

ÖNSÖZ

Bu tezi yöneten ve çalışmalarım sırasında değerli bilgi ve yardımları ile yanımda olan sayın hocam Prof.Dr. Mehmet Ali Taşdemir' e, çalışmalarımda ilgi ve yardımları dolayısıyla sayın hocalarım Prof.Dr. Mehmet Uyan ve Prof.Dr. Canan Taşdemir' e, Araş.Gör. Burcu Akçay, Araş.Gör. Anıl Doğan ve Araş.Gör Ayda Şafak Ağar'a, deneysel çalışmalarım sırasındaki yardımları dolayısı ile Murat Meydan ve İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Labaratuvarı çalışanları ile, çalışmalarım süresince her anımda yanımda olan arkadaşlarım Araş.Gör. Murat Yılmaz, Tolga Şerbetçi ve Süleyman Güner' e, gösterdikleri sevgi, destek ve üstün sabır için aileme teşekkür ederim.

Mayıs 2005

Cengiz ŞENGÜL

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÖZET	vii
SUMMARY	ix
1.GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI ve GENEL BİLGİLER	3
2.1. Normal Betonlar	3
2.2. Özel Betonlar	3
2.2.1. Yük taşıma kapasiteleri ve enerji yutma kapasitelerine göre	4
2.2.2. Özel üretim teknikleri ve sürecine göre	7
2.3. Çelik Lif ve Silis Dumanı Kullanımının KYB' özelliklerine Etkisi	17
2.3.1. Çelik liflerin beton özelliklerine etkisi	17
2.3.2. Silis dumanının beton özelliklerine etkisi	22
2.4. Sıcaklığın Etkisi ve Isıl İşlem	27
2.4.1. Dış ısıtma (Buhar kürü)	28
2.4. Katkı Maddelerinin Etkisi	29
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	32
3.1. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	32
3.1.1. Çimento	32
3.1.2. Silis dumanı	33
3.1.3. Agregalar	33
3.1.4. Akışkanlaştırıcı	34
3.1.5. Çelik lif	35
3.2. Beton Karışımları	35
3.3. Üretimde İzlenen Sıra	38
3.4. Numune Boyutları ve Şekilleri	38
3.5. Isıl İşlem Programı	39
3.6. Numune Kodlarının Belirlenmesi	39

4. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ	40
4.1. Taze Beton Deney Sonuçları	40
4.1.1. Birim ağırlık deneyi	40
4.1.2. Çökme-yayılma deneyi	41
4.1.3. Kısıtlanmış yayılma deneyi	42
4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri	43
4.2.1. Kiriş numunelerde RILEM kırılma enerjisi deney sonuçları	43
4.2.2. Silindir basınç deneyi	45
4.2.3. Yarma deneyi	45
4.2.4. Sertleşmiş beton deneyleri	46
4.3. Silindir Basınç Deneylerinden Elde edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	50
4.4. Elastisite Modüllerinin Değerlendirilmesi	50
4.5. Disk Yarma Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	50
4.6. RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması	51
4.7. Net Eğilme Dayanımlarının Değerlendirilmesi	51
5. GENEL SONUÇLAR	52
KAYNAKLAR	53
EKLER	55
ÖZGEÇMİŞ	64

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1: Portland Çimentosunun Fiziksel Özellikleri.....	32
Tablo 3.2: Portland Çimentonun Kimyasal Özellikleri.....	33
Tablo 3.3: Portland Çimentosunun Basınç Dayanımı.....	33
Tablo 3.4: Agregaların Fiziksel Özellikleri.....	34
Tablo 3.5: Silis Ununun Fiziksel Özellikleri.....	34
Tablo 3.6: Agregaların Elek Analizi Sonuçları.....	34
Tablo 3.7: Kullanılan Süperakışkanlaştırıcının Teknik Özellikleri.....	35
Tablo 3.8: Teorik Beton Bileşimleri Ve Özellikleri.....	37
Tablo 4.1: 1m ³ Betonda Gerçek Miktarlar.....	40
Tablo 4.2: Çökme-Yayılma Testi Sonuçları.....	41
Tablo 4.3: Kısıtlanmış Yayılma Testi Sonuçları.....	42
Tablo 4.4: Sertleşmiş Beton Özellikleri.....	46
Tablo 4.5: Kırılma Enerjileri ve Net Eğilme Dayanımları.....	49

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1: Çökme-Yayılma Testi Deney Düzeneği.....	12
Şekil 2.2: J-Halkası Testi Deney Düzeneği.....	13
Şekil 2.3: L-Kutusu Testi Deney Düzeneği.....	14
Şekil 2.4: V-Hunisi Testi Deney Düzeneği.....	15
Şekil 2.5: U-Kutusu Testi Deney Düzeneği.....	16
Şekil 2.6: Simule Edilmiş Doldurma Testi Deney Düzeneği.....	17
Şekil 2.7:Farklı Oranlarda Lif İçeren Kompozitler için Tipik Yük–Sehim Eğrileri.....	19
Şekil 2.8: Lif Doğrultusunun Ters Yönünde Zayıf Malzeme Özellikleri.....	20
Şekil 2.9: Silis dumanı tane boyu dağılımı.....	23
Şekil 2.10: Silis Dumanı İçeren ve İçermeyen Betonların Arayüz Bölgesinin Şematik Gösterimi.....	26
Şekil 2.11: Silis Dumanının Puzolan ve Boşlukları Doldurma Etkisi.....	27
Şekil 2.12: Süper Akışkanlaştırıcı Katkıların Etki Mekanizması.....	31
Şekil 3.1: Beton agregası karışımının granülometrisi ve referans eğrileri.....	36
Şekil 3.2: Numune Şekilleri ve Boyutları.....	38
Şekil 4.1: Çökme-Yayılma Testi Deney Sonuçları.....	41
Şekil 4.2: Kısıtlanmış Yayılma Testi Deney Sonuçları.....	42
Şekil 4.3: RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme düzeni.....	43
Şekil 4.4: Yük-Sehim Eğrisinin Şematik Gösterimi.....	44
Şekil 4.5: V0 Kodlu Numunelerin Basınç Mukavemetlerinin Değişimi.....	46
Şekil 4.6: V1 Kodlu Numunelerin Basınç Mukavemetlerinin Değişimi.....	47
Şekil 4.7: V2 Kodlu Numunelerin Basınç Mukavemetlerinin Değişimi.....	47
Şekil 4.8: Elastisite Modüllerinin değişimi.....	48
Şekil 4.9: Yarma-Çekme Mukavemetlerinin Değişimi.....	48
Şekil 4.10: Kırılma Enerjilerinin Değişimi.....	49
Şekil 4.11: Net Eğilme Dayanımlarının Değişimi.....	49

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

ÖZET

Son yıllarda gelişen beton teknolojisi ile birlikte yüksek performansın anlamı belirlenen ihtiyaçlara cevap verebilmek için beton bileşiminin düzenlenmesi şekline dönüşmüştür. Bu yaklaşımla belirli bir basınç dayanımının elde edilmesi, kendiliğinden yerleşebilme ve işlenebilirlik, çelik lifler ile optimum donatılandırmanın sağlanması gibi kavramlar başlı başına bir amaç olarak ortaya çıkmıştır.

Hamurun su/çimento oranına önemli derecede bağlı olan kayma gerilmelerinin optimum su/çimento oranının belirlenmesi ile azaltılması ve viskozitedeki uyumlu azalmanın süperakışkanlaştırıcıların kullanılması ile sağlanması sonucunda kendiliğinden yerleşen betonların üretiminde önemli bir mesafe alınmıştır. Bununla birlikte mikrofiller malzemeler kullanılması ve maksimum su/çimento oranının sınırlandırılması ile uygun işlenebilirliğe sahip ve çelik liflerin kullanılması ile yeterli sünekliğe erişen yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen betonların üretimine olanak sağlanmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında sabit 0.51 hacimsel su/pudra oranına sahip 3 farklı karışım üretilmiştir. Bu karışımlarda çimento ile aynı inceliğe sahip olacak şekilde $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ blaine değerine kadar öğütülmüş silis unu çimento ile hacimce ikame edilerek kullanılmıştır. 900 kg/m^3 , 650 kg/m^3 ve 350 kg/m^3 çimento dozajına sahip karışımlarda azalan çimento hacmi kadar öğütülmüş silis unu eklenmiş ve böylece toplam su miktarı değişmediği için su/ince malzeme oranı sabit tutulmuştur. Karışıma giren toplam su miktarının sabit tutulmasından dolayı azalan çimento dozajı ile birlikte su/çimento oranı arttırılmıştır. 900 kg/m^3 çimento dozajlı üretimlerde bu değer 0,22 iken 650 kg/m^3 ve 350 kg/m^3 dozajlı üretimlerde sırasıyla 0,33 ve 0,61 oranlarına ulaşmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda su/çimento oranının artmasına rağmen su/ince malzeme oranının mekanik özellikleri nasıl etkilediği, optimum değerlerin ve sınır değerlerin neler olduğu incelenmiştir. Daha sonra çelik lif katkısının ve çelik lif dayanımının, eğilme ve yarıлма dayanımı ile enerji yutma yeteneğine etkisini incelemek amacı ile bütün özellikleri aynı olan, yalnızca çekme dayanımları farklı 2 tür lif 1 m^3 betonda 40' ar kg olacak şekilde eklenerek davranışlar incelenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda sabit 0,51 hacimsel su/pudra oranında çelik lif içermeyen üretimlerin basınç mukavemetlerinde su/çimento oranının 0,22' den 0,33 değerine kadar artmasına ve çimento dozajının 900 kg/m^3 değerinden 650 kg/m^3 değerine kadar azalmasına rağmen değişmediği belirlenmiştir. Lif ilavesinin dayanımdan çok yutulan enerjiyi arttırdığı, lif dayanımındaki artışın sünekliği ve dayanımı olumlu etkilediği görülmüştür. 650 kg/m^3 çimento dozajına 0,33

su/çimento oranına sahip üretimlerin işlenebilirliği yüksek optimum karışımlar olduğu tespit edilmiştir. Mevcut lif dozajının ve boyutlarının yüksek viskoziteye sahip üretimlerde işlenebilirliği azaltmadığı grlmştr.

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

SUMMARY

The meaning of high performance has changed to adjusting the mix design of concrete according to the demands accompanying the improving concrete technology. Parallel to this approach, the concepts like self-compaction, workability, determination of optimum reinforcement and attainment of a specified compressive strength have turned into a main objective.

The design of the optimum water/cement ratio which mitigates the shear stress in the cement paste and the use of superplasticizers which mildly reduce viscosity, led to development of self-compacted concrete. In addition, limiting the maximum water/cement ratio, and using of fine powder material and steel fibers admit the development of high performance self-compacted concrete.

In this work, three different concrete mixtures having the same volumetric water/powder ratio of 0,51 were produced. In the mixture design, cement was replaced by the same volume of finely ground silica powder having a Blaine surface area of 3500 cm²/g. Because the amount of silica powder added was equal to the amount of cement removed, and the water content was kept constant, the water/fine powder material ratio remained constant in all three mixtures which were produced with the cement dosages of 900 kg/m³, 650 kg/m³ and 350 kg/m³. However, water/cement ratios were increased because the total amount of water was kept constant while the amount of cement used was decreased. These ratios were 0,33 and 0,61 for the mixtures with the cement dosages of 650 kg/m³ and 350 kg/m³ respectively, while it reached to a value of 0.22 for the mixture having 900 kg/m³ cement dosage. Then, two types of steel fibers which have similar geometric properties and different tensile strengths were added to the concrete mixtures at the dosage of 40kg/m³. The main objective of this work is to study the effects of water/fine powder material ratio and fiber strength on the mechanical properties of self-compacted concrete and to determine the optimum values of water/cement ratio. Experiments have shown that, at the constant water/powder ratio of 0,51, the compressive strengths of concretes without steel fibers did not change even though the water/cement ratio increased from 0,22 to 0,33 and the cement dosage was decreased from 900 kg/m³ and 650 kg/m³. Addition of steel fibers affected the ductility of concrete more than the strength. Increasing the strength of fibers had an effect of increasing both the ductility and the strength of concrete. The mixtures with the cement dosage of 650 kg/m³, having the water/cement ratio of 0,33 were determined to be the highly workable, optimum mixtures. Finally, the fiber content and the type of fibers that have been used in the scope of this research did not decrease the workability of concrete having a high viscosity.

1.GİRİŞ

Kendiliğinden yerleşen betonlar vibrasyona gerek duymadan istenilen yere yerleşebilen, yüksek işlenebilirliğe sahip, terleme ve segregasyon probleminin yaşanmadığı, homojenliği yüksek betonlardır. Akıcı kıvamda olan, gürültü kirliliğini engelleyen, daha az işçilik gerektiren, ekonomik ve segregasyon olmaksızın sık donatılar arasından akabilen, her türlü kalıba yerleşebilen bu betonlar, aynı zamanda kendi ağırlığının etkisi ile boşlukları minimuma indirerek yerleşme sağladığı için dürabilitesi yüksek olan ve kararlı bir tekniğe sahip betonlardır [1].

Mikrofiller malzemelerin betonda kullanılması günümüzde yaygın bir uygulamadır. Bu durum 125 mikrondan daha ince olacak şekilde ince öğütülmüş malzeme içeren yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen betonların gelişmesine katkıda bulunmaktadır. Mikrofiller malzeme olarak genellikle silis unu ve uçucu kül tercih edilmektedir. Yapılan çalışmalar bu malzemelerin beton hem reolojik özelliklerini hem de basınç dayanımını olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Mikrofiller malzemelerin artışıyla birlikte iri agregalar arasındaki mesafe artmakta ve içsel sürtünme azalmaktadır. İri agregaların bloke olmalarının önüne geçilmesi ile betonun akıcılığı artmakta ve reolojik özellikler olumlu yönde etkilenmektedir. Bu tezin de konusunu oluşturan ve işlenebilirlikteki gelişmeye ek olarak gerçekleşen basınç dayanımı artışı ise halen incelenmekte olan bir çalışma konusudur. İç yapıdaki yoğunlaşmadan kaynaklandığı düşünülen bu davranışı incelemek amacı ile Kassel Üniversitesi'nde R. Bornemann ve M. Schmidt tarafından yapılan bir çalışmada, 0,44 sabit hacimsel su/pudra oranında, su/çimento oranı 0,20' den 0,38' e kadar arttırılmış olmasına rağmen ve çimento dozajı 900 kg/m^3 değerinden 470 kg/m^3 değerine kadar azaltılmasına rağmen basınç dayanımının aynı seviyede kaldığı görülmüştür. Kassel Üniversitesi'nde geliştirilen hacimsel su/pudra oranı yöntemi, bağlayıcı maddenin etkin kullanımını sağlamakla birlikte optimizasyon kavramını da geliştirerek iç yapı ile ilgili yeni araştırma konuları yaratmaktadır [2].

Çelik lifler betonda mekanik özellikleri iyileştirmek amacı ile kullanılmaktadır. Oluşan çatlakların ani olarak yayılmasını engelleyerek betonun sünek davranış göstermesini sağlayan lifler, yüksek deformasyon değerlerinde dahi betonun yük taşıyabilmesini sağlamakta ve enerji yutma kapasitelerini arttırmaktadır. Çelik liflerden beklenen performans lif boyu, lif narinlik oranı ve lif geometrisine bağlı olmakla birlikte lif dayanımından ve lif-matris aderansından da önemli derecede

etkilenmektedir. Kullanılan bağlayıcı miktarının artmasıyla birlikte artan lif-matris aderansı göçme davranışını değiştirmekte ve davranışın lif sıyrılmasından çok daha az enerji yutan lif kopması ile gerçekleşmesine neden olmaktadır. Kullanılan lifin dayanımının artması ise yeterli aderans sağlandığı takdirde sıyrılma ile gerçekleşen göçme davranışını düşük dayanımlı liflerin kullanıldığı duruma göre arttırmakta ve daha fazla enerji yutulmasına izin vermektedir [2].

Bu tez çalışması kapsamında 0.51 sabit hacimsel su/pudra oranına sahip 3 farklı karışım üretilmiştir. Bu karışımlarda çimento ile aynı inceliğe sahip olacak şekilde $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ blaine değerine kadar öğütülmüş silis unu çimento ile hacimce ikame edilerek kullanılmıştır. 900 kg/m^3 , 650 kg/m^3 ve 350 kg/m^3 çimento dozajına sahip karışımlarda azalan çimento hacmi kadar öğütülmüş silis unu eklenmiş ve böylece toplam su miktarı değişmediği için su/ince malzeme oranı sabit tutulmuştur. Karışıma giren toplam su miktarının sabit tutulmasından dolayı azalan çimento dozajı ile birlikte su/çimento oranı arttırılmıştır. 900 kg/m^3 çimento dozajlı üretimlerde bu değer 0,22 iken 650 kg/m^3 dozajlı üretimlerde 0,33, 350 kg/m^3 dozajlı üretimlerde ise 0,61 değerine ulaşmıştır. Yürütülen deneysel çalışmalarda su/çimento oranının artmasına rağmen su/ince malzeme oranının mekanik özellikleri nasıl etkilediği, optimum değerlerin ve sınır değerlerin neler olduğu incelenmiştir. Daha sonra çelik lif katkısının ve çelik lif dayanımının, eğilme ve yarıma dayanımı ile enerji yutma yeteneğine etkisini incelemek amacı ile bütün özellikleri aynı olan, yalnızca çekme dayanımları farklı 2 tür lif 1m^3 betonda 40 kg olacak şekilde eklenerek davranışlar incelenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI ve GENEL BİLGİLER

Beton; belirli esaslara göre karışım oranları hesaplanan, çimento, agrega, su ve gerekiyorsa akışkanlaştırıcı ya da priz geciktirici gibi katkı maddelerinden oluşan bir karışımı, şekil ve boyutları bir amaca yönelik belirlenmiş kalıpların içine boşluksuz olarak yerleştirmek ve uygun bakım koşulları altında sertleştirmek sureti ile elde edilen, sınıfı basınç dayanımına bağlı olarak ifade edilen kompozit bir malzemedir [3,4].

Günümüze kadar olan gelişim sürecinin sonunda, ihtiyaçlara cevap verebilmek amacı ile farklı özelliklerde betonlar üretilmektedir. Özellikle son yıllarda, beton endüstrisindeki gelişmeler sonucunda çok yüksek dayanımlara ve kırılma enerjilerine erişilmiştir. Mekanik, fiziksel ve ekonomik özelliklerinin çeşitliliği dolayısı ile net bir sınıflandırma yapmak güç olsa da genel anlamda normal ve özel betonlar olmak üzere 2 ana başlık altında incelenmektedir.

2.1 Normal Betonlar

Normal betonlar, günümüzde yaygın olarak kullanılan genel amaçlı betonlardır. En önemli özellikleri, malzemesine kolay ulaşılabilmesi, özel nitelikler gerektirmeyen ve kolay elde edilebilen işgücü ile ekonomik ve standartlara göre seri üretim yapılabilmesidir.

Basınç dayanımları 20-50 MPa arasında değişen normal betonların sünek davranışı bu dayanımın artması ile azalmaktadır. Yüksek dayanımlı ve ultra yüksek dayanımlı betonlarla karşılaştırıldıklarında ise, normal betonların tek eksenli basınç ve çekme dayanımları ihmal edilebilecek kadar düşüktür. Bu özelliklere sahip normal betonlar bina, yol, köprü, tünel, baraj ve prefabrik yapı elemanları gibi, pek çok alanda kullanılırlar. Beton endüstrisinin gelişmesiyle, her ne kadar üstün niteliklere sahip betonlar üretilse de, normal betonların uygulamada her zaman yeri mevcuttur.

2.2 Özel Betonlar

Normal betonların basınç dayanımı, süneklik, yoğunluk, düşük geçirimsizlik, dürabilite, sınırlı rötre, kimyasal etkilere karşı dayanıklılık gibi özelliklerinin bir

amaca yönelik olarak iyileştirilmesi ve geliştirilmesi ile oluşturulan, normal, hafif, ya da ağır betonlardır.

Beton kompozitinin içerisindeki en kritik yerler, çimento hamuru ile agrega tanelerinin temas yüzeyleridir. Bu yüzeylerde gerekli aderansın sağlanması, istenilen performansın elde edilebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Silis dumanı gibi ultra ince tanecikler beton üretiminde kullanıldığında, boşlukları doldurmakta ve yoğunluğu arttırmaktadır. Böylece geçirimsizlik azaltılır, dürabilite iyileştirilir ve dayanım yükseltilir. Silis dumanının performansı artırıcı etkisinin oluşabilmesi için ise beton içerisinde dağıtılması gerekir ve bu da süperakışkanlaştırıcılar ile sağlanır. Betonun sünekliği ise betona katılan kısa kesilmiş liflerle sağlanır [5]. Özel betonları kendi içinde bazı sınıflara ayırmak mümkündür;

- Yük taşıma kapasiteleri ve enerji yutma kapasitelerine göre,
- Özel üretim teknikleri ve sürecine göre,

2.2.1 Yük taşıma kapasiteleri ve enerji yutma kapasitelerine göre

2.2.1.1 Yüksek dayanımlı betonlar

Yüksek dayanımlı betonlar, gelişen beton endüstrisine paralel olarak ortaya çıkan yeni tekniklerin uygulanması ve bazı farklı malzemelerin kompozit yapının oluşturulmasında kullanılması ile meydana gelen, normal betonlardan daha üstün iç yapı ve mekanik davranışa sahip betonlardır.

Küp basınç dayanımı 60–115, silindir basınç dayanımı 50–100 MPa arasında değişen betonlar, günümüz standartlarına göre yüksek dayanımlı betonlar sınıfını oluştururlar. Silis dumanı, silis unu, yüksek mukavemetli çimento ve süperakışkanlaştırıcı kullanımı ile yüksek dayanımlı betonlardan daha iyi performans elde edilir. Özellikle silis dumanının, işlenebilirliği arttıran akışkanlaştırıcılarla birlikte kullanılması, çimento hamurunda sıkı bir diziliş oluşmasını sağlayarak üstün bir performans elde edilmesini neden olur.

Yüksek dayanımlı betonların kullanım alanları, normal betonlar kadar geniş olmamakla birlikte, çok yüksek yapılarda, açık deniz platformlarında, köprülerde, ön gerilmeli prefabrike elemanlarda kullanılırlar [6].

2.2.1.2 Çok yüksek dayanımlı betonlar

Son yirmi yıllık süreç içerisinde yapılan çalışmalara ve gelişen üretim tekniklerine paralel olarak ileri çimento esaslı malzemeler üretilmiştir. Bunlardan başlıcaları; büyük boşluklarından arındırılmış (MDF) çimento, içinde ultra incelikteki taneleri

homojen olarak bulunduran yoğunlaştırılmış sistemler (DSP), ilk olarak Fransa’da geliştirilen çok yüksek dayanıma ve sünek bir yapıya sahip Reaktif Pudra Betonları ile çok yüksek lif içeriğine sahip SIFCON’dur [5].

Büyük boşluklardan arınmış (MDF) polimer hamurlar

MDF çimentolu malzemeler, Portland veya Yüksek Alüminli çimentoların suda çözünen bir polimer ile birleştirilmesi ile oluşturulan kompozitlerdir [5]. Bu malzemelerin üretimindeki temel ilke, çimento hamurunun yoğunluğunun dolayısı ile dayanımının arttırılmasıdır. Suda çözünen polimerlerin kullanılmasının amacı çimento tanelerinin topaklanmasını önlemek ve düşük su/çimento oranında karışımın viskozitesini arttırmaktır. Yerleşme ve sertleşme sırasında çimento hidrate olurken, polimerler dehidrate olarak çimento taneciklerinin hareketini kolaylaştırırlar. Malzemenin boşluk oranı da azalarak dayanımı artar [6].

Yoğunlaştırılmış çimento ve ultra ince tane içeren malzemeler (DSP)

İlk kez Danimarka’da Aalborg Portland çimento tarafından üretilen DSP malzemeler, silis dumanı, yüksek miktarda süperakışkanlaştırıcı, 16 mm’lik kırılmış granit agregası ya da yüksek sertlikteki agregalar (kalsine boksit) içeren yoğun taneli matris betonlarıdır. Tane büyüklüklerinin optimizasyonu ve ultra incelikteki silis dumanının çimento taneleri arasındaki boşluklara homojen olarak dağıtılması ile yoğunluğu ve dayanımı yüksek bir malzeme üretilir. Karıştırma ve döküm sırasında, çimento ile silis dumanının topaklanması yüksek miktarda süperakışkanlaştırıcıların kullanılması ile engellenir. Normal DSP’nin basınç dayanımı 130 MPa iken dayanımı yüksek agregaların kullanılması ile 270 MPa değerine ulaşılabilme mümkündür. Fakat bu agregaların pahalı olması nedeni ile DSP harcının kullanımı sınırlıdır [5,6].

2.2.1.3 Ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozit malzemeler (RPC)

1990’lı yılların başlarında Fransa’da geliştirilen Reaktif Pudra Betonu, yüksek dayanımlı, az boşluklu, çok düşük geçirimsiliği olan, mükemmel sünekliğe ve çok yüksek kırılma enerjisine sahip ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozit malzemelerdir. Basınç dayanımları 200 ile 800 MPa arasında, çekme dayanımları 25 ile 150 MPa arasında, kırılma enerjileri 1200 J/m² ile 40000 J/m² arasında ve birim ağırlıkları da 2500–3000 kg/m³ arasında değişen yeni kuşak betonları oluşturmaktadırlar [5].

Çimento, ince kum, silis dumanı, çelik lif ve süperakışkanlaştırıcıların kullanılmasıyla üretilirler. Üretimin ardından ortam sıcaklığında uygulanan küre ilave olarak ısıtılma tabii tutulurlar. Su/çimento oranı 0.15 mertebesinde olmasına

rağmen, kullanılan süper akışkanlaştırıcı miktarının önemli ölçüde artırılması ile karıştırma, dökme ve vibrasyon işlemleri normal betonlarda olduğu gibi yapılabilir. Kullanılan iri agregaların dane çapı küçüktür ve granülometri eğrileri süreksizdir. Karışımında ve üretiminde özel prensipleri olan bu malzeme çeliğin alternatifi olabilecek bir malzemedir. Üstün fiziksel ve mekanik özellikleri nedeni ile askeri yapılarda ve nükleer atıkların saklanması için kullanılabilirler [6].

2.2.1.4 Çimento hamuru enjekte edilmiş lif donatılı beton (SIFCON)

Çeşitli teknikler kullanılarak üretilen ve yüksek performansa sahip, çimento esaslı kompozit malzemelerde karşılaşılan en önemli problem, bu malzemelerin sünek olmayan bir davranış göstermeleridir. Dayanımları yüksek olmasına karşın, elastik şekil değiştirme sınırının aşılmasından sonra önemli bir şekil değiştirme yapmadan kırılmaktadırlar. Bu davranışın önüne geçebilmek için lifli betonların üretilmesi yoluna gidilmiştir. Bununla beraber günümüzde kullanılan lif donatılı betonlarda karıştırma ve yerleştirme tekniklerinin sınırlayıcı etkisinden dolayı lif hacminde maksimum %2 değerine ulaşılmıştır. Bu hususlar göz önüne alınarak, yüksek miktarda lif kullanılmasına izin veren teknikler ve malzeme bileşimleri araştırılmış, sonucunda da ilk olarak 1979 yılında Dr. David Lankard tarafından SIFCON üretilmiştir.

SIFCON, çelik liflerden yararlanılarak elde edilen, çimento esaslı kompozit bir malzemedir. Ana bileşenlerini çelik lifler ve çimento esaslı hamur oluşturmaktadır. Lif oranı hacimce %5 ile %20 arasında değişen bu malzemenin hamuru, yalnızca çimento, çimento ile birlikte kum ya da çimento ile birlikte diğer katkı maddelerinden oluşmaktadır. Genellikle düşük su/çimento oranına sahip olduğu için akışkanlığı arttıran katkı maddeleri de kullanılmaktadır [7].

SIFCON üretiminde kullanılan çelik lifler, üretilen diğer lif donatılı betonlarda kullanılan çelik liflerin aynısıdır ve genellikle çekme tellerden ya da ince çelik plaklardan üretilir. Değişik uzunluklarda, çaplarda ya da şekillerde olabilirler. Lif uzunluğu genellikle 30mm ile 60 mm arasında değişirken lif narinlik oranı 60 ile 100 arasında değişim göstermektedir. Şekil olarak kanca uçlu, yüzeyi deforme olmuş, dalgalı, düz, geniş uçlu gibi farklı şekilleri mevcuttur. Liflerin sahip olduğu bu şekiller, çimento hamuru ile liflerin aderansında önemli rol oynadığı gibi üretilen malzemede ulaşılabilen maksimum lif hacminde de belirleyici unsurdurlar. Öyle ki, kanca uçlu ya da yüzeyi deforme olmuş lifler söz konusu olduğunda aderansın kuvvetli oluşundan dolayı dayanım artmakta, düz lifler söz konusu olduğunda da kullanılabilen maksimum lif miktarı artmaktadır. Yapılan araştırmalar lif hacim oranının %9 ile %11 arasında olması durumunda maksimum gerilme değerlerine ulaşıldığını göstermektedir [7,8].

SIFCON' un matris bileşimi incelendiğinde iri agrega içermediğı görölmektedir. Genel olarak çimento, çimento-uçucu kül, çimento-silis dumanı, çimento-kum-uçucu kül, ve çimentoda-kum-silis dumanı gibi bileşimlere sahiptir. İnce ve uniform olarak derecelendirilmiş kum kullanılmaktadır. Daha az boşluklu bir yapı elde etmek için düşürölen su-çimento oranında akışkanlığı arttırmak için akışkanlaştırıcılar kullanılmaktadır. Tavsiye edilen su/çimento oranı 0.3 ile 0.4 arasında değışmekte iken çimentonun kuma oranı 1:2 ile sınırlandırılmıştır. Mikrosilis kullanılması durumunda tavsiye edilen dozaj, mikrosilisin ağırlığının çimento ağırlığının %10'u kadar olmasıdır. Uçucu kül kullanılması söz konusu ise tavsiye edilen dozaj yine çimento ağırlığının %10'u kadardır. Farklı olarak, kullanılacak akışkanlaştırıcının miktarı akışkanlaştırıcının özelliklerine göre değışmektedir [7,8].

2.2.2 Özel üretim teknikleri ve sürecine göre

Üretim süreci ve özellikleri açısından normal betonlardan önemli derecede farklılık gösteren betonlardır. Pompa betonlarını, püskürtme betonlarını, prefabrikasyon betonlarını, vakum betonlarını ve bu tezin de çalışma konusunu oluşturan kendiliğinden yerleşen çelik lifli betonları bu grubun içersine dahil etmek mümkündür [9].

2.2.2.1 Kendiliğinden yerleşen çelik lifli betonlar

Kendiliğinden yerleşen betonlar, vibrasyona gerek duymadan tamamen kendi ağırlığının etkisi ile istenilen yere kolaylıkla yerleşebilen, yüksek işlenebilirlik ve yeterli viskozite sayesinde terleme ve ayrışma gibi sakıncalar göstermeyen, süperakışkanlaştırıcıların kullanılması ile iyi bir sıkışmanın sağlanabildiğı, homojenliğı yüksek betonlardır [1].

Son yıllarda genellikle yüksek dayanımlı, gelişmiş dürabilite özelliklerine sahip, çeşitli özellikleri ile normal betonlardan ayrılan yüksek performanslı beton türleri geliştirilmiştir. Bu çalışmaların ışığında da yalnızca yüksek basınç dayanımının elde edilmesi hedeflenmemiş, yüksek performansın anlamı gerekli ve belirlenen ihtiyaçlara cevap verebilmek için beton bileşiminin düzenlenmesi şekline dönüşmüştür. Bu kavramın paralelinde belirli bir basınç dayanımının elde edilmesi, kendiliğinden yerleşebilme ve işlenebilirlik, çelik liflerle optimum donatılandırmanın 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 olduğı kadar düşük maliyetlerle ulaşılması şekline dönüşmüştür [1].

1983 yılından başlayan süreçte, betonarme yapıların dürabilite problemi Japonya'da büyük bir ilgi ile karşılanan başlıca konu olmuş ve hatta Japonya inşaat sektörünün karşılaştığı ana problemi oluşturmuştur. Bilindiği gibi dürabilitesi yüksek betonarme yapıların elde edilmesinde ihtiyaç duyulan en önemli unsur, çalışanlar tarafından beton dökümü sırasında yeterli sıkıştırmanın sağlanabilmesidir. Fakat Japonya'da bu işi başarıyla yapanların sayısının zamanla azalması ile yapı işlerindeki kalite de azalmış ve yapının d rabilitesinin garanti edilebilmesi açısından kendiliğinden yerleşen betonlara duyulan gereksinim artmıştır. Başlangıçta yeni bir beton yaratmanın mümkün olduğu ve bunun aslında çok zor olmayacağı düşünülüyordu. Çünkü su altında dökülebilen ve işlevini başarı ile gerçekleştirebilen su altı betonları mevcuttu ve bu betonlarda segregasyon problemi suda çözülebilen polimer esaslı katkıların kullanılması ile engellenmişti. Fakat bu betonlar hava ile temasta olan yapılarda, hava balonlarının yüksek viskoziteden dolayı ortadan kaldırılamaması ve donatı ile çevrilmiş yapı elemanlarında sıkıştırmanın çok zor olması nedeni ile kullanılamıyordu. Betonun işlenebilirliğini incelemek amacı ile yapılan deneylerde, dar kesitlerden akış sırasında iri agregaların birbirleri ile temasından kaynaklanan tıkanmalar gözlemlenmiş ve aynı zamanda iri agregalar arasındaki bağıl konumun değişiminden dolayı hamur içinde kayma gerilmelerinin oluştuğu g r lm ştur. Hamurun su/ imento oranına önemli derecede bağlı olan kayma gerilmelerini azaltmak amacı ile su/ imento oranının optimum değerlerini belirleyerek ve viskozitede uyumlu bir azalmayı s perplastikleştiricilerin kullanımı ile gerçekleştirerek kendiliğinden yerleşen betonların üretiminde önemli bir mesafe alınmıştır. İri agregaların birbirleri ile temasından kaynaklanan blokaj problemi, iri agregaların toplam katı hacme olan oranının kısıtlanması ile aşılmış ve hamurun deformasyon yeteneğini azaltan ince agrega miktarının da sınırlanması ile kendiliğinden yerleşen betonların üretim teknikleri oluşturulmuştur. Bu çalışmalara paralel olarak, üretilen betonların deneyleri için yeni yöntemler oluşturulmaya çalışılmıştır. Kendiliğinden yerleşen betonlar için kullanılan özel deney yöntemleri literatür çalışmasında daha detaylı olarak anlatılacaktır [10].

Uygun karışım tasarımıının elde edilmesinde, şantiye alanına götürülmesi ve burada işlenmesi sırasında, tasarım ve yapım kalitesinin elde edilmesi anlamında özel bilgiler gerektiren kendiliğinden yerleşen betonların ana bileşenleri, sıkıştırmaya ihtiyaç duyan normal betonların ana bileşenleri ile aynıdır. Asıl belirleyici olan unsur yeterli harç bileşimidir. Bu bileşim  imento, su, ince agrega, kireçtaşı pudrası gibi doldurucu özellik gösteren malzemeler ile uçucu kül ve silis dumanı gibi puzolanik özellik gösteren malzemelerden oluşmaktadır. Tüm bunlara ek olarak viskozitede önemli bir azalmaya neden olmadan akışkanlığı arttıran s perkışkanlaştırıcılar da karışımlarda belirleyici özelliğe sahip önemli bileşenlerdir. Karışım tasarımında

hedeflenen asıl amaç ayrışma, terleme ve topaklanma gibi eğilimler oluşmadan mümkün olan en yüksek akışkanlığa sahip betonu elde edebilmektir. Genel olarak su/pudra oranının kontrol edilmesi, akışkanlığı etkin bir şekilde artırma özelliğine sahip katkıların kullanılması ve kullanılan iri agreganın sınırlı tutulması ile segregasyon direnci ve akışkanlık gibi gereksinimlerin elde edildiği kendiliğinden yerleşen betonlarda, gerekli ve yeterli karışım oranlarını belirlemek amacı ile bir çok adım takip edilmektedir. 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. Bu oranın pudra olarak belirtilen çimento, uçucu kül, silis dumanı, kireçtaşı pudrası ve 0.125mm elek çapına sahip malzemelerin özelliklerine de bağlı olduğu unutulmaması gereken bir unsurdur. Akışkanlaştırıcıların miktarı ise harç huni testi yapılarak kabaca belirlenebilmektedir. Katkı miktarlarının beton içindeki etkinliği karışım faktörünün etkisinden dolayı harç fazındaki etkinliğine göre farklılık göstermektedir. Bu nedenle Okamura ve Ozawa yeterli katkı dozajına taze beton üzerinde yapılan yayılma deneyleri ile karar verilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Kendiliğinden yerleşen betonların akış karakterleri, kullanılan malzemelerden önemli derecede etkilendiği için karışım özelliklerinin değişme riski oldukça fazla olmaktadır. Malzemelerin işleme sokulması sırasında oluşacak değişiklikler ve dozajlarda yapılacak hatalar bu tür sonuçların oluşmasında en önemli unsuru oluşturduğu için efektif bir üretim programı oluşturulması hassasiyet kazanmaktadır [1].

Vibrasyon yapılmadığı için gürültü kirliliğini engelleyen kendiliğinden yerleşen betonlar, kalıba daha kolay ve kısa zamanda yerleştiği için işçilik, ekipman ve zaman açısından büyük üstünlükler sağlayan homojen betonlardır. Segregasyonun engellendiği ve çalışanların performansına bağlı olan sıkıştırmanın yapılmadığı dürabilitesi yüksek olan bu betonlar, dar kesitli, sık donatılı karmaşık yapılarda dahi üniform bir beton üretimine olanak sağlamaktadır. İnce malzeme oranı normal betonlara göre daha fazla olduğu için gereksinim duyduğu su miktarı da fazla olmaktadır. Dayanım, dayanıklılık ve kompoziteyi olumsuz etkileyen bu problemi çözebilmek amacı ile süperakışkanlaştırıcılar kullanılmakta ve böylece su/çimento oranı azaltılarak dayanımı yüksek, geçirimsizlik yeteneği azalan boşluk oranından

dolayı fazla, her türlü dış etkilere karşı direnci yüksek, kohezyonlu betonlar üretilmektedir. Bu olumlu özelliklerinden dolayı özellikle son birkaç yılda kendiliğinden yerleşen betonların kullanımının arttığı görülmektedir. Japonya’ da Akashi-Kaikyo Köprüsü’nün ankraji, Osaka petrol şirketinin LNG tankı, Fransa’da Cleuson Dixence projesi, İsviçre’de yürütülen bir demiryolu projesinin Loetschberg temel tüneli ve Viyana’da Milenyum Kulesi göze çarpan en önemli örneklerdir. Osaka petrol şirketinin LNG tanklarında kendiliğinden yerleşen beton kullanılması ile asansör sayısının %25 azaldığı, beton dökümü ile uğraşan çalışan sayısının yaklaşık %60 civarında azaldığı, yapım süresinin ise %17 civarında azaldığı belirtilirken, Akashi-Kaikyo Köprüsü’nde ankraj yapım periyodunun %20 azaldığı, İsveç’te yapılan karayolu köprülerinde ise verimliliğin %60 oranında arttığı görülmüştür. Bütün bu unsurlar göz önüne alındığında, çok akıcı kıvamda olup şantiyede su katılma riskini ortadan kaldıran, segregasyona uğramadan sık donatılar arasından akarak her türlü kalıba yerleşebilen, gürültü kirliliğinin engellendiği ve tesviye işlemi de dahil olmak üzere daha az işçilik gerektiren ekonomik, dürabilitesi yüksek ve homojenliği nedeni ile güvenilir olan kendiliğinden yerleşen betonlar gelecek vaat eden ürünler olarak gelişmekte ve bir süre sonra da özel beton olmaktan çıkıp standart beton olma yolunda bir gelişim sergilemektedir [1, 11].

Kendiliğinden yerleşen betonlar bir çok ekonomik ve teknik faydalar sağlarken, çelik liflerin kullanılması bu faydaların elde edilmesini kolaylaştırmaktadır. Çelik lifler mevcut çatlaklarda köprü kurarak çatlak gelişimini yavaşlatan ve geciktirme görevini üstlenen bileşenlerdir. Çatlak oluşumunu da zorlaştıran bu lifler kendiliğinden yerleşen betonların uygulama alanlarını da genişletmektedir. Betonun kolaylıkla yerleştirilebilirliğinin ve sıkıştırılabilirliğinin bir ölçüsü olmakla birlikte akışkanlık, kohezyon, ayrışma, terleme, kararlılık, minimum enerji gibi kavramları bünyesinde barındıran işlenebilirlik özelliği, liflerin kullanılmasından önemli derecede etkilenmektedir. Farklı malzemelerden farklı şekillerde üretilen lifler uzun bir şekle sahip olmakla beraber aynı hacimdeki agregalara kıyasla daha fazla özgül yüzeye sahiptirler. İşlenebilirliği azaltan bu özgül yüzeyin etki derecesi matris içerisinde kullanılan miktarına ve tipine göre değişmektedir. Lif içeriği arttıkça uniform dağılımı elde etmek zorlaşmakta ve azalan işlenebilirliğin sonucunda liflerden elde edilen fayda 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 ve kritik lif oranına daha az lif içeriği ile ulaşıldığı görülmüştür. Bilindiği gibi toplam agrega içindeki ince agrega miktarının artması ve iri agrega miktarının azalması ile işlenebilirlik olumlu yönde değişmekte ve lif içeriğinin arttırılmasına olanak

sağlamaktadır. Beton içinde kullanılan liflerin etki mekanizmaları ve çalışma ilkeleri literatür çalışması içinde daha ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

Lund Teknoloji Enstitüsü'nde Bertil Perrson tarafından yapılan bir araştırmada kendiliğinden yerleşen betonların dayanım, elastisite modülü, sünme ve büzülme davranışları normal betonlarla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmada su/bağlayıcı oranı 0.24 ile 0.80 arasında değişen ve yarısı normal beton kaynaklı olan 8 farklı karışım incelenmiştir. Basınç dayanımları ile elastisite modülünün değişimini veren grafikleri elde ederek, basınç dayanımlarının sabit tutulduğu durumlarda normal betonlarla kendiliğinden yerleşen betonların elastisite modüllerinin benzer olduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde porozite ile yakından ilgili olan büzülme davranışları arasında da sadece çok küçük farklar olduğunu vurgulayarak, sünme değerlerinin birbirine yakın olduğunu göstermiştir [11].

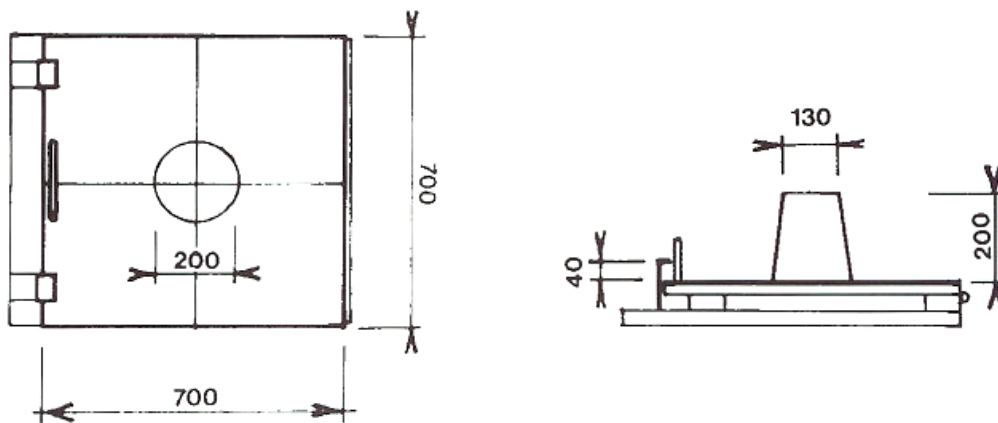
S. Gürünwald ve J.C. Walraven kendiliğinden yerleşen çelik lifli betonların taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini incelemek amacı ile geniş bir çalışma yapmışlardır. Taze beton özellikleri üzerinde çelik lif tipi ve içeriğinin etkisini belirlemek üzere yapılan bir parametre çalışması ile başlayan 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 oluşuktan sonra yük taşıma kapasitesinin arttığı, kırılma enerjilerindeki standart sapmanın da normal lifli betonlara göre daha düşük olduğu vurgulanmıştır [1].

Günümüzde sık donatılı, dar kesitli ve sıkıştırmanın zor olduğu betonarme yapılarda, detay içeren karmaşık şekilli kalıplarda, kiriş, kolon ve döşemelerde, prefabrike betonlarda, çok yüksek ve kompleks formdaki perdelerde kullanılan kendiliğinden yerleşen betonların özelliklerini belirleyebilmek için değişik test yöntemleri geliştirilmiştir. Henüz tam olarak standartlaşmış olmasa da kullanılmakta olan deneyler ve uygulama şekilleri tanımlanarak KYB üretiminde belirleyici karakteristikler elde edilmiştir. Kendiliğinden yerleşen çelik lifli betonlarda aynı deneyler uygulanmaktadır.

2.2.2.2 Deney yöntemleri

Çökme-yayılma testi

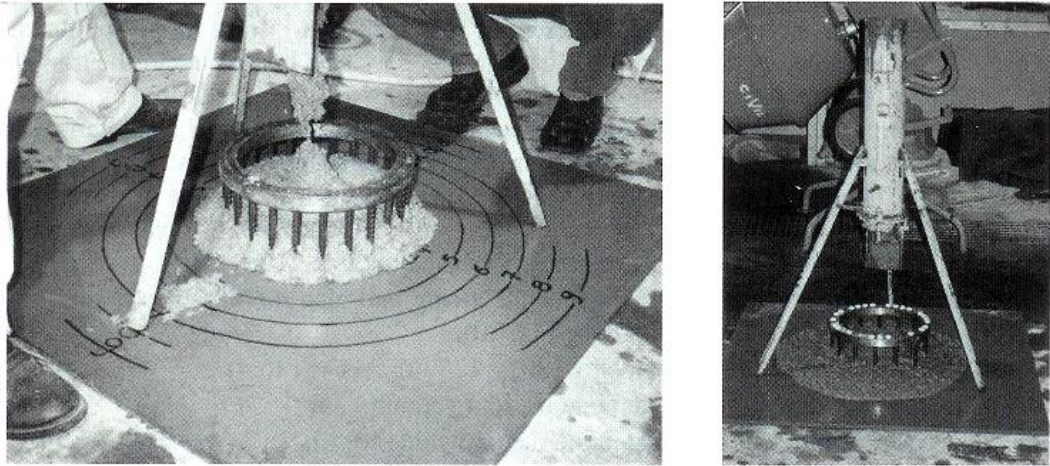
Uygulanması oldukça kolay olmasına rağmen iki kişiye ihtiyaç duyulan bu deney ilk defa Japonya’da su altı betonlarının incelenmesi için geliştirilmiştir. Üretilen betonun akıcılık ve yayılma yeteneklerinin belirlenmesinde kullanılan bu deney yöntemi, kendiliğinden yerleşen betonlar için de uygulanmaktadır. Hiçbir engelin bulunmadığı durumda, betonun kendi ağırlığı altında serbest olarak deforme olabilme yeteneğini incelemek amacı ile kullanılmaktadır. Gerçek durumda ise donatılar mevcut olduğu için beton serbest olarak deforme olamamaktadır. Bu nedenle tıkanma olasılığı hakkında bilgi vermese de segregasyona karşı direncin belirlenmesi amacı ile veri elde etmek mümkündür. Abram’s konisinden ve yayılma tablasından oluşan bu deney düzeneğinde, 20cm ve 50cm çaplı iki daire yayılma tablası üzerinde çizili olarak bulunmaktadır. Tamamen düz bir yüzeye yerleştirilen yayılma tablasının yüzeyi nemlendirildikten sonra merkezine Abram’s konisi yerleştirilir ve yaklaşık 5.5 litre beton ile doldurulur. Daha sonra koni tablaya dik olarak çekilir ve 50cm çapındaki daireye yayılma süresi belirlenir. Yayılma tamamen durduktan sonra birbirine dik iki yönde çap ölçülerek yayılma çapı hesaplanır. T_{50} süresi ve yayılma çapı betonun akıcılığı hakkında bilgi verirken, gözlem yapılarak segregasyon hakkında bilgi sahibi olmak da mümkündür. İri agregaların çap boyunca dağılmaması ya da çimento hamurunun bir şerit şeklinde agregalardan ayrılması segregasyon olduğuna işaret etmektedir [12]. Şekil 2.1’ de çökme-yayılma testi deney düzeneği yer almaktadır.



Şekil 2.1: Çökme-Yayılma Testi Deney Düzeneği [12].

J-Halkası testi

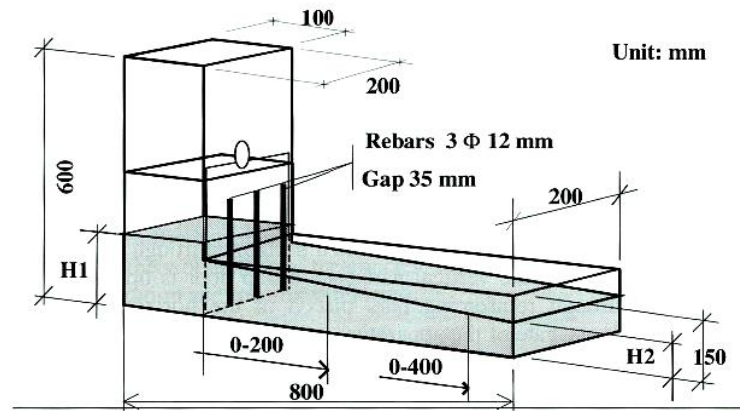
J-Ring testi Japonya orijinli bir test olup referans anlamında tam olarak bir bilgi mevcut değildir. Orijinal formu Paisley Üniversitesi ACM Merkezi'nde geliştirilen J-Ring testi, KYB' nin geçiş yeteneğini ve bloklanma davranışını belirleyebilmek için tasarlanmıştır. Bu deney aleti, yayılma tablası, yayılma tablasının merkezine yerleştirilen ve açıklıkları üretilen betonun özelliklerine göre değişen donatılardan oluşmuş bir halka ile Abram's konisinden oluşmaktadır. Gerçek durumdaki donatıları temsil eden bu halkanın çapı 300mm ve donatı yüksekliği 100mm'dir. Bu deneyin uygulanması sırasında, yayılma tablasının tamamen yatay olarak yerleştirildiğinden emin olunmalı ve kullanılan her aparatın temiz ve yüzeyleri nemlendirilmiş olmalıdır. Daha sonra J-Ring yayılma tablasının üzerine sabit bir şekilde yerleştirilir ve içersine konulan Abram's konisi yaklaşık 5.5 litre beton ile doldurulur. Ardından koni sabit bir hızla dikey olarak çekilerek betonun tabla üzerinden akması sağlanır. Donatılar arasından geçen betonun yayılması tamamlandıktan sonra birbirine dik iki yönde çap ölçülerek ortalaması alınır. Bu sırada süre de ölçülebilirse, davranış hakkında bilgi vermesi açısından yararlı olur. Bununla birlikte halka içinde kalan betonun yüksekliği ile halka dışındaki betonun yüksekliği 4 farklı noktadan ölçülür ve yükseklikler arasındaki fark incelenerek betonun donatılar arasından geçiş yeteneği hakkında bilgi sahibi olunur [12]. Şekil 2.2' de J-Halkası testi deney düzeneği yer almaktadır.



Şekil 2.2: J-Halkası Testi Deney Düzeneği [12].

L-Kutusu testi

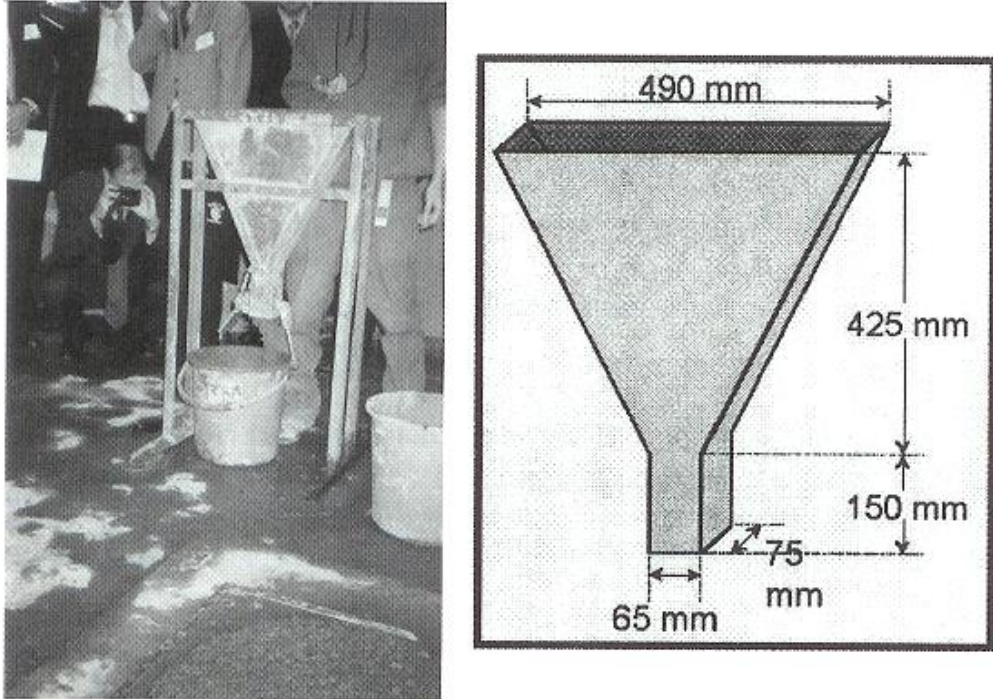
Bu deney düzeneği, ilk olarak Japonya’da M. Sonebi tarafından su altı betonlarının akış kabiliyetlerini değerlendirmek için tasarlanmış olan L-Flow isimli deney düzeneği esas alınarak oluşturulmuştur. Ö. Petersson tarafından geliştirilen bu sistem ile betonun akıcılığını ve tıkanma riskini değerlendirmek mümkün olmaktadır. L-Box deney düzeneği yatay ve dikey olmak üzere iki hazneden meydana gelmektedir. Dikey haznenin sonunda gerçek durumdaki donatıları simgeleyen donatılar bulunmaktadır. Bu donatıların açıklıkları kullanılan maksimum agrega boyutuna ve lif boyutuna göre değişmektedir. Dikey haznenin sonunda bir de kapak bulunmaktadır. Bu kapak aracılığı ile betonun akışına izin verilmekte ve donatılar arasından akması sağlanmaktadır. Ahşap ya da çelik malzemeden yapılması mümkün olan bu deney düzeneği henüz tam olarak standartlaşmamıştır. Deneye başlamadan önce düzeneğin iç yüzeyleri yağlanır, nemlendirilir ve dikey haznenin ucundaki kapak kapatılır. Yaklaşık 13 litre hacmindeki beton dikey hazneye yerleştirilerek 1 dakika süre ile bekletilir. Bu gecikmenin amacı betonun oturmasına izin vermek ve şayet varsa belirgin bir segregasyonu gözlemlemektir. Herhangi bir şekilde sıkıştırma enerjisi uygulanmadan dikey hazneye doldurulmuş olan beton, kapağın kaldırılması ile yatay haznede bulunan donatılar arasından geçerek akmaya başlar. Kapağın kaldırılmasından sonra kapak önünden itibaren 200mm ve 400mm mesafeye akış için geçen süreler ölçülür. Akış tamamlandıktan sonra her iki uçtaki beton yükseklikleri ölçülerek birbirine oranlanır. Bloklanma oranı olarak bilinen bu değer, T_{20} ve T_{40} değerleri ile birlikte tıkanma olasılığı hakkında bilgi edinilmesini sağlar. Uygulayan kişinin tecrübesinin önem kazandığı bu deneyde geçiş yeteneği, ayrışma ve tıkanma olasılığı ile birlikte akış özellikleri hakkında da önemli verilere ulaşmak mümkün olmaktadır [12]. Şekil 2.3’ de L-Kutusu testi deney düzeneği yer almaktadır.



Şekil 2.3: L-Kutusu Testi Deney Düzeneği [12].

V-Hunisi testi

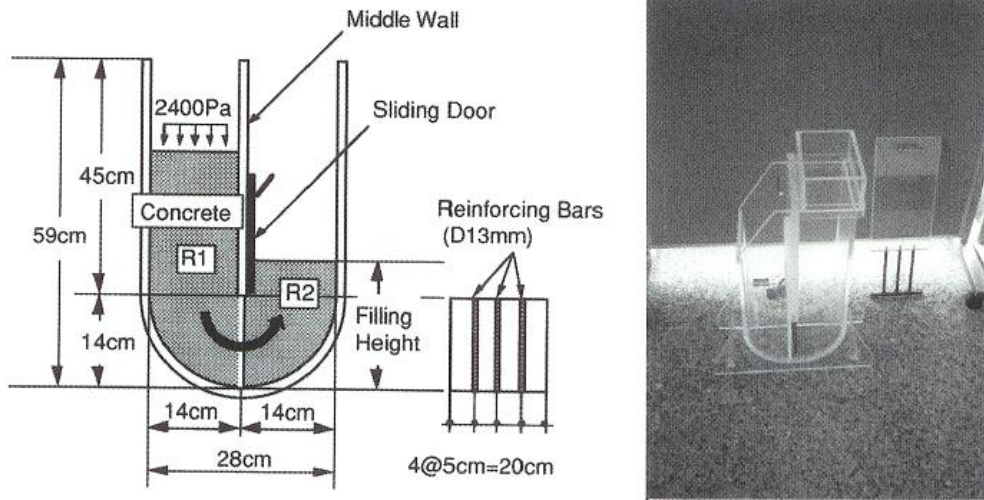
İlk olarak Japonya’da geliştirilen ve Ozawa tarafından kullanılan bu test düzeneği, KYB’ nin dar bir kesitten kendi ağırlığı altında geçiş yeteneğini incelemek amacı ile oluşturulmuştur. Akış hızının belirlenmesi ve gözlem yapılması sureti ile KYB’ nin viskozitesi hakkında bilgi veren bu deney yönteminde, belirli aralıklarla belirlenen akış sürelerinin kullanılması sonucu ayrışma direnci hakkında da bilgi edinilmektedir. Maksimum agreg a 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 [12]. Şekil 2.4’ de V-Hunisi testi deney düzeneği yer almaktadır.



Şekil 2.4: V-Hunisi Testi Deney Düzeneği [12].

U-Kutusu testi

Bu test düzeneği Japonya’da Taisei şirketinin teknoloji araştırma merkezinde geliştirilmiştir. Bu deney yöntemi, maksimum agrega boyutu 25mm’ den küçük olan su altı betonlarına ve kendiliğinden yerleşen betonlara, doldurma kapasitelerini ve akış yeteneklerini tayin etmek amacı ile uygulanmaktadır. U şeklindeki bu alet bir orta duvar ile iki hazneye ayrılmıştır. Bu orta duvar tabana kadar devam etmemektedir ve taban kısmında kayıcı bir kapak bulunmaktadır. Mevcut kapağın önünde ise gerçek durumu temsil eden, 13mm çapında ve 35mm net açıklığa sahip donatılar bulunmaktadır. Bu donatılar yerleştirildikten sonra kapak kapatılarak ilk hazneye yaklaşık 20 litre beton doldurulur. Bir dakika boyunca burada bekletilen beton, kapağın açılması ile birlikte diğer hazneye doğru akmaya başlar. Akış tamamlandıktan sonra iki haznedeki betonun yükseklikleri ölçülerek aradaki fark belirlenir. Elde edilen bu değer ile betonun doldurma yeteneği hakkında veri elde edilmektedir. Her iki haznedeki beton yükseklikleri 3 farklı noktadan ölçülür ve ortalama değerler kullanılarak yükseklik farkı hesaplanır. Bu farkın 30cm’ den küçük olması durumunda betonun doldurma yeteneğinin yeterli olduğu kabul edilmektedir [12]. Şekil 2.5’ de U-Kutusu testi deney düzeneği yer almaktadır.

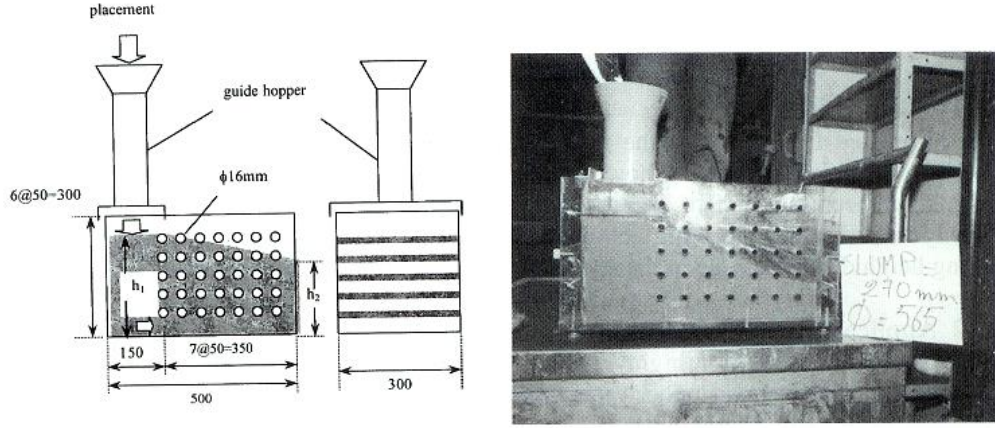


Şekil 2.5: U-Kutusu Testi Deney Düzeneği [12].

Simule edilmiş doldurma testi

İlk olarak Ozawa tarafından Japonya’da geliştirilen bu test metodu, taze haldeki KYB’ nin akış hareketinin gözlemlenmesini ve doldurma yeteneğinin belirlenmesini esas alarak tıkanma olasılığını incelemek amacı ile uygulanmaktadır. Maksimum agrega boyutu 25mm’ nin altında olan betonlara uygulanan bu deney yönteminde, yaklaşık olarak 38 litre betona ihtiyaç duyulmaktadır. Yatayda 7, düşeyde 5 sıra olmak üzere toplam 35 adet donatıdan oluşan sistemde, betonun yerleştirildiği

haznenin yüzeyleri şeffaf bir malzemeden yapılmaktadır. Belirli bir hız ile hazneye yerleştirilen betonun donatılar arasından akışı tamamlandıktan sonra iki farklı uçtaki beton yükseklikleri belirlenerek doldurma oranı hesaplanmaktadır. Böylece KYB' nin davranışı hakkında bilgi sahibi olunmaktadır [12]. Şekil 2.6' de simule edilmiş doldurma testi deney düzeneği yer almaktadır.



Şekil 2.6: Simule Edilmiş Doldurma Testi Deney Düzeneği [12].

2.3 Çelik Lif ve Silis Dumanı Kullanımının KYB' özelliklerine Etkisi

2.3.1 Çelik liflerin beton özelliklerine etkisi

Lif içeren kompozitler, ana faz olan çimento hamurunun içine betonun çeşitli mühendislik özelliklerini iyileştirmek için homojen olarak lif katılmasıyla elde edilirler.

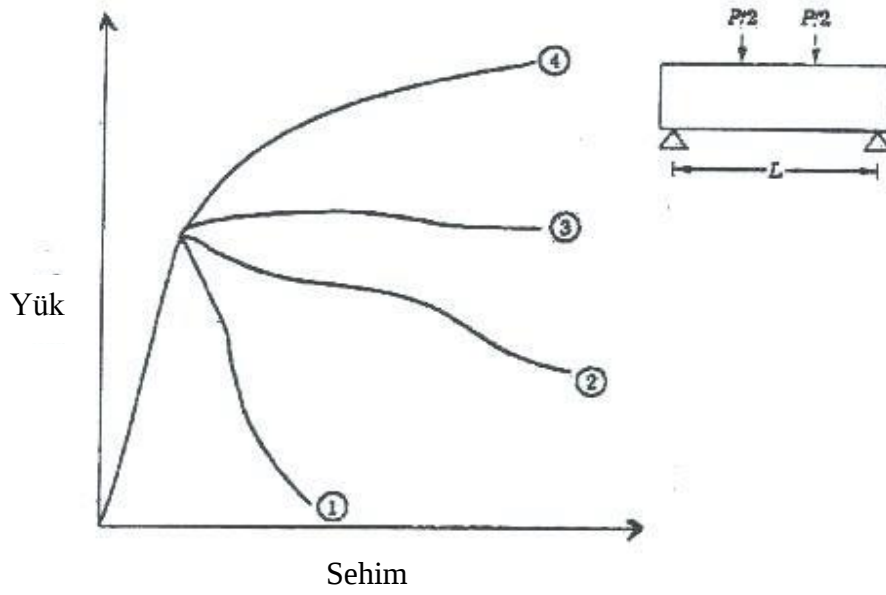
2.3.1.1 Çelik lif donatılı çimento esaslı kompozit malzemeler

Bir yapı malzemesi olarak incelendiğinde betonun, rasgele şekilde dağılmış agregalardan oluştuğu için homojen olmayan bir iç yapıya sahip olduğu görülür. Bu heterojen yapı, içsel şekil değiştirmelerin de düzensiz ve buna bağlı olarak kırılma sürecinin karmaşık ve süresiz olmasına neden olmaktadır. Tüm karmaşıklığına rağmen, betonun kırılma davranışı araştırıldığında, malzemenin kırılmasına neden olacak potansiyel çatlakların, kritik bağın oluştuğu agrega yüzeyi ile çimento harcı arasındaki geçiş bölgesinde oluşan mikroçatlaklardan kaynaklandığı görülmektedir. Bu ara yüzey betonda hasar oluşma ihtimalinin en fazla olduğu zayıf halka olarak adlandırılmaktadır. Şekil değiştirmelerin ya da bir diğer ifade ile bu şekil değiştirmelere sebep olan gerilmelerin, heterojen yapı dolayısı ile düzgün olarak iletilmemesi, betonun en zayıf bağ karakterine sahip olduğu bölgelerde taşıma

gücünün aşılmasına ve ani göçmelerin meydana gelmesine olanak sağlamaktadır. Bu tezin de konusunu oluşturan ani göçmenin önüne geçilerek sünek bir yapının oluşturulması için, değişik tipte güçlendirme elemanları kullanılmaktadır. Günümüzde betonun içine lif katılması, malzemenin sünekliği ile birlikte bütün mühendislik özelliklerini iyileştirmesi nedeni ile yaygın bir yöntem olarak kullanılmaktadır [13].

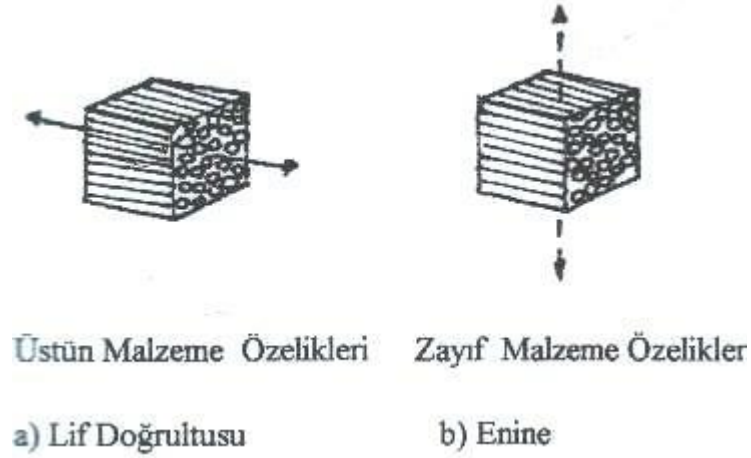
Lif donatılı betonlarda kullanılan liflerin görevi, özellikle çekme mukavemetleri yüksek olduğu için, beton matrisinde kılcal boşlukların oluşmasını engellemek veya geciktirmek, çatlakların hızlı ve kontrolsüz gelişiminin önüne geçmektir. Beton içinde kullanılan çelik lifler, malzemeye yük etkimesi ile çalışmaya başlarlar. Mikroçatlakların 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 [13,14].

Yükler altında zorlanan matrisin, en zayıf olduğu noktada taşıma kapasitesinin aşılması ile çatlaklar oluşmaya başlar ve bu olayı takiben şayet lif miktarı yeterli ise ve matris rijit, boşluksuz, yoğun bir yapıda ise bu lifler yükün tamamını alarak çatlakların önünde bir köprü vazifesi görürler. Liflerden elde edilen bu performans sonucunda, daha önce çatlamamış beton kesitlerinin de dayanımından yararlanma imkanı oluşmaktadır. Artan bu matris kapasitesi ve çekme dayanımı ile şekil değiştirme yeteneği betona göre çok yüksek olan çelik liflerin çatlağın olduğu yerlerde taşıma gücünü arttırması sonucunda mühendislik özellikleri gelişmiş bir malzeme oluşmaktadır. Şekil 2.7. de lif oranının, taşıma kapasitesini ve kırılma davranışının karakterini nasıl etkilediğini gösteren, farklı lif oranlarında 4 tane numuneye ait yük-sehim diyagramları görülmektedir. Bu grafiklerden de görüleceği gibi, 1. ve 2. numunelerde lifler tarafından taşınan yük matrisin taşıdığı yükten daha az, 3. numunede matrisin taşıdığı yüke eşit, son numunede ise matrisin taşıdığı yükten daha fazladır. 1 numara ile gösterilen eğri en az lif içerirken lif oranının artması ile dayanım ve süneklik artmaktadır [6,15].



Şekil 2.7:Farklı Oranlarda Lif İçeren Kompozitler için Tipik Yük–Sehim Eğrileri [6].

Bilindiği gibi, betonun çekme mukavemeti çok düşük olduğu için, çekmeye çalışmadığı kabul edilmektedir. Yapılan betonarme hesaplarda da, kesitin çekme bölgesinde oluşan gerilmeler donatı ile karşılanmaktadır ve donatı çekme gerilmelerinin olduğu doğrultularda yerleştirilmektedir. Bu şekilde oluşturulan kesitte, hem çekme gerilmeleri alınmakta hem de donatının şekil değiştirme kapasitesinden yararlanılarak sünek davranış ortaya çıkarılmaktadır. Aynı prensip lif donatılı kompozit malzemelerde de geçerli olmaktadır. Liflerin özelliklerinden maksimum seviyede yararlanabilmek için, liflerin matriste maksimum çekme gerilmelerinin olduğu yönde yerleştirilmeleri gerekmektedir. Ancak üretim aşamasında bu prensibin uygulanması çok zor bir husustur. Lifler ince ve kısa kesilmiş oldukları için malzeme içinde istenilen yönde yerleştirilmeleri güçtür. Ancak lifler, çimento matrisi içinde homojen bir yapı oluşturdukları için liflerin rijit ve kuvvetli oldukları yönler malzemenin her doğrultusunda bulunur. Özellikle kendiliğinden yerleşen betonlarda iri agrega miktarının kısıtlaması, agrega granülometrisi ayarlanması, düşük su/çimento oranından dolayı yeterli kohezyonun ve viskozitenin sağlanması ile liflerin matris içerisinde homojen olarak her yönde dağılması sağlanmaktadır. Şekil 2.8 de lifin yönüne göre malzemenin güçlü olduğu doğrultular yer almaktadır. Buradan da net olarak görüleceği gibi, lifler kuvvetin uygulandığı yöne paralel ise dayanım da artmaktadır [15].



Şekil 2.8: Lif Doğrultusunun Tersi Yönünde Zayıf Malzeme Özellikleri [7].

Liflerin betonda kullanılmasındaki amaç, malzemenin diğer mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinin yanında sünekliği arttırmaktır. İstenilen sünekliği elde etme aşamasında dikkat edilmesi gereken en önemli husus, çelik liflerin çekme dayanımlarının ne ölçüde kullanılabileceğidir. Liflerden elde edilen performans, lifin üretildiği malzemeye, lifin geometrik şekline, beton matrisi ile oluşturduğu aderansa ve matris içindeki dağılımına bağlı olarak değişmektedir.

2.3.1.2 Lif malzemesinin etkisi

Üretildikleri malzemelerin farklılığından dolayı değişik özelliklere sahip birçok lif türü mevcuttur. Bu lifler genel olarak;

- Metalik lifler (Çelik lifler vb)
- Polimerik lifler (Karbon, polietilen, polipropilen vb) • Mineral Lifler (Cam)
- Doğal olarak oluşan lifler (Selüloz) şeklinde sınıflandırılabilirler [7].

Lif donatılı betonların üretim aşamasında, kullanılacak olan liflerden istenilen performans belirlenerek, bu karaktere sahip liflerin elde edilebileceği lif malzemesinin seçilmesi, oluşturulan kompozit yapının dayanımı ve dürabilitesi açısından önemli bir husustur. Bu tez çalışması sırasında betonda oluşan çekme ve kesme kuvvetlerini karşılamak üzere çelik lifler kullanılmıştır. Çok yüksek çekme mukavemetine sahip çelik liflerden istenilen performansı elde edebilmek için, matris ile aderansının yeterli derecede sağlanması gerekmektedir. Liflerin matristen sıyrılmasının engellenmesi ile oluşan yüksek performans aynı zamanda kullanılan lifin karakteristiklerine de bağlı olmaktadır. Genellikle hacimce %0,5 ile %1,5 arasında değişen lif içeriği işlenebilirliğin optimum düzeyde olması kriteri göz önüne

alınarak belirlenmektedir. Matrisi güçlendiren, matriste çatlaklar oluşuncaya kadar gerilmeleri matris ile birlikte paylaşan, çatlak oluşumu ile birlikte gerilmeleri üzerine alarak çatlağın her iki yanına ileten çelik liflerin performansını ön plana çıkartabilmek için, çimento içeriğinin arttırılması, iri agrega miktarının sınırlandırılması, agrega granülometrisi ile ilgili optimizasyonun yapılması ve puzolanik özelliğe sahip malzemelerin kullanılması, dikkat edilmesi gereken unsurlar olarak ortaya çıkmaktadır [16].

2.3.1.3 Lif-matris aderansının etkisi

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 bu mekanik bağ hem matrisin özelliklerine hem de kullanılan lifin özelliklerine bağlıdır. 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. Bununla birlikte kullanılan liflerin yüzeylerinin deforme oluşu mekanik bağ arttırırken, lif boyu ve narinliğin artması ile artan yüzey alanı fiziksel bağ arttırarak aderans geliştirilmektedir [16]. Farklı uygulama alanları için bu aderans kuvvetini arttırmak amacı ile çeşitli geometrilerde lifler üretilmektedir. Bunlar kullanım amacına göre düz, dalgalı, pürüzlü, kanca uçlu, zigzaglı gibi çeşitli geometrilerde lifler günümüz uygulamalarında yer almaktadır.

2.3.1.4 Lif içeriği, lif narinlik oranı ve lif dağılımının etkisi

Lif uzunluğunun çapa bölünmesi ile bulunan ve 60–100 arasında olması istenen narinlik oranı ile lif içeriği, lif donatılı betonların performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Lif içeriği hacim ya da ağırlık olarak kullanılan lif miktarını tanımlarken lifin sıyrılmaya karşı dayanımı da lif etkin olarak çalışmasını tanımlamaktadır. Lif boyu ve narinliği arttıkça artan sıyırılma dayanımı kompozitin özelliklerini önemli ölçüde belirlemektedir. Aynı zamanda, kullanılan lif miktarı ile lif geometrisi ve lif narinliği arasında da 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 [8,16].

Liflerin kalıp içinde yönlenmeleri malzemenin mühendislik özelliklerini belirleyen önemli bir husustur. Çekme, basınç ve eğilme gibi çeşitli yükleme durumlarında birbirlerinden farklı lif dağılımları önem kazanmaktadır. Çekme yüklemesinin olduğu yükleme durumu söz konusu iken, liflerin yükleme eksenine paralel dizilmeleri dayanımı arttırmakta, basınç yüklemesi durumunda da yükleme eksenine dik yönde dizilim dayanımı arttırmaktadır.

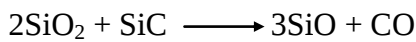
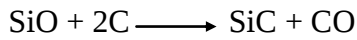
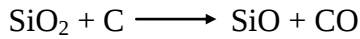
2.3.2 Silis dumanının beton özelliklerine etkisi

Silis dumanı silisyum ya da ferrosilisyum alaşımlarının üretimleri sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında, yüksek sıcaklıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli tozudur. Yaklaşık 2,20 kg/dm³'lük bir özgül ağırlığa sahip olan silis dumanı genellikle camsı, düzgün yüzeyli ve küresel taneciklerden meydana gelir. Özgül yüzeyi, taneler arasından geçen havanın geçiş hızını esas alan Blaine metodundan farklı olarak azot absorpsiyonu ile tayin edilmektedir [17].

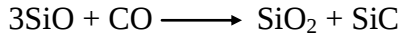
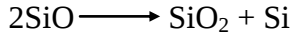
İlk olarak 1950'lerde Norveç Teknik Enstitüsünde yapılan, silis dumanı içeren betonlarla ilgili deneyler, 1970'lerde ayrıntılı olarak yapılmaya başlandı ve bazı çalışmalar yayınlandı. Mikrosilis, ferrosilikon ve amorf silis gibi isimlere de sahip olan silis dumanı 1980'lerin başından itibaren birçok ülkede daha yaygın bir şekilde araştırıldı ve uygulamada da kullanılmaya başlandı [7].

Özellikle zirkonyum endüstrisinden elde edildiğinde en iyi sonucu veren silis dumanının üretim aşamasında, büyük elektrik ocaklarında 2000° C' ye kadar ısıtılan kuvars (SiO₂), doğal silikon ve gaz halindeki silikon monoksit indirgenir. Daha sonra gaz halindeki silikon monoksit, hava ile temasta olan açık elektrik ocağında oksitlendirilerek tekrar SO₂ oluşturulur.

Karışım ısıtıldığında;



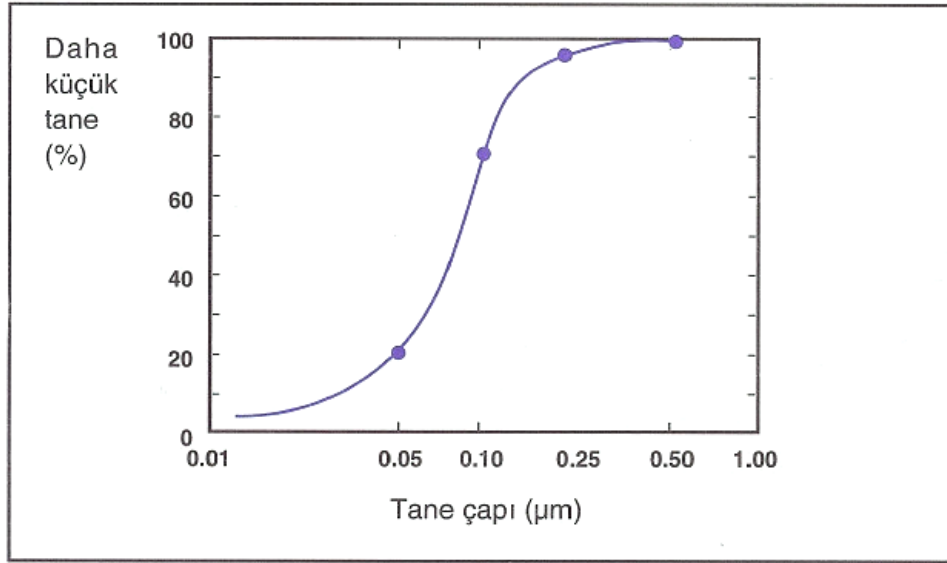
Fırın gazı soğutulduğunda;



Çimentodan yaklaşık olarak 100 kat daha ince olan silis dumanının ortalama tane boyutu $0.1\mu\text{m}$ civarındadır. Tablo 2.1. de tipik bir bileşimi yer alan silis dumanının ortalama tane boyu dağılımı da Şekil 2.9 de görülmektedir [17,18].

Tablo 2.1: Tipik Bir Silis Dumanının Kimyasal Bileşimi [17].

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



Şekil 2.9: Silis dumanı tane boyu dağılımı [17].

2.3.2.1 Silis dumanının betonun mekanik özelliklerine etkileri

Su / çimento oranının seçimi, üretilecek betonun dayanımı ve dayanıklılığı göz önüne alınarak yapılmaktadır. Bu iki kriterle dayanarak bulunan su/çimento oranlarından daha küçük olanı üretimde kullanılmak üzere seçilir. Kendiliğinden yerleşen yüksek performanslı betonlarda bu değer önemli ölçüde küçüktür ve bu da dayanımı arttırmaktadır. Beton üretiminde kullanılan suyun bir kısmı çimentonun hidratasyonunda işlev görürken, bir kısmı da hidratasyon tepkimelerine girmeden

serbest su olarak kalır. Silis dumanının kullanılması, betondaki serbest su miktarını azaltarak çimento hamuru ara yüzeylerinde daha boşluksuz bir yapı oluşmasını sağlar. Bu sayede hidrate olmuş çimento tanelerinin, birbirleri ile ve agregaya ile aderansı artarak dayanım artmaktadır. Silis dumanının dayanımı arttırıcı bir diğer özelliği de puzolanik başka bir ifade ile ikincil bağlayıcı özelliğe sahip olmasıdır. Malzemenin bu karakteri, betonun mikroyapısını iyileştirerek betonun dayanım ve dürabilitesinin artmasını sağlamaktadır. Kusurları azaltıcı özelliği nedeni ile kullanılan silis dumanı, gevrekliğin artmasına neden olsa da, günümüzde yaygın biçimde kullanılan lifler sayesinde hem dayanımı hem de sünekliği yüksek, mükemmel enerji yutma kapasitesine sahip betonların üretilmesine olanak sağlamaktadır [6,19].

2.3.2.2 Silis dumanının betonun fiziksel özelliklerine etkileri

Üretilen betondan beklenen ana niteliklerden biri de malzemenin taze halde iken işlenebilir olmasıdır. Başka bir ifade ile malzeme kolay karıştırılabilir, kolay yerleştirilip sıkıştırılabilir ve karıştırma işlemi sırasında ya da taşıma işlemi sırasında bile bozulma ihtimali bulunan homojenliğin korunması için ayrışmanın meydana gelmesi önlenmelidir. Silis dumanı içeren betonlarda işlenebilirlik, düşük su/çimento oranı ve silis dumanının kullanılmasıyla artan kohezif yapı nedeni ile geleneksel betonlara göre zorlaşarak, kullanılması gereken karışım suyu miktarı artmaktadır. KYB’ de bu problem süperakışkanlaştırıcıların kullanılması ile çözülmektedir. Bununla beraber silis dumanının kullanılması ile oluşan yoğun yapı nedeni ile betonda segregasyon ihtimali de azalmaktadır. Böylece homojen ve boşluksuz bir yapı oluşarak malzemenin dayanımı ve dürabilitesi artmaktadır. Özellikle kimyasal etkilere ve donma-çözünme gibi tepkimelere yoğun olarak maruz kalan ve bu nedenle boşluksuz yapının tercih edildiği, yüksek dayanımlı betonlarda bu özellik önem kazanmaktadır [6,9].

2.3.2.3 Silis dumanının betonun dürabilitesine etkileri

Malzemenin, yapının ömrü boyunca özelliklerini koruması anlamına gelen dürabiliteyi kavrayabilmek için betonda hasar meydana getiren fiziksel ve kimyasal etkilerin bilinmesi gerekmektedir. Bu etkilerden bazıları;

- a) Donma - Çözünme etkileri,
- b) Islanma - Kuruma (Şişme – Büzülme) etkileri,
- c) Temas edeceği sulardaki ve havadaki kimyasal maddelerden zarar görme,
- d) Kendi içindeki kimyasal reaksiyonlardan zarar görme [9].

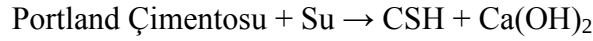
Geçirgenlik betonun d rabilitesini belirleyen en önemli unsurdur. Beton bileşimine kullanılan malzemelerin özelliklerine, betonun kalıplara yerleştirilmesine ve k r koşullarına önemli ölçüde bağlı olan geçirgenlik, hidrasyon sürecinden de etkilenmektedir. Silis dumanı kullanılması ile oluşabilecek boşluk miktarı, boşluk çapı ve boşluklar arasındaki bağlantılar azalmakta, ara yüzey olarak ifade edilen bölgede de yoğunluk arttığı için geçirimsizlik azalmaktadır. Hidrasyon sırasında yan ürün olarak ortaya çıkan kalsiyumhidroksiti de ba layan silis dumanı, zararlı kimyasalların ve dışarıdan gelmesi muhtemel suyun difüzyonunu engelleyerek d rabiliteyi olumlu yönde etkilemektedir. Bilindiği gibi  imento hamuru gözenek sıvısında bulunan alkaliler, agregadaki aktif silis ile reaksiyona girerek betona zarar vermektedir. Yapay puzolan olan silis dumanının ortamda bulunması halinde ise silis dumanının bu alkalileri hızla başlamasından dolayı bu reaksiyon zorla makta ve betonun zarar görmesi engellenmektedir. Bu olumlu etkileri sayesinde silis dumanı, dürabilitesi yüksek ve uzun ömürlü beton üretilmesine olanak sağlamaktadır [17].

2.3.2.4 Silis dumanının betonun mikroyapısı üzerindeki etkileri

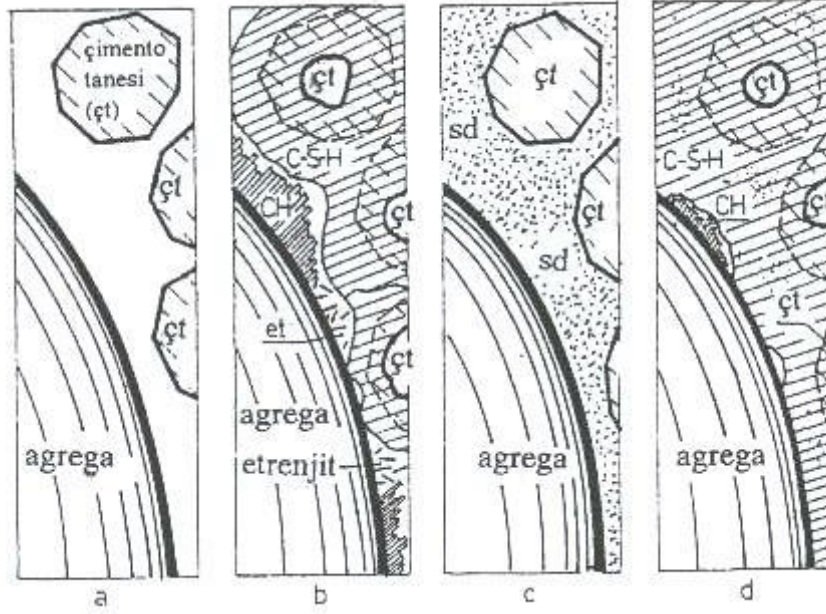
Silis dumanının betonun mikroyapısı üzerinde iki önemli etkisi vardır. Bunlar puzolanik ve boşlukları doldurma etkisidir.

a) Puzolanik etki

Çimento ile suyun etkileşimi sonucunda hidrasyon tepkimeleri ile çeşitli ürünler ortaya çıkmaktadır ve bunlardan kalsiyumhidroksit (Ca(OH)_2) ile kalsiyum silikat hidrate puzolanik özelliğin anlaşılabilmesi açısından önem taşımaktadır. Puzolanik özelliğe sahip katkı maddeleri karışıma katıldığı zaman, tek başına bağlayıcı olmamalarına rağmen, çimentonun hidrasyonu sonucunda ortaya çıkan kalsiyumhidroksit ile tepkimeye girerek hidrolik bağlayıcı kalsiyum silikat hidrateyi (CSH) oluştururlar [1]. Böylece aşağıdaki bağıntılar yazılabilir;



Bu reaksiyonların sonucunda, temas yüzeyinde devamlı faza göre daha yüksek porozitenin oluştuğu, hidrasyon ürünlerine ait daha büyük kristal tanelerinin  ekillendi i ve   kelmi  Ca(OH)_2 kristallerinin biriktiği ara yüz bölgesinde,  imento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderans artarak dayanımı ve dürabilitesi yüksek bir malzeme ortaya çıkar. Silis dumanının,  imento hamurunda sıkı bir dizili  oluşturan bu özelliğine puzolanik etki denir. Şekil 2.10 de silis dumanı içeren ve içermeyen betonlarda  imento hamuru agrega ara yüzeylerinin şematik olarak gösterimi yer almaktadır [5,6].

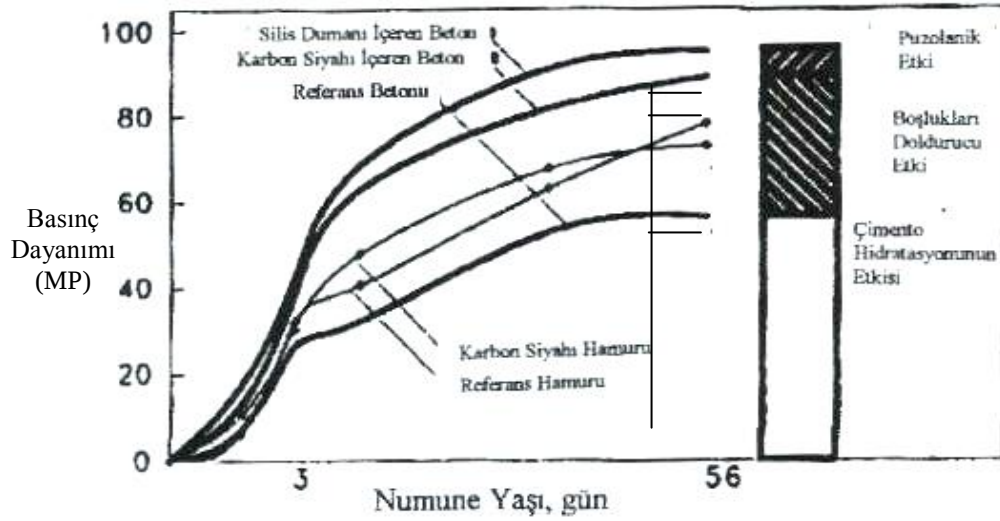


Şekil 2.10: Silis Dumanı İçeren ve İçermeyen Betonların Arayüz Bölgesinin Şematik Gösterimi a) Silis dumanı içermeyen taze beton, b) CH' nin agrega yüzeyinde çökmesi, boşluklu geçiş bölgesi, c) Silis dumanı ile boşlukları dolmuş taze beton, d) Daha az boşluklu geçiş bölgesi [15].

b) Boşlukları doldurma etkisi

Puzolanlar, rötre ve yüksek hidratasyon ısısının açığa çıkmasını engelleyerek yüksek miktarda bağlayıcı kullanılmasına izin veren malzemelerdir. Bu puzolanlardan biri olan silis dumanı, agrega ile çimento arasındaki boşlukları azaltarak temas yüzeyinde daha homojen bir mikroyapının oluşmasını sağlar. Silis dumanının boşlukları doldurma etkisi, oluşan kompozitin tane boyutu açısından incelenmesi ile daha iyi anlaşılmaktadır. Çimentonun tane boyutu yaklaşık 30 µm mertebesinde iken, silis dumanının tane boyutu 0.1µm ile 0.2 µm arasında değişmektedir. Tane boyutları arasındaki bu çok büyük fark ile birlikte, silis dumanının çok küçük boyuta ve yüksek aktiviteye sahip olması ile açığa çıkan bu boşlukları doldurma kabiliyeti sonucunda, agrega ile çimento hamuru temas yüzeyinde homojenlik artmakta ve porozite azalmaktadır [15].

Malzemenin dayanımını arttıran bu mineral katkıların boşlukları doldurma etkisinin, dayanımı ne kadar etkilediğini incelemek amacıyla çeşitli deneyler yapılmış ve puzolanik özelliğin dayanıma katkısına bağlı olarak kıyaslamalar yapılmıştır. Bentur ve Goldman'ın silis dumanı ile, bağlayıcı özelliği bulunmayıp yalnızca boşluk doldurma kabiliyeti bulunan karbon siyahı kullanarak yaptıkları deneyler sonucunda, dayanımlardaki farklılıklardan dolayı, boşlukları doldurma etkisinin puzolanik etkiden daha önemli olduğu sonucuna varılmıştır. (Şekil 2.11) [4,7].



Şekil 2.11: Silis Dumanının Pozolan ve Boşlukları Doldurma Etkisi [6].

2.4 Sıcaklığın Etkisi ve Isıl İşlem

Genel anlamda incelendiğinde sıcaklık, hidratasyon reaksiyonlarını hızlandıran ve böylece betonun dayanımı üzerinde olumlu etkiler oluşturan bir unsur olarak ortaya çıkmaktadır. Fakat dikkat edilmesi gereken en önemli husus betonun prizi sırasında sıcaklığın belirli sınırları aşmasının engellenmesidir. Aksi takdirde ortaya çıkan hidratasyon ürünleri boşluklu bir yapıya sahip olmakta ve üretilen betonun dayanımını olumsuz etkilemektedir. Bununla beraber sıcaklığın düşük olması da dayanım kazanma hızını olumsuz etkilemektedir. Yapılan çalışmalar üretimin üzerinden 1 hafta geçtikten sonra ve buharlaşma kontrol altına alındığı süreçte, sıcaklığın yüksek olmasının dayanım kazanma hızını arttırdığını göstermektedir [9,21].

Sıcaklığın hidratasyon üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için hidratasyonun kinetiğinin bilinmesi gerekmektedir. Çimento, kalker ve kil karışımının demir filizi içeren toprakla ile birlikte 1400 °C' ye kadar ısıtılması sonucu meydana gelmektedir. Başka bir ifade ile kireç, silis, alüminyumoksit ve demiroksit içeren bir bağlayıcıdır. Bu bileşenler yüksek sıcaklıklarda elde edildiği ve süratli soğutulduğu için sahip oldukları enerjilerini dışarı veremezler. Su ile temas ettiklerinde ise çözünerek bu enerjilerini dışarı verdikleri için hidratasyon ekzotermik bir reaksiyon olarak gerçekleşmektedir. Bu açıdan bakıldığında, ekzotermik bir reaksiyona dışarıdan ısı verilmesinin reaksiyonu olumsuz olarak etkilemesi beklenmektedir. Fakat çimento tanesinin Arrhenius teorisine uygun bir biçimde, suya çeşitli oksitler ve iyonlar vererek çözündüğü hususuna dikkat edilirse, aslında sıcaklığın artması suyun bu iyonları çözme yeteneğini arttırdığı için hidratasyon

tepkimelerinin olumlu yönde etkilendiği anlaşılmaktadır. Arrhenius denklemi aşağıdaki şekildedir;

$$K = A \exp[-E/(RT)] \quad (2.4)$$

K= Reaksiyon hızı,

A= Katsayı,

E= Aktivasyon enerjisi,

R= Gaz sabiti (1.986 kal/mol °K),

T= Mutlak sıcaklık (°K) [24].

Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bu bilgiler ışığında, hidratasyonu hızlandırmak için ısıtmanın kullanılması amaçlanmış ve ısıtma uygulamaları ortaya çıkmıştır. Isıtma işlemleri uygulama yöntemlerine göre betonun yerleştirilmeden önce ısıtılması ve betonun yerleştirilmesinden sonra ısıtılması şeklinde iki ana gruba ayrılır. Üretimden sonra betonun ısıtılması yöntemi de iç ısıtma ve dış ısıtma olmak üzere iki gruba ayrılır. Pratikte daha çok dış ısıtma yöntemi kullanılmaktadır [21].

2.4.1 Dış ısıtma (Buhar kürü)

Buhar kürü, betonu gereken olgunluk derecesine daha kısa sürede ulaştırmak için yapılmaktadır. Özellikle prefabrike elemanların üretiminde kullanılan bu yöntem atmosfer basıncında buhar kürü ve yüksek basınçta buhar kürü olmak üzere iki farklı uygulama prensibine sahiptir. Genel olarak incelendiğinde, yüksek basınçtaki buhar kürü dışındaki ısıtma işlemlerinin tümünde verilen sıcaklık 100 °C' nin altında olduğu için hidratasyon ürünleri benzer olmaktadır. Yüksek basınçta buhar kürü uygulandığında ise normalde jel karakterli olan çimento hamurunun yapısı daha çok kristal yapıya dönüşür ve çimento hamurunun özgül yüzeyi azalır. Daha az rötre yapan betonun kimyasal etkilere ve donatı dayanıklılığı arttığı için durabilitesi yüksek olur fakat çelik donatı ile aderansının azalması da olumsuz bir sonuç olarak ortaya çıkmaktadır [10, 21].

Isıtma uygulamalarında dikkat edilmesi gereken diğer bir husus da uygulamanın başarı derecesidir. Erken yaşlardaki mukavemeti arttıran bu uygulamalar genellikle ileri yaşlarda ki mukavemeti normal şartlarda kür uygulanmış betonlara göre düşürmektedir. Bu nedenle kısa sürede sağlanan mukavemet artışı ile geç yaşlardaki mukavemet kayıplarını birlikte göz önüne alarak değerlendirmek önem kazanmaktadır [21].

Bu tezde uygulanan ısıtma işlem yöntemi yukarıda anlatılanlara göre farklılık göstermektedir. Numuneler üretimlerinden 7 gün sonra 85 °C sıcaklıkta ısıtma işlemine tabi tutulmuş ve 3 gün süre ile bu sıcaklıkta bekletilmişlerdir. Uygulanan ısıtma işlem çevrimi ile ilgili detaylı bilgi deneysel çalışmalar bölümünde verilecektir.

2.4 Katkı Maddelerinin Etkisi

Katkı maddeleri genel anlamda harç ve betonun taze ya da sertleşmiş haldeki özelliklerini değiştiren, betonun diğer ana bileşenlerine oranla çok az miktarda kullanılan kimyasallar olarak tanımlanabilir. Kullanım amaçlarına göre sınıflandırıldığında taze beton ya da harcın taze beton veya harcın reolojisini değiştiren, prizi ve sertleşmeyi etkileyen, hava içeriğini değiştiren, fiziksel, mekanik ve kimyasal etkilere karşı direnci arttıran katkıları şeklinde çeşitli sınıflandırmalar yapmak mümkün olmaktadır.

Akışkanlaştırıcı katkıları taze beton ya da harcın işlenebilirliğini değiştirerek reolojik özelliklerini etkileyen, su/çimento oranını düşürerek boşluk ve ayrışma olmaksızın daha iyi bir yerleşmenin sağlanması ile dayanım ve dayanıklılık özelliklerini etkileyen katkılarıdır. Etkinlik derecelerine göre normal akışkanlaştırıcılar, orta derecede su azaltıcı akışkanlaştırıcılar ve süper akışkanlaştırıcılar olmak üzere 3 ana grupta toplamak mümkün olmaktadır. Akışkanlaştırıcıların bu etkileri göstermeleri, hava sürüklemeleri, çimento taneleri tarafından absorbe edilmeleri ve prizi geciktirmelerinden kaynaklanmaktadır. Akışkanlaştırıcı kullanılması ile oluşan kapalı hava boşluklarının yüzeyel sürtünme kuvveti bulunmamaktadır. Böylece kararlı olan bu hava boşlukları, betonun içsel sürtünmesini azaltarak daha az su ile benzer işlenebilme yeteneğinin elde edilmesini sağlamaktadır.

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 itmektedir. Betonun iç sürtünmesini azaltan bu unsur işlenebilme özelliğini arttırmaktadır. Priz geciktirici özelliğe sahip olan akışkanlaştırıcılar, bu özelliklerine ek olarak başlangıçtaki hidrasyon reaksiyonları için gerekli su gereksinimini azaltması ile akışkanlığı arttırmaktadır.

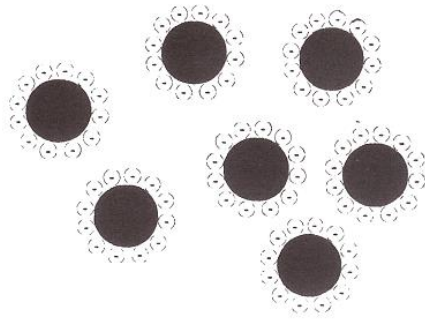
Yeni kuşak süperakışkanlaştırıcılarda dispersiyon etkisinin yanında sterik etki de akışkanlığı arttırmaktadır. Uzun dallar içeren polimer zincirleri sayesinde çimento tanecikleri çevresinde birbirini iten fiziksel bir etki oluşur. Sterik etki adı verilen bu etki sayesinde çimento taneleri dağılarak kararlı hale gelmektedir.

İşlenebilirliği düşürmeden su/çimento oranını ve aynı zamanda kullanılan çimento miktarını azaltan, ayrışma olmaksızın akıcılığı arttırarak ulaşılması en zor yerlere dahi beton dökümüne izin veren akışkanlaştırıcılar, son dönemde yeni kuşak süperakışkanlaştırıcıların da ortaya çıkması ile yüksek performanslı betonların üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bu betonların akışkanlıkları kendiliğinden yerleşme sağlayacak derecede yüksek olabilmekte ve kendiliğinden yerleşen betonların gelişmesine olanak sağlamaktadır. Kimyasal bileşimleri göz önüne alındığında süperakışkanlaştırıcıları 3 farklı grupta toplamak mümkün olmaktadır;

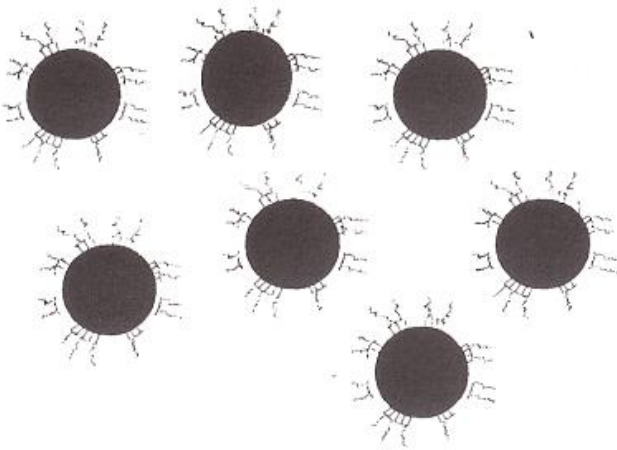
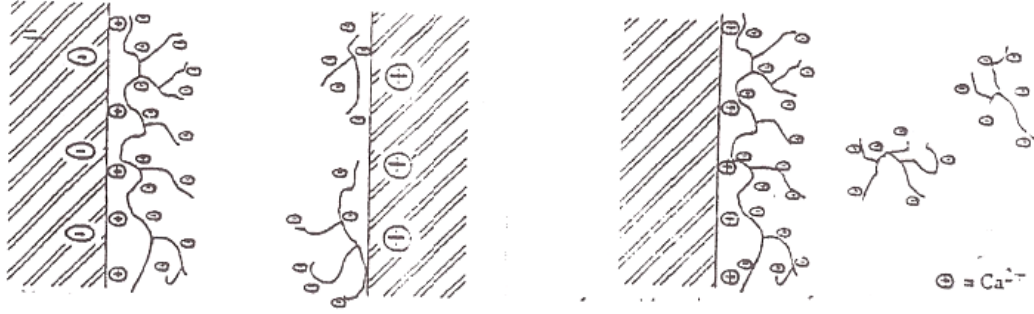
- a) Sülfonatlı sentetik polimerler,
- b) Karboksilatlı sentetik polimerler,
- c) Modifiye linyo sülfonatlar.

Sülfonatlı sentetik polimerler sülfonatlı naftalin formaldehit (SNF) ya da sülfonatlı melamin formaldehit(SMF) bileşiklerinden oluşmaktadır ve piyasada da çoğunlukla kullanılan bu malzemeler süperakışkanlaştırıcıların temelini oluşturmaktadır. Karboksilat ya da hidrokarboksilat tuzları olan karboksilatlı sentetik polimerler, poliakrilat ana polimer zincirleri ile tarak şeklinde polieter yan bağları içeren katkılardır. Bu yapıları sayesinde sterik etki de oluşturarak daha yüksek performans elde edilmesini sağlamaktadır. Modifiye edilmiş linyosülfonatlar ise yapılarında farklı anodik ve kutupsal fonksiyon gruplarına sahip olan dispersiyon etkisi ile çalışan katkılardır.

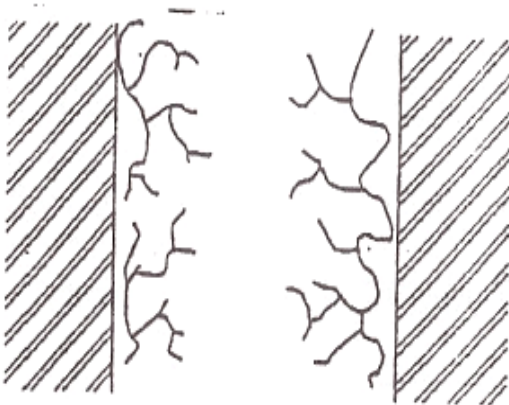
Çimento tanelerini dağıtarak daha etkin bir hidratasyona olanak sağlayan ve sıvı ortamdaki viskoziteyi ve kayma eşiğini düşürerek reolojik özellikleri etkileyen bu katkıların etki mekanizmaları Şekil 2.12' de görülmektedir [22].



Elektrostatik etki



Sterik etki



Şekil 2.12: Süper Akışkanlaştırıcı Katkıların Etki Mekanizması [22].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez çalışması kapsamında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda su/ince malzeme oranı hacimce 0.51 olan ve çimento ile öğütölmüş silis ununun hacimce yer değıştirdiğı 3 adet karışım üretilmiştir. Daha sonra bu 3 karışım 1m³'de 40 kg olmak üzere yüksek mukavemetli çelik lif katılarak 3 adet daha karışım elde edilmiştir. Bağlı olarak düşük mukavemetli liflerin aynı oranda katılması ile toplam 9 adet farklı karışım elde edilmiştir. Üretimlerde bağlayıcı madde olarak çimentonun yanında ek olarak silis dumanı kullanılmıştır. Silis dumanının miktarı 120 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Üretimlerde akışkanlığı sağlamak için hiper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcı katkı maddesi üretim sırasında yapılan kendiliğinden yerleşen beton deneylerine bağlı olarak ve ayrışma dikkate alınarak, her üretim için farklı miktarlarda kullanılmıştır.

3.1 Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

3.1.1 Çimento

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

Tablo 3.1: Portland Çimentosunun Fiziksel Özellikleri

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

Tablo 3.2: Portland Çimentonun Kimyasal Özellikleri

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

Tablo 3.3: Portland Çimentosunun Basınç Dayanımı

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

3.1.2 Silis dumanı

Deneylerde çimentoya ek olarak filler ve puzolanik etkisi bulunan silis dumanı da kullanılmıştır. Silis dumanının miktarı 120 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Helyum piknometresi ile yapılan ölçümde silis dumanının özgül ağırlığı 2,24 gr/cm³ bulunmuştur.

3.1.3 Agregalar

Deneylerde iri agrega olarak bazalt kırmataş 1 kullanılmıştır. İnce agrega olarak deniz kumu ve bazalt kırma taş tozu kullanılmıştır. Agregaların fiziksel özellikleri Tablo (3.4)'de verilmiştir. Tablo (3.5)'te ise öğütülerek kullanılan silis ununun fiziksel özellikleri verilmiştir. Agregaların elek analizleri Tablo (3.6)'da gösterilmektedir. 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 (%)
Deniz Kumu	2,64	2,61
Kırmataş Tozu	2,78	2,11
Kırmataş 1	2,86	1,60

Tablo 3.5: Silis Ununun Fiziksel Özellikleri

Agrega	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Su emme (%)	90 µ'luk elekten geçen %	45 µ'luk elekten geçen %	Blaine (cm ² /g)
Silis unu	2,62	0,4	99,96	83	3500

Tablo 3.6: Agregaların Elek Analizi Sonuçları

Elek Göz Boyutu (mm)	Elekten Geçen %			
	Deniz Kumu	Bazalt KT Tozu	Bazalt KT1	Karışım
16	100	100	100	100
8	100	100	55	87
4	98	99	3,6	70
2	86	53	0,2	49
1	76	17,5	0,2	33
0,5	52	6,6	0,1	21
0,25	8,7	4	0,1	4

3.1.4 Akışkanlaştırıcı

Beton üretimleri sırasında su ihtiyacını yüksek oranda azaltan, yeni nesil bir hiper akışkanlaştırıcı katkı malzemesi olan ve YKS Degussa firması tarafından üretilen, Glenium 51 isimli akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Bu katkı modifiye edilmiş olup klor içermemektedir.

3.1.4.1 Yeni nesil süperakışkanlaştırıcıların etki mekanizması ve teknik özellikleri

Bu katkıların geleneksel süper akışkanlık verici katkı maddelerinden (NSF veya MSF esaslı) farkı, çimento dağılımının etkinliğini büyük ölçüde artıran, yeni etki mekanizmasıdır. Geleneksel, melamin ve naftalin sülfonatlar gibi süper

akışkanlaştırıcılar, çimento taneleri üzerine adsorbe olan katkılardır. Bu katkılardaki polimerler beton karıştırma işleminin en erken aşamasında çimento tanelerinin yüzey alanlarının çevresini kuşatırlar. Polimer zincirlerinin sülfonik grupları, çimento tane yüzeylerinin negatif yükünü artırır ve bu taneleri elektriksel itme ile dağıtırlar. Bu elektrostatik mekanizma, çimento hamurunun dağılmasına neden olur ve bunun olumlu bir sonucu da, belirli beton işlenebilirliğinin daha az su karışımı ile elde edilmesini sağlamasıdır.

TS EN 934-2 'ye göre yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkı ve sertleşmeyi hızlandırıcı katkı sınıflarına uygundur. Yeni nesil süper akışkanlaştırıcılar süper akışkanlık verici katkı maddelerine göre değişik bir kimyasal yapıya sahiptir. Bu katkılar, uzun kenar zincirli karboksilik eter polimerlerinden oluşur. Karıştırma işleminin başlangıcında, geleneksel süper akışkanlaştırıcılarda olduğu gibi, elektrostatik dağılma mekanizmasını harekete geçirir. Bu işlemle su içeriği büyük ölçüde azalan akışkan bir beton elde edilir. Tablo (3.7)'da kullanılan süperakışkanlaştırıcıya ait teknik özellikler verilmiştir.

Tablo 3.7: Kullanılan Süperakışkanlaştırıcının 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

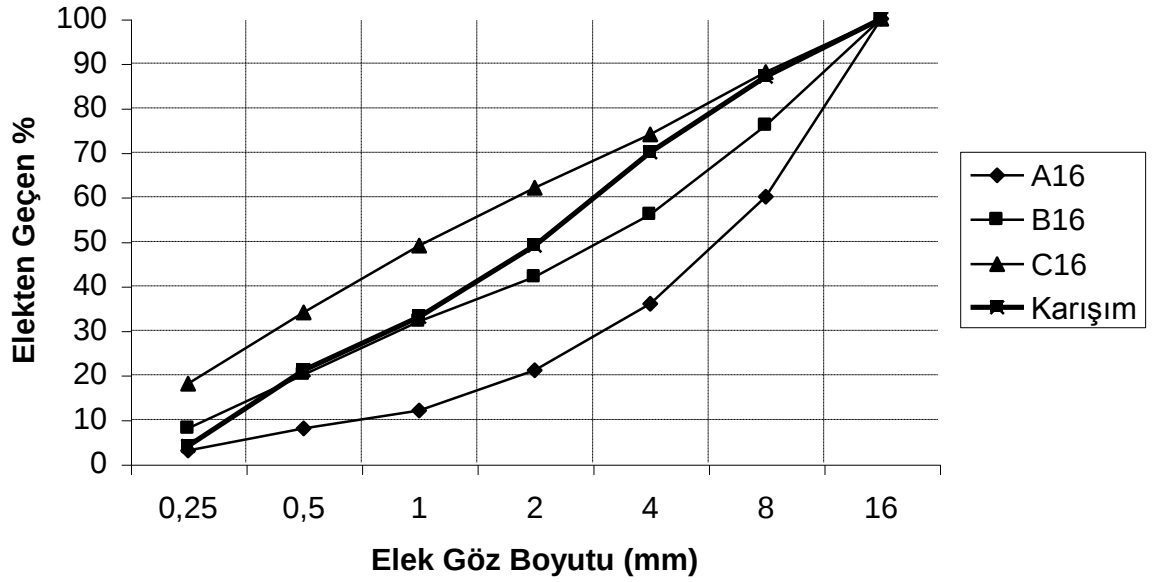
3.1.5 Çelik lif

Tez çalışması kapsamında beton takviyesinde kullanılan TS10513 standardına uygun olarak üretilen, kanca uçlu, iki ucu kıvrılmış, birbirlerine tutkalla birleştirilmiş, C sınıfı A tipi soğuk çekilmiş 0.55 mm çapında, 30 mm boyunda, narinliği 55 olan BEKSA Firması üretimi ZP305 kodlu iki tür çelik lif kullanılmıştır. Aynı karakteristiklere sahip iki lif çekme dayanımları açısından farklılık göstermektedir. Bağlı olarak düşük dayanımlı liflerin çekme mukavemetleri 1100 MPa olup yüksek dayanımlı liflerin çekme mukavemetleri 2250 MPa değerindedir.

3.2 Beton Karışımları

Bu çalışma kapsamında 3'ü lif içermeyen, 3'ü bağlı olarak düşük dayanımlı lif içeren ve 3' ü de yüksek dayanımlı lif içeren toplam 9 farklı beton üretilmiştir. Bütün bileşimlerde hacimce su/ince malzeme oranı 0,51 değerinde sabit tutulmuş ve öğütülmüş silis unu çimento ile hacimce ikame edilerek kullanılmıştır. Çimento ile

öğütülmüş silis ununun ikame edilmesi sırasında karışıma giren toplam su miktarı sabit tutulduğu için su/çimento oranı 900 kg/m^3 dozajlı numunelerde 0.22 değerinde iken 650 kg/m^3 dozajlı üretimlerde 0.33, 350 kg/m^3 dozajlı üretimlerde ise 0.61 değerine ulaşmıştır. Kullanılan çelik lif oranı 1 m^3 beton içerisinde 40 kg olarak belirlenmiş ve her bir lifli karışım için aynı oran kullanılmıştır. Katkı miktarı bütün bileşimlerde kendiliğinden yerleşen beton özelliklerinin elde edilebilmesi için deneme betonları yapılarak belirlenmiştir. Agrega karışımı TS706' da belirtilen B16 ve C16 referans eğrileri arasında kalacak şekilde belirlenmiştir. Buna göre karışım oranları için deniz kumu %35, kırmataş tozu %35 ve kırmataş1 %30 olarak belirlenmiştir. Karışımın granülometri eğrisi Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Tablo (3.8)'de üretimlerin 1 m^3 için teorik bileşim değerleri verilmiştir.



Şekil 3.1: Beton agregası karışımının granülometrisi ve referans eğrileri

Tablo 3.8: Teorik Beton Bileşimleri Ve Özellikleri

Bileşen (kg)	V0-900	V0-650	V0-350	V1-900	V1-650	V1-350	V2-900	V2-650	V2-350
Çimento	900	650	350	900	650	350	900	650	350
Silis Dumanı	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Su	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Silis Unu	150	350	610	150	350	610	150	350	610
Deniz Kumı	334	334	334	334	334	334	334	334	334
KT Tozu	352	352	352	352	352	352	352	352	352
KT 1	310	310	310	310	310	310	310	310	310
Çelik Lif	-	-	-	40	40	40	40	40	40
Katkı	19,8	14,3	8,3	19,8	14,3	8,3	19,8	14,3	8,3
Su/İnce Malzeme (Hacimce)	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
Su/Çimento	0,22	0,33	0,61	0,22	0,33	0,61	0,22	0,33	0,61
Su/Bağlayıcı	0,20	0,28	0,46	0,20	0,28	0,46	0,20	0,28	0,46

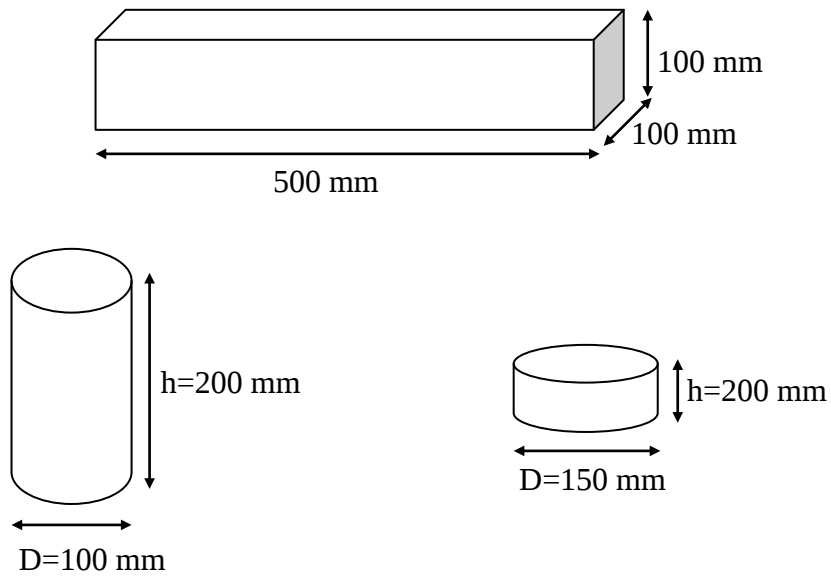
3.3 Üretimde İzlenen Sıra

- 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,
- Birim ağırlık ve kendiliğinden yerleşen beton deneylerinin yapılması,
- Betonun kalıplara alınması.

Numuneler üretimden 1 gün sonra kalıptan çıkartılarak daha önceden belirlenmiş olan kür ortamlarına alındılar.

3.4 Numune Boyutları ve Şekilleri

Bu çalışmada; 4 adet kiriş, 4 adet silindir ve 5 adet disk olmak üzere toplam 13 numune üretildi.



Şekil 3.2: Numune Şekilleri ve Boyutları

3.5 Isıl İşlem Programı

Üretilen numunelerin tamamına ısıtıl işlem uygulanmıştır. İzlenen ısıtıl işlem programında numuneler ilk 7 günlük süreyle $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ’ de kirece doymuş su içinde saklanmıştır. Ardından 3 gün süre ile $85^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ’ de kirece doymuş su içinde bekletilmiştir. Ardından tekrar $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ’ de ki kirece doymuş su içinde tutularak 28. güne kadar bu ortamda bekletilmiştir.

3.6 Numune Kodlarının Belirlenmesi

Bu çalışmada üretilen 9 farklı betonun belirlenen kodlamasında ilk bölüm karışımın lif içeriğini ve lif türünü açıklamaktadır. V0 karışımın lif içermediğini, V1 yüksek mukavemetli lif içerdiğini, V2 ise düşük mukavemetli lif içerdiğini temsil etmektedir. Kodlamanın ikinci bölümü ise çimento dozajını temsil etmektedir.

Örneğin; V0–900 kodu, 900 dozajlı ve lif içermeyen karışımı ve V1–650 kodu, 650 dozajlı, yüksek mukavemetli karışımı temsil etmektedir.

4. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

4.1 Taze Beton Deney Sonuçları

4.1.1 Birim ağırlık deneyi

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

Tablo 4.1: 1m³ Betonda Gerçek Miktarlar

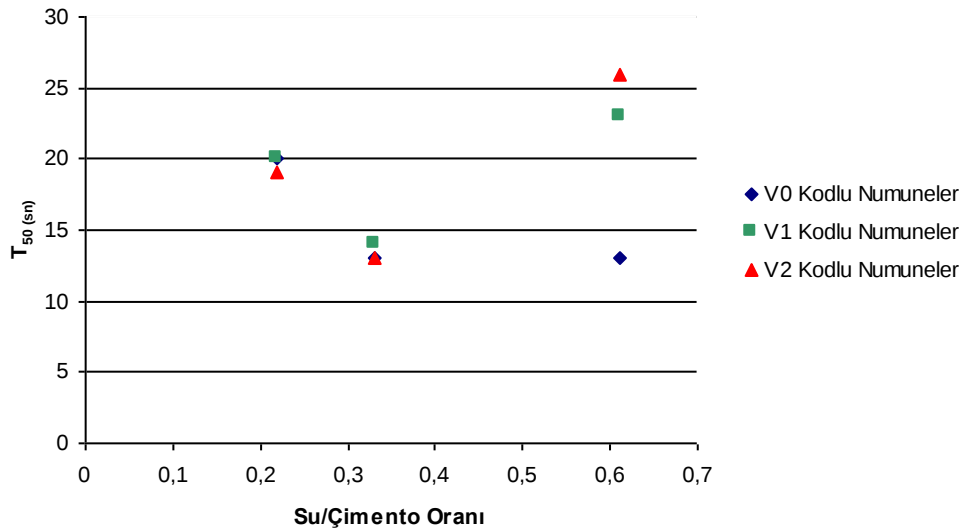
Bileşen (kg)	V0- 900	V0- 650	V0- 350	V1- 900	V1- 650	V1- 350	V2- 900	V2- 650	V2- 350
Çimento	898	656	348	897	652	351	896	653	349
Silis Dumanı	120	121	119	120	120	120	119	121	120
Su	200	202	199	199	201	200	199	201	199
Silis Unu	150	353	607	150	351	611	149	352	608
Deniz Kumu	333	337	332	333	335	335	332	336	333
KT Tozu	351	355	350	351	353	353	350	354	351
KT 1	309	313	308	309	311	311	308	312	309
Çelik Lif	0	0	0	40	40	40	40	40	40
Katkı	19,8	14,4	8,3	19,7	14,3	8,3	19,7	14,4	8,3
Hava(%)	2,8	2,5	3,9	2,4	2,5	2,7	2,5	2,3	3,2
Su/ince Malzeme (Hacimce)	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
Su/Çimento	0,22	0,33	0,61	0,22	0,33	0,61	0,22	0,33	0,61

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)
V0-350	13	77
V0-650	13	84
V0-900	20	80
V1-350	23	69
V1-650	14	82
V1-900	20	77
V2-350	26	68
V2-650	13	83
V2-900	19	78



Şekil 4.1: Çökme-Yayılma Testi Deney Sonuçları

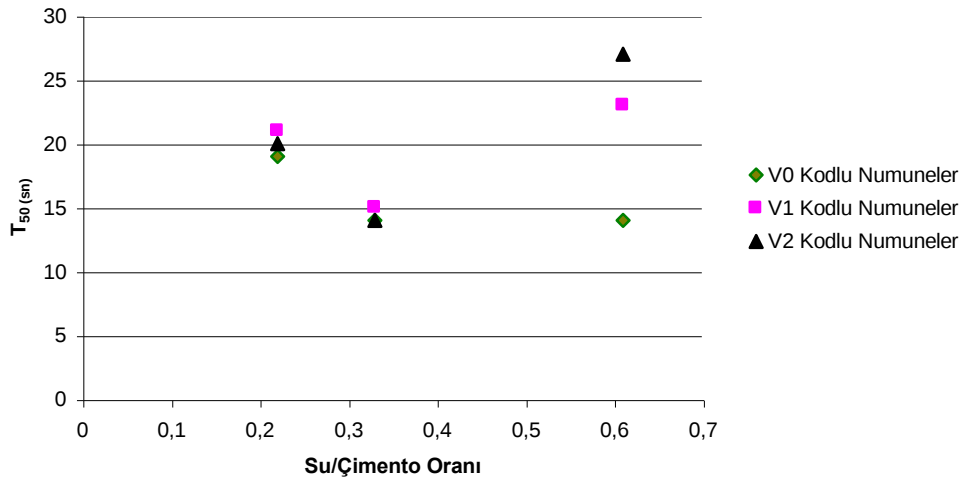
Çökme-yayılma deneyi sonunda elde edilen T_{50} süreleri incelendiğinde lif içermeyen numunelerde yalnızca 900 kg/m³ çimento dozajlı numunelerin 50 cm çaplı dairesel alana yayılma sürelerinin, düşük su/çimento oranı ve yüksek çimento dozajı ile artan kohezyondan dolayı arttığı görülmektedir. Toplam yayılmalarda ise önemli bir azalma olmadığı, kendiliğinden yerleşen beton özelliklerinin sağlandığı görülmektedir. Çelik liflerin kullanıldığı üretimlerde ise yalnızca 350 kg/m³ çimento dozajlı numunelerin T_{50} sürelerinin lifsiz beton üretimlerine göre azalan kohezyondan dolayı arttığı, yüksek dozajlı numunelerde bu sürelerin değişmediği görülmektedir. Aynı zamanda 650 kg/m³ dozajlı, 0.33 su/çimento oranına sahip üretimlerin en iyi sonuçları veren optimum değerlere sahip olduğu görülmektedir.

4.1.3 Kısıtlanmış yayılma deneyi

Kısıtlanmış yayılma testi sonuçları Tablo 4.3. de verilmektedir.

Tablo 4.3: Kısıtlanmış Yayılma Testi Sonuçları

Numune Kodu	T ₅₀ (sn)	Toplam Yayılma (cm)
V0-350	14	77
V0-650	14	84
V0-900	19	81
V1-350	23	70
V1-650	15	82
V1-900	21	82
V2-350	27	68
V2-650	14	82
V2-900	20	81



Şekil 4.2: Kısıtlanmış Yayılma Testi Deney Sonuçları

Kısıtlanmış yayılma deneyi sonunda elde edilen veriler incelendiğinde çökme-yayılma testi sonuçlarına benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir. T₅₀ süreleri incelendiğinde lif içermeyen numunelerde yalnızca 900 kg/m³ çimento dozajlı numunelerin 50 cm çaplı dairesel alana yayılma sürelerinin, düşük su/çimento oranı ve yüksek çimento dozajı ile artan kohezyondan dolayı arttığı görülmektedir. Toplam yayılmalarda ise önemli bir azalma olmadığı, kendiliğinden yerleşen beton özelliklerinin sağlandığı görülmektedir. Çelik liflerin kullanıldığı üretimlerde ise yalnızca 350 kg/m³ çimento dozajlı numunelerin T₅₀ sürelerinin lifsiz beton üretimlerine göre azalan kohezyondan dolayı arttığı, yüksek dozajlı numunelerde bu sürelerin değişmediği görülmektedir. Mevcut lif içeriğinde ve donatı aralığında akışın engellenmediği ve aynı zamanda 650 kg/m³ dozajlı, 0.33 su/çimento oranına

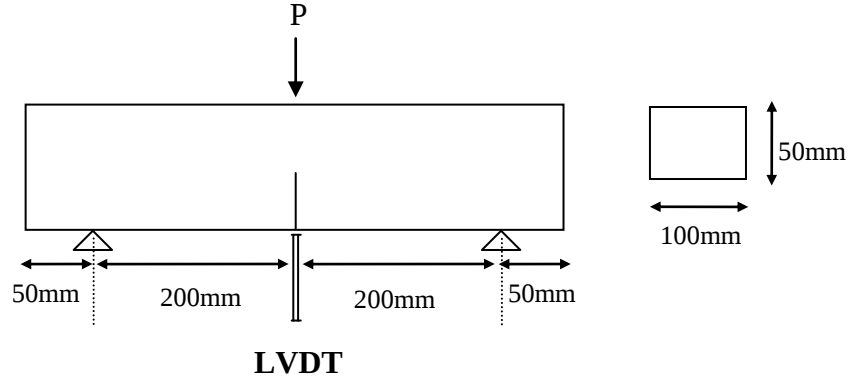
sahip üretimlerin en iyi sonuçları veren optimum değerlere sahip olduğu görülmektedir.

4.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri

4.2.1 Kiriş numunelerde RILEM kırılma enerjisi deney sonuçları

Kırılma enerjisi deneyleri İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi laboratuvarında INSTRON 5500R marka deplasman kontrollü yükleme makinesi kullanarak yapıldı. Bu deneylerde kiriş numunelerinin eğilme dayanımlarının ve kırılma enerjilerinin hesaplanması, bununla birlikte sünekliğin incelenerek, malzemenin davranışı hakkında bilgi edinilmesi amaçlandı. Yapılan deneyler sonucunda yük-sehim eğrileri elde edilerek, lif kullanılmasının ve su/ince malzeme oranının sabit tutulmasının malzemenin eğilme dayanımında ve kırılma enerjisinde meydana getirdiği değişim incelendi.

Kiriş numunelerin ortasından tekil yük uygulanarak yapılan deneylerde, numunenin etkin kesit alanı 100 mm x 50 mm olarak seçildi. Oluşturulan 3 noktalı eğilme deney düzeneği Şekil 4.3’ de gösterilmektedir.

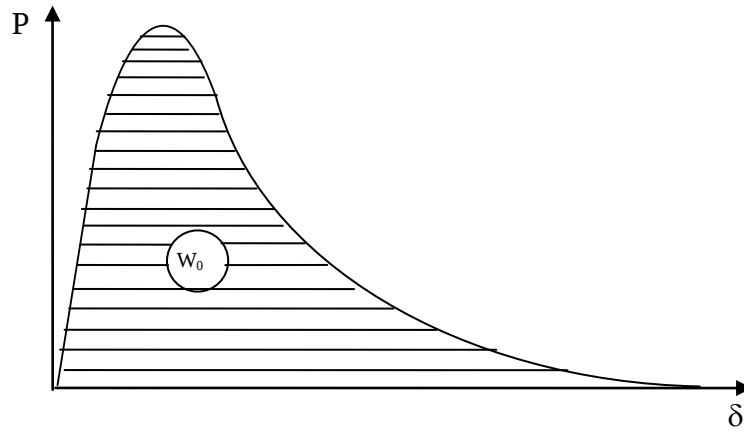


Şekil 4.3: RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme düzeni

Deneyden önce numunenin yan yüzeyine yapıştırılan korniyere sehim ölçmek amacıyla 1 adet LVDT alıcı yerleştirdi. Bu deney düzeneği ile uygulanan yükler ve bu yüklere karşılık gelen düşey deplasmanlar alıcılardan bilgisayara aktarılarak, yük-sehim grafiklerine geçildi. Her numuneye ait yük sehim grafikleri ekler bölümünde verilmektedir.

4.2.1.1 RILEM kırılma enerjisi deneylerinden kırılma enerjisinin hesaplanması

Bir numunenin yük-sehim eğrisi oluşturulduğunda, bu eğrinin altında kalan alan hesaplanarak kırılma süresince harcanan enerjiye geçilmektedir. Sünek malzemelerde şekil değiştirme kapasitesi yüksek olduğu için, kırılma anında büyük sehimlere ulaşılmakta ve harcanan enerji artmaktadır. Bu çalışmada numunelerin yük-sehim eğrileri elde edilerek kırılma enerjileri hesaplanmıştır. Şekil 4.4’ de örnek bir yük-sehim eğrisi görülmekte ve kırılma enerjisinin nasıl hesaplandığı gösterilmektedir.



Şekil 4.4: Yük-Sehim Eğrisinin Şematik Gösterimi

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

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

m = Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı (kg)

g = Yer çekimi ivmesi (9.81 m/sn^2)

δ_o = Kirişin göçme sırasındaki deformasyonu (m)

A_{lig} = Etkin kesit alanı (m^2)

4.2.1.2 RILEM kırılma enerjisi deneylerinden net eğilme dayanımlarının hesaplanması

Numunelerin eğilme dayanımları aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmaktadır.

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

F_{net} = Net eğilme dayanımı

P = Kırılma yükü (N)

L = Mesnetler arası uzaklık (mm)

B = Numune kesitinin genişliği (mm)

D = Numune kesitinin yüksekliği (mm)

Tablo 4.5. de yapılan deneyler sonucunda hesaplanan kırılma enerjileri ve net eğilme dayanımları verilmektedir.

4.2.2 Silindir basınç deneyi

Basınç deneyleri $\varnothing = 10$ cm ve $h = 20$ cm' lik silindir numuneler üzerinde gerçekleştirildi. ELE marka 3000 kN kapasiteli yükleme makinesi kullanılarak test edilen numuneler için her 10 kN' luk yüke karşı gelen eksenel yer değiştirme değerleri okundu. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde, maksimum yükün %33' üne kadar olan grafiğin eğiminden yararlanılarak elastisite modülü hesaplandı.

Silindir basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımları ve elastisite modülü değerleri Tablo 4.4. de verilmektedir.

4.2.3 Yarma deneyi

Yarma deneyleri $\varnothing = 150$ ve $h = 60$ mm' lik disk numuneler üzerinde yapıldı. Numunelere çizgisel yük uygulanarak yarma kuvvetleri bulundu ve bu kuvvetlerden aşağıdaki bağıntı kullanılarak yarma-çekme dayanımlarına geçildi. Yük numunelere alttan ve üstten 4 mm kalınlıklı ince çubuklar vasıtası ile aktarıldı. Gerilme hesaplanırken (4.3) bağıntısı kullanıldı. Bu bağıntıda σ ; Yarma-Çekme dayanımı (MPa), P ; Yük (N), D ; Çap (mm), L ;Yükseklik (mm) dir.

$$\sigma = \frac{2P}{\pi DL} \quad (4.3)$$

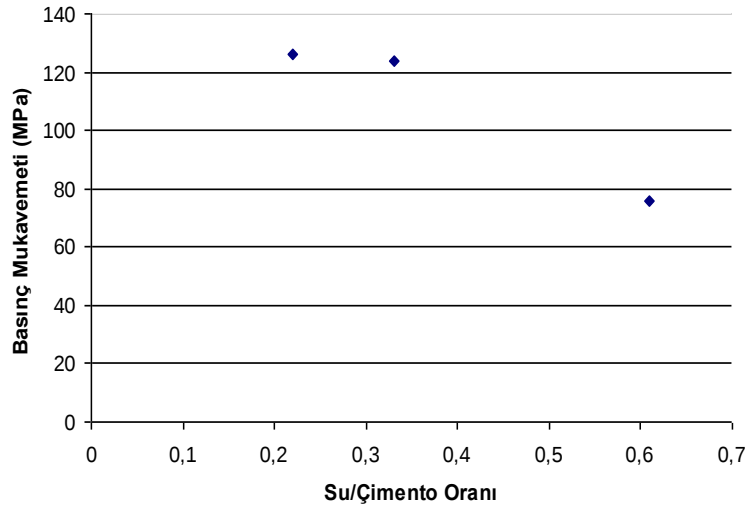
Yarma deneylerinde elde edilen numunelerin Yarma-Çekme dayanımı değerleri, numunelerin ikişer ikişer ortalaması alınarak Tablo 4.4.' de verilmektedir.

4.2.4 Sertleşmiş beton deneyleri

Tablo 4.4: Sertleşmiş Beton Özellikleri

Numune Kodu	Basınç Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Yarma Çekme Dayanımı, (MPa)
V0350	75,5	36,4	7,16
V0650	123,8	44,8	9,55
V0900	126,3	45,8	7,47
V1350	94,9	38,4	8,32
V1650	123,7	42,0	9,48
V1900	138,0	43,8	10,93
V2350	86,0	36,9	7,99
V2650	110,2	43,6	8,56
V2900	124,2	43,9	9,38

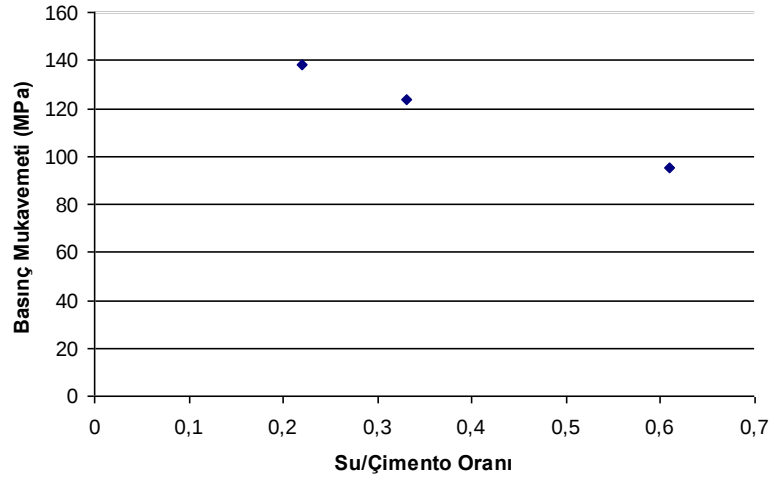
Şekil 4.5 de V0 kodlu numunelerin basınç mukavemetlerinin değişimi görülmektedir. Su / çimento oranının değişimine göre çizilen bu grafikte 900 kg/m³ çimento dozajına sahip üretimlerin basınç mukavemetleri ile 650 kg/m³ çimento dozajına sahip numunelerin basınç mukavemetlerinin artan su/çimento oranına rağmen değişmediği, 650 kg/m³ çimento dozajına sahip numunelerde ise basınç dayanımının %40 azaldığı görülmektedir.



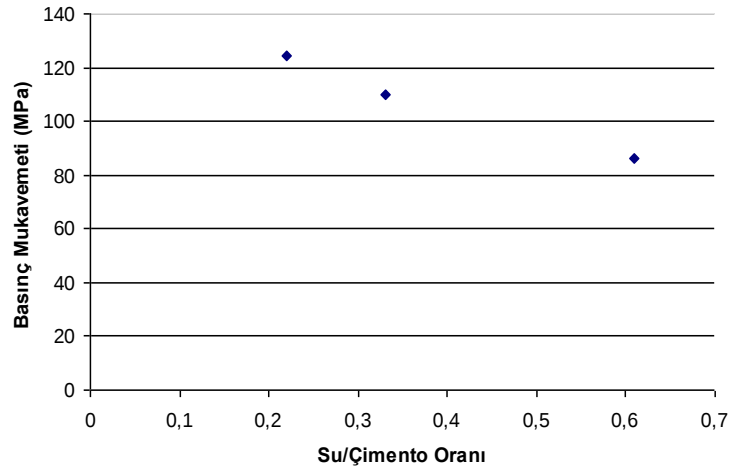
Şekil 4.5: V0 Kodlu Numunelerin Basınç Mukavemetlerinin Değişimi

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 de V1 ve V2 kodlu numunelerin basınç mukavemetlerinin değişimi görülmektedir. Su / çimento oranının değişimine göre çizilen bu grafiklerde 650 kg/m³ çimento dozajına sahip üretimlerin basınç mukavemetlerinin, 900 kg/m³ çimento dozajına sahip numunelerin basınç mukavemetlerine göre, artan su/çimento oranı ve azalan çimento dozajından dolayı aderansta meydana gelen azalma nedeni

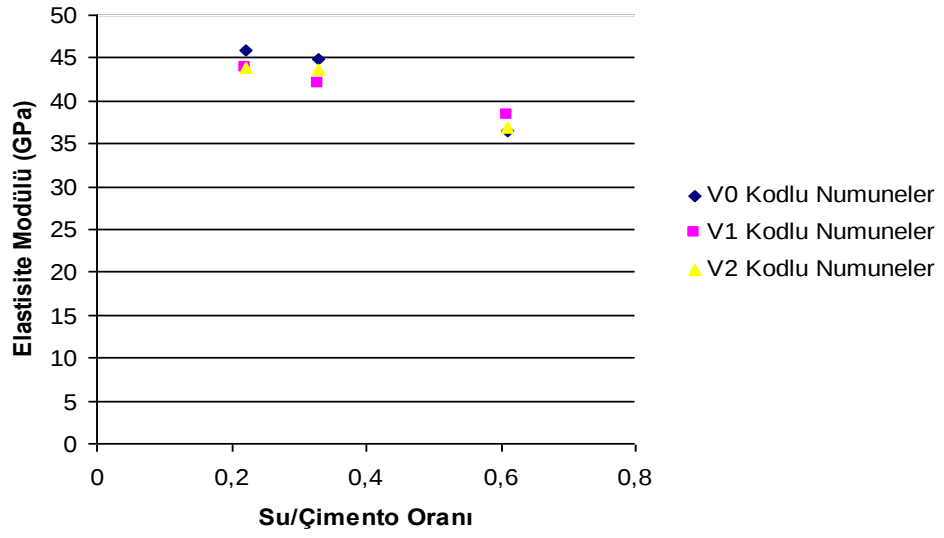
ile azaldığı, 350 kg/m³ çimento dozajına sahip numunelerde ise basınç dayanımının lifsiz üretimlerde görülen davranışa benzer şekilde azaldığı görülmektedir.



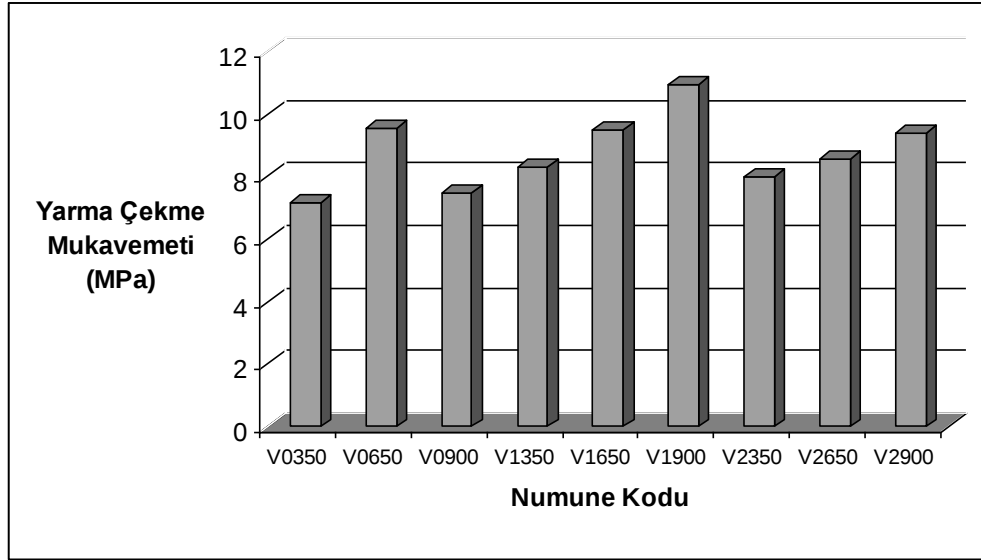
Şekil 4.6: V1 Kodlu Numunelerin Basınç Mukavemetlerinin Değişimi



Şekil 4.7: V2 Kodlu Numunelerin Basınç Mukavemetlerinin Değişimi



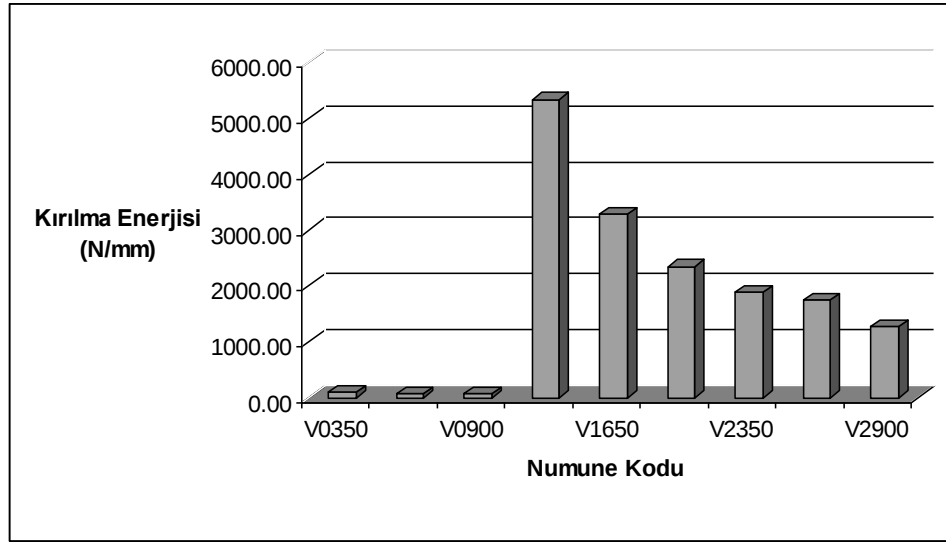
Şekil 4.8: Elastisite Modüllerinin değişimi



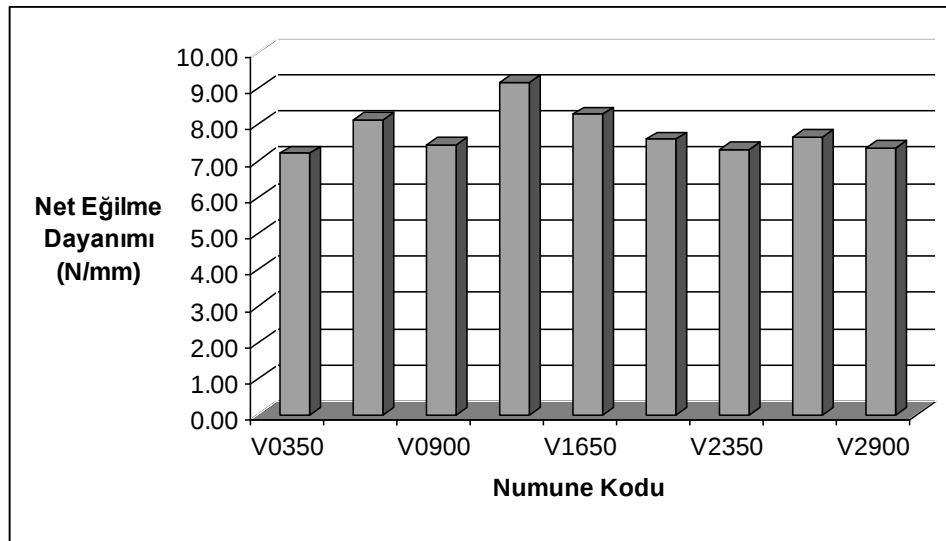
Şekil 4.9: Yarma-Çekme Mukavemetlerinin Değişimi

Tablo 4.5: Kırılma Enerjileri ve Net Eğilme Dayanımları

Numune Kodu	Son Deplasman (mm)	Kırılma Enerjisi (J/m ²)	Net Eğilme Dayanımı (MPa)
V0350	0,67	100	7,19
V0650	0,60	77	8,13
V0900	0,60	73	7,41
V1350	10,0	5335	9,14
V1650	10,0	3286	8,27
V1900	9,8	2346	7,58
V2350	10,0	1877	7,29
V2650	10,0	1741	7,66
V2900	9,9	1277	7,34



Şekil 4.10: Kırılma Enerjilerinin Değişimi



Şekil 4.11: Net Eğilme Dayanımlarının Değişimi

4.3 Silindir Basınç Deneylerinden Elde edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 kendiliğinden yerleşen lifli ve lifsiz betonların basınç mukavemetlerinin değişimini göstermektedir. 0.51 sabit hacimsel su/ince malzeme oranında su/çimento oranı 0.22'den 0.33 değerine kadar artmasına ve çimento dozajı 250 kg/m^3 azalmasına rağmen lif içermeyen numunelerde basınç mukavemetinin değişmediği, oluşan çok küçük farkın deney sonuçlarındaki dağınıklar içinde kaldığı görülmüştür. Çimento dozajının 350 kg/m^3 değerine düştüğü, su/çimento oranının 0.61'e çıktığı numunelerde ise basınç mukavemetinin %40 azaldığı görülmüştür. Çelik lif içeren numunelerde ise yalnızca 650 kg/m^3 dozajlı numunelerde, düşük mukavemetli liflerin kullanıldığı üretimlerde ise yalnızca 900 kg/m^3 dozajlı numunelerde basınç mukavemetlerinin lifsiz numunelere göre değişmediği gözlemlenmiştir. 350 kg/m^3 dozajlı üretimlerde lif içeriği basınç mukavemetini artırırken yüksek mukavemetli lifler düşük mukavemetli liflere göre daha yüksek basınç mukavemeti vermiştir. Yüksek mukavemetli lif içeren betonlarda aderansın yüksek dozajlarda çimento kullanılması ile arttığı görülmüştür.

4.4 Elastisite Modüllerinin Değerlendirilmesi

Şekil 4.8' de elastisite modüllerinin değişimi görülmektedir. Lif kullanılması halinde 650 ve 900 dozajlı üretimlerde elastisite modüllerinin ortalama olarak %5 azaldığı görülmüş, 350 dozajlı üretimlerde düşük mukavemetli lif kullanıldığında elastisite modülünün değişmediği, yüksek mukavemetli lif kullanıldığında ise %7 arttığı görülmüştür.

4.5 Disk Yarma Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Şekil 4.9 da kendiliğinden yerleşen lifli ve lifsiz beton numunelerinin ortalama yarma-çekme dayanımları verilmektedir. Çelik lifli numunelerin tamamında öğütülmüş silis ununun çimento ile ikame edilmesi sonucunda yarma çekme mukavemetlerinin azaldığı görülmüştür. V1 kodlu numunelerde 900 dozajdan 650 dozaja inerken bu azalma %13 oranında olurken V2 kodlu numunelerde bu oran %9 olmuştur. Yüksek mukavemetli lifler söz konusu iken lifler daha iyi performans göstererek düşük mukavemetli lif içeren numunelere göre daha yüksek yarma çekme dayanımları elde edilmiştir. Yapılan deneyler çimento yerine kullanılan öğütülmüş silis ununun aderansı olumsuz etkilediğini göstermiştir. Beklenen davranışın elde edilememesinin, öğütmenin ve mevcut koşullar altında uygulanabilen ısıtıl işlemin yeterli olamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.6 RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

Şekil 4.10’ da kendiliğinden yerleşen lifli ve lifsiz beton numunelerinin ortalama kırılma enerjisi değerleri verilmektedir. Lif içermeyen numunelerde beklendiği gibi 350 kg/m^3 dozajlı su/çimento oranı 0,61 olan üretimlerde en yüksek kırılma enerjisi değerleri elde edilmiştir. Bu davranışın nedeninin mukavemetin azalması ile artan süneklik olduğu bilinmektedir. Çelik liflerin kullanılması durumunda ise kırılma enerjilerinde çok yüksek artışlar elde edilirken, benzer şekilde düşük çimento dozajlı üretimlerde daha büyük değerlere erişilmiştir. Yüksek mukavemetli lifler söz konusu iken düşük mukavemetli liflere göre daha yüksek performans elde edilmiştir.

4.7 Net Eğilme Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Şekil 4.11 de kendiliğinden yerleşen lifli ve lifsiz beton numunelerinin ortalama net eğilme dayanımları verilmektedir. Net eğilme dayanımları incelendiğinde yarma çekme dayanımlarına göre oldukça farklı sonuçların elde edildiği görülmüştür. Düşük mukavemetli liflerin kullanıldığı üretimler dozajdan ve su/çimento oranından bağımsız olarak birbirine çok yakın eğilme dayanımı değerleri vermişlerdir. Yüksek mukavemetli lifler söz konusu iken beklenmeyen bir davranış görülmüştür. Çimento dozajı azalıp su/çimento oranı artarken eğilme dayanımlarının arttığı gözlemlenmiştir. Aderansa bağlı olmayan bu davranışın üretim sırasında lif yöneliminden kaynaklanabileceği yorumu yapılmıştır.

5. GENEL SONUÇLAR

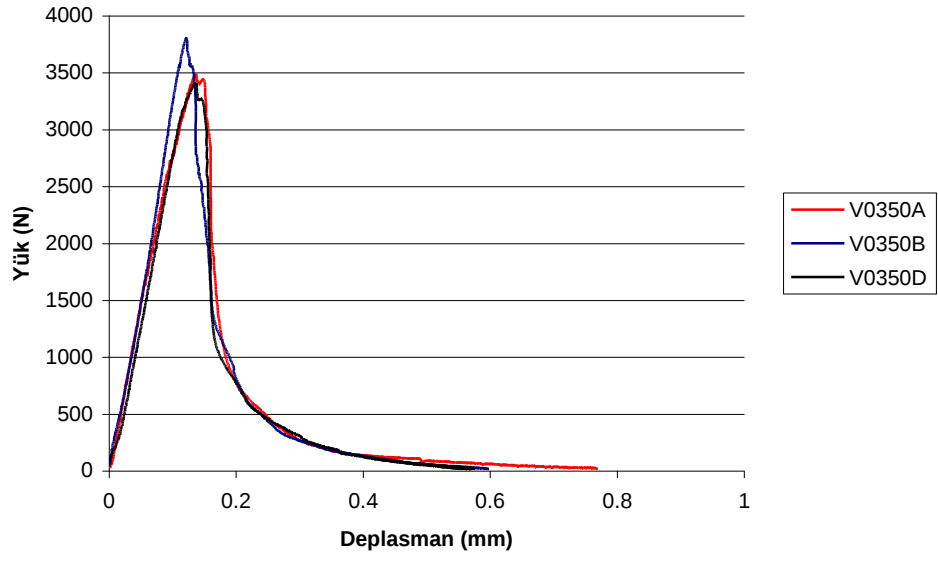
- Sabit 0.51 hacimsel su/ince malzeme oranında su/çimento oranı 0.22'den 0.33 değerine kadar artmasına ve çimento dozajı 900 kg/m³ değerinden 650 kg/m³ değerine kadar azalmasına rağmen basınç mukavemetlerinde önemli bir azalma olmamıştır. 350 kg/m³ çimento dozajı, 0.61 su/çimento oranı değerine sahip numunelerde ise basınç mukavemetinin 900 kg/m³ dozajlı numunelere göre lifsiz betonlarda %40, lifli betonlarda %30 azaldığı görülmüştür.
- Yarma-çekme dayanımları çimento dozajı azaldıkça gerçekleşen aderans probleminden dolayı azalmaktadır. Yüksek dayanımlı lif içeren betonların yarma-çekme dayanımı, düşük dayanımlı lif içeren betonlara göre daha yüksektir.
- Lif ilavesi sünekliği belirgin biçimde arttırmaktadır. Lifler dayanımdan çok yutulan enerjiyi etkilemektedir. Lifli betonlarda 10mm sehim değerine kadar ölçülen enerjiler, yalın betonların kırılma enerjilerinin 15 ile 50 katı arasında değişmektedir.
- Lif içeriği aynı kalmasına karşın lif dayanımının sünekliği önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Bu etki düşük dozajlı betonlarda liflerin sıyrılması nedeniyle daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak, beton dayanımı arttıkça liflerdeki göçmeler sıyrılmadan çok kopma şeklinde gerçekleşmektedir. Dolayısı ile süneklik yüksek dozajlı betonlarda azalmaktadır.
- Çimento dozajının artması ve su/çimento oranının azalması ile artan viskoziteden dolayı yayılma sürelerinde artışın gerçekleştiği görülmektedir. Lif kullanılması durumunda ise yalnızca 350 kg/m³ dozajlı numunelerde yayılma süresi önemli ölçüde arttığı görülmektedir.
- Betonun donatıları temsil eden engeller arasından geçişi sırasında da aynı davranışın sergilendiği görülmektedir.
- 650 kg/m³ çimento dozajına ve 0,33 su/çimento oranına sahip üretimlerin işlenebilirliği yüksek optimum karışımlar olduğu görülmektedir.

KAYNAKLAR

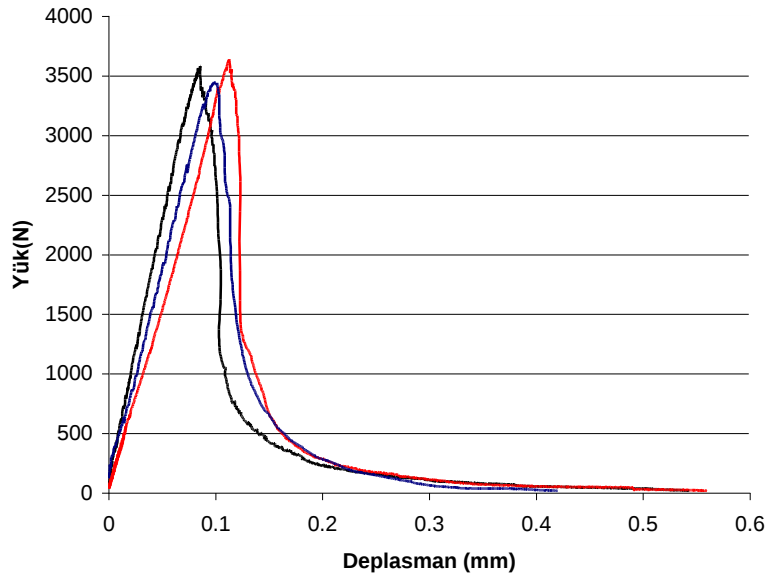
- [1] **Grünwald, S., Walraven, J. C.**, Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete., Cement and Concrete Research 31 (12): 1793-1798 Dec 2001.
- [2] **Bornemann, R., Schmidt, M.**, The role of powders in concrete in: 6th internationally symposium on utilization OF high strength/high performance concrete Leipzig 2002.
- [3] **Kocataşkın, F.**, 1991. Betonun Dünü Bugünü Yarını, 2. Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton, Kardeşler Matbaası, (TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası) Sf. 23-42.
- [4] **Celep, Z., Kumbasar, N.**, 2000. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Beta Dağıtım, İstanbul
- [5] **Taşdemir, M.A.**, 2001. Kent Mobilyalarında Kullanılan Yeni Çimento Esaslı Kompozitler, 1. Uluslararası Kent Mobilyaları Sempozyumu, Sempozyum Bildirileri, Sf. 535-547.
- [6] **Özyurt, N.**, 2000. Ultra Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [7] **Balaguru, P.N., Shah, S.P.**, Fiber Reinforced Cement Composites, McGraw-Hill, New York.
- [8] **Kaushik, S. K.**, High Performance Cement Composites,
<http://www.geocities.com/asiaconstruct/tech22.htm> 2004.
- [9] **Akman, S.**, 1990. Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [10] **Okamura, H.**, Development of Self-Compacting High-Performance Concrete, Self-Compacting High-Performance Concrete Ferguson Lecture for 1996.
- [11] **Perrson, B.**, 2000. A Comparison Between Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete and Corresponding Properties of Normal Concrete, Lund Institute of Technology, Sweden.

- [12] **Bartos, P.J.M., Sonebi, M., Tamim, A.K.**, Workability and Rheology of Fresh Concrete: Compendium of Tests, RILEM Technical Committee TC 145-WSM Workability of Special Concrete Mixes.
- [13] **Arslan, A.**, 1999. Lifli Betonların Darbe Etkisi Altında Genel Özellikleri, Çelik Tel Donatılı Betonlar Sempozyumu, Sempozyum Bildirileri.
- [14] **Kurtoğlu, K.**, 2001. Reaktif Pudra Betonlarının Mekanik Davranışı, Lisans Tezi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi.
- [15] **Goldman, A., Bentur, A.**, 1989. Bond Effect in High-Strength Silica-Fume Concretes, ACI Material Journal **86**, No.5, September-October, pp.440-447.
- [16] **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.
- [17] **Yeğinobalı, A.**, 2001. Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği.
- [18] **Dodson, V.H.**, 1990. Concrete Admixtures, Published by Van Nostrand Reinhold, New York.
- [19] **Naaman, A.E., Najm, H., Otter, D.**, 1991. Elastic Modulus of SIFCON in Tension and Compression, ACI Materials Journal / November-December 1991.
- [20] **Taşdemir, C.**, 1994. Agrega Çimento Hamuru Arayüzeyi Mikro Yapısının Yüksek Mukavemetli Betonların Kırılma Parametrelerine Etkisi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [21] **Uyan, M.**, 1982. Isıl İşlem Uygulaması ile Birlikte Katkı kullanımının Beton Özelliklerine Etkisi, Doçentlik Tezi.
- [22] **Doğan, Ü., A.**, 2000. Yeni Kuşak Süper Akışkanlaştırıcıların Harç ve Beton Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.

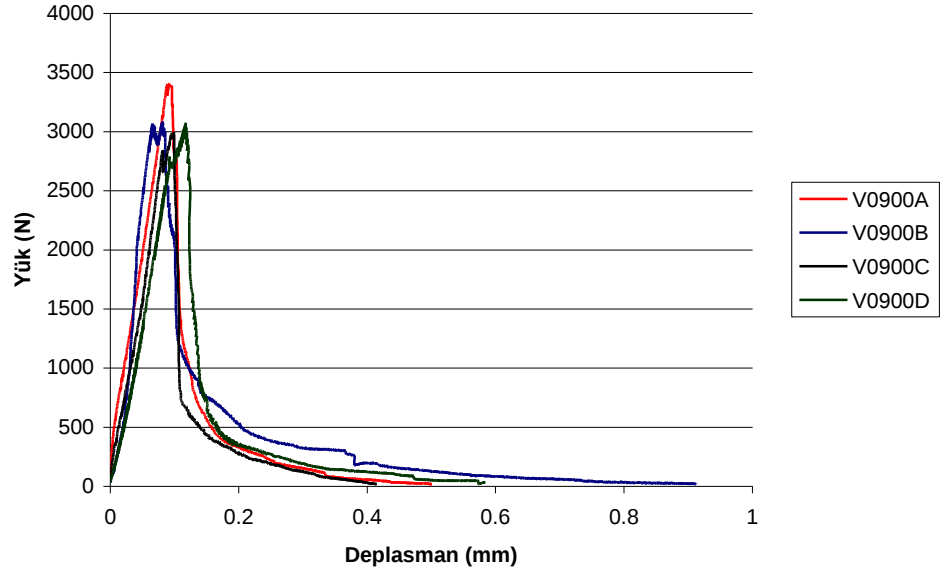
EKLER



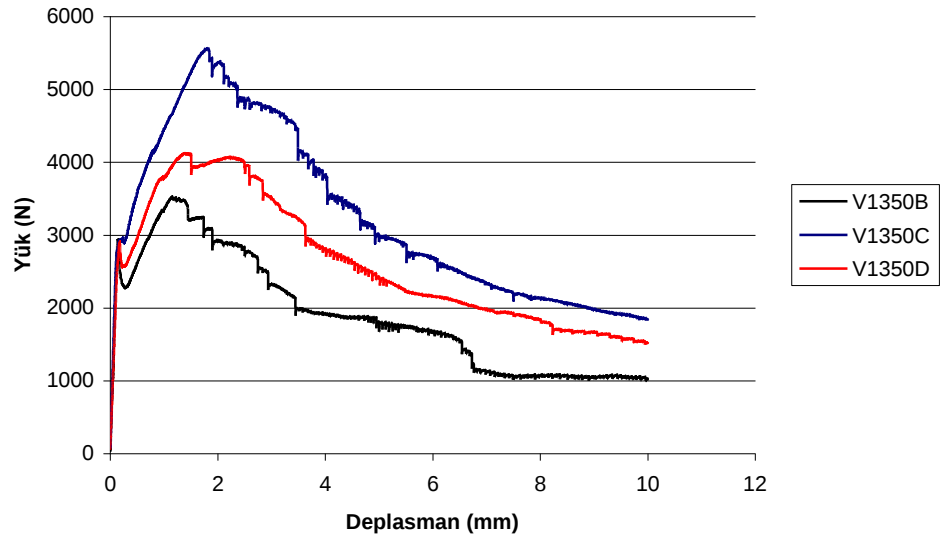
Şekil A.1: V0350 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



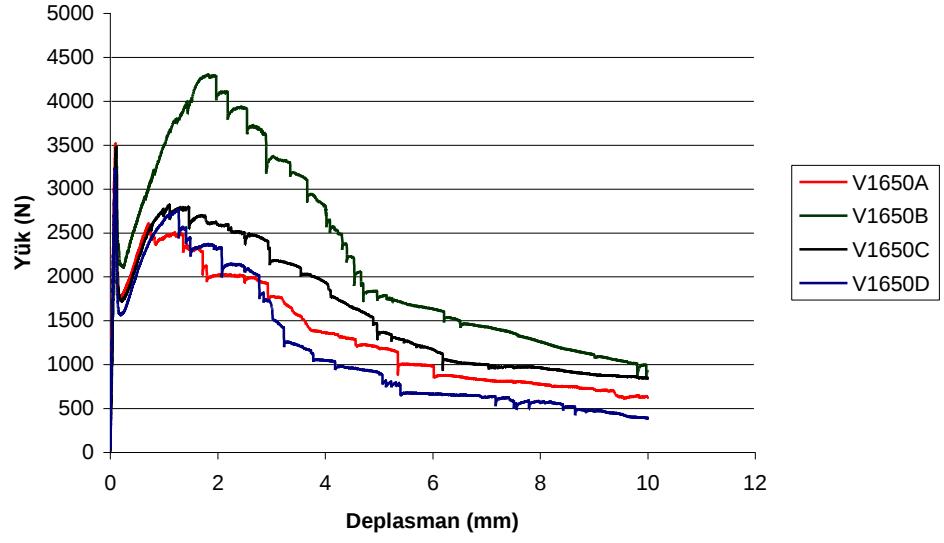
Şekil A.2: V0650 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



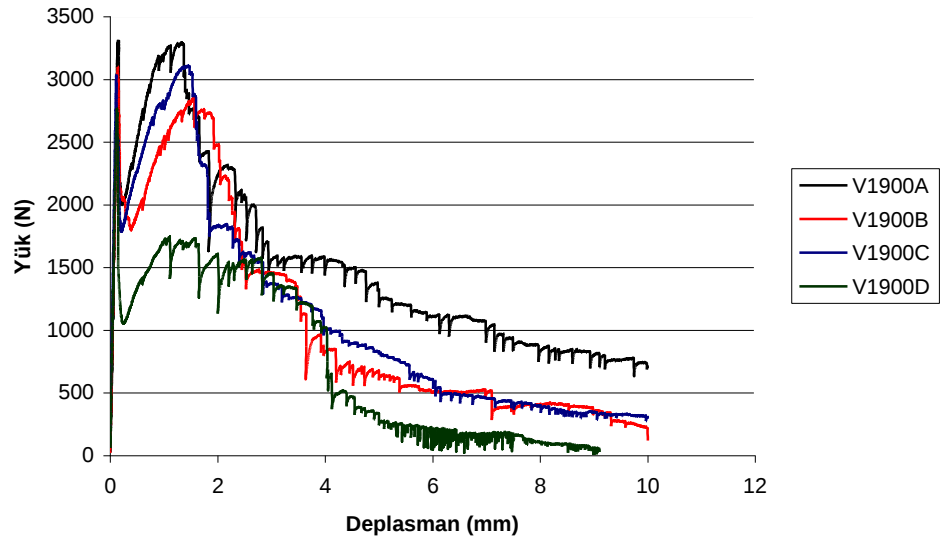
Şekil A.3: V0900 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



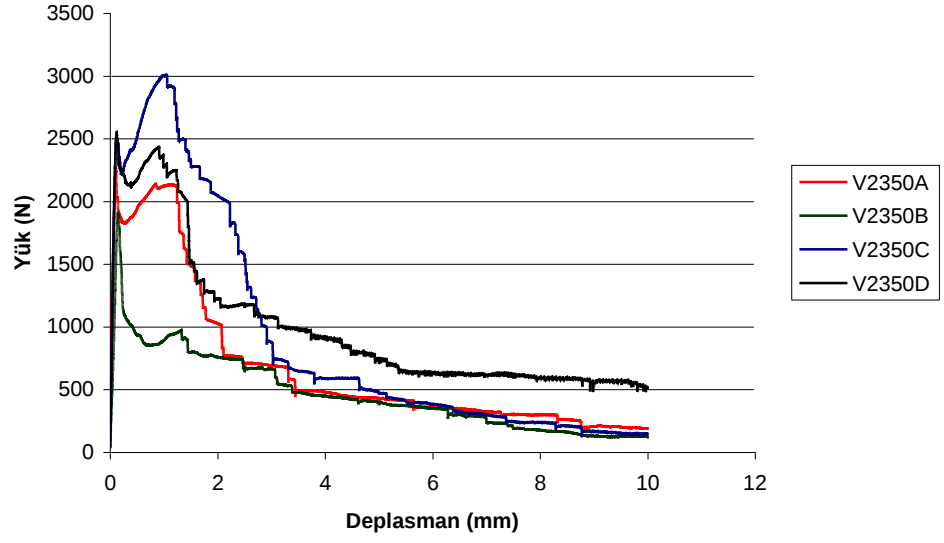
Şekil A.4: V1350 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



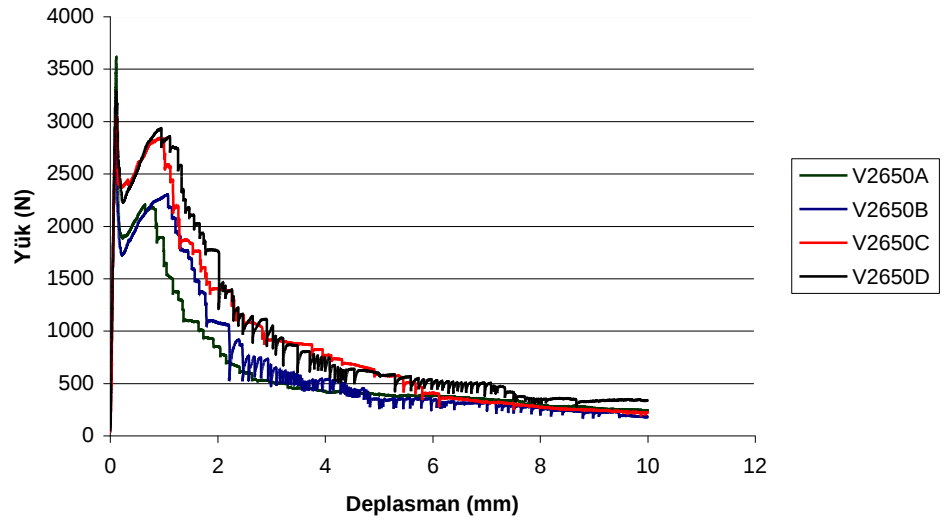
Şekil A.5: V1650 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



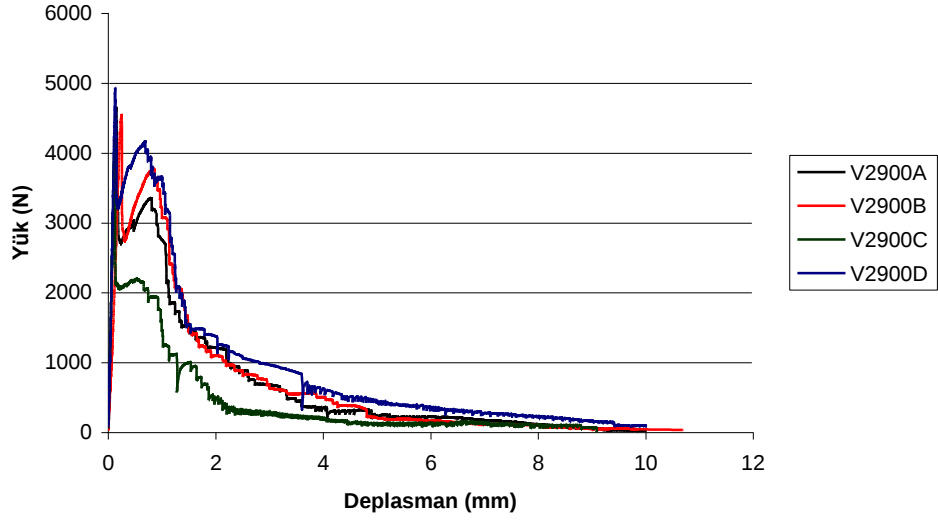
Şekil A.6: V1900 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



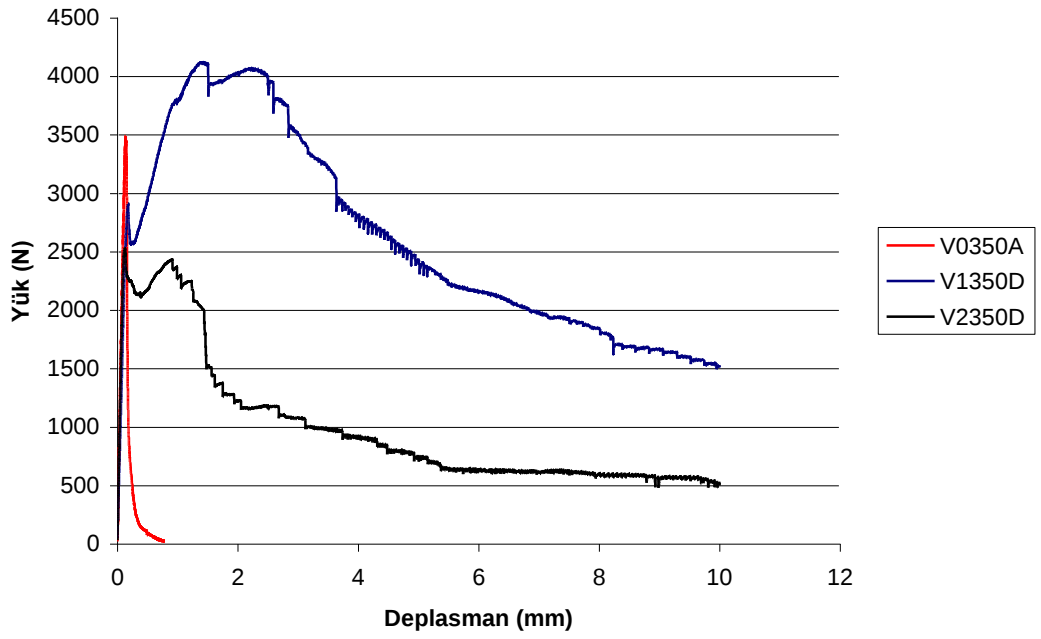
Şekil A.7: V2350 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



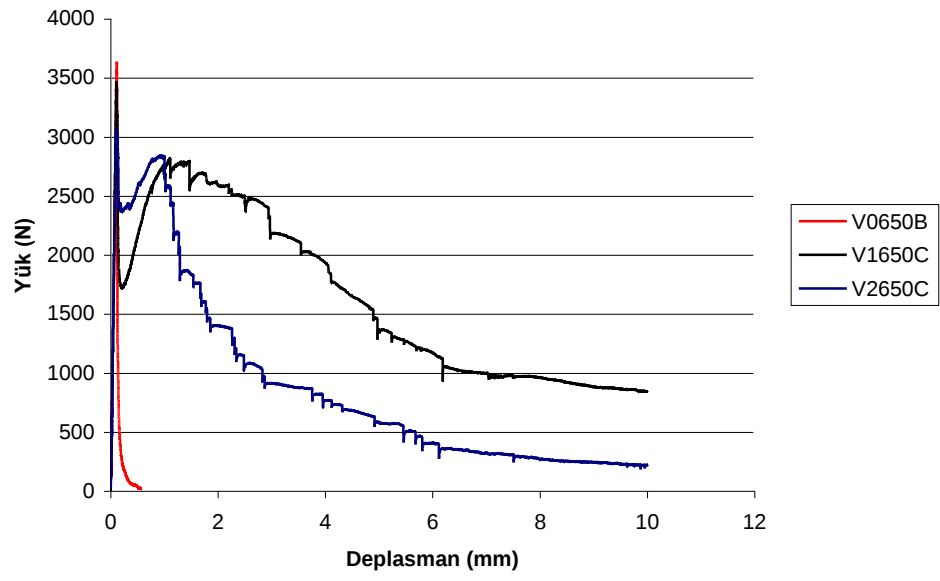
Şekil A.8: V2650 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



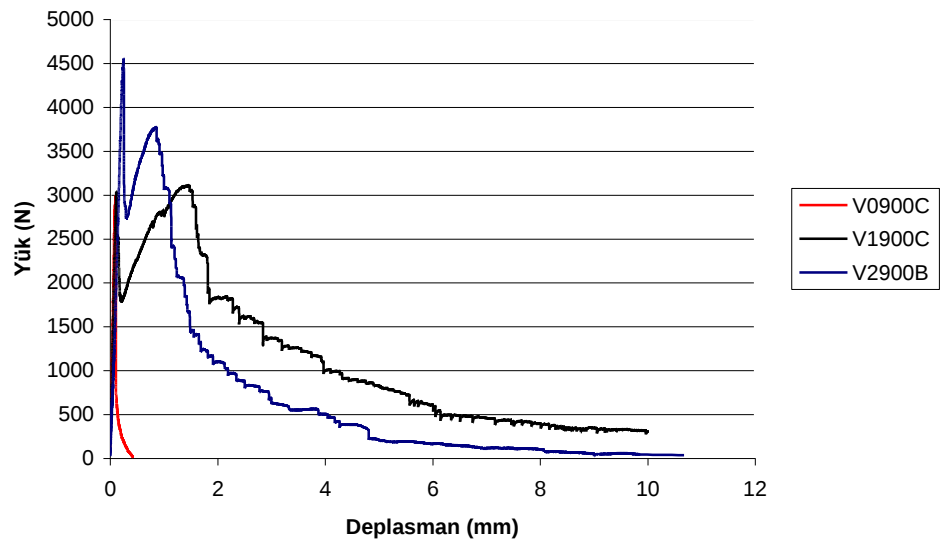
Şekil A.9: V2900 Kodlu Numunelerin Yük Deplasman İlişkisi



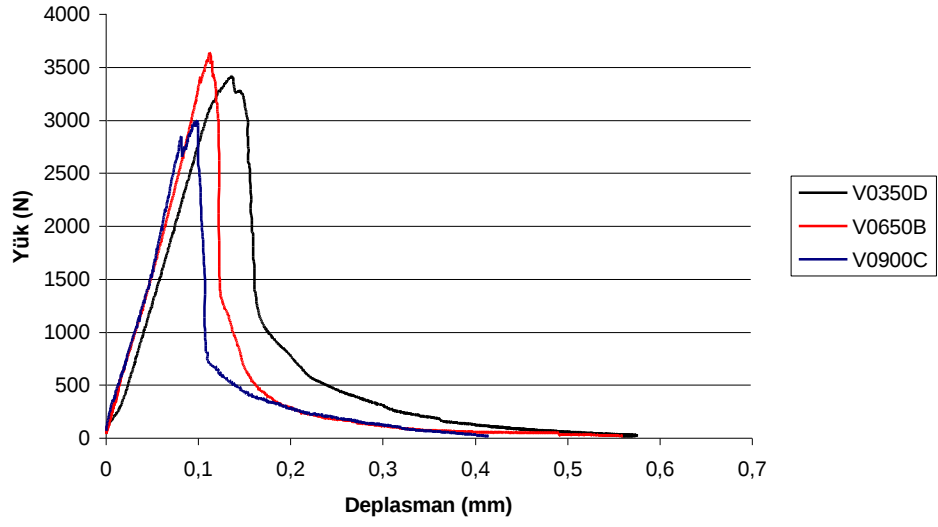
Şekil A.10: 350 Dozajlı Numunelerin Ortalama Yük Deplasman İlişkisi



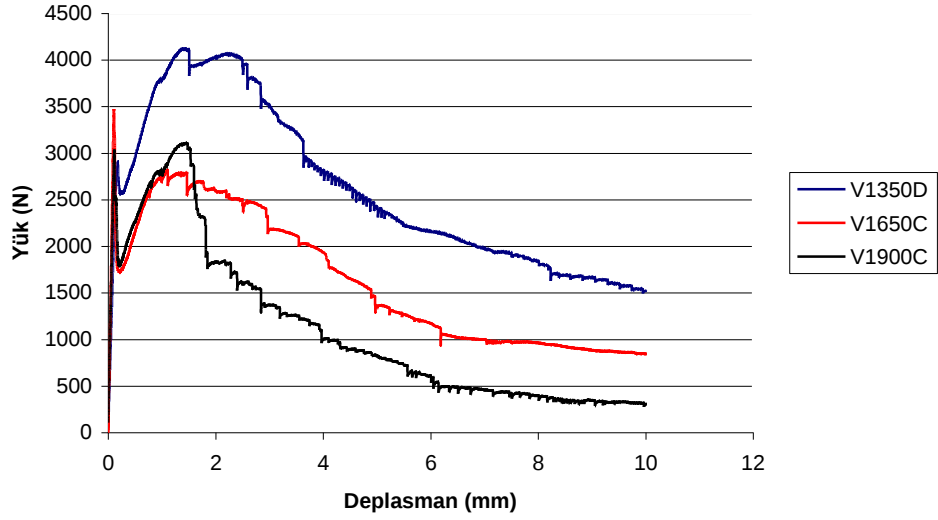
Şekil A.11: 650 Dozajlı Numunelerin Ortalama Yük Deplasman İlişkisi



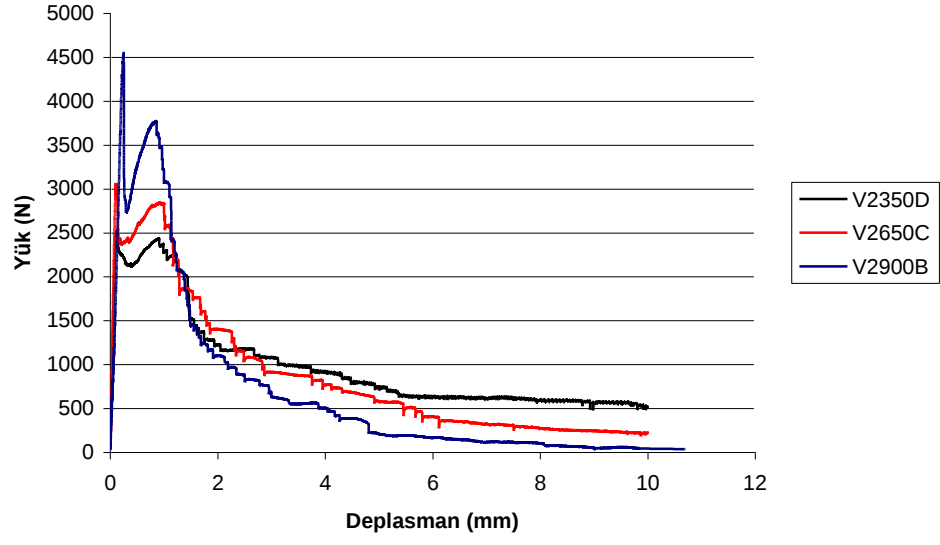
Şekil A.12: 900 Dozajlı Numunelerin Ortalama Yük Deplasman İlişkisi



Şekil A.13: Farklı Dozajlarda Lifsiz Numunelerin Ortalama Yük Deplasman İlişkisi



Şekil A.14: Farklı Dozajlarda Yüksek Mukavemetli Lif İçeren Numunelerin Ortalama Yük Deplasman İlişkisi



Şekil A.15: Farklı Dozajlarda Düşük Mukavemetli Lif İçeren Numunelerin Ortalama Yük Deplasman İlişkisi

ÖZGEÇMİŞ

Cengiz Şengül, 1979 yılında İstanbul’ da doğdu. Orta ve lise öğrenimini Eyüp Otakçılar Lisesi’ nde tamamladı. 1996 yılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girdi. 1996–1997 öğretim yılında İ.T.Ü. İngilizce Hazırlık Bölümünü tamamladıktan sonra 1997–1998 öğretim yılında başladığı lisans öğrenimini 2002 yılında tamamladı. 2002 yılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Anabilimdalı’ nda yüksek lisans öğrenimine başladı ve Mart 2005’ de bu bölüme araştırma görevlisi olarak atandı. Halen bu görevine devam etmektedir.