

**KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN REOLOJİK
VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE SU/İNCE MALZEME
ORANI İLE LİF KATKISININ ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Burak YILMAZ
501031180**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14 Mart 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Mart 2007**

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

MART 2007

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında bana değerli bilgi ve yardımlarıyla destek olan sayın hocalarım Doç. Dr. Yılmaz Akkaya ve Prof. Dr. Mehmet Ali Taşdemir' e, gerek deney aşamasındaki yardımları ve gerekse fikirleri ile tezde büyük emeği olan Araş. Gör. Cengiz Şengül'e, çalışmalarım sırasındaki ilgilerinden dolayı Araş. Gör. Bekir Pekmezci ve Araş. Gör. Anıl Doğan'a, dökümler ve deneyler sırasında yanımda olan arkadaşım Alihan Dinç' e, çalışmalarım sırasındaki yardımları dolayısıyla Murat Meydan, Hakan Özmen ve İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanlarına ve ayrıca gösterdikleri sevgi, destek ve üstün sabırlarından dolayı aileme teşekkür ederim.

Mart 2007

Burak YILMAZ

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
1.GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	3
2.1 Normal Betonlar	4
2.2 Özel Betonlar	4
2.2.1 Yüksek Dayanımlı Betonlar	4
2.3 Taze Beton Özellikleri ve Ölçüm Yöntemleri	9
2.3.1 Taze Beton Özellikleri	9
2.3.2 Ölçüm Yöntemleri.....	14
2.4 Çelik Lif, Silis Dumanı ve Katkı Kullanımının KYB' özelliklerine Etkisi.....	18
2.4.1 Silis Dumanının Beton Özelliklerine Etkisi.....	18
2.4.2 Çelik Liflerin Beton Özelliklerine Etkisi	22
2.4.3 Katkı Kullanımının Beton Özelliklerine Etkisi.....	25
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	28
3.1 Karışımlarda Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	28
3.1.1 Çimento	28
3.1.2 Silis dumanı.....	29
3.1.3 Agregalar.....	29
3.1.4 Akışkanlaştırıcı Katkı	31
3.1.5 Çelik lifler	32
3.2 Beton Karışımları	32
3.4 Numune Şekil ve Boyutları	35
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	40

4.1.4 V-funnel deneyi.....	41
4.1.5 U-Box Deneyi	43
4.1.6 Segregasyon Deneyleri.....	46
4.2 Sertleşmiş Beton Deneylerinin Hesaplanması	49
4.2.1. RILEM kırılma enerjisi deneyinden elde edilen sonuçlar.....	49
4.2.2 Silindir basınç deneyi hesaplaması	51
4.2.3 Yarma-çekme deneyi hesaplaması.....	51
4.3 Sertleşmiş Beton Deneylerinin Sonuç ve Değerlendirmeleri.....	52
4.3.1 Silindir Basınç Deneyi Sonuç ve Değerlendirmeleri	52
4.3.2 Yarma çekme deneyi sonuç ve değerlendirme.....	55
4.3.3 RILEM kırılma enerjisi deney sonuç ve değerlendirme.....	57
5. GENEL SONUÇLAR	64
KAYNAKLAR	66
EKLER.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	79

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1: Portland Çimentosunun Fiziksel Özellikleri.....	28
Tablo 3.2: Portland Çimentosunun Basınç Dayanımı.....	29
Tablo 3.3: Portland Çimentonun Kimyasal Özellikleri.....	29
Tablo 3.4: Agregaların Fiziksel Özellikleri.....	30
Tablo 3.5: Silis Ununun Kimyasal Özellikleri.....	30
Tablo 3.6: Agregaların Elek Analizi Sonuçları.....	30
Tablo 3.7: Beyaz ve Sarı İnce Kum Özgöl Ağırlıkları.....	31
Tablo 3.8: İnce Sarı Kum Elek Analizi Sonuçları.....	31
Tablo 3.9: İnce Beyaz Kum Elek Analizi Sonuçları.....	31
Tablo 3.11: Kullanılan Süper akışkanlaştırıcının Teknik Özellikleri.....	32
Tablo 3.12: Teorik Beton Bileşimleri Ve Özellikleri.....	34
Tablo 4.1: 1m ³ Betonda 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.....	43
Tablo 4.6: U-box Segregasyon Deneyi Test Sonuçları.....	47
Tablo 4.7: Kısıtlanmış Yayılma Segregasyon Deneyi Test Sonuçları.....	48
Tablo 4.8: Silindir Basınç Deneyi Sonuçları.....	52
Tablo 4.9: Yarma-Çekme Deneyi sonuçları.....	55
Tablo 4.10: Kırılma Enerjileri ve Net Eğilme Dayanımları.....	57

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1: DSP Hamuru.....	5
Şekil 2.2: Kendiliğinden Yerleşen Betonların Özellikleri.....	7
Şekil 2.3: Taze Betonun Boru İçindeki Akışı.....	11
Şekil 2.4: Sıkıştırma Faktörü Deney Düzeneği.....	13
Şekil 2.5: Orimet Testi.....	15
Şekil 2.6: Compaction Test Düzeneği.....	17
Şekil 2.7: U-Kutusu Deney Düzeneği.....	17
Şekil 2.8: V-Hunisi Deney Düzeneği.....	18
Şekil 2.9: Silis Dumanını Dolduruculuk Etkisi.....	20
Şekil 2.10: Silis Dumanını Dolduruculuk Etkisi.....	21
Şekil 2.11: Silis Dumanını Puzalonik Etkisi.....	21
Şekil 2.12: Lif-Matris Mekanizmasının Enerji Yutması.....	24
Şekil 2.13: Farklı Miktarlarda Lif için Tipik Yük-Sehim Eğrileri.....	24
Şekil 2.14: Lif Doğrultusuna Göre Malzeme Özellikleri.....	25
Şekil 2.15: Süper Akışkanlaştırıcı Katkıların Etki Mekanizması.....	27
Şekil 3.1: Beton Karışımının Granülometrisi ve Referans Eğrileri.....	33
Şekil 3.2: Numune Şekil ve Boyutları.....	35
Şekil 4.1: Lifsiz-Lifli T50 Sonuçları.....	38
Şekil 4.2: Lifli-Lifsiz Toplam Yayılma Miktarı	39
Şekil 4.3: Lifli-Lifsiz Toplam Yayılma Süresi	39
Şekil 4.4: Lifli-Lifsiz Kısıtlanmış Toplam Yayılma Miktarı	40
Şekil 4.5: Lifli-Lifsiz Kısıtlanmış Yayılma Testi Deney Sonuçları	41
Şekil 4.6: Lifli-Lifsiz V-Funnel Testi Deney Sonuçları	42
Şekil 4.7: Lifli-Lifsiz U-Box Durma Süreleri.....	44
Şekil 4.8: Lifli-Lifsiz h_1/h_2 Oranları.....	45
Şekil 4.9: Kısıtlanmış Yayılma Lifli-Lifsiz Segregasyon Deney Grafiği.....	48
Şekil 4.10: RILEM Deneyi Yükleme Düzeneneği.....	45
Şekil 4.11: Yük-Sehim Eğrisinin Şematik Gösterimi.....	50

Şekil 4.12: Lifsiz-Lifli Basınç Dayanımı Grafiği.....	52
Şekil 4.13: Lifsiz-Lifli Basınç Elastisite Modülü Grafiği.....	54
Şekil 4.14: Lifsiz-Lifli Yarma-Çekme Dayanım Grafiği.....	56
Şekil 4.15: Lifsiz Eğilme-Çekme Dayanım Grafiği.....	58
Şekil 4.16: Lifsiz-Lifli Eğilme-Çekme Dayanım Grafiği.....	58
Şekil 4.17: Lifsiz Özgöl Kırılma Enerjisi Grafiği.....	59
Şekil 4.18: Lifsiz-Lifli Özgöl Kırılma Enerjisi Grafiği.....	61
Şekil 4.19: Lifsiz-Lifli Karakteristik Boy Grafiği.....	62

KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN REOLOJİK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE SU/İNCE MALZEME ORANI İLE LİF KATKISININ ETKİSİ

ÖZET

Gelişen beton teknolojisi ile birlikte değişen niteliklerdeki beton ihtiyacına karşılık verebilmek için beton bileşimlerinin yeniden düzenlenmesiyle yüksek performanslı betonlar doğmuştur. Yüksek performans kavramıyla belirli bir basınç dayanımının elde edilmesi, kendiliğinden yerleşebilme ve işlenebilirlik, çelik lifler ile optimum mekanik özelliklerin geliştirilmesi gibi kavramlar başlı başına bir amaç olarak ortaya çıkmıştır.

Bu tez çalışmasında sabit hacimsel 0,52 su/pudra oranlı 5 farklı su/çimento oranına sahip karışımla çalışılmıştır. Bu karışımlarda (0-45) mikron arası dane boyutuna sahip silis unu çimentoyla ikameli olarak kullanılmıştır. Kullanılan çimento dozajları sırasıyla 833 kg/m³, 645 kg/m³, 546 kg/m³, 444 kg/m³ ve 318 kg/m³'dir. Karışımlarda azalan çimento miktarına karşılık aynı hacimde silis unu eklenmiş böylece çimento ve silis unu toplam hacminin sabit kalması sağlanmıştır. Karışımlarda, toplam su miktarının aynı olmasından dolayı su/ince malzeme oranı sabit kalırken azalan çimento miktarından dolayı su/çimento oranı artmıştır. Sabit su/ince malzeme oranına sahip karışımlarda su/çimento oranları sırasıyla 0,24, 0,31, 0,38, 0,45 ve 0,63 olmuştur. Daha sonra bu karışımlar 1 m³ betonda 78 kg olacak şekilde kullanılan liflerle üretilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda su/ince malzeme oranı sabitken artan su/çimento miktarının betonun gerek taze haldeki özelliklerini ve gerekse sertleşmiş haldeki mekanik davranışlarını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Ayrıca lif katılarak üretilen karışımlarda, liflerin betonun taze haldeki özelliklerini ve sertleştikten sonraki eğilme dayanımı, enerji yutma yeteneği gibi mekanik davranışlarına nasıl etkidiği 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 546 kg/m³ değerine azalmasına karşın basınç mukavemetlerinde bir düşüş gözlenmemiştir. Bu özellik lifli üretimlerde de görülmüştür. Ayrıca lif katkısının betonun dayanımından çok yutulan enerjiyi artırdığı gözlenmiştir.

THE EFFECT OF WATER/FINE POWDER MATERIAL RATIO AND FIBER CONTENT ON THE MECHANICAL AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SELF-COMPACTED CONCRETE

SUMMARY

High performance has become a demanded feature for a concrete to meet and this kind of concrete has become a widely used material recently. Adjusting the mix design, and using mineral and polymeric admixtures, superplasticizers, viscosity enhancing agents and fly ash made it possible to produce high performance concrete types, such as self compacting concrete, which has improved workability, compact without any vibration, has high segregation resistance and durability properties. Also steel fibers can be used in this type of concretes to enhance the mechanical properties.

In this work, 5 different concrete mixtures were produced that have the same volumetric water/powder ratio of 0,52. In the mixtures, cement was replaced with the same volume of finely ground silica powder that has a particle dimension up to 45 μ . Cement dosages used in the mixtures were 833 kg/m³, 645 kg/m³, 546 kg/m³, 444 kg/m³ and 318 kg/m³ respectively. The amount of silica powder added to mixtures was equal to the amount of cement removed so that the water/fine powder material ratio remained constant in all 5 mixtures. However, water/cement ratios were increased because the total amount of water was kept constant for all mixtures while the amount of cement used was decreasing. These water/cement ratios were 0,24, 0,31, 0,38, 0,45, 0,63 respectively. These mixtures were also cast with steel fibers with a dosage of 78kg/m³. The main objective of this work is to analyse the effects of water/fine powder material ratio and fiber content on the mechanical properties of self-compacted concrete and to determine the optimum values of water/cement ratio for various fresh and hardened concrete properties.

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 546 kg/m³. Addition of steel fibers affected the ductility of concrete rather than the strength and the fresh concrete properties. The mixtures with the cement dosage of 546 kg/m³, having the water/cement ratio of 0,38 were determined to be highly workable, optimum mixtures within the frame of this experimental work.

1.GİRİŞ

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) kendi ağırlığı altında vibrasyona gerek duymadan kalıba yerleşen ve sıkışan beton olarak tanımlanmaktadır. KYB, 1980'lerin ikinci yarısında Japonya'da deprem ihtimalinin yüksek olduğu bölgelerde, yoğun donatılı betonarme elemanlara rahatça yerleştirilebilen bir betona olan ihtiyaç sonucu doğmuş ve zamanla kullanımı dünya çapında yaygınlaşmıştır. KYB'nin geleneksel betonlara göre başlıca avantajları; yoğun donatılı kalıplara boşluksuz bir biçimde yerleşebilmesi, yapım süresini kısaltması, işçilik maliyetini düşürmesi, vibrasyondan dolayı oluşan ses kirliliğini azaltması, yüksek akışkanlık ve segregasyon direncinden dolayı uzun mesafelere pompalanabilmesidir. [1]

KYB' ler içerik olarak konvansiyonel betonlara göre oldukça farklılık gösterir. Kullanılan süper akışkanlaştırıcılar sayesinde taze beton akışkanlık kazanırken, ince malzemenin fazla tutulması ve viskosite artırıcı katkıların kullanılmasıyla KYB'de kararlılık (ayrışmaya karşı direnç) sağlanır. KYB'nin akışkanlık özelliği, kayma eşiğinin küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu özelliğin su miktarının arttırılarak sağlanması ayrışmaya sebep olabilir bu sebeple KYB' lerde su miktarı çok önemlidir. KYB' ler genelde düşük su/çimento oranlarına sahip olduklarından dolayı yüksek dayanım sergilerler. Ayrıca KYB bünyesinde kullanılan silis dumanı gibi ince malzemeler betonun durabilitesinde çok olumlu etkilemektedir. Dolayısıyla KYB' lere yüksek performanslı betonlar da diyebiliriz. [2]

KYB' ların mekanik niteliklerini geliştirebilmek amacıyla günümüzde çelik lifler de kullanılmaktadır. Kullanılan lifler betonda çatlak oluşumunu ve yayılımını kontrol altına almakta, sehim kapasitesini ve taşıdığı yükü artırmakta dolayısıyla betonun yutabileceği enerji miktarını dramatik bir biçimde artırabilmektedir. KYB' nin performansı kullanılan lif miktarı, dayanımı, boyutu, narinliği, şekli ve diğer lif geometrisine bağlı olarak değişmektedir. Lif özelliklerinin yanı sıra liflerle matris arasındaki aderans da lif performansını etkilemektedir. Lif aderansının düşük olduğu durumda, betonun göçmesi, liflerin sıyrılmasıyla beraber gerçekleşmektedir. Kullanılan çimentonun artmasıyla aderans artmakta ve betonun çökmesi liflerin sıyrılmasından çok kopmasından dolayı gerçekleşmektedir. Kopma olayı daha az sehim yapmasından dolayı sıyrılan bir harekete göre daha az enerji yutacaktır. Güçlü

bir aderansa sahip betonda, kopma davranışı sergileyen lifler, dayanımı daha yüksek olan liflerle değiştirildiğinde sıyrılma davranışı baskın olacak ve yutulan enerjide de artma olacaktır. [3]

Bu tez çalışmasında sabit hacimsel 0,52 su/pudra oranlı 5 farklı su/çimento oranına sahip KYB 'ler üretilmiştir. Bu karışımlarda, çimento ile benzer inceliğe sahip olan silis unu çimentoyla hacimce ikame edilerek kullanılmıştır. Kullanılan çimento dozajları sırasıyla 833 kg/m^3 , 645 kg/m^3 , 546 kg/m^3 , 444 kg/m^3 ve 318 kg/m^3 'dir. 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/m^3 değerinde sabit olmasından dolayı su/ince malzeme oranı sabit kalırken azalan çimento miktarı ile birlikte su/çimento oranı arttırılmıştır. Daha sonra bu KYB' lere çekme dayanımı 1100 MPa olan çelik lifler hacimce %1 oranında eklenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda su/ince malzeme oranı sabitken artan su/çimento miktarının ve kullanılan lifin betonun sertleşmiş haldeki mekanik davranışlarını nasıl etkilediği araştırılmıştır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Beton, ucuzluğu, şekil verilebilme kolaylığı, dayanıklı olması, fiziksel ve kimyasal etkilere karşı dirençli olmasından dolayı ilk olarak kagir yapı malzemesi olarak kullanılmaya başlandığı 1842'lerden bu yana yapı sektöründeki önemini kaybetmeden günümüze ulaşmıştır. Geleneksel beton, içerdiği ince ve iri agrega, çimento ve sudan oluşan kompozit bir malzemedir. Bu kompozitte agregalar dağınık fazı oluşturmakla beraber su ve çimento ise sürekli bir faz oluşturur. Günümüzde ihtiyaca göre betona değişik özellikler kazandırabilmek için kimyasal ve mineral katkı maddeleri de katılabilmektedir. Bu katkılar sayesinde betonun gerek taze haldeki ve gerekse sertleşmiş haldeki özellikleri geliştirilebilmektedir. Betonun en üstün niteliği istenilen biçimin verilebilmesini sağlayan plastik kıvamıdır. Başlangıçta akıcı bir kıvama sahip olan beton kalıplar yardımıyla şekil verildikten sonra sertleşerek mukavemet kazanır. Günümüzde çelik donatılarla çekme yeteneği desteklenen beton malzeme, başta konut yapımı olmak üzere karayolu, demiryolu, köprü, liman, havaalanı, baraj gibi pek çok sektörde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Beton malzeme kullanım amacına göre üretilirken göz önünde bulundurulması gereken en önemli hususlar; ekonomik olması, taze haldeyken işlenebilirliğinin iyi olması, sertleştikten sonra ise dayanım ve durabilitesinin yeterli düzeyde olmasıdır. Betonlar, çeşitli niteliklerine göre değişik biçimde sınıflandırılabilirler. [4]

Basınç dayanımlarına göre üç ana gruba ayrılabilir.

- 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.

Birim ağırlıklarına göre de üç ana grupta toplanabilirler.

- Normal Beton: Birim ağırlığı 2400 kg/m^3 civarında olanlar.
- Hafif Beton: Birim ağırlığı 2000 kg/m^3 ' den az olanlar.
- Ağır Beton: Birim ağırlığı 2600 kg/m^3 ' den fazla olanlar. [4]

Bu sınıflandırmanın haricinde betonlar normal ve özel betonlar olarak da sınıflandırılabilir.

2.1 Normal Betonlar

Günümüzde yaygın olarak kullanılan beton tipidir. Kolay üretilebilmesi, içerdği malzemelere kolay ulaşımı, uygulanmasının kolay olması, ekonomikliği ve seri bir biçimde üretilebilmesinden dolayı tercih edilir. Bu sebeple, bina, yol, köprü, baraj gibi yapılarda yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Basınç dayanımları 20-50 MPa arasında değişmektedir. Normal betonlar, yüksek dayanımlı ve ultra yüksek dayanımlı betonlarla karşılaştırıldıklarında çekme, eğilme ve basınç dayanımları açısından oldukça zayıf kalmaktadırlar.

2.2 Özel Betonlar

Özel betonlar adında anlaşılabileceği gibi özel bir amaca hizmet eden betonlardır. Oluşan ihtiyaca göre normal betonlara kıyasla basınç, çekme, eğilme dayanımı, süneklik, kimyasal dayanıklılık gibi niteliklerinin geliştirilmesi amacıyla ortaya çıkan betonlardır. Genel olarak normal betonlardan farklı olarak silis unu, silis dumanı, uçucu kül gibi filler malzemelerin yanı sıra süper akışkanlaştırıcılar, hava sürükleyiciler, viskosite artırıcılar gibi katkıları kullanılır.

Beton kompozitinin en zayıf noktalarından birisi de agrega ve matris ara yüzeyidir. Betonun göstereceği performans, bu ara yüzeydeki aderans ve geçirimsizliğe bağlıdır. Özel betonlarda kullanılan silis dumanı, uçucu kül gibi mikrofiller malzeme boşlukları doldurmakta ve ayrıca pozolanik etkisinden dolayı ara yüz güçlenmektedir. Bu durum, betonun basınç, çekme, eğilme dayanımı gibi özelliklerini iyileştirmesinin yanı sıra yoğunluğunu artırmaktadır. Ayrıca betonda matris-agrega ara yüzünün güçlenmesinden dolayı geçirimsizlik artmakta ve betonun durabilitesi iyileşmektedir. Fakat betonda artan ince malzeme miktarından dolayı yeterli bir dağılmanın sağlanabilmesi için süper akışkanlaştırıcı katkıların kullanılması gerekliliği doğmaktadır. Ayrıca betonun enerji yutma özelliği iyileştirilmesi gerektiğinde lifler de kullanılabilmektedir. [5]

2.2.1 Yüksek Dayanımlı Betonlar

Yüksek dayanımlı betonlar normal betonlardan farklı olarak içyapıyı geliştiren malzemelerle beraber farklı üretim tekniklerinin kullanılmasıyla elde edilirler. Bu malzemeler dayanımı yüksek agregalar, süper akışkanlaştırıcı katkıları, yüksek mukavemetli çimentolar, silis dumanı gibi filler malzemenin kullanılmasıyla elde edilir. Küp basınç dayanımları 60-115 MPa arası değişmekte olup diğer mekanik özellikleri de normal betonlara göre oldukça iyidir. [6]

2.2.2 Çok Yüksek Dayanımlı Betonlar

Beton üzerinde yapılan çalışmalarla betonda kullanılan malzemeler ve beton üretim teknolojisi açısından son 20 yıllık süreçte oldukça büyük gelişmeler sağlanmıştır. Bu teknolojilerden bazıları; büyük boşluklarından arındırılmış polimer hamurlar (MDF), ultra ince tanecikli yoğunlaştırılmış sistemler (DSP), reaktif pudra betonları ve çok yüksek lif içeriğine sahip çimento esaslı malzemeler olan SİFCON betonlarıdır. [5,6]

2.2.2.1 Büyük Boşluklarından Arındırılmış Polimer Hamurları (MDF)

MDF' lerde temel amaç, alüminü çimento ile çimento taneciklerinin hareketini ve dağılımını kolaylaştıracak bir polimerin beraber kullanılmasıyla betonda oluşacak boşluk oranını minimuma indirmek, betonun yoğunluğunu artırmak dolayısıyla dayanımı artırmaktır. Betonun sertleşmesi sırasında çimento taneleri hidrate olurken, kullanılan polimer dehidrate olur dolayısıyla polimerin saldığı su çimento tarafından kullanılır. Böylece kılcal boşlukların minimum olması sağlanır. [5,6]

2.2.2.2 Yoğunlaştırılmış Çimento ve Ultra İnce Tane İçeren Malzemeler (DSP)

DSP malzemeler, yüksek miktarda çimento, silis dumanı, süper akışkanlaştırıcı içeren ve yüksek dayanımlı (kalsine boksit ve granit) agregası kullanılarak yapılan betonlardır. Tane granülometrisini ayarlayarak, çimento taneleri arasındaki boşlukları silis dumanı ile doldurup yüksek yoğunluklu beton üretmek DSP' nin amacını oluşturmaktadır. Yüksek miktardaki ince malzeme kullanılmasından dolayı homojen bir dağılım sağlamak amacıyla süper akışkanlaştırıcı ihtiyacı bu tip betonlarda artmaktadır. DSP' lerin dayanımları 130 MPa civarında değişirken yüksek dayanımlı agregaların kullanılması durumunda ise dayanım 270 MPa değerine ulaşabilmektedir. [5,6]



Şekil 2.1: DSP Hamuru [7]

2.2.2.3 Reaktif Pudra Beton (RPC)

Reaktif pudra betonları yüksek çimento dozajı, ince kum, silis dumanı, dane çapı küçük agrega ve çelik lif kullanılarak üretilen kompozit malzemelerdir. Ayrıca bu tür betonlara silis dumanını reaktif hale getirebilmek için kürün yanısıra ısıtma işlemi uygulanır. Reaktif pudra betonu, kullanılan lifler, düşük su/çimento oranı ve boşluksuz yapı nedeniyle üstün mekanik özelliklere sahiptir. Bu tür betonların basınç dayanımları, 200 ile 800 MPa arasında değişirken çekme dayanımları ise 25 MPa'dan başlayarak 150 MPa değerine kadar ulaşabilmektedir. Kırılma enerjileri 1200 J/m^2 ile 40000 J/m^2 arasında ve birim ağırlıkları ise $2500\text{--}3000 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir. [5,6]

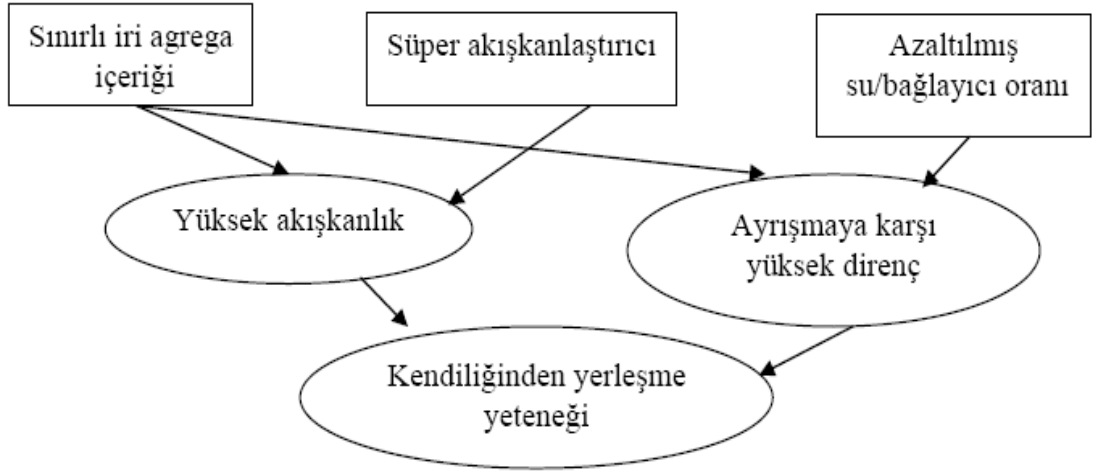
2.2.2.4 Kendiliğinden Yerleşen Çelik Lif Donatılı Betonlar

Kendiliğinden yerleşen betonlar kendi ağırlığı altında hareket edip, uygulandığı her şekildeki yapı kalıbında tüm köşelere ve dar bölgelere yayılarak, yerleşmenin ve hareketin çok zor olduğu yoğun donatılı kısımlarda vibratör gerektirmeden boşlukları, homojenliğini ve bütünlüğünü koruyarak doldurabilen betonlardır. [8]

Gelişen beton teknolojisiyle beraber artık günümüzde yüksek dayanım ve gelişmiş durabiliteye sahip, pek çok avantajlı yönleriyle normal betonlardan ayrılan yüksek performanslı betonlar üretilmektedir. Betonlardan sadece yüksek dayanıma sahip olması değil, istenen amaca yönelik durabilite şartlarını da sağlayabilmesi beklenmektedir. Yüksek performansın anlamı gerekli ve belirlenen ihtiyaçlara cevap verebilmek için beton bileşiminin düzenlenmesi şekline dönüşmüştür. Bu kavramla birlikte, belirli bir basınç dayanımının elde edilmesi, nitelikli taze beton özellikleri, kendiliğinden yerleşebilme, işlenebilirlik ve betonun çelik liflerle geliştirilmesinin sağlanması gibi kavramlar, başlı başına bir amaç olarak ortaya çıkmıştır. Böylece, optimizasyonun anlamı da mevcut çelik liflerin varlığına rağmen, kendiliğinden yerleşen betonlarda mevcut gereksinimlerin elde edilmesi ve istenilen mekanik özelliklerin geliştirilmesinde belirlenen hedeflere, mümkün olduğu kadar düşük maliyetlerle ulaşılması şekline dönüşmüştür [9].

Kendiliğinden yerleşen betonlarda işlenebilirlik özelliklerine ve betonun kararlılığına etki eden farklı hususlar mevcuttur. Önemli etkenlerden bir tanesi betondaki ince malzeme miktarıdır. Su/ince malzeme oranının çok yüksek olması harcın kohezifliğini azaltıp beton akış halindeyken ince ve iri agregaların ayrışmasına ve tıkanmaya sebep olabilir. Su/ince malzeme miktarının düşük olması ise taze betonun deformasyon kapasitesini kısıtlayabilir. Bir diğer husus betondaki iri agrega miktarı ve büyüklüğüdür. Taze beton boşlukların az olduğu dar yerlerden geçerken büyük

agregaların çarpışmaları artar buda içsel sürtünmenin ve viskositenin artmasına neden olur. Bu sebeple iri agrega ve kum miktarını azaltıp hamur hacmini artırmak kendiliğinden yerleşen beton üretiminde dikkat edilen bir husustur. Betonda silis unu, silis dumanı, uçucu kül, taş unu gibi ince malzemelerin miktarının artırılması içsel sürtünme açısından önemlidir. Ayrıca kendiliğinden yerleşen betonlarda, yüksek oranda süper akışkanlaştırıcı kullanımı, çimento tanelerini dağıtıp yayarak taneler arasındaki sürtünmeyi azaltıp su miktarında azalmaya olanak tanırken aynı zamanda gerekli düzeyde akıcılık vizkositenin devamını sağlarlar. Fakat betonda kullanılan ince malzeme, betona katılan katkının ve suyun bir miktarını kendi bünyelerine çekebileceğinden betonun işlenebilirliğinde olumsuzluklara sebep olurlar dolayısıyla betonda kullanılan katkı miktarının ayarlanması önemlidir.



Şekil 2.2: Kendiliğinden Yerleşen Betonların Özellikleri [10].

Kendiliğinden yerleşen beton üretirken işlenebilirliğin yanı sıra betonun stabilitesinde koruyacak malzeme çeşit ve oranlarının seçilmesine dikkat edilmelidir. Karışım tasarımında hedeflenen, terleme ve segregasyon gibi durumlar oluşmadan mümkün olan en yüksek akışkanlığa sahip betonu elde edebilmektir. Okamura ve Ozawa bu noktada karışım oranlarını belirlemek amacı ile bir karışım-oran sistemi ileri sürmüşlerdir. Karışım içindeki ince ve iri agrega miktarını sabit tutarak yalnızca su/pudra oranı ile akışkanlaştırıcı miktarını belirleyip kendiliğinden yerleşme yeteneğini elde edebilmişlerdir. Beton içindeki iri agrega miktarını katı hacmin %50'si değerinde, ince agrega miktarını da harç fazının %40 değerinde sabit tutulmasının ardından su/pudra oranına karar verebilmek amacı ile akış tablası kullanarak bir çok denemeyi içeren seri testler uygulanmış ve su/pudra oranının hacimce 0.9–1.0 arasında olduğu durumda kendiliğinden yerleşme yeteneğinin elde edileceği sonucuna varmışlardır. Okamura ve Ozawa yeterli katkı dozajına taze beton üzerinde yapılan yayılma deneyleri ile karar verilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. [9]

Kendiliğinden yerleşen betonlar, işlenebilirlik açısından pek çok avantaj getirmesinin sonucu, normal betonlara göre mekanik nitelikleri de daha gelişmiş olmaktadır. Bu betonlarda çelik liflerin kullanılması bu mekanik özellikleri daha da geliştirmektedir. Bilindiği gibi çelik lifler matraste oluşan çatlaklar üzerinde köprü vazifesi görmekte ve çatlak ilerlemesini yavaşlatmaktadır. Çatlak yayılmasını önemli bir şekilde kontrol eden lifler kendiliğinden yerleşen betonların mekanik özelliklerini ve uygulama alanlarını da genişletmektedir. Betonda akışkanlık, kohezyon ve ayrışma direnci, terleme direnci, kararlılık, minimum enerji gibi kavramların kolektif bir bütünü olan işlenebilirlik özelliği, liflerin kullanılmasından önemli derecede etkilenmektedir. Lifler farklı malzeme ve şekillerde üretilmekte olup betonun taze haldeki işlenebilirlik özelliğini kullanılan miktar veya lifin şekline göre olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Lif içeriği arttıkça üniform bir dağılım elde etmek zorlaşmakta ve azalan işlenebilirlikle beraber liflerden elde edilen fayda da azalmaktadır. Lif boyunun lif çapına oranı olarak tanımlanan narinlik kavramı da işlenebilirliği etkileyen diğer bir unsurdur. Yapılan çalışmalar sonucunda narinlik oranının artması ile işlenebilirliğin azaldığı görülmüştür.

Kendiliğinden yerleşen çelik lifli betonların taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini incelemek amacı ile S. Gürünewald ve J.C. Walraven geniş perspektifli bir çalışma yapmışlardır. Taze beton özellikleri üzerinde çelik lif tipi ve içeriğinin etkisini belirlemek üzere yapılan bir parametre çalışması ile başlayan araştırmada maksimum lif içeriği, 600 mm'den büyük olan slump akış değeri, dairesel şekilde olan akış alanı ve liflerle betonun homojen dağılımı kriterleri göz önüne alınarak belirlemişlerdir. Daha sonra 3 adet farklı beton sınıfına ait kendiliğinden yerleşen referans betonları ve farklı lif içeren 6 adet kendiliğinden yerleşen lifli beton karışımları üretilmiştir. Taze halde yapılan deneyler sonucunda her referans karışım ayrı ayrı incelenerek lif içerdikleri durumlarda slump akış alanının daha küçük, T_{50} sürelerinin ise daha uzun olduğunu ve lif kullanımı sonucunda işlenebilirliğin azaldığını vurgulamışlardır. Çalışmanın ileri safhalarında üretilen kendiliğinden yerleşen lifli betonlar aynı basınç dayanımı, lif içeriği ve lif oranına sahip normal lifli betonlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda kendiliğinden yerleşen lifli betonların eğilme altındaki davranışlarının önemli ölçüde daha iyi sonuç verdiği, ilk çatlak oluştuktan sonra yük taşıma kapasitesinin arttığı, kırılma enerjilerindeki standart sapmanın da normal lifli betonlara göre daha düşük olduğu vurgulanmıştır [9].

Beton teknolojisinin getirdiği en son gelişmelerden biri kendiliğinden yerleşen betonlardır. İlk geliştirildikleri 1980'lerden bu yana yapı sektöründe yüksek durabilite ve taze beton özelliklerinden dolayı önemleri zamanla anlaşılmış ve dünya çapındaki kullanımları artmıştır. Bu tip betonlar vibrasyona gerek duymadan kolay ve hızlı bir biçimde kalıplara yerleşmekte ve sık donatı aralıklarından

geçebilmektedir. Bununla beraber ayrışma ve terleme göstermemekte, homojen, düzgün yüzeyli, boşluksuz, durabilitesi yüksek betonların oluşumuna imkan vermektedir. Ayrıca lif kullanımıyla mekanik özellikleri geliştirilebilmekte fakat işlenebilirliğin düşmemesi açısından lif miktarına ve şekline dikkat edilmelidir.

2.3 Taze Beton Özellikleri ve Ölçüm Yöntemleri

Beton teknolojisindeki gelişmelerle, betonlarda çeşitli kimyasal ve mineral katkıların kullanılmasıyla beraber betonun taze haldeki özellikleri geliştirilebilmiş ve ortaya kendiliğinden yerleşebilme özelliğine sahip yeni nesil betonlar gelmiştir. Yüksek akışkanlık ve kararlılık özelliklerinden dolayı istenilen mimari şekle çok kolay bir şekilde girebilen bu betonlar yüksek yüzey kalitesinden dolayı betonun durabilite niteliğini de artırmaktadırlar. Taze betonun sahip olduğu nitelikleri ölçmek için standartlaşmış birkaç deney yöntemi olmasına karşın genelde uygulamalar ülkeden ülkeye değişmektedir. Ayrıca kullanılacak olan deney yöntemini seçmek ve bu deney yönteminden elde edilecek sonuçları yorumlamak araştırmacının kendi tecrübesine bağlıdır.

2.3.1 Taze Beton Özellikleri

2.3.1.1 İşlenebilirlik ve Kıvam

İşlenebilirlik ve kıvam harç, taze beton ve çimento hamuru söz konusu olduğunda en çok kullanılan iki terimdir. İşlenebilirlik her türlü taze beton ve harç karışımlarının değerlendirilmesinde kullanılırken, kıvam terimi ise agrega bulundurmeyen, çimento ve sudan imal edilmiş hamurun özelliklerini belirtmekte kullanılmaktadır. Çimento hamurunun sahip olduğu bazı özellikler doğrudan taze harç veya beton özellikleri ile ilişkilendirilememesinden dolayı uygulamada bu iki kavram farklı olarak kullanılmaktadır [11].

Kıvam kavramı homojenlik, üniformaluluk, akıcılık gibi kavramları kapsamakla beraber bilimsel ve reolojik verilerle tanımlanabilmektedir. İşlenebilirlik ise betonda viskozite, akma gerilmesi, içsel sürtünme, pompalanabilirlik, kararlılık, kohezyon, ayrışma, terleme, yerleşebilirlik, perdahlanabilirlik kavramlarını karşılamakta olup bu bahsedilen özelliklerin ancak bazıları reolojik yöntemlerle ölçülebilen bilimsel veriler verir. Diğerleri ise ancak ampirik deneylerle değerlendirilebilir.

İşlenebilirlik, viskozite, pompalanabilirlik, akışkanlık, koheziflik, sıkıştırılabilirlik gibi özellikleri içeren kolektif bir kavramdır. Taze beton işlenebilirliğine etki eden başlıca faktörler aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Karışımın su muhtevası
- Agregâ özellikleri (dane şekli, çapı, dokusu)
- Çimento özellikleri
- Yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı kullanılması
- Süper akışkanlaştırıcı, priz geciktirici veya hava sürükleyici katkı kullanımı
- Lif kullanılması
- Granülometrik özellikler

Taze betonun işlenebilirliğini etkileyen bu faktörler birbirinden bağımsız olmayıp birbirleriyle etkileşim halindedir.

İşlenebilirlik kavramını ölçebilmek için pek çok yöntem kullanılmasına karşın bunların hiçbirisi taze betonun bu özelliğinin tam olarak anlaşılabilmesi için yeterli değildir. Taze beton deneyleri, işlenebilirliğin ancak belli bir kısmını ifade edebilmektedir. Slump çökme deneyi, yayılma deneyi, sıkışma faktörü deneyi, küre penetrasyon deneyi, Ve-be testi uygulanan birkaç bir kaç örnektir. Bütün testler betonun işlenebilirlik özelliğini ölçmeye çalışmakta ve hiçbirisi mukayese edilememektedir [12].

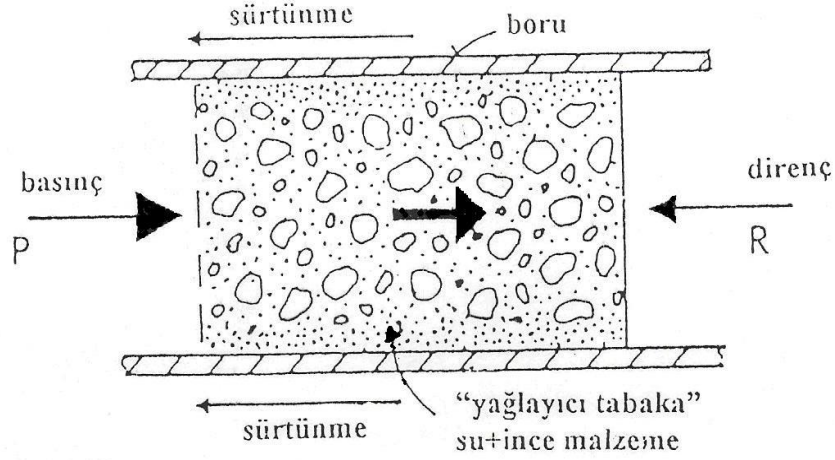
İşlenebilirlik kullanılan deneye bağlı olarak deneyi yapanın sahip olduğu tecrübe çerçevesinde değerlendirilmektedir. Dolayısıyla işlenebilirlik hakkındaki değerlendirmeler, hem deney sonuçlarına hem de öznel yargıya dayanmaktadır. İşlenebilirlik genellikle iyi, kötü, orta taze karışımın görüntüsü ise kuru, koyu, katı, plastik, yumuşak, nemli, ıslak olarak ifade edilmektedir.

2.3.1.2 Hareketlilik ve Pompalanabilirlik

Genelde taze beton üretildiği noktada hemen kullanılamamaktadır. Betonun üretildiği noktadan kullanılacağı yere kadar özelliklerini kaybetmeden taşınması ve döküleceği yere pompalanması gerekmektedir. Pompalama işleminin ufak bir basınçla kolay bir biçimde yapılması beklenirken betonun da özelliklerini koruması gerekmektedir. Pompalanan betonun, karmaşık şekilli kalıpları doldurması ve karışımın donatılar arasından ve çevresinden kolayca akabilmesi beklenir. Dolayısıyla betonun niteliklerini koruyarak yaptığı akış betonun hareketliliği olarak tanımlanabilir. Bu niteliği ölçmek için yayılma deneyi, ve bazı akış deneyleri mevcut olsada hareketliliğin doğrudan ölçümü için bir deney bulunmamaktadır.

Kolay pompalama için betonun minimum basınç ile segregasyon tehlikesi olmadan boru içinde bir bütün halinde akması gerekmektedir. Buna bağlı olarak

pompalanabilirlik çevresini saran boru içinde basınç altındaki betonun hareketlilik ve kararlılığı olarak açıklanabilir.



Şekil 2.3: Taze Betonun Boru İçindeki Akışı [11].

Betonda çok miktarda çimento ve ince malzeme kullanılması, beton ve boru cidarı arasındaki sürtünmeyi arttırabilir ve gereken pompalama basıncı yükselir. Bu durumda, kullanılan su miktarı veya akışkanlaştırıcı katkı miktarı artırılabilir. Ayrıca, betonun granülometrisi değiştirilip boşluk oranı yükseltilerek pompalanabilirlik geliştirilebilir. Taze betonun pompalanabilirliğini geliştirmek için yapılan çalışmalar sonucunda terlemenin segegasyonu artırdığı ve bununda sürtünmeyi artırarak pompalanabilirliği azalttığı kanısına varılmıştır. Ayrıca poroz ve hafif agregaların pompalama sırasında fazladan su emerek pompalanabilirliği azalttığı belirtilmektedir [11].

2.3.1.3 Kararlılık, Ayırışma, Terleme

Üretilen betonun taze haldeki işlenebilirliğinin yanı sıra karışımın kararlılığı da önemlidir. Beton üretildiği tesisten kullanılacağı şantiyeye taşınması esnasında uniformluluğunu, homojenliliğini etkileyebilecek olan çarpma ve basınç etkilerine maruz kalmaktadır. Kararlılık, beton tüm etkilere maruz kalırken ilk andaki uniformluluğunu tüm taşıma ve yerleştirme işlemleri süresi boyunca koruyabilme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca kararlılık, karışımın ayırışma ve terlemeye olan direnci olarak da görülebilir.

Ayırışma betondaki iri agregaların titreşim gibi sebeplerle dağılım düzeninin bozulmasıdır. Böyle bir durumda iri agregalar karışımın dibine veya bir köşesinde birikir. Bunun sonucunda beton uniformluluğunu kaybeder ve sertleştikten sonra beton bünyesinde çatlaklar oluşabilir. Taze beton kararlılığı arzu edilen bir özellik olmasına rağmen kararlılığın ölçülmesinde standartlaşmış bir deney yöntemi yoktur.

Genelde yapılan deneylerden tecrübeye bağılı olarak anlaşılr. Mesela yayılma deneyinde ayrışmaya olan eğilim, yayılma deneyi sonucunda numunenin etrafını saran su veya çimento hamurundan anlaşılr. Betonda karalılığı, dolayısıyla ayrışma ve terlemeye karşı olan eğilimi etkileyen bazı faktörler aşağıda sayılmıştır.

Kararlılığı azaltıp, ayrışma riskini artıranlar:

- Boşluklu granölometriye sahip ve en büyük agrega boyutu 40 mm civarında olanlar.
- Agrega karışımında kumun inceliğine bağılı olarak %30-%40 oranından az olması.
- Çimento hamuru miktarının az olması
- İri agrega, çimento hamuru ve ince agrega yoğunluklarının birbirlerinden farklı olması
- Çok yüksek su/çimento oranından dolayı çimento hamurunun viskozitesinin düşmesiyle betonun, agreganın dağılımını sağlayacak kadar bir kohezifliğe sahip olamaması
- Süper akışkanlaştırıcıların gereğinden fazla kullanılması

Kararlılığı artırıp, ayrışma riskini azaltanlar:

- Sürekli bir agrega granölometrisinin sağlanması ve en büyük tane çapının küçük olması
- Hava sürüklenme
- İnce malzeme oranının artırılması
- Karışımın sıvı fazını yoğunlaştırıcı katkıları

Betonun taşınması ve yerleştirilmesi esnasında meydana gelen titreşimler, pompalama, vibrasyon gibi faktörler, betonun ayrışmasına sebep olan başlıca etmenlerdir. Taze beton yerleştirme esnasında 1.5 m' den daha yüksek mesafeden düşürülmemelidir. Bu durum, betonun viskozitesinin düşmesine, taze betonun kısa bir süre için bile olsa Newton sıvısı gibi davranmasına ve uniform bir beton üretmek için gerekli olan kohezyonun düşmesine sebep olmaktadır.

Terleme, suyun titreşim anında karışımından ayrılarak yüzeye çıktığı özel bir ayrışma türüdür. Terleme esnasında betonda bulunan agrega çöker ve su yüzeye doğru çıkar. Ayrışmış su, yüzeyde toplanır ve burada su/çimento oranının artmasına, dolayısıyla dayanımın düşük olduğu bir çimento hamur tabakası oluşmasına sebep olur **[11]**.

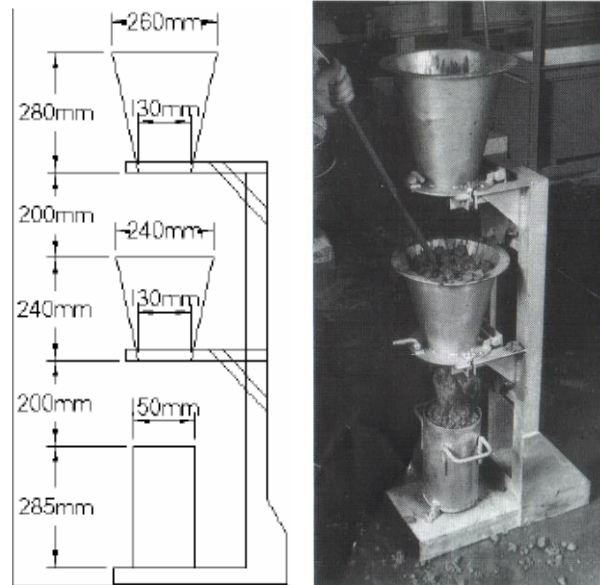
Genel olarak karışımdaki çimento dozajının artırılması, karşının uçucu kül, silis dumanı gibi ince malzemelerle desteklenmesi, su muhtevasının azaltılması ve betona hava sürükleyici katkıların eklenmesi terlemeyi azaltmaktadır [12].

2.3.1.4 Sıkışabilirlik (Yerleşebilirlik)

Üretilen normal bir betonun işlenebilirliği içinde hapsolmuş havanın dışarı çıkmasına izin verecek kadar iyi değildir. Beton içinde kalan hava, sertleşme gerçekleşikten sonra beton içinde hava boşlukları oluşturmakta ve buda mukavemet ve dayanım üzerinde olumsuz etki yapabilmektedir. Normal betonlarda hava çıkarılması yani betonun sıkıştırılması, betona titreşim verilerek yani enerji harcanarak gerçekleştirilir. Sıradan bir betonun iyi sıkıştırılması sonucu betonda %1-%2 mertebesinde hava kalır. Bu değerlerin daha altına düşmek harcanan enerji ve elde edilen fayda açısından uygun değildir.

Yerleştirme işlemi enerji gerektiren bir işlemdir. Dolayısıyla betonu sıkıştırmak için gerekli enerji cinsinden beton sıkıştırılabilirliği ölçülebilmektedir. Yerleşebilirliği ölçen standartlaşmış deneyler de bulunmaktadır. Bunlar; sıkıştırma faktörü deneyi ve sıkıştırma deneyleridir.

Sıkıştırma faktörü deneyinde numune iki standart yükseklikten düşürülmekte ve belli bir sıkışma gerçekleşmektedir. Daha sonra bu sıkışan numuneyle sıkışma yapılmamış numunenin aynı hacimli kaptaki ağırlıkları oranlanarak karışımın standart bir enerji ile ne kadar sıkışabildiği araştırılmaktadır. Fakat bu deneyde harcanan enerji şantiye şartlarında sıkışma işlemi için harcanan enerjiye göre çok küçük kaldığı için gerçeği pek yansıtmamaktadır [11].



Şekil 2.4: Sıkıştırma Faktörü Deney Düzeneği [13,11].

2.3.1.5 Perdahlanabilirlik

Perdahlanabilirlik teriminin tatmin edici bir tanımı bulunmamaktadır. Her türlü perdah işinin kendine has işlenebilirlik derecesine ihtiyacı vardır. Bunun için uygun hareketlilik, kararlılık, terleme direnci ve yeterli kohezyon gibi ölçütlere ihtiyaç vardır. Perdahlanabilirlik, genelde döşeme kaplama gibi karmaşık şekilde uzanan kalıplarla karşılaşıldığında önem kazanır. Perdahlanabilirlik hakkındaki yorumlar çeşitli işlenebilirlik deneyleriyle veya tecrübeye dayalı görsel değerlendirmelerle yapılır.

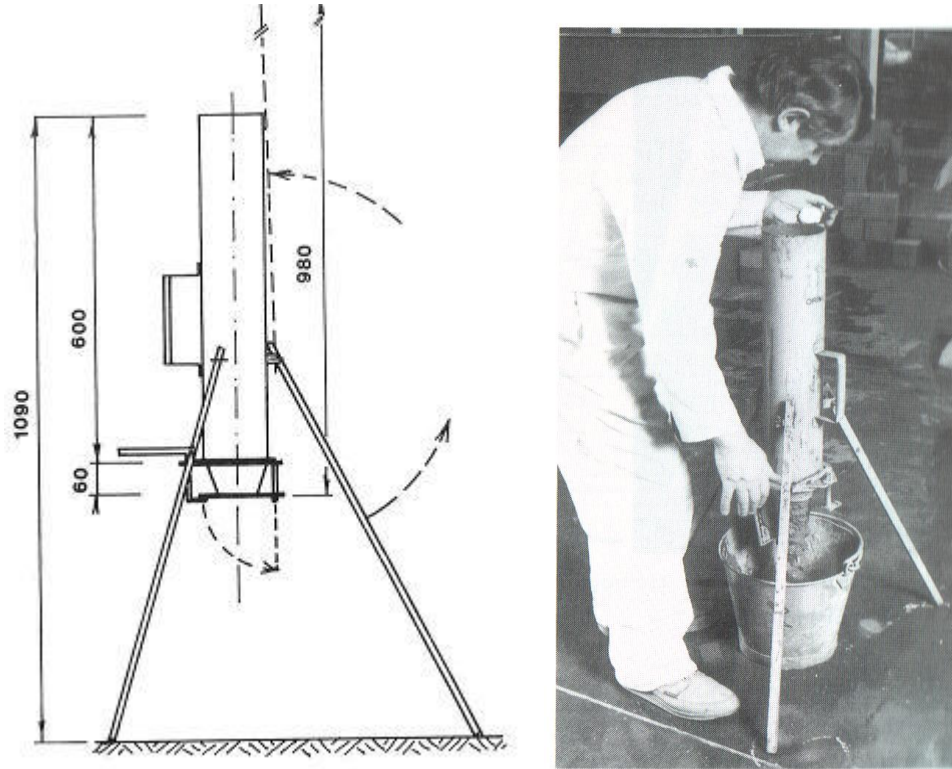
2.3.2 Ölçüm Yöntemleri

Betonun işlenebilirliği, beton üretildikten sonra ölçülebilen ilk özelliklerindendir, 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. İşlenebilirlik, su miktarı, agrega boyutu ve miktarı, çimento miktarı, ince malzeme oranı, beton içindeki hava oranı gibi pek çok faktörle alakalıdır. İşlenebilirliği ilk ölçen deney slump testidir. Bu test, basit olduğundan sahada yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Fakat yinede slump test beton işlenebilirliği hakkında bir fikir verse de tam olarak beton özelliklerini yansıtamamaktadır. Dolayısıyla beton işlenebilirliği üzerine daha detaylı, farklı deney yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları da betonun sıkıştırılabilirliğini, akış özelliklerini veya doldurma yeteneği gibi özelliklerini ölçerek, betonun işlenebilirliği hakkında bilgi veren deneyleridir.

2.3.2.1 Orimet Testi

Orimet testi, yüksek işlenebilirliğe sahip taze betonlar için uygun bir testtir. Genelde Slump'ı 150mm'den büyük veya çökmüş slump'lı betonların işlenebilirliğini sınıflandırır. Yani Slump'dan daha hassas bir biçimde yüksek akışkan veya kendinden yerleşen betonların işlenebilirliğini ölçer. Ayrıca bu yüksek işlenebilirlikli betonlarda segregasyonu konusunda fikir verir. Orimet aleti düşey bir silindir ve bu silindirin altındaki bir orifisten oluşur. Bu alttaki orifisin ağzında açılır-kapanır bir kapak bulunur. Düşey silindirin uzunluğu 600mm, buna bağlı, sonunda orifis bulunan kesik koninin uzunluğu 60mm ve ucundaki orifisin çapı ise 80mm'dir. Bu orimet cihazlarında 80mm'lik orifis ağzı için max agrega boyutu 20mm'dir. Bunun dışındaki agrega boyutları için orifis çapı 70-90mm arası değiştirilebilir. Deneyi gerçekleştirebilmek için en az 7.5 lt taze betona ihtiyaç vardır. Bu orimet cihazı akış zamanı ölçmede veya akış var- yok durumunu incelemek için 2 tipte kullanılır

ikisinin de kullanım amacı farklıdır. Akış zamanlarıyla işlenebilirlik arasında direk ilişki kuran bir tablo veya korelasyon yapılmamıştır. Sadece iyi işlenebilirliğe sahip betonlar 5 sn gibi bir sürede orifisi tıkamadan akışı tamamlamaktadırlar. Kendinden yerleşen betonlar ise 2 sn gibi bir sürede akışı tamamlamaktadırlar. Bunun yanı sıra yüksek plastik viskoziteye sahip su altı betonları ise akışı ancak 60sn gibi bir sürede tamamlayabilmektedirler. İşlenebilirlik artıka karışımın stabilitesi düşebilir. Aşırı akışkanlaştırıcı veya fazla su kullanıldığı durumlarda taze betonda segregasyon tehlikesi başlar. Betonda segregasyon tehlikesi varsa, beton silindirden akarken agregalar betondan ayrılıp orifis çıkışını tıkarlar. Bu durumda akış ya duraksadıktan sonra devam eder veya tamamen durur. Bu betonda segregasyon olacağını gösterir. Kısacası aleti kullanan kişi kullandığı betonda cihazdaki akış durumuna göre segregasyon durumunu ve akış süresine göre de betonun işlenebilirliğini anlayabilir.



Şekil 2.5: Orimet Testi [11]

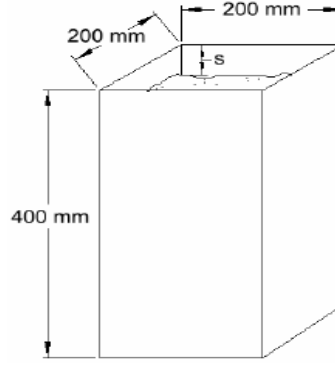
2.3.2.2 Compaction Test (Sıkıştırma Deneyi)

Bu test yüksek işlenebilirlikli betonlardan çok düşük işlenebilirlikli betonlara kadar geniş bir yelpazede ölçüm yapabilir fakat çok yüksek işlenebilirliğe sahip betonların işlenebilirliğini ölçmek için uygun değildir. Max agreg boyutu (40-63) mm' ye kadar olan betonların ve hafif agregalı betonların işlenebilirliğini ölçebilir. Deney aleti kare kesitli 16lt'lik ağzı açık metal bir konteynırdan oluşmaktadır. Konteynır paslanmaz çelikten olup boyutları 200mm-200mm-400mm kadardır. Konteynır et

kalınlığı 1,5mm'dir. Deneyde sıkıştırma standart bir çubukla veya vibratörle yapılacaksa, standart frekansta olmalıdır. Bu frekans genelde 120 Hz'dir. Deneye başlamadan önce konteynırın içi hafifçe ıslanır veya yağlanır. İlk önce beton deney konteynırına yavaşça doldurulur. Doldurma işleminde dört köşenin de kullanılmasına dikkat edilir. Konteynır bu şekilde ağzına kadar doldurulur ve üst kısmı fazla betonu almak için hafifçe sıyrılır. Bu arada betonu sıkıştırmamaya özen gösterilmelidir. Bu işlemeyden sonra konteynır, bir çubukla veya vibrasyonla iyice sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemine betonun sıkışması durana kadar devam edilir. Sıkıştırmadan sonra beton yüzeyi kontrol edilir. Eğiklik varsa düzeltilir. Daha sonra betonun derinliği 4 köşede de ayrı ayrı ölçölür ve ortalaması alınır(s). Bu değeri kullanarak betonun sıkışma derecesi hesap edilir(c).

- $c = h_1 / (h_1 - s)$
- h_1 = konteynırın yüksekliğı
- s = köşelerden beton yüzeyinden konteynır üst tabakasına kadar ki mesafenin ortalaması.

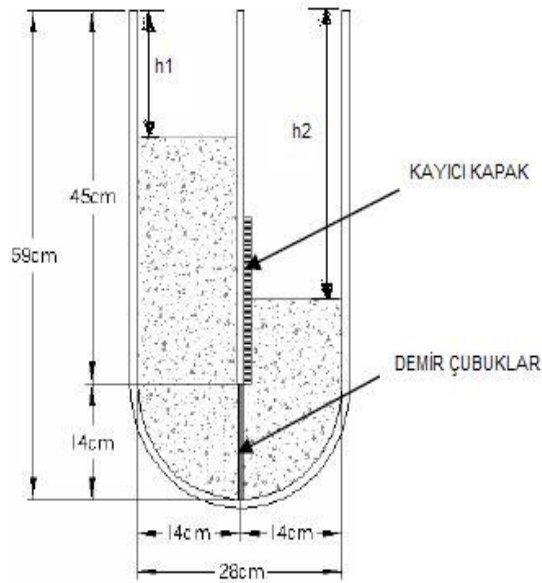
Bu deneyde, sonuç olarak elde edilen c değeri betondaki sıkışmayı kısmi olarak göstermektedir. Betonun sıkışmadan önceki yüksekliğı konteynırın yüksekliğıyle aynı olup aşşa yukarı 400mm kadardır. “c”değerinin alt kısmını oluşturan ($h_1 - s$) değeri, beton sıkıştıktan sonra betonun ortalama yüksekliğini vermektedir. Bu oran genelde $c=1,02$ ve $c= 1,50$ değeri arasında değışmektedir. Bu oran büyüdükçe betonun işlenebilirliğı azalıyor demektir. Şöyle ki; eğer beton ilk konteynıra koyulduğunda kendiliğinden yerleşebilse beton içinde boşluklar az olur, dolayısıyla sonradan vibrasyonla sıkışması az, yani “s” değeri küçük olur ve “s” değeri ne kadar küçük olursa “c” değeri de o derecede 1'e yaklaşır yani küçük olur. Bu durum, deneyi yapılan betonun işlenebilirliğinin yüksek olduğunu gösterir. Bunun tersi bir durumda ise “c” değeri yükselir yani “s” artar ve o numunenin işlenebilirliğinin düşük olduğunu gösterir. Bu test, işlenebiliriliğı diğeri test metodlarına nazaran daha farklı bir biçimde göstermektedir. Compaction factor (sıkıştırma faktörü testi) testinde numunede standart bir enerji altındaki hacim değışimi ölçölürken, bu testte ise enerji, vibrasyon sınırlaması olmadan standart bir konteynırdaki hacim değışimi ölçölülmektedir [13,11].



Şekil 2.6: Compaction Test Düzenegi [13]

2.3.2.3 U-Kutusu Testi

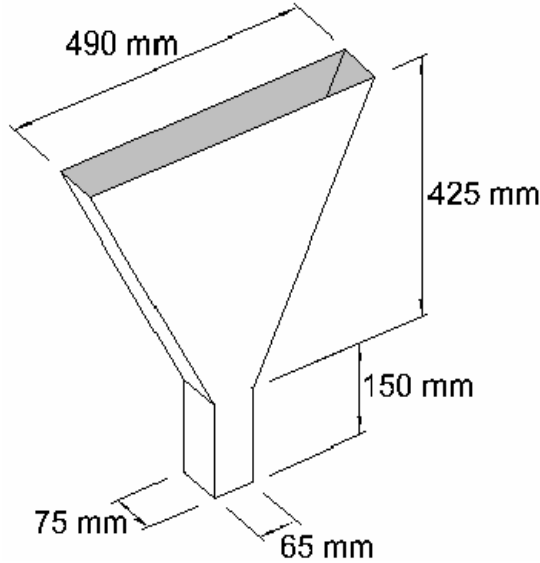
U-box deneyi, taze betonun kendi ağırlığı ile şekil değiştirme ve donatılar arasından geçme yeteneğini ölçen bir testtir. U-box kutusu “U” şeklinde olup, ortadan bir bölmeyle ikiye ayrılmıştır. Bölmenin alt kısmında betonun diğer kısma geçmesini sağlayacak bir açıklık bulunur. Bu kısımda belli aralıklarla donatılar vardır. Deneyde, beton bir bölüme doldurulduktan sonra aradaki bölme açılır ve kendi ağırlığıyla alttan diğer bölüme doğru geçer. Bu tez çalışmasında, veri olarak, betonun hareketini tamamlama süresi ve hareketini tamamladıktan sonra u-box kutusunun iki tarafındaki beton yüzeyine olan mesafeler kullanılmıştır. Bu mesafeler, h_1 , betonun u-box aletine konulan taraftaki yüksekliği olmak üzere h_1 ve h_2 olarak ölçülmüş ve h_1/h_2 olarak oranlanmıştır. İşlenebilirliği yüksek betonlarda bu hareket süresin kısa ve h_1/h_2 oranının 1’e yakın olması beklenmektedir.



Şekil 2.7: U-Kutusu Deney Düzenegi [13]

2.3.2.4 V-Hunisi Testi

Bu test KYB' nin dar bir kesitten kendi ağırlığı altında geçiş yeteneğini incelemek amacı ile oluşturulmuştur. Akış hızının belirlenmesi ve gözlem yapılması sureti ile KYB' nin viskozitesi hakkında bilgi veren bu deney yönteminde, belirli aralıklarla belirlenen akış sürelerinin kullanılması sonucu ayrışma direnci hakkında da bilgi edinilmektedir. Maksimum agrega boyutu 25mm'nin altında olan betonlar için kullanılan bu deney, V şeklinde dikdörtgen kesitli bir huniden oluşmaktadır. Yaklaşık 12 litre hacme sahip bu huninin en alt kesitinde betonun akışına izin vermek üzere kullanılan bir kapak bulunmaktadır. Deney düzeneğinin yüzeyleri nemlendirildikten sonra üst yüzeye kadar beton ile doldurulur. Alt kapağın açılması ile deney başlar ve süre çalıştırılır. Akış, üstten bakıldığında alt kesitte ışığın görülmesi ile tamamlanır ve geçen süre ölçülür. Deney sırasında sürekli ya da geçici olarak, akışın bloklanma nedeni ile engellenip engellenmediği gözlemlenir ve not edilir. Kullanılan beton deney tamamlandıktan 5 dakika sonra tekrar test edilir ve süre tekrar kaydedilir. Yaklaşık 10 saniye olması gereken akış süresi betonun akıcılığı hakkında bilgi verirken, 5 dakika ara ile yapılan ölçümler arasındaki fark segregasyon direnci hakkında bilgi vermektedir [14].



Şekil 2.8: V- Hunisi Deney Düzeneği [13]

2.4 Çelik Lif, Silis Dumanı ve Katkı Kullanımının KYB' özelliklerine Etkisi

2.4.1 Silis Dumanının Beton Özelliklerine Etkisi

Silis dumanı ile ilgili ilk çalışmalar 1950'lerde Norveç'te başlayıp 1970'lerde betonda kullanımıyla ilgili makale ve araştırmalar artmaya başladı. 1980'lerden sonra ise dünyada yaygın bir kullanım alanı buldu [15].

Silis dumanı metal ve ferrosilisyum alaşımlarının üretilmesi için yapılan eritme işleminin yan ürünüdür. Üretim esnasında kullanılan elektrik ark fırınlarında, yüksek sıcaklıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli bir toz olup genellikle camsı, düzgün yüzeyli ve küresel taneciklerden meydana gelir ve bir çimento tanesinin 100 katı inceliğindedir. [16].

Silis Dumanının başlıca özellikleri;

- %85'ten %98'e kadar SiO_2 içeriği
- 0,1-0,2 μ tane büyüklüğü
- Küresel tane şekli
- Amorf yapısıdır [17].

Silis dumanı kullanıldığı betonlarda belli mekanizmalarla pek çok fayda sağlar. Silis dumanının çok ince yapısı sebebiyle betonda kullanıldığında boşlukları doldurucu bir etki sergiler. Agregası ve beton matrisi arasındaki ara yüzeyde boşluk miktarı azalır ve betonun dayanımı artar. Boşluk yapısı azaldığı için betonun geçirgenliği düşer ve durabilite niteliği artar. Ayrıca silis dumanını sahip olduğu pozolanik özelliğinden dolayı betonun içyapısı daha güçlü bir hale gelir ve betonun dayanımı artar. Azalan boşluk yapısı ve artan dayanımdan dolayı beton gevrekleşir.

2.4.1.1 Silis Dumanının İşlenebilirlik ve Durabiliteye Etkisi

Üretilen betonlarda taze haldeki en önemli özellikler işlenebilirlik, homojenlik ve karalılıktır. Silis dumanı kullanılmasıyla beraber betonda ince malzeme oranı artacaktır. Bu da işlenebilirlik için gerekli olan su miktarını artırmaktadır. İnce malzeme miktarının artmasıyla işlenebilirlik düşecek fakat oluşan kohezif yapı sebebiyle betonun segregasyon direnci artacaktır. Düşen işlenebilirlik kullanılan akışkanlaştırıcı miktarının artırılmasıyla giderilebilmektedir. Böylece kohezif, işlenebilirliği yüksek ve ince malzeme miktarının fazla olmasından dolayı durabilitesi iyi, kimyasal etkilere dirençli bir beton elde etmek mümkün olmaktadır [6,18].

Bilindiği gibi geçirgenlik betonun durabilitesini etkileyen en önemli husustur. Betonun bütünlüğüne zarar verebilecek unsurlar, beton yüzeyindeki çatlaklardan, agregası-matris ara yüzeyinden betona nüfuz etmekte ve birbiriyle bağlantılı olan boşluklar sistemiyle betonun içine ilerlemektedir. Kullanılan silis dumanı, çok ince yapısı nedeniyle boşlukları ve agregası-matris ara yüzünü çok iyi bir biçimde doldurmaktadır. Ayrıca silis dumanının sahip olduğu pozolanik özellikten dolayı çimentonun hidratasyon reaksiyonları sonucu ortaya çıkarmış olduğu kireci bağlayarak kalsiyum silikat hidrat yapısını oluşturur. Böylece betonun boşluk yapısı

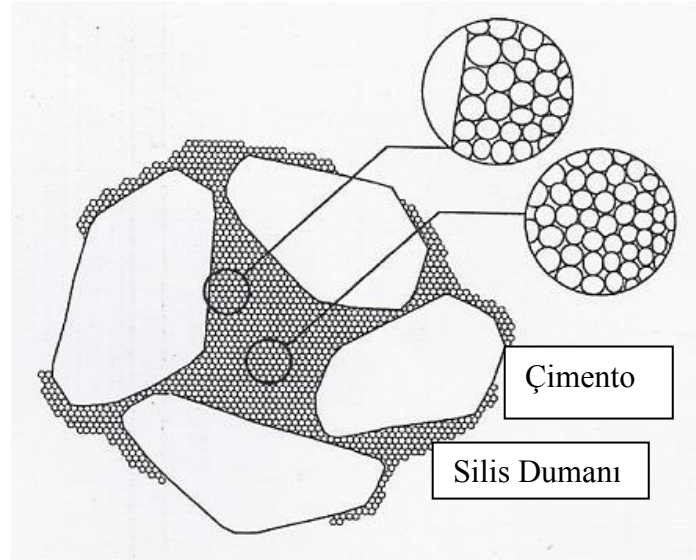
azalmış, agrega-matris ara yüzü güçlenmiş olur. Dolayısıyla betonun geçirgenliği azaldığından dolayı durabilitesi artmış olur [16].

2.4.1.2 Silis Dumanının Beton Mikro Yapısına Etkisi

Silis dumanının betonun mikro yapısı üzerindeki etkileri puzalonik ve boşluk doldurma olmak üzere iki şekilde olur.

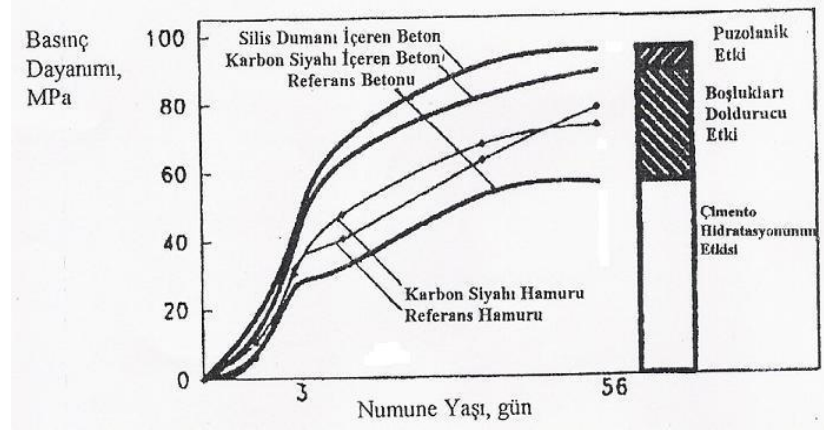
a) Boşluk doldurma etkisi

Silis dumanı önceden de belirtildiği gibi çok ince (0,1-0,2) μ ve küresel bir yapıya sahiptir ve beton içerisindeki boşlukları çok iyi bir biçimde doldurabilmekte dolayısıyla poroziteyi azaltmaktadır. Silis dumanı suyun yerine çimento taneleri arasındaki boşlukları doldurmakta ve Agrade-matris ara yüzünü güçlendirmektedir. Böylece betonun geçirgenliğini azaltmakta ve durabilitesini artırmaktadır [19].



Şekil 2.9: Silis Dumanının Dolduruculuk Etkisi [20]

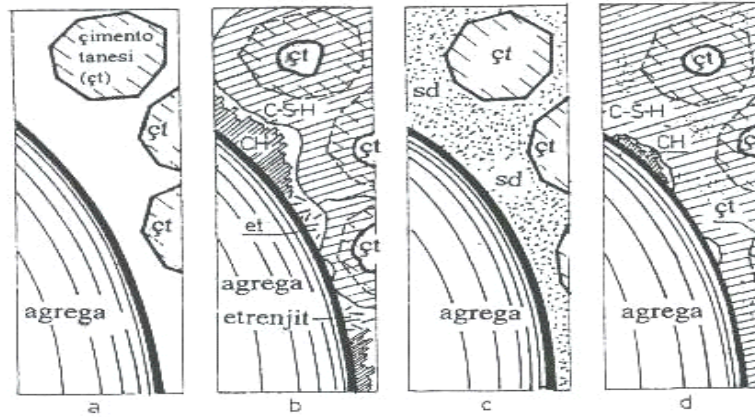
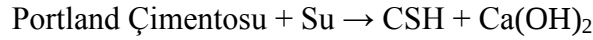
Silis Dumanının sahip olduğu dolduruculuk ve puzolanik etkinin dayanıma olan katkısını incelemek amacıyla Bentur ve Goldman tarafından yapılan deneylerde silis dumanı ve aynı incelikte puzalonik özelliği bulunmayan, sadece boşluk doldurma yeteneği bulunan karbon siyahı kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda dayanıma olan katkı söz konusu olduğunda dolduruculuk etkisinin, puzalonik etkiye göre daha fazla katkı sağlandığı gözlemlenmiştir [6].



Şekil 2.10: Silis Dumanını Dolduruculuk Etkisi [6]

b) Puzalonik etki

Bilindiği gibi çimento ve suyun yaptığı hidratasyon reaksiyonları sonucu kalsiyum silika hidrate (CSH) yapılar ve kireç Ca(OH)_2 oluşmaktadır. Puzolanik özelliğe sahip maddeler hidratasyon reaksiyonları sonucu oluşan bu kireç ve suyla birleşerek kalsiyum silika hidrate (CSH) yapıları oluşturur. Silis dumanı bu puzolanik mineral katkılar arasında sayılmaktadır. Silis dumanının sahip olduğu bu özellik sayesinde beton matrisinde zayıf ve geçirgen bir karakter sergileyen kireçli kısımlarla birleşerek CSH kristallerini oluşturur ve betonda mikro boşluk oluşturabilecek olan fazla suyu da bu reaksiyonlar sırasında tüketir. Böylece matris ve agrega-matris ara yüzeyi güçlenmiş olur dolayısıyla betonun dayanımıyla beraber durabilite özellikleride artar. Çimento ve silis dumanının yaptığı reaksiyonlar aşağıda gösterilmiştir [9].



Şekil 2.11: Silis Dumanını Puzalonik Etkisi [19]

Şekil 2.9 incelendiğinde, “a” kısmı silis dumanı içermeyen, “b” kısmı kirecin agrega yüzeyine çökmesini, “c” kısmı silis dumanı ile boşlukları dolmuş taze betonu, “d” kısmı ise daha az boşluklu geçiş bölgesini göstermektedir.

2.4.2 Çelik Liflerin Beton Özelliklerine Etkisi

Bilindiği gibi çimento esaslı malzemelerin sünekliği, çekme dayanımı, ve toklukları düşüktür. Betonun kırılmasında en büyük rolü çatlak oluşum ve yayılım mekanizmaları oynamaktadır. Lif kullanılmasıyla bu çatlak yayılımı kontrol altına alınarak betonun tokluğu, kesme dayanımı, çekme dayanımı, yorulması gibi yetenekleri geliştirilmektedir.

Lif donatılı betonlarda kullanılan liflerin görevi, özellikle çekme mukavemetleri yüksek olduğu için, beton matrisinde çatlakların hızlı ve kontrolsüz gelişiminin önüne geçmektir. Beton içinde kullanılan çelik lifler, malzemeye yük etkimesi ile çalışmaya başlarlar. Mikro çatlakların başlaması ile yükün büyük bir kısmını alan lifler, ana taşıyıcı olarak görev alırlar ve bu noktada matris, yükü liflerden alan ve liflere transfer eden ikincil taşıyıcı eleman olarak çalışır [21].

Çelik lif katkılı betonlarda, beton malzemenin özellikleri liflerin yardımıyla geliştirmek amaçlanmaktadır. Dolayısıyla oluşan bu yeni kompozitin performansı matris ve lif arasındaki etkileşime bağlıdır. Bu ilişkiyi etkileyen başlıca etmenler şu şekilde sıralanabilir;

- Matrisin durumu: çatlamış veya çatlamamış olması
- Matrisin niteliği
- Lif geometrisi
- Lif tipi ve yüzey özellikleri
- Liflerin yönlenmesi
- Liflerin kompozitteki miktarı
- Matris ve lif elastisite modülleri arasındaki farklar [15].

2.4.2.1 Lif malzemesinin etkisi

Betonda değişik malzemelerle üretilmiş farklı niteliklere sahip lifler kullanılabilir. Bu lifler sahip oldukları bu farklı özellikler sebebiyle betona sağladıkları avantajlarda farklı olmaktadır. Lifler üretildikleri malzemelere göre genel olarak;

- Metalik lifler (çelik lifler)

- Polimerik lifler (polipropilen, polietilen, polyester)
- Mineral lifler (cam)
- Doğal lifler (selüloz) şeklinde sıralanabilir [15].

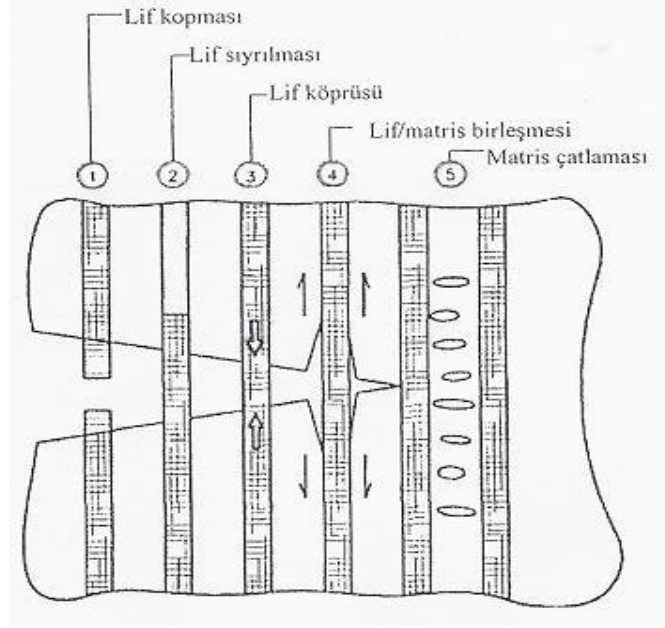
Çelik lifler genel olarak, beton sertleştikten sonra mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılırken, polimerik lifler ise beton taze haldeyken plastik rötre dayanımını artırmak ayrıca betonun yangına olan dayanımını artırmakta kullanılabilir [10].

2.4.2.2 Lif-matris ilişkisinin etkisi

Lif matris arasındaki ilişki lifin performansını etkileyen önemli hususlardandır. Çelik liflerin çatlak oluşuktan sonra köprü oluşturarak gerilmeleri çatlağın her iki yanında bulunan matrise aktardığı ve böylece çatlağın ilerlemesini engellediği bilinmektedir. Kullanılan liflerin, özellikle betonda çatlama başladıktan sonra yükün tamamını karşılayabilmeleri için matris ile kuvvetli bir fiziksel ve mekanik bağ oluşturabilmeleri gerekmektedir. Lif ile matris arasında oluşan gerilme transferi için matrisin yoğun olması ve lif yüzeyini sarabilmesi gerekmektedir. Sıyırılmanın engellenmesi ile artan lif performansı sayesinde çatlağın ilerlemesi için gerekli enerji miktarı artmaktadır [22].

Lif matris ilişkisi söz konusu olduğunda matrisin çatlayıp, çatlamamış olması önem kazanmaktadır. Çatlamamış matris-lif ilişkisi yüklemelerin başlangıcında hemen hemen tüm kompozitelerde görülür. Lifler, matrise gelen yüklerden, ısı değişikliklerinden, rötrede, hidrasyon ısısından dolayı oluşan iç gerilmeleri matrisle arasındaki aderans sayesinde alarak betonun bütünlüğünü korur. Beton da çatlak oluşuktan sonra ise lifler, çatlaklar arasında köprü kurarak yükü çatlak boyunca iletir. Lifler üzerine gelen gerilmeler çatlağı durdurmaya yeterse çatlak oluşumu kontrol altına alınır. Gerilmelerin artması durumunda ise liflerin matrisle arasında olan aderansa bağlı olarak lif sıyrılması veya lif kopması gözlenir. Liflerin sıyrılması ve kopması durumunda beton yük altında şekil değiştirme yapabildiğinden büyük oranlarda enerji yutabilmektedir [15].

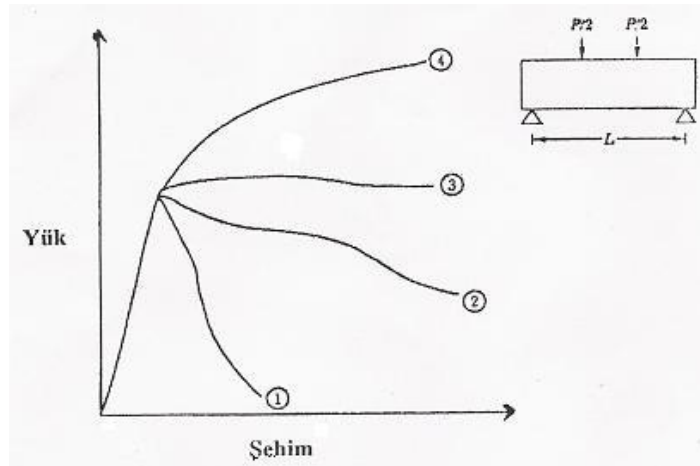
Farklı uygulama alanları için aderans kuvvetini arttırmak amacı ile çeşitli geometrilerde lifler üretilmektedir. Bunlar kullanım amacına göre düz, dalgalı, pürüzlü, kanca uçlu, zigzaglı gibi çeşitli geometrilerde üretilebilmektedirler. Liflerin, bu farklı geometrilerde üretilmesiyle lif ve matris arasında aderansı olumlu etkileyen mekanik bir dış kuvveti oluşturulması amaçlanmaktadır. [5,6].



Şekil 2.12: Lif-Matris Mekanizmasının Enerji Yutması [23]

2.4.2.3 Lif miktarı, lif narinlik oranı, yönelimi ve lif dağılımının etkisi

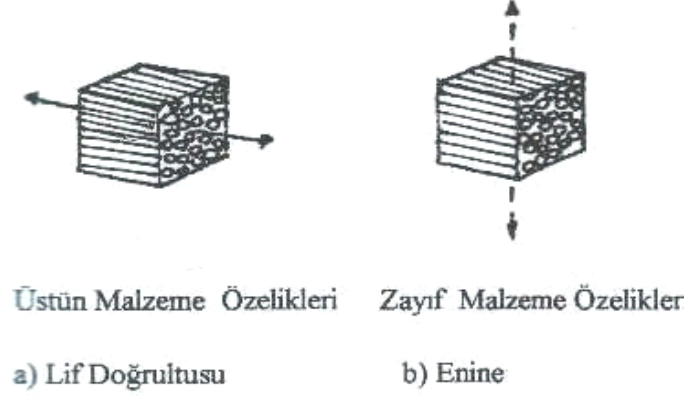
Lif donatılı, çimento esaslı kompozit malzemelerde lif ve matris olmak üzere 2 ana faz bulunmaktadır. Çeşitli yüklemeler altında matris çatladıktan sonra yük, çatlak üstündeki liflere transfer edilir ve lifler bir köprü vazifesi görmeye başlar. Bu noktada kompozitin yük taşıma kapasitesi içerdiği lif miktarına bağlıdır. Şekil 2.11’ de görüldüğü üzere farklı oranlarda lif içeren 4 kompozitin yük-sehim eğrileri verilmiştir. Bu eğrilerde 1. ve 2. kompozit malzemelerde lifler tarafından taşınan yük, matrisin taşıdığı yük miktarından daha azdır. 3. ve 4. malzemelerde ise sırasıyla liflerin taşıdığı yük miktarı matrisin taşıdığı yüke eşit ve daha fazladır.



Şekil 2.13: Farklı Miktarlarda Lif için Tipik Yük–Şehim Eğrileri [15]

Lif katkılı kompozit malzemelerde en iyi performansı elde edebilmek için lifler çekme gerilmelerine paralel bir şekilde yerleştirilmelidirler. Fakat böyle bir durumu

uygulamada elde etmek zordur. Kendiliğinden yerleşen betonlarda kullanılan agregaların küçük boyutlu olması, düşük vizkositeye sahip olmaları ve yüksek kohezif özelliklerinden dolayı lif dağılımı homojen bir biçimde sağlanabilmektedir. Böylece kompozit her yönde aynı özelliği sergileyebilmektedir [5,6].



Şekil 2.14: Lif Doğrultusuna Göre Malzeme Özellikleri[5]

Lif uzunluğunun çapa bölünmesi ile bulunan lif narinliğinin 60–100 arasında olması istenir. Narinlik oranı, lif içeriği, lif geometrisi gibi faktörler donatılı betonların performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Aynı zamanda, kullanılan lif miktarı ile lif geometrisi ve lif narinliği arasında çok yakın bir ilişki söz konusudur. 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 [5].

2.4.3 Katkı Kullanımının Beton Özelliklerine Etkisi

Katkılar betonun diğer bileşenlerine göre daha az kullanılan kimyasallardır. Genel olarak karışımda kullanılan çimento miktarına göre belirlenirler. Betona kazandırılmak istenen özelliklere göre çeşitli katkıları kullanılabilir. Bunlar, hava sürükleyen, korozyon direncini artıran, priz geciktiren veya akışkanlaştırıcı katkıları olabilir. Katkıları, genelde betonun üç temel özelliği olan dayanım, işlenebilirlik ve durabilite yönlerini güçlendirmek için kullanılır.

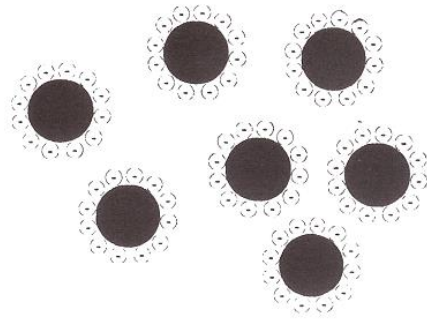
Beton üretiminde akışkanlaştırıcıların kullanılmasıyla su/çimento oranı düşük, zor kalıplara kolaylıkla yerleşebilen yüksek işlenebilirlikli, yüksek ayrışma direnci, yüksek dayanım ve durabilite özelliklerine sahip yüksek performanslı betonlar üretilmeye başlanmıştır. Akışkanlaştırıcıları, etkinlik derecelerine göre normal

akışkanlaştırıcılar, orta derecede akışkanlaştırıcılar ve süper akışkanlaştırıcılar olarak 3 grupta toplanabilirler. Ayrıca beton üretiminde süper akışkanlaştırıcılar genel olarak çok düşük su/çimento oranına sahip betonlar üretmek, düşük çimento dozajlı betonlar üretmek ve yüksek akışkanlığa sahip betonlar üretmek amacıyla 3 farklı şekilde kullanılabilir. Kimyasal bileşimleri göz önüne alındığında ise süper akışkanlaştırıcıları 3 farklı grupta toplamak mümkün olmaktadır;

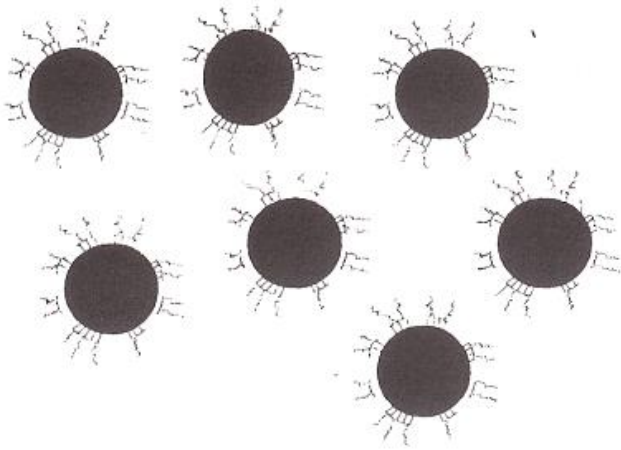
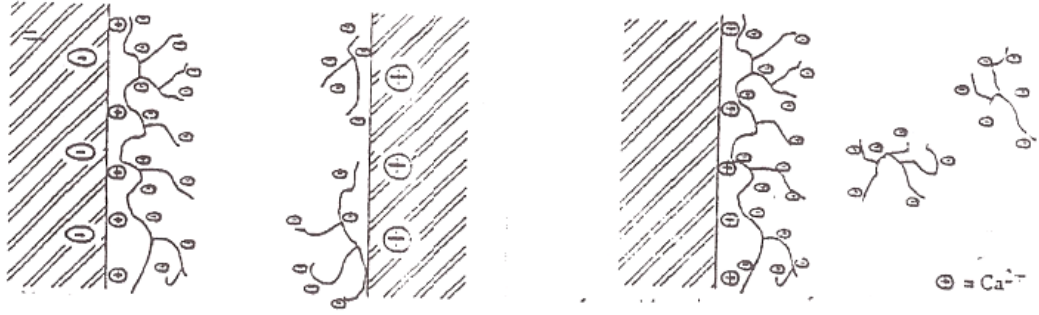
- a) Sülfonatlı sentetik polimerler,
- b) Karboksilatlı sentetik polimerler,
- c) Modifiye linyo sülfonatlar [24,5].

Süper akışkanlaştırıcı betonlar yoğun donatılı, dar ve karmaşık şekilli kalıplara sahip bölgelere vibrasyona gerek duymadan rahatlıkla yerleşebilmektedir. Süper akışkanlaştırıcı betonlar taze betonun pompalanabilmesi işlemini de oldukça kolaylaştırmaktadırlar. Bu tip katkıların, işlenebilirliği nasıl arttırdığı hususunda birkaç teori bulunmaktadır. Bilindiği gibi çimento taneleri su ile temas ettikten sonra çözünmeye başlayarak ortama Ca^{++} iyonları vermektedir. Tane yüzeyinde Ca^{++} iyonlarının konsantrasyonlarının artması ile polimer esaslı akışkanlaştırıcıların polimer moleküllerinin tane yüzeylerine yapışması gerçekleşmektedir. Böylece tane yüzeylerinin elektrostatik yükleri değişmekte ve (-) yükle yüklenen çimento taneleri birbirlerini itmektir. Betonun iç sürtünmesini azaltan bu unsur işlenebilirlik özelliğini arttırmaktadır. Priz geciktirici özelliğe sahip olan akışkanlaştırıcılar, bu özelliklerine ek olarak başlangıçtaki hidrasyon reaksiyonları için gerekli su gereksinimini azaltması ile akışkanlığı arttırmaktadır. Yeni kuşak süper akışkanlaştırıcılarda dispersiyon etkisinin yanında sterik etki de akışkanlığı arttırmaktadır. Uzun dallar içeren polimer zincirleri sayesinde çimento tanecikleri çevresinde birbirini iten fiziksel bir etki oluşur. Sterik etki adı verilen bu etki sayesinde çimento taneleri dağılarak kararlı hale gelmektedir [5].

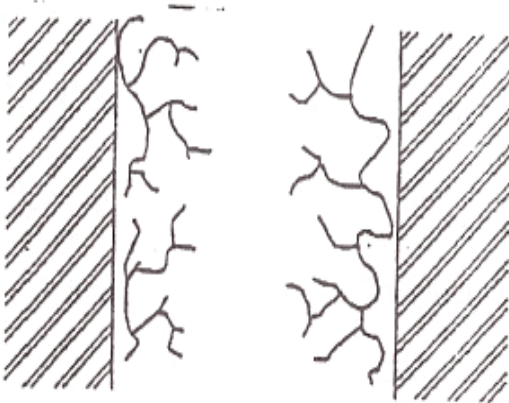
Süper akışkanlaştırıcıların etki mekanizmaları üzerinde yapılan çalışmalar, akışkanlaştırıcı moleküllerinin çimentodaki C_3S , C_2S tanecikleri tarafından adsorbe edilerek etki gösterdiği gözlemlenmiştir. Fakat çimento da çimento inceliğinin fazla olması, C_3A ve C_4AF taneciklerinin akışkanlaştırıcı moleküllerini hızlı bir biçimde adsorbe etmesi gibi sebeplerden dolayı betonun işlenebilirliği sürekliliğini koruyamamakta ve işlenebilirlikte düşme olmaktadır [24].



Elektrostatik etki



Sterik etki



Şekil 2.15: Süper Akışkanlaştırıcı Katkıların Etki Mekanizması [24].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışması kapsamında, hacimce sabit 0,52 su/pudra oranlı 5 adet 0,24, 0,31, 0,38, 0,45 ve 0,63 su/çimento oranlarına sahip karışımlar üretilmiştir. Bu karışımlarda çimento ile (0-45) μ dane boyutuna sahip silis unu hacimce ikameli olarak kullanılmış ve karışımlarda toplam ince malzeme oranı sabit tutulmuştur. Daha sonra bu karışımlar 1 m³'de 78 kg olacak şekilde yüksek dayanımlı ve nispeten daha düşük dayanımlı çelik lifler kullanılarak tekrar üretilmiştir. Sonuç olarak toplamda 15 adet farklı karışım üretilmiştir. Karışımlarda, çimentonun yanı sıra silis unu ve silis dumanı kullanılmıştır. Silis dumanı miktarı 1 m³'de 67 kg nispetindedir. Üretimlerde akışkanlığı sağlamak için süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Katkının miktarı, kendinden yerleşen beton deneylerine göre ve segregasyon ihtimali göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında bahsedilen 15 karışımdan lifsiz ve nispeten düşük 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

Karışımlarda, Nuh Çimento Fabrikası'na ait CEM I 42,5 tipinde çimento kullanılmıştır. Çimentonun basınç dayanımı ve fiziksel özellikleri ile kimyasal özellikleri sırasıyla Tablo (3.1), Tablo (3.2) ve Tablo (3.3)' te verilmiştir.

Tablo 3.1: Portland Çimentosunun Fiziksel Özellikleri

Özgül Ağırlık (gr/cm ³)		3,17
Priz Süresi	Başlangıç	03:05
Hacim Sabitliği (mm)		2
Özgül Yüzey (cm ² /gr)		3700

Tablo 3.2: Portland Çimentosunun Basınç Dayanımı

Gün	Basınç Dayanımı (N/mm ²)
2	27,0
28	59,0

Tablo 3.3: 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 dumanı

Deneylerde çimentoya ek olarak silis unu ve puzolanik etkisi bulunan silis dumanı da kullanılmıştır. Silis dumanının miktarı 67 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Helyum piknometresi ile yapılan ölçümde silis dumanının özgül ağırlığı 2,24 gr/cm³ bulunmuştur.

3.1.3 Agregalar

Üretimlerde iri agrega olarak bazalt kırmataş 1 kullanılmıştır. İnce agrega olarak ise TS 33 kumu ve bazalt kırma taş tozu kullanılmıştır. Agregaların fiziksel özellikleri Tablo (3.4)'de verilmiştir. Kullanılan silis ununun dane boyutu (0-45) mikron arası değişmekte olup özgül ağırlığı 2,60'tır. Tablo (3.5)'te ise seramik endüstrisinde kullanılan bu silis ununun kimyasal özellikleri gösterilmiştir. Agregaların elek analizleri Tablo (3.6)'da 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. Bunlarla ilgili bilgide Tablo (3.7), Tablo (3.8) ve Tablo (3.9)' da verilmiştir. Alkali volkanik kayalar üzerinde yapılmış analizler bu kayaların silikaya doyumsuz ve sodyumca zengin (Na₂O/K₂O = 1.45-3.88) olduklarını, %42.6 dan %50.3 a gibi geniş bir SiO₂ aralığında yüksek MgO (%6.11-13.48) değerlerine sahip olduklarını göstermiştir. Bazaltlar, orta CaO (%8.74-11.79) ve yüksek Al₂O₃ (%11.62-14.67) değerlerine sahiptir ve Cr ve Ni içerikleri sırasıyla 116.3-622.6 ppm ve 59.1-363.6 ppm aralığında değişmektedir.

Tablo 3.4: 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 3.5: 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 3.6: Agregaların Elek Analizi Sonuçları

Elek Göz Boyutu (mm)	Elekten Geçen %					
	Sarı İnce Kum	Beyaz İnce Kum	TS 33 Kumu	Bazalt KT Tozu	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 3.7: Beyaz ve Sarı İnce Kum Özgöl Ağırlıkları (g/cm³)

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

Tablo 3.8: İnce Sarı Kum Elek Analizi Sonuçları

Elek No	Elek Göz Boyutu (mm)	Elekten Geçen %
40	0,42	99
70	0,21	89
100	0,149	79
200	0,074	3

Tablo 3.9: İnce Beyaz Kum Elek Analizi Sonuçları

Elek No	Elek Göz Boyutu (mm)	Elekten Geçen %
40	0,42	99
70	0,21	94
100	0,149	86
200	0,074	2

3.1.4 Akışkanlaştırıcı Katkı

Üretimlerde su ihtiyacını yüksek oranda azaltabilen yeni nesil bir süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan katkı TS EN 934-2 'ye göre yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkı ve sertleşmeyi hızlandırıcı katkı sınıflarına uygundur. YKS Degussa firması tarafından üretilen katkının adı Glenium 51 olup klor içermemektedir.

Kullanılan katkı karışıma katıldığında, çimento taneleri üzerinde adsorbe olarak çimento tanelerinin üstünü kaplar. Katkının polimer yapısındaki sülfonat grupları çimento taneleri üzerinde negatif yükün artmasına sebep olurlar bu da çimento tanelerinin dağılmasına sebep olur. Ayrıca çimentoyu saran katkının sahip olduğu polimer zincirleri sayesinde çimento taneleri arasında fiziksel bir itmede oluşur. Bu iki etki sayesinde çimento taneleri çok iyi bir dağılma gösterir ve belirli bir beton işlenebilirliği için gerekli olan su miktarı azalır. Bu sayede su içeriği düşük akışkan bir beton elde etmek mümkün hale gelir. Tablo (3.10)'da kullanılan süper akışkanlaştırıcıya ait teknik özellikler verilmiştir.

Tablo 3.10: Kullanılan Süper akışkanlaştırıcının Teknik Özellikleri

Yoğunluk (g/cm ³) (20°C)	1.08-1.14
Klor % (EN 480-10)	<0.1
Renk	Amber
Homojenite	Homojen
Kimyasal İçeriği	Polikarboksilik Eter Zincirleri

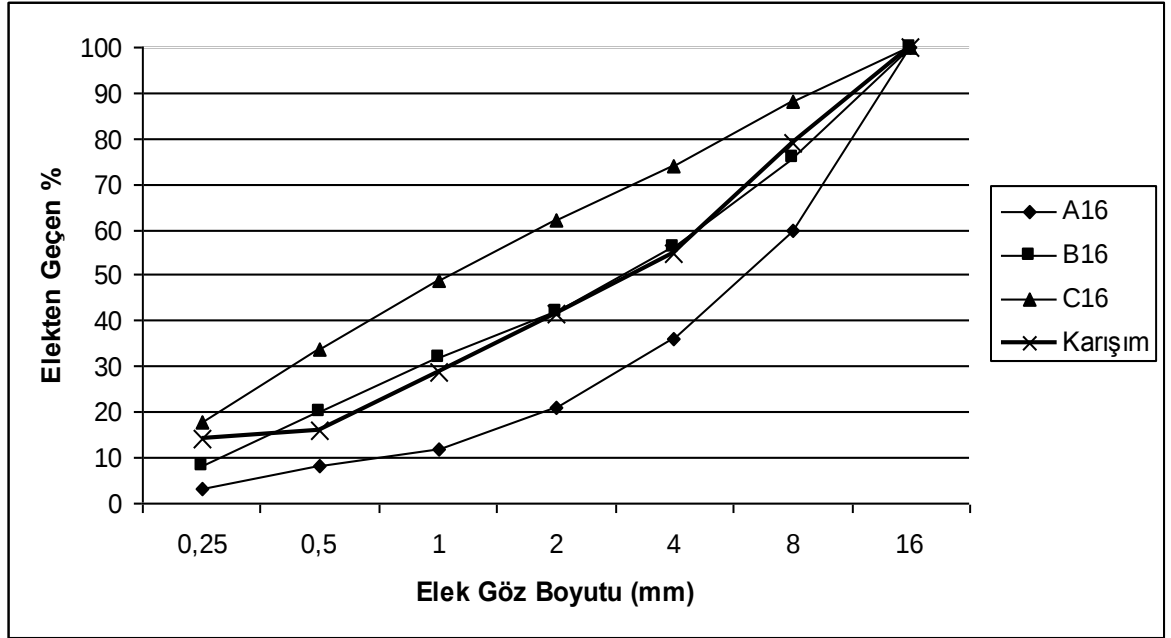
3.1.5 Çelik lifler

Bu tez çalışması kapsamında 2 farklı türde çelik lif kullanılmıştır. Lifler, BEKSA Firması tarafından üretilmiş olup 0,55 mm çapında, 30 mm boyunda, narinliği 55 olan C sınıfı A tipi soğuk çekilmiş çeliktir. Lifler, TS10513 standardına uygun olarak üretilmiş, kanca uçlu, birbirlerine tutkalla birleştirilmiştir. Liflerin kodu ZP305 ve ZP305X olup, karakteristikleri aynı olmasına rağmen çekme dayanımları açısından farklılık göstermektedirler. Nispeten düşük dayanımlı liflerin çekme dayanımı 1100 MPa ve renkleri beyazdır. Yüksek dayanımlı liflerin çekme dayanımı ise 2250 MPa değerinde ve renkleri sarıdır.

3.2 Beton Karışımları

Yapılan bu tez çalışmasında 15 farklı beton karışımı üretilmiştir. Bu karışımlardan 5 tanesi lifsiz, 5 tanesi yüksek dayanımlı lif içeren, kalan 5 tanesi ise bağıl olarak düşük dayanımlı lif içeren beton karışımlarıdır. Üretilen betonlarda toplam su/ince malzeme oranı 0,52 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Karışımlarda çimento dozajları sırasıyla 833 kg/m³, 645 kg/m³, 526 kg/m³, 444 kg/m³, 318 kg/m³ dir. Karışımlarda silis unu çimento ile hacimce ikameli olarak kullanılmış, azalan çimento hacmi kadar silis unu eklenmiş ve böylece toplam çimento ve silis unu hacminin sabit kalması sağlanmıştır. Betonlarda ince malzeme olarak silis unun yanı sıra sabit miktarlarda silis dumanı ve cam endüstrisinde kullanılan 2 tip özel kum kullanılmıştır. Ayrıca karışımlarda toplam ince malzeme miktarının yanı sıra, toplam su miktarı 1 m³ beton için 200 kg olacak şekilde sabit tutulmuştur. Üretimlerde çimento miktarının azalması ve suyun sabit tutulmasından dolayı su/çimento oranları çimento miktarı azaldıkça artmıştır. Karışımların su/çimento oranları sırasıyla 0,24, 0,31, 0,38, 0,45 ve 0,63' tür. 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. Kullanılan katkının miktarını belirlemek amacıyla deneme betonları üretilmiş ve bu üretimler sonunucu karışımlar için gerekli katkı miktarları belirlenmiştir. Karışım granülometrisi TS 706' da

belirtilen B16 ve C16 referans eğrileri arasında kalacak şekilde belirlenmiştir. Buna göre karışım oranları için TS 33 kumu %14, kırmataş tozu %25 ve kırmataş1 %47, ince beyaz kum %7 ve ince sarı kum %7 oranlarında kullanılmıştır. Karışımın granülometri eğrisi Şekil .’de gösterilmektedir. Ayrıca Tablo (3.11)’de üretimlerin 1m^3 için teorik bileşim değerleri verilmiştir.



Şekil 3.1: Beton Karışımının Granülometrisi ve Referans Eğrileri

Tablo 3.11: 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	N1-0,24	N1-0,31	N1-0,38	N1-0,45	N1-0,63
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/İnce Malzeme (Hacimce)	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

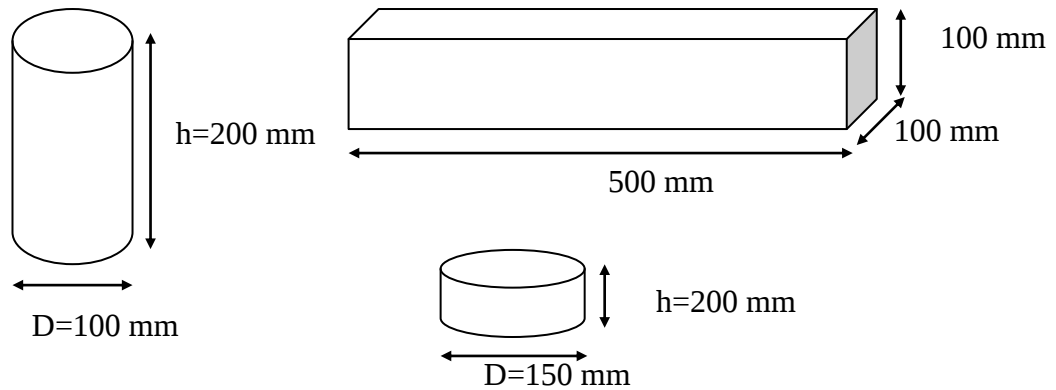
3.3 Üretimde İzlenen Sıra

- 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 havuzlara alındılar.

3.4 Numune Şekil ve Boyutları

Her partide toplam 4 kiriş, 5 silindir ve 8 disk olmak üzere toplam 17 adet numune üretildi.



Şekil 3.2: Numune Şekil ve Boyutları

3.5 Numune Kodlarının Belirlenmesi:

Tez çalışmasında, üretilen numuneleri birbirinden ayırabilmek, özelliklerini belirtmek ve deney sonuçlarını yorumlamayı kolaylaştırmak açısından numunelere bir takım kodlar verilmiştir. Bu kodlardan ilki numunenin lif içerip içermediğini, ikinci bölüm ise su/çimento içeriğini belirtmektedir. Mesela N0, numunenin lif içermediğini, N1 düşük dayanımlı lif içerdiğini, N0-0,63 kodu numunenin lifsiz ve 0,63 su/çimento oranına sahip olduğunu, N1-0,31 kodu ise numunenin lifli ve 0,31 su/çimento içeriğine sahip olduğunu gösterir.

4. DENEY SONUÇLARININ İNCELENMESİ

4.1 Taze Beton Deney Sonuçları

4.1.1 Birim ağırlık deneyi

Betonlar üretilirken, kalıplara konulmadan önce silindir bir kaba konularak tartıldı. Daha sonra silindirin hacmi bulundu. Ağırlığı ve hacimleri bilinen betonların birim ağırlıkları hesaplanıp gerçek bileşimleri hesaplandı. Tablo (4.1) 'de üretilen betonların gerçek bileşimleri verilmektedir.

Tablo 4.1: 1m³ Betondaki Gerçek Miktarlar

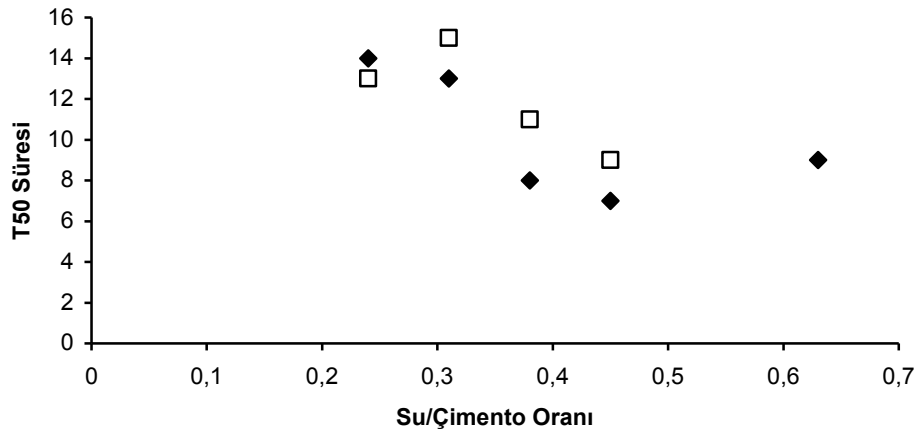
Bileşen (kg)	N0-0,24	N0-0,31	N0-0,38	N0-0,45	N0-0,63	N1-0,24	N1-0,31	N1-0,38	N1-0,45	N1-0,63
Çimento	808	652	524	440	315	788	611	514	426	308
Silis Unu	76	234	328	392	495	74	219	321	380	485
Silis Dumanı	65	68	67	66	66	64	64	66	65	66
İnce Sarı Kum	81	84	83	82	82	78	78	81	79	80
İnce Beyaz Kum	81	84	83	82	82	78	78	81	79	81
Doğal Kum	163	170	167	166	166	159	159	164	161	163
K.T. Tozu	308	322	317	315	315	301	301	311	305	309
K.T.1	598	623	613	610	610	583	583	602	591	598
Su	194	202	199	198	198	189	189	195	192	194
Katkı	10,5	6,5	4,6	6,6	5,9	7,9	6,9	6,7	6,4	5,8
Lif	0	0	0	0	0	75	75	77	76	76
Hava %	3,96	3,36	2,8	2,36	2,65	4,8	4,4	3,4	4,4	3,3

4.1.2 Çökme-yayılma deneyi

Çökme-yayılma deneylerinin sonuçları Tablo (4.2)' de verilmektedir.

Tablo 4.2: Çökme-Yayılma Testi Sonuçları

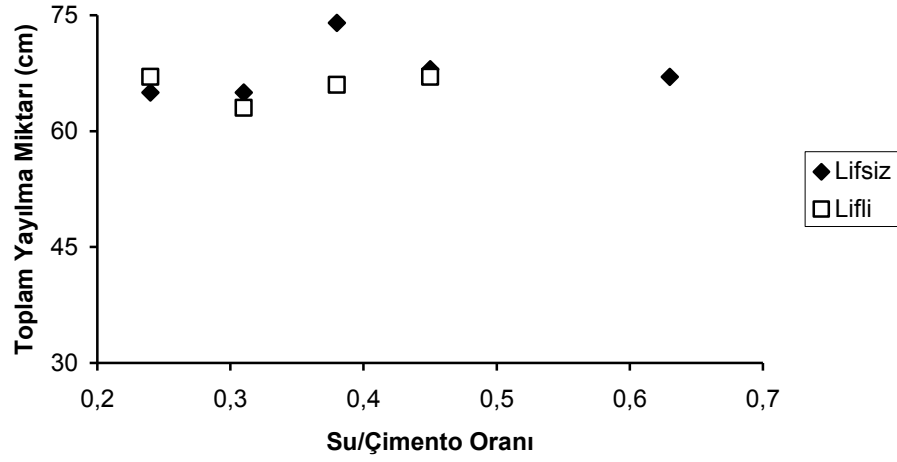
Numune Kodu	T ₅₀ (sn)	Toplam Yayılma (cm)	Toplam Yayılma Süresi (sn)
N0-0,24	14	65	52
N0-0,31	13	65	52
N0-0,38	8	74	49
N0-0,45	7	68	45
N0-0,63	9	67	39
N1-0,24	13	67	47
N1-0,31	15	63	45
N1-0,38	11	66	44
N1-0,45	9	67	41
N1-0,63	-	-	-



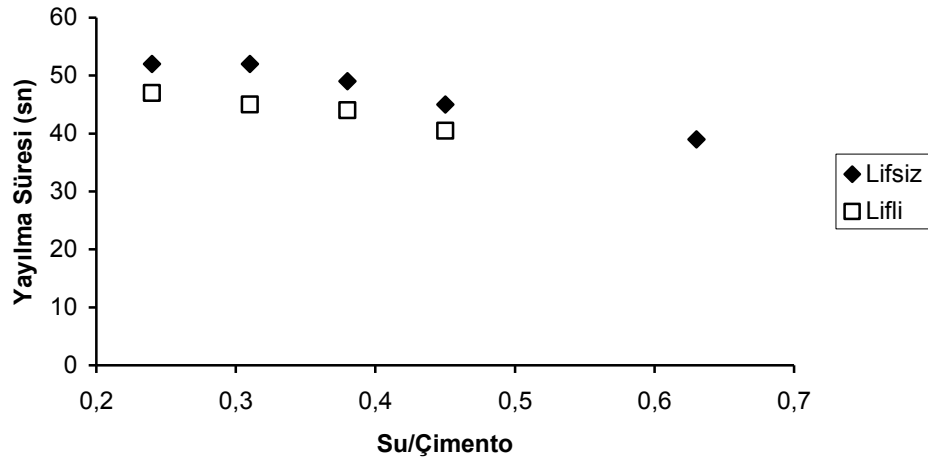
Şekil 4.1: Lifsiz-Lifli T50 Sonuçları

Çökme-yayılma deney sonuçlarına göre lifsiz üretimler için su/çimento oranı arttıkça T50 süresi, yani taze betonun yayılma tablasındaki 50 cm çaplı daire sınırlarına erişme süresinin azaldığı gözlenmektedir. Lif içermeyen numunelerde 0,24 su/çimento oranlı 900 dozajlı karışımın yüksek viskoz karakterden dolayı T₅₀ Süresi diğer üretimlerden yüksektir. Karışımlarda, ince malzeme miktarının değişmemesi, çimento yerine aynı hacimde silis unu konulmasına rağmen karışımların T50 sürelerinin azalması, azalan çimentonun işlenebilirliğe ve kohezyonuna etkisinin bir ispatıdır. Lifsiz üretimlerde 0,45 su/çimento oranından sonra T50 süresinin artma eğiliminde olduğu gözlenmektedir. Bu durumda deneysel yolla belirlenebilecek optimum su/çimento değerleri aşıldığında, artan su/çimento oranı ile birlikte

betonun kohezyonunun azaldığı ve paralelinde agregaları taşımakta zorlandığı görülmektedir. Yalnızca T50 süreleri açısından incelendiğinde, lifsiz üretimler için en uygun değerin 0,45 su/çimento oranıyla elde edildiği görülmektedir. Lifli üretimler de ise lifsizlere benzer olarak T50 sürelerinin artan su/çimento oranıyla beraber azaldığı gözlenmiştir. Fakat lifsizlere göre lifli üretimlerin T50 süreleri içerdikleri liflerin işlenebilirliğe olan negatif etkisinden dolayı genel olarak biraz daha yüksektir. 0,63 su/çimento oranında lifli üretimler kendinden yerleşen beton özelliği sergilememişler ve T50 süresini belirlemek için gerekli olan 50 cm lik daire sınırına kadar yayılmayı sağlayamamıştır.



Şekil 4.2: Lifli-Lifsiz Toplam Yayılma Miktarı



Şekil 4.3: Lifli-Lifsiz Toplam Yayılma Süresi

Karışımların toplam yayılması ve bu yayılmayı gerçekleştirdikleri toplam sürelerine bakıldığında, lifli ve lifsiz üretimlerde artan su/çimento oranının toplam yayılma miktarında önemli bir değişikliğe neden olmadığı görülmektedir. Lifsiz üretimlerin

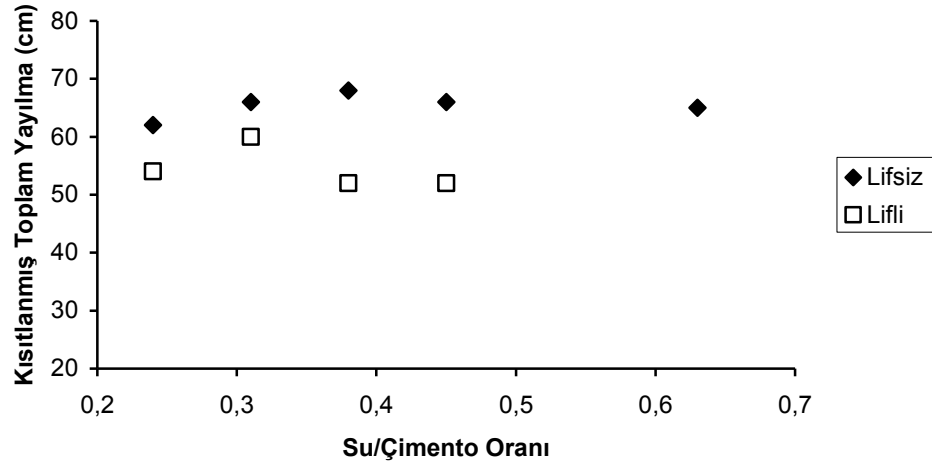
toplam yayılması lifli üretimlerle karşılaştırıldığında ise ihmal edilebilecek bir değişimin söz konusu olduğu Şekil (4.2) ve Şekil (4.3) incelendiğinde görülebilmektedir. Bu durum, mevcut çalışma için seçilen bileşimdeki betonlarda, mevcut lif geometrisi ve içeriğinin, taze betonun toplam yayılma yeteneğini fazla etkilemediğini göstermektedir.

4.1.3 Kısıtlanmış Yayılma Deneyi

Kısıtlanmış yayılma deneylerinin sonuçları Tablo (4.3)' de verilmektedir.

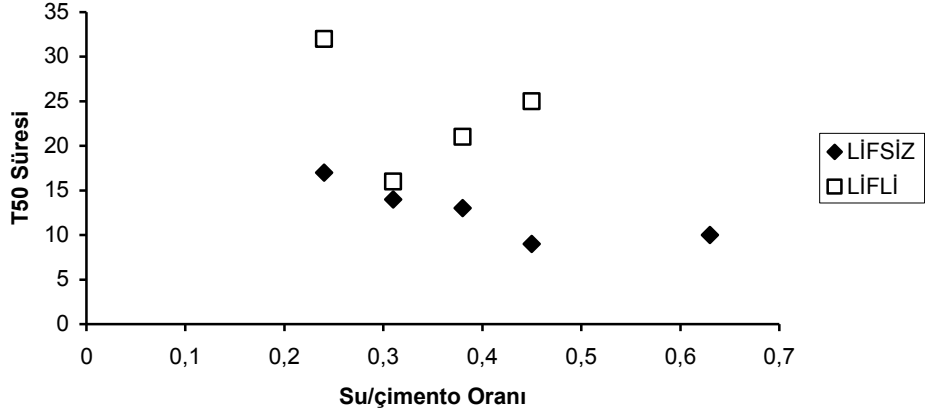
Tablo 4.3: Kısıtlanmış Yayılma Testi Sonuçları

Numune Kodu	T_{50} (sn)	Toplam Yayılma (cm)	Toplam Yayılma Süresi (sn)
N0-0,24	17	62	52
N0-0,31	14	66	53
N0-0,38	13	68	49
N0-0,45	9	66	44
N0-0,63	10	65	46
N1-0,24	32	54	55
N1-0,31	16	60	70
N1-0,38	21	52	55
N1-0,45	25	52	45
N1-0,63	-	-	-



Şekil 4.4: Lifli-Lifsiz Kısıtlanmış Toplam Yayılma Miktarı

Betonun donatılar arasından geçerken ki yayılma yeteneğini simule eden kısıtlanmış yayılma deney düzeneği ile yapılan deneyler Şekil (4.4)'den de görüldüğü gibi betona lif katılması betonun donatılar arasından geçiş özelliğini olumsuz etkileyebilmektedir.



Şekil 4.5: Lifli-Lifsiz Kısıtlanmış Yayılma Testi Deney Sonuçları

Kısıtlanmış yayılma deneyinde genel olarak çökme-yayılma deneyine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Lifsiz üretimlerde 0,24 su/çimento oranında yüksek viskoziteden dolayı betonun kısıtlanmış T50 süresi diğer su/çimento oranlarına göre yüksektir. Su/çimento oranı yükseldikçe azalan viskoziteden dolayı T50 süresi düşmektedir fakat lifsiz üretimlerde T50 süresi normal çökme-yayılma deneyinde olduğu gibi 0,45 su/çimento oranından sonra azda olsa artma eğilimindedir. Bu durum azalan kohezyonun betonun belirli donatı aralığından geçerken agrega taşıma yeteneğini azalttığını göstermektedir. Lifli üretimlerde ise bu kısıtlanmış T50 süresinin 0,38 su/çimento oranından sonra artma eğiliminde olduğu çok daha net görülebilmektedir. Bu durum, bu tezde kullanılan beton bileşimi, lif geometrisi, narinliği ve lif içeriğinde, su/çimento oranının artması ve kohezyonun azalması sonucunda, donatılar arasından akış sırasında betonun lifleri taşıyamadığını, liflerin taze betonda agrega hareketinin önünde engel oluşturduğunu göstermektedir. N1-0,63 kodlu karışımda ise lifler kısıtlanmış yayılma deney aletinin donatılarının arasındaki beton akışını önemli ölçüde engellemiş ve 50 cm 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.

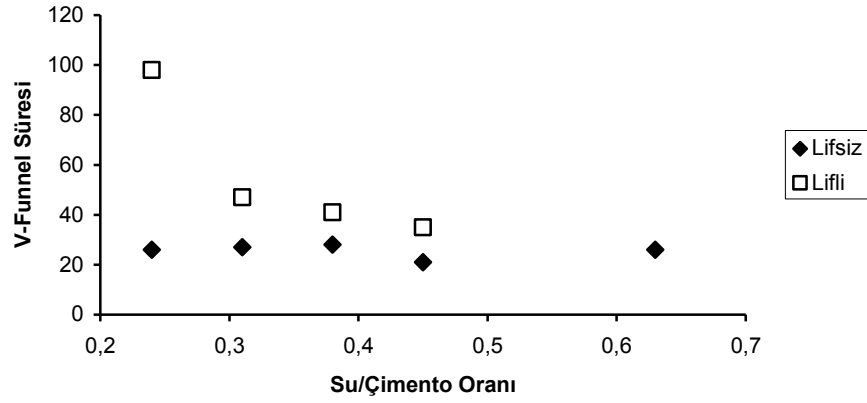
4.1.4 V-funnel deneyi

V-funnel testi taze betonun, kendi ağırlığı altında dar bir kesitten geçebilme yeteneğini simüle eden bir testtir. Bu bakımdan kısıtlanmış yayılma ve çökme-yayılma testlerine göre farklılıklar gösterir. Beton deney aletine geniş dikdörtgen bir ağızdan girer ve dar bir kesitten çıkar. Bu tez çalışması çerçevesinde taze betonun v-funnel aletindeki davranışı da incelenmiştir. Taze betonun su/çimento oranına göre

bu değişken kesitten geçme süresi ölçülmüştür. V-funnel deney sonuçları Tablo (4.4)'da verilmektedir.

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	-



Şekil 4.6: Lifli-Lifsiz V-Funnel Testi Deney Sonuçları

Lifsiz üretimler için V-Funnel test sonuçları incelendiğinde 0,24 su/imento oranından 0,38 su/imento oranına kadar V-Funnel süresinin 2 sn artmakla beraber pek değişmediği görülmektedir. Bu durum, ince malzeme içeriği olarak aynı bileşime sahip karışımlarda, karışımın içerdiği imento miktarının, betonun V-funnel deneyinde simüle edilen davranışı açısından önemli olduğunu göstermektedir. 0,38 su/imento oranından sonra beton işlenebilirliğinde imento miktarından çok betondaki su/imento oranı etkili olmaya başlamış beton viskozitenin azalmasıyla v-funnel süresi düşmüştür. Fakat 0,63 su/imento oranında tekrar yükselen v-funnel süresi betonda kohezyon kaybı ve segregasyon tehlikesinin göstergesidir. Beton viskozitesini kaybetmeye başlayınca içindeki agregalar betondan sıyrılmaya başlamış ve v-funnel aletinin çıkış ağzını kapatmıştır. Böylece beton çıkışı yavaşlamış, v-funnel süresini artmıştır. Bu durum, lifsiz karışımlar için bu tezde kullanılan

malzeme ve bileşim oranları çerçevesinde 0,63 su/çimento oranında betonda değişken kesitli yerlerden geçerken segregasyon görülebileceğinin göstergesidir.

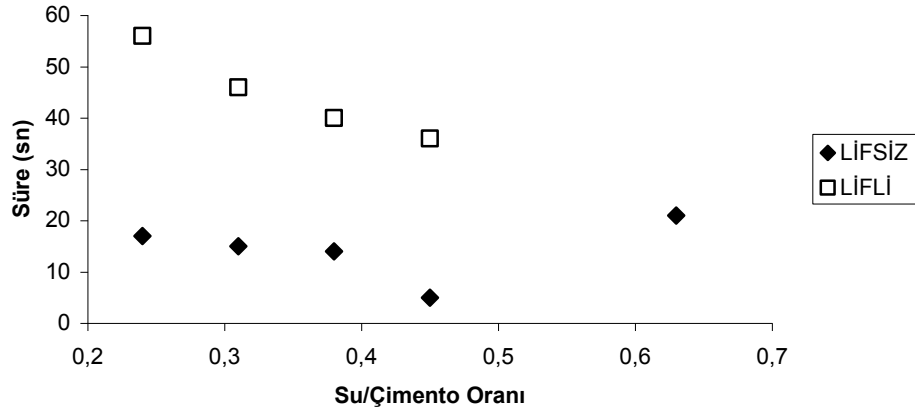
Lifli üretimlerin, v-funnel süreleri incelendiğinde, bu sürelerin lifsiz üretilere göre fark edilir biçimde yüksek olduğu görülmektedir. Buradan betona lif eklenmesinin, taze betonun dar kesitlerden geçme yeteneğini azalttığı sonucu çıkarılabilir. Ayrıca, lifli üretimlerde de lifsizlere benzer olarak belli bir su/çimento oranından sonra sürenin artma eğilimi gözlenmiştir. 0,63 su/çimento oranlı üretimde ise bu süre çok uzun olduğu ve bu karışımın kendinden yerleşen beton özellikleri göstermemesi nedeniyle dikkate alınmamıştır.

4.1.5 U-Box Deneyi

U-box deneyinde elde edilen veriler Tablo (4.5) 'de gösterilmiştir.

Tablo 4.5: U-box Test Sonuçları

Numune Kodu	h1/h2	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	-	-

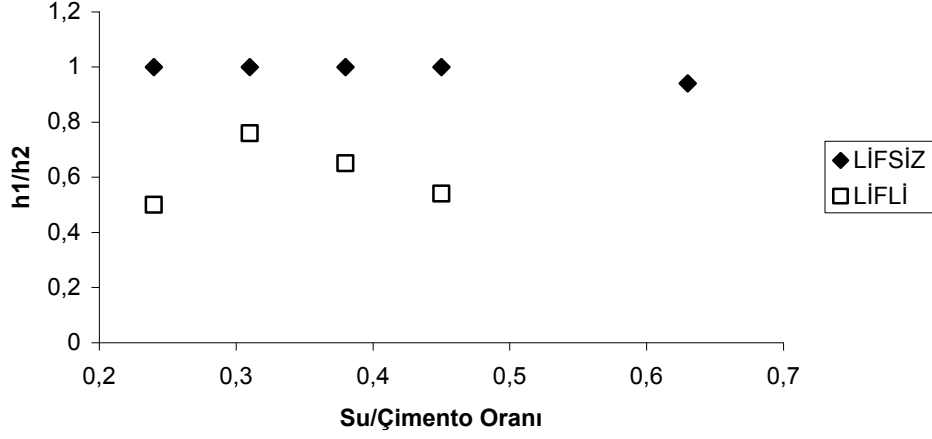


Şekil 4.7:Lifli-Lifsiz U-Box Durma Süreleri

U-box deneyi, taze betonun kendi ağırlığı ile şekil değiştirme ve donatılar arasından geçme yeteneğini ölçen bir testtir. U-box kutusu “U” şeklinde olup, ortadan bir bölmeyle ikiye ayrılmıştır. Bölmenin alt kısmında betonun diğer kısma geçmesini sağlayacak bir açıklık bulunur. Bu kısımda belli aralıklarla donatılar vardır. Deneyde, beton bir bölüme doldurulduktan sonra aradaki bölme açılır ve kendi ağırlığıyla alttan diğer bölüme doğru geçer. Bu tez çalışmasında, veri olarak, betonun hareketini tamamlama süresi ve hareketini tamamladıktan sonra u-box kutusunun iki tarafındaki beton yüzeyine olan mesafeler kullanılmıştır. Bu mesafeler, h_1 , betonun u-box aletine konulan taraftaki yüksekliği olmak üzere h_1 ve h_2 olarak ölçülmüş ve h_1/h_2 olarak oranlanmıştır. İşlenebilirliği yüksek betonlarda bu hareket süresin kısa ve h_1/h_2 oranının 1’e yakın olması beklenmektedir.

Lifsiz üretimler için yukarıdaki grafik incelendiğinde, hareket süresinin, artan su/çimento oranıyla beraber azaldığı görülmektedir. Düşük su/çimento oranlarında beton, yüksek çimento dozajından dolayı daha viskoz olmakta ve aynı zamanda U-box aletinin yüzeylerine daha çok yapışmaktadır. Dolayısıyla hareket süresi artmaktadır. Artan su/çimento oranlarıyla, su ve ince malzeme miktarı aynı kalmasına rağmen betonda çimento miktarının azalması kohezyonu da azaltmakta ve beton daha hızlı bir geçiş yapmaktadır. Fakat u-box deneyinde de v-funnel deneyinde olduğu gibi yüksek su/çimento oranlarında geçiş süresi tekrar artmaktadır. Bu durum, azalan çimentodan dolayı betonun kohezyon yeteneğinin önemli ölçüde kaybolduğunun ve altta bulunan donatılı kısımda agregaların betondan sıyrılıp burada birikerek engel oluşturduğunun göstergesidir. Lifli üretimlerin de lifsiz üretimlere temelde benzer bir davranış gösterdiği yukarıdaki grafikte görülmektedir. Lifli içeren bileşimlerde, bu geçiş süresi lifsizlere göre 2-3 kat daha fazla olabilmektedir. Bu durum, betona bu tez çalışması çerçevesinde katılan hacimce

%1'lik lif oranının, beton işlenebilirliğini ciddi olarak etkileyebileceğinin göstergesidir. Geçiş süresi açısından lifli ve lifsizler için 0,45 su/çimento oranı en verimli sonucu vermektedir. Lifli üretimlerde, 0,63 su/çimento oranında geçiş sağlanamamış ve değerlendirmeye alınmamıştır.



Şekil 4.8: Lifli-Lifsiz h_1/h_2 Oranları

Lifsiz üretimler için h_1/h_2 oranı 1 olarak gözlenmiş ve su/çimento oranı arttıkça bu oranda pek değişme olmamış, aynı kalmıştır. Yani beton u-box kutusunun her iki tarafında da aynı seviyeye ulaşmıştır. Bu da, U-box deneyinde yalnızca ulaşılan yükseklikler baz olarak alındığında üretilen lifsiz karışımların kendiliğinden yerleşen beton niteliği taşıdığının bir göstergesidir. En yüksek su/çimento oranı olan 0,63 değerinde ise h_1/h_2 oranı 0,94'e düşmüştür. Bu durum, betondan ayrılan bir kısım agreganın donatılardan geçişte beton akışını engellemesiyle açıklanabilir. Bu deneyde, artan su/çimento oranıyla azalan kohezyonun lifsiz üretimler için u-box kutusunun simule ettiği kendinden yerleşen beton niteliklerini pek de etkilemediği sonucuna ulaşılmıştır. Lifli üretimlerde ise h_1/h_2 oranları açısından lifsiz olanlara göre oldukça farklı davranış gözlenmiştir. 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. Yüksek su/çimento oranlarında azalan kohezyondan dolayı betonun içindeki malzemeyi taşıma yeteneği düşmüş ve lifler betondan sıyrılıp u-box kutusunun altındaki donatılı geçişi tıkamış ve daha sonra agregalarında burayı tıkamasıyla h_1/h_2 oranı düşmüştür. Bu durumun oluşmasında hiç şüphesiz lif boyutunun, lif miktarının ve donatı aralığının etkisi büyüktür. Daha düşük lif içeriklerinde daha kısa liflerle, daha büyük donatı aralıklarından geçişlerin daha yüksek h_1/h_2 oranları vermesi muhtemeldir. h_1/h_2 oranları açısından lifsiz üretimler için kullanılan bütün su/çimento oranlarında bu değer 1 civarındadır ve bu üretimler kendiliğinden yerleşen beton niteliği taşımaktadır. Lifli üretimlerde ise işlenebilirlik açısından 0,3 ve 0,4 arası su/çimento oranlarının en yüksek h_1/h_2 oranlarını verdiği

görülmüştür. Bu açıdan kendinden yerleşen beton niteliği bu su/çimento oranları arası daha fazladır.

4.1.6 Segregasyon Deneyleri

Bu tez çalışmasında üretilen betonların segregasyona olan dirençlerini ölçmek amacıyla 2 tip deney gerçekleştirilmiştir. Bunlardan birincisi u-box kutusu diğeri ise kısıtlanmış yayılma deney düzeneği kullanılarak yapılmıştır. U-box kutusuyla yapılan deneyler bitirildikten sonra segregasyon çalışması için deney aletinin beton konulan kolu ve betonun geçiş yaptığı kol olmak üzere 2 tarafından numuneler alınmıştır. Numunelerin konulduğu kapların daraları alındıktan sonra, alınan numuneler tartılmış ve bu değerler not edilmiştir. Daha sonra alınan numuneler, su altında 4 mm'lik elekten elenerek, alınan numunelerdeki lif ve harç kısım yıkanmış, elek üzerinde 4mm'den büyük agregaların kalması sağlanmıştır. Elenen numuneler, ıslanan agregaların kurumması için 1 gün etüvde bekletilmiş ve 1 gün sonunda agregaların kuru ağırlıkları not edilmiştir. Bu aşamadan sonra, taze betonun u-box'a dökülen kısmından alınan numune ağırlığıyla yine bu numunenin elenip ve etüvde bekletilmesiyle bulunan kuru agrega ağırlığı oranlanmıştır. Bu oran, betonun u-box'a giriş kolunda bulunan beton içersindeki agrega oranını belirtmektedir ve tezde (K1) kodu ile belirtilmiştir. Aynı işlem betonun geçtiği 2. kolda da tekrarlanıp (K2) oranı hesaplanmıştır. İki kısımda da bulunan oranlar, başka bir ifade ile taze beton içersindeki agrega miktarları olan K1 ve K2 değerleri birbirine yakın ise iri agrega konsantrasyonunda azalma olmamış ve taze beton, u-box kutusunun simule ettiği donatılar arasından geçiş, betonun kendi ağırlığı ile hareketi gibi etkilerden etkilenmemiş ve dolayısıyla segregasyona uğramamış demektir. Bu durum K1 ve K2 değerlerinin birbirine yakın olmasını ve (K1/K2) değerinin 1'e yakın olmasını gerektirmektedir. U-box ile gerçekleştirilen segregasyon deneyinin sonuçları Tablo (4.6)' da gösterilmiştir.

Tablo 4.6: U-box Segregasyon Deneyi Test Sonuçları

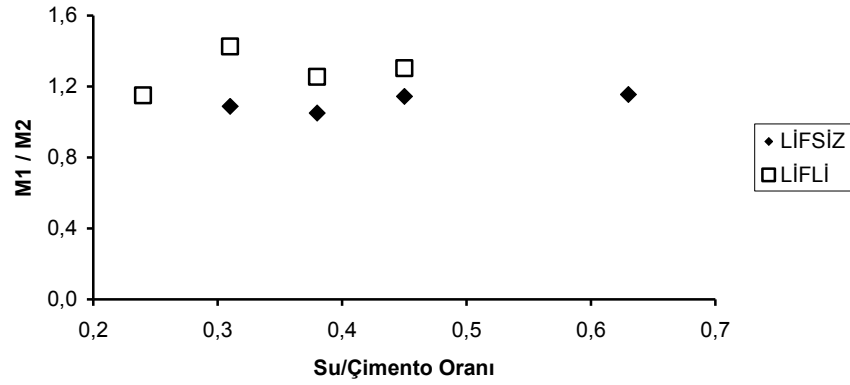
Numune Kodu	K1	K2	K1/K2
N0-0,24	0,29	0,28	1,04
N0-0,31	0,26	0,26	1
N0-0,38	0,27	0,27	1,03
N0-0,45	0,32	0,22	1,44
N0-0,63	0,28	0,29	1
N1-0,24	0,27	0,25	1,09
N1-0,31	0,29	0,29	1
N1-0,38	0,30	0,28	1,05
N1-0,45	0,27	0,30	0,9
N1-0,63	-	-	-

Deney sonuçlarına göre genel olarak, K1/K2 oranı yani numune alınan her iki taraftaki agrega miktar oranı 1'e yakın sonuçlar vermiştir. Bu da agrega konsantrasyonlarında belirgin bir değişimin olmadığını gösterir. Bu durum üretilen betonlarda segregasyon tehlikesi bulunmadığının bir göstergesi olmakla beraber aslında bu tarz bir deney metodunun güvenilir sonuçlar vermediğini de göstermektedir. N0-0,45 numunesinde bu değer 1,44 değerini göstermektedir. Bu durum 1. kısımda agrega miktarının daha çok olduğuna dolayısıyla segregasyon olduğuna işaret etmektedir. Fakat diğer deney sonuçları göz önüne alındığında bu durum deney yönteminde ki hatadan kaynaklandığı sonucunu çıkarmaktadır.

Segregasyonu belirlemede kullanılan 2. deney de ise kısıtlanmış yayılma deney düzeneği kullanılmıştır. Bu deneyde, kısıtlanmış yayılma deneyi yapıldıktan sonra donatılı kısım içinde kalan beton bir kaba alınarak tartılmıştır. Bu işlemten sonra 1. deneye benzer biçimde numune su altında 4 mm'lik elekten geçirilmiş ve elek üstünde kalan agregalar etüvde 1 gün kurumaya bırakılmış ve tartılmıştır. Bu deneyde birincisinden farklı olarak donatılar arasında kalmış taze betondaki agrega miktarıyla betonun gerçek bileşimindeki agrega miktarı oranlanmıştır. Kısıtlanmış yayılma deney aletindeki oran (M1) ve gerçek bileşimdeki agrega oranı ise (M2) olarak alınmıştır. Bu değerlerin birbirine yakın olması segregasyon tehlikesinin bulunmaması şeklinde yorumlanacaktır. Bu deneyle ilgili sonuçlar Tablo (4.7)' de gösterilmiştir.

Tablo 4.7: Kısıtlanmış Yayılma Segregasyon Deneyi Test Sonuçları

Numune Kodu	Agrega Oranı M1	Gerçek Agreg Oranı M2	M1/M2
N0-0,24	0,28	0,24	1,15
N0-0,31	0,27	0,25	1,09
N0-0,38	0,26	0,25	1,05
N0-0,45	0,29	0,25	1,14
N0-0,63	0,29	0,25	1,15
N1-0,24	0,28	0,24	1,15
N1-0,31	0,34	0,24	1,42
N1-0,38	0,30	0,24	1,25
N1-0,45	0,31	0,24	1,30
N1-0,63	-	-	-

**Şekil 4.9:** Kısıtlanmış Yayılma Lifli-Lifsiz Segregasyon Deneyi Grafiği

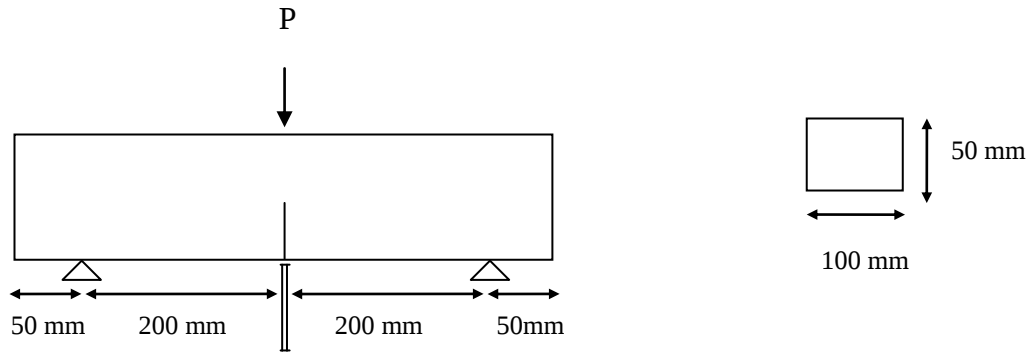
Kısıtlanmış yayılma segregasyon deneyi, u-box kutusundaki segregasyon deneyine göre lifli ve lifsiz karışımlar arasındaki farkı daha belirgin bir biçimde ortaya koymuştur. Bu durum deney aletleri arasındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Kısıtlanmış yayılma aletinde yapılan deneyde lifsiz bileşimlerin arasında pek bir fark görülmezken lifli ve lifsiz karışımlar arasındaki fark göze çarpmaktadır. Lifli bileşimlerin M1/M2 oranları daha yüksek çıkmıştır. Yani özellikle lifli taze beton, donatılar arasından geçerken agregalarını donatıların dışına taşıyamamış ve agregalar liflerden dolayı betondan sıyrılmıştır böylece donatılı kısım içinde agrega miktarı artmış buda M1/M2 oranının 1'in üstünde çıkmasına sebep olmuştur. Lifsiz üretimlerde ise liflilerde olduğu kadar yüksek M1/M2 değerleri yoktur. Lifsiz üretimler için en düşük segregasyon 0,31 ve 0,38 su/çimento değerlerinde görülmüştür. Lifli üretimlerde ise en düşük segregasyon 0,24 su/çimento oranında görülmüştür.

4.2 Sertleşmiş Beton Deneylerinin Hesaplanması

Yapılan tez çalışmasında taze beton özellikleri incelenen üretimler, daha sonra çeşitli sertleşmiş beton niteliklerinin araştırılması amacıyla kalıplara konulmuştur. Bir gün kalıpta bekletilen numuneler, sertleşmiş beton deneylerinin yapılacağı güne kadar kirece doymun havuzlarda bekletilmiştir.

4.2.1. RILEM kırılma enerjisi deneyinden elde edilen sonuçlar

Üretilen betonların kırılma enerjileri INSTRON 5500R marka deplasman kontrollü yükleme makinesi kullanılarak yapılmıştır. Kırılma enerjisi deneyleri kiriş numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonunda elde edilen yük-sehim grafikleri incelenerek, çelik lif eklenmesinin, çimento içeriğinin ve su/çimento oranının değişiminin eğilme dayanımı, kırılma enerjisi, süneklik gibi mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Eğilme deneyleri, malzemenin ortasında tekil yük uygulanmasıyla oluşturulan 3 noktalı deney düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. Şekil (4.10)'da deney düzeneği ve kullanılan kirişlerin boyutları gösterilmiştir.

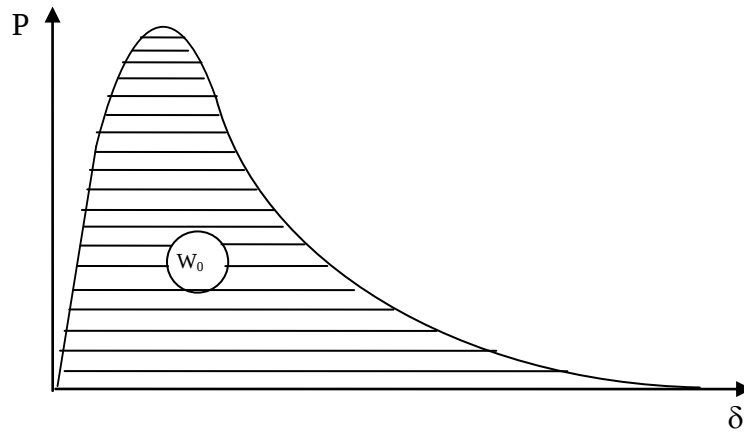


Şekil 4.10: RILEM Deneyi Yükleme Düzeneği

RILEM kırılma enerjisi deneyine başlamadan önce kirişlerin orta noktalarına 5 cm derinliğinde çentik açılmış ve yan yüzeylerine kirişlere açılmış olan çentiğe yakın olmak üzere bir korniyer yerleştirilmiştir. Bu korniyere deneyler sırasında sehim ölçmek amacı ile LVDT yerleştirilmiştir. Deney esnasında kirişe uygulanan yük ve yüke karşı gelen deplasmanlar kaydedilerek bilgisayar ortamında yük-deplasman grafikleri çizilmiştir. Kirişlere ait yük-deplasman grafikleri eklerde 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, dolayısıyla harcanan enerjiyi vermektedir. Malzemenin sünekliği arttıkça yaptığı sehim ve yuttuğu enerji artmaktadır. Bu tez çerçevesinde değişik su/çimento değerlerine sahip lifsiz ve lifli betonların kırılma enerjileri incelenmiştir. Şekil (4.11) 'de örnek bir yük-sehim eğrisi görülmekte ve ayrıca kırılma enerjisi deney sonuçlarının nasıl hesaplanacağı gösterilmektedir.



Şekil 4.11: Yük-Sehim Eğrisinin Şematik Gösterimi

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

m = Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı (kg)

g = Yer çekimi ivmesi (9.81 m/sn^2)

δ_o = Kirişin göçme sırasındaki deformasyonu (m)

A_t = Etkin kesit alanı (m^2)

$$G_F = (W_o + mg\delta_o) / A_t \quad (4.1)$$

4.2.1.2 RILEM deneylerinden net eğilme dayanımlarının hesaplanması

Kirişlerin yükleme altında gösterdikleri eğilme dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. Eğilme dayanımı sonuçları Tablo (4.10)' da gösterilmiştir.

D= Numune kesitinin yüksekliği (mm)

B = Numune kesitinin genişliği (mm)

L = Mesnetler arası uzaklık (mm)

P = Kırılma yükü (N)

F_{net} = Net eğilme dayanımı (MPa)

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

4.2.1.2 RILEM deneylerinden lch karakteristik boy hesaplanması

Karakteristik çatlak boyu hesaplaması, diğer sertleşmiş deney sonuçlarının kullanılması gereken bir hesaplama türüdür. Tablo (4.10)' da yapılan deneyler sonucunda hesaplanan kırılma enerjileri ve net eğilme dayanımları verilmektedir.

E = Elastisite modülü (GPa)

T= Yarma çekme dayanımı (MPa)

G_f = Kırılma enerjisi (N/m)

Lch = Karakteristik çatlak boyu (mm)

$$Lch = (E * G_f) / (T^2) \quad (4.3)$$

4.2.2 Silindir basınç deneyi hesaplaması

Silindir basınç deneyleri, 10 cm çapında, 20 cm yüksekliğinde numuneler kullanılarak yapılmıştır. Deneyler, ELE marka 3000 kN kapasiteli yükleme makinesiyle gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, numunelere düşey yer değiştirmeyi okumak amacı ile çerçeve takılmış ve deney sırasında değişen yük ve şekil değiştirme miktarları kaydedilmiştir. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde maksimum yükün %33'üne kadar olan kısmın eğiminden basınç elastisite modülü bulunmuştur. Silindir basınç deneyinde araştırılan veriler, numunenin maksimum basınç dayanımı ve basınç elastisite modülü değeridir. Bu değerlerle ilgili detaylı bilgi Tablo (4.8)'de verilmektedir.

4.2.3 Yarma-çekme deneyi hesaplaması

Yarma-çekme deneyleri 150 mm çapında, 60 mm yüksekliğinde disk numuneler kullanılarak yapılmıştır. Numunelere yükleme makinesinde, çıtalar yardımıyla

Çapları doğrultusunda çizgisel yük uygulanmıştır. Bu yük değerleri kullanarak aşağıdaki bağıntıyla numunelerin yarma-çekme dayanımları bulunmuştur. Bu bağıntıda, σ ; Yarma-ekme dayanımı (MPa), P; Yük (N), D; ap (mm), L;Yükseklik (mm) dir.

$$\sigma = 2P / (\pi * D * L) \quad (4.4)$$

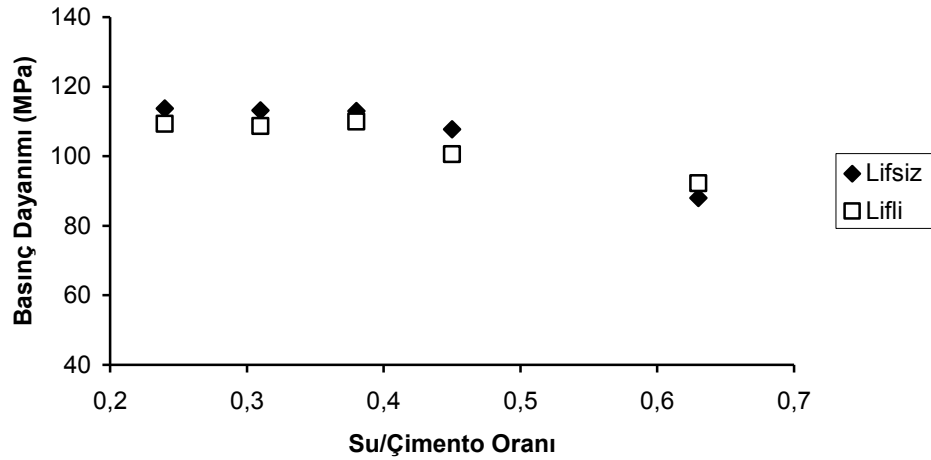
Yarma-ekme dayanım değerleri Tablo (4.9)' da verilmiştir.

4.3 Sertleşmiş Beton Deneylerinin Sonuç ve Değerlendirmeleri

4.3.1 Silindir Basınç Deneyi Sonuç ve Değerlendirmeleri

Tablo 4.8: 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
N1-0,24	109,7	41,5
N1-0,31	108,7	41,7
N1-0,38	109,9	42,6
N1-0,45	100,6	40,2
N1-0,63	92,2	39,7

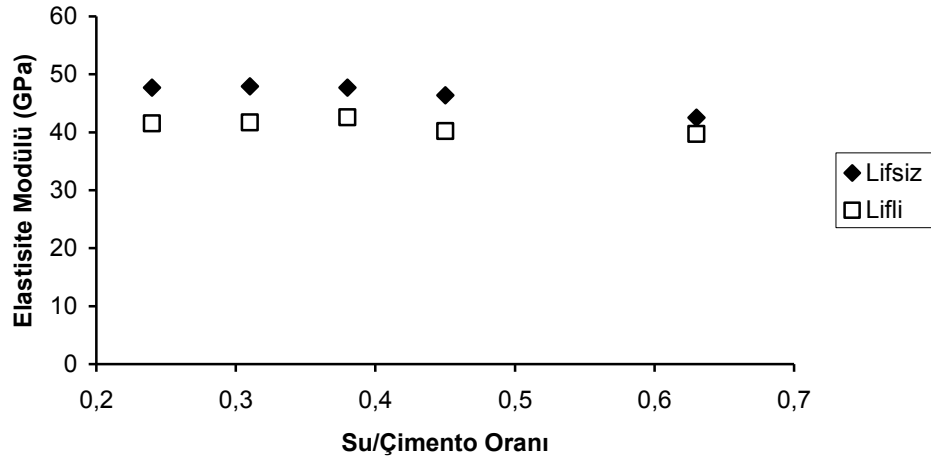


Şekil 4.12: Lifsiz-Lifli Basınç Dayanımı Grafiği

Yukarıdaki şekilde, tez çalışmasında üretilen lifsiz ve lifli karışımların basınç dayanımlarının su/çimento oranı ile değişimi görülmektedir. Bilindiği gibi, üretimlerde su/çimento oranının artması, betondaki suyun buharlaşmasıyla beraber oluşacak kılcal çatlakların miktarını artırıp betonun basınç dayanımını düşürmektedir. Fakat bu tez çerçevesinde yapılan çalışmada, 0,24, 0,31, 0,38 su/çimento oranlarına sahip karışımların, su/çimento oranının artmasına rağmen basınç dayanımlarında, beklenenin aksine herhangi bir düşüş gözlenmemektedir. 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. Bu durum, karışımlardaki malzeme oranları incelenerek açıklanabilir. Üretilen numunelerde önceden de belirtildiği gibi su ve agrega miktarları sabittir. Su/ince malzeme oranı ise 0,52 olarak sabit tutulmuş olup karışımlardaki tek değişken öge çimento miktarıdır. Çimento, silis unu ile hacimce ikameli olarak kullanılmış olduğundan karışımlardaki çimento miktarı azaldıkça kullanılan su miktarı değişmemesine rağmen su/çimento oranları artmaktadır. Bu tez çalışmasında 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 yerine aynı hacimde öğütülmüş silis unu kullanılmıştır. Numunelerin basınç mukavemetlerinde herhangi bir düşüş gözlenmemiş olup 0,45 çimento oranında sadece %6'lık bir düşüş gözlenmiştir. Bu durum 0,24 ve 0,38 su/çimento oranları arasında hidrate olmayan çimentonun ve çimento ile ikameli olarak kullanılan silis ununun mukavemete olan etkilerinin benzer olduğunun bir göstergesidir. Ayrıca silis ununun beton mukavemetine olan katkısının önemli bir kısmının boşlukları doldurmasından dolayı olduğu düşünülürse, hidrate olmayan çimento ile silis ununun aynı mekanizmayla basınç dayanımını artırdığını ifade etmek mümkündür. Yani çimento, bağlayıcı olmasıyla ve doldurucu etki yapmasıyla mukavemeti belirleyici bir unsur olmaktadır. Bu sebeple herhangi bir karışımda hidrate olmayan çimento betonda doldurucu madde olarak görev yapacaktır diyebiliriz. Üretilen betonlarda, çimento, sadece bağlayıcı olacak şekilde kullanılıp ve doldurucu olarak da çimentodan daha ucuz bir malzeme kullanılması durumunda beton maliyetlerinin düşmesinden bahsedebiliriz.

Lifli üretimler açısından yukarıdaki grafik incelenecek olursa lifsiz numunelerle aynı özellikleri gösterdiğini görmekteyiz. Lifsiz numunelerde görülen silis unu ve çimento ilişkisi aynı şekilde lifli üretimler içinde görülmektedir. 0,24 ve 0,45 su/çimento oranları arasında malzeme basınç mukavemetlerimde ciddi bir düşme yoktur. Lifli üretimlerin lifsiz olanlara göre basınç dayanımlarının bir miktar düşük olduğu görülmektedir. Bilindiği gibi basınç deneylerinde malzeme geçmesinin numune 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 artıracığı muhtemeldir fakat bu tez çalışmasında lif dizilimleri tamamen rastlantısalıdır. Liflere yönlendirme yapılmamıştır. Liflerin betondaki çatlak oluşum ve yayılma mekanikleri açısından malzemede olumlu kazanımlar sağladığı bilinmektedir fakat aynı zamanda lif kullanıldığında lif ve beton matrisi arasında kusurlarda oluşmaktadır ve bu kusurlar beton mukavemetine negatif etki edebilmektedir. Bu tez çalışması sırasında kullanılan liflerin, boyut, şekil, ve miktarı çerçevesinde lif kusur etkisi betonun basınç mukavemeti göz önüne alındığında, liflerin beton üzerindeki pozitif etkilerine göre baskın gelmiş ve basınç mukavemetleri bir miktar düşmüştür. 0,63 su/çimento oranında ise matrisin kayma direnci diğer numunelere göre daha düşüktür. Bu durumda 0,63 su/çimento oranına sahip üretimde çatlak yayılması ve gelişmesi diğer numuneler göre daha kolay olmasından dolayı liflerin çatlak yayılması üzerindeki pozitif etkileri bu su/çimento oranında liflerin kusur etkisine baskın gelmiş ve malzemelerin basınç dayanımı açısından mukavemetlerde lifsiz üretime göre bir miktar artış olmuştur. Buradan, liflerin 0,63 su/çimento oranına kadar basınç mukavemeti açısından negatif etkiye sahipken 0,63'den sonra basınç mukavemetini iyileştirici bir yönde etkiye sahip oldukları söylenilebilir.



Şekil 4.13: Lifsiz-Lifli Basınç Elastisite Modülü Grafiği

Gerek lifsiz, gerekse lifli üretimler açısından bakıldığında elastisite modülü grafiği genel yapı itibarıyla basınç mukavemeti grafiğine benzemektedir. Lifsiz üretimlerde, basınç dayanım grafiğine benzer bir şekilde 0,24 su/çimento oranından 0,45 su/çimento oranına kadar, basınç elastisite modüllerinde de fazla bir değişim olmamaktadır. 0,63 su/çimento oranında ise bir miktar düşme gözlenmektedir. Grafikten, su/çimento oranının artmasıyla, malzemenin sünekleştiğini dolayısıyla elastisite modülünün bir miktar azaldığını görmekteyiz. Bilindiği gibi Hooke Yasası

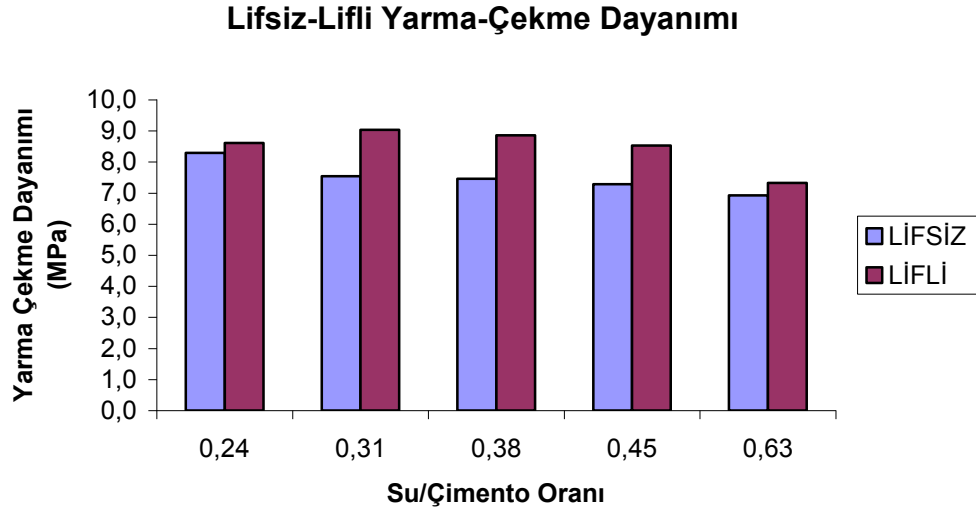
gereği $\sigma = \epsilon \cdot E$ olduğu yani gerilme ile elastisite modülünün doğru orantılı olduğu bilinmektedir. Bu bakımdan bu tez çalışmasında yapılan basınç deneyleriyle 2 farklı veri setinden ayrı ayrı elde edilen basınç dayanımı ve elastisite modülü grafiklerinin benzer davranış göstermesi yapılan deney ve çalışmaların doğruluğuna işaret etmektedir. Ayrıca basınç dayanımı kısmında açıklanan ve basınç mukavemetlerinin 0,24 ve 0,45 su/çimento değerleri arasında sabit kalmasını sağlayan sebepler ve aynı mekanizma, beklendiği gibi elastisite modülleri üzerinde de benzer bir etki sergilemiştir. Şekil (4.13) incelendiğinde lifli üretimlerin elastisite modüllerinin lifsizlere göre daha düşük olduğu görülmektedir.

4.3.2 Yarma çekme deneyi sonuç ve değerlendirmeleri

Yarma-çekme deneyi sonuçları Tablo (4.9)' da belirtilmiştir.

Tablo 4.9: Yarma-Çekme Deneyi 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
N1-0,24	8,6
N1-0,31	9
N1-0,38	8,8
N1-0,45	8,5
N1-0,63	7,3



Şekil 4.14: Lifsiz-Lifli Yarma-Çekme Dayanım Grafiği

Yarma-çekme dayanımı, disk numunelere çapları doğrultusunda çizgisel yük uygulayarak elde edilen değerin $\sigma = 2P/(\pi \cdot D \cdot L)$ bağıntısında kullanılmasıyla bulunur. Yukarıdaki grafik, lifsiz numuneler açısından incelendiğinde, yarma-çekme dayanımının artan su/çimento oranıyla beraber az da olsa azaldığını göstermektedir. Bu bakımdan numunelerin yarma-çekme dayanımları, değişen su/çimento oranları göz önüne alındığında, 0,24 ve 0,45 su/çimento oranları arasında sabit bir gidişat sergileyen basınç altındaki davranışa göre farklılık arz etmektedir. Çimento ile hacimce ikame edilen silis ununun çekme dayanımı üzerinde basınç dayanımında gözlemlendiği gibi olumlu bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Bu durum, basınç dayanımına katkısı olan yalnızca boşluk doldurucu etkiye sahip bileşenlerin, çekme dayanımı üzerinde benzer olumlu bir etkiyi sergilemeyeceğinin göstergesidir. Ayrıca azalan çimento miktarı ile düşen yarma-çekme dayanımları, çimento dozajının çekme dayanımı üzerindeki etkisinin ispatı niteliğindedir. Bu sebeple çimento hidratasyon reaksiyonları sonucu oluşan hidrate kalsiyum silikatların betonun çekme gerilmelerini karşılayan asıl bağlayıcı etken olduğu görülmektedir. Önceden belirtildiği gibi üretimlerde kullanılan su miktarı sabittir. Kullanılan suyun, çimento tanelerini dıştan içe doğru hidrate ettiği varsayılırsa suyun, çimentonun fazla kullanıldığı karışımlarda, az çimento içeren karışımlara göre daha fazla hidrate olmuş yüzey oluşturacağı muhtemeldir çünkü suyun, bir çimento tanesinin içini hidrate etmesine göre yandaki çimento tanesinin yüzeyini hidrate etmesi daha kolay olacaktır. Bu durum, yüksek çimento içeren karışımlarda hidrate kalsiyum silikat yüzeyini artıracak ve matris daha sürekli bir hal alacaktır. Ayrıca çimento miktarının azalmasıyla yerine konulan silis unu da hidrate kalsiyum silikat yapının sürekliliğini bozabilir. Bu varsayımlar ışığında, betonda kullanılan çimento miktarının azalması

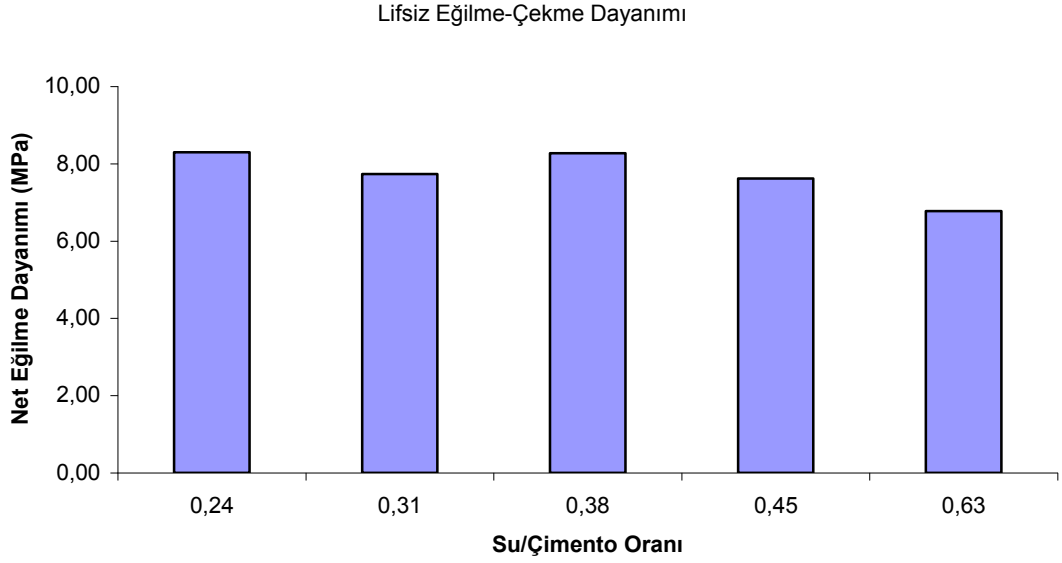
sonucu, oluşan hidrate kalsiyum silikatların sürekliliğinin de azalacağı ve betonun çekme dayanımının düşeceği ön görülebilir. Lifli üretimler incelendiğinde ise lifsiz numunelere benzer bir şekilde, yarma-çekme dayanımlarının artan su/çimento oranı ve azalan aderans ile azalmakta olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca lifli üretimlerin, yarma-çekme dayanımlarının lifsizlere göre bir miktar daha fazla olduğu görülmektedir. Buda liflerin betonun çekme dayanımına olan olumlu etkisini göstermektedir. Liflerin çatlak oluşumu esnasında çatlak oluşumunu geciktirdiği, çatlak gelişimini yavaşlatarak ve matris faz ile lifler arasındaki aderans sayesinde çekme gerilmelerinin bir kısmını alarak betonda çekme dayanımını artırdığı düşünülebilir.

4.3.3 RILEM kırılma enerjisi deney sonuç ve değerlendirmeleri

RILEM kırılma enerjisi deneylerinden elde edilen, artan su/çimento oranlarına göre değişen kırılma enerjisi, eğilme dayanımı, karakteristik boy değerleri Tablo (4.10)'da gösterilmiştir.

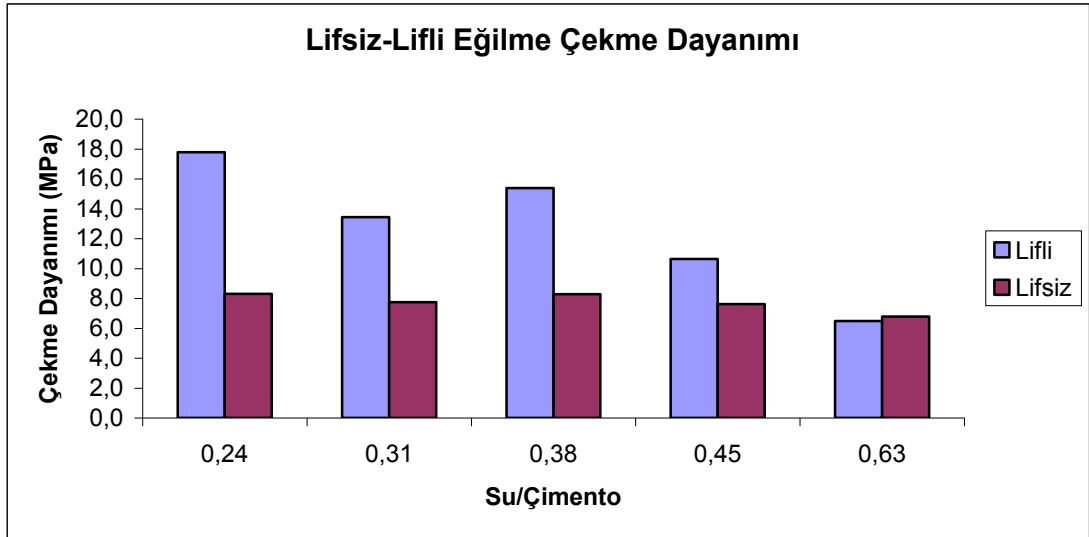
Tablo 4.10: Kırılma Enerjileri ve Net Eğilme Dayanımları

Numune Kodu	L_{ch} Karakteristik Boy (mm)	Özgül Kırılma Enerjisi G_f (N/m)	Net Eğilme Dayanımı (MPa)
N0-0,24	64	93	8,3
N0-0,31	73,4	87	7,8
N0-0,38	79	92	8,2
N0-0,45	92	106	7,6
N0-0,63	96	108	6,8
N1-0,24	2357	4210	17,8
N1-0,31	1576	3082	13,5
N1-0,38	2109	3877	15,3
N1-0,45	1304	2360	10,6
N1-0,63	1006	1358	6,5



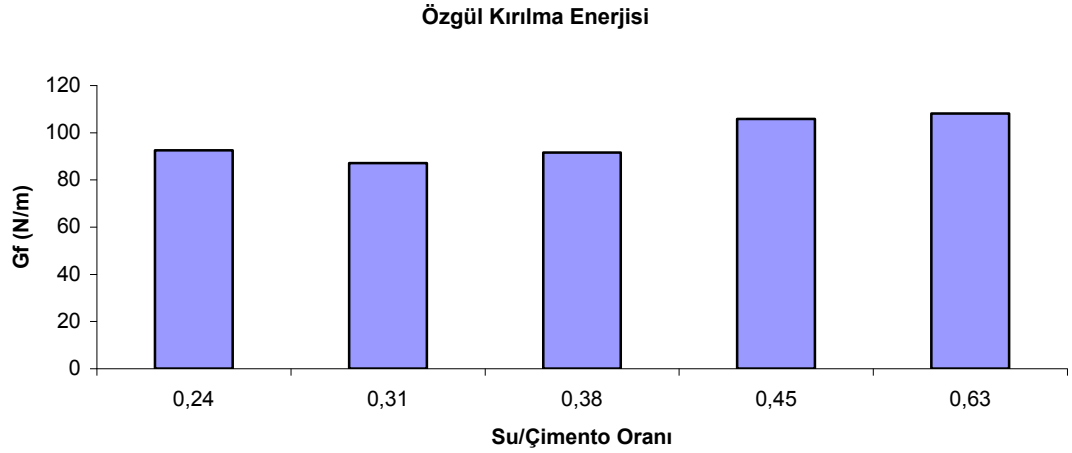
Şekil 4.15: Lifsiz Eğilme-Çekme Dayanım Grafiği

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 değerlendirmektedir. Eğilme deneyi ile elde edilen grafik incelendiğinde yarma-çekme dayanımından elde edilene benzer bir şekilde davrandığı görülmektedir. Bu bakımdan yarma-çekme grafiği kullanılarak çıkarılan sonuçları destekler niteliktedir. 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 daha net bir biçimde görülmektedir.



Şekil 4.16: Lifsiz- Lifli Eğilme-Çekme Dayanım Grafiği

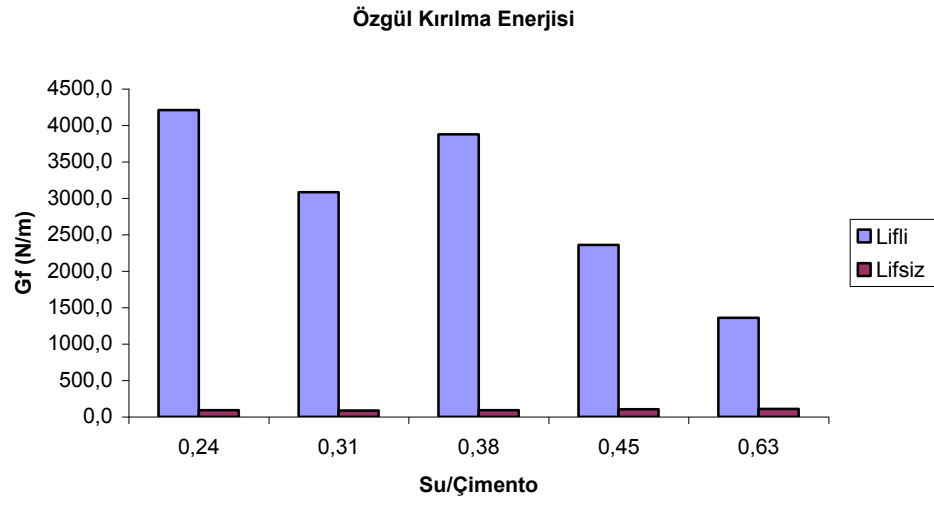
Çekme eğilme grafiği, lifli üretimler açısından incelendiğinde ise lifsizlere göre daha yüksek bir performans sergiledikleri görülmektedir. Lifli numuneler, 0,24 su/çimento oranında aynı su/çimento oranındaki yalın betona göre yaklaşık 2 kat daha fazla çekme dayanımına sahip olurken, 0,63 su/çimento oranında bu dayanım farkı ortadan kalkmaktadır. Yani, çekme dayanımı açısından lifsizler ve lifli üretimler arasındaki dayanım farkının artan su/çimento oranıyla azaldığı görülmektedir. Önceden de belirtildiği gibi üretilen numunelerde su ve agrega oranı sabittir. Çimento ise aynı incelikte olan silis unuyla hacimce ikameli olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla üretimlerdeki su/çimento miktarı artışı, suyun artmasından değil çimentonun ikameli olarak kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Azalan çimento miktarı ile gerek yarma-çekme grafiği ve gerekse eğilme-çekme grafiklerinden de görüldüğü gibi lifsiz betonların çekme dayanımları düşmektedir. Ayrıca Şekil (4.16) incelendiğinde, artan su/çimento oranıyla, yani azalan çimento miktarıyla beraber betonlarda liflerin çekme dayanımına olan olumlu katkısının yani lifli ve lifsiz numuneler arasındaki çekme dayanımı farkının düştüğü görülmektedir. Bu durum, betonda kullanılan çimento dozajının, önceden de belirtildiği gibi betonun çekme dayanımını etkilemesinin yanı sıra betonun liften yararlanma yeteneğini de etkilediğinin göstergesidir. Bu ilişki, beton matrisi ve lifler arasındaki aderans göz önüne alınarak açıklanabilir. Bilindiği gibi beton matrisi ile lifler arasındaki aderans sayesinde lifler çekme gerilmelerini alabilmektedir. Aderansı etkileyen en önemli unsur ise matris dayanımıdır. Üretilen karışımlardan en fazla çimento dozajı 0,24 su/çimento oranına sahip numunede olmasından dolayı liflerle olan aderans bu üretimde yüksek olmuş ve lifli ve lifsiz üretimler arasındaki en büyük fark oluşmuştur. Su/çimento oranı arttıkça çimento dozajı düşmüş matris zayıflamış ve liflerle sağlanan aderans düşmüştür. Dolayısıyla liflerin çekme gerilmelerini taşıma oranı düşmüş ve lifli üretimlerin çekme dayanımı düşmüştür. 0,63 su/çimento oranına sahip numunelerde ise lifler çekme dayanımı açısından bir avantaj sağlamadığı görülmektedir.



Şekil 4.17: Lifsiz Özgöl Kırılma Enerjisi Grafiği

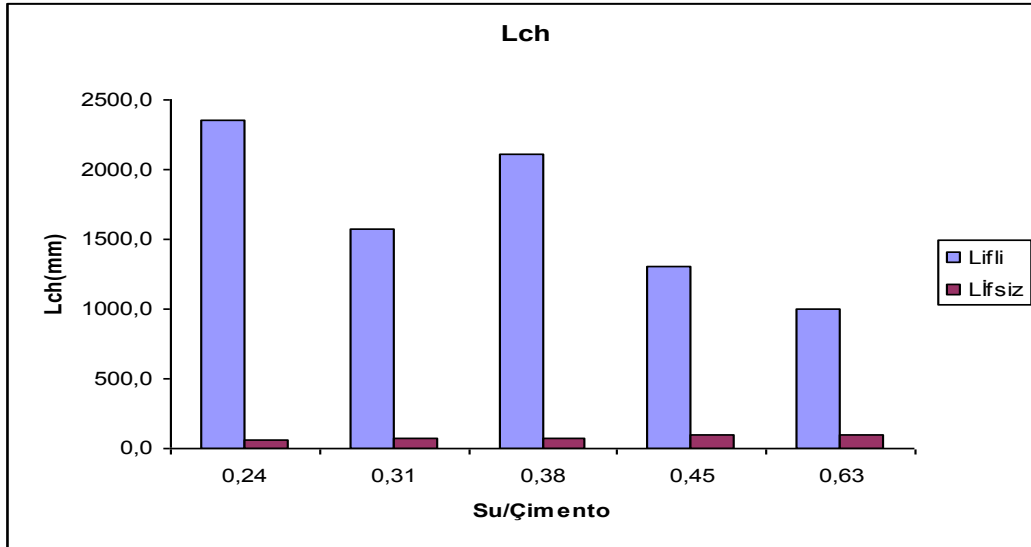
Üretilen lifsiz numuneler, özgül kırılma enerjileri açısından incelendiğinde artan su/çimento oranıyla beraber özgül kırılma enerjilerinin artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bilindiği gibi üretilen numunelerin özgül enerjisi kırıya uygulanan yük ve aynı doğrultuda ölçülen sehim ile orantılıdır. Bu tezde üretilen karışımlardan, düşük su/çimento oranına sahip olanlar, çimento dozajı yüksek olduğundan dolayı beton matrisi diğerlerine göre daha güçlüdür. Bu üretimlerde, malzemede çatlak oluşumu daha güçlü içyapı sebebiyle daha zor olmuştur. 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 oluşumuna kadar olan şekil değiştirme, malzemenin elastik enerji yutma kapasitesini yani rezilyansını gösterir. Çatlak oluşumundan sonra ise plastik şekil değiştirmeler başlar ve numunenin absorbe ettiği enerji çatlağın ilerleme direncine ve şekline bağlıdır. Bu çalışmadaki düşük su/çimento oranına sahip numunelerde, matriks çok güçlü olduğu için çatlak bulduğu en zayıf yerden, en kısa yoldan ilerlemiştir. Çatlak ilerlemesi esnasında önüne bir agrega çıkması durumunda güçlü matriks ve agrega-matriks ara yüzü sebebiyle agregayı kırarak ilerlemiştir. Kısaca, 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. Üretilen yüksek su/çimeto oranlı malzemelerde ise karışımlardaki çimento dozajı daha düşük olduğu için matris yapısı da düşük su/çimento oranlı olanlara göre daha zayıftır dolayısıyla matris aynı yükleme şekli altında daha düşük gerilmelere dayanabildiği için kaldırabileceği yük de daha düşük olmuştur. Bu sebeple çatlaklar daha erken gelişmiş ve daha kolay ilerlemiştir. Mesela, çatlak bir agrega ile karşılaştığında agregayı kırmak yerine daha zayıf olan agrega etrafından hareket

etmiştir. Bu da çatlağın daha çok hareket etmesine sebep olmuş ve malzemeyi sünekleştirmiştir.



Şekil 4.18: Lifsiz-Lifli Özgöl Kırılma Enerjisi Grafiği

Özgöl kırılma enerjisi grafiğı, lifli üretimler için incelendiğinde en çok göze çarpan etmen, lifli üretimlerin lifsizlere göre çok daha fazla enerji absorbe etmesidir. En çok enerji, en düşük su/çimento oranında yutulmakta olup su/çimento oranı arttıkça absorbe edilen enerji de azalmaktadır. Daha önceden de belirtildiğı gibi en güçlü matris yapısı 0,24 su/çimento oranına sahip numunelerdedir. Matris yapısı güçlendikçe lifler ve matris arasındaki aderans güçlenmektedir. Bilindiğı gibi lifler, çatlak yüzeyinin iki tarafında köprü vazifesi görmekte olup çatlağı ilerletmek isteyen etkileri matrisle olan aderans sayesinde kendi bünyeleri üzerine aktarmaktadırlar. Lifler, çatlak üzerinde iken, aderans zayıf ise çatlak üzerinden sıyrılır ve sehimi bu sıyrılma miktarına bağılı olarak çok olur. Aderans çok güçlü olduğunda ise liflerin çekme kapasitesi aşılr ve lifler kopabilir. Bu durumda ise sehimi ancak lifin kopma aşamasında yaptığı şekil değıştirme kadar olabilir. Beklendiğı gibi aynı yükleme şartları altında lifin kopması, numunenin daha yüksek dayanım sergilemesine sebep olsa da sıyrılan lifli üretimler kadar sehimi yapamadığı için yuttukları enerjide daha düşük olacaktır. Bu tez çerçevesinde üretilen numunelerde en yüksek özgöl enerji, matrisi en güçlü olan karışımlardan elde edilmiştir. Bu durum, matrisin güçlü olmasına rağmen liflerde baskın davranışın sıyrılma şeklinde olduğunun göstergesidir. Dolayısıyla daha yüksek su/çimento oranına sahip üretimlerde de matris ve aderans daha zayıf olduğu için baskın lif davranışının sıyrılma şeklinde olacağı aşıkardır. Düşük su/çimento oranlı numunelerde liflerin güçlü aderans sayesinde yüksek su/çimento oranına sahip numunelere göre taşıdıkları yük daha yüksektir. Ayrıca düşük ve yüksek su/çimento oranlarına sahip numunelerde baskın lif davranışının sıyrılma şeklinde olması sehimi miktarlarının da aynı olmasını sağlamıştır. Düşük su/çimentoya sahip numunelerde uygulanan yükün daha fazla olması ve enerjinin sehimi ve yük çarpımıyla doğru orantılı olmasından dolayı yutulan enerjinin daha yüksek olmasını sağlamıştır. Fakat numunelerdeki lif miktarı daha az olsa, matris yükleme altında iken lif başına düşen gerilme miktarı daha yüksek olacağından, su/çimento oranı düşük üretimlerde baskın lif hareketinin kopma şeklinde olması muhtemel olacaktı. Daha düşük lif miktarıyla düşük su/çimento oranlı üretimlerde kopma baskın davranışını sergileyen lifler, yüksek su/çimento oranlarında azalan aderans sayesinde kopma yerine sıyrılma baskın bir hareket sergileyeceklerdi. Dolayısıyla lifli üretimler açısından en yüksek enerji yutulması adreansın 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 (lch) grafikleri incelendiğinde, lifli üretimlerin karakteristik boylarının lifsiz üretilere göre çok daha fazla olduğu ve artan su/çimento oranıyla beraber karakteristik boyun azaldığı görülmektedir. Lifsiz üretimler de ise artan su/çimento oranıyla birlikte lifli üretimlerin tersine lch karakteristik boy artmaktadır. Grafik incelendiğinde genel olarak Şekil (4.18)' de gösterilen kırılma enerjisi grafiği ile benzer özellikler taşıdığı görülmektedir. Bu sebeple, bu tez çalışması çerçevesinde üretilen numuneler için lch karakteristik boyunun kırılma enerjisinin bir fonksiyonudur diyebiliriz. Kırılma enerjisini etkileyen iç dinamiklerin karakteristik boyu da benzer şekilde etkilediği görülmektedir.

5. GENEL SONUÇLAR

- Sabit 0,52' lik su/ince malzeme oranıyla üretilen numunelerde, 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. 0,63 su/çimento oranında ise basınç dayanımdaki azalma % 24 değerine ulaşmıştır. Bu davranış lifsiz ve lifli üretimlerde benzer bir şekilde gelişmiş olup lifli betonların dayanımları lifsizlere göre %5 - %7 nispetinde düşük çıkmıştır. 0,63 su/çimento oranında lifli numunelerin dayanımı lifsizlerden %4 kadar yüksek olmuştur.
- Lifsiz numunelerde yarma-çekme dayanımları azalan çimento dozajı ile düşmüştür. Numunelerde lif kullanılması yarma-çekme dayanımlarını artırmıştır. En büyük artış %20 ile 0,31 su/çimento oranında görülmüştür. Lifli üretimlerin yarma-çekme dayanımları 0,45 su/çimento oranına kadar yakın seyretmiş ve 0,63 su/çimento oranında 7,3 MPa değerine düşmüş ve lifsiz üretimlere göre ancak %4'lük bir artış sağlanabilmiştir.
- Lifsiz üretimlerin eğilme-çekme dayanımları 0,24 ve 0,45 su/çimento değerleri arasında genelde aynı kalmış fakat 0,63 su/çimento oranında 0,24 su/çimento oranına göre 8,3 MPa' dan 6,8 MPa değerine düşerek %18'lik bir düşüş sergilemiştir.
- Lifli üretimlerin eğilme çekme dayanımları lifsizlere göre belirgin bir biçimde fazla olmasına rağmen artan su/çimento oranı ve azalan çimento dozajı ile birlikte, liflerin eğilme dayanımına sağladığı katkıda azalmaktadır. 0,24 su/çimento oranında 17.8 MPa eğilme çekme dayanımı ile lifsiz üretime göre %115' lik bir artış sağlanırken, 0,63 su/çimento oranında 6,5 MPa' lık eğilme çekme dayanımıyla lifsiz üretime göre %4' lük bir düşüş gözlenmiştir.
- 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.

- Lif katkılı betonların özgül kırılma enerjileri, lifsizlere göre çok daha yüksek sonuçlar vermiştir. Lifli üretimlerin özgül kırılma enerjileri artan su/çimento oranı ve azalan çimentoyla birlikte düşmüştür. 0,24 su/çimento oranında 4210 (N/m) özgül enerjiye sahip üretimler lifsiz üretime göre 45 katlık bir avantaj sağlarken, 0,63 su/çimento oranında düşerek 1358 (N/m) 'lık özgül enerji sağlanmış ve lifsiz üretimlere göre sağlanan avantaj 13 kat nispetinde kalmıştır.
- Lif ilavesinin sünekliği artırdığı gözlenmiş ayrıca yukarıda basınç dayanımı, çekme dayanım ve özgül enerji ile ilgili sonuçlar irdelendiğinde, betona lif katılmasının dayanımdan çok betonun yuttuğu enerjiyi artırdığı görülmüştür.
- Numunelerin, taze haldeyken yayılma özellikleri incelendiğinde, lifsiz üretimlerin kendinden yerleşen beton özelliği sergiledikleri görülmüş ayrıca betona bu tezde kullanılan tip, uzunluk ve miktar nispetinde lif katılmasının betonun yayılma özelliğini pek etkilemediği görülmüştür.
- Üretilen lifsiz numunelerin, kapalı değişken kesitten ve donatılar arasından geçiş yeteneklerinin, kullanılan çimentonun azalmasıyla beraber azalan kohezyondan dolayı düştüğü görülmüştür. Betona, bu tez çalışması çerçevesinde kullanılan tip ve miktarda lif katılmasının, bahsedilen yetenekleri ciddi bir biçimde düşürdüğü görülmüştür. Su/çimento oranını 0,38' den yüksek olan lifli karışımlarda kendinden yerleşen beton özelliği gözlenmemiştir.
- Yapılan taze beton deneylerinde azalan çimento ve kohezyonla beraber numunelerin kendinden yerleşen beton özelliklerini kaybettikleri 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.

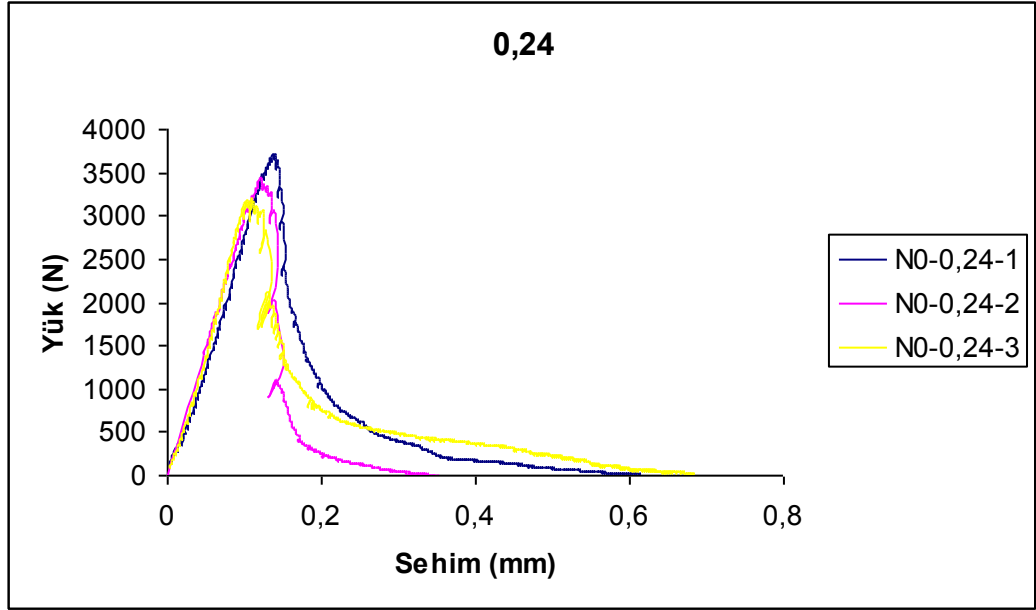
KAYNAKLAR

- [1] Tokyay, M, Şahmaran, M., Yaman İ., Ö., 2004, Yeni Nesil Yüksek Akışkanlaştırıcı Katkı Maddeleri ile Yüksek Hacimde Uçucu Kül İçeren Kendiliğinden Yerleşen Beton, *Beton 2004 Kongresi*, THBB, İstanbul,10-12 Haziran, s. 213-225.
- [2] Özkul, M., H., Doğan Ü., A., 2004, Kendiliğinden Yerleşen Beton ve Katkı Çimento Uyumu, *Beton2004 Kongresi*, THBB, İstanbul,10-12 Haziran, s. 225-233.
- [3] Bornemann, R., Schmidt,M., The role of powders in concrete in: 6th internationally symposium on utilization OF high strength/high performance concrete Leipzig 2002.
- [4] Özkul, H., TAşdemir, M., A., Tokyay, M., Uyan, M., 1999. Her Yönüyle Beton, THBB, İstanbul.
- [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] Özyurt, N., 2000, Ultra Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] Bache, H., H., 1981, Densified Cement Ultra-fine Particle Based Materials, Report 40, Aalborg Portland, Denmark.
- [8] Nagataki, S., 2000. Advanced TEchnology for High Fludity Concrete, *Proceedings of the Cement and Concrete TEchnology in the 2000's Second International Symposium*, İstanbul, 6-10 Eylül, Turkey, Volume 1, s. 87-102.
- [9] Grünwald, S., Walraven, J. C., 2001, Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete., *Cement and Concrete Research*, 31, (12), 1793-1798.

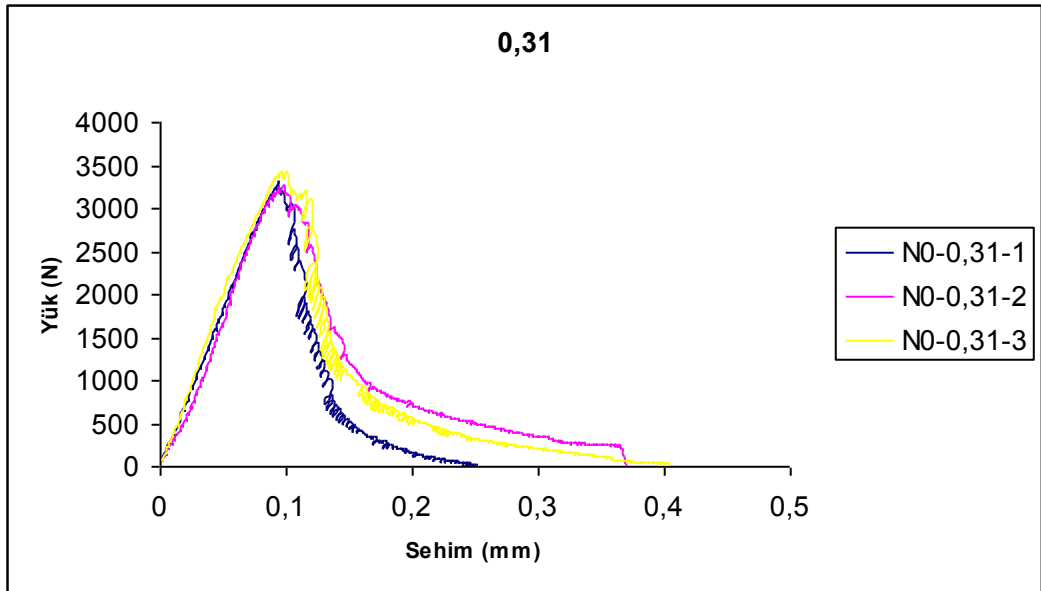
- [10] **Taşdemir, M., A., Bayramov F.**, 2002, Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, *İTÜ Dergisi*, Cilt 1, Sayı:2, 125-144.
- [11] **Bartos, P.**, 1992, *Fresh Concrete and Tests*, Elsevier, Amsterdam
- [12] **Tattershal, G. H.**, 1991 *Workability and Quality Control of Concrete*, E&F, N. Spon Ed., London
- [13] **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.
- [14] **Bartos, P.J.M., Sonebi, M., Tamim, A.K.**, 2002, Workability and Rheology of Fresh Concrete: Compendium of Tests, *TC 145-WSM RILEM Technical Committee Report*, Cachan, France
- [15] **Balaguru, P.N., Shah, S.P.**, 1992, *Fiber Reinforced Cement Composites*, McGraw-Hill, New York.
- [16] **Yeğınobalı, A.**, 2001, Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Amkara.
- [17] **Sellevold, E., J., Nielsen T.**, 1987, Condensed Silica Fume in Concrete: A World Review, *Supplementary Cementing Materials for Concrete*, CANMET, Canadian Government Publishing Center, pp. 167-229.
- [18] **Akman, S.**, 1990. *Yapı Malzemeleri*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [19] **Goldman, A., Bentur, A.**, 1989, Bond Effect in High-Strength Silica-Fume Concretes, *ACI Material Journal* **86**, 440-447.
- [20] **Aitcin, P., C.**, 1998, *High Performance Concrete*, E&F, N. Spon Ed., London.
- [21] **Arslan, A.**, 1999. *Lifli Betonların Darbe Etkisi Altında Genel Özellikleri*, Çelik Tel Donatılı Betonlar Sempozyumu, BEKSA Sempozyum Bildirileri, Sabancı Center.
- [22] **ACI Committee 544**, 1988, Design considerations for steel fiber reinforced concrete (ACI 544.4R-88), *Manual of Concrete Practice*, 5, American Concrete Institute, Detroit, MI.
- [23] **Ekincioglu Ö.**, 2003, Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı ; “Bir Optimum Tasarım”, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [24] **Doğın, Ü., A.**, 2000. Yeni Kuşak Süper Akışkanlaştırmaların Harç ve Beton Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.

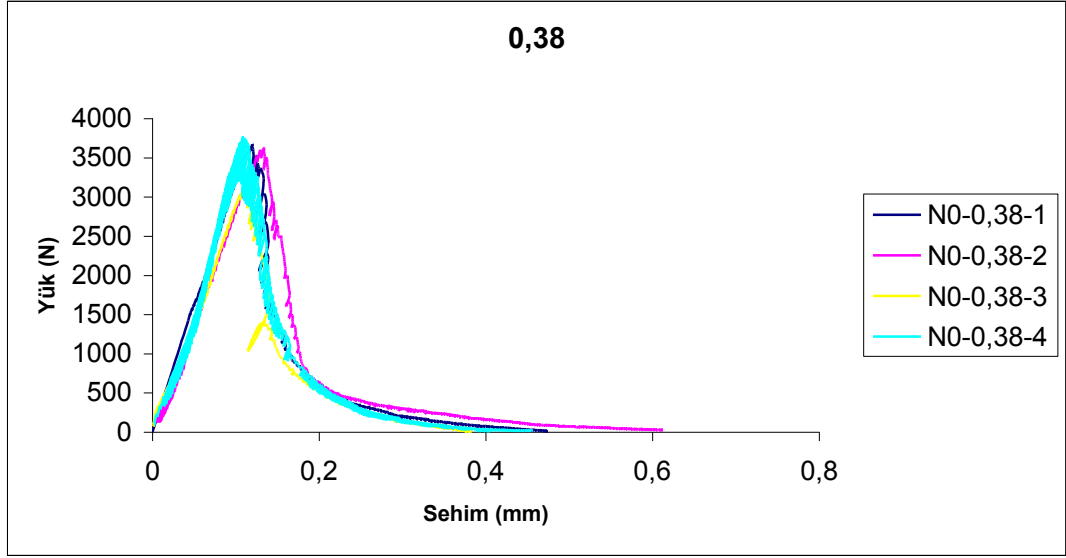
EKLER



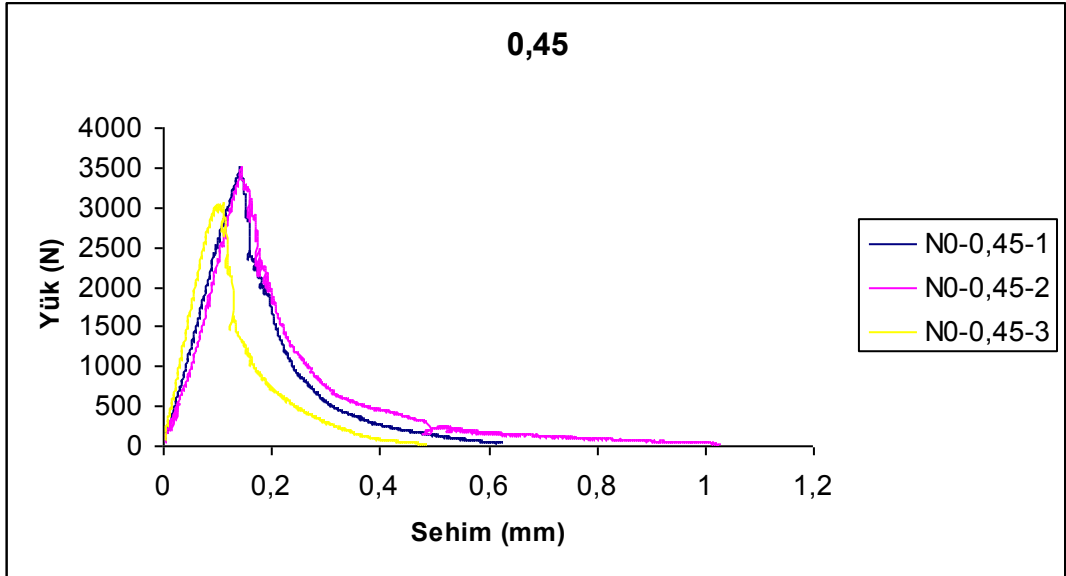
Şekil A.1: N0-0,24 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



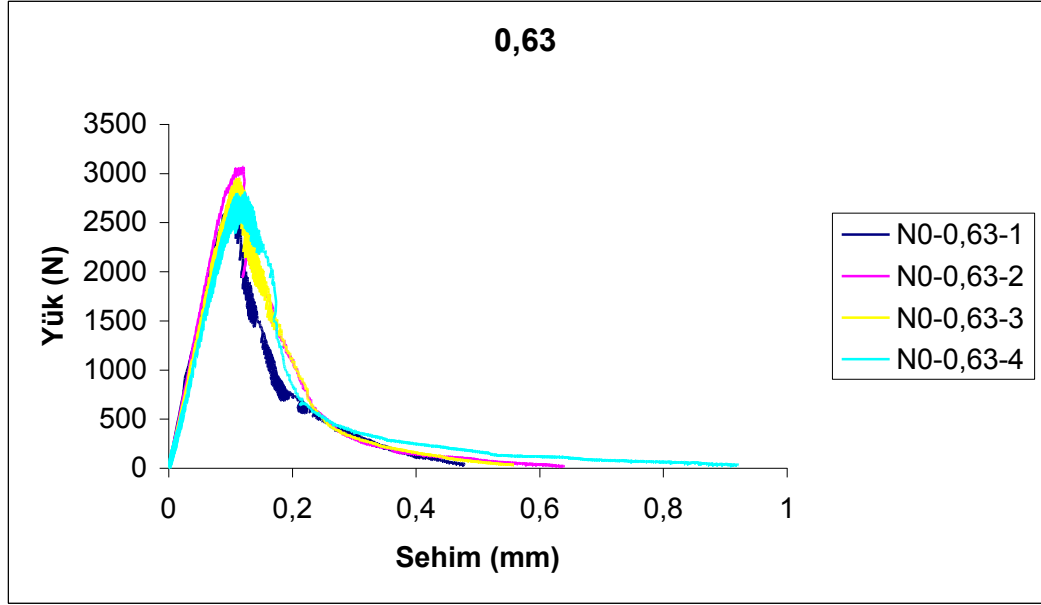
Şekil A.2: N0-0,31 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



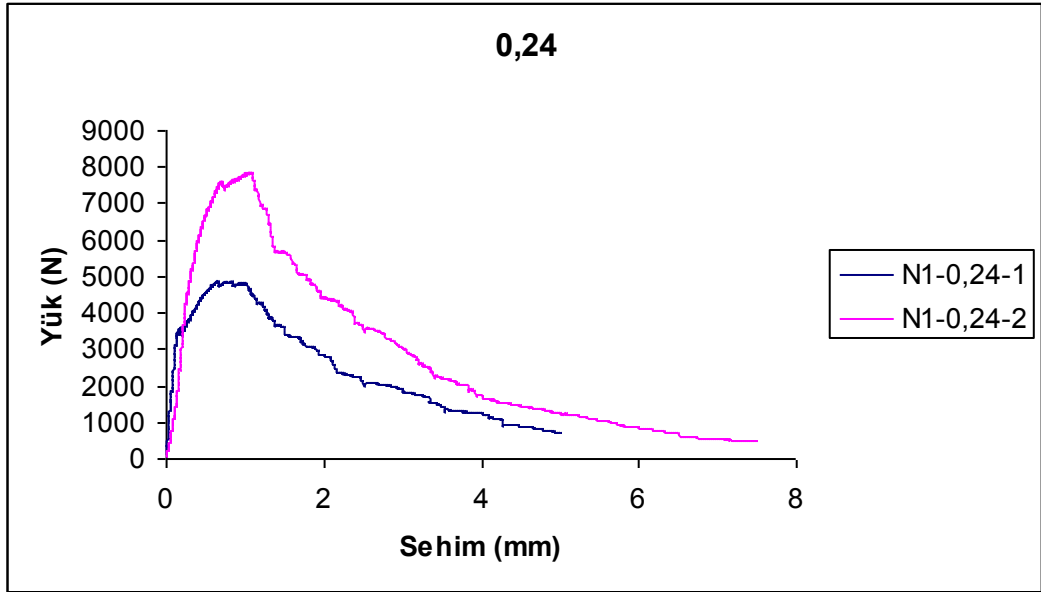
Şekil A.3: N0-0,38 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



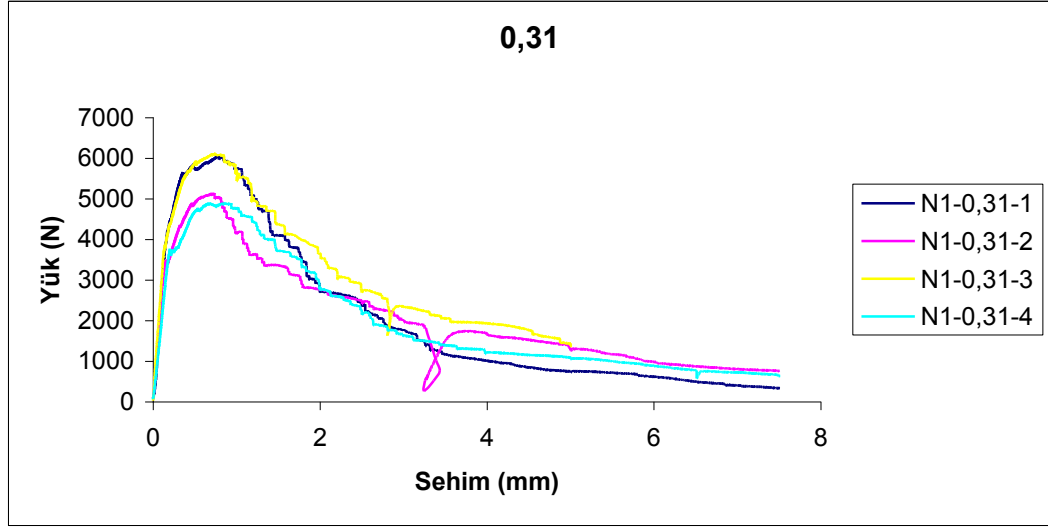
Şekil A.4: N0-0,45 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



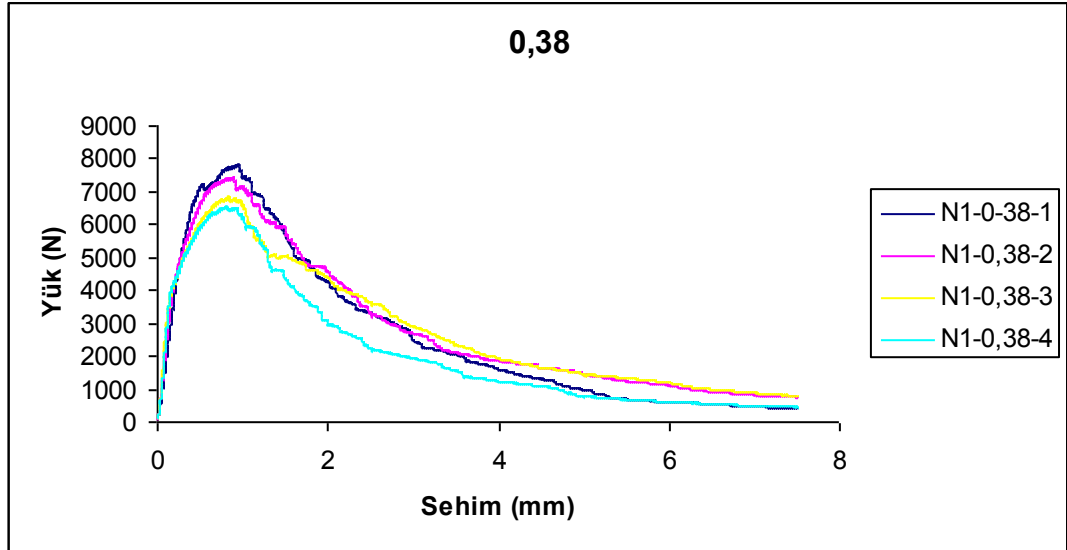
Şekil A.5: N0-0,63 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



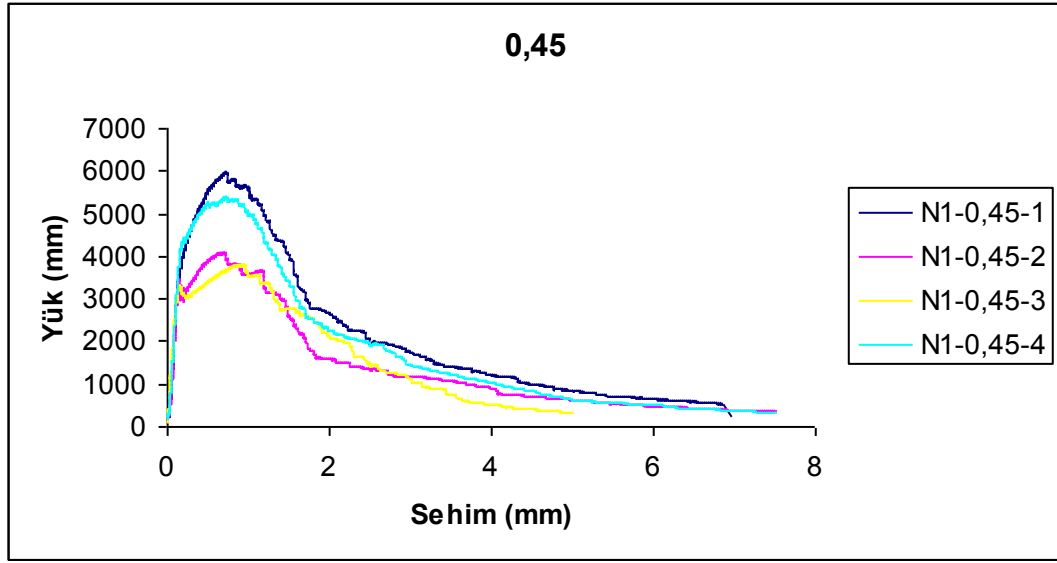
Şekil A.6: N1-0,24 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



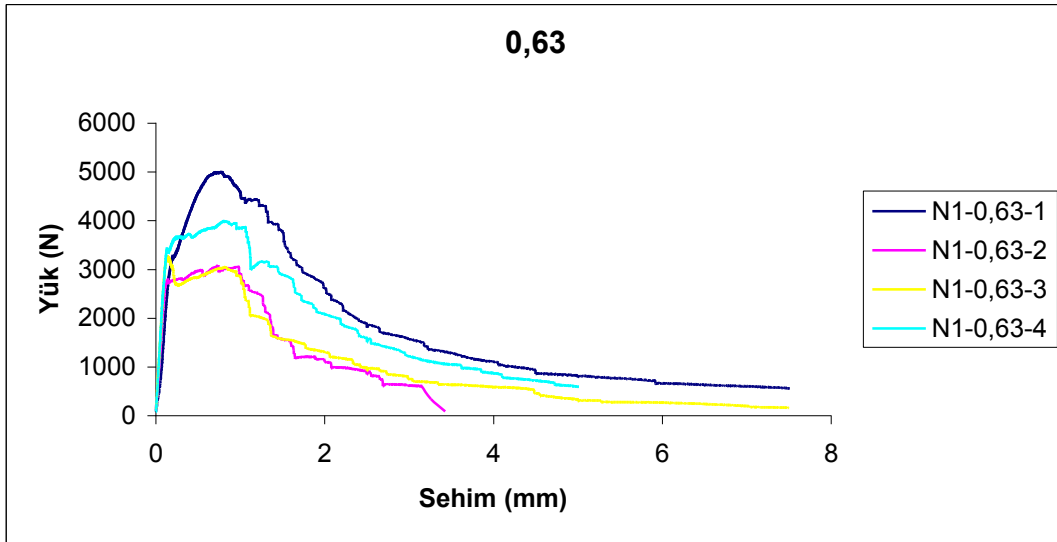
Şekil A.7: N1-031 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



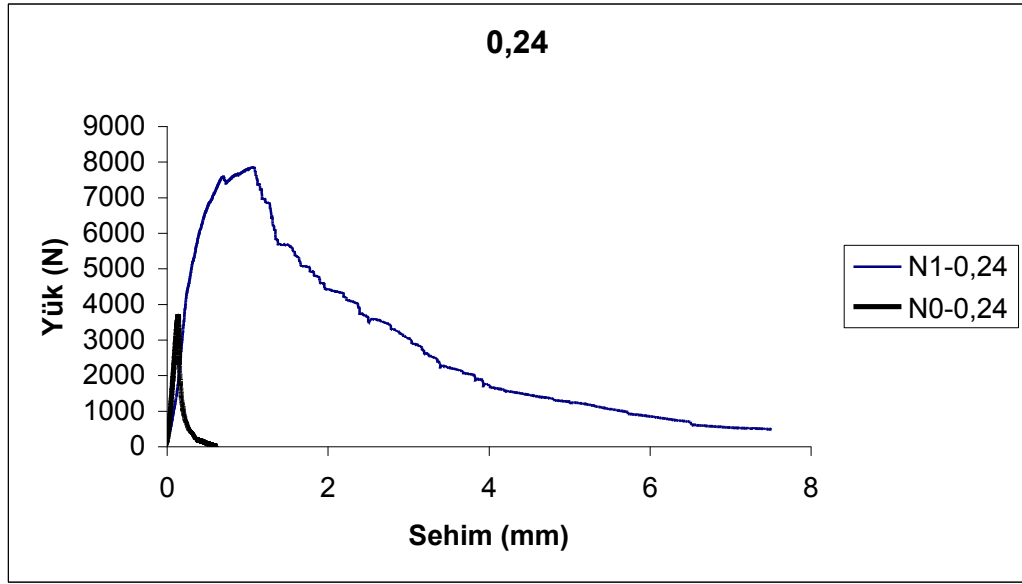
Şekil A.8: N1-038 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



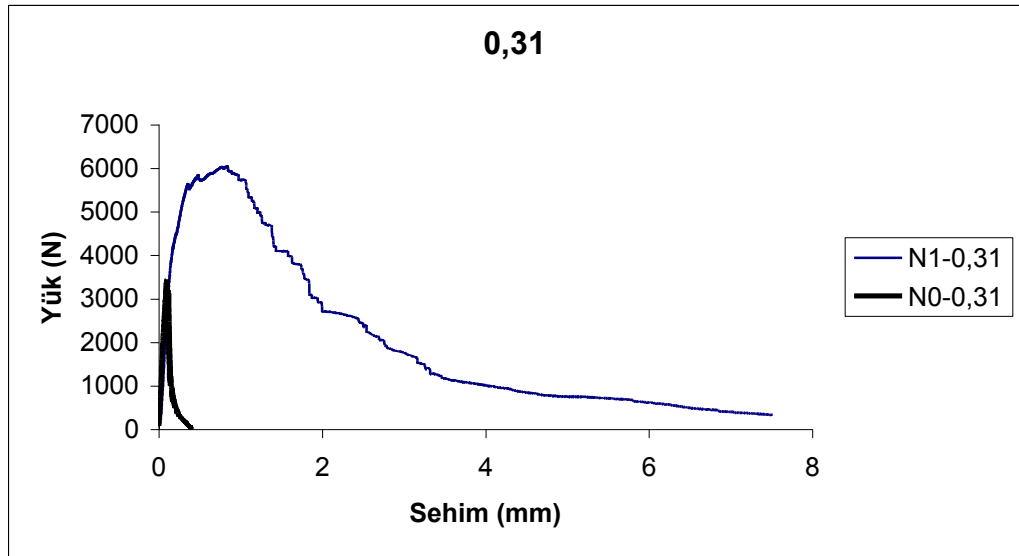
Şekil A.9: N1-0,45 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



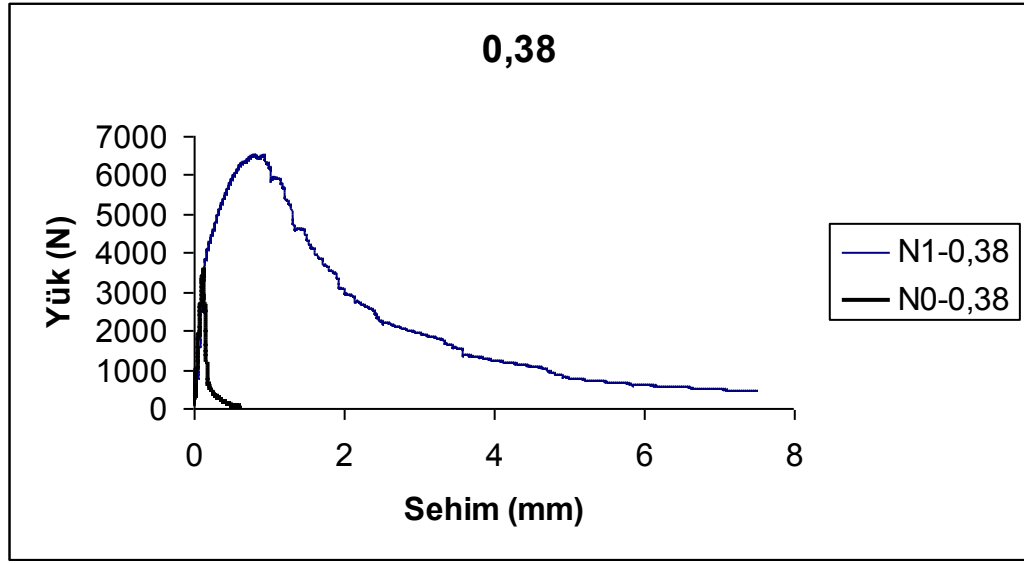
Şekil A.10: N1-0,63 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



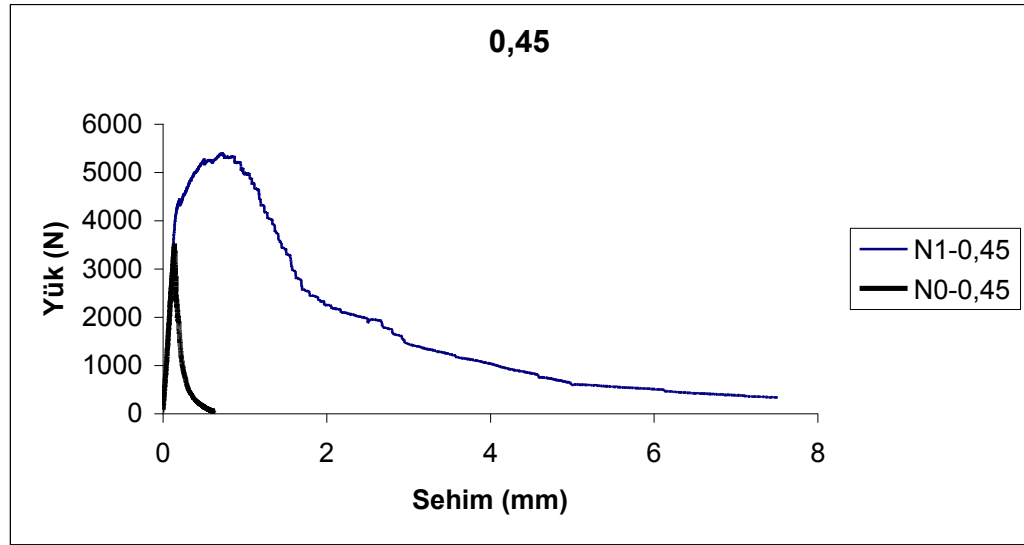
Şekil A.11: 0,24 Su/Çimento Oranlı Numunelerin Ortalama Yük Deplasman İlişkisi



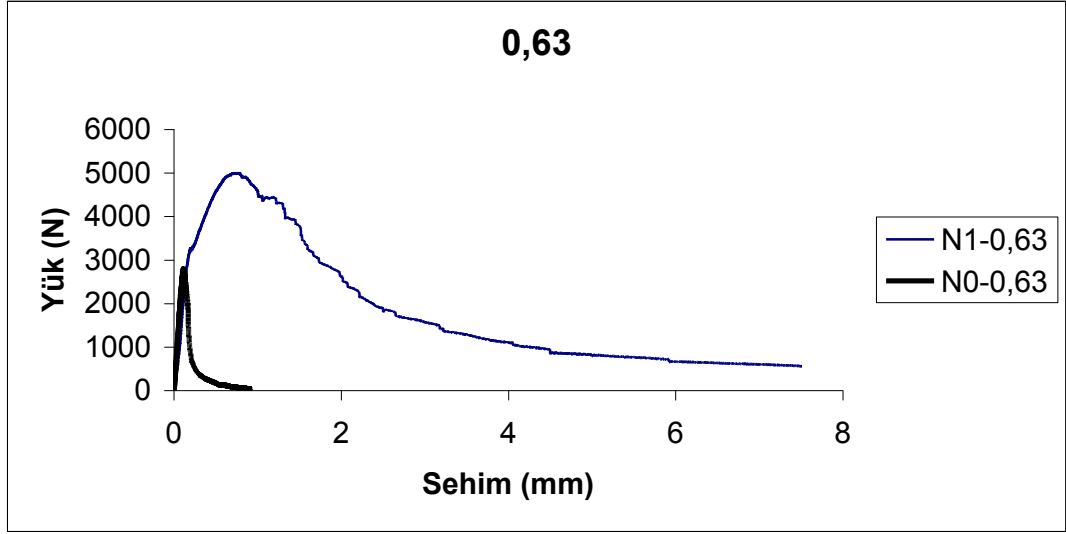
Şekil A.12: 0,31 Su/Çimento Oranlı Numunelerin Ortalama Yük Deplasman İlişkisi



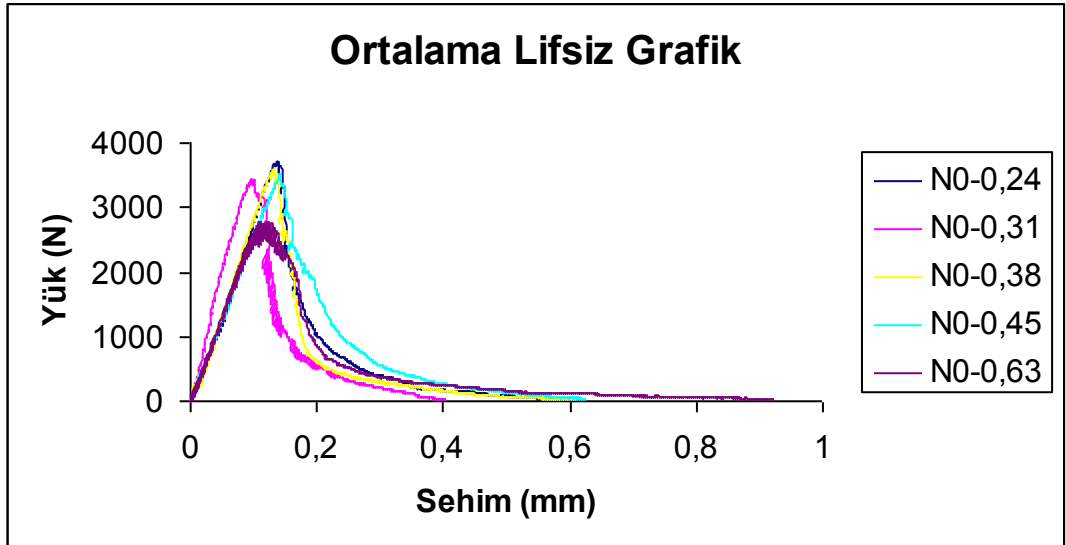
Şekil A.13: 0,38 Su/Çimento Oranlı Numunelerin Ortalama Yük Deplasman İlişkisi



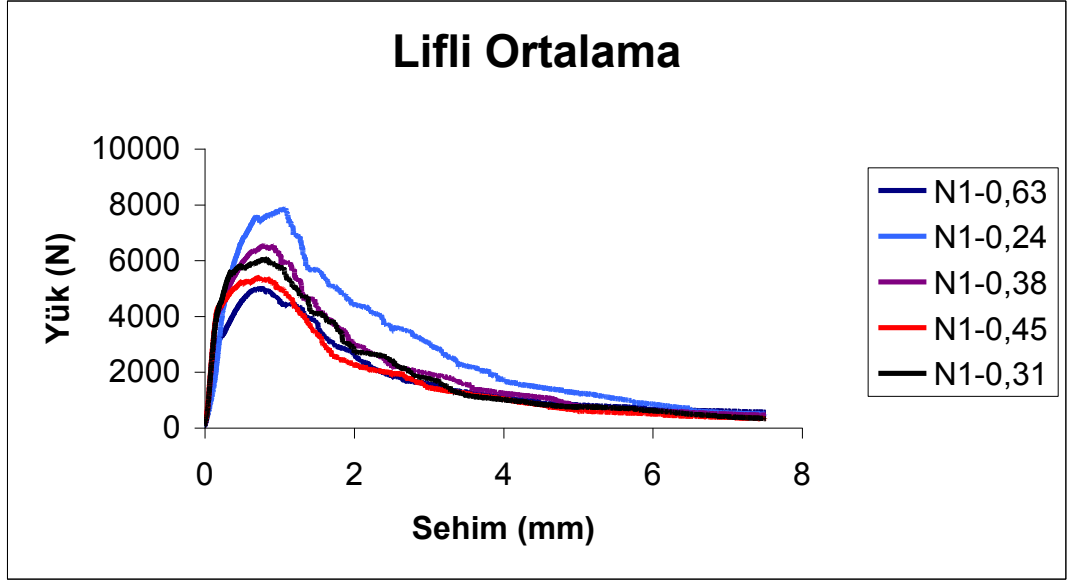
Şekil A.14: 0,45 Su/Çimento Oranlı Numunelerin Ortalama Yük Deplasman İlişkisi



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



Şekil A.16: Farklı Su/Çimento Oranlarında Lifsiz Numunelerin Ortalama Yük Deplasman İlişkisi



Şekil A.17: Farklı Su/Çimento Oranlarında Lif İçeren Numunelerin Ortalama Yük Deplasman İlişkisi

ÖZGEÇMİŞ

Burak Yılmaz, 1980 yılında Eskişehir’de doğdu. Eskişehir’ de başladığı ilk okul öğrenimini İstanbul’ da bitirdi. Daha sonra orta okulu Özel Doğu Lisesi’nde, liseyi ise Hayrullah Kefoğlu Lisesi’ nde tamamladı. 2000 yılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümüne girdi. 2003 senesinde tamamladığı lisans öğreniminden sonra 2003-2004 güz yarıyılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Anabilimdalı Yapı Mühendisliği Programında yüksek lisans öğrenimine başladı. Yüksek lisans öğrenimi ile paralel olarak 2004 yılında girdiği Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden 2006 senesi bahar yarıyılında mezun oldu. Yüksek lisans öğrenimini ise 2006-2007 öğretim yılı bahar dönemi sonu tamamladı.