellikleri

İçerdiği Madde	Yüzdesi (%)
SiO ₂	99,52
Na ₂ O	0,1
Al ₂ O ₃	0,18
K ₂ O	0,01
Fe ₂ O ₃	0,05
TiO ₂	0,01
CaO	0,03
MgO	0,03

Tablo 3.4: Silis Ununun Fiziksel Özellikleri

Agrega	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Su emme (%)	90µ'luk elekten geçen %	45µ'luk elekten geçen %	Blaine (cm ² /g)
Silis unu	2,60	0,4	99,96	83	3500

3.1.3. Silis dumanı

Deneylerde kullanılan silis dumanı özgül ağırlığı, helyum piknometresi ile yapılan ölçüm sonucu 2,24 gr/cm³ bulunmuştur. Karışımlarda kullanılan silis dumanının miktarı sabit ve 67 kg/m³ olarak belirlenmiştir.

3.1.4. Agregalar

Üretimlerde iri agregalar bazalt kırmataş 1, ince agregalar ise yine bazalt kökenli kırma taş tozu ve TS 33 kumu kullanılmıştır. Agregaların fiziksel özellikleri tablo 3.5’de verilmiştir. Agregaların elek analizleri ise tablo 3.7’de gösterilmektedir.

Silis unu ve silis dumanının yanı sıra karışımlarda ince malzeme olarak, cam endüstrisinde kullanılan sarı ve beyaz renkli 2 farklı tür ince kum malzemeye de yer verilmiştir. Bunların zemin mekaniği laboratuvarında yapılan elek analizleri tablo 3.6’da verilmiştir. Ayrıca özgül ağırlıkları tablo 3.8’de gösterilmiştir.

Tablo 3.5: Agregaların Fiziksel Özellikleri

Agrega Türü	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Su emme (%)
TS 33 Kumu	2,63	2,60
Kırmataş Tozu	2,78	2,11
Kırmataş 1	2,86	1,60

Tablo 3.6: İnce Beyaz ve Sarı Kum Elek Analizi Sonuçları

Elek No	Elek Göz Boyutu (mm)	İnce Sarı Kum	İnce Beyaz Kum
		Elekten Geçen %	Elekten Geçen %
40	0,42	99	99
70	0,21	89	94
100	0,149	79	86
200	0,074	3	2

Tablo 3.7: Agregaların Elek Analizi Sonuçları

Elek Göz Boyutu (mm)	Elekten Geçen %					
	Sarı İnce Kum	Beyaz İnce Kum	TS 33 Kumu	Bazalt Tozu KT	Bazalt KT1	Karışım
16	100	100	100	100	100	100
8	100	100	100	100	55	79
4	100	100	100	99	3,6	55
2	100	100	99,8	53	0,2	41
1	100	100	74,5	17,5	0,2	29
0,5	100	100	1,25	6,6	0,1	16
0,25	91	95	0,9	4	0,1	14

Tablo 3.8: Beyaz ve Sarı İnce Kum Özgöl Ağırlıkları (g/cm³)

İnce Türü	Malzeme	Özgöl ağırlık (g/cm ³)
Sarı kum		2,58
Beyaz kum		2,61

3.1.5. Akışkanlaştırıcı Katkı

Üretimlerde YKS firması tarafından üretilen polikarboksilik eter esaslı yüksek oranda su azaltan Glenium 51 adlı yeni nesil süper akışkanlaştırıcı katkı malzemesi kullanılmıştır. Kullanılan katkı TS EN 934-2 'ye göre yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkı ve sertleşmeyi hızlandırıcı katkı sınıflarına uygun olup klor içermemektedir. Tablo 3.9'da kullanılan süper-akışkanlaştırıcıya ait özellikler verilmiştir.

Tablo 3.9: Kullanılan Süper akışkanlaştırıcının Teknik Özellikleri

Yoğunluk (kg/l)	1.082-1.142
Klor içeriği % (EN 480-10)	<0.1
Renk	Amber
Homojenite	Homojen
Kimyasal İçeriği	Polikarboksilik Eter Zincirleri

3.1.6. Çelik lifler

Üretimlerde 2 farklı türde çelik lif kullanılmıştır. TS10513 standardına uygun olarak üretilen, kanca uçlu, birbirlerine tutkalla birleştirilmiş, C sınıfı A tipi soğuk çekilmiş 0.55 mm çapında, 30 mm boyunda ve narinliği 55 olan BEKSA Firması üretimi olan çelik liflerin farkı çekme dayanımlarıdır. ZP305 kodlu çelik lif dayanımı 1100 MPa ve renkleri beyaz iken ZP305X kodluların çekme dayanımı ise 2250 MPa değerinde ve renkleri sarıdır. Bu tez çalışmasında yüksek dayanımlı lif içeren numuneler üzerinde durulmuştur.

3.2. Beton Karışımları

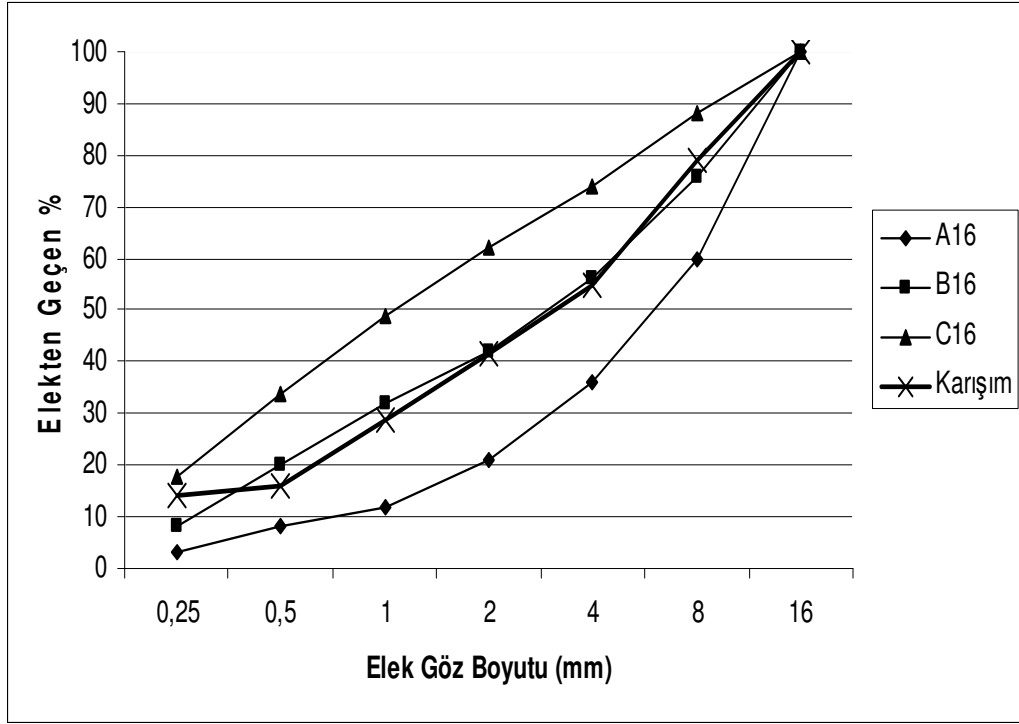
Tez çalışmasında üretilen 15 farklı beton karışımından 5 tanesi lifsiz, 5 tanesi yüksek dayanımlı lif içeren, kalan 5 tanesi ise bağıl olarak düşük dayanımlı lif içeren karışımlardır. Bu karışımlarda farklı su / çimento oranları mevcuttur. Üretimlerde hacimce su/ince malzeme oranı 0,52 değerinde sabit tutulmuş ve çimento ile benzer inceliğe sahip olan öğütülmüş silis unu çimento ile hacimce ikame edilerek kullanılmıştır. Üretimlerde su / çimento oranları 0,24 – 0,31 – 0,38, 0,45 – 0,63 olacak şekilde 5 adet karışım hazırlanmıştır. Karışımlarda, toplam su miktarının 200 kg/m³ değerinde sabit olmasından dolayı su/ince malzeme oranı sabit kalırken azalan çimento miktarı ile birlikte su/çimento oranı arttırılmıştır.

Betonlarda ince malzeme olarak silis unun yanı sıra sabit miktarlarda silis dumanı ve cam endüstrisinde kullanılan 2 tip özel kum kullanılmıştır.

Kimyasal katkı miktarı bütün bileşimlerde kendiliğinden yerleşen beton özelliklerinin elde edilebilmesi için deneme betonları yapılarak belirlenmiştir.

Lif içeren üretimlerde hacimce %1 ve 1 m³ beton için 78 kg olacak şekilde lif katılmıştır. Lifler daha önceden de belirtildiği gibi yüksek dayanımlı ve nispeten daha düşük dayanımlı olarak 2 tiptir ve bu 5 farklı su/çimento oranına sahip karışımlar 2 farklı lif türü ile ayrı ayrı üretilmiştir.

Agrega karışımı TS706' da belirtilen B16 ve C16 referans eğrileri arasında kalacak şekilde belirlenmiştir. Karışımın granülometri eğrisi şekil 3.1'de gösterilmektedir. Karışım oranları için TS 33 kumu %14, kırmataş tozu %25 ve kırmataş1 %47, ince beyaz kum %7 ve ince sarı kum %7 oranlarında kullanılmıştır. Tablo 3.10'da üretimlerin 1m³ için teorik bileşim değerleri verilmiştir



Şekil 3-1: Beton karışımının granülometrisi ve referans eğrileri

Yapılan deneysel çalışmalarda su/ince malzeme oranı sabitken artan su/çimento miktarının ve kullanılan lifin betonun taze ve sertleşmiş haldeki mekanik davranışlarını nasıl etkilediği araştırılmıştır.

Tablo 3.10: 1 m³ için Teorik Beton Bileşimleri Ve Özellikleri

Bileşen (kg)	N0-0,24	N0-0,31	N0-0,38	N0-0,45	N0-0,63	N2-0,24	N2-0,31	N2-0,38	N2-0,45	N2-0,63
Çimento	833	645	526	444	318	824	639	521	440	314
Silis Unu	78	231	329	396	500	77	229	325	392	495
Silis Dumanı	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67
İnce Sarı Kum	83	83	83	83	83	82	82	82	82	82
İnce Beyaz Kum	83	83	83	83	83	82	82	82	82	83
Doğal Kum	168	168	168	168	168	166	166	166	166	166
K.T. Tozu	318	318	318	318	318	315	315	315	315	315
K.T.1	616	616	616	616	616	610	610	610	610	610
Su	200	200	200	200	200	198	198	198	198	198
Katkı	10,8	6,5	4,7	6,7	5,9	8,2	7,2	6,8	6,6	5,9
Lif	-	-	-	-	-	78	78	78	78	78
Su/ince malzeme (Hacim)	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
Su/Çimento	0,24	0,31	0,38	0,45	0,63	0,24	0,31	0,38	0,45	0,63

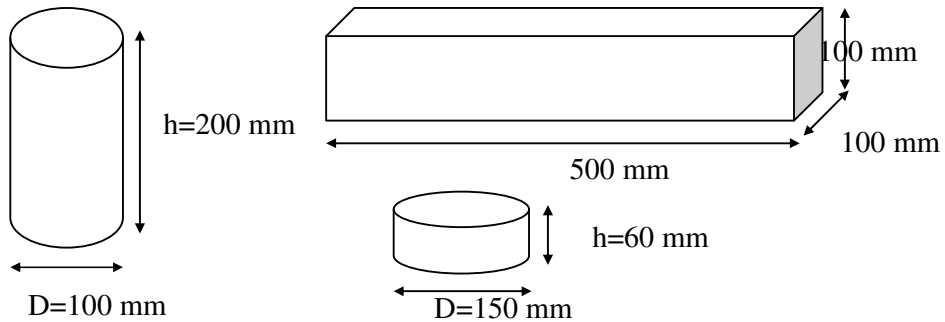
3.3. Üretimde İzlenen Sıra

- Çimento, silis dumanı, silis unu ve diğer agregalardan oluşan kuru karışımın 60 saniye süre ile karıştırılması,
- 80 saniyede karma suyunun tamamının katılması,
- 60 saniye süre ile karıştırmaya devam edilmesi,
- Akışkanlaştırıcı katkının eklenmesi,
- Lifli karışımlarda 60 saniye süre ile karıştırmaya devam edildikten sonra çelik liflerin katılması,
- Çökme-yayılma, kısıtlanmış yayılma, V-funnel, U-box, birim ağırlık deneylerinin yapılması ,
- Betonun kalıplara alınması.

Numuneler üretimden 1 gün sonra kalıptan çıkartılarak kür havuzunu alınmışlardır.

3.4. Numune Şekil ve Boyutları

Üretimlerde eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi deneyleri için 100 mm x100 mm x 500 mm kiriş, basınç deneyleri ve elastisite modülleri için 100 mm x 200 mm silindir ve yarma çekme deneyleri için 150 mm x 200 mm disk olmak üzere numuneler üretildi.



Şekil 3-2: Numune Şekil ve Boyutları



Şekil 3.3: Numunelerin alındığı kalıplar

3.5. Numune Kodlarının Belirlenmesi:

Bu çalışmada NX kodu numunenin lif içerip içermediğini, içeriyorsa lif cinsini belirtmektedir. N0 kodu numunenin lif içermediğini gösterirken N1 kodu orta dayanımlı lif içerdiğini, N2 kodu yüksek dayanımlı lif içerdiğini göstermektedir. Kodlamada ikinci kısım ise su / çimento oranını ifade etmektedir. N1-0,38 kodu numunenin orta dayanımlı lif içerdiğini ve su / çimento oranının 0,38 mertebesinde olduğunu göstermektedir.

4. DENEY SONUÇLARININ İNCELENMESİ

4.1. Taze Beton Deney Sonuçları

4.1.1. Birim ağırlık deneyi

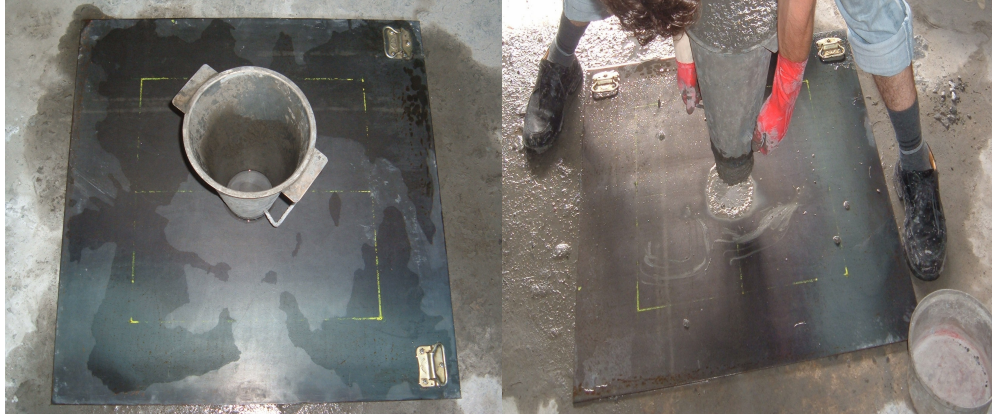
Üretilen betonlar kalıplara yerleştirilmeden önce, silindir şeklinde ağırlığı ve hacmi bilinen bir kap içerisine yerleştirilerek taze beton birim ağırlıkları bulundu ve gerçek bileşimleri hesaplandı. Tablo 4.1'de üretilen betonların gerçek bileşimleri verilmektedir

Tablo 4.1: 1m³ Betondaki Gerçek Miktarlar

Bileşen (kg)	N0-0,24	N0-0,31	N0-0,38	N0-0,45	N0-0,63	N2-0,24	N2-0,31	N2-0,38	N2-0,45	N2-0,63
Çimento	808	652	524	440	315	805	622	506	429	309
Silis Unu	76	234	328	392	495	75	223	316	382	487
Silis Dumanı	65	68	67	66	66	65	65	65	65	65
İnce Sarı Kum	81	84	83	82	82	80	80	80	80	81
İnce Beyaz Kum	81	84	83	82	82	80	80	80	80	81
Doğal Kum	163	170	167	166	166	162	162	161	162	163
K.T. Tozu	308	322	317	315	315	308	307	306	307	310
K.T.1	598	623	613	610	610	596	594	593	595	601
Su	194	202	199	198	198	193	193	192	193	195
Katkı	10,5	6,5	4,6	6,6	5,9	8,0	7,0	6,6	6,4	5,8
Lif	0	0	0	0	0	76	76	76	76	77
Hava %	3,96	3,36	2,8	2,36	2,65	3,47	3,90	4,13	3,80	2,99

4.1.2. Çökme-yayılma deneyi

Çökme-yayılma deneyleri lifsiz ve lifli betonları temsilen N1 kodlu numunelere uygulanmıştır. Sonuçları tablo 4.2’de verilmektedir. Taze betonun yayılma tablasındaki 50 cm çaplı daire sınırlarına erişme süresinin (T_{50} süresi) lifsiz üretimler için su/çimento oranı arttıkça azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.1: çökme-yayılma deney uygulaması

Tablo 4.2: Çökme-Yayılma Testi Sonuçları

Numune Kodu	T_{50} (sn)	Toplam Yayılma (cm)
N0-0,24	14	65
N0-0,31	13	65
N0-0,38	8	74
N0-0,45	7	68
N0-0,63	9	67
N1-0,24	13	67
N1-0,31	15	63
N1-0,38	11	66
N1-0,45	9	67
N1-0,63	-	-

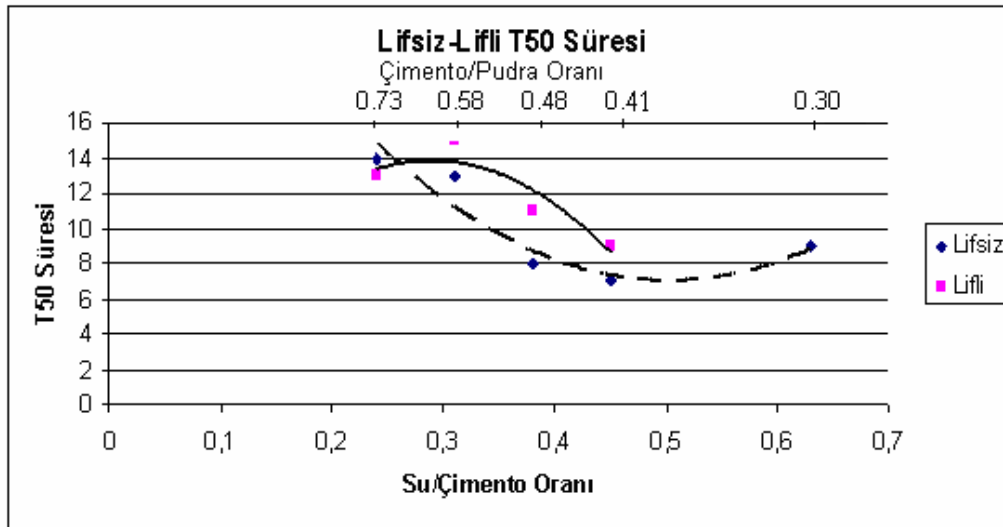
Tabloda görüldüğü gibi lif içermeyen numunede 0,24 su/çimento oranlı karışımın 50 cm çaplı dairesel alana yayılma süresinin, düşük su/çimento oranı ve yüksek çimento dozajı ile artan kohezyondan dolayı en yüksek değerde olduğu dikkati çekmektedir. Lifsiz üretimler de dikkati çeken diğer bir nokta da karışımlarda, ince lifsiz üretimlerde 0,45 su/çimento oranından sonra T_{50} süresinin artma eğilimidir. Yüksek

su/çimento değerlerinde betonun kohezyonunun azaldığı segregasyon tehlikesinin başladığı ve betonun iri agregaları taşımakta zorlandığı anlaşılmıştır.

Lifli üretimlerde de lifsiz numunelere paralel olarak T_{50} sürelerinin artan su/çimento oranıyla beraber azaldığı gözlenmiştir. Burada diğer önemli bir husus da lif ilavesinin işlenebilirliğe olan negatif etkisidir. Lifli numunelerin T_{50} süreleri içerdikleri liflerin işlenebilirliğe olan olumsuz etkisinden dolayı genelde daha yüksektir. 0,63 su/çimento oranında lifli üretimler kendiliğinden yerleşen beton özelliği sergilememişler ve 50 cm'lik daire sınırına kadar yayılma gerçekleştirememişlerdir.

Toplam yayılmalarda ise önemli bir azalma olmadığı, kendiliğinden yerleşen beton özelliklerinin lifli 0,63 su/çimento değeri hariç sağlandığı görülmektedir.

Yalnızca T_{50} süreleri açısından incelendiğinde, lifli ve lifsiz üretimler için en uygun değer 0,45 su/çimento oranıyla elde edildiği görülmektedir. Toplam yayılma değerinde ise 0,38 -0,45 değerleri en yüksek değerleri vermiştir.



Şekil 4.2: Numunelerin Çökme-Yayılma Testi T_{50} süreleri

4.1.3. Kısıtlanmış Yayılma Deneyi

Şekilde düzeneği gösterilen kısıtlanmış yayılma deneylerinin sonuçları tablo 4.3' de verilmektedir.

Betona lif katılması ile T_{50} süreleri artmış ve toplam yayılma azalmıştır. Bu göstergeler ışığında lif katılmasının betonun donatılar arasından geçiş özelliğini ve yayılmasını olumsuz etkilediği söylenebilir.

Lifsiz üretimlerde 0,24 su/çimento oranında yüksek viskoziteden dolayı betonun kısıtlanmış T_{50} süresi diğer su/çimento oranlarına göre yüksektir.



Şekil 4.3: kısıtlanmış yayılma deney düzeneği

Tablo 4.3: Kısıtlanmış Yayılma Testi Sonuçları

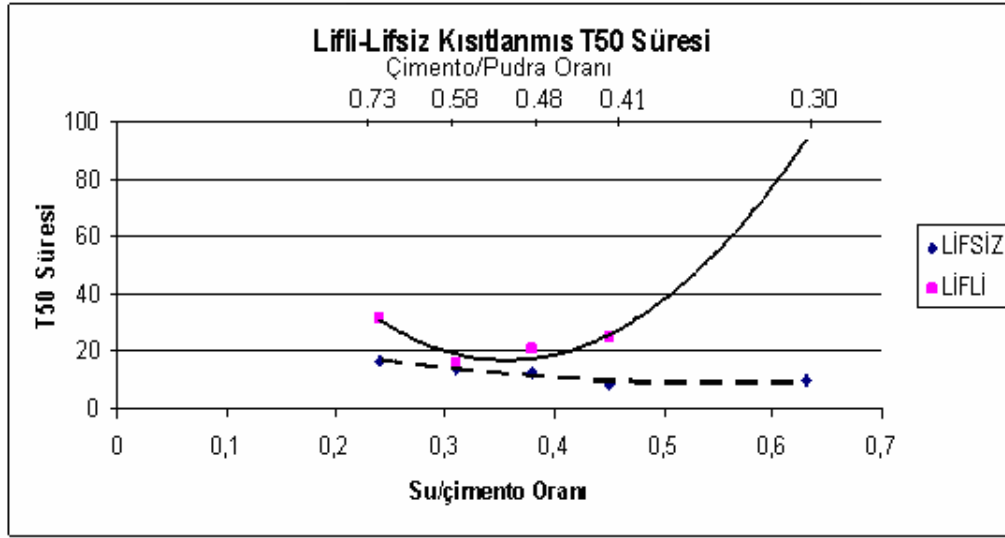
Numune Kodu	T_{50} (sn)	Toplam Yayılma (cm)
N0-0,24	17	62
N0-0,31	14	66
N0-0,38	13	68
N0-0,45	9	66
N0-0,63	10	65
N1-0,24	32	54
N1-0,31	16	60
N1-0,38	21	52
N1-0,45	25	52
N1-0,63	-	-

Kısıtlanmış yayılma deneyinde genel olarak çökme-yayılma deneyine benzer sonuçlar elde edilmiştir. T_{50} süresi çökme-yayılma deneyinde olduğu gibi 0,45 su/çimento oranından artma eğilimindedir. Bu durum azalan kohezyonun betonun belirli donatı aralığından geçerken agrega taşıma yeteneğini azaltmaya başladığını göstermektedir.

Lifli üretimlerde kısıtlanmış T_{50} süresinin genel olarak 0,38 su/çimento oranından sonra artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu durum artan su/çimento oranı ile ve kohezyonun azalması sonucunda, donatılar arasından akış sırasında betonun lifleri taşıyamadığını, liflerin taze betonda agrega hareketinin önünde engel oluşturduğunu göstermektedir.

Genel olarak lifsiz üretimlerde su/çimento oranı artması ile azalan viskoziteden dolayı T_{50} süresi düşmektedir. Lifli ve 0,63 su/çimento oranlı karışımda lifler kısıtlanmış yayılma deney aletinin donatılarında akışın engellenmesine neden olmuş ve 50 cm'lik yayılma sağlanamamıştır.

Yapılan çalışmada, betonun donatılar arasından geçebilme yeteneği bakımından lifli karışımlar için 0,31, lifsizler için ise 0,45 su/çimento oranının optimum olduğu görülmüştür.



Şekil 4.4: Kısıtlanmış Yayılma Testi Deney Sonuçları

4.1.4. V-funnel deneyi

V-funnel testi taze betonun, kendi ağırlığı altında dar bir kesitten geçebilme yeteneğini gösteren testtir. Bu deneyde taze betonun V-funnelin dar ağzından geçme süresi ölçülmüştür. Şekilde V-funnel deney aleti görülmektedir. Deney sonuçları tablo 4.4'de verilmiştir.

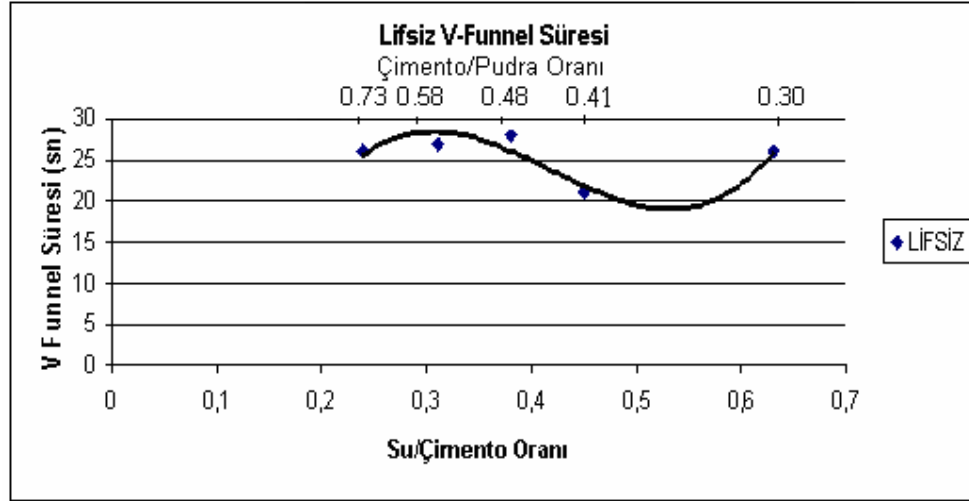


Şekil 4.5: V - funnel Test Aleti

Tablo 4.4: V- funnel Test Sonuçları

Numune Kodu	V-Funnel Süresi (sn)
N0-0,24	26
N0-0,31	27
N0-0,38	28
N0-0,45	21
N0-0,63	26
N1-0,24	98
N1-0,31	47
N1-0,38	41
N1-0,45	35
N1-0,63	-

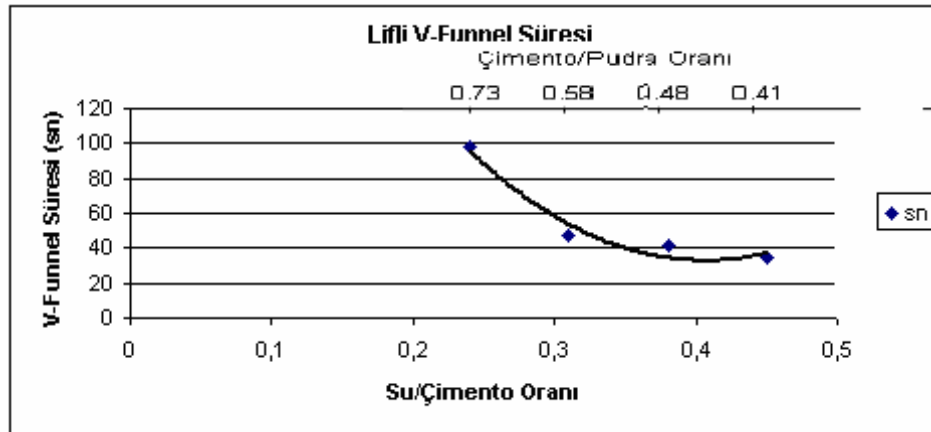
Lifsiz numunelerde 0,24 su/çimento oranından 0,38 su/çimento oranına kadar V-Funnel süresinin çok fazla değişmediği görülmektedir. 0,38 su/çimento oranından sonra ise beton işlenebilirliğinde betondaki su/çimento oranı etkili olmaya başlamış beton viskozitenin azalmasıyla V-funnel süresi düşmüştür. Yayılma ve kısıtlanmış yayılma deney sonuçlarında da görüldüğü gibi bu deneyde de 0,63 su/çimento oranında betonda kohezyon kaybı ve segregasyon tehlikesinin oluşmaya başlaması ile süre yine artış eğilimine geçmiştir.



Şekil 4.6: Lifsiz V-Funnel Testi Deney Sonuçları

0,63 su/çimento oranında beton viskozitesini kaybetmeye başlayınca agregalar betondan sıyrılmaya başlamış ve v-funnel aletinin dar çıkış ağzını bloke etmiştir ve v-funnel deney süresi artmıştır.

Lifli üretimlerinde v-funnel deney süresinin lifsiz üretilere göre belirgin biçimde yüksek olduğu görülmektedir. Buradan betona lif eklenmesinin, dar kesitlerden geçme yeteneğini azalttığı sonucu çıkarılabilir. Ayrıca lifli üretimlerde de lifsiz numunelere benzer olarak belli bir su/çimento oranından sonra beton işlenebilirliğinde betondaki su/çimento oranı etkili olmaya başlamış beton viskozitenin azalmasıyla v-funnel süresi düşmüştür. Ancak yine lifsiz numuneler de olduğu gibi 0,63 su/çimento oranlı numune de süre yine artmış ve kendiliğinden yerleşme özelliği kaybolmuştur.



Şekil 4.7: Lifli V-Funnel Testi Deney Sonuçları

4.1.5. U-Box Deneyi

Deneyde kullanılan U-box aleti şekil de gösterilmiştir. U-box deney sonuçları tablo 4.8 'de verilmiştir.



Şekil 4.8: U-box deney aleti

Tablo 4.5: U-box Test Sonuçları

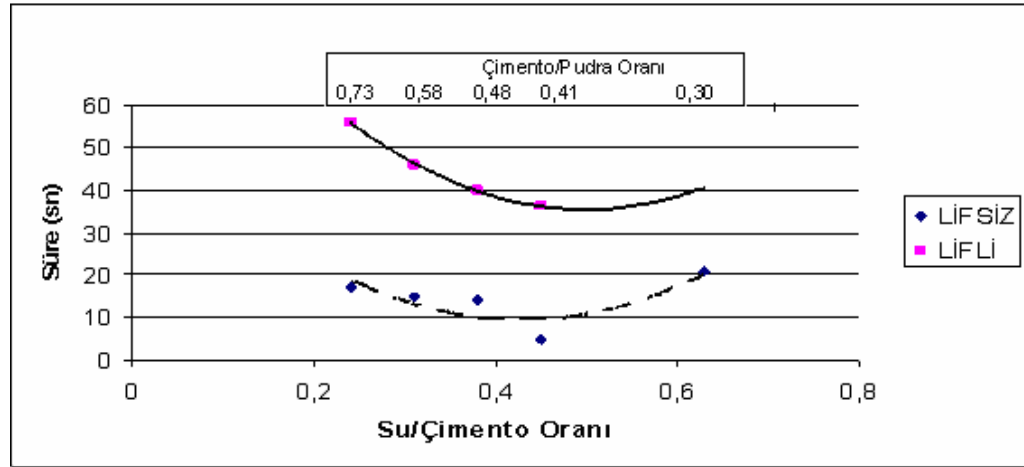
Numune Kodu	h_1/h_2	Akış Süresi (sn)
N0-0,24	1	17
N0-0,31	1	15
N0-0,38	1	14
N0-0,45	1	5
N0-0,63	0,94	21
N1-0,24	0,5	56
N1-0,31	0,76	46
N1-0,38	0,65	40
N1-0,45	0,54	36
N1-0,63	-	-

Deney aletinin alt kısmında betonun diğer kısma geçtiği açıklıkta donatılar bulunmaktadır. Bu çalışmada betonun kendi ağırlığı ile bir bölmeden diğerine geçişin tamamlandığı süre ve u-box kutusunun iki bölmesinde beton yüzeyine olan mesafeler incelenmiştir. Betonun u-box aletine konulan taraftaki yüksekliği h_1 olmak üzere h_1 ve h_2 değerleri ölçülmüş ve h_1/h_2 oranı hesaplanmıştır.

Tablo 4.5 incelendiğinde lifsiz numunelerde akış süresinin, artan su/çimento oranıyla beraber azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni düşük su/çimento oranlarında beton,

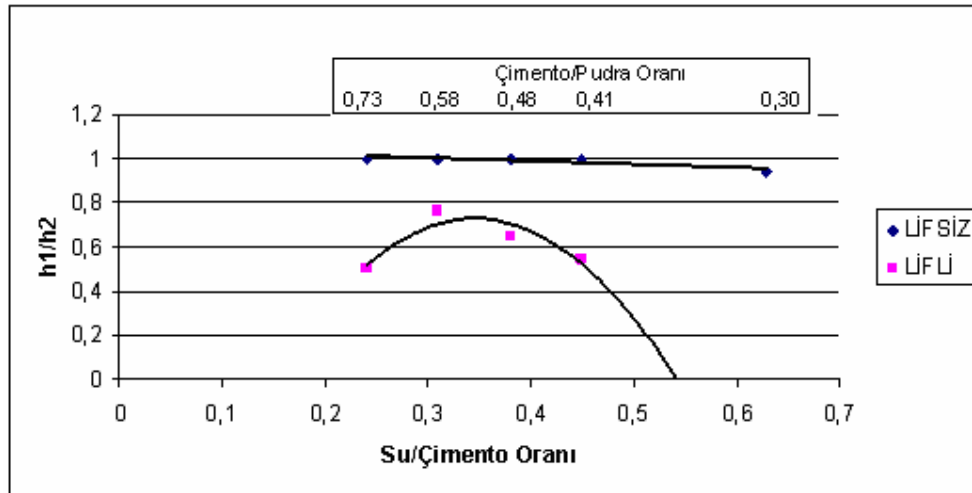
yüksek çimento dozajından dolayı daha viskozitenin yüksek olmasıyla açıklanabilir. Ancak yine 0,63 su / çimento oranında bu eğilim değişmiştir. Bu durum azalan çimentodan dolayı betonun kohezyon yeteneğinin önemli ölçüde kaybolduğunun ve yine betonun donatılı kısımdan geçişi esnasında agregaların betondan ayrışıp birikerek engel oluşturduğunun göstergesidir.

Lifli içeren bileşimlerde, geçiş süresi lifsizlere oranla çok daha uzun olmuştur. Bu durum, betona katılan liflerin işlenebilirliği olumsuz etkilediğini göstermektedir.



Şekil 4.9: Lifli-Lifsiz U-Box Durma Süreleri

Geçiş süresi açısından lifli ve lifsizler için 0,45 su/çimento oranı en verimli sonucu vermektedir. Lifli üretimlerde, yine 0,63 su/çimento oranında geçiş sağlanamamış ve değerlendirmeye alınmamıştır.



Şekil 4.10: Lifli-Lifsiz h1/h2 Oranları

h_1/h_2 oranının işlenebilirliği yüksek betonlarda 1'e yakın olması beklenmektedir. Lifsiz üretimler için h_1/h_2 oranı 1 olarak gözlenmiş ve artan su/çimento oranıyla oranda pek değişme olmadığı görülmüştür. Su/çimento oranı 0,63 olan numune de ise h_1/h_2 oranı 0,94'e düşmüştür.

Lifli üretimlerde 0,24 su/çimento oranında h_1/h_2 oranı 0,5 mertebesindeyken 0,38'de 0,8 değerine yaklaşmış ve tekrar 0,63 su/çimento oranında 0,5 seviyelerine düşmüştür. Burada çok düşük ve yüksek çimento dozajlarının betonun hareketini zorlaştırabildiği burada optimum bir değer de kalınması gerekliliği görülmektedir.

Yüksek dozajda çimentonun betonun kohezyonunu önemli şekilde yükselttiği ve lifli betonun hareketini zorlaştırdığı azalan çimento ile de yüksek su/çimento oranlarında ise azalan kohezyondan dolayı betonun içindeki malzemeyi taşıma yeteneğini azalttığı ve lifler betondan sıyrılıp u-box kutusunun altındaki donatılı geçişi tıkadığı ve sonuçta da h_1/h_2 oranının düştüğü anlaşılmaktadır. Bu durumun oluşmasında hiç şüphesiz lif boyutunun, lif miktarının ve donatı aralığının etkisi de göz önünde tutulmalıdır. Daha düşük lif içeriklerinde daha kısa liflerle, daha büyük donatı aralıklarından geçişlerin daha yüksek h_1/h_2 oranları vermesi muhtemeldir.

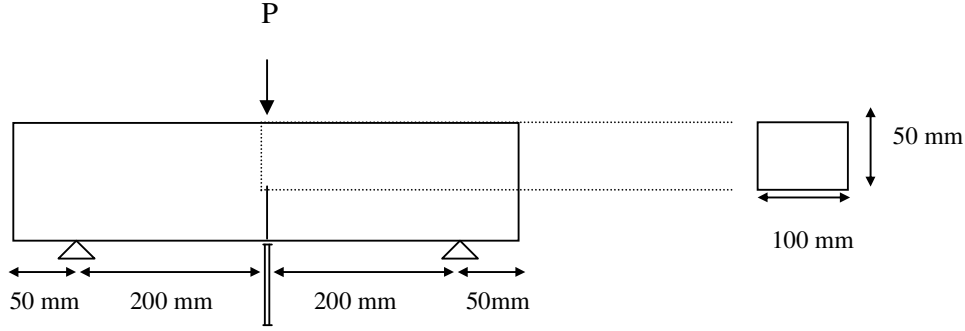
4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Bu tez çalışmasında kalıplara alınan ve bir gün süreyle kalıpta bekletilen numuneler, sertleşmiş beton deneylerinin yapılacağı güne kadar kirece doymun havuzlarda bekletilmiştir.

4.2.1. RILEM kırılma enerjisi deneyinden elde edilen sonuçlar

Numunelerin kırılma enerjileri INSTRON 5500R marka deplasman kontrollü yükleme makinesi kullanılarak yapılmıştır. Kırılma enerjisi deneyleri daha önce boyutları verilmiş kiriş numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda yük-sehim eğrileri elde edilerek, çelik lif eklenmesinin, su/ince malzeme oranının sabit tutulmasının, çimento içeriğinin ve su/çimento oranının değişiminin eğilme dayanımı, kırılma enerjisi, süneklik gibi mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

RILEM kırılma enerjisi deneyine başlamadan önce kirişlerin orta noktalarına çatlakların burada oluşması için 50 mm derinliğinde çentik açılmış, numunelerin etkin kesit alanı 100 mm x 50 mm olarak seçilerek ve kiriş numunelerin ortasından tekil yük uygulanmıştır. deney düzeneği şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11: RILEM kırılma enerjisi deney düzeneği

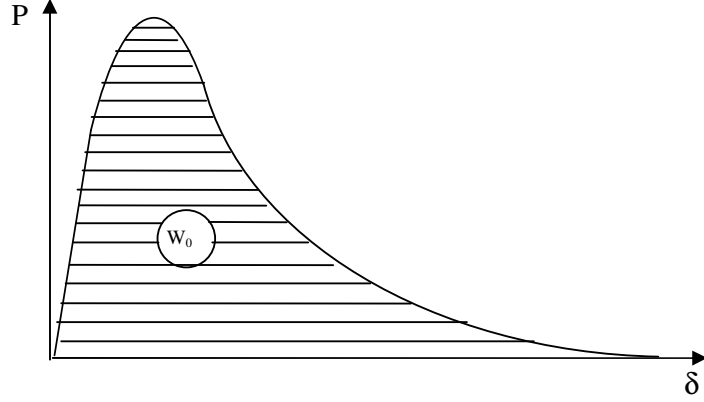
Deneyde numune yan yüzeyine, açılmış olan çentiğe yakın olmak üzere bir korniyer eklenmiştir. Bu korniyere sehim ölçmek amacı lineer değişken diferansiyel transformatör (Linear Variable Differential Transformer - LVDT) yerleştirilmiştir.

Deney esnasında kirişe uygulanan yük ve yüke karşı gelen deplasmanlar LVDT sayesinde kaydedilerek bilgisayar ortamında yük-deplasman grafikleri çizilmiştir. Kirişlere ait yük-deplasman grafikleri ekler bölümünde verilmiştir.

4.2.1.1 RILEM kırılma enerjisinin hesaplanması

RILEM kırılma enerjisi deneyinde, numuneye ait yük ve deplasman değerleri kaydedilir. Daha sonra bu verilerden yük-sehim grafikleri elde edilir. Bu grafiklerin altında kalan alan, kiriş kırılırken yapılan işi diğer bir ifade ile harcanan enerjiyi vermektedir.

Bu tez çalışmasında sabit su/ince malzeme oranında değişik su/çimento değerlerine sahip lifsiz ve lifli betonların kırılma enerjileri incelenmiştir. Şekil 4.12 'de örnek bir yük-sehim eğrisi görülmektedir.



Şekil 4.12: Yük-Sehim grafiği ve kırılma enerjisi

Kırılma enerjisi hesabı aşağıdaki denklem ile yapılabilmektedir.

$$G_F = (W_o + mg\delta_o) / A_{lig} \quad (4.1)$$

W_o = Yük-Sehim eğrisi altında kalan alan (N/m)

m = Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı (kg)

g = Yer çekimi ivmesi ($9,81 \text{ m/sn}^2$)

δ_o = Kirişin göçme sırasındaki deformasyonu (m)

A_{lig} = Etkin kesit alanı (m^2)

4.2.1.2 RILEM kırılma enerjisi deneylerinden net eğilme dayanımlarının hesaplanması

Numunelerin eğilme dayanımları aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$F_{net} = (3PL) / 2BD^2 \quad (4.2)$$

F_{net} = Net eğilme dayanımı

P = Kırılma yükü (N)

L = Mesnetler arası uzaklık (mm)

B = Numune kesitinin genişliği (mm)

D = Numune kesitinin yüksekliği (mm)

Tablo 4.8’de yapılan deneyler sonucunda hesaplanan kırılma enerjileri ve net eğilme dayanımları verilmektedir.

4.2.1.3 RILEM deneylerinden karakteristik boy (l_{ch}) hesaplanması

$$L_{ch} = (E \cdot G_f) / (T^2) \quad (4.3)$$

E = Elastisite modülü (GPa)

T= Yarma çekme dayanımı (MPa)

G_f = Kırılma enerjisi (N/m)

L_{ch} = Karakteristik çatlak boyu (mm)

Tablo 4.8’de yapılan deneyler sonucunda hesaplanan karakteristik boy (l_{ch}) değerleri verilmiştir.

4.2.2. Silindir basınç deneyi

Silindir basınç deneyleri, ELE marka 3000 kN kapasiteli yükleme makinesiyle gerçekleştirilmiştir. Basınç deneyleri çapı 10 cm ve yüksekliği 20 cm’ lik silindir numuneler üzerinde yapılmıştır. Ayrıca her 10 kN’ luk yüke karşı gelen eksenel yer değiştirme değerleri okunmuştur. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde maksimum yükün %33’üne kadar olan kısmın eğiminden basınç elastisite modülü hesaplanmıştır. Silindir basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımları ve elastisite modülü değerleri tablo 4.6 da verilmektedir.

4.2.3. Yarma-çekme deneyi

Yarma-çekme deneyleri 150 mm çaplı, 60 mm yüksekliğinde disk numuneler üzerinde yapılmıştır. Numunelere tahta çıtalar yardımıyla çizgisel yük uygulanmıştır. Bu yük değerleri kullanılarak aşağıdaki bağıntı yardımıyla numunelerin yarma-çekme dayanımları bulunmuştur

$$\sigma = \frac{2P}{\pi DL} \quad (4.4)$$

σ ; Yarma-Çekme dayanımı (MPa),

P; Yük (N),

D; Çap (mm),

L;Yükseklik (mm)

Yarma-çekme dayanım değerleri Tablo 4.7’de verilmiştir.

4.3. Sertleşmiş Beton Deneylerinin Sonuç ve Değerlendirmeleri

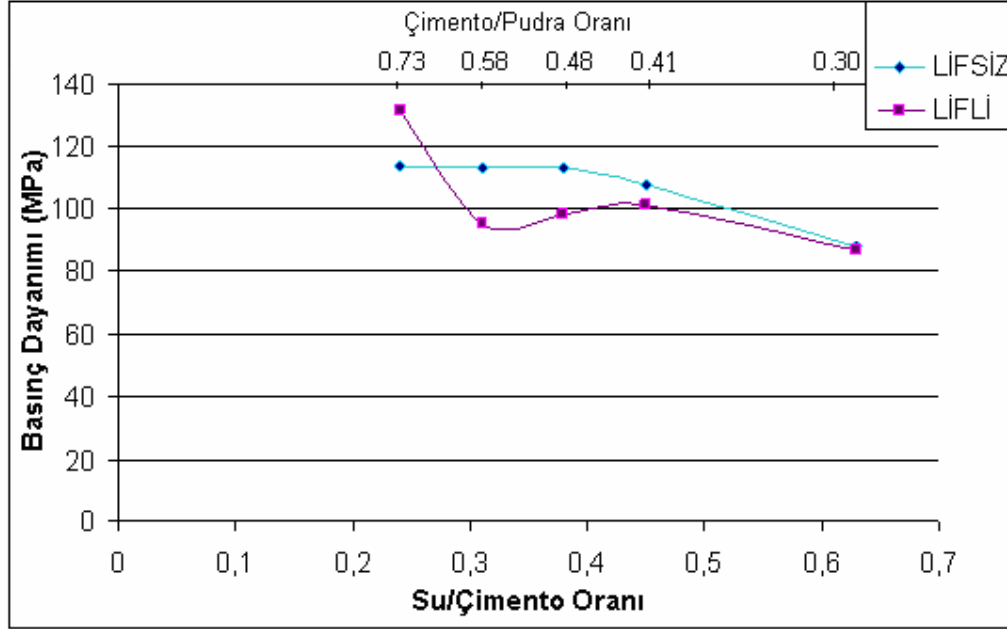
4.3.1. Silindir Basınç Deneyi Sonuç ve Değerlendirmeleri

Tablo 4.6: Silindir Basınç Deneyi Sonuçları

Numune Kodu	Basınç Mukavemeti (MPa)	Basınç Elastisite Modülü (GPa)
N0-0,24	113,7	47,7
N0-0,31	113,2	47,9
N0-0,38	113	47,7
N0-0,45	107,7	46,4
N0-0,63	88	42,5
N2-0,24	131,9	47,9
N2-0,31	95,2	41,9
N2-0,38	98,3	44
N2-0,45	101,2	44,7
N2-0,63	86,8	42,2

Bu çalışmada sabit su/ince malzeme oranında çimento miktarının azalmasıyla buna ikameli olarak silis unu eklenmiş ancak çimento miktarı düşürüldüğünden su/çimento oranı arttırılmıştır. Genel olarak su/çimento oranının artması, betondaki suyun buharlaşmasıyla beraber oluşacak kılcal çatlakların miktarını arttırıp betonun basınç dayanımını düşürmektedir. 0,24 su/çimento oranında 833 kg, 0,31 su/çimento oranında 645 kg ve 0,38 su/çimento oranında ise 526 kg çimento kullanılmış ve bu azalan çimento miktarı silis unu kullanılarak karşılanmıştır. Tablo 4.6’da da görüldüğü gibi bu çalışmada lifsiz numunelerde 0,24 su/çimento oranından 0,38 su/çimento oranına düşülmesine rağmen basınç dayanımında belirgin bir düşüş olmamıştır. Buradan lifsiz numunelerde 0,24 ve 0,38 su/çimento oranları arasında hidrate olmayan çimento taneleriyle, çimento ile ikameli olarak kullanılan silis ununun basınç altındaki etkilerinin benzer olduğu ve bu mekanizmanın boşluk dolduruculuk olduğu görülmektedir. 0,45 su/çimento oranında 0,24 su/çimento oranına sahip numunenin basınç dayanımına göre ancak % 6 lık bir düşüş

gözlenmektedir. 0,63 su/çimento oranında ise bu düşüş % 23 seviyelerine yükselmektedir.



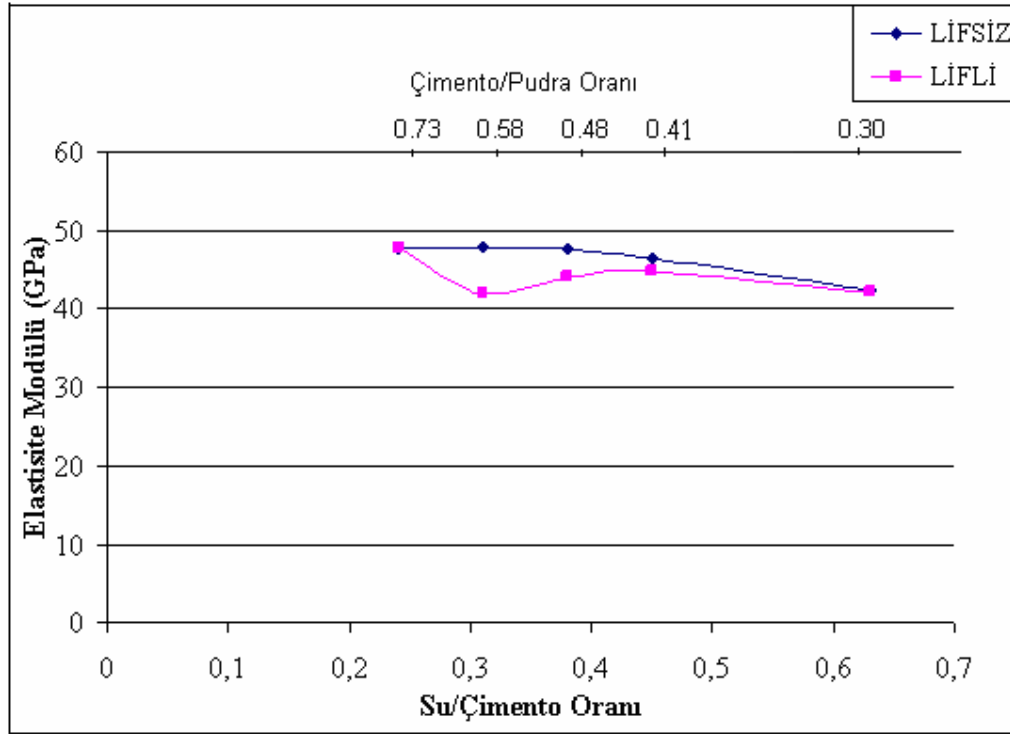
Şekil 4.13: Lifsiz-Lifli Numunelerde Basınç Dayanımı Grafiği

Bu çalışmada ayrıca liflerin basınç dayanımına etkisi de araştırılmıştır. Basınç altında malzeme göçmesinin şekil değiştirme kapasitesinin aşılması veya kayma gerilmelerinin malzeme dayanımını aşmasından dolayı olduğu bilinmektedir. Liflerin bu kayma gerilmelerini alacak şekilde özel olarak yönlendirilmiş olması, malzemenin basınç dayanımını artıracak muhtemeldir ancak bu tez çalışmasında kullanılan çelik liflere yönlendirme yapılmamış diziliş tamamen rastlantısal oluşmuştur. Lif kullanımı basınç altında betondaki çatlak oluşum ve yayılması açısından faydalı olsa da aynı zamanda lif ve beton matrisi arasında daha fazla kusur oluşması nedeniyle basınç mukavemetine negatif etki edebilmektedir.

Lifli numuneler kendi aralarına değerlendirildiğinde 0,24 su/çimento oranında yüksek çimento dozajı ve dolayısı ile çok yüksek aderans nedeni ile basınç mukavemeti yüksek çıkmıştır. 0,24 oranından sonra belirgin bir düşüş gözlenmiş 0,31 su/çimento oranından sonra basınç mukavemetleri 0,45 değerlerine kadar bir miktar artmıştır. Lifsiz üretimler de olduğu gibi en düşük dayanım 0,63 su/çimento oranında görülmüştür. Burada liflerin basınç dayanıma etkisinin lif yönelimi ve aderansa bağlı olarak değişeceği sonucu çıkmaktadır. 0,24 su/çimento oranındaki numunede yüksek dayanımlı lif kullanımı çok yüksek aderans dolayısıyla yalın

betonlara göre dayanım miktarını arttırmış ancak artan su/çimento oranlarında liflerin kusur etkisi baskın hale geçerek lifli numunelerin dayanımları yalnız betonlardan düşük hale getirmiştir. Bu fark yüksek su/çimento oranlarında kapanmaktadır.

Bu tez çalışmasında basınç dayanımı göz önüne alındığında lifsiz numunelere kıyasla kullanılan liflerin, dayanım, boyut, şekil, miktarı çerçevesinde kusur etkisinin, liflerin beton üzerindeki pozitif etkilerine göre genelde baskın gelmiş ve basınç mukavemetleri bir miktar düşmüştür.



Şekil 4.14: Lifsiz-Lifli Basınç Elastisite Modülü Grafiği

Gerek lifsiz, gerekse lifli üretimler açısından bakıldığında elastisite modülü grafiği genel yapı itibarıyla basınç mukavemeti grafiğine benzemektedir. Şekil 4.14 incelendiğinde lifli üretimlerin elastisite modüllerinin lifsizlere göre daha düşük olduğu görülmektedir.

Grafikten, lifsiz üretimlerde su/çimento oranının artmasıyla, elastisite modülünün bir miktar azaldığını ve malzemenin sünekleştiği görülmektedir.

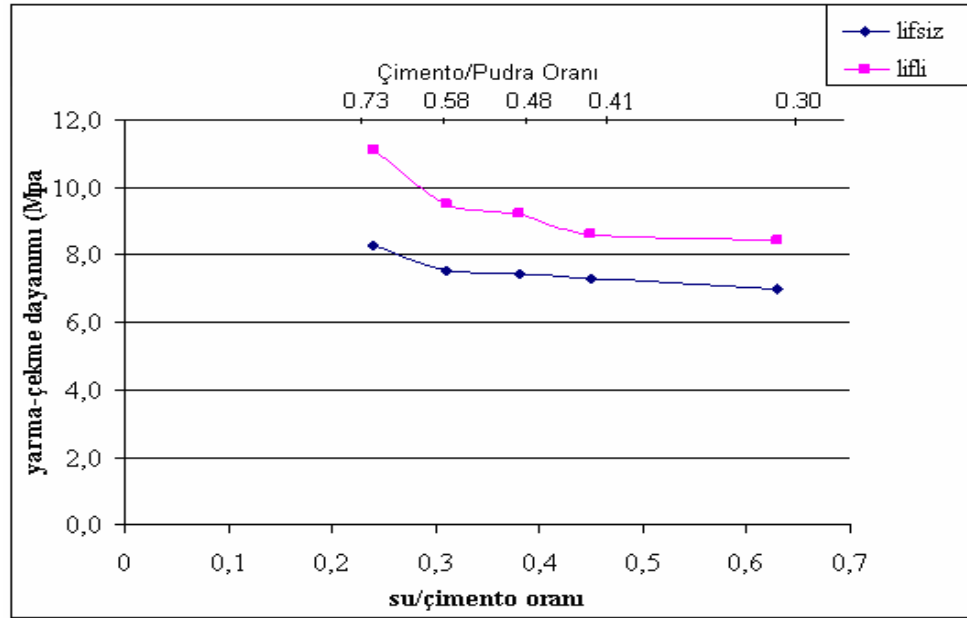
4.3.2. Yarma çekme deneyi sonuç ve değerlendirmeleri

Yarma-çekme deneyi sonuçları Tablo 4.7' de verilmiştir.

Tablo 4.7 : Yarma-çekme deney sonuçları

Numune Kodu	Yarma Çekme Dayanımı (MPa)
N0-0,24	8,3
N0-0,31	7,5
N0-0,38	7,5
N0-0,45	7,3
N0-0,63	7,0
N2-0,24	11,1
N2-0,31	9,5
N2-0,38	9,2
N2-0,45	8,6
N2-0,63	8,4

Tablo 4.7 incelendiğinde lifli ve lifsiz numunelerin yarma-çekme dayanımının artan su/çimento oranıyla beraber azaldığı görülmektedir. Bu azalma şekil 4.15'de daha net görülebilmektedir.



Şekil 4.15: Lifsiz-Lifli Numunelerde Yarma-Çekme Dayanım Grafiği

Lifsiz numuneler üzerinde yapılan deneyler çimento yerine kullanılan öğütülmüş silis unu kullanımı çekme dayanımına olumlu etki katamamıştır. Bu durum, basınç dayanımına katkısı olan yalnızca boşluk doldurucu etkiye sahip silis unu gibi bileşenlerin, çekme dayanımı üzerinde benzer olumlu bir etkiyi sergileyemeyeceğini

ifade etmektedir. Ayrıca çimento miktarının azalmasıyla yerine konulan silis unu da hidrate kalsiyum silikat yapının sürekliliğini bozabilmektedir bunun da basınç deneylerinde lifsiz numunelerde karşımıza çıkmayan bu sürekli düşüşün nedeni olabileceği düşünülmektedir.

Lifli üretimler incelendiğinde de lifsiz numunelere benzer bir şekilde, yarma-çekme dayanımlarının artan su/çimento oranı ve azalan aderans ile azalmakta olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca lifli üretimlerin, yarma-çekme dayanımlarının lifsizlere göre daha fazla olduğu görülmektedir. En düşük yarma çekme dayanımına sahip lifli 0,63 su/çimento oranlı numune lifsiz ve en yüksek yarma çekme dayanımına sahip 0,24 su/çimento oranlı numunenin dayanımından daha yüksektir. Buda liflerin betonun çekme dayanımına olan olumlu etkisini göstermektedir. Liflerin çatlak oluşumunu geciktirdiği, oluşan çatlaklar arasında köprü vazifesi görerek ve matris faz ile lifler arasındaki aderans sayesinde çekme gerilmelerinin bir kısmını alarak betonda çekme dayanımını artırdığı görülmektedir.

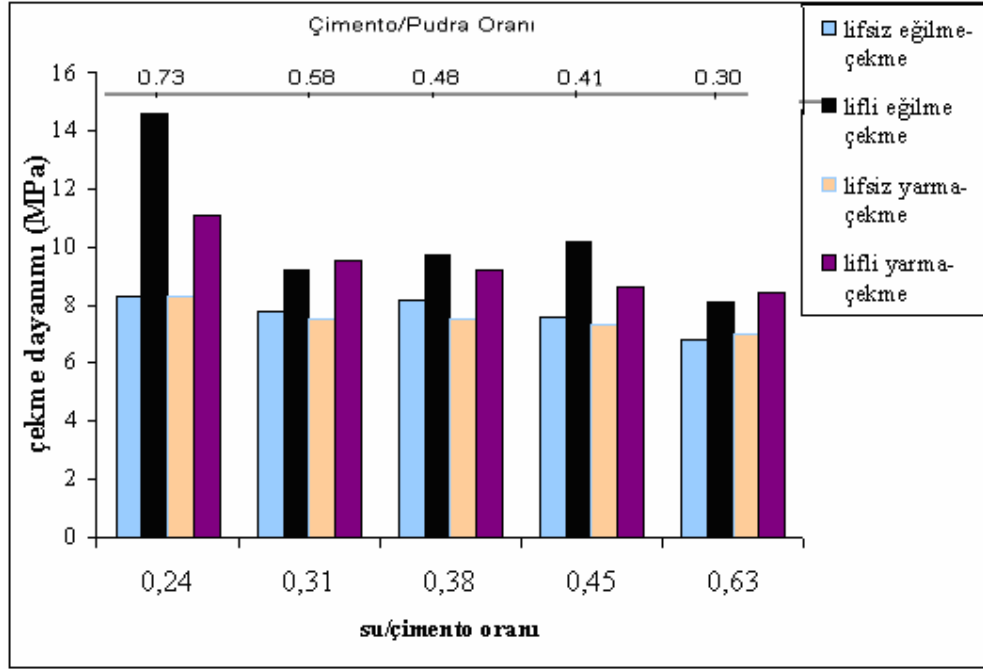
4.3.3. RILEM kırılma enerjisi deney sonuçları ve değerlendirmeleri

RILEM kırılma enerjisi deneylerinden elde edilen kırılma enerjisi, eğilme dayanımı, karakteristik boy değerleri tablo 4.8’de gösterilmiştir.

