T.C.

GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETONDA VAKUM UYGULAMASI VE POLİPROPİLEN LİF KATKISININ BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet NERGİZ

EKİM 2016

GÜMÜŞHANE

T.C.

GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BETONDA VAKUM UYGULAMASI VE POLİPROLİPEN LİF KATKISININ BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet NERGİZ

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

"İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı"

Yüksek Lisans Programında Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05.10.2016

Tezin Sözlü Savunma Tarihi : 28.10.2016

EKİM 2016

KABUL VE ONAY

Yrd. Doç. Dr. Mustafa ÇULLU danışmanlığında **Mehmet NERGİZ** tarafından hazırlanan **"BETONDA VAKUM UYGULAMASI VE POLİPROLİPEN LİF KATKISININ BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN BELİRLENMESİ"** isimli bu çalışma jürimiz tarafından Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak Oy Birliği ile kabul edilmiştir.

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Osman KARA

Üye (Danışman) : Yrd. Doç. Dr. Mustafa ÇULLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ömer CAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa DURMAZ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Alaaddin YURAL

ONAY

Bu tez 25/01/2017 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. İbrahim TURAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu tez çalışması 3501 TÜBİTAK Kariyer Geliştirme Programı projeleri kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: 212M012

TEZ BEYANNAMESİ

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalı'nda, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlamış olduğum "**BETONDA VAKUM UYGULAMASI VE POLİPROLİPEN LİF KATKISININ BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN BELİRLENMESİ**" isimli tez çalışmasında; bütün bilgi ve belgeleri genel akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel ve yazılı bütün bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak hazırlayıp sunduğumu, başka kaynaklardan yararlandığım bilgileri metin ve kaynaklarda eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma süresince bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksi durumda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 03/10/2016

Mehmet NERGİZ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BETONDA VAKUM UYGULAMASI VE POLİPROLİPEN LİF KATKISININ BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN BELİRLENMESİ

Mehmet NERGİZ

Gümüşhane Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mustafa ÇULLU

2016

Beton hem taşıyıcı bir sistem olarak hem de büyüklük ve şekil belirleyicisi olarak en önemli inşaat malzemesidir. Genellikle sıkıştırma kuvvetlerini engellemek için kullanılır. Ek olarak korozyona, donma-çözülme ve bükülme etkilerine dayanıklıdır. Uygunsuz yükleme veya kötü hava koşulları betonun ekonomik ömrünü kısaltabilir. Yapılan çalışmaların çoğu betonun ekonomik ömrünü uzatmak üstünedir. Dolayısıyla araştırmacılar özellikle su-çimento oranı ve ek içerikler üzerine çalışmaktadırlar. Günümüzde kimyasal katkı maddeleri daha az su ve daha az çimento kullanılarak dayanıklı beton üretmek için en çok tercih edilen malzemelerdir. Polipropilen lif ise bükülme, korozyon, donma/çözülme gibi etkilere dayanıklılığına ek olarak, daha çok enerji kaldırabilme özelliği nedeniyle tercih edilmektedir.

Beton vakum uygulaması yeni karıştırılmış betondan bir miktar suyun çekilmesiyle çalışır. Bu yöntemde su ile birleşme önemli olduğundan bir miktar su içeride kalırken, işlenebilirlik önemli olduğundan bir miktar su çekilir. Betonun enerji kaldırabilme kapasitesini arttırmak için çelik lifler ve sentetik lifler de kullanılmaktadır. Polipropilen lifler, çelik lifler ve diğer sentetik liflerin alternatifleridir. Özellikle çelik lifler dış mekân şartlarına maruz kaldıklarında korozyon gibi etkiler gösterebilirler, dolayısıyla betona yaptıkları katkı da azalmış olur. Dolayısıyla son yıllarda sentetik lifler beton üreticileri tarafından daha çok tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, üç farklı beton kuvvet sınıfı üretilmiş, üç farklı birleşim oranı ve iki farklı polipropilen lif normal ve vakumlu betonda kullanılmıştır. 42 farklı beton çeşidi üretilmiş ve sıkıştırma testi, bükme testi, levha testi ve enerji kaldırma kapasitesi testi gibi fiziksel testler uygulanmıştır. Bu çalışmanın amacı vakum testi ve lif uzunluk testi kullanarak beton performansını belirlemekti. Sıkıştırma testinde lifler düşük kuvvetteki betonda olumlu etki gösterirken, orta ve yüksek kuvvetteki betonda olumsuz etkiler gösterdi. Vakum uygulamasının lifli betonda sıkıştırma kuvvetini %20'ye kadar arttırdığı görüldü. Liflerin uzun veya kısa olması anlamlı bir değişiklik yaratması. Öte yandan, en yüksek oranda lif içeren beton en düşük sıkıştırma kuvvetine sahipti. Kiriş bükme testinde en yüksek taşıma değerinde lifsiz beton %30'a kadar daha yüksek sonuç verdi; ancak 3 mm'ye kadar bükülmelerde kiriş bükme testi %60'a kadar daha düşük sonuç verdi. Enerji kaldırma testinde lifli beton lifsiz betondan 8-16 kat daha yüksek değerlere ulaştı. Enerji kaldırma kapasitesinde normal beton ve vakumlu beton arasında anlamlı bir fark görülmedi. Betonda kullanılan polipropilen lif miktarı ve uzunluğu ile vakum kullanımının beton özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu sonucuna varıldı.

Anahtar Kelimeler: Basınç Dayanımı, Enerji Sönümleme, Kiriş Bükme, Levha Testi, Lifle Desteklenmiş Beton, Polipropilen Lif, Vakumlu Beton

ABSTRACT

MS THESIS

CONCRETE VACUUM IMPLEMENTATION AND DETERMINATION OF THE EFFECTS OF POLYPROPYLENE FIBER COMPOUND ON CONCRETE CHARACTERISTICS

Mehmet NERGİZ

Gümüşhane University

The Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Mustafa ÇULLU

2016

Concrete is the most important building material both load-bearing system and determination shape and size. Concrete is generally used to prevent the compression forces. Furthermore, concrete can convey under influences corrosion, freezing-thawing and bending. Economic life of concrete can decreasing due to unfavorable load and unfavorable weather conditions. Most of the research, economic life of concrete is increasing. So, especially researchers research on the water-cement ratio and additive. Nowadays, chemical additives is most preferred product for production of durable concrete with less water and less cement. Moreover, polypropylene fiber prefers for bending, corrosion, freezing - thawing for contribute to more energy absorption.

Vacuum concrete application is withdrawn an amount of mixing water from the fresh concrete. In this method, for the hydration reaction necessary water remains in the concrete but necessary an important part of the water withdrawns with the vacuum from fresh concrete for workability. Also, steel fibers and synthetic fibers are used to increase the energy absorption capacity of the concrete. Polypropylene fibers and steel fibers are used type an alternative synthetic fiber. In particular, steel fibers show effects such as corrosion in concrete exposed to outdoor conditions therefore, positive effects on concrete are also short-lived. So, synthetic fibers is more preferred by concrete manufacturers in recent years.

In this study, three different concrete strength classes produced and three different rates and two different length polypropylene fibers are used in normal concrete and vacuum concrete. Produced over 42 types of concrete are perform tested physical tests, compression test, bending tests, slab test and energy absorption capacity tests. The aim of this study, concrete performance is determination with aplication of vacuum test, fiber length test. In the compression test of fibers are showed positive effects in low strength concrete but it is showed adverse effects in normal and high strength concrete. Aplication of vacuum is increased up to ~20 percent compression strength in the fiber concrete. To be long or short of fibers are not showed significant difference. However, the concrete that contains the highest ratio of has shown the lowest compressive strength value of concrete. Bending stress in the beam bending test, considering the maximum load value Up to ~30 percent increase are showed in the non-fibrous concrete. However, up to 3 mm deflection bending stress in the beam bending test showed decline of up to ~60 percent. Looking at the energy absorption values, it showed 8-16 times higher values of the fibrous concrete according to non-fibrous concrete. Between normal concrete and vacuum concrete are not showed significant difference energy absorption capacity. As a result, the amount and length of polypropylene fibers and the use in the of vacuum concrete have significant influence on concrete properties.

Keywords: Compressive Strength, Energy Absorption, Beam Bending, Slab Test, Fiber Reinforcement Concrete, Polypropylene Fiber, Vacuum Concrete

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışmalarım sırasında bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım Sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Mustafa ÇULLU'ya, çalışmalarımda büyük emeği olan Yrd. Doç. Dr. Hakan BOLAT'a, deneysel çalışmalarımla ilgili Yapı Malzemesi Bölümü laboratuvarlarının tüm kapılarını açan Bölüm başkanımıza, 2013-2015 yılları arasında İnşaat Mühendisliği lisans 3. ve 4. Sınıf öğrencilerine teşekkür ederim.

212M012 numaralı proje kapsamında gerçekleştirdiğim bu tez için TÜBİTAK'a şükranlarımı sunarım.

Mehmet NERGİZ
Gümüşhane, 2016

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET IV
ABSTRACT VI
TEŞEKKÜR VIII
İÇİNDEKİLER IX
ŞEKİLLER DİZİNİ XI
TABLOLAR DİZİNİ XV
SEMBOLLER VE KISATMALAR DİZİNİ XVI
1. GİRİŞ 1
1.1. Çalışmanın Amacı 4
2. GENEL BİLGİLER 5
2.1. Beton Dayanımına Etkileyen İç Faktörler 5
2.2. Beton Dayanımına Etkileyen Dış Faktörler 8
2.3. Lifli Beton Araştırması 11
2.4. Betonda Enerji Çalışmaları 16
2.5. Literatürde Vakumlu Beton 23
3. MATERYAL VE METOT 31
3.1. Materyal 31
3.1.1. Beton 31
3.1.2. Beton Bileşenleri 37
3.1.3. Polipropilen Lifler 40
3.2. Metot 40
3.2.1. Taze Beton Özelliklerinin Tayini 41
3.2.2. Basınç Dayanımı Tayini 41
3.2.3. Eğilme Dayanımının Tayini (Kiriş Eğilme Testi) 42
3.2.4. Enerji Yutma Kapasitesinin Tayini (Plak Testi) 43
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA 45
4.1. Taze Beton Fiziksel Özellikleri 45
4.2. Basınç Dayanımı 46
4.3. Kiriş Eğilme Dayanımı 48
4.4. Kirişlerin En Büyük Eğilme Gerilmeleri ve Öngörülen Eğilme Gerilmeleri ... 63

Sayfa No

4.5. Enerji Yutma Kapasitesi (Plak Testi) 67
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 89
6. KAYNAKLAR 91
ÖZGEÇMİŞ

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Beton yolların hasarında etkili olan faktörler 9
Şekil 2.2. Taşıt yüklerinin beton yol hareketlerine tesirleri 10
Şekil 2.3. Tek eksenli gerilmede lifli betonların kırılma gelişimi (a) ve çatlak gelişimi (b) 12
Şekil 2.4. ACI 544.1R-96 lifli ve lifsiz betonlar yük - deformasyon ilişkisi 13
Şekil 2.5. Çimento esaslı malzemelerde gerilimin yükleme boyunca sınıflandırılması 13
Şekil 2.6. Paslanmış çelik lifler (a ve b) 14
Şekil 2.7. Elastik zeminde tekil yük moment dağılımı şematik gösterimi 18
Şekil 2.8. Çelik tel donatılı zemin betonlarında moment dağılımı 19
Şekil 2.9. EN 14488-5 plak test düzeneği (Fransız Plak Testi) (EN 14488-5, 2006) 20
Şekil 2.10. Roesler vd (2006) MST'ların plak testi grafikleri 21
Şekil 2.11. ASTM C 1550 – 05 Lifli betonlarda Plak Testi 22
Şekil 2.12 Vakumlu beton uygulama aşamaları 23
Şekil 2.13. Vakum uygulaması 26
Şekil 2.14. 30 ay sonunda vakum uygulanmış ve uygulanmamış beton yüzeyi 27
Şekil 2.15. Vakumlu beton ve normal beton alt üst basınç dayanımı testleri sonuçları 28
Şekil 2.16. İsveç Chalmers Üniversitesi (a) ve Bolat (b) aşınma deneyi sonuçları 29
Şekil 2.17. Philadelphia Üniversitesi (a) eğilme ve Bolat (b) çekme deneyleri 29
Şekil 2.18. İsveç Chalmers Üniversitesinde yapılan vakumlu beton don testi 30
Şekil 2.19. Vakumlu ve normal beton kapiler su emme grafiği (Bolat, 2002) 30
Şekil 3.1. Lifsiz referans ve kısa lifli normal üretim betonlar. 35
Şekil 3.2. Uzun lifli normal üretim ve vakumlu betonların kalıp planı 35
Şekil 3.3. Vakumlu beton üretimi 36
Şekil 3.4. Betonların üretiminde kullanılan ince, orta ve iri agregalar 37
Şekil 3.5. Betonda kullanılan agregaların granülometrisi 38
Şekil 3.6. Afşin-Eşbistan Temik santralinden temin edilen uçucu kül 38
Şekil 3.7. Betonda kullanılan kısa ve uzun PP lifler 40
Şekil 3.8. Basınç testine tabi tutulan beton örnekler 41
Şekil 3.9. Kiriş eğilme testleri 43

Şekil 3.10. Plak numuneler 44
Şekil 4.1. Düşük dayanımlı PP lifli betonların basınç dayanımları 47
Şekil 4.2. Normal dayanımlı PP lifli betonların basınç dayanımları 47
Şekil 4.3. Yüksek dayanımlı PP lifli betonların basınç dayanımları 48
Şekil 4.4. DR betonların yük-sehim grafiği 49
Şekil 4.5. DAKPP lifli betonların yük-sehim grafiği 49
Şekil 4.6. DBKPP lifli betonların yük-sehim grafiği 50
Şekil 4.7. DCKPP lifli betonların yük-sehim grafiği 50
Şekil 4.8. DVR betonların kiriş eğilme grafiği 50
Şekil 4.9. DVR betonların kiriş eğilme grafiği 51
Şekil 4.10. DBVKPP lifli betonların yük-sehim grafiği 51
Şekil 4.11. DCVKPP lifli betonların yük-sehim grafiği 51
Şekil 4.12. DAUPP lifli betonların yük-sehim grafiği 52
Şekil 4.13. DBUPP lifli betonların yük-sehim grafiği 52
Şekil 4.14. DCUPP lifli betonların yük-sehim grafiği 52
Şekil 4.15. DAVUPP lifli betonların yük-sehim grafiği 53
Şekil 4.16. DBVUPP lifli betonların yük-sehim grafiği 53
Şekil 4.17. DCVUPP lifli betonların yük-sehim grafiği 53
Şekil 4.18. NR betonların kiriş eğilme grafiği 54
Şekil 4.19. NAKPP lifli betonların yük-sehim grafiği 54
Şekil 4.20 NBKPP lifli betonların yük-sehim grafiği 54
Şekil 4.21. NCKPP lifli betonların yük-sehim grafiği 55
Şekil 4.22. NVR betonların kiriş eğilme grafiği 55
Şekil 4.23. NAVKPP lifli betonların yük-sehim grafiği 55
Şekil 4.24. NBVKPP lifli betonların yük-sehim grafiği 56
Şekil 4.25. NCVKPP lifli betonların yük-sehim grafiği 56
Şekil 4.26. NAUPP lifli betonların yük-sehim grafiği 56
Şekil 4.27. NBUPP lifli betonların yük-sehim grafiği 57
Şekil 4.28. NCUPP lifli betonların yük-sehim grafiği 57
Şekil 4.29. NAVUPP lifli betonların yük-sehim grafiği 57
Şekil 4.30. NBVUPP lifli betonların yük-sehim grafiği 58
Şekil 4.31. NCVUPP lifli betonların yük-sehim grafiği 58
Şekil 4.32. YR betonların kiriş eğilme grafiği 58
Şekil 4.33. YAKPP lifli betonların yük-sehim grafiği 59

Şekil 4.34. YBKPP lifli betonların yük-sehim grafiği 59
Şekil 4.35. YCKPP lifli betonların yük-sehim grafiği 59
Şekil 4.36. YVR betonların kiriş eğilme grafiği..... 60
Şekil 4.37. YAVKPP lifli betonların yük-sehim grafiği 60
Şekil 4.38. YBVKPP lifli betonların yük-sehim grafiği..... 60
Şekil 4.39. YCVKPP lifli betonların yük-sehim grafiği..... 61
Şekil 4.40. YAUPP lifli betonların yük-sehim grafiği 61
Şekil 4.41. YBUPP lifli betonların yük-sehim grafiği 61
Şekil 4.42. YCUPP lifli betonların yük-sehim grafiği 62
Şekil 4.43. YAVUPP lifli betonların yük-sehim grafiği 62
Şekil 4.44. YBVUPP lifli betonların yük-sehim grafiği..... 62
Şekil 4.45. YCVUPP lifli betonların yük-sehim grafiği..... 63
Şekil 4.46. PP lifli betonların kiriş eğilme testleri..... 67
Şekil 4.47. Plak testleri bulgularının değerlendirme şeması 68
Şekil 4.48. DR betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri..... 68
Şekil 4.49. DAKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 69
Şekil 4.50. DBKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 69
Şekil 4.51. DCKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 70
Şekil 4.52. DVR betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri..... 70
Şekil 4.53. DAVKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 71
Şekil 4.54. DBVKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri..... 71
Şekil 4.55. DCVKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri..... 71
Şekil 4.56. DAUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 72
Şekil 4.57. DBUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 72
Şekil 4.58. DCUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 72
Şekil 4.59. DAVUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 73
Şekil 4.60. DBVUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri..... 74
Şekil 4.61. DCVUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri..... 74
Şekil 4.62. NR lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri..... 75
Şekil 4.63. NAKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 75
Şekil 4.64. NBKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 75
Şekil 4.65. NCKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 76
Şekil 4.66. NVR lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri..... 76
Şekil 4.67. NAVKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 77

Şekil 4.68. NBVKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri..... 77
Şekil 4.69. NCVKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri..... 77
Şekil 4.70. NAUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 78
Şekil 4.71. NBUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 78
Şekil 4.72. NCUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 79
Şekil 4.73. NAVUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 79
Şekil 4.74. NBVUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri..... 80
Şekil 4.75. NCVUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri..... 80
Şekil 4.76. YR lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri..... 80
Şekil 4.77. YAKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 81
Şekil 4.78. YBKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 81
Şekil 4.79. YCKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 81
Şekil 4.80. YAVKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 82
Şekil 4.81. YBVKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri..... 82
Şekil 4.82. YCVKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri..... 83
Şekil 4.83. YAUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 83
Şekil 4.84. YBUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 84
Şekil 4.85. YCUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 84
Şekil 4.86. YVR lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri..... 84
Şekil 4.87. YAVUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri 85
Şekil 4.88. YBVUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri..... 85
Şekil 4.89. YCVUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri..... 85
Şekil 4.90. Referans beton plakların kırılma şekilleri 87
Şekil 4.91. Lifli beton plakların kırılma şekilleri 88

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 2.1. EFNARC çelik lifli beton enerji sınıflandırması 21
Tablo 3.1. Beton karışım miktarları 32
Tablo 3.2. Beton türleri ve kodları 33
Tablo 3.3. CEM II/A-M (P-LL) 42.5 R kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri 37
Tablo 3.4. Betonlarda kullanılan agregaların fiziksel ve kimyasal özellikleri 38
Tablo 3.5. Uçucu kül özellikleri 39
Tablo 3.6. Normal akışkanlaştırıcı katkı maddesi teknik özellikleri 39
Tablo 3.7. PP Liflerin teknik özellikleri 40
Tablo 4.1. Taze betonların çökme ve birim hacim değerleri 46
Tablo 4.2. Beton türlerinin en yüksek eğilme ve öngörülen eğilme gerilmeleri 64

SEMBOLLER VE KISATMALAR DİZİNİ

b : Deney numunesinin genişliği (mm)
E : Enerji yutma kapasitesi (Joule: 1N=1J/m),
e : Öngörülen eğilme gerilmesi (N/mm^2)
$f_{ck, fl}$: Donatısız betonun karakteristik eğilme dayanımı (N/mm^2)
Fi : i'deki yük değeri (N)
Fi+1 : i+1'deki yük değeri (N)
H : Deney numunesinin yüksekliği (mm)
İ : Mevcut sehim (mm)
i+1 : Mevcut sehimden bir sonraki sehim değeri (mm)
K : Kompozite
L : Deney numunesinin iki mesnet arasındaki uzunluğu (mm)
m : 25 mm
Mn : Negatif moment (N)
Mp : Pozitif moment (N)
PET : Polietilenteftalat
PP : Polipropilen
Pu : Maksimum yük (N)
tb : Sehim 3 mm
Tb : Şekil değiştirme (3 mm sehimdeki kümülatif alan-Nmm)
u : En büyük gerilme (N/mm^2)
BHA : Birim hacim ağırlık
ÇTB : Çelik telli beton
DAKPP : Düşük dayanımlı A oranlı 3 cm polipropilen lifli beton
DAUPP : Düşük dayanımlı A oranlı 6 cm polipropilen lifli beton
DAVKPP : Düşük dayanımlı A oranlı 3 cm polipropilen lifli vakumlu beton
DAVUPP : Düşük dayanımlı A oranlı 6 cm polipropilen lifli vakumlu beton
DBKPP : Düşük dayanımlı B oranlı 3 cm polipropilen lifli beton
DBUPP : Düşük dayanımlı B oranlı 6 cm polipropilen lifli beton
DBVKPP : Düşük dayanımlı B oranlı 3 cm polipropilen lifli vakumlu beton
DBVUPP : Düşük dayanımlı B oranlı 6 cm polipropilen lifli vakumlu beton
DCKPP : Düşük dayanımlı C oranlı 3 cm polipropilen lifli beton
DCUPP : Düşük dayanımlı C oranlı 6 cm polipropilen lifli beton

DCVKPP : Düşük dayanımlı C oranlı 3 cm polipropilen lifli vakumlu beton
DCVUPP : Düşük dayanımlı C oranlı 6 cm polipropilen lifli vakumlu beton
DR : Düşük dayanımlı referans beton
DRB : Düşük referans beton
DVR : Düşük dayanımlı vakumlu referans beton
MST : Makro sentetik tel
NAKPP : Normal dayanımlı A oranlı 3 cm polipropilen lifli beton
NAUPP : Normal dayanımlı A oranlı 6 cm polipropilen lifli beton
NAVKPP : Normal dayanımlı A oranlı 3 cm polipropilen lifli vakumlu beton
NAVUPP : Normal dayanımlı A oranlı 6 cm polipropilen lifli vakumlu beton
NBKPP : Normal dayanımlı B oranlı 3 cm polipropilen lifli beton
NBUPP : Normal dayanımlı B oranlı 6 cm polipropilen lifli beton
NBVKPP : Normal dayanımlı B oranlı 3 cm polipropilen lifli vakumlu beton
NBVUPP : Normal dayanımlı B oranlı 6 cm polipropilen lifli vakumlu beton
NCKPP : Normal dayanımlı C oranlı 3 cm polipropilen lifli beton
NCUPP : Normal dayanımlı C oranlı 6 cm polipropilen lifli beton
NCVKPP : Normal dayanımlı C oranlı 3 cm polipropilen lifli vakumlu beton
NCVUPP : Normal dayanımlı C oranlı 6 cm polipropilen lifli vakumlu beton
NR : Normal dayanımlı referans beton
NVR : Normal dayanımlı vakumlu referans beton
SNCF : Fransız Demiryolları
YAKPP : Yüksek dayanımlı A oranlı 3 cm polipropilen lifli beton
YAUPP : Yüksek dayanımlı A oranlı 6 cm polipropilen lifli beton
YAVKPP : Yüksek dayanımlı A oranlı 3 cm polipropilen lifli vakumlu beton
YAVUPP : Yüksek dayanımlı A oranlı 6 cm polipropilen lifli vakumlu beton
YBKPP : Yüksek dayanımlı B oranlı 3 cm polipropilen lifli beton
YBUPP : Yüksek dayanımlı B oranlı 6 cm polipropilen lifli beton
YBVKPP : Yüksek dayanımlı B oranlı 3 cm polipropilen lifli vakumlu beton
YBVUPP : Yüksek dayanımlı B oranlı 6 cm polipropilen lifli vakumlu beton
YCKPP : Yüksek dayanımlı C oranlı 3 cm polipropilen lifli beton
YCUPP : Yüksek dayanımlı C oranlı 6 cm polipropilen lifli beton
YCVKPP : Yüksek dayanımlı C oranlı 3 cm polipropilen lifli vakumlu beton
YCVUPP : Yüksek dayanımlı C oranlı 6 cm polipropilen lifli vakumlu beton
YR : Yüksek dayanımlı referans beton

YVR : Yüksek dayanımlı vakumlu referans beton

1. GİRİŞ

İnşaat sektörünün vazgeçilmez yapı malzemelerinin en başında beton gelmektedir. Beton; çimento, agrega, su ve gerekli ise katkı malzemesinin (kimyasal-mineral katkı, lif gibi) uygun oranlarda karıştırılması ile elde edilen başlangıçta plastik kıvamda olup daha sonra çimentonun hidratasyonu sebebi ile sertleşen bir yapı malzemesidir. İnşaat sektöründe çok önemli bir yere sahip olan beton yüzyılı aşkın süredir tüm dünyada yapı malzemesi olarak kullanılmakta ve her geçen gün kullanım alanları artmakta ve yaygınlaşmaktadır. Beton sahip olduğu özellikleri ve temin edilebilme kolaylığı sebebiyle, yaygın olarak kullanılan yapı malzemesi haline gelmiştir. Günümüz piyasa şartlarında, kolay ve basit yapılabilirliği, ekonomik olması ve de sahip olduğu teknik özellikler nedeniyle, yaşadığımız çevrede üst yapı ve alt yapı tesislerin temel malzeme olarak beton tercih edilmektedir. Ancak beton, kimyasal özellikleri farklı olan su, çimento, agregalar ve katkı maddeleri gibi malzemelerden meydana gelmesi ve bu malzemelerin dış etkilere (ısı, çözünme, aşınma vb.) farklı fiziksel tepki vermeleri nedeniyle, olumsuz koşullar altında beklenenden daha zayıf özellikler gösterebilirler. Bu nedenle betonun inşaat sektöründe kullanımıyla birlikte beton durabilitesi (kalıcılığı) üzerine araştırmalar da eş zamanlı olarak başlamıştır. Beton üzerindeki iyileştirme çalışmalarının tarihsel gelişimi aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Çimento ham maddelerinin özellikleri ile ilgili yapılan çalışmalar,
- Agrega granülometrisi çalışmaları,
- Puzolanik katkı maddeleri çalışmaları,
- Kimyasal katkı maddeleri çalışmaları,
- Beton uygulama yöntemlerinin geliştirilmesi,
- Çelik lifli beton çalışmaları,
- Sentetik lifli beton çalışmaları

Dünya nüfusunun hızlı bir şekilde artışıyla, insanların barınma, altyapı, üstyapı, okul, hastane, baraj, yol vb. gibi yaşamsal alanlarında yer alan yapılarda kalite ihtiyacı da artmaktadır. Bu tür yapıların inşasında çoğunlukla beton kullanılmaktadır. Amaca uygun

üretim ve servis ömrünün daha fazla olması için betona sonradan ya da önceden yapılan bazı işlemlerle lifli beton, püskürtme beton, vakumlu beton, öngerilmeli beton, hafif beton, ağır beton ve kendiliğinden yerleşen beton gibi farklı isimler verilerek pek çok beton türü ortaya çıkmıştır. Olumsuz hava şartları, ağır yükler ve korozif ortamlar betonunun servis ömrünü azaltan faktörler olarak karşımıza çıkmaktadır. Lifler betonda bir bileşen olarak yer aldığında bu tür faktörlerin zararlı etkenlerini azaltabilmektedir.

Betonun en büyük dezavantajı çekme dayanımının ihmal edilecek kadar düşük olmasıdır, birim boy değişimi ve çekme kuvvetine karşı koyma direnci oldukça küçüktür. Lifli betonlar, basınç düktilitesi gösterir. Yani taşıma gücüne eriştiği halde yük taşıma özelliği vardır. Ayrıca kesme, burulma ve yorulmaya karşı mukavemeti fazladır. Çatlamalar, dökülme, parçalanma ve dağılmalar azdır. Çelik lifler basınç ve çekme kuvvetleri etkisi altında iken, betonda çok sayıda kılcal çatlakların meydana gelmesini önlemektedir (Türker, 2000; ACI 544.1R-96, 1996; Bolat, 2010). Betonda liflerin homojen bir şekilde dağılması ve optimum miktarda kullanılmasının betonun mekanik özelliklerini etkilediği tespit edilmiştir. Betonun yüzeyinde oluşan gerilmeler sebebiyle çatlaklar oluşmaktadır. Betona katılan bu lifler ise mikro çatlakların büyümesini engellemekte, bu sayede betonun başta süneklik olmak özere diğer mekanik özelliklerini etkileyerek ani kırılmaları önlediği saptanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan polipropilen (PP), malzeme olarak termoplastiklerin içinde yer alan ve oldukça hafif bir polimerdir. Günlük hayatta kullanılan plastiklerin hemen hemen yarısının hammaddesini oluşturur. Bu açıdan da bakılacak olursa üretimi ucuz olan bir plastik olduğunu da söylemek mümkündür. Beton veya sıvada PP lifli betonun en önemli etkisi, beton dökümünden sonraki ilk birkaç saat içinde plastik büzülmelerden dolayı oluşacak çatlakları kontrol altına almasıdır. Sertleşme, prizlenmenin ilk safhasında beton mukavemetinin oluşma hızı, büzülmelerden dolayı meydana gelen iç çekme gerilmelerinin oluşum hızından daha yavaştır. Bu plastik büzülme esas itibariyle su ve çimento arasında başlayan kimyasal reaksiyon ve buharlaşmanın tabii bir sonucudur. PP lifler çelik liflere nazaran betonun mekanik mukavemetlerini arttırmada çok etkili olmazlar. Yine de az da olsa betona enerji yutma özelliği kazandırırlar ve özellikle plastik rötrede çok etkili olurlar. Özellikle çok güçlü olmayan büzülmelere karşı PP lifler tercih edilmektedirler. PP liflerin fonksiyonu betonun yumuşak, plastik safhasıyla sınırlı iken, çelik lifler ise mukavemet arttırıcı etkisi, beton prizini alıp sertleştikten sonra da belirgin şekilde devam eder. Betonun

plastik safhasında çelik liflerin çatlak önleyici ve sınırlayıcı etkisi de mevcuttur. Ancak, betonda mükemmel şekilde dağılmış olan PP liflerin etkisine göre zayıftır. Bununla birlikte sertleşmiş betonda uzun dönemde kuruma büzülmelerinden dolayı oluşacak çatlakların azaltılmasında çelik lifler malzemeye belirli bir dayanıklılık ve tokluk vererek betonun mukavemetini önemli ölçüde arttırırlar (Arazsu, 2012; Bekaert, 1998). Beton uygulama yöntemleri de normal beton, püskürtme beton, vakumlu beton, kendinden yerleşen beton, prefabrik beton, ön-ard gerilmeli betonlar şeklinde gösterilebilir.

Vakumlu beton; geniş yüzey alanlarında kullanılan betonun katılaşmadan önce, içerisindeki işlenebilirlik için kullanılan suyun ve hapsolmuş havanın, vakum uygulaması yoluyla, kontrollü bir şekilde alınması suretiyle oluşturulan betondur (Bolat vd., 2014).

Vakum işlemi esnasında, taze beton içerisinde atmosfer basıncından daha düşük basınç oluşması bir iç akımın oluşmasına neden olur. Bu da atmosfer basıncı etkisiyle bir sıkışmanın olması demektir. Sıkışmanın etkisi ile, su/çimento oranının düşürülmesi ve beton içindeki havanın alınması normal betona göre dayanım artışı sağladığı gibi beton kalınlığının alt ve üst kısmı arasında önemli derecede farklılık görülmektedir (Bolat vd., 2008).

Vakumlu beton, işçilikten malzemeden, zamandan sağladığı tasarrufun yanında normal betona kıyasla sağladığı düzgünlük, çatlaksızlık, daha fazla aşınma direnci, su geçirmezlik, yağlara, kimyasallara, akaryakıta karşı dayanıklı oluşu, kısaca hizmet ömrünün uzun oluşu nedeni ile tercih edilmektedir (Bolat vd., 2014). Özdemir, (1999) yaptığı araştırmada, sertleşmiş betondan aldığı karot numunelerin üzerine aşınma deneyi uygulamış ve aşınmaya karşı vakumlu betonun normal betondan 1.5 kat daha dayanıklı olduğu saptamıştır.

Genellikle vakumlu beton donma-çözülme gibi hava şartlarına direk maruz kalan, erken dayanım istenen, çok ağır yüklerin etkisinde kalan, her zaman için aşınma etkisinde kalabilecek ve vakum örtüsü ile üzeri örtülebilecek kadar alana sahip plaklarda kullanılır.

Bu yapılardan bazıları şunlardır (Bolat vd., 2010):

- Ağır iş makinelerinin çalıştığı, aşırı titreşimin olduğu fabrika ve depolar,
- Saha betonları, benzin istasyonları, havaalanları, limanlar ve karayollarıdır.

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın parametreleri; Polipropilen lifler, 2 farklı lif uzunluğu (uzun - kısa), 3 farklı lif oranı (A-B-C), Normal üretim betonlar, Vakumlu betonlar ve 3 farklı dayanım sınıfında betonlardır (C16/20-C25/30-C35/45-düşük-normal-yüksek). Tüm bu parametrelerin bir araya gelmesiyle toplam 42 tür deney betonu ortaya çıkmıştır. Bu betonlar üzerinde aşağıda belirtilen çalışmalar yapılmıştır.

- Fiziksel özellikler
- Tek eksenli tahribatlı basınç dayanımı
- Kiriş eğilme testleri
- Plak testleri ile enerji yutma kapasitelerinin belirlenmesi,

Bu çalışmanın amacı, düşük, normal ve yüksek basınç dayanımı sınıfındaki beton türlerinde, PP lif oranının, PP lif uzunluğunun ve vakum uygulamasının yukarıda belirtilen çalışmalarla etkilerinin belirlenmesidir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Beton Dayanımına Etkileyen İç Faktörler

Betonun yapı malzemesi olarak kullanılmasını sağlayan en önemli özelliği, betonun basınç dayanımıdır. Betonun dayanım özeliklerine etki eden faktörlerin başında, betonu meydana getiren bileşim elemanları ve oranı gelmektedir. Betonun basınç dayanımına etki eden faktörler, şöyle sıralanabilir (Neville, 2011; Mehta ve Monteiro 2006; Erdoğan, 2010; Akman, 1990):

- Çimento türü ve miktarı
- Su/Çimento oranı
- Karışım suyu
- Yükleme hızı
- Betonun kompozitesi
- Kür Şartları
- Agrega tane boyutu
- Aynı boy/çap oranına sahip ancak farklı boyuttaki numuneler
- Beton numunenin şekli
- Beton numunelerin boy/çap oranı
- Yükün uygulama süresi

Çimento türü ve miktarı: Çimento cinsi ve miktarı (dozajı) basınç dayanımını etkiler. Çimentonun yüksek dayanımlı olması betonun da yüksek dayanımlı olmasında etkisi büyüktür. Çimento dozajının fazla olması dayanımı arttırır. Ancak dayanıma etki eden yalnız

dozaj değil, su/çimento oranı olduğu unutulmamalıdır. Beton karışım hesaplarında bir minimum dozaj değeri verilmiştir. Bundaki amaç, çimentonun agreganın tüm boşluklarında yer almasını sağlamaktır. Dozajın artmasıyla çimento tanelerine gelen basınç gerilme değerleri azalacaktır (ASTM C 39, 1994; Neville, 2011; Mehta ve Monteiro 2006; Erdoğan, 2010; Akman,1990).

Su/Çimento Oranı: Su miktarını ayarlamak beton üretiminde önemli ve zor bir sorundur. İyi bir yerleşme ve işlenebilirlik sağlamak mühendisliğin birinci amacıdır. Bu amacı gerçekleştirmek için su/çimento oranının %55 üstüne çıkmamasına çalışılmalıdır. İyi bir yerleşme ve işlenebilirlik için daha çok gerekli olduğu durumlarda agrega veya kumun değiştirilmesi yoluna gidilmelidir. Su/çimento oranı arttıkça betonun içerisinde yer alan boşluk miktarı daha çok olmakta ve bu nedenle basınç dayanımı değeri düşük elde edilmektedir. Su/çimento oranının düşük olması nedeniyle iyi yerleştirilemeyen betonlarda oluşacak boşluklar da basınç dayanımını düşürür. Örneğin betona gerekenden %20 daha fazla su konulması dayanımda %30; %20 daha az su kullanılması da dayanımda %60 oranında bir azalmaya neden olmaktadır (ASTM C 39, 1994; Neville, 2011; Mehta, 2006; Erdoğan, Y. Turhan, 2010).

Karışım Suyu: Betonun üretiminde kullanılacak yoğurma suyunun içerisinde betonun prizine, dayanımına, dayanıklılığına ve betonarme yapılardaki donatının korozyonuna olumsuz etki yapacak yabancı maddeler bulunmamalıdır. Ayrıca kullanılacak yoğurma suyu, gerekenden az kullanılması sonucunda yeterli hidratasyon ve işlenebilme elde edilememektedir. Gerekenden fazla su ise beton içerisinde boşlukları arttırmakta ve böylece sertleşmiş betonun dayanımı ve dayanıklılığını olumsuz etkilemektedir (ASTM C 39, 1994; Neville, 2011; Mehta, 2006; Erdoğan, Y. Turhan, 2010; Akman, 1990; TS EN 1008, 2003).

Yükleme hızı: TS EN 12390-3 (2010) standardı ve ASTM C 39'da basınç dayanımının elde edilme aşamasında numuneye uygulanan kırılma yükünün 14–35 kgf/cm^2 olması gerektiği belirtilmiştir. Böyle bir yükleme hızında numune 2–3 dakikada kırılır. Düşük yükleme hızı uygulandığında elde edilen basınç dayanımı değeri düşük olmaktadır. Yükleme hızı artıkça basınç dayanımı değeri artmaktadır.

Betonun Kompozitesi (K): 1 m^3 taze betondaki katı öğelerin (agrega ve çimento) kapladığı mutlak hacim toplamıdır. İyi bir betonda K=%80 olmalıdır. K'sı yüksek, dolu bir betonun basınç dayanımı da yüksektir. K'nin küçük olması betonun boşluklarının fazla

olması demektir. Boşlukların fazla olması ise dayanımı azaltır. K'nin yüksek olması ise ancak agreganın K'nin yüksek olmasıyla olasıdır. Agreganın K'sı, agreganın granülometrisine bağlı olduğundan agrega granülometrisinin uygun olması gerekir. Bunun için de olanaklar ölçüsünde betonda iri agrega fazla olmalı, ince agrega iri agreganın boşluklarını dolduracak kadar olmalıdır (Mehta, 2006; Erdogan, Y. Turhan, 2010).

Kür Koşulları: Betonun sertleşme aşamasında uygulanan çevre koşullarına kür koşulları denilir. Bunlar ise nem ve sıcaklık olarak gruplanabilir. Nemi yüksek tutmak hatta doygun durumda tutmak koşuluyla sıcaklık 60 ºC üzerine çıkıldığında (80–90ºC) dayanım artışı hızlanmaktadır. Bu yöntemle 1–2 gün gibi kısa bir zamanda istenilen dayanıma ulaşılır. Ancak bağıl nemin %50'nin altına düşmesi beton bünyesindeki suyun buharlaşması, hidratasyon için gerekli suyun kalmaması anlamına gelir. Buharlaşmanın fazla olması yalnız hidratasyonu etkilemez, erken rötre denilen olayı önemli ölçüde arttırır. Bu da çatlaklı bir yapının oluşmasına neden olur. Hidratasyonu tamamlanmamış ve çatlaklı bir yapıya sahip bir betonun dayanımının düşük bir değer olacağı açıktır. Betonun basınç dayanımı, taze betonun silindir veya küp kalıplara doldurularak hazırlanan beton silindir veya küp numunelerin belli bir süre (standart olarak 28 gün sonra) basınç altında kırılmasıyla elde edilir (Mehta, 2006; Erdogan, Y. Turhan, 2010; TS 3323, 2012).

Agrega tane boyutu: Numune kalıplarına yerleştirilecek betonda en büyük agrega tane boyutunun, kalıbın çapının veya kalıp genişliğinin 1/3'ünden daha büyük olmaması gerekmektedir. Standart numunelerde en büyük agrega tane boyutu 5 cm'yi geçmemelidir. Bu kurala uyulmazsa numunelerden elde edilecek basınç dayanımı değeri üniform olmamaktadır (Troxell, vd., 1968).

Beton numunelerin boy/çap oranı: Standart boyuttaki silindirin çapı 15 cm ve boyu 30 cm'dir. Boy/çap oranı 2'dir. Boy/çap oranı 2'den küçük numunelerin dayanımı boy/çap oranı 2 olan numunelerden daha büyük; boy/çap oranı 2 den büyük olan numunelerin basınç dayanımları ise boy/çap oranı 2 olan numunelerden daha küçük değerde olmaktadır (ASTM C 39, 1994).

Aynı boy/çap oranına sahip ancak farklı boyutlardaki numunelerin betonun basınç dayanımına etkisi: Aynı betondan üretilen 7.5x15 cm; 10x20 cm; 15x30 cm; 20x40 cm ve 30x60 cm gibi boy/çap oranı 2 olan numunelerin basınç dayanımları birbirinden farklıdır.

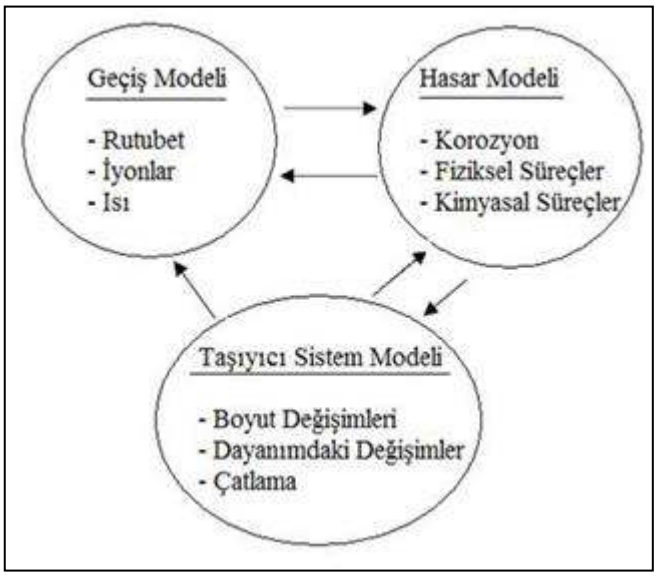
Numunenin boyutları küçüldükçe basınç dayanımı değeri artmaktadır (Neville, 2011; Mehta, 2006).

Beton numunenin şekli: Küp numunelerden elde edilen basınç dayanımları silindir numunelerin basınç dayanımlarından %5 ila %30 arasında farklılık gösterir. 15x30 cm standart boyutlu silindir numune dayanımı ile küp numune dayanımı arasındaki ilişki fc (silindir) /fc (küp)=0.8 olarak kabul edilir (Erdoğan, Y. Turhan, 2010; Akman, 1990).

Yükün uygulama süresi: Beton numuneye uygulanan yükün uygulama hızı azaldıkça elde edilen basınç dayanımı daha az olmaktadır. Yükün numune üzerinde uzun süre kalması dayanımın düşük çıkmasına yol açar. Örneğin, numunenin 2 dakika içinde kırılmasıyla elde edilen basınç dayanımı %100 kabul edilirse, 10 dakika ve 30 dakikada kırılan numunelerin basınç dayanımları sırasıyla %96 ve %92 düzeyinde olmaktadır (Celasun ve Polat, 1974). Öte yandan uygulanan yükleme hızının daha kısa olması ile, numunelerden daha büyük basınç dayanımı elde edilmektedir (Troxell vd.,1968). Yük hızı 7 Mpa olarak uygulanan numunelerden elde edilen basınç dayanımı yük hızı 2.1 Mpa olarak uygulanan numunelerden elde edilen basınç dayanımı değerinden yaklaşık %10 daha yüksek olmaktadır (Troxell vd.,1968).

2.2. Beton Dayanımına Etkileyen Dış Faktörler

Betonun servis ömrünü olumsuz etkileyen faktörlerin birçoğu birbiriyle ilişkilidir. Olumsuz bir faktörün ortaya çıkısı diğer olumsuz faktörleri de beraberinde getirebilmektedir. Örneğin ağır taşıt yüklerinden dolayı yol kaplamasında kırılmalar olabilmekte, buna bağlı olarak geçirimlilik artmakta, yol temeli ve zemini deformasyona uğrayarak kaplamadaki kırılmaların artmasına neden olabilmektedir. Buna göre beton yolların bozulmalarını etkileyen alt modellerin girişimleri Şekil 2.1'de gösterilmektedir (Baradan ve Yazıcı, 2002).



Şekil 2.1. Beton yolların hasarında etkili olan faktörler

Betonun hasarında etkili olan alt modellerin girişimlerine bağlı olarak beton yollarındaki bozulmaları arttıran en bilinen faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

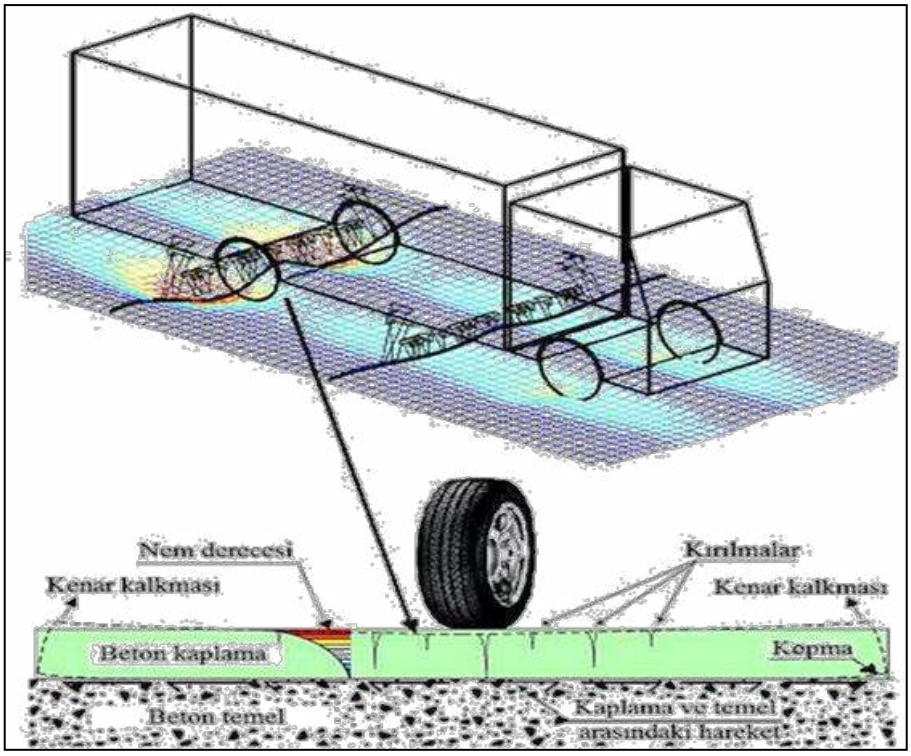
- Taşıt yükleri ve trafik
- Beton tasarım ve uygulamalarda kusurlar
- Donma çözülme ve tuzlama çalışmaları
- Kimyasal bozulmalar
- Diğer etkenler

Taşıt yükleri ve trafik;

Taşıt yüklerinin etkilerini, yol kaplamasının kendisi ve alt zemini olarak iki şekilde incelemek daha açıklayıcı olacaktır. Beton yol kaplaması taşıt yüklerine karşı bir kirişten daha çok, plak davranışı göstermektedir. Beton kaplama rijittir. Elastik bir zemine oturan plak gibi çalışır ve üzerine gelen yükleri çok daha geniş bir alana yayarak taban zeminine iletir. (Halm, 2002; İyina ve Ağar 2004).

Araçların dingil yükü, dingiller arası mesafe, dingildeki lastik sayısı, lastiğin yola temas eden yüzeyinin büyüklüğü ve aracın hızı yol kaplamasının bozulmasının ayrıca sebepleridir. Araçların dingilleri tarafından yola aktarılan yük karşısında yol üst yapısının gösterdiği davranış, dingil yükünün artışı ve geçiş sıklığı ile olumsuz yönde etkilenmekte,

dingil yükü ile yolun deformasyonu arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Yoldan geçecek dingil yükleri dikkate alınarak üst yapı (kaplama, temel, alt temel) tabaka kalınlıkları belirlenmektedir. Projesine göre inşa edilen bir yolun, proje ömrü süresince esas alınan dingil yüküne uygun olması gerekmektedir. Bir yoldan geçecek dingil yükünün projede ön görülen dingil yüklerinden bir ton fazla olması ve sürekli geçmesi halinde zarar faktörü yaklaşık % 50 artmakta ve yol ömrü de buna bağlı olarak kısalarak daha az sürede yapım ve bakıma gereksinim duyulmaktadır (Dalak ve İlgün, 2007). Beton yollarda araç teker yükleri yol kaplaması ile temel arasında zıt hareketlere neden olmaktadır. Bu zıt hareketler ve yüzeye doğru artan nem neticesinde tekerin izlediği hat üzerinde çökmeler ve çatlamalar, kenar kısımlarda da kaplamanın yukarı kalkarak temelden ayrılması söz konusu olmaktadır (Bolat vd.,2010). Bir aracın beton yol kaplamasında yaptığı etkiler Şekil 2.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Taşıt yüklerinin beton yol hareketlerine tesirleri

Beton tasarım ve uygulamalardaki kusurlar;

Yol kaplaması için tasarlanan beton karışımı yolun maruz kalabileceği olumsuz faktörler dikkate alınarak yapılmalıdır. Özellikle kırılmalar, aşınmalar, geçirimliliğe, donma çözülmeye ve tuzlama çalışmalarına bağlı bozulmalar, kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan

bozulmalar doğru karışım tasarımı ile büyük oranda önlenebilmektedir. Beton karışım tasarımı ile ilgili yol hasarını arttıran bazı etkenler şunlardır (Bolat vd,2010):

- C20'nin altındaki düşük dayanımlı betonların kullanımı,
- Beton karışım elemanlarının standartlara uygun özellikte olmayışı
- Aşınmalara karşı iri agrega oranının ve kılcal boşluklara karşı ince agrega oranının (özellikle taşının grubunun) karışımda yeterince bulunmaması,
- Geçirimsizliği arttıran katkıların kullanılmaması,
- Donma çözülme dayanımını arttıran hava sürükleyici katkı maddesinin kullanılmaması,
- Segregasyon oluşturabilecek kadar akıcı kıvamlı beton kullanımı,
- Lifli beton uygulamalarında lif oranının, lif türünün, lif uzunluğunun ve karışım şeklinin belirlenmesinde yapılan kusurlar,

Betonun yola uygulama aşamasında da birçok kusur yapılabilmektedir. Bunlardan en bilinen bazı uygulama kusurları şöyle sıralanabilir (Bolat, Subaşı, Çullu ve Akaya, 2010):

- Özellikle yağışlı bölgelerde yolun belirli noktalarında, gerekli menfezlerin yapılmaması ya da yapılanların yeterli olmaması,
- Beton döküm ve bakım işlerinde yapılan eksiklikler ve yetersiz kontrol hizmetleri, kazı şevi ve yol platformundan gelen ve kenar hendekte biriken suların tahliyesinde yapılan kusurlar,
- Yol kaplamasının temel ve temel altı tabakalarındaki yetersiz sıkıştırma ve yol güzergahının stabilize edilmesindeki kusurlar,
- Kaplama kalınlığının 15 cm'den az tutulması,
- Donatılı betonlarda korozyon önleyici tedbirlerin alınmaması, 5-6 m'den daha uzun enine ve boyuna derzlerin oluşturulması,
- Kalitesiz işçilik ve yetersiz uzman kontrolü

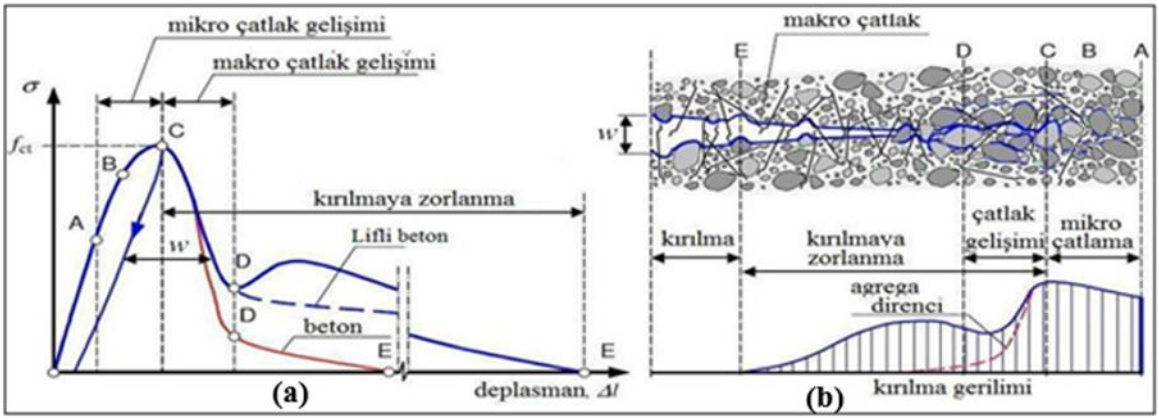
2.3. Lifli Beton Araştırması

Lifli betonlar üzerine ilk çalışmalar 1960'lı yıllarda beton içerisine cam elyaf liflerin katılmasıyla başlamıştır. Daha sonraları farklı lif tipleri kullanılarak beton dayanımı üzerine liflerin etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda süreksiz bir şekilde bulunan

liflerin genellikle betonda oluşan çatlakları en aza indirerek betonun şekil değiştirme özelliğini artırmakta olduğu görülmüştür (CIRIA, 1984).

Betonda çatlaklar mikro düzeyde başlayıp ve sırasıyla mezo (orta) ve makro düzeye ilerlediği bilinmektedir. Bu çatlakların kontrolü için yine mikro ve makro düzeyde lifler kullanılmaktadır. Mikro çatlak, uzunluğu numune veya yapının boyutlarına göre çok küçük olan çatlak, makro çatlak ise uzunluğu bir numune veya yapının boyutlarına göre fazla küçük olmayan çatlaktır (Şekil 2.3.) Büyük boyutlu lifler arasındaki mesafe fazla olduğu için bu lifler mikro çatlaklar için etkili olamazlar. Büyük boyutlu lifler ancak çatlaklar gelişip makro düzeye geldiği zaman etkili olmaktadırlar (Löfgren, 2005).

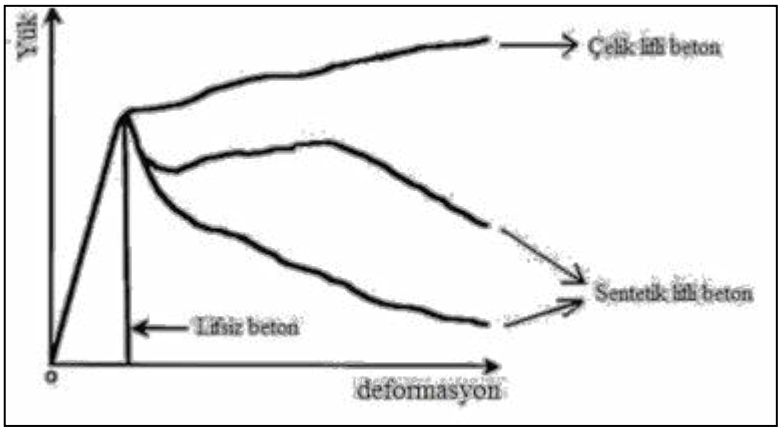
Yüksek dayanımlı makro lifler, büyük çatlakları, zayıf mikro lifler (PP vb.) ise mikro çatlakların başlangıcını ve gelişimini kontrol etmektedirler. Mikro lifler boyutları nedeniyle matris içinde daha sık bir lif dağılımı oluştururlar, çatlakları makro düzeye gelmeden durdururlar, elastik bölgedeki davranışı iyileştirirler. Makro lifler ise elastiklik modülünü, çekme ve eğilme dayanımlarını arttırırlar, makro düzeydeki çatlakları kontrol ederler, maksimum yük sonrasında davranışı iyileştirirler (Rossi, 2000; vd., 2000; Betterman, vd., 1995; Banthia, vd., 2000).



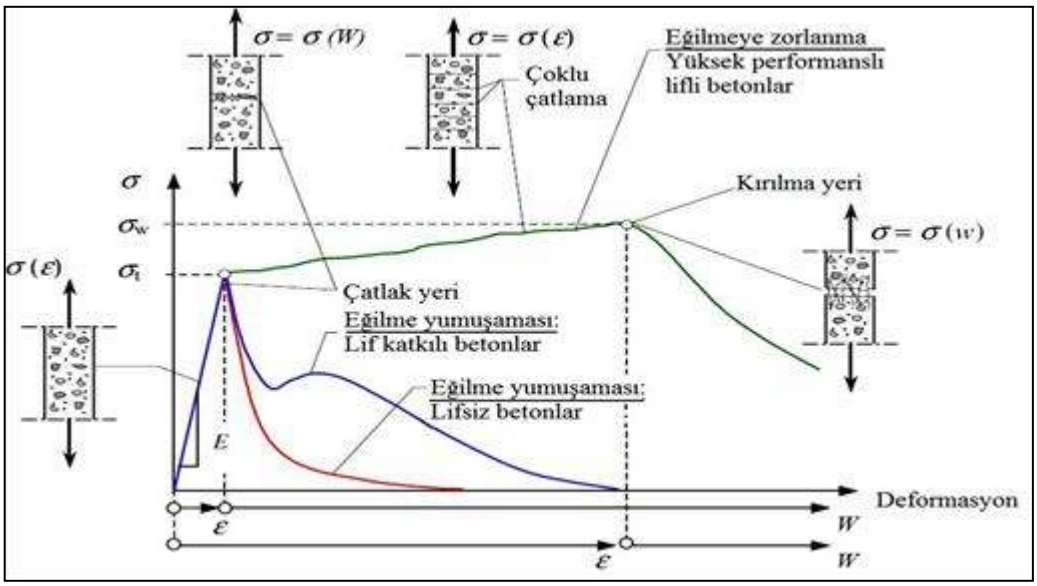
Şekil 2.3. Tek eksenli gerilmede lifli betonların kırılma gelişimi (a) ve çatlak gelişimi (b)

Liflerin esnek olması yapının güçlendirilmesi ve bir örümcek ağı gibi yekpare davranış göstermesini sağlamaktadır. Çelik teller betonda kırılma sırasında büyük bir deformasyon olmasını önler. Buna karşın betonda sentetik tellerin kullanılması, yükü daha büyük bir alana dağıtmakla birlikte plastik bir davranış gösterdiğinden büyük deformasyonları önlemede çelik teller kadar etkili olamamaktadır (Lambrechts, 2005).

Şekil 2.4'de ACI 544.1R-96'a (1996) göre lifli ve lifsiz betonların eğilme dayanımında yük deformasyon ilişkisi görülmektedir. Buna göre lifsiz betonlar kırıldıktan hemen sonra özelliğini yitirmekte, lifli betonlarda lif türüne ve yükleme durumuna göre bir süre daha yük taşıyabilmektedir. Gerilim – deformasyon ilişkisi ile yük – deformasyon ilişkisi benzerdir. Şekil 2.5'de yükleme boyunca gerilimin gösterdiği davranışların sınıflandırılması yapılmıştır (Löfgren, 2005).



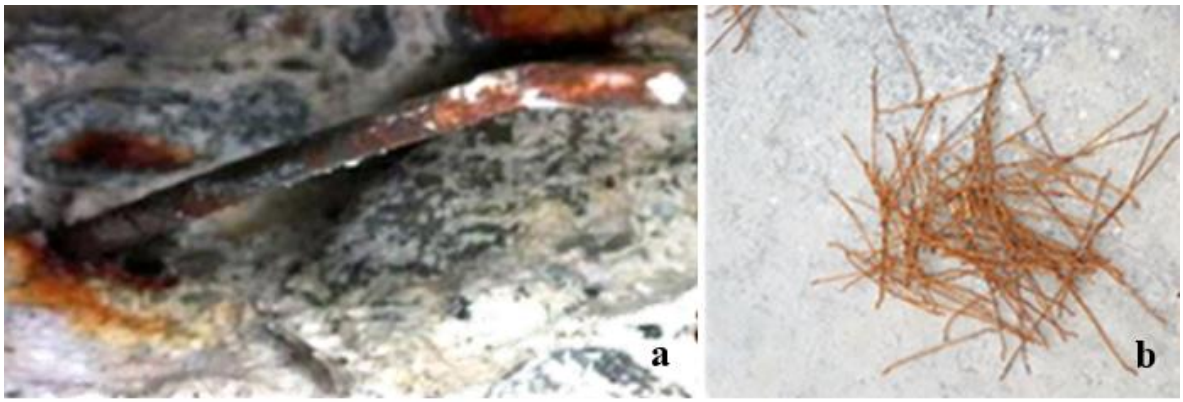
Şekil 2.4. ACI 544.1R-96 lifli ve lifsiz betonlar yük - deformasyon ilişkisi



Şekil 2.5. Çimento esaslı malzemelerde gerilimin yükleme boyunca sınıflandırılması

Granju ve Balouch'un (2005) yaptığı bir araştırmada kiriş olarak üretilen çelik lifli betonlar 1 yıl süre ile deniz suyu içinde bekletilmiş ve daha sonra eğilme deneyi yapılmıştır.

Deney sonucunda şaşırtıcı bir şekilde korozyonun artmasına paralel olarak eğilme dayanımında arttığı görülmüştür. Bolat ve Şimşek (2015)'in yaptığı çalışmada açık hava şartlarının etkisinde kalan çelik liflerin korozyona uğradığı görülmüştür (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Paslanmış çelik lifler (a ve b)

Bolat vd. (2014) yaptıkları çalışmada, beton içinde 30 mm uzunluğunda ve yaklaşık %0.5 oranında çelik, polyester ve PP lifler kullanılmıştır. Betonlar üzerinde basınç dayanımı, kapiler su emme, karbonatlaşma derinliği, aşınma dayanımı ve donma-çözülme dayanımı özellikleri belirlenmiştir. Çalışmaya göre basınç dayanımına liflerin önemli bir etkisi olmazken en fazla çelik lifli betonlar %12 artış sağlamıştır. Kapiler su emme değerleri en çok lifsiz referans betonda görülmüş, 6 ay sonundaki karbonatlaşma değerleri en az lifsiz referans betonda görülmüş, aşınma testinde en çok aşınma referans betondan yaklaşık 2 kat daha çok olan çelik lifli betonda görülmüştür.

Nelson vd. (2002) yaptıkları çalışmada lifli betonlarda çatlak genişliklerini etkileyen en önemli parametrelerin liflerin hacim yüzdesi ve lifleri kenetlenme özellikleri olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca mikro çaplı liflerin betonda oluşabilecek mikro çatlakları uzun liflere göre daha etkin bir şekilde engellediğini vurgulamışlardır. Diğer bir ifadeyle mikro çaptaki lifler, betonda mikro çatlakların gelişimini engelleyerek bölgesel çatlakların oluşumunu geciktirildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Beton gibi çimento esaslı malzemeler çekme dayanımı ve çekme birim deformasyon kapasitesi çok düşük gevrek yapıdaki malzemelerdir. Geleneksel beton tipik olarak; yorulma dayanımı, kavitasyon ve aşınma dayanımı, çekme dayanımı, deformasyon kapasitesi, kayma dayanımı, çatlama sonrası yük taşıma dayanımı ve tokluk açısından zayıf performans gösterir. Betonun bu özelliklerinin belirgin olarak gerektiği yerlerde beton içerisine değişik

malzemelerden üretilmiş ve teknik özellikleri yüksek liflerin katılması sonucu betonun yukarıdaki zayıf özellikleri iyileştirilmiştir.

Betonda PP lif, karbon lif, plastik-cam bazlı lif ve çelik lifler kullanılmaya başlanmıştır. İnşaat Mühendisliği alanında, sağladığı avantajlar bakımından lifli betonların önemi hızla artmaktadır ve K'lerin özeliklerini geliştirmek adına önemli adımlar atılmıştır (Yardımcı, 2007).

Beton veya sıvada PP lifli betonun en önemli etkisi, beton dökümünden sonraki ilk birkaç saat içinde plastik büzülmelerden dolayı oluşacak çatlakları kontrol altına almasıdır. Sertleşmenin ilk safhasında beton mukavemetinin oluşma hızı, büzülmelerden dolayı meydana gelen iç çekme gerilmelerinin oluşum hızından daha yavaştır. Bu plastik büzülme esas itibariyle su ve çimento arasında başlayan kimyasal reaksiyon ve buharlaşmanın tabii bir sonucudur. PP lifler çelik liflere nazaran betonun mekanik mukavemetlerini arttırmada çok etkili olmazlar. Yine de azda olsa betona enerji yutma özelliği kazandırırlar ve özelliklede plastik rötre de çok etkili olurlar. Özellikle çok güçlü olmayan büzülmelere karşı PP lifler tercih edilmektedirler. PP liflerin fonksiyonu betonun yumuşak, plastik safhasıyla sınırlı iken, çelik liflerin mukavemet arttırıcı etkisi beton prizini alıp sertleştikten sonra da belirgin şekilde devam eder. Betonun plastik safhasında çelik liflerin çatlak önleyici ve sınırlayıcı etkisi de mevcuttur. Ancak, betonda mükemmel şekilde dağılmış olan PP liflerin etkisine göre zayıftır. Bununla birlikte sertleşmiş betonda uzun dönemde kuruma büzülmelerinden dolayı oluşacak çatlakların azaltılmasında çelik lifler malzemeye belirli bir dayanıklılık ve tokluk vererek betonun mukavemetini önemli ölçüde arttırırlar (Arazsu,2007; Bekaert,1998).

Tekstil sanayisinde yoğun olarak kullanılan sentetik bir lif olan polyester; etilen glikol ile organik asitlerden teraftalik asit veya dimetil terftalatın kondensasyonu ile elde edilen Polietilenteftalat (PET) polimerinin eriyikten çekilmesi ile elde edilmektedir. Elde edilen polimer madde yaklaşık 4mm boyutlarında kesilmekte ve granül (çips) adı verilen şekle dönüştürülmektedir. Elde edilen granüller yumuşak eğirme yöntemi ile filament haline dönüştürülmektedir. Yumuşak eğirme yönteminde kimyasal yolla elde edilen polimer parçaları, ısıtılmış ızgara ya da ekstrüderden oluşan eritme ünitesinde erime noktası üzerindeki sıcaklığa ısıtılarak eritilip sıvı haline getirilmektedir. Erimiş polimer bir pompa yardımıyla sabit basınç altında düse başlıklarından soğuk hava akımı bulunan odalara

püskürtülmektedir. Soğuk hava akımı yardımıyla katılaşan liflere, bitim işlemi uygulanmakta ve daha sonra germe çekme işlemi ile lif oryantasyonu sağlanarak lifler bobinlere sarılmaktadır. Kullanım yerine göre; kesikli lif üretimi için lifler istenen boyda kesilmekte ve balyalamaktadır (Başer, 1983; Başer, 1992; Yakartepe, 1996; Demiryürek, 2009) Polyester lifi; kullanılacağı yere göre üretimdeki şekli değiştirilerek istenen enine kesit şeklinde (üçgen, yıldız, yarım ay gibi) ve incelikte üretilebilmekle birlikte, genellikle dairesel enine kesite sahiptir. Boyuna kesiti ise pürüzsüz ve muntazam olup cam çubuğa benzemektedir. Parlak görünümlü olan polyester lifi, 1.35 g/cm3 ile 1.45g/cm3 aralığında yoğunluğa sahiptir. Bu tür lifler gerilmeye, eğilip bükülmeye karşı oldukça dayanıklı olmakla beraber mukavemeti 3-9 g/denye aralığında değişmektedir. Ayrıca ıslandığında mukavemet kaybı olmamaktadır. Hidrofob karakterli olan polyester lifi, standart atmosfer koşullarında %0.4-0.8 oranında nem çekebilmektedir. Isıya ve kimyasallara karşı oldukça dayanıklı durumda bulunan bu tür liflerin boncuk oluşturmaya eğilimi oldukça yüksek olup statik elektriklenme özelliği nedeniyle üretim sırasında problem çıkabilmektedir (Başer, 1983; Başer, 1992; Yakartepe, 1996; Albrecht, vd., 2003).

2.4. Betonda Enerji Çalışmaları

Elastik zemine oturan plakların dizaynı, 1920'li yıllarda Westergaard tarafından geliştirilen elastik metot ile yapılmaktadır. Dizayn sonucu elde edilen döşeme kalınlığı oldukça fazladır ve zemin betonunun servis gereksinimleri dikkate alınmamıştır. Plastik metodun kullanımıyla plak kalınlığı azaltılmış, deformasyon ve çatlak kontrolü, nihai taşıma kapasitesi ve servis yükleri dikkate alınmıştır. Plastik metotda, plağın sünek davranacağı kabul edilmektedir. Plağın, çatlak sonrası elasto-plastik davranışı için yeteri miktarda çelik tel veya hasır donatıya sahip olması gerekir. İçinde donatı olmayan veya en az donatı miktarına sahip olmayan plaklar, elastik metotla hesaplanması gerekmektedir. Rötre donatısı olarak kullanılan ve beton kesit alanının %0.10 – 0.15 değerinde donatı içeren zemin betonları, esnek davranış gösterememekte ve çözümleri elastik metot ile yapılmaktadır. Bu donatılar, sadece rötre çatlaklarının sınırlandırılması için kullanılmakta ve beton plakların nihai taşıma kapasitesine etkileri olmamaktadır (Bayramov vd., 2004; Yerlikaya, 2005; Taşdemir vd., 2006; Yalçın vd., 2007).

Taşıma sınırı, yapının dayanımı, servis yük durumu ise çatlak genişliğinin sınırlandırılması ve deformasyonu ile ilgilidir. Elastik zemine oturan döşemelerin eğilme

nihai dayanımları için yapılan dizaynı, “kırık hatlar” teorisine dayanmaktadır (Yield Line Theory). Nihai limit durumunda, döşeme altında kırık hatlar boyunca uzanan eğilme momentlerinin plastik bölgede oluştuğu kabul edilmektedir. Diğer taraftan, elastik zemine oturan plakların üst yüzeylerinde çatlak oluşumu istenmez. Bu nedenle, döşemenin üst yüzeyinde kırık hatlar boyunca devam eden eğilme momentleri, beton dizayn momentleri ile sınırlandırılır. Özellikle dış saha betonlarında, rötre ve sıcaklık değişimleri, önemli çekme gerilmelerine sebep olabilir. Bu durum, yüzeyde çekme gerilmeleri oluşturan üniform dağılı yükler arasında veya raf ayakları arasında problemlere yol açabilir. Bu durumda, çatlak momentlerin ve beton çekme dayanımının azaltılması gerekmektedir (Bayramov vd., 2004; Yerlikaya, 2005; Taşdemir vd., 2006; Yalçın vd., 2007) .

Kırık Hatlar Teorisi şu şekildedir: Elastik zemine oturan bir plak üzerine tekil bir yük uygulandığında, Şekil 2.7’de gösterildiği gibi, ilk çatlamadan önceki ve sonraki moment dağılımı farklılık göstermektedir. Yükün artmasıyla, yük altında oluşan eğilme gerilmeleri, betonun eğilme dayanımına eşitlenir. Plak kırılmaya başladığında, pozitif momentlerden dolayı plak altında radyal gerilme çatlakları oluşur. Betonun eğilme dayanımının sınırına getiren bu momentin değeri (2.1)’de ki formülle hesaplanmaktadır (Bayramov, vd., 2004; Yerlikaya, 2005; vd., 2006 ; Yalçın, vd., 2007).

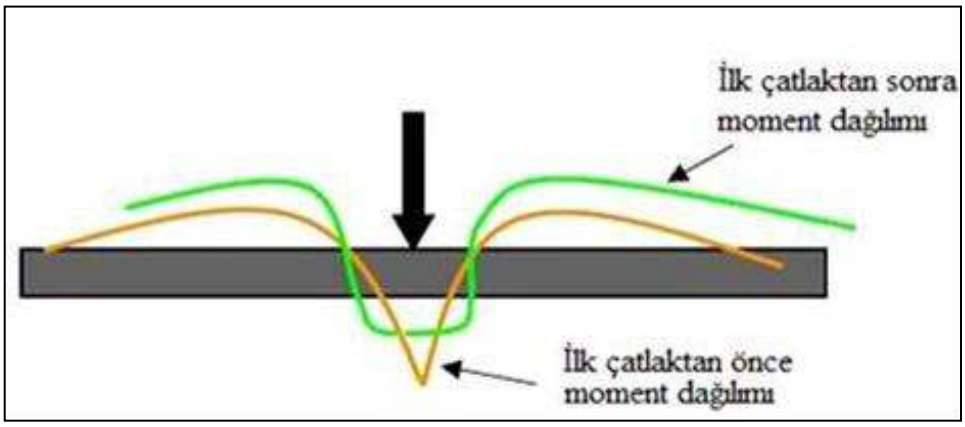
$$M = f_{ck,fl} \, (h^2/6) \qquad (2.1)$$

Bu eşitlikte;

M ; Betonun eğilme dayanım sınırı momenti

$f_{ck,fl}$; Donatısız betonun karakteristik eğilme dayanımı (N/mm^2)

h ; Döşeme kalınlığı (mm)



Şekil 2.7. Elastik zeminde tekil yük moment dağılımı şematik gösterimi

Yükün daha da artmasıyla, pozitif moment daha fazla artmamaktadır, ancak plak yüzeyinde negatif moment artmaya devam etmekte ve yükün uygulandığı noktadan 2x karakteristik boy uzunluğunda en yüksek düzeyine ulaşmaktadır. Plağın negatif moment kapasitesini aştığında, yüzeyde daire şeklinde gerilme çatlakları gözlenmektedir. Plağın kırılma yükü olarak (eğilmede), (2.2)'de ki formülle hesaplanmaktadır (Taşdemir, vd., 2006 ; Yalçın, vd., 2007),

$$Pu = 2\,\pi\,(\,Mn + Mp\,) \qquad (2.2)$$

Bu eşitlikte;

Pu ; Plağın kırılma yükü
Mn ; Plağın nihai negatif momenti (yüzeyde)
Mp ; Plağın nihai pozitif momenti (tabanda)

Yukarıda açıklanan çatlak gelişiminde, plağın sünek davrandığı, dolayısıyla zımbalanma olmayacağı kabul edilmiştir.

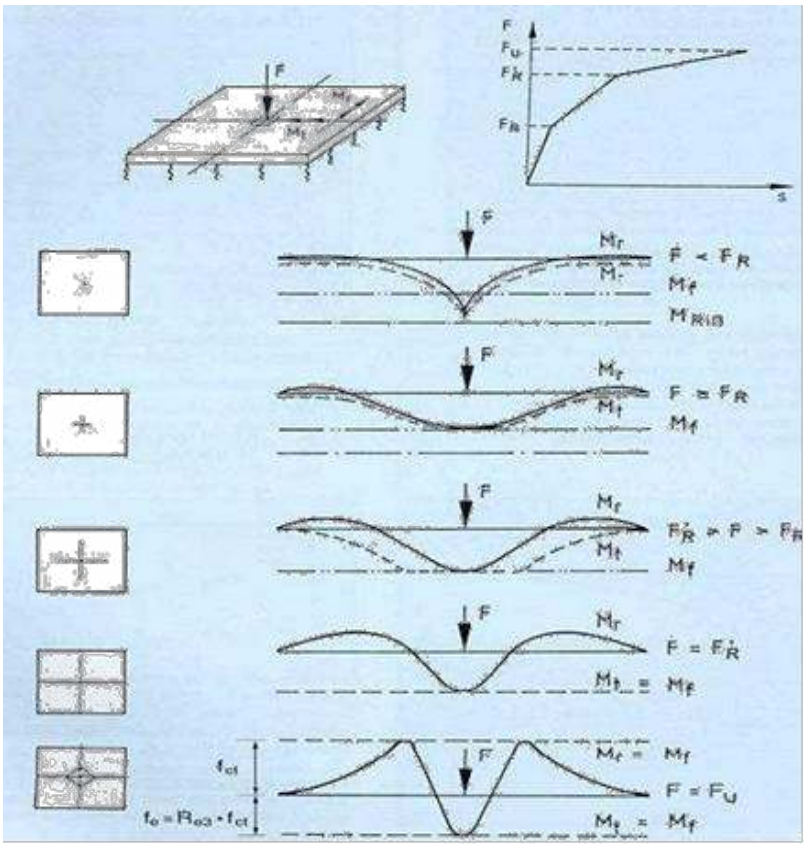
Çelik tel donatılı zemin betonlarında moment dağılımı Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Çelik tel donatılı beton plaklar için dizayn moment kapasitesi, (2.3)'de ki formülle hesaplanmaktadır (Yalçın vd., 2007).

$$Mp = (f_{ck,fl} / \gamma c)\ (R_{e,3})\ (h^2/6) \quad (2.3)$$

Bu eşitlikte;

γc = Beton için güvenlik faktörü

$R_{e,3}$ değerinin en az 0.3 olması, dolayısıyla bu değeri sağlayacak dozajda ve özellikte çelik telin betonda bulunması gerekir. Çelik teller sünekliliği arttırırlar, negatif moment kapasitesine etkisi yoktur.



Şekil 2.8. Çelik tel donatılı zemin betonlarında moment dağılımı

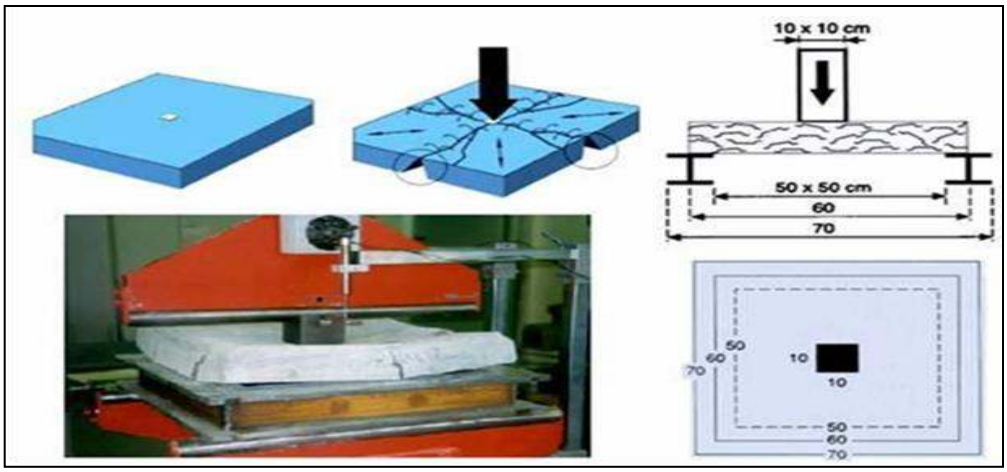
Betonun enerji yutma (sönümleme) kapasitesinin ve sünekliliğinin artması ve çatlak oluşumunu frenlemesi çelik tellerin betona kazandırdığı önemli özelliklerdendir. Zaten çelik tellerin betona katılmasının en önemli amacı bu özelliklerdir (Dramix, 2008).

Amerika, Japonya, Norveç ve Hollanda gibi gelişmiş ülkelerde ağır yüklere maruz, endüstriyel zemin betonlar, yoğun betonlar, prefabrik beton elemanlar ve elastik zemine oturan beton elemanlar için yapılan, gerek karışım tasarımı gerek statik hesaplarda enerji faktörü de önemli bir yer tutmaktadır. Burada adı geçen betonlarda açıklık geçme yine klasik

demir donatı ile sağlanmaktadır. Çelik teller yüksek performanslı beton üretiminde de kullanılmaktadır. Yüksek performanslı betonların tasarımında, betonun enerji yutma özelliği de dikkate alınmaktadır. TS 10515 (1992)'de belirtilen yöntemle yapılan kiriş eğilme testleri, ÇTB'ların enerji yutma kapasitelerinin belirlenmesinde önemli yol göstermektedir. Burada belirtilen yöntem Amerikan ve Avrupa standartları ile aynıdır (Taşdemir ve Yerlikaya, 2003; Uğurlu,1999). Ancak telli betonların enerji yutma kapasitelerini sadece kiriş eğilme testleri ile tespit etmek plak şeklindeki betonlar için ne kadar geçerlidir, bu hala tartışılmaktadır. Çünkü yük, kiriş testlerinde betona noktasal uygulanırken, pratikte plak betonlarda belli bir alanı etkilemektedir (Khaloo ve Afshari, 2005).

Fransız Demiryolları (SNCF) ve Grenoble Essais laboratuarının birlikte yürüttükleri araştırma programı temel alınarak ÇTB'ların özelliklerini karakterize eden "plak testi" geliştirilmiştir (Şekil 2.9.) Bu test Nisan 2006 yılında "Avrupa Standardizasyon Birliği (CEN-European Committee For Standardization) tarafından EN

14488-5 (2006) olarak standartlandırılmıştır. Testin amacı püskürtme betonların telli plak beton numuneler üzerinde enerji yutma kapasitelerinin belirlenmesidir. Test standartlaşmadan önce "Fransız Plak Testi" ismi ile anılmakta idi. Her ne kadar standart püskürtme betonlar için olsa bile, olumsuz hava şartlarına ve ağır yüklere maruz saha betonları içinde uygun bir test metodu olduğu düşünülmektedir. Bu testte Şekil 2.9.'da verilen düzenekle plak betonlara merkezden 25 mm deformasyona kadar yükleme yapılmaktadır. Bu işlem sırasında kayıt altına alınan yük-deformasyon değerleri ile betonun enerji yutma kapasitesi bulunmaktadır.



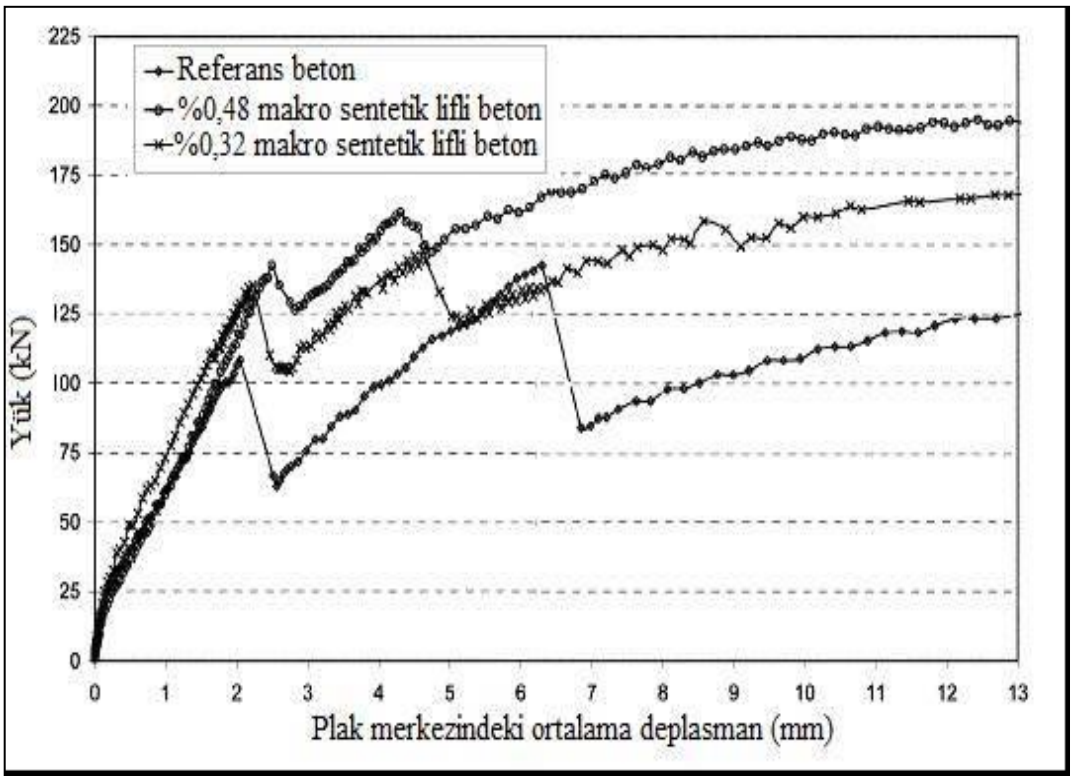
Şekil 2.9. EN 14488-5 plak test düzeneği (Fransız Plak Testi) (EN 14488-5, 2006)

EFNARC (1996) ÇTB'ların plak testlerinde 25 mm kadar deformasyon sonunda olması gereken enerji sınıflandırmasını Tablo 2.1'de belirtildiği gibi oluşturmuştur.

Tablo 2.1. EFNARC çelik lifli beton enerji sınıflandırması

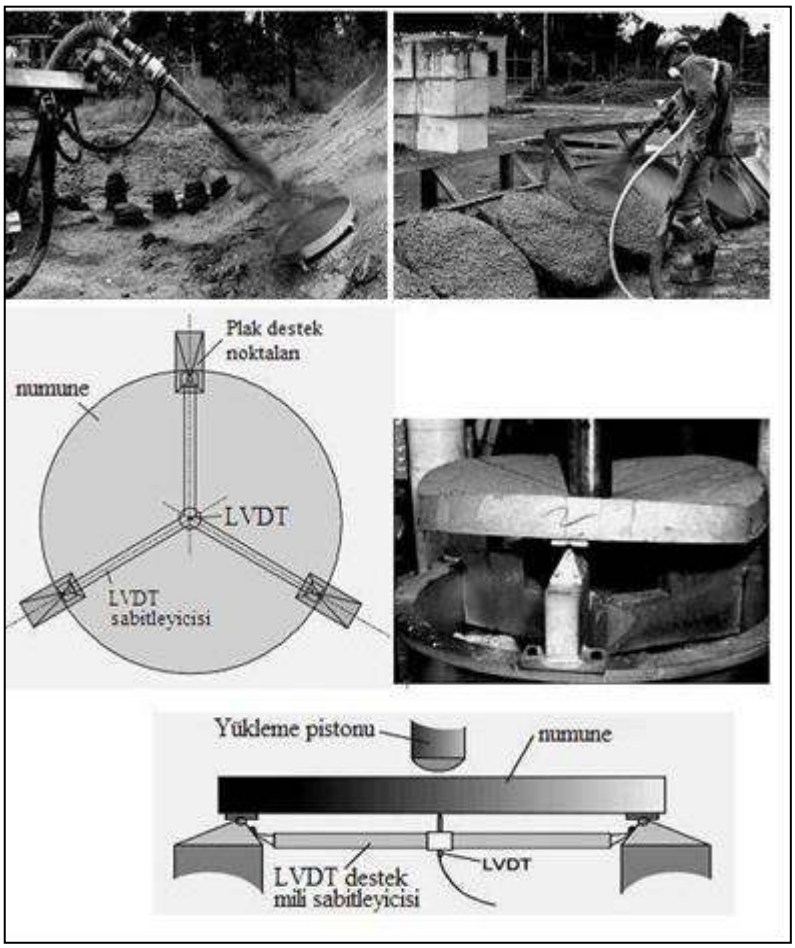
Tokluk sınıfı	**25 mm deformasyonda (Joule)**
a	500
b	700
c	1000

Roesler ve arkadaşları (2006) , 2200x2200x127 mm ebatlarına sahip plak betonları üzerine büyük ölçekli yük deneyi yapmışlardır. Deneylerde beton hacminin %0.32 ve %0.48 oranlarında MST ve lifsiz referans beton olmak üzere 3 tür beton kullanılmıştır. Buna göre sentetik teller (ST) betonların çatlama gerilmelerini önemli derecede değiştirmemiştir. Ancak betonlara merkezden yapılan sabit hızlı yükleme sonucu, %0.32 ve %0.48 oranlarına sahip MST'ların sırasıyla %25 ve %32 çatlama gerilmesi yükünü referans betona göre arttırmıştır. Çalışma ile ilgili yük deformasyon grafiği Şekil 2.10'da görülmektedir.



Şekil 2.10. Roesler vd (2006) MST'ların plak testi grafikleri

Lif içerikli betonlarda plak test yöntemleri öncelikle püskürtme betonlar için düşünülmüştür. Bunlardan biri de ASTM C 1550 – 05'tir (2005). Bu test yönteminde liflerin betonda çatlama olduktan sonra eğilme dayanımı ve enerji yutma kapasiteleri ölçülmektedir. Prensip olarak standart lifli püskürtme betonlar için tasarlanmıştır. Buna uygun olarak Şekil 2.11'de gösterildiği gibi 80 cm çapında, 7.5 cm kalınlığında püskürtme beton yöntemi ile elde edilen plak betonlar kullanılmaktadır. Betonlar kenardan 2.5 cm içerde üç eşit aralıktaki mesnetler üzerine yerleştirilmekte ve tam ortadan 4 cm sehim olana kadar yuvarlak başlık bir piston ile yükleme yapılmaktadır. Yükleme sonucu yük-deformasyon eğrisi ve buna bağlı olarak enerji deformasyon eğrileri çıkarılmaktadır. Bu eğrilerle liflerin betondaki enerji yutma özelliğine ne kadar katkıda bulunduğu hakkında yorum yapılabilmektedir.



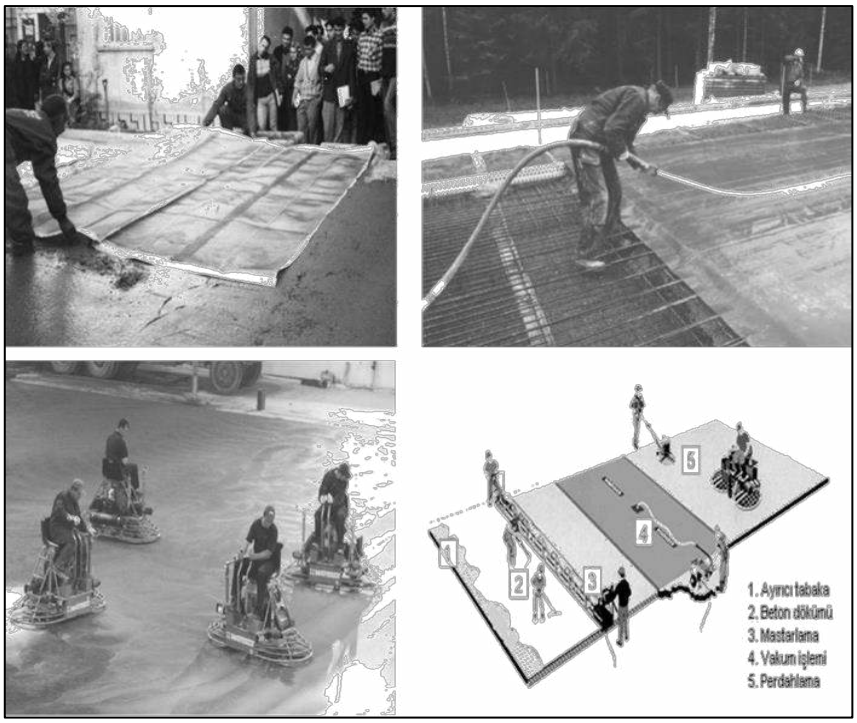
Şekil 2.11. ASTM C 1550 – 05 Lifli betonlarda Plak Testi

Genel olarak lif uzunluğu ve miktarı arttıkça plak betonların enerji yutma kapasiteleri de artmaktadır. Lifler betonun nihai kırılma dayanımını önemli derecede etkilememekle beraber enerji yutma özelliği tersine önemli miktarda artmaktadır (Şahin ve Köksal, 2007;

Ünal vd., 2007). Löfgren (2005)'in yaptığı bir araştırmada 820x820x80 mm ebatlarındaki plak betonlar üzerinde çalışmıştır. Merkezden 80x80 mm^2'lik alanda yapılan yükleme sonucu, %0.5 oranında lifli betonun referans betona göre yaklaşık 1.2 kat, %1 oranında lifli betonun %0.5 lifli betona göre yaklaşık 2 kat ve %1.5 oranında lif katkılı betonun %1 lifli betona göre yaklaşık 1.5 kat enerji yutma kapasitelerinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

2.5. Literatürde Vakumlu Beton

Saha beton uygulamalarında kullanılan bir yöntem olan vakum; kalıba yerleştirilen taze betonun tüm yüzeyinin düzeltilmesine müteakip özel bir ürün olan vakum örtüsünün serilmesiyle vakum pompasının örtüye takılarak karışım içerisindeki suyun belli miktarının çekilmesi işlemidir (Şekil 2.12). Taze beton içerisinde bulunan suyun belli miktarının geri alınmasıyla karışımdaki suyun beton sertleştikten sonra meydana getireceği zararları minimum seviyelere indirilmesi sağlanmıştır (Bolat, 2002; Bolat vd., 2006; Neville, 2001).



Şekil 2.12.Vakumlu beton uygulama aşamaları

Bilindiği üzere betonda karışım suyu hidratasyon ve işlenebilirlik amacıyla kullanılır. Beton, kalıba yerleştirilip yüzeyine son şekli verildikten sonra, suyun işlenebilirlik için kullanılan kısmı olumsuz etkileri de beraberinde getirir. Vakum uygulaması karışım

suyunun betonda oluşturduğu zararları önlemek amacıyla yapılır (Neville, 2011 ; Bolat vd., 2006).

Zemine oturan döşemelerde vakumlu beton uygulama aşamaları; (Bolat vd., 2008; Bolat vd., 2010; Yamaguchi ve Muramatsu,1999); aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Zemin stabilizasyonu
- Zemine ayırıcı tabaka serilmesi
- Kalıpların yerleştirilmesi
- Varsa donatıların yerleştirilmesi
- Beton dökümü
- Betonun sıkıştırılması ve yüzeyinin mastarlanması
- Vakum örtüsünün serilmesi
- Vakum örtüsü ile vakum pompası bağlantısının yapılması
- Vakum pompasının çalıştırılması ve suyun betondan çıkarılışı
- Vakum işlemi bittikten sonra yüzeyin perdahlanması
- Yüzeye son şeklin verilmesi (yüzey sertleştirici ya da renkleştirici kullanımı)

Zemine oturmayan kat döşemelerinde zemin stabilizasyonu ve ayırıcı tabaka aşamaları olmaz. Kalıplar tamamlanıp donatı yerleştirildikten sonra beton dökülüp vakum uygulamasına geçilir.

Vakumlu beton uygulamasında dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir: (Bolat vd., 2008; Bolat vd., 2010;).

Zemin stabilizasyonu iyi yapılmalıdır. Zemin yeterince sıkıştırılmalı. Aksi takdirde beton döküldükten sonra oluşacak yüklerle zeminde çökmeler oluşabilir.

Beton zemine direk döküldüğünde karışım suyunun bir kısmı zemine sızabilir. Bu durum zeminin gevşemesine ve ileriki zamanlarda çökmesine neden olabilir. Ayrıca zeminde oluşabilecek çatlak doğrultularının betona geçmemesi gerekir. Bu nedenlerden dolayı zeminde ayırıcı bir tabaka (naylon - 0.2 mm) mutlaka kullanılmalıdır. Ayırıcı tabaka zemine kırışıksız düz bir şekilde serilmelidir. Bu tabaka yapıların üst kat betonlarında kalıp

üzerinde kullanılmaz Kuru kıvamlı betonlarda vakum uygulamasıyla yeterince iyi sonuçlar alınmaz. Bu yüzden akıcı kıvamlı betonlarda uygulanması tercih edilmelidir.

Donatısız saha betonlarında daldırma vibratör yerine vibratörlü yüzey mastarları kullanılır. Bunlar betonu hem düzeltir hem de yüzeyden titreşim uygulayarak sıkıştırır. Donatılı betonlarda ise donatı sıklığına göre hem daldırma hem de vibratörlü yüzey mastarları birlikte kullanılabilir.

Beton yüzeyi düzeltildikten sonra vakit geçirmeden vakum örtüsü serilmelidir. Vakum örtüsü 3x6, 4x6, 5x6 ve 6x6 metre ebatlarındadır. Vakum örtüsü ile beton yüzeyi arasında hava boşluğu kalmamasına dikkat edilmelidir. Böyle yerler varsa mala ile bastırarak kaybedilmelidir.

Vakum örtüsü ile vakum pompasının tespiti bir hortum ile yapıldıktan sonra vakum pompası çalıştırılmalıdır.

Vakum süresi beton tabaka kalınlığı ile doğrudan ilgilidir. Bazı kaynaklara göre vakum işlemi betonun ilk 15 cm'sine kadar iyi derece de etkisini gösterebilmekte, fakat derinlik arttıkça etkisi azalmaktadır.

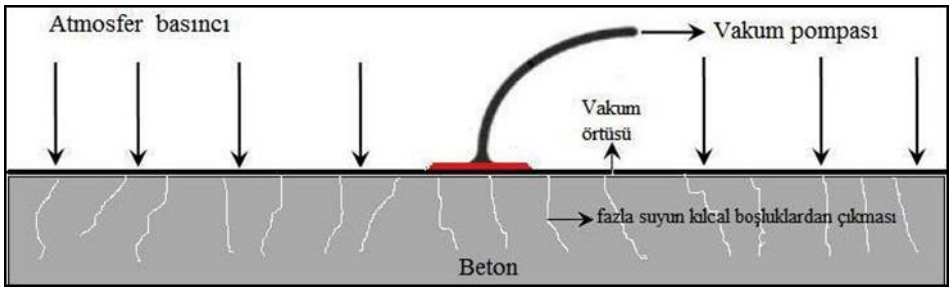
Vakum işlemi sırasında pompa ile betondan çekilen su atılır. Belli bir süre sonra pompadan su kesik kesik atılır, sonra su hiç gelmez buhar çıkmaya başlar. Pompadan tamamen buhar çıkması vakum işleminin bittiğini gösterir ve vakum pompası durdurulur. Bazı kaynaklarda yaklaşık her 5 cm beton kalınlığı için 5 dakika vakum uygulanabileceği tavsiye edilmektedir. Ancak bu tavsiye kesin olarak doğru değildir. Vakum işleminin bittiği pompadan tamamen buhar çıkmasıyla kesinlik kazanır. Bu süre de betonun tabaka kalınlığı, çökme değeri ve varsa donatı sıklığı ile doğrudan ilgilidir ve farklılık gösterebilir.

Vakum örtüsü beton yüzeyinden kaldırılır ve varsa yapışmış beton parçaları ayrı bir yerde su ile yıkanmalıdır.

Vakum örtüsü kaldırıldıktan sonra beton yüzeyi üzerinde yürünebilecek kadar sertleşmiş olur. Vakum işlemi esnasında betonda çukurlaşan ve örtü kaldırılırken kopan bölgeler taze betonla doldurulup mala ile düzeltilir. Daha sonra tercihen helikopter tipi perdah makinesi ile perdah yapılır. Bu tip perdahlama beton yüzeyinin tesviyesini en iyi şekilde gerçekleştirmiş olur.

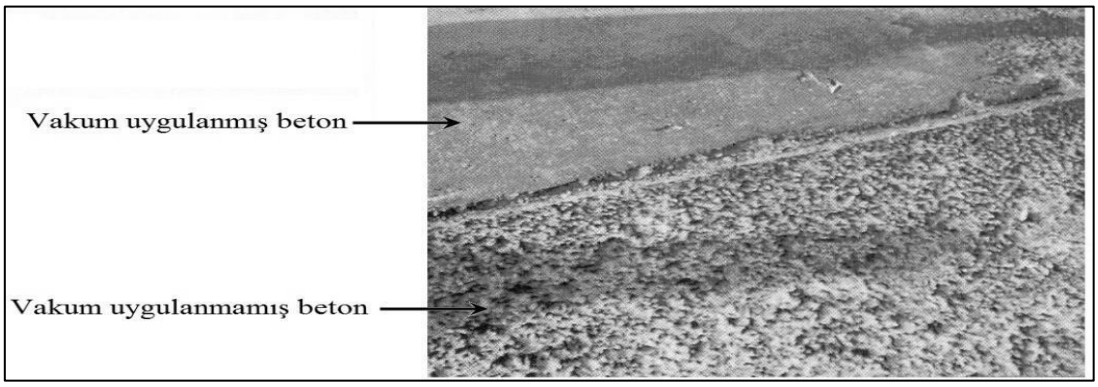
Perdahlama işleminden sonra beton yüzeyine sertleştirici ya da renklendirici katkılar homojen bir şekilde serilerek yüzeye son şekli verilebilir.

Vakum örtüsü sadece betondaki suyu emmesini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Betonun tüm yüzeyinden topladığı suyu ortasında biriktirip bir hortum vasıtasıyla pompaya ulaştırır. Örtü betondan kapiler yolla suyu çeker (Şekil 2.13.). Betona kimyasal katkı katılmış ise bunun rengi çıkan suda olabilir (Bolat vd., 2008; Bolat vd., 2010;).



Şekil 2.13. Vakum uygulaması

Akışkan kıvama sahip betonlarda segregasyon olma ihtimali yüksektir. Segregasyon sonucu beton kalıp içinde homojenliğini kaybeder. İri agregalar yerçekimi etkisiyle dibe, ince agregalar da yukarı hareket eder. Beton karışımı içinde yoğunluğu en az olan su da yukarı hareket eder ve yüzeyde beton terleme suyu olarak bir film tabakası şeklinde birikir. Bu olay betonun yüzey tabakasını zayıflatır, boşluk miktarını ve geçirimliliğini artırır. Olumsuz hava koşullarına, aşınmaya ve ağır yüklere maruz saha betonlarında, etkiler yüzeyden geldiği için beton yüzey tabakasının son derece dayanıklı olması istenir. Buda yalıtım, yüzey kaplamaları ya da vakumlu beton uygulamasıyla mümkündür. Vakum uygulaması ile segregasyon önlenir, beton yüzey kısmında kompozite artar. Kompozitenin artması vakum etkisiyle yüzeye çimento ve çimento inceliğinde ince agreganın hareket etmesiyle oluşur. Şekil 2.14'de bir saha betonunun bir kısmına vakum uygulanmış diğer kısmına elektrik kesintisi nedeniyle uygulanamamış ve böylece 30 ay sonraki durumu gösterilmiştir (Bolat vd., 2006; Özdemir, 1999).



Şekil 2.14. 30 ay sonunda vakum uygulanmış ve uygulanmamış beton yüzeyi

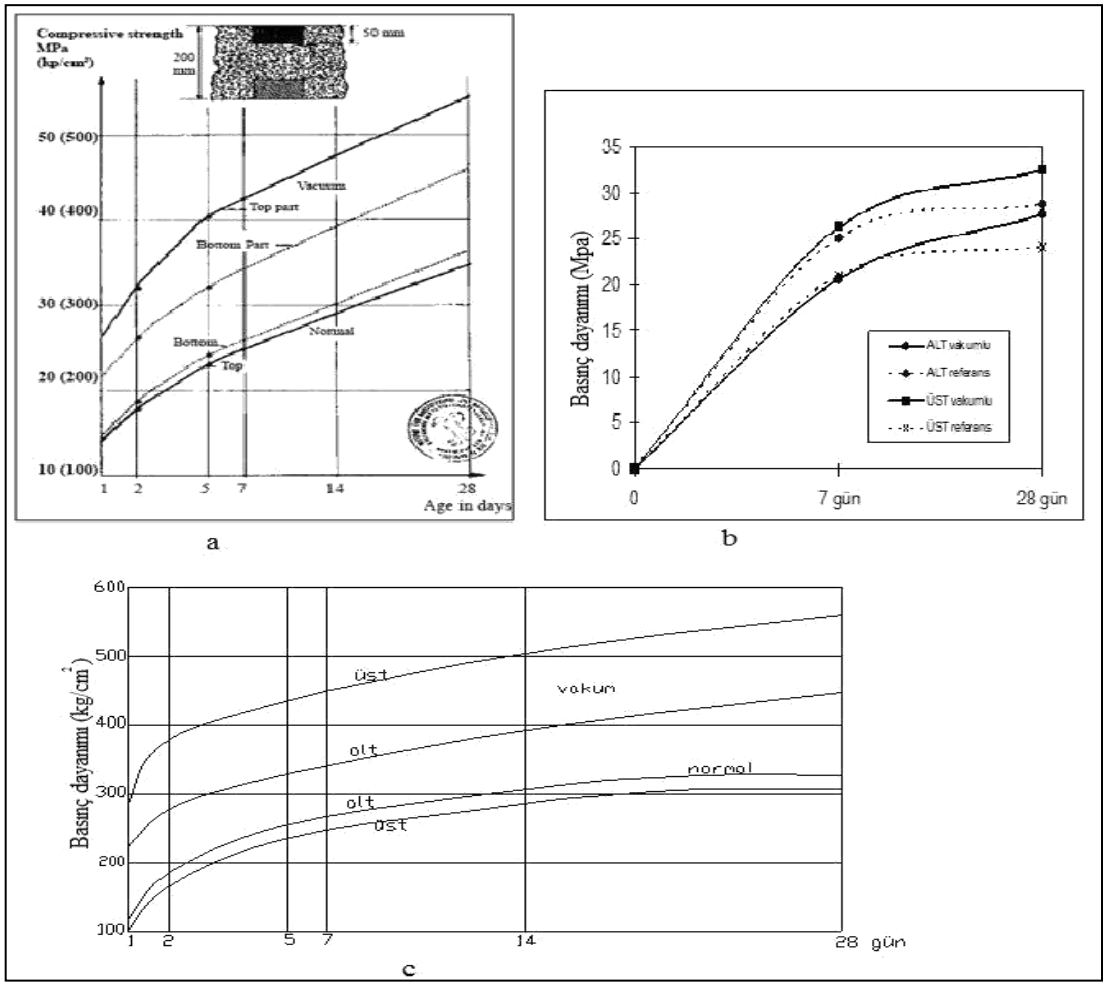
Betonun işlenebilirliği kalıba yerleştirilip yüzeyi düzeltilene kadar gereklidir. Yapılan araştırmalarda betonun hidratasyon reaksiyonu ve işlenebilirlik için (katkı maddesi kullanılmamış ise) su/çimento oranı 0.42'den az olmamalıdır. Bu oranın yaklaşık çimento ağırlığının 0.30'luk kısmı çimentonun reaksiyonları için, 0.12'lük kısmı da işlenebilirlik için gereklidir. İşlenebilirlik için kullanılan su, beton yerleştikten sonra kılcal boşluklara dönüşebilmektedir. Bu boşluklar betonun geçirimliliğinin artmasına ve buna bağlı olarak ileriki yaşlarda aşınma ve donma çözülme dayanımına da olumsuz etkilemesine neden olur. Vakum uygulaması ile zamanla oluşabilecek bu kapiler boşluklar fazla suyun çıkarılmasıyla beton taze halde iken baştan engellenmiş olur (Erdogan, 2010; Yalçın ve Koç, 2004).

Kat döşeme betonlarında vakumlu beton uygulaması önemli kazançlar sağlamaktadır. Genel olarak bir kat döşemesinde betondan sonra tesviye betonu ve son yüzey kaplaması (seramik, şap, parke…) vardır. Döşeme betonun üzerindeki diğer tabakalar binanın ölü yükünü arttırmakta, işçilik, malzeme, zaman ve ekonomik açıdan yapıyı, yaptıranı ve içinde yaşayacakları olumsuz etkileyebilmektedir. Vakumlu beton uygulamasında istenirse sadece kullanılan betonla işlem bitmektedir. Dökülen betona yapılan yüzey işlemleriyle betona son şekli verilebilmektedir. İstenirse yüzeye ince bir tabaka sertleştirici ve renkleştirici katkı maddesi de uygulanabilir (Neville, 2011; Mehta, vd., 2006; Erdoğan ve Y. Turhan, 2010).

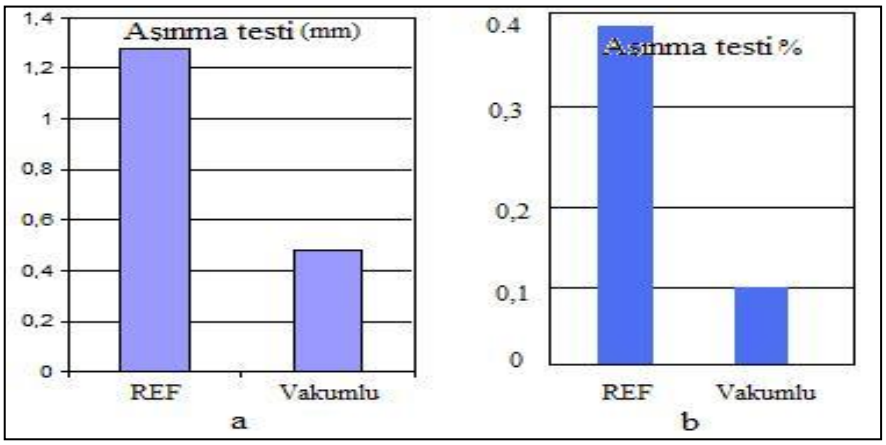
1960 yılından bu zamana kadar vakumlu beton uygulaması yapan ve ekipmanı üreten İsveçli Tremix Ltd. yaptığı bir çalışmada 20 cm kalınlığındaki bir plak betonun üstten 5cm'sine ve alttan 5 cm'sine basınç deneyine tabi tutmuş ve sonuçları aşağıdaki (Şekil 2.15.-a) grafiğe yansıtmıştır. Buna göre vakum uygulanmamış betonun alt tabakası üst tabakasına göre daha dayanıklı çıkmakla birlikte çok yakın değerdedir. Vakumlu betonun ise üst

tabakası alt tabakasından yaklaşık %20 daha fazla çıkmıştır. Buna karşın vakumlu betonun üst tabakası vakum uygulanmamış betondan yaklaşık %43 daha fazla çıkmıştır. Saha betonlarında olumsuz hava koşulları, aşınma ve ağır yük gibi etkiler yüzeyden geldiği için beton yüzey tabakası bu sonuçlara göre daha yüksek direnç gösterecektir. Benzer çalışmalar Bolat (Şekil 2.15.-b) ve Hanover Üniversitesi (Şekil 2.15.-c) tarafında da yapılmıştır (Bolat, 2002).

Vakumlu betonlar üzerine İsveç Chalmers Üniversitesi (a) ve H. Bolat (b) tarafından yapılan iki aşınma deneyi sonuçları Şekil 2.16. gösterilmiştir. Deney sonuçları birbirine benzemekle birlikte vakumlu betonlarda aşınma miktarı normal betonlara göre % 75 daha az olduğu görülmektedir (Bolat, 2002).

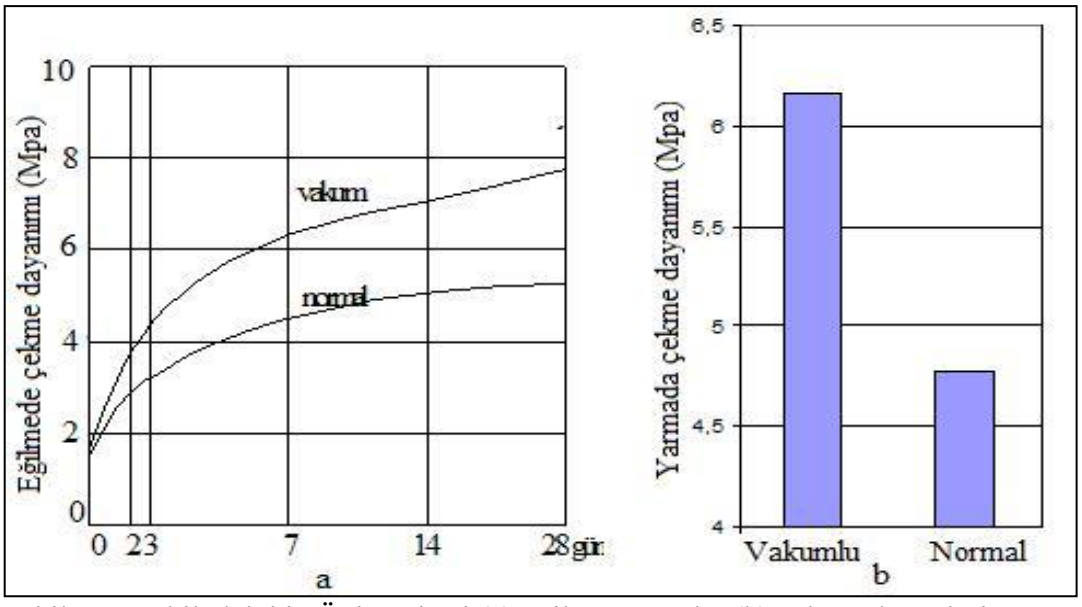


Şekil 2.15. Vakumlu beton ve normal beton alt üst basınç dayanımı testleri sonuçları



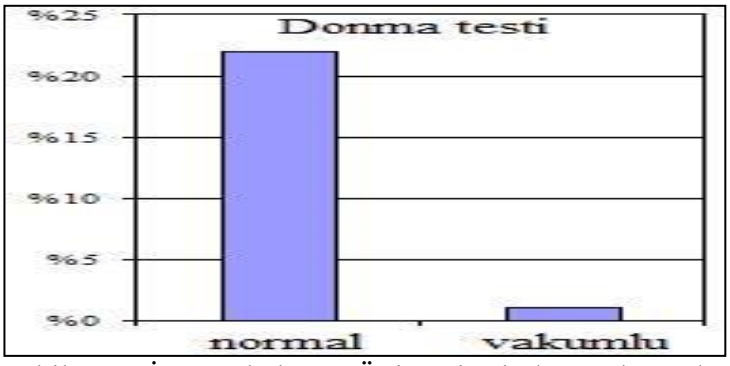
Şekil 2.16. İsveç Chalmers Üniversitesi (a) ve Bolat (b) aşınma deneyi sonuçları

Vakumlu betonun eğilmede ve yarmada çekme dayanımları üzerine Philadelphia Üniversitesi (a) ve Bolat (b) (2002) tarafından yapılan deney sonuçları Şekil 2.17'de grafik şeklinde gösterilmiştir. Eğilmede çekme dayanımı vakumlu beton 28 gün sonunda normal betona göre yaklaşık %33 fazla çıkmış, yarmada çekme dayanımında ise vakumlu beton 28 gün sonunda normal betona göre yaklaşık %24 fazla çıkmıştır (Bolat, 2002).

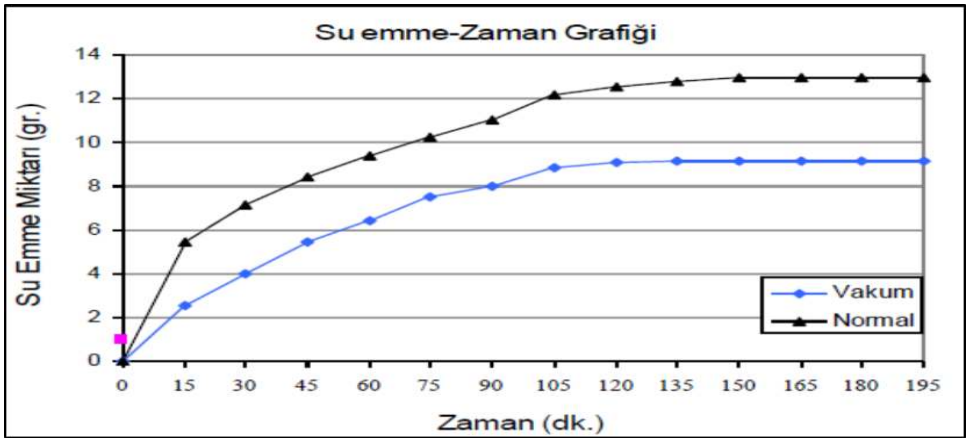


Şekil 2.17. Philadelphia Üniversitesi (a) eğilme ve Bolat (b) çekme deneyleri

İsveç Chalmers Üniversitesinde yapılan bir çalışmada dona karşı vakumlu betonun normal betona göre yaklaşık 11 kat daha dayanıklı olduğu belirlenmiştir (Şekil 2.18.) Bolat tarafından vakumlu betonların kapiler su emme miktarı tespit edilerek Şekil 2.19.'de grafik şeklinde gösterilmiştir. Buna göre 195 dakika sonunda vakumlu betonun normal betona göre su emmesi yaklaşık %35 daha azdır (Bolat, 2002).



Şekil 2.18. İsveç Chalmers Üniversitesinde yapılan vakumlu beton don testi



Şekil 2.19. Vakumlu ve normal beton kapiler su emme grafiği (Bolat, 2002)

Saeed ve Ezzulddin (2014) vakumlu betonlar üzerine yaptıkları çalışmada, vakum etkisinin en iyi betonunun 200-250 mm derinliğe kadar etkilediğini, bunun çimento ve agrega oranı ile ilişkili olduğunu, bu betonların normal betondan 2-3 kat daha hızlı sertleşmesinden dolayı özellikle prefabrik betonların üretiminde ekonomik katkılar sağlayacağını belirtmişlerdir. Vakum uygulamasının betonların yoğunluklarını önemi derecede arttırdığını, betonların 15 cm'ye kadar üst tabakasında yoğunluk artışı ile dayanım arasında ilişki olduğunu ve kapiler su emme değerlerinin yoğunluk artışına bağlı olarak düşürdüğünü belirtmişlerdir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

3.1.1. Beton

Bu çalışmada üretim tekniği olarak, normal ve vakumlu olmak üzere iki uygulama türünde betonlar kullanılmıştır. Betonları dayanım sınıfına göre, Düşük "C16/20" (D), "Normal" C25/35 (N) ve Yüksek "C35/45" (Y) dayanımlı olarak üretilmiştir. Beton türlerinin tasarım parametreleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Normal beton üretim (3 farklı dayanım sınıfına sahip)
- 3 farklı oranda lifler (A-B-C)
- Vakumlu beton üretim (3 farklı dayanım sınıfına sahip)
- Lif türü (polipropilen (PP) lifli)
- Kısa (K) ve uzun (U) lifler (3 cm kısa ve 6 cm uzun lifler)

Uygulama türü, lif türü, lif boyu, lif oranı ve beton dayanım sınıfı parametreleri ile toplam 42 tür beton üretilmiştir. Dayanım sınıflarına göre betonların karışım oranları Tablo 3.1'de gösterildiği gibi belirlenmiştir. Lif hacmi ile artan toplam beton hacmi kum hacminden eksiltilerek dengelenmiştir. Betonların dayanım sınıfı yükseldikçe çökme değerleri düşmektedir. Bu nedenle Normal ve Yüksek Dayanımlı betonlarda su yerine normal akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılarak çökme değerinin tüm referans betonlarda aynı olması sağlanmıştır.

Tablo 3.1. Beton karışım miktarları

Beton Bileşenleri	**Beton türleri (1000 dm^3)**		
	DR	**NR**	**YR**
Su	301	260	280
Çimento	94.3	115.7	153.3
Hava	14	14	14
Akışkanlaştırıcı	-	4.4	5.8
Agregalar	590.7	608.7	546.9
Uçucu kül	56.7	58.5	52.5
0-2 mm	-	-	120
0-4 mm	215	199	-
2-4 mm	-	-	110
4-8 mm	106	120	-
4-11.2 mm	-	-	140
8-16 mm	106	117	
11.2-32 mm	-	-	124.4
16-32 mm	107	117	-
Toplam	1000	1000	1000

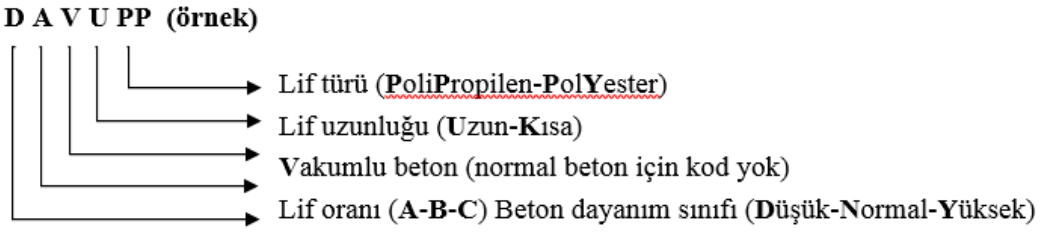
Beton türlerinin kodlanması aşağıdaki gibidir. Betonlar lifsiz referans ve lifli betonlar olarak 2 değişik şekilde kodlanmıştır. Çalışmada 42 tür beton farklı numara ve kodlarla gösterilmiştir. Tablo 3.2.'de tüm betonların sıra numarası ve kodlarının açıklamaları gösterilmiştir.

Lifsiz betonlar:

DR-NR-YR: Düşük-Normal-Yüksek dayanımlı referans betonlar

DVR-NVR-YVR: Düşük-Normal-Yüksek dayanımlı vakumlu referans betonlar

Lifli Betonlar:



Tablo 3.2. Beton türleri ve kodları

Beton kodu	Beton türü açıklaması
DR	Düşük Dayanımlı Referans beton
DVR	Düşük Dayanımlı Vakumlu Referans beton
DAKPP	Düşük Dayanımlı A oranlı 3 cm polipropilen lifli beton
DBKPP	Düşük Dayanımlı B oranlı 3 cm polipropilen lifli beton
DCKPP	Düşük Dayanımlı C oranlı 3 cm polipropilen lifli beton
DAVKPP	Düşük Dayanımlı A oranlı 3 cm polipropilen lifli vakumlu beton
DBVKPP	Düşük Dayanımlı B oranlı 3 cm polipropilen lifli vakumlu beton
DCVKPP	Düşük Dayanımlı C oranlı 3 cm polipropilen lifli vakumlu beton
DAUPP	Düşük Dayanımlı A oranlı 6 cm polipropilen lifli beton
DBUPP	Düşük Dayanımlı B oranlı 6 cm polipropilen lifli beton
DCUPP	Düşük Dayanımlı C oranlı 6 cm polipropilen lifli beton
DAVUPP	Düşük Dayanımlı A oranlı 6 cm polipropilen lifli vakumlu beton
DBVUPP	Düşük Dayanımlı B oranlı 6 cm polipropilen lifli vakumlu beton
DCVUPP	Düşük Dayanımlı C oranlı 6 cm polipropilen lifli vakumlu beton
NR	Normal Dayanımlı Referans beton
NVR	Normal Dayanımlı Vakumlu Referans beton
NAKPP	Normal Dayanımlı A oranlı 3 cm polipropilen lifli beton
NBKPP	Normal Dayanımlı B oranlı 3 cm polipropilen lifli beton
NCKPP	Normal Dayanımlı C oranlı 3 cm polipropilen lifli beton
NAVKPP	Normal Dayanımlı A oranlı 3 cm polipropilen lifli vakumlu beton
NBVKPP	Normal Dayanımlı B oranlı 3 cm polipropilen lifli vakumlu beton
NCVKPP	Normal Dayanımlı C oranlı 3 cm polipropilen lifli vakumlu beton
NAUPP	Normal Dayanımlı A oranlı 6 cm polipropilen lifli beton
NBUPP	Normal Dayanımlı B oranlı 6 cm polipropilen lifli beton
NCUPP	Normal Dayanımlı C oranlı 6 cm polipropilen lifli beton
NAVUPP	Normal Dayanımlı A oranlı 6 cm polipropilen lifli vakumlu beton
NBVUPP	Normal Dayanımlı B oranlı 6 cm polipropilen lifli vakumlu beton
NCVUPP	Normal Dayanımlı C oranlı 6 cm polipropilen lifli vakumlu beton
YR	Yüksek Dayanımlı Referans beton
YVR	Yüksek Dayanımlı Vakumlu Referans beton
YAKPP	Yüksek Dayanımlı A oranlı 3 cm polipropilen lifli beton
YBKPP	Yüksek Dayanımlı B oranlı 3 cm polipropilen lifli beton
YCKPP	Yüksek Dayanımlı C oranlı 3 cm polipropilen lifli beton
YAVKPP	Yüksek Dayanımlı A oranlı 3 cm polipropilen lifli vakumlu beton
YBVKPP	Yüksek Dayanımlı B oranlı 3 cm polipropilen lifli vakumlu beton
YCVKPP	Yüksek Dayanımlı C oranlı 3 cm polipropilen lifli vakumlu beton
YAUPP	Yüksek Dayanımlı A oranlı 6 cm polipropilen lifli beton
YBUPP	Yüksek Dayanımlı B oranlı 6 cm polipropilen lifli beton
YCUPP	Yüksek Dayanımlı C oranlı 6 cm polipropilen lifli beton
YAVUPP	Yüksek Dayanımlı A oranlı 6 cm polipropilen lifli vakumlu beton
YBVUPP	Yüksek Dayanımlı B oranlı 6 cm polipropilen lifli vakumlu beton
YCVUPP	Yüksek Dayanımlı C oranlı 6 cm polipropilen lifli vakumlu beton

Beton karışım tasarımları TS 802 (2009), TS 10514 (1992) ve TS 10515 (1992) standartları dikkate alınarak hazırlanmıştır. Bu standartlarda betonların üretim aşaması ve testleri için önemli ayrıntılar belirtilmiştir.

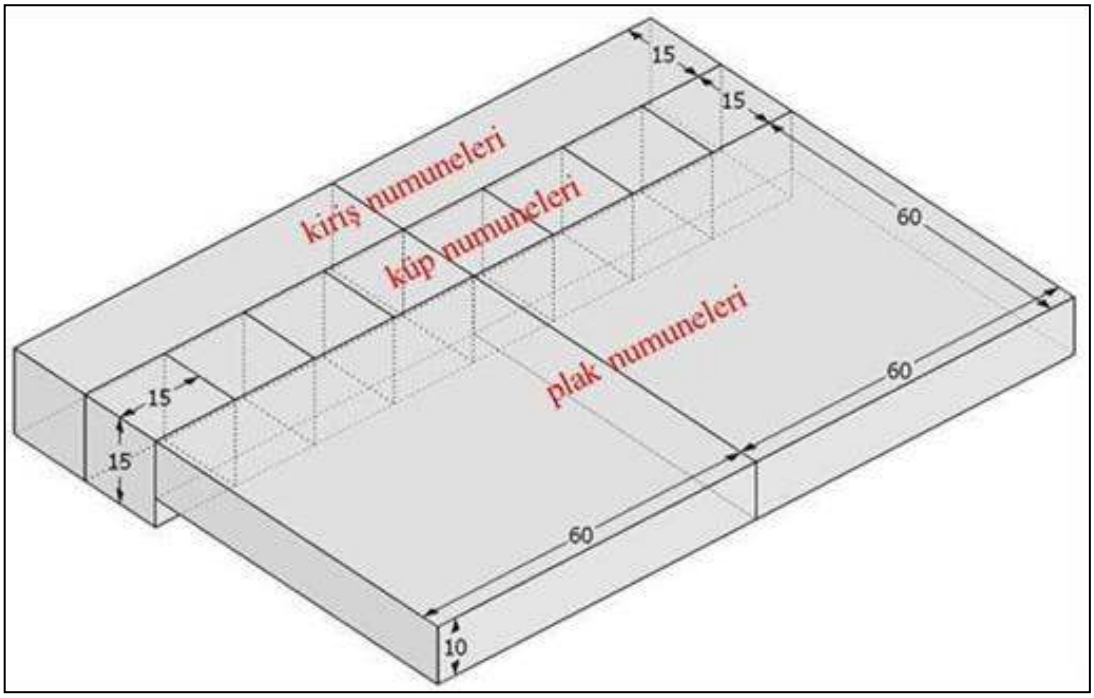
Bu ayrıntılar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- Betonun çimento miktarı en az 320 kg olması gerekmektedir.
- 0-4 mm kum miktarı, toplam agrega kütlesinin %40-%45'i olması gerekmektedir (750 kg/m^3 - 850 kg/m^3).
- En büyük dane çapı (D_{max}) 32 mm olan lif içeren karışımlarda 0-0.25 mm arasındaki agrega 400 kg/m^3 olması gerekmektedir.
- En büyük dane çapı, doğal agrega için 28 mm, kırma taş için 32 mm olması gerekmektedir. 14 mm'den büyük agrega oranı, %15-20 arasında sınırlanması gerekmektedir.
- Betonun karakteristik basınç mukavemeti en az 20 Mpa olmalıdır.
- Çelik tel uzunluğu 40 mm'yi geçiyorsa, deney numunesinin genişliği ve yüksekliği 150 mm'den az olmaması gerekmektedir.
- Su/Çimento oranı en çok 0.55 olması önerilmektedir.
- Yüksekliği 75 mm veya daha az olan numuneler için tek tabakada, yüksekliği 75 mm'den fazla olan numuneler için 2 tabakada beton yerleştirilmesi gerekmektedir.

Betonlar iki grup halinde üretilmiştir. Birinci grup da lifsiz referans betonlar ile kısa lifli normal üretim betonlar "plak, kiriş ve küp örnekler olarak ayrı kalıplarda üretilmiştir (Şekil 3.1). Bu üretim yönteminin tercih sebebi; agrega en büyük tane çapının belirtilen kalıp en dar boyutuna uygun olması (TS 802), küp ve kiriş numunelerin en dar boyutunun kısa lif uzunluğunun 2 katından daha fazla olması (TS 10514) ve laboratuvar şartlarında daha pratik üretim yapılmasıdır.

Şekil 3.1. Lifsiz referans ve kısa lifli normal üretim betonlar.

İkinci grup da ise betonlar 120x120 cm (Şekil 3.2) olarak hazırlanan bir alanda üretilmiştir. Bu şekilde kısa lifli vakumlu, uzun lifli ve uzun lifli vakumlu betonların üretimi yapılmıştır. Belirtilen alan, içinde 20 cm, 15 cm ve 10 cm kalınlığında olan bölümlerden oluşmaktadır. Bu alanlardan *20 cm kalınlığında olan bölümlerden* 10 cm çapında karot numuneler TS EN 12504-1'e (2011), *15 cm kalınlığında olan bölümlerden* 15x15x15 cm'lik küp numuneler ve 15x15x60 cm'lik kiriş numuneler ve *10 cm kalınlığında olan bölümlerden* 10x60x60 cm'lik plaklar elde edilmiştir.



Şekil 3.2. Uzun lifli normal üretim ve vakumlu betonların kalıp planı

Vakumlu beton üretim aşamaları Şekil 3.3'de görülmektedir.

Şekil 3.3. Vakumlu beton üretimi

3.1.2. Beton Bileşenleri

Çalışmada bağlayıcı malzeme olarak Gümüşhane Aşkale Çimento Fabrikası'ndan temin edilen CEM II/A-M (P-LL) 42.5 R (TS EN 197-1) sınıfı çimento kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.3'de gösterilmiştir.

Tablo 3.3. CEM II/A-M (P-LL) 42.5 R kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal Analizler		**Fiziksel Testler**	
SiO_2	18.59	İncelik (45 µ elek üstü%)	8.58
Al_2O_3	4.69	Özgül Kütle	3.05
Fe_2O_3	3.04	Özgül Yüzey (cm^2/g)	4145
CaO	60.34	Priz Başlangıcı (saat-dk)	2sa-33dk
MgO	1.92	Priz Sonu (saat-dk)	3sa-18dk
SO_3	2.89	Hacim Genleşmesi (mm)	0.7
Kızdırma Kaybı	7.19	Su İhtiyacı %	29.9
Na_2O	0.11		
K_2O	0.64	Basınç Dayanımı (MPa)	
Cl	0.0189		
Ölçülemeyen	0.57	2. gün	23.9
Toplam	100	28.gün	51.1
s.CaO	0.38		
Katkı %	17.87		

Beton üretiminde kullanılan agregalar Gümüşhane yöresine ait Gümüş Hazır Beton tesislerinden temin edilen kireçtaşı agregalardır (Şekil 3.4).

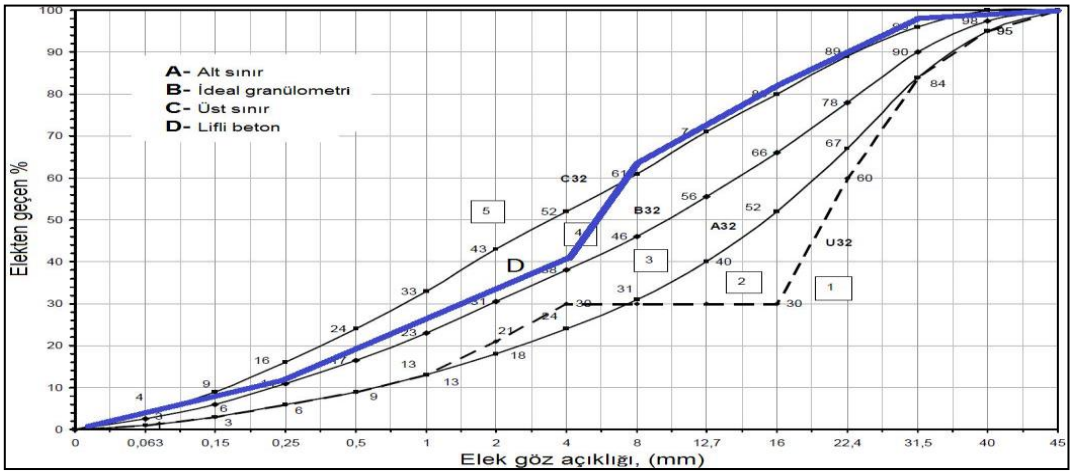
Şekil 3.4. Betonların üretiminde kullanılan ince, orta ve iri agregalar

Agregaların fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.4 de görülmektedir.

Tablo 3.4. Betonlarda kullanılan agregaların fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal özellikler		**Fiziksel özellikler**	0-4 (İnce)	4-32 (İri)
SiO_2	2.95			
Al_2O_3	0.43			
Fe_2O*	0.46	Kuru tane yoğunluğu (g/cm^3)	2.52	2.54
CaO	73.93	DKY yoğunluk (g/cm^3)	2.63	2.59
$MgCo_3$	22.24	Su emme Oranı (%)	4.21	1.93
Toplam	100.01	Porozite (%)	10.62	4.89

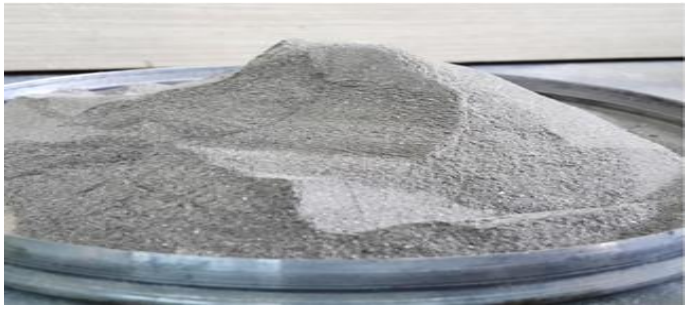
Agrega granülometri dağılımları da Şekil 3.5'de gösterilmiştir. Agrega granülometrisinin belirlenmesinde TS 802 esas alınmış, ancak TS 10514 Çelik lif standardının önerileri de (bkz. 3.1.1 başlığı) dikkate alınmaya çalışılmıştır.



Şekil 3.5. Betonda kullanılan agregaların granülometrisi

Beton üretiminde kullanılan karışım su, Gümüşhane Belediyesi içme suyudur.

TS 10514 standardına göre 0-0.25 mm aralığındaki agregaların 400 kg/m^3 olması gerekmektedir. Bu aralıktaki agrega uçucu kül ile sağlanmıştır. Uçucu kül Afşin Elbistan Termik Santralinden temin edilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Afşin-Eşbistan Temik santralinden temin edilen uçucu kül

Beton üretiminde kullanılan uçucu küllerin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.5'de görülmektedir.

Tablo 3.5. Uçucu kül özellikleri

Kimyasal Analizler (%)	
Toplam SiO_2	23.08
Al_2O_3	6.25
Fe_2O_3	2.58
CaO	47.03
MgO	1.60
SO_3	14.61
K_2O	0.47
Na_2O	0.32
Kızdırma Kaybı	3.95
Cl	0.0334
Fiziksel Analizler	
45 µ elek üzeri (%)	4.0
Özgül Kütle	2.44
Blaine (cm^2/g)	2496
Puzolanik Aktivite	15.8

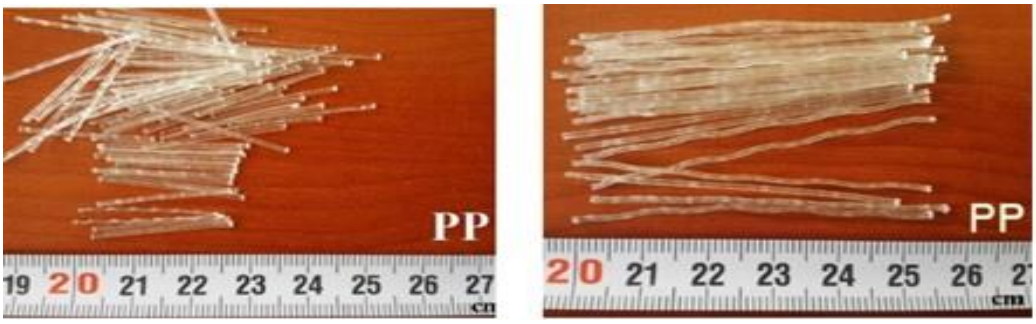
Normal ve yüksek dayanım sınıfına sahip betonlarda Aydos Yapı Kimyasalları kuruluşundan temin edilen TS EN 934–2 standardına uygun Aydos MR-NS 2 tipi "Su azaltıcı normal akışkanlaştırıcı beton katkısı" kullanılmıştır. Normal üretim ve vakumlu üretim referans betonlarda (DR-DVR-NR-NVR-YR-YVR) çökme değeri 15-19 cm arasında tutulmaya çalışılmıştır. Düşük dayanımlı betonlarda bu çökme miktarı su ile sağlanabilmiştir. Ancak normal ve yüksek dayanımlı betonlarda belirlenen çökme miktarı akışkanlaştırıcı katkı maddesi ile sağlanabilmiştir. Tablo 3.6'da belirtilen beton karışım tasarımdaki akışkanlaştırıcı miktarı ön denemeler sonucu belirlenmiştir.

Tablo 3.6. Normal akışkanlaştırıcı katkı maddesi teknik özellikleri

Kimyasal İçeriği	Modifiye lignin sülfonat esaslı sıvı
Görünüm/Renk	Koyu kahverengi
Yoğunluk	1.13 ± 0.02 kg/l.
pH Değeri	8.0 ± 1
Klor İçeriği %	< % 0.1
Alkali İçeriği %	< % 7
Donma Noktası	-3 ºC
Dozaj	Çimento ağırlığının % 0.5 ile % 1.4

3.1.3. Polipropilen Lifler

Bu çalışmada PP lif uzun ve kısa olarak kullanılmıştır (Şekil 3.7). Çalışmada, sentetik liflerle ilgili standart olmayışı nedeni ile TS 10514 çelik lif standardının maksimum belirlediği lif miktarı dikkate alınarak, çelik lif miktarı 15-30-45 kg/m^3 (A-B-C) karşılık gelen hacimler (1.91-3.81-5.72 dm^3/m^3) şeklinde 3 oran belirlenmiştir.



Şekil 3.7. Betonda kullanılan kısa ve uzun PP lifler

Çalışmada kullanılan polipropilen (PP) lif özellikleri Tablo 3.7'de gösterilmiştir.

Tablo 3.7. PP Liflerin teknik özellikleri

Lif Özellikleri	**Polipropilen lif**
Lif oranı (dm^3 A-B-C)	1.91-3.81-5.72
Lif uzunluğu (mm)	25-50
Lif genişliği (mm)	0.5
Lif kalınlığı (mm)	0.25
Lif çapı (mm)	-
Özgül Kütle	0.91
Çekme Dayanımı (MPa)	600-750
Elastik modül (MPa)	3800
En son uzama (%)	10
Alevlenme sıcaklığı (^{0}C)	537
Erime, oksidasyon ve bozulma sıcaklığı (^{0}C)	180
ASTM D 570'e göre Su emme (%-ağırlık esas)	0.01

3.2. Metot

Çalışmada, C16/20, C25/35 ve C35/45 dayanım sınıflarında üretilen betonların taze beton özelliklerinden çökme değeri ve birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Mekanik özelliklerini belirleme amacıyla 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları, eğilme dayanımı ve enerji yutma kapasitelerini belirlemek amacıyla deneyler yapılmıştır.

3.2.1. Taze Beton Özelliklerinin Tayini

42 tür betonda kalıba yerleştirilmeden önce TS EN 12350-2 (2010) göre çökme deneyi yapılmıştır. Betonların birim hacim ağırlıkları 1 gün sonra kesme makinesi ile elde edilen küp numuneler boyutları hassas bir şekilde ölçüldükten ve tartıldıktan sonra belirlenmiştir.

3.2.2. Basınç Dayanımı Tayini

Basınç dayanımı, 150x150x150 mm ebadında küp beton örnek üzerinde TS EN 12390-3'de belirtilen esaslara göre yapılmıştır.

Beton basınç dayanımının hesaplanması:

$$f_c = \frac{F}{A_C} \tag{3.1}$$

eşitliği kullanılmıştır.

Burada;

Fc ; Basınç dayanımı, MPa (N/mm^2),

F ; Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N,

Ac ; Numunenin, üzerine basınç uygulandığı en kesit alanı, (mm^2) ifade etmektedir.

Basınç dayanımın belirlenmesinde vakum uygulanan betonlarda basınç dayanımı belirlemede kullanılacak örnekler kesilerek elde edilmiştir. Beton örnekler ve basınç presi Şekil 3.8'de görülen basınç presi kullanılmıştır

Şekil 3.8. Basınç testine tabi tutulan beton örnekler

3.2.3. Eğilme Dayanımının Tayini (Kiriş Eğilme Testi)

TS 10515'e göre 15x15x60 cm ebatlarında kirişler üzerinde iki noktadan yüklemeli eğilme deneyleri yapılmıştır. Buna göre kirişler 2.5 cm mesnet açıklığı olacak şekilde 55cm açıklığı olan iki mesnet arasına yerleştirilmiştir. Öngörülen eğilme gerilmesi için 3 mm sehim yapılana kadar testin yapılması gerekmektedir, ancak kirişler0.1-0.2 mm/dk sabit yükleme hızı ile kırılana kadar test devam ettirilmiştir. Betonların "en yüksek eğilmede gerilmesi" ve "öngörülen eğilme gerilmesi" için TS 10515'de Eşitlik 3.2 ve 3.3'e göre tespit edilmiştir.

Beton eğilme dayanımı ve öngörülen eğilme dayanımının hesaplanması:

En büyük eğilme gerilme, $$\sigma u = \frac{M}{W} = \frac{\frac{Pu}{2}.\frac{L}{3}}{\frac{b.h^2}{6}} = Pu.\frac{L}{b.h^2} \quad (3.2)$$

Öngörülen eğilme gerilmesi, $$\sigma e = \frac{T_b}{\delta tb}.\frac{L}{b.h^2} \quad (3.3)$$

eşitlikleri kullanılmıştır.

Burada;

σ_u ; En büyük gerilme (N/mm^2)

σ_e ; Öngörülen eğilme gerilmesi (N/mm^2)

T_b ; Şekil değiştirme (3 mm sehimdeki kümülatif alan-Nmm)

L ; Deney numunesinin iki mesnet arasındaki uzunluğu (mm)

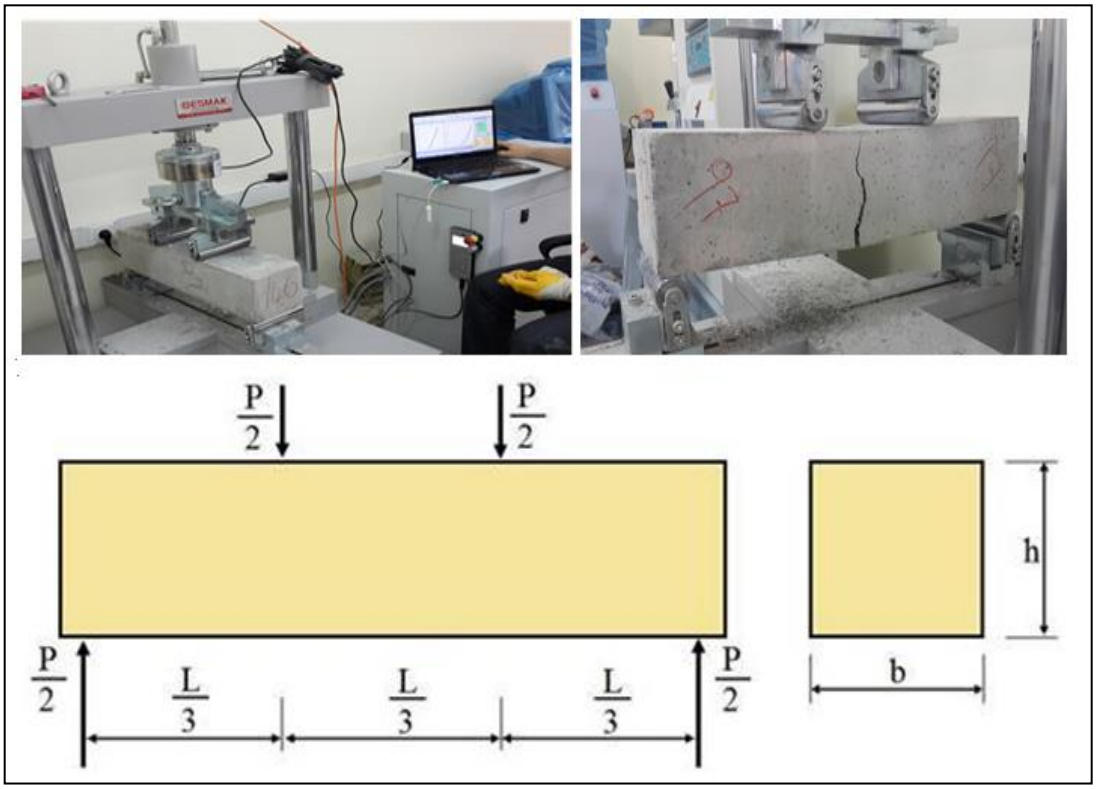
Pu ; Maksimum yük (N)

H ; Deney numunesinin yüksekliği (mm)

δtb ; Sehim 3 mm

b ; Deney numunesinin genişliği (mm)

Kiriş testi deney düzeneği Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Kiriş eğilme testleri

3.2.4. Enerji Yutma Kapasitesinin Tayini (Plak Testi)

Plak testleri için beton bloklardan elde edilen 60x60x10 ebatlarındaki 2 adet plak teste tabi tutulmuştur. Testler EN 14488-5'e (2006) göre yapılmıştır. Buna göre plaklar 5 cm genişliği olan metal çerçeve üzerinde, merkezde 10x10 cm alandan 30 mm sehim olana kadar 1mm/dk sabit yükleme hızı ile eğilmeye tabi tutulmuştur. Plak testleri standardın öngördüğü gibi 30 mm sehime kadar yapılmış, ancak yine standardın öngördüğü gibi 25 mm sehime kadar olan değerler grafiklerde gösterilmiştir. Betonların enerji yutma kapasiteleri (Eşitlik 3.4)'e göre tespit edilmiştir (Bolat ve Şimşek, 2015).

Beton enerji yutma kapasitesinin hesaplanması:

$$E = \sum_{i=0}^{i=\delta_m} \left[(\delta_{i+1} - \delta_i) \frac{F_i + F_{i+1}}{2} \right] \quad (3.4)$$

eşitliği kullanılmıştır.

Burada;

E ; Enerji yutma kapasitesi (Joule: 1N=1J/m),

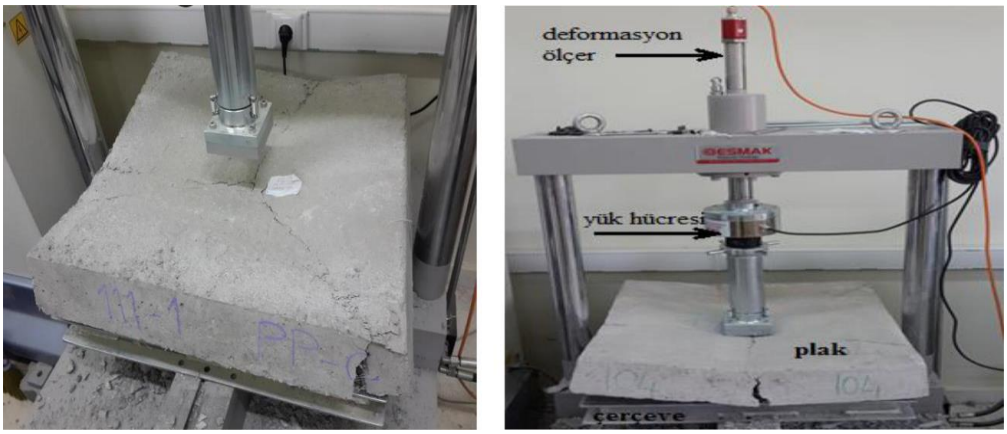
i ; Mevcut sehim (mm),

i+1 ; Mevcut sehimden bir sonraki sehim değeri (mm),

Fi ; i'deki yük değeri (N),

Fi+1 ; i+1'deki yük değeri (N), *m:*25 mm

Plak testi deney düzeneği Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Plak numuneler

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Taze Beton Fiziksel Özellikleri

Tüm betonları çökme ve birim hacim değerleri Tablo 4.1.'de gösterilmiştir. Her bir beton türü yaklaşık 250 dm^3 beton karışımı yapılarak elde edilmiştir. Betonların mekanik özelliklerinin objektif değerlendirilebilmesi için özellikle çökme değerleri su ve akışkanlaştırıcı katkı maddeleri ile eşitlenmeye çalışılmıştır. Tüm betonların çökme değerleri 15-18 cm arasında tutulmaya çalışılmıştır. Bu nedenle çökme değerleri üzerinden herhangi bir tartışma yapılmamıştır.

Taze betonların birim hacim ağırlıkları değerlerine bakıldığında;

- Normal üretim betonlarda lif oranı arttıkça birim hacim değerleri düşmektedir.
- Vakum uygulamasının birim hacim ağırlıklarını arttırdığı görülmüştür.
- Vakumlu betonlarda da lif oranı arttıkça birim hacim ağırlık değerleri düşmektedir.
- Dayanım sınıfı arttıkça betonların birim hacim değerleri de artmıştır.
- PP lif miktarı birim hacim ağırlık değerlerine önemli derecede etkilediği görülmemekte.

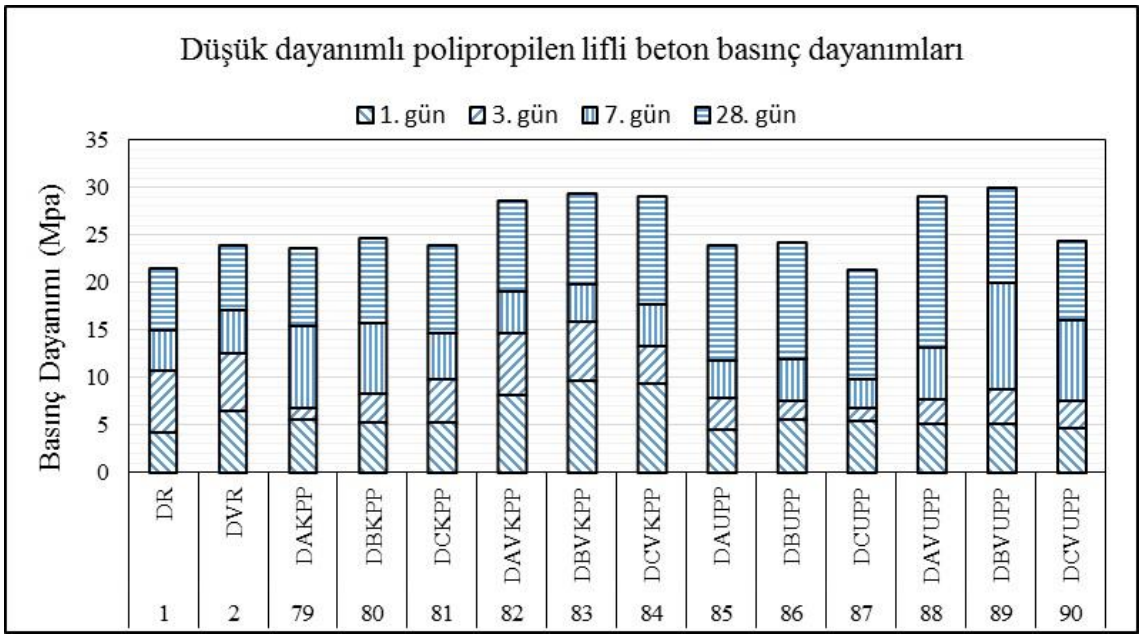
Tablo 4.1. Taze betonların çökme ve birim hacim değerleri

Beton Kodu	**Çökme (cm)**	**BHA (kg/m^3)**	**Beton Kodu**	**Çökme (cm)**	**BHA (kg/m^3**	**Beton Kodu**	**Çökme (cm)**	**BHA (kg/m^3**
DR	15.5	2342	NR	17.5	2355	YR	15	2421
DVR	17	2364	NVR	17	2380	YVR	18.5	2466
DAKPP	18	2324	NAKPP	16	2334	YAKPP	15	2405
DBKPP	18	2318	NBKPP	16.5	2318	YBKPP	16	2385
DCKPP	19	2275	NCKPP	19	2279	YCKPP	18	2316
DAVKPP	16	2382	NAVKPP	18	2375	YAVKPP	16	2459
DBVKPP	18	2361	NBVKPP	19	2319	YBVKPP	18	2436
DCVKPP	19	2312	NCVKPP	16	2287	YCVKPP	18	2377
DAUPP	19	2351	NAUPP	19	2326	YAUPP	16	2388
DBUPP	18	2308	NBUPP	19	2258	YBUPP	16.5	2367
DCUPP	18	2247	NCUPP	18	2227	YCUPP	17	2307
DAVUPP	17.5	2310	NAVUPP	17	2341	YAVUPP	17	2441
DBVUPP	16	2278	NBVUPP	18	2308	YBVUPP	18	2419
DCVUPP	16	2258	NCVUPP	18	2246	YCVUPP	19	2389

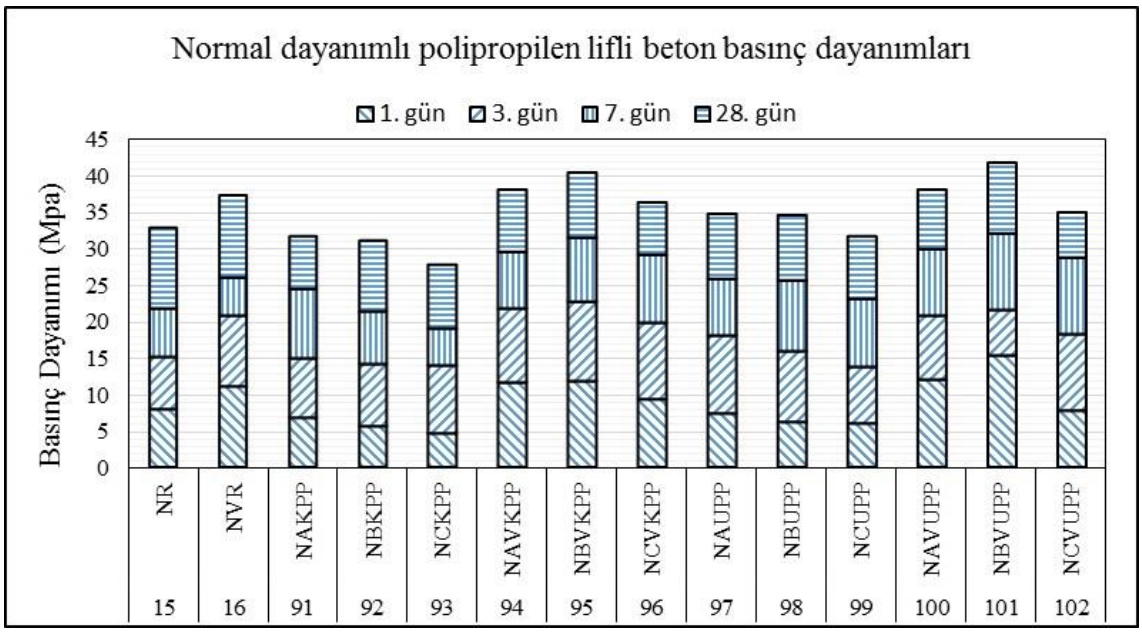
4.2. Basınç Dayanımı

PP lifli betonların basınç dayanımı sonuçları düşük, normal ve yüksek dayanımlı beton sınıfı gruplarına göre oluşturulmuştur. Her grup içinde normal ve vakumlu referans betonların, uzun ve kısa lifli normal ve vakumlu betonların basınç değerleri gösterilmiştir. Basınç değerlerinin 1, 3, 7 ve 28 gün sonuçları kümülatif olarak gösterilmiştir. Şekil 4.1. 4.2. ve 4.3.'de PP lifli düşük-normal-yüksek dayanımlı betonların, basınç dayanımları gösterilmiştir.

Düşük dayanımlı PP lifli betonların basınç dayanımları değerlendirmesinde; ilk üç gün içinde toplam basınç dayanımlarının lifsiz normal ve vakumlu betonlar ile vakumlu kısa lifli betonlar yaklaşık %50 dayanımı kazandıkları görülmektedir. Kısa, uzun ve vakumlu uzun lifli betonlarda ise ilk 3 gün dayanımı %28-41 arasında dayanım kazanmıştır. 28 gün sonunda kısa ve uzun lifler normal betonlarda %9-15 arasında dayanım artışı sağlamıştır. Vakum uygulaması en çok B oranlı uzun ve kısa lifli betonlarda %39'a kadar artış sağlamıştır. Tüm lifli betonlarda B oranı en çok dayanımı, C oranı da en az dayanımı göstermiştir. Özellikle C oranlı uzun lifli betonlarda dayanım A ve B oranlı betonlara göre çok daha düşük olduğu görülmüştür.



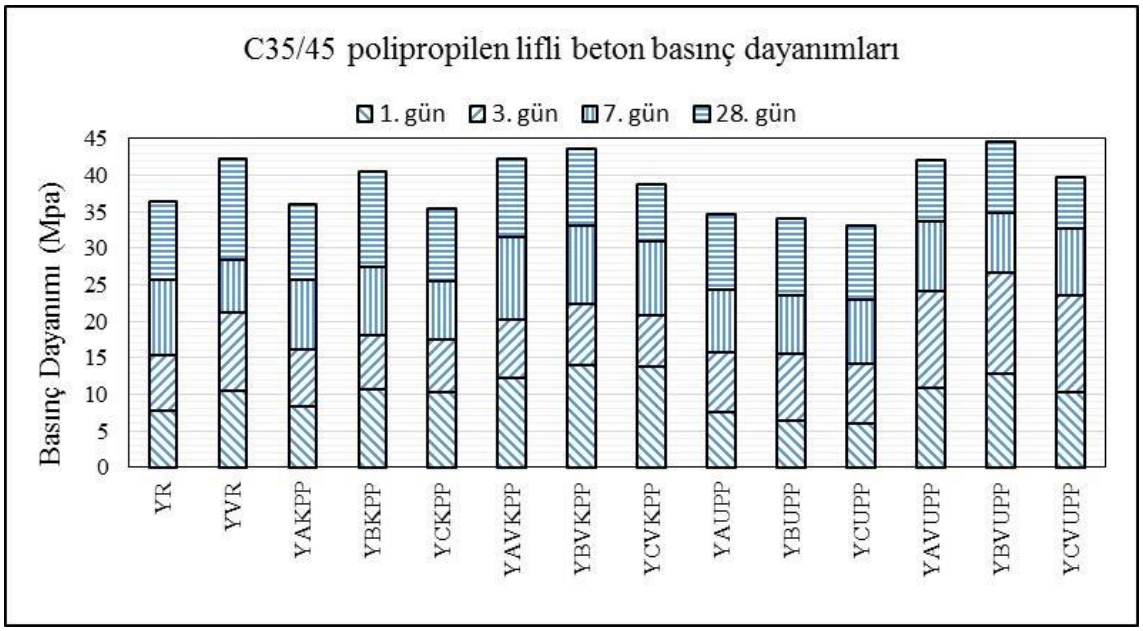
Şekil 4.1. Düşük dayanımlı PP lifli betonların basınç dayanımları



Şekil 4.2. Normal dayanımlı PP lifli betonların basınç dayanımları

Normal dayanımlı PP lifli betonların basınç dayanımları değerlendirmesinde; ilk üç gün içinde toplam basınç dayanımlarının tüm betonlarda yaklaşık %43-57 arasında dayanımı kazandıkları görülmektedir. 28 gün sonunda kısa lifler normal betonlarda %3-6 arasında dayanım düşüşüne neden olmuştur. Vakum uygulaması en çok B oranlı uzun ve kısa lifli

betonlarda %23 ve %27 artış sağlamıştır. Özellikle C oranlı lifli betonlarda dayanım A ve B oranlı betonlara göre çok daha düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 4.3. Yüksek dayanımlı PP lifli betonların basınç dayanımları

Yüksek dayanımlı PP lifli betonların basınç dayanımlarına bakıldığında (Şekil 4.3); ilk üç gün içinde toplam basınç dayanımlarının tüm betonlarda yaklaşık %43-57 arasında dayanımı kazandıkları görülmektedir. 28 gün sonunda kısa lifler normal betonlarda B oranı ~%11 dayanım artışı, A ve C oranı ise %1-3 arasında dayanım düşüşü sağlamıştır. Vakum uygulaması en çok B oranlı uzun ve kısa lifli betonlarda %22 ve %19 artış sağlamıştır. Özellikle C oranlı lifli betonlarda dayanım A ve B oranlı betonlara göre çok daha düşük olduğu görülmüştür.

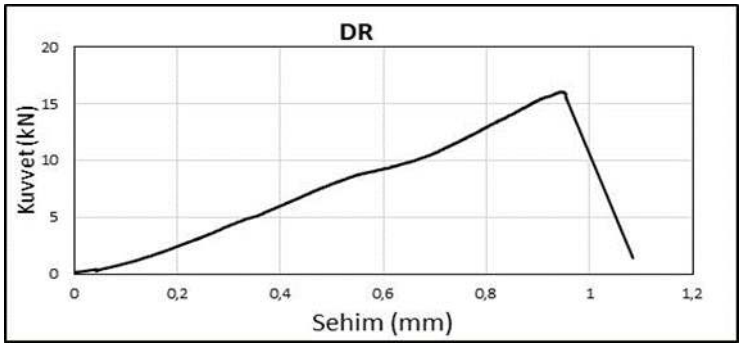
Sonuç olarak: Dayanımı düşük, normal ve yüksek betonlar sınıflarında uzun PP liflerin betonda gereğinden çok kullanılması basınç dayanımını olumsuz etkilediği ve lifsiz vakumlu betonlar ile lifli vakumlu betonlar arasında önemli bir basınç dayanımı farkı olmadığı görülmüştür.

4.3. Kiriş Eğilme Dayanımı

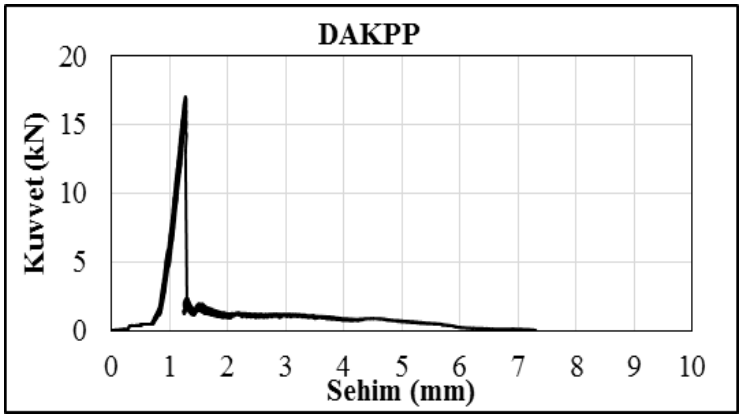
C16/20 Mpa PP lifli betonların kiriş eğilme grafikleri Şekil 4.4. - Şekil 4.17. arasında, C25/30 Mpa PP lifli betonların kiriş eğilme grafikleri Şekil 4.18 - Şekil 4.31. arasında, C35/45 Mpa PP lifli betonların kiriş eğilme grafikleri Şekil 4.32. - Şekil 4.45. arasında

gösterilmiştir. Her dayanım sınıfına ait betonlar kendi içinde değerlendirilmiştir. Değerlendirme parametreleri ilk beton kırılma yükü, ilk kırılmadan sonraki lif davranışları, en büyük eğilme gerilmesi ve öngörülen eğilme gerilmesidir.

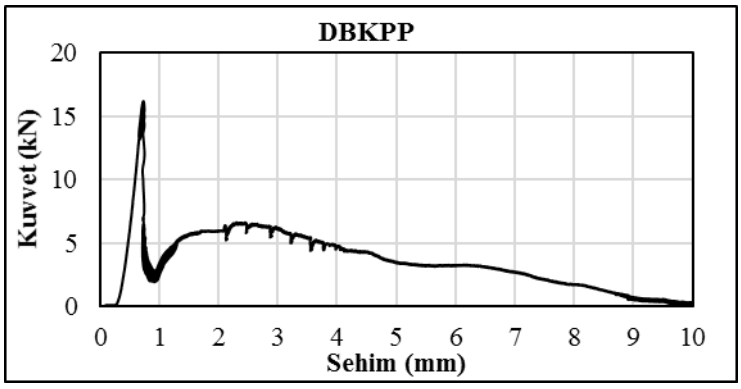
C16/20 Mpa Referans betonlara yapılan kısa PP lif takviyesi; DR'ye (Şekil 4.4.) göre DAKPP, DBKPP ve DCKPP (Şekil 4.5. Şekil 4.6. ve Şekil 4.7.) betonlarının ilk kırılma yükleri yaklaşık aynı değerlere sahip oldukları görülmüştür. PP lifler dayanımı düşük betonların ilk kırılma yük değerlerine önemli bir etkisi yoktur yorumu yapılabilir.



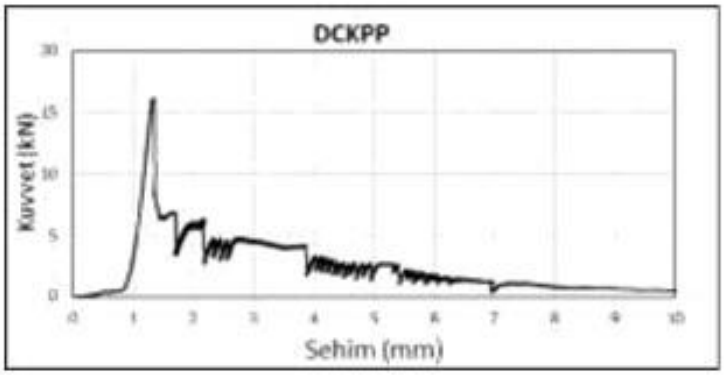
Şekil 4.4. DR betonların yük-sehim grafiği



Şekil 4.5. DAKPP lifli betonların yük-sehim grafiği

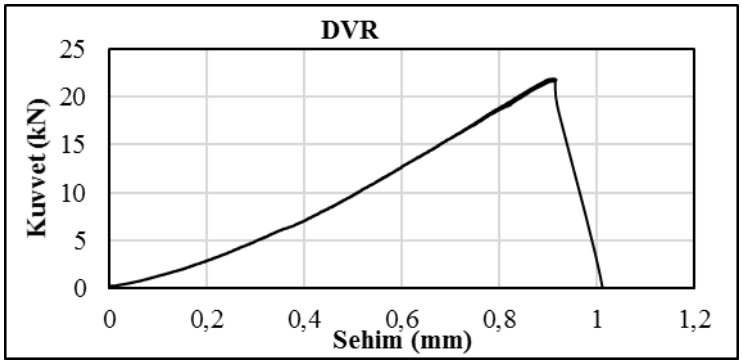


Şekil 4.6. DBKPP lifli betonların yük-sehim grafiği

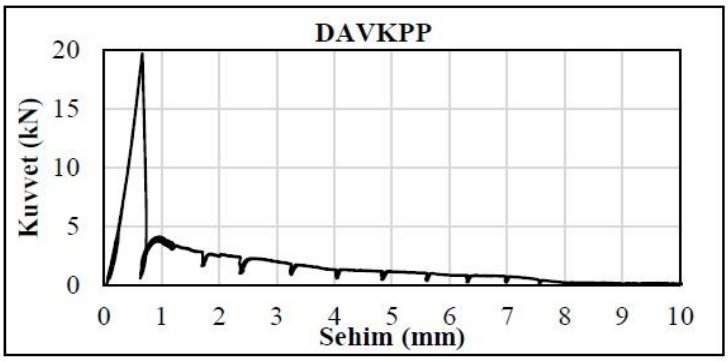


Şekil 4.7. DCKPP lifli betonların yük-sehim grafiği

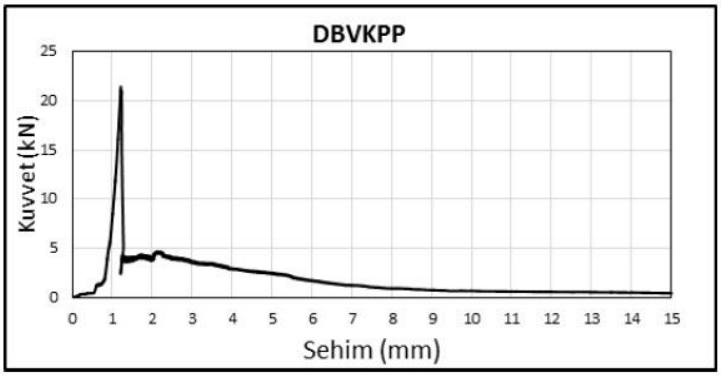
C16/20 Vakumlu betonlara yapılan kısa PP lif takviyesi; DVR'ye (Şekil 4.8.) göre DAVKPP, DBVKPP ve DCVKPP (Şekil 4.9. Şekil 4.10. ve Şekil 4.11.) betonlarının ilk kırılma yüklerinin yaklaşık aynı değerlere sahip oldukları görülmüştür. PP liflerin dayanımı düşük vakumlu betonların ilk kırılma yük değerlerine önemli bir etkisi yoktur yorumu yapılabilir.



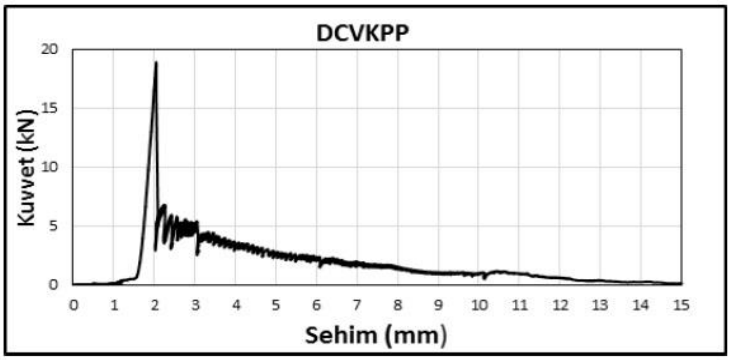
Şekil 4.8. DVR betonların kiriş eğilme grafiği



Şekil 4.9. DVR betonların kiriş eğilme grafiği

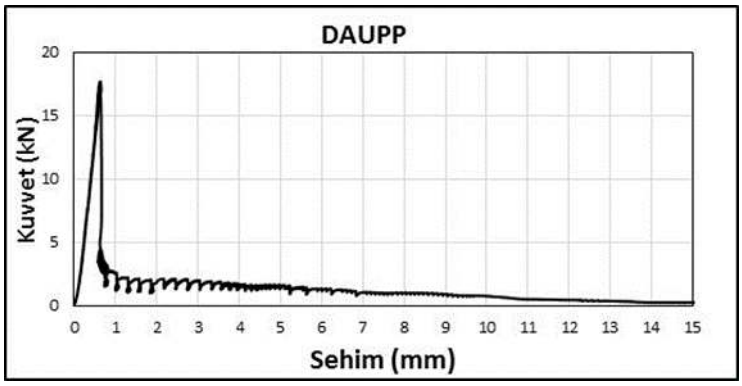


Şekil 4.10. DBVKPP lifli betonların yük-sehim grafiği

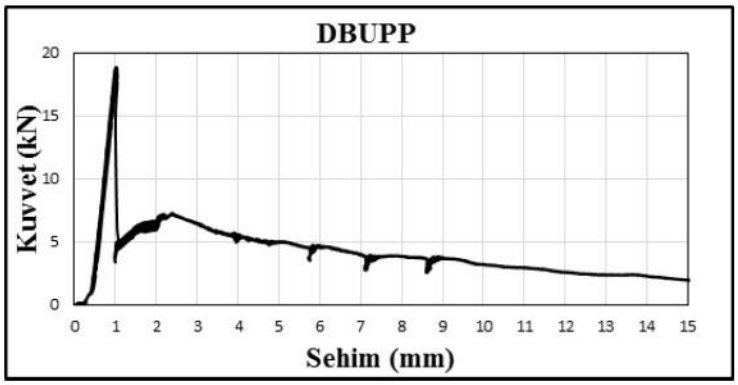


Şekil 4.11.DCVKPP lifli betonların yük-sehim grafiği

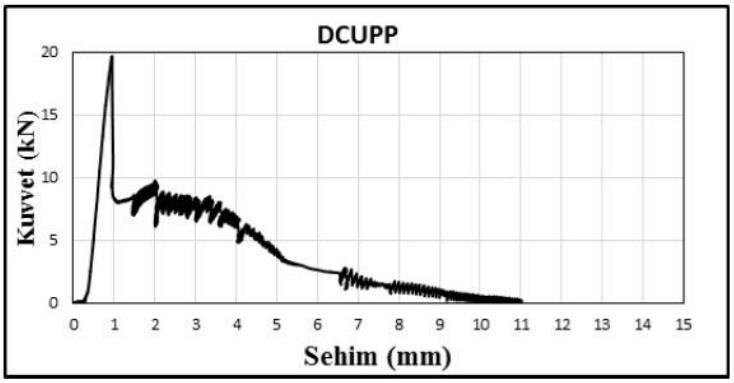
C16/20 Referans betonlara yapılan uzun PP lif takviyesi; DR'ye (Şekil 4.4) göre DAUPP, DBUPP ve DCUPP (Şekil 4.12. Şekil 4.13. ve Şekil 4.14.) betonlarının ilk kırılma yüklerine bakıldığında sırasıyla; ~%13, ~%19, ~%25 daha fazla kırılma yükü değerlerine sahip oldukları görülmüştür. PP lif oranı arttıkça kırılma yükü değerlerinde de artış olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.12. DAUPP lifli betonların yük-sehim grafiği

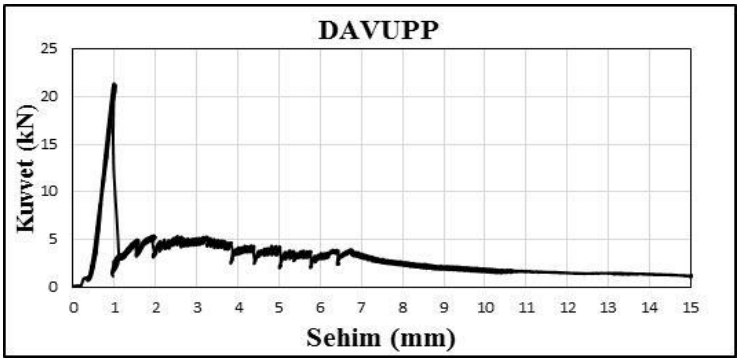


Şekil 4.13. DBUPP lifli betonların yük-sehim grafiği

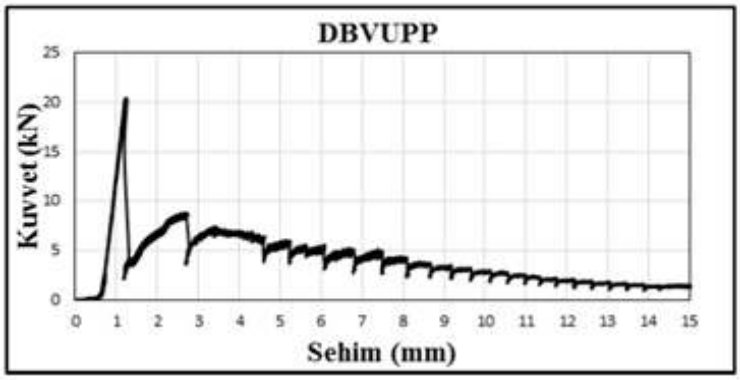


Şekil 4.14. DCUPP lifli betonların yük-sehim grafiği

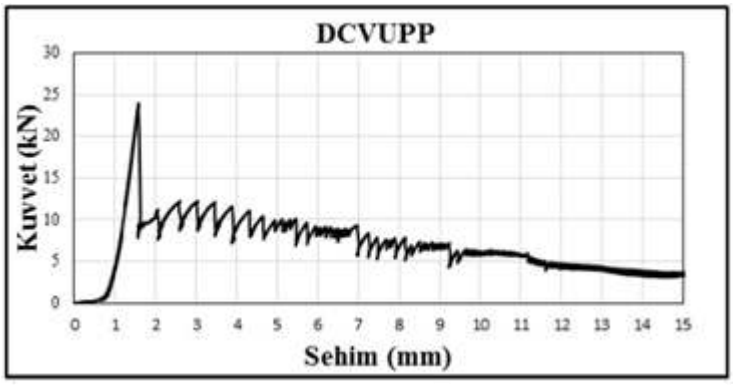
C16/20 Vakumlu betonlara yapılan uzun PP lif takviyesi; DVR'ye (Şekil 4.8.) göre DAVUPP, DBVUPP ve DCVUPP (Şekil 4.15. Şekil 4.16. ve Şekil 4.17.) betonlarının ilk kırılma yüklerinin yaklaşık aynı değerlere sahip oldukları görülmüştür. PP lifler dayanımı düşük betonların ilk kırılma yük değerlerine önemli bir etkisi yoktur yorumu yapılabilir.



Şekil 4.15. DAVUPP lifli betonların yük-sehim grafiği

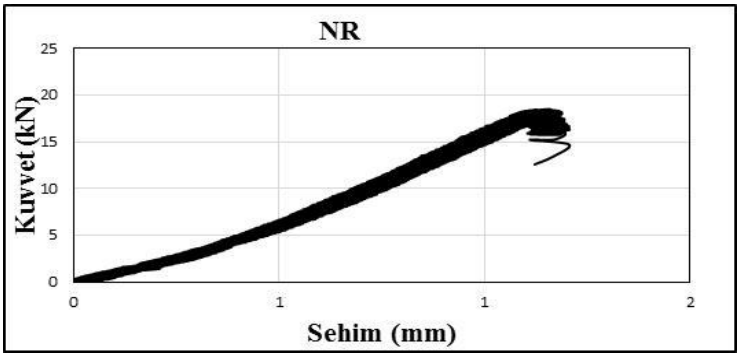


Şekil 4.16. DBVUPP lifli betonların yük-sehim grafiği

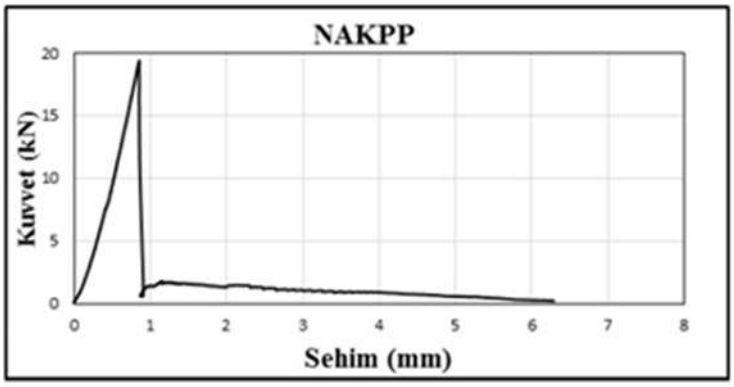


Şekil 4.17. DCVUPP lifli betonların yük-sehim grafiği

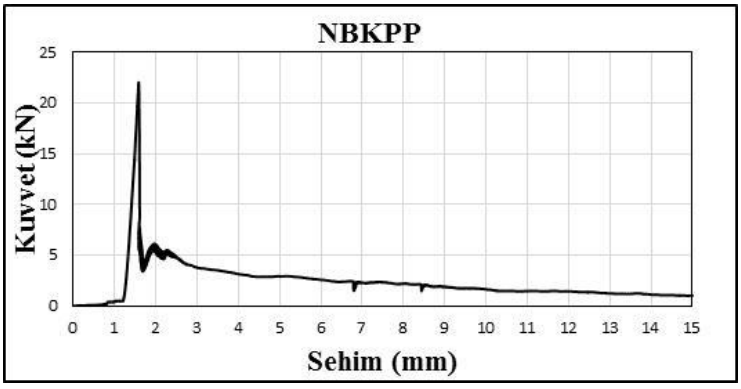
C 25/30 Referans betonlara yapılan kısa PP lif takviyesi; NR'ye (Şekil 4.18) göre NAKPP (Şekil 4.19) lifli betonun aynı kırılma yüküne, NBKPP (Şekil 4.20.) lifli betonun ~%16 ve NCKPP (Şekil 4.21.) lifli betonunun ise ~%26 daha yüksek kırılma yükü değerlerine sahip oldukları görülmüştür. En çok oranlı beton olan NCKPP betonunun en yüksek kırılma yüküne sahip olduğu görülmüştür.



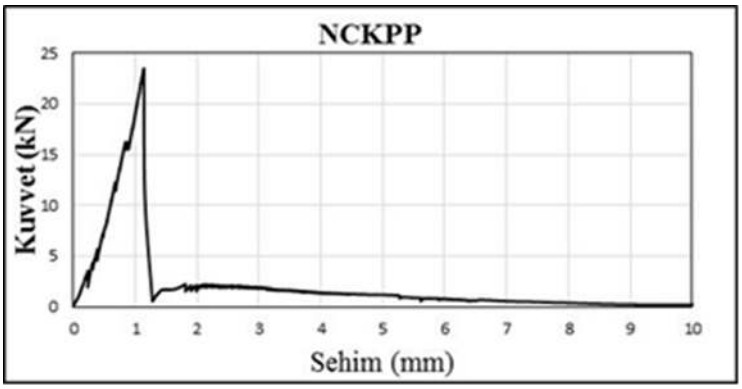
Şekil 4.18. NR betonların kiriş eğilme grafiği



Şekil 4.19. NAKPP lifli betonların yük-sehim grafiği

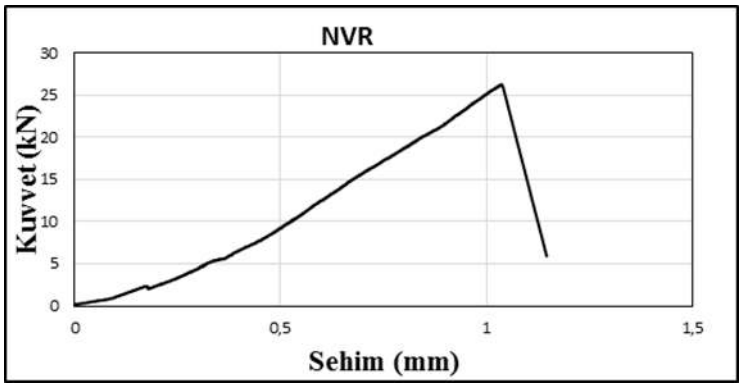


Şekil 4.20. NBKPP lifli betonların yük-sehim grafiği

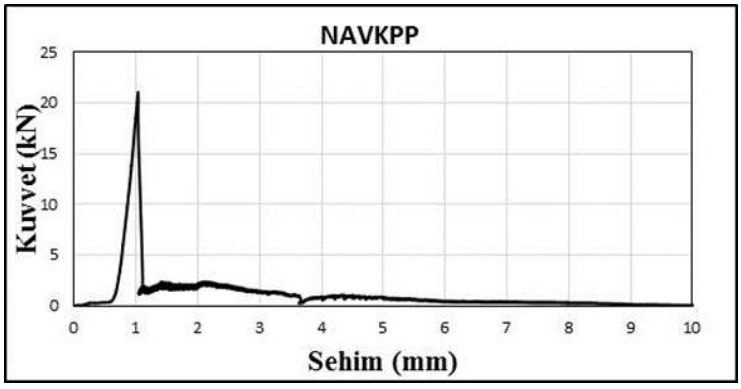


Şekil 4.21. NCKPP lifli betonların yük-sehim grafiği

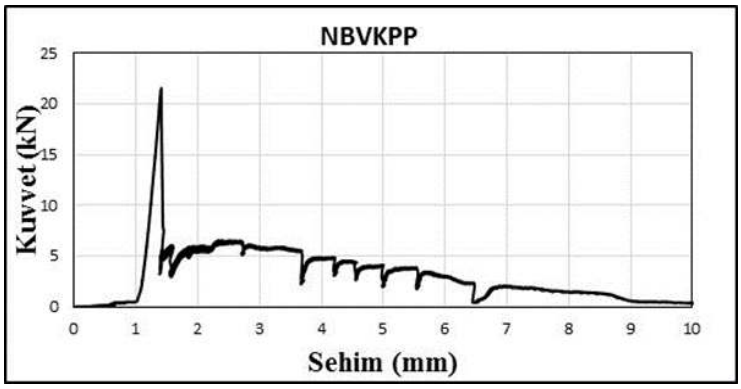
C 25/30 Vakumlu betonlara yapılan kısa PP lif takviyesi; NVR'ye (Şekil 4.22.) göre NAVKPP, NBVKPP ve NCVKPP (Şekil 4.23, Şekil 4.24. ve Şekil 4.25.) betonlarının ilk kırılma yüklerinin sırasıyla; ~%19, ~%15, ~%8 daha az kırılma yükü değerlerine sahip oldukları görülmüştür. Lif oranı arttıkça kırılma yükünün azaldığı görülmüştür