Tablo 4.8: Kırılma Enerjileri, Net Eğilme Dayanımları ve karakteristik boy değerleri

Numune Kodu	Net Eğilme Dayanımı (MPa)	Karakteristik Boy (mm)	Özgül Kırılma Enerjisi (N/m)
N0-0,24	8,3	64	93
N0-0,31	7,8	73	87
N0-0,38	8,2	79	92
N0-0,45	7,6	92	106
N0-0,63	6,8	96	108
N2-0,24	14,6	2474	6374
N2-0,31	9,2	1388	2968
N2-0,38	9,7	1829	3481
N2-0,45	10,2	1815	3002
N2-0,63	8,1	1786	2966

RILEM kırılma enerjisi deneyleriyle elde edilen verilerden bir tanesi de numunelerin eğilme-çekme dayanımlarıdır. Bu deneyde elde edilen sonuçlar ile yarma-çekme deneyinde elde edilen sonuçlar betonun çekme gerilmesi altındaki davranışını ortak değerlendirilmesi bakımından önemlidir. Bu davranış şekil 4.16’da görülebilmektedir.



Şekil 4.16: Yüksek dayanımlı lif içeren ve lifsiz numunelerde eğilme-çekme ve yarma çekme dayanımları

Genel olarak artan su/çimento oranı ile lifli ve lifsiz numunelerde çekme dayanımlarının düştüğü söylenebilir. Lifsiz numunelerde 0,24 su/çimento oranında 8,3 MPa olan çekme dayanımı, su/çimento oranı 0,63 e ulaştığında 6,8 MPa değerine düşmektedir. Bu geçiş yarma-çekme dayanım grafiğinde de net bir biçimde görülmektedir. Çekme-eğilme ve yarma-çekme grafiği lifli ve lifsiz üretimler için değerlendirildiğinde ise, lifli üretimlerin lifsizlere göre daha yüksek bir performans sergiledikleri görülmektedir. Ayrıca diğer bir eğilimde lifli numuneler ve lifsiz numuneler arasındaki çekme gerilmeleri farkının azalan çimento dozajı ve artan su/çimento oranıyla azalmasıdır.

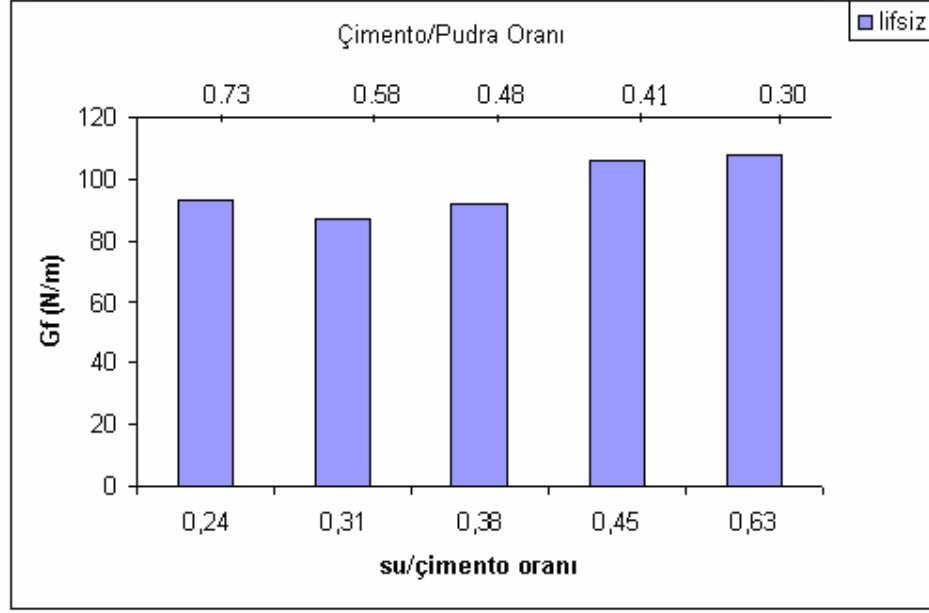
Azalan çimento miktarının hacimce eşit miktarda, çimento ile aynı incelikteki silis unu ile karşılanmış olması betonun çekme dayanımını etkilemesinin yanı sıra betonun liflerden yararlanma yeteneğini de etkilemiştir. Bu durum matris-lif

arasındaki aderans ile ilişkilidir. Üretilen karışımlardan en fazla çimento dozajı 0,24 su/çimento oranına sahip numunede olmasından dolayı liflerle olan aderans bu üretimde yüksek olmuş ve lifli - lifsiz üretimler arasındaki en büyük fark oluşmuştur. Su/çimento oranı arttıkça çimento dozajı düşmüş matris sürekliliği azalmış ve liflerle sağlanan aderans düşmüştür. Dolayısıyla matrisin liflere aktardığı gerilmelerde azalma oluşmuştur.

Lifsiz üretimlerde özgül kırılma enerjileri 0,24 su/çimento oranından 0,31 su/çimento oranına geçerken bir miktar düşmüş, 0,31 su/çimento oranından itibaren ise su/çimento oranında artma ile beraber yükselme eğilimi göstermiştir. Düşük su/çimento oranına sahip numunelerde, çimento dozajı yüksek olduğundan dolayı beton matrisi diğerlerine göre daha güçlüdür ve buna bağlı olarak daha gevrekler. Numune, yüklenmeye başladığında elastik kapasitesi nispetinde sehim yapmaya başlamış ve taşıyabileceği maksimum yükten sonra malzeme içindeki gerilmelere karşı koyamayıp gerilmenin maksimum olduğu yerden çatlamıştır. Çatlak ilerlemesi esnasında önüne bir agrega çıkması durumunda güçlü matris ve agrega-matriks ara yüzü sebebiyle agregayı kırarak ilerlemiştir. Böylece çatlak bulduğu en zayıf yerden, en kısa yolu takip etmiştir. Özetle, düşük su/çimento oranlı karışımlarda matriks güçlü olduğu için kesitin taşıdığı yük diğerlerine göre yüksek olur ve çatlak en kısa yoldan ilerliyerek kesiti geçer ve malzeme dayanıklı ama gevrek bir nitelik kazanır.

Yüksek su/çimento oranlı numunelerde ise karışımlardaki çimento dozajı daha düşük olduğu için matris yapısı daha zayıftır. Böylece matris daha düşük gerilmelere dayanabildiği için kaldırabileceği yük de daha düşük olmuştur. Bu numunelerde çatlak, bir agrega ile karşılaştığında agregayı kırmak yerine agrega etrafından dolanmaktadır. Bu da çatlağın daha çok hareket etmesine sebep olmuş ve malzemeyi sünekleştirmiştir. Sünekliğin artmasıyla lifsiz üretimlerde kırılma enerjisindeki artış şekil 4.17 de görülmektedir.

Lifli üretimlerin kırılma enerjisi lifsizlere göre çok daha fazladır. Ayrıca lifli numunelerde lifsiz üretimlerden farklı bir eğilim vardır. En çok enerji, en düşük su/çimento oranında yutulmakta olup su/çimento oranı arttıkça absorbe edilen enerji de genelde azalmaktadır. Çimento dozajının yüksek olması nedeniyle en güçlü matris yapısına sahip 0,24 su/çimento oranlı lifli numunelerin kırılma enerjisi yalın numuneye oranla yaklaşık 70 kat daha yüksektir. 0,63 su/çimento oranında bu değer 27 kattır.

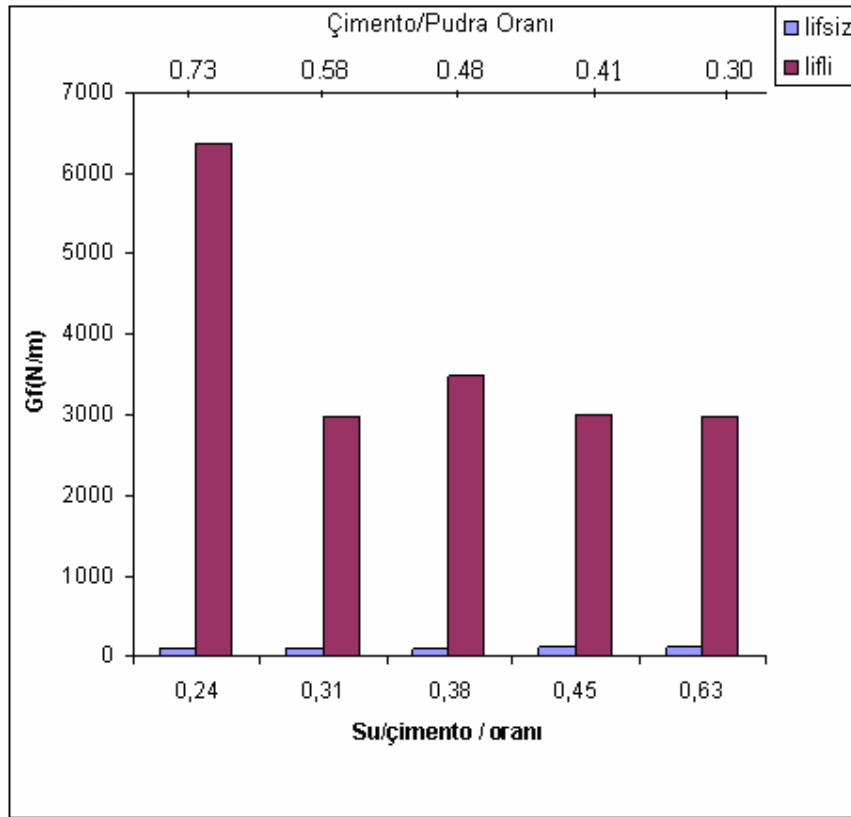


Şekil 4.17: Lifsiz Numunelerde Özgül Kırılma Enerjisi Grafiği

Lif ve matris arasındaki elastisite modülü farkından dolayı gerilme altında lif yüzeyi boyunca kayma gerilmeleri oluşur. Bununla birlikte lifler de matrisin aktardığı gerilmeleri taşır. Çatlak oluşumu başladıktan sonra ana taşıyıcı olarak liflerin yük taşıyabilmesi ve lifler arasında yük transferi için lif-matris aderansının çok iyi olması gerekir. Matris taşıma kapasitesinin aşılması ile matrisin en zayıf noktasında çatlak oluşumu başlamaktadır. Çatlak oluşumunu geciktiren lifler çatlak oluşuktan sonra ise köprü vazifesi görerek gerilmeleri sağlam bölümlere aktarmaktadır. Bu yüzden lifli numunelerde kırılma enerjisi oldukça yüksektir. Matris yapısı güçlendikçe lifler ve matris arasındaki aderans güçlenmektedir. Kullanılan bağlayıcı miktarının artmasıyla birlikte artan lif-matris aderansı göçme davranışını değiştirmekte ve davranışın lif sıyrılmasından çok daha az enerji yutan lif kopması ile gerçekleşmesine neden olmaktadır. Aderans çok güçlü olduğunda yada lifin kopma mukavemeti düşük olduğunda liflerin çekme kapasitesi aşılar ve lifler kopabilir. Bu durumda sehim ancak lifin kopma aşamasında yaptığı şekil değiştirme kadar olabilir. Beklendiği gibi aynı yükleme şartları altında lifin kopması, numunenin daha yüksek dayanım sergilemesine sebep olsa da sıyrılan lifli üretimler kadar sehim yapamadığı için yuttukları enerjide daha düşük olacaktır. Kullanılan lifin dayanımının artması durumunda ise ancak yeterli aderans sağlandığı takdirde sıyrılma ile gerçekleşen

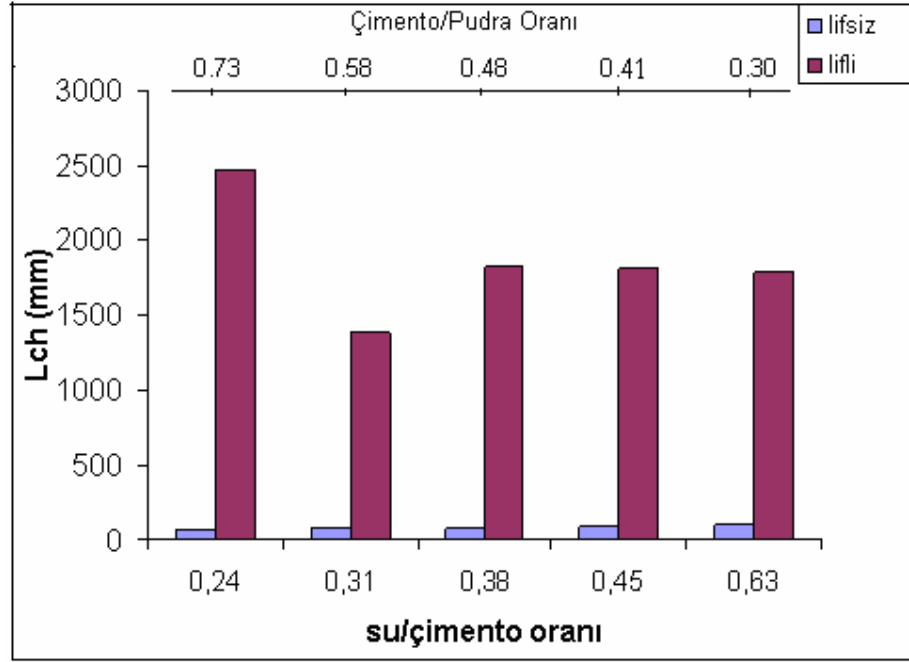
göçme davranışı sonucu düşük dayanımlı liflerin kullanıldığı duruma göre daha fazla enerji yutulmasına izin vermektedir.

Bu tez çalışmasında en yüksek özgül kırılma enerjisi, matrisi en güçlü olan en düşük su/çimento oranlı numunelerde meydana gelmiştir. Bu durum, matrisin güçlü olmasına rağmen yüksek dayanımlı liflerde baskın davranışın sıyrılma şeklinde olduğunun göstergesidir. Şekil 4.18’de lifli ve lifsiz numunelerin özgül kırılma enerjisi grafiği verilmiştir.



Şekil 4.18: Lifsiz-Lifli Özgül Kırılma Enerjisi Grafiği

Hacimce %1 olarak kullanılan lif miktarı belli bir oranın altında olsa idi yükleme altında iken lif başına düşen gerilme miktarı daha yüksek olacağından, su/çimento oranı düşük üretimlerde baskın lif hareketinin kopma şeklinde olması muhtemel olacaktı. Yüksek su/çimento oranlarında azalan aderans sayesinde kopma yerine sıyrılma baskın bir hareket sergileyecekti. Dolayısıyla lifli üretimler açısından en yüksek enerji yutulması lifsiz üretimlerde olduğu gibi matrisin en zayıf, aderansın en düşük, sıyrılmanın en yüksek olacağı 0,63 su/çimento oranında görülecekti.



Şekil 4.19: Lifsiz-Lifli Karakteristik Boy Grafiği

Lifli ve lifsiz üretimler için karakteristik boy (l_{ch}) grafikleri incelendiğinde, lifli üretimlerin karakteristik boylarının lifsiz üretilere göre çok daha fazla olduğu görülmektedir. Lifsiz üretimler de artan su/çimento oranıyla birlikte karakteristik boy artma eğiliminde iken lifli numunelerde artan su/çimento oranıyla beraber karakteristik boyda genel bir azalma görülmüştür. Grafik incelendiğinde genel olarak şekil 4.19’ da gösterilen kırılma enerjisi grafiği ile benzer özellikler taşıdığı görülmektedir. Bu sebeple, bu tez çalışması çerçevesinde üretilen numuneler için l_{ch} karakteristik boyunun kırılma enerjisinin bir fonksiyonudur denebilir. Kırılma enerjisini etkileyen iç dinamiklerin karakteristik boyu da benzer şekilde etkilediği görülmüştür.

5. GENEL SONUÇLAR

Sabit hacimsel 0,52 su/ince malzeme oranıyla üretilen yalın betonlarda, çimento miktarı 0,24 su/çimento oranında 833 kg' dan, 0,38 su/çimento oranında 526 kg'a düşmesine rağmen numunelerin basınç dayanımlarında azalma görülmemiştir. Su/çimento oranı 0,45 olduğunda ise ancak % 6'lık bir düşüş görülmüştür. Fakat lif eklenmesinin basınç dayanımını kararlı bir şekilde değiştirmedeği yüksek dayanımlı lifler kullanılırken gözlemlenmiştir. Basınç dayanımı göz önüne alındığında lifsiz numunelere kıyasla kullanılan liflerin, dayanım, boyut, şekil, miktarı çerçevesinde kusur etkisinin, liflerin beton üzerindeki pozitif etkilerine göre genelde baskın gelmiş ve basınç mukavemetleri bir miktar düşmüştür.

Lifsiz numunelerde yarma-çekme dayanımları azalan çimento dozajı ile düşmüştür. Lifli üretimler incelendiğinde de lifsiz numunelere benzer bir şekilde, yarma-çekme dayanımlarının artan su/çimento oranı ve azalan aderans ile azalmakta olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca lifli üretimlerin, yarma-çekme dayanımlarının lifsizlere göre daha fazla olduğu görülmektedir. En düşük yarma çekme dayanımına sahip lifli 0,63 su/çimento oranlı numune lifsiz ve en yüksek yarma çekme dayanımına sahip 0,24 su/çimento oranlı numunenin dayanımından daha yüksektir.

Genel olarak artan su/çimento oranı ile lifli ve lifsiz numunelerde çekme dayanımlarının düştüğü söylenebilir. Lifsiz numunelerde 0,24 su/çimento oranında 8,3 MPa olan çekme dayanımı, su/çimento oranı 0,63 e ulaştığında 6,8 MPa değerine düşmektedir. Lifli üretimlerin lifsizlere göre daha yüksek bir performans sergiledikleri görülmüştür. Ayrıca diğer bir eğilimde lifli numuneler ve lifsiz numuneler arasındaki çekme gerilmeleri farkının azalan çimento dozajı ve artan su/çimento oranıyla azalmasıdır.

Üretimler özgül kırılma enerjisi açısından incelendiğinde lifsiz üretimlerin 0,24 ve 0,38 su/çimento oranları arasında kırılma enerjilerinin genel olarak aynı kaldığı, 0,45 ve 0,63 su/çimento oranlarında ise diğer üretimlere göre fark edilir bir artış olduğu

görülmektedir. 0,24 su/çimento oranında 93 N/m olan özgül kırılma enerjisi 0,63 su/çimento oranında ise 108 N/m'ye ulaşarak %16'lık bir artış sağlanmıştır.

Lifli üretimlerin kırılma enerjisi lifsizlere göre çok daha fazladır. Ayrıca lifli numunelerde lifsiz üretimlerden farklı bir eğilim vardır. En çok enerji, en düşük su/çimento oranında yutulmakta olup su/çimento oranı arttıkça absorbe edilen enerji de genelde azalmaktadır. Çimento dozajının yüksek olması nedeniyle en güçlü matris yapısına sahip 0,24 su/çimento oranlı lifli numunelerin kırılma enerjisi yalın numuneye oranla yaklaşık 70 kat daha yüksektir. 0,63 su/çimento oranında bu değer 27 kattır.

Betona lif ilavesinin dayanımdan çok betonun yuttuğu enerjiyi artırdığı görülmüştür.

Numunelerin, taze haldeyken serbest yayılma özellikleri incelendiğinde, lifsiz bileşimlerin kendiliğinden yerleşen beton özeliği sergiledikleri görülmüş ayrıca betona mevcut içerik ve geometride lif katılmasının işlenebilirliği negatif etkilediği görülmüştür.

Üretilen lifsiz numunelerin, daralan kesitten (V-hunisi) ve donatılar arasından geçiş (kısıtlanmış yayılma ve U-kutusu) yeteneklerinin, kullanılan çimentonun azalmasıyla beraber azalan kohezyondan dolayı düştüğü görülmüştür. Betona mevcut içerik ve geometride lif katılmasının bahsedilen yetenekleri olumsuz etkilediği görülmüştür. Gerek lifli ve gerek lifsiz üretimlerde, taze beton özellikleri açısından en optimum sonuçlar 0,38 ve 0,45 su/çimento oranına sahip karışımlarda gözlenmiştir.

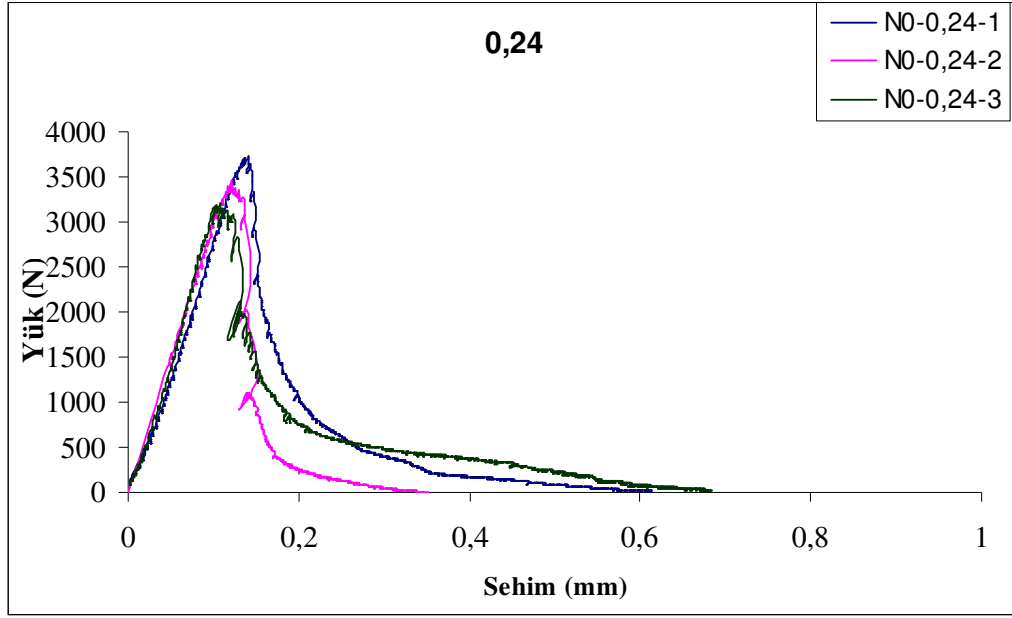
KAYNAKLAR

- [1] Nehdi, M., Pardhan, M. and Koshowski, S., 2004. Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements, *Cement and Concrete Research*, **34**, 2103– 2112.
- [2] Mindess, S., 2006. Advanced concrete for use in civil engineering, in *Advanced Civil Infrastructure Materials*, pp. 1-29, Eds. Wu, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, England.
- [3] Sirivivatnanon, V., Tam, C. T. and Ho, D. W. S., 2003. Special Concrete and Applications, In *The Civil Engineering Handbook*, CRC Pres LLC.
- [4] Taşdemir, M., A., Bayramov F., 2002. Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, *İTÜ Dergisi*, **1**, 125-144.
- [5] Şengül, C., 2005, Kendiliğinden Yerleşen Çelik Lif Donatılı Betonların Mekanik Davranışına Su/İnce Malzeme Oranı ile Lif Dayanımının Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] Bayramov, F., Taşdemir, C. ve Taşdemir M. A., 2005. Çimento esaslı kompozit malzemelerin optimum tasarımı, *İTÜ Dergisi*, **4**, 53-66.
- [7] Akman, S., 1990. Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [8] Mindess, S., Young, J. F., 2000. Concrete, Prentice-Hall Inci, USA.
- [9] Gani, M.S.J., 1995. Cement and Concrete, Chapman & Hall Pres, Australia.
- [10] Li, Z., Zhang, Y., 2005. High-Performance Concrete Handbook of Structural Engineering, CRC Pres.
- [11] Aitcin, P., C., 2000. Cements of yesterday and today, Concrete of tomorrow, *Cement and Concrete Research*, **30**, 1349-1359.

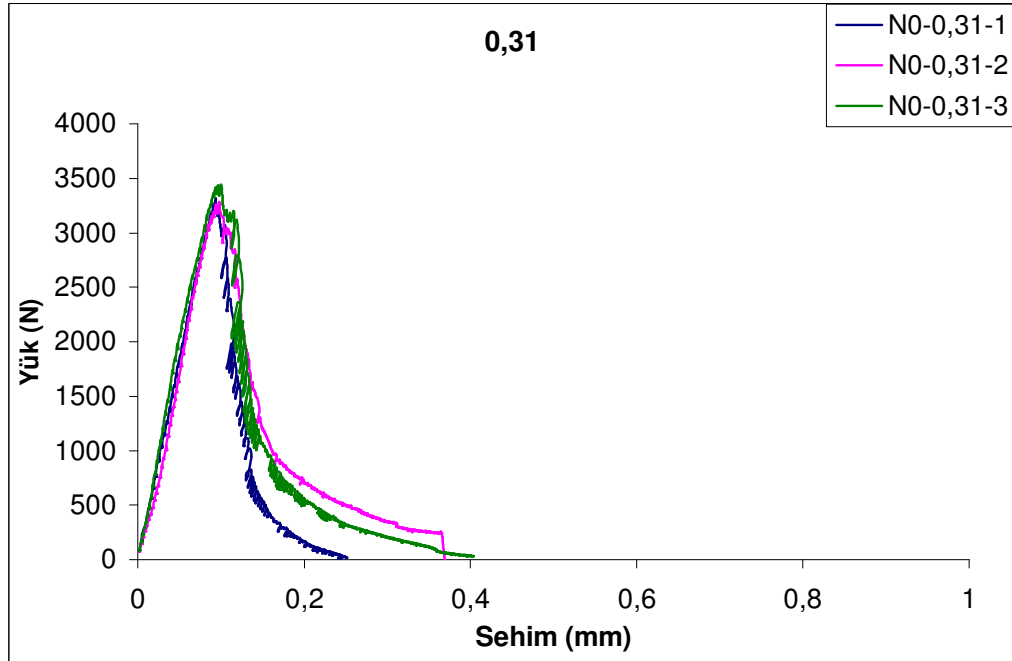
- [12] **Mehta, P.K.**, 2002. Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development, *Concrete International*, july, 23-28
- [13] **Özkul, H., Taşdemir, M., A., Tokyay, M. ve Uyan, M.**, 1999. Her Yönüyle Beton, THBB, İstanbul.
- [14] **Reinhardt, H.W. and Naaman, A.E.**, 1991. High Performance Fiber Reinforced Composites, London
- [15] **Isaia, G.C., Gastaldini, A.L.G., Moraes, R.**, 2003. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high performance concrete, *Cement & Concrete Composites*, **25**, 69–76.
- [16] **Shi, Y., Matsui, I., Feng, N.**, 2002. Effect of compound mineral powders on workability and rheological property of HPC, *Cement and Concrete Research*, **32**, 71–78.
- [17] **Okamura, H., Ouchi, M.**, 1998. Self-compacting high performance Concrete *Progress in Structural Engineering and Materials* , **I(4)**, 378-383.
- [18] **Aitcin, P., C.**, 1998. High Performance Concrete, E&F, N. Spon Ed., London.
- [19] **Sonebi, M., Bartos, P. J. M.**, 2002. Filling ability and plastic settlement of self-compacting concrete, *Materials and Structures, Matériaux et Constructions*, **35**, 462-469.
- [20] **Balaguru, P.N., Shah, S.P.**, 1992. Fiber Reinforced Cement Composites, McGraw-Hill, New York.
- [21] **Bornemann, R., Schmidt, M.**, 2002. The role of powders in concrete, *6th internationally symposium on utilization OF high strength/high performance concrete*, Leipzig
- [22] **Bache, H., H.**, 1981. Densified Cement Ultra-fine Particle Based Materials, Report 40, Aalborg Portland, Denmark
- [23] **M.F.M. Zain, Md. Safiuddin H. Mahmud**, 2000. Development of high performance concrete using silica fume at relatively high water-binder ratios, *Cement and Concrete Research*, **30**, 1501-1505.
- [24] **Bartos, P.**, 1992. Fresh Concrete and Tests, Elsevier, Amsterdam.

- [25] **Bartos, P.J.M., Sonebi, M., Tamim, A.K.**, Workability and Rheology of Fresh Concrete: Compendium of Tests, RILEM Technical Committee TC 145-WSM Workability of Special Concrete Mixes.
- [26] **Ferraris, C., F., Koehler, P., E., Fowler, D., W.**, 2003. Summary of Concrete Workability Test Methods, *Icar Report 105.1*, University of Texas, Austin, U.S.
- [27] **Yeğınobalı, A.**, 2001. Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği.
- [28] **Shannag, M.J.**, 2000. High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume, *Cement & Concrete Composites*, **22**, 399-406.
- [29] **Goldman, A., Bentur, A.**, 1989. Bond Effect in High-Strength Silica-Fume Concretes, *ACI Material Journal*, **86**,.5, 440-447.
- [30] **Bijen,j.**, 2003. Durability of engineering structures design, repair and maintenance, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.
- [31] **Nehdi, M., Mindess, S., Aitcin, P.C.**, 1998, Rheology of high performance concrete: Effect of ultrafine particles, *Cement and Concrete Research*, **28**, 687–697.
- [32] **Bonen, D., Shah, S.P.**, 2005. Fresh and hardened properties of selfconsolidating concrete, *Concrete Construction*, **7**, 14–26.
- [33] **Shannag, M.J.**, 2000. High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume, *Cement & Concrete Composites*, **22**, 399-406.
- [34] **Sellevold, E., J., Nielsen T.**, 1987. Condensed Silica Fume in Concrete: A World Review, In *Supplementary Cementing Materials for Concrete*, CANMET, , pp. 167-229, Canadian Government Publishing Center.
- [35] **Özyurt, N.**, 2000. Ultra Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [36] **Wu, H. C.**, 2006. Advanced civil infrastructure materials, Woodhead Publishing Limited,

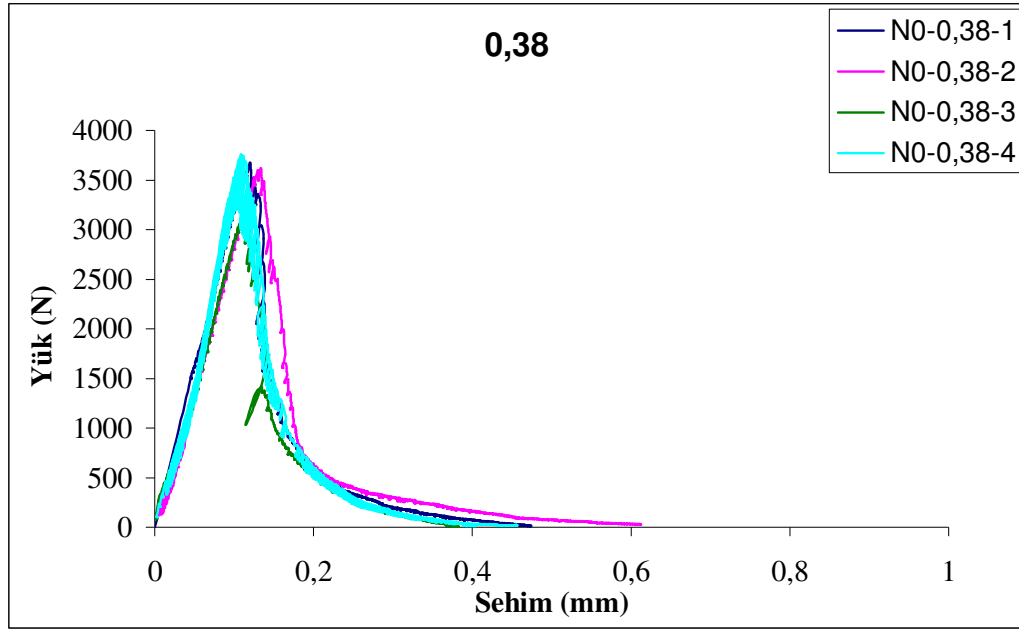
EKLER



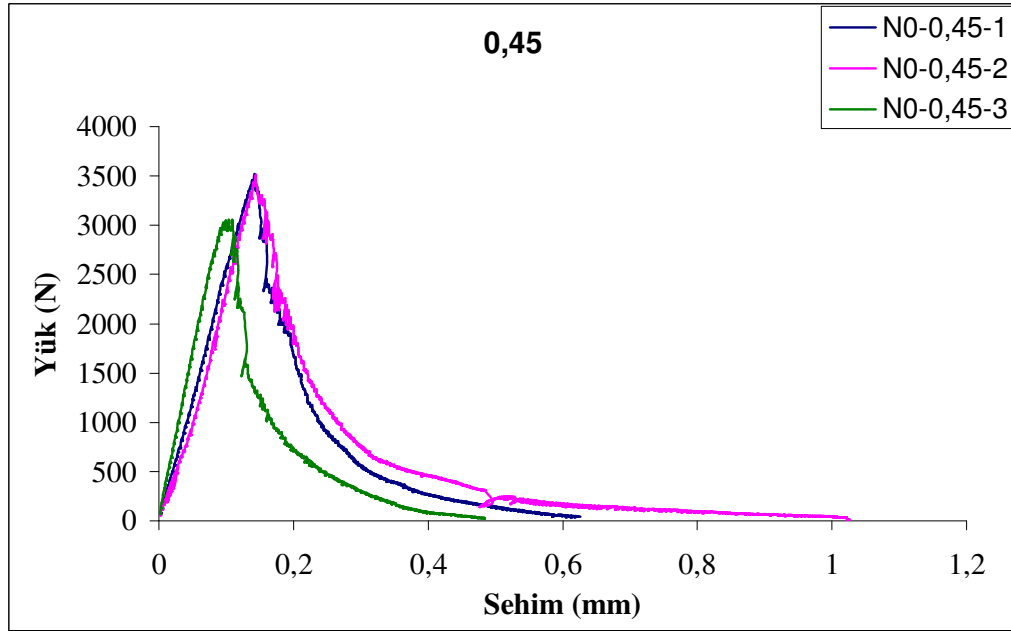
Şekil A.1: N0-0,24 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



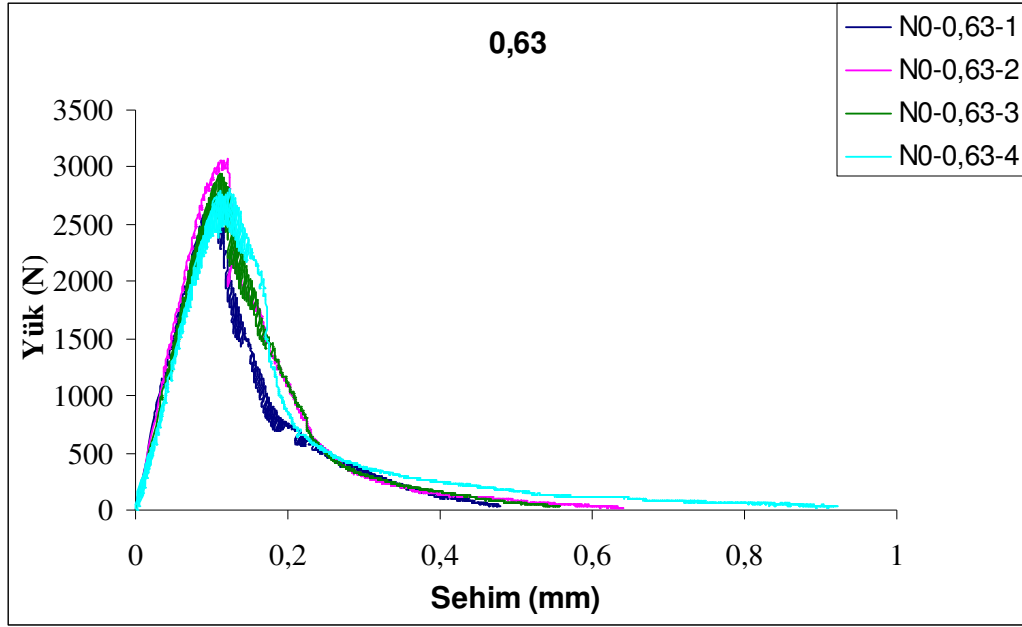
Şekil A.2: N0-0,31 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



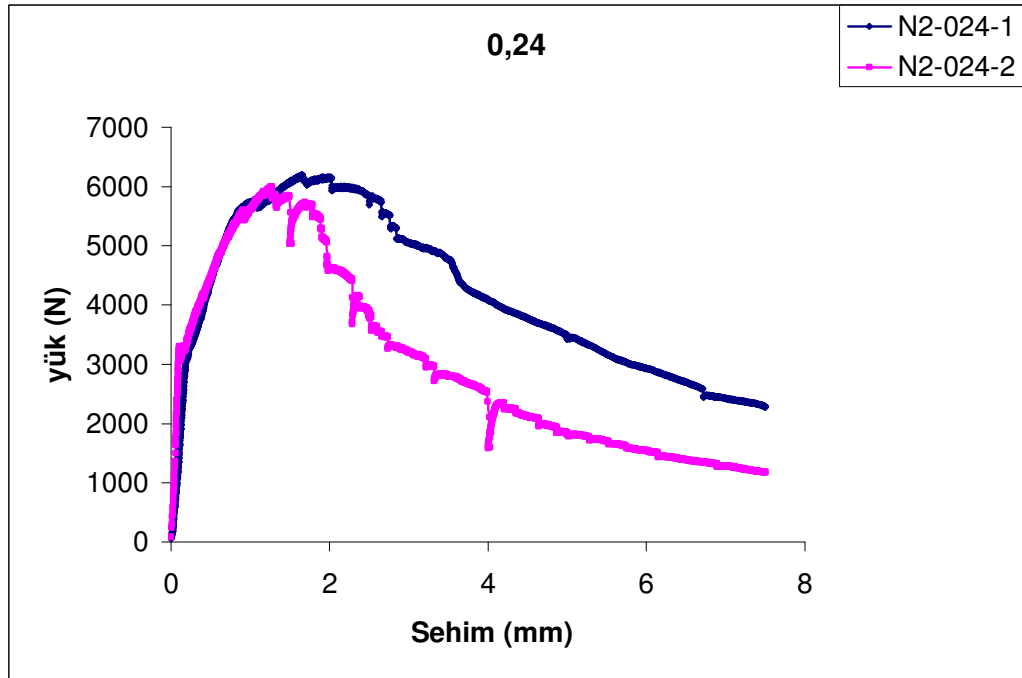
Şekil A.3: N0-0,38 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



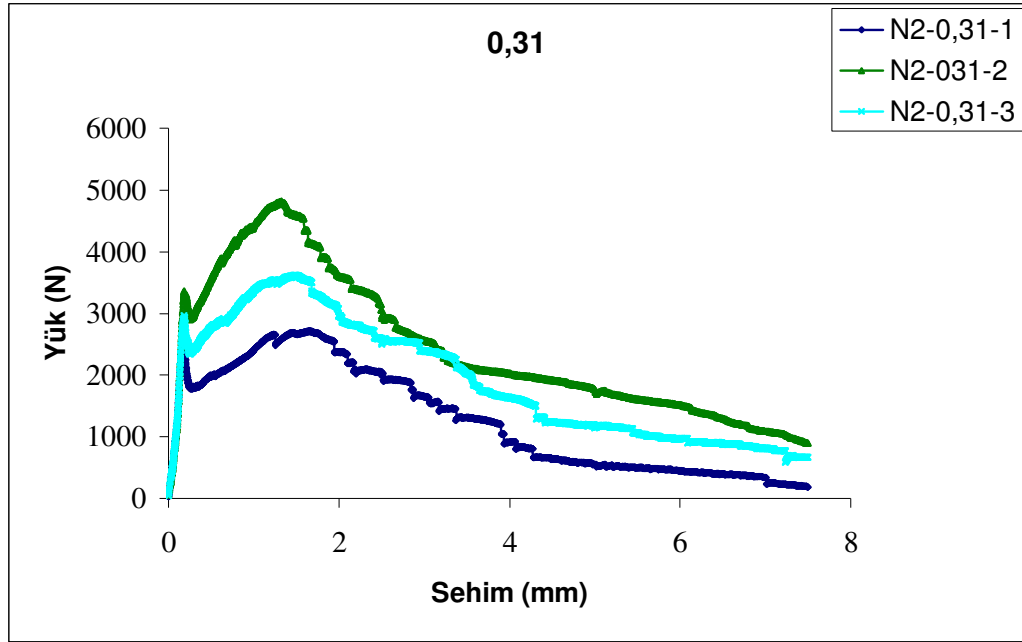
Şekil A.4: N0-0,45 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



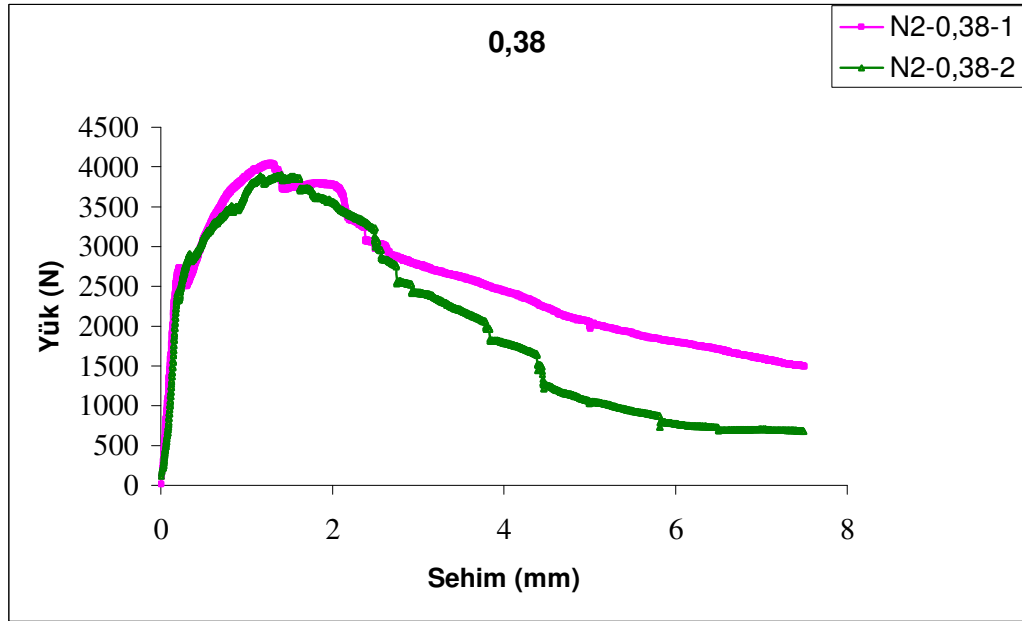
Şekil A.5: N0-0,63 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



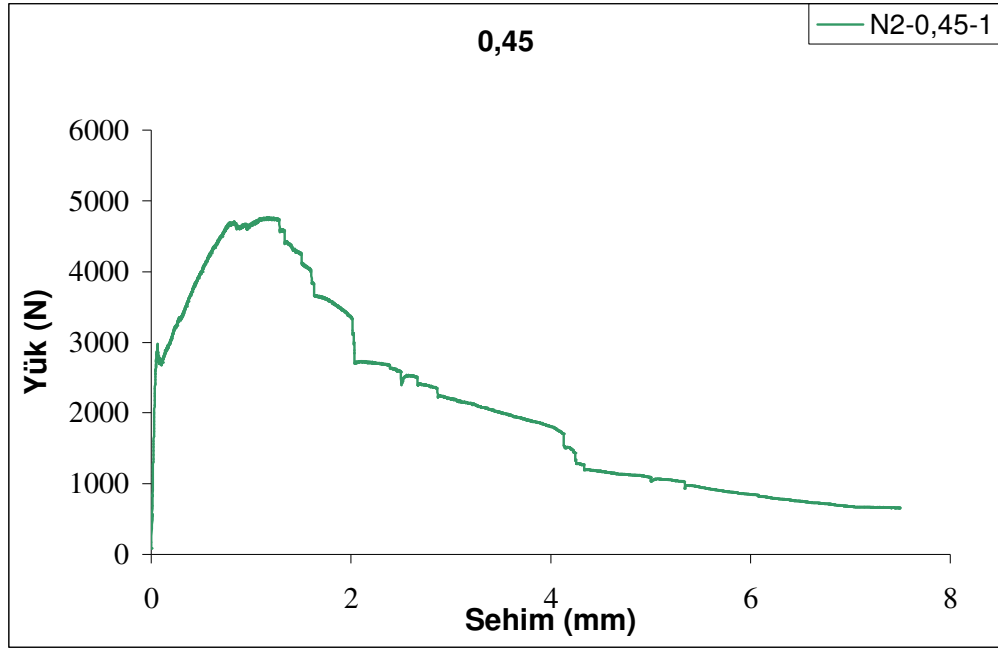
Şekil A.6: N2-0,24 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



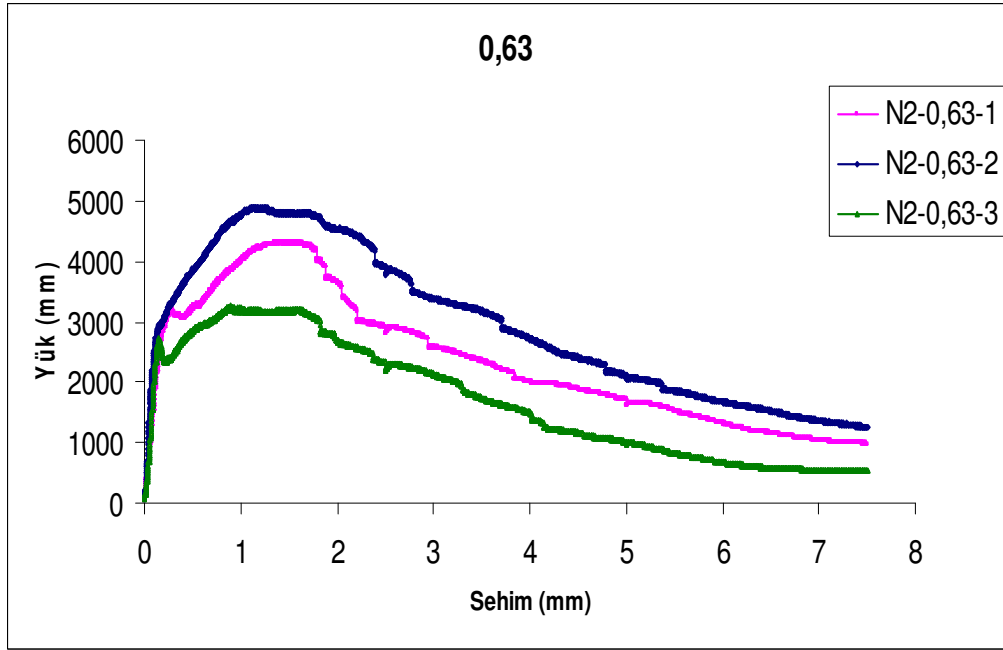
Şekil A.7: N2-031 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



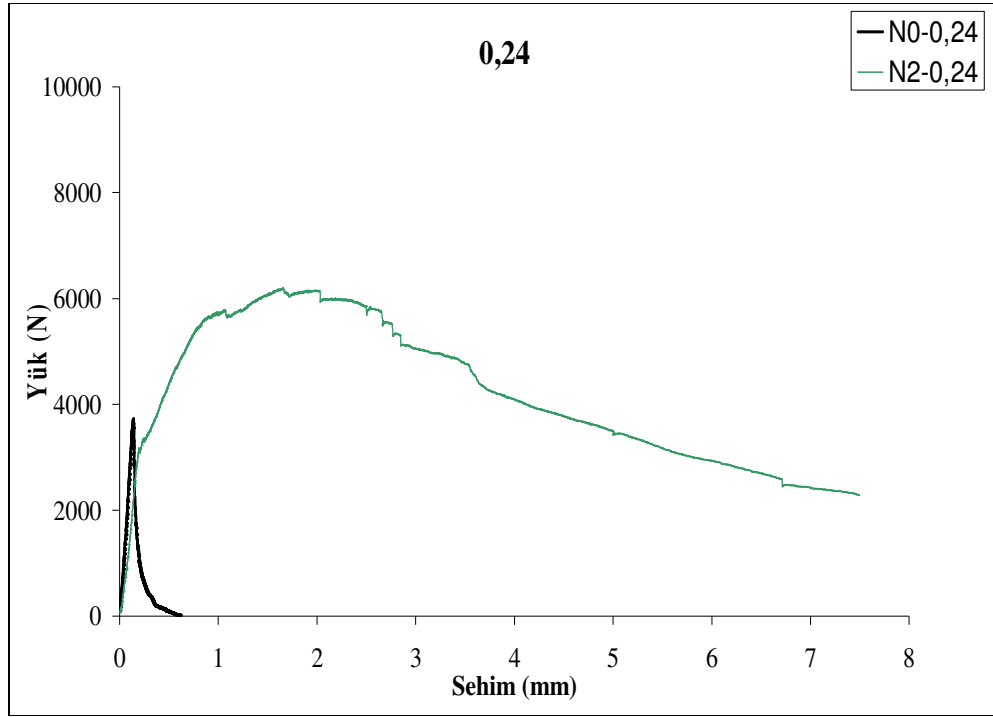
Şekil A.8: N2-038 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



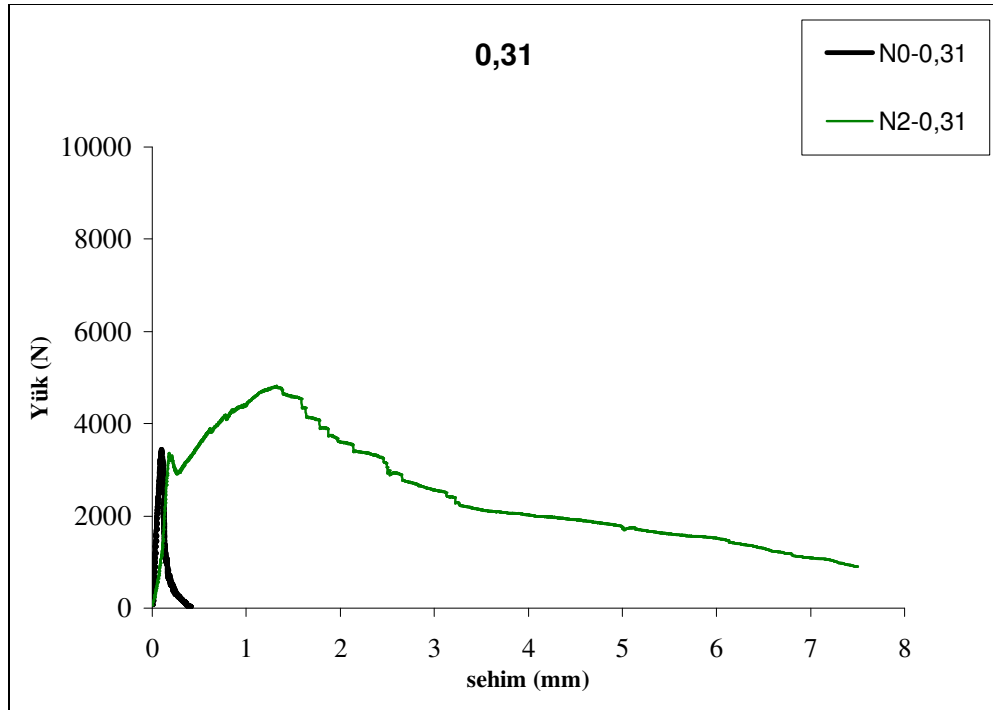
Şekil A.9: N2-0,45 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



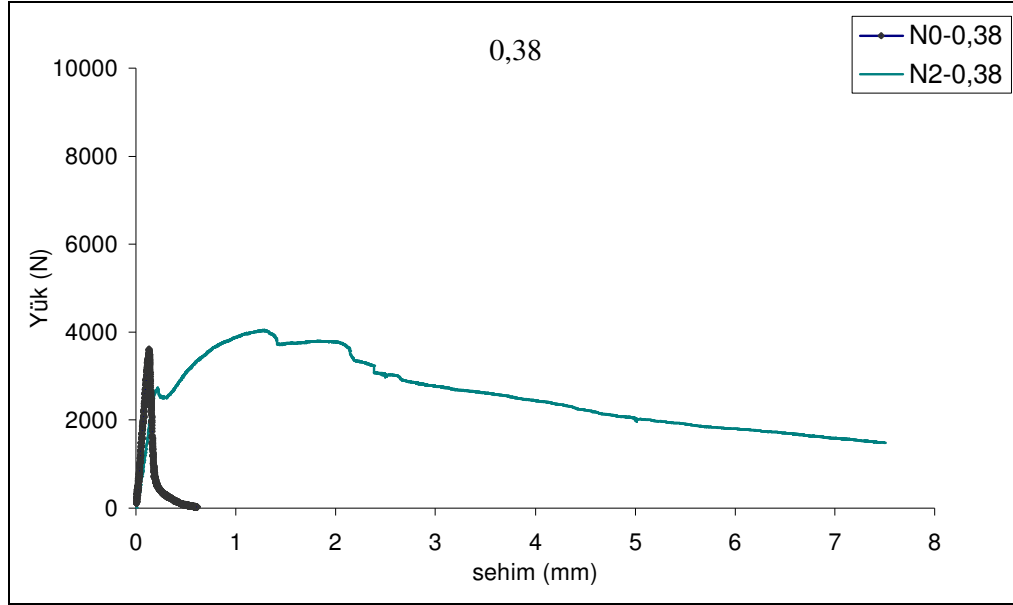
Şekil A.10: N2-0,63 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



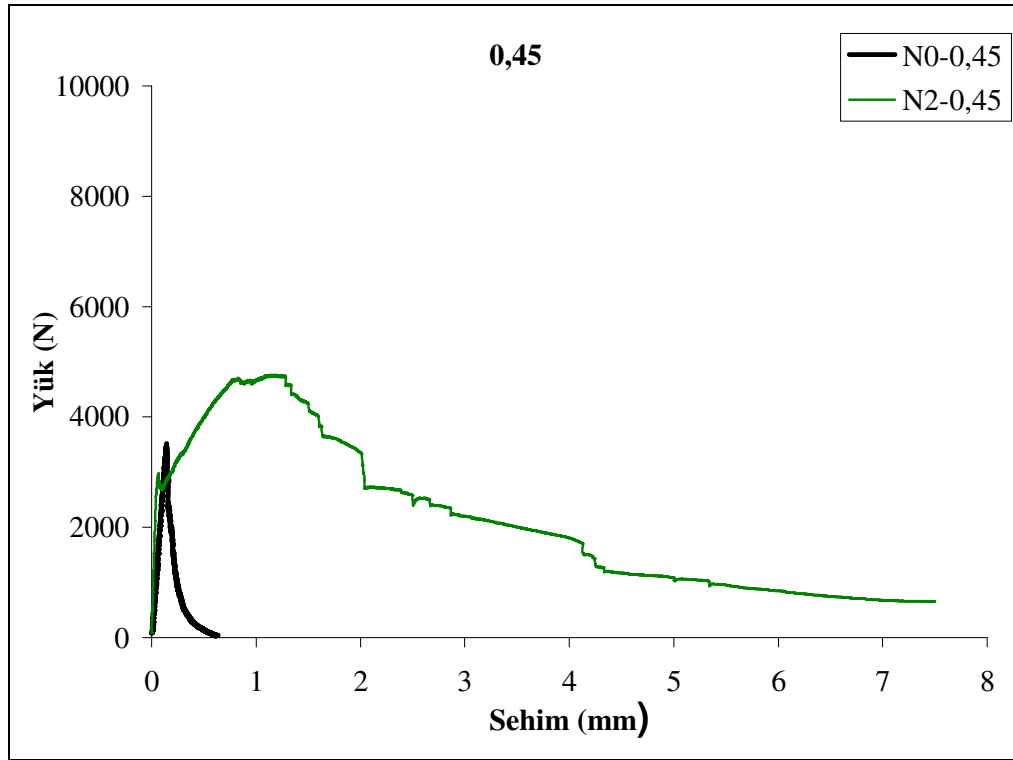
Şekil A.11: 0,24 Su/Çimento Oranlı Numunelerin Ortalama Yük Deplasman İlişkisi



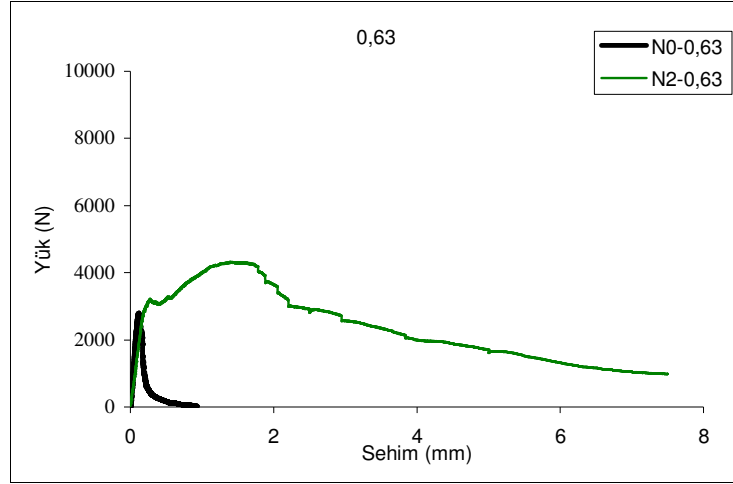
Şekil A.12: 0,31 Su/Çimento Oranlı Numunelerin Ortalama Yük Deplasman İlişkisi



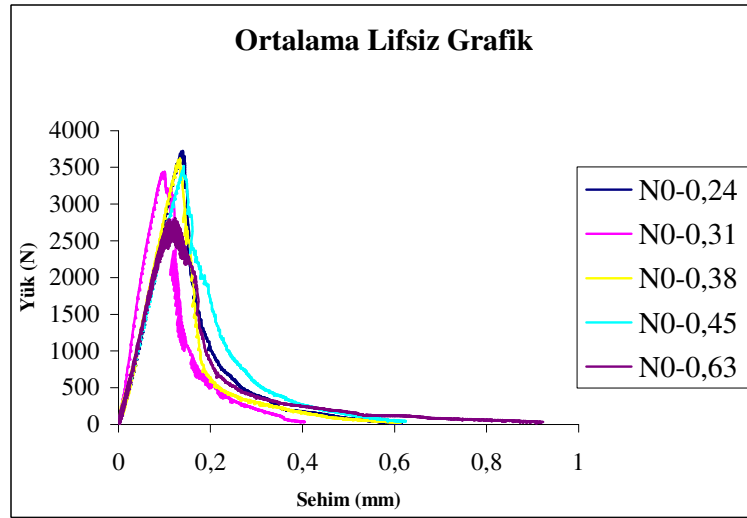
Şekil A.13: 0,38 Su/Çimento Oranlı Numunelerin Ortalama Yük Deplasman İlişkisi



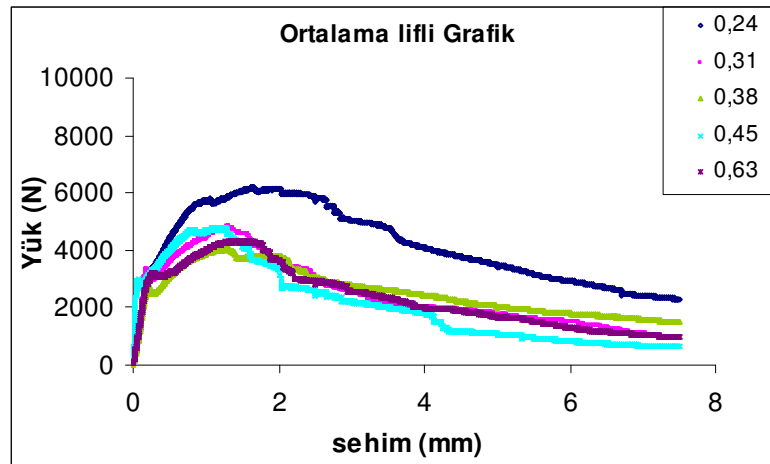
Şekil A.14: 0,45 Su/Çimento Oranlı Numunelerin Ortalama Yük Deplasman İlişkisi



Şekil A.15: 0,63 Su/Çimento Oranlı Numunelerin Ortalama Yük Deplasman İlişkisi



Şekil A.16: Lifsin Numunelerin Ortalama Yük Deplasman İlişkisi



Şekil A.17: Lifsin Numunelerin Ortalama Yük Deplasman İlişkisi

ÖZGEÇMİŞ

Alihan Dinç, 1979 yılında Karaman’da doğdu. İlkokulun ardından, orta ve lise öğrenimini Gebze Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 1998 yılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümüne girdi. 1998-1999 öğretim yılında İ.T.Ü İngilizce Hazırlık Programını tamamladı. 1999-2000 yılında başladığı lisans öğrenimini 2003 senesinde tamamladı. Lisans öğreniminden sonra 2003-2004 güz yarıyılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Anabilim dalı Yapı Mühendisliği Programında yüksek lisans öğrenimine başladı. Yüksek lisans öğrenimi ile paralel olarak 2004 yılında İnşaat Mühendisliği fark derslerini İ.T.Ü. Yüksek Lisans Bilimsel Hazırlık Programı ve girdiği Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde tamamlayarak 2006 yılında inşaat mühendisliği eğitimini tamamladı. 2006 yılında Oyak Beton’da çalışmaya başladı ve halen Oyak Beton Gebze Tesisi Tesis Sorumlusu görevini sürdürmektedir.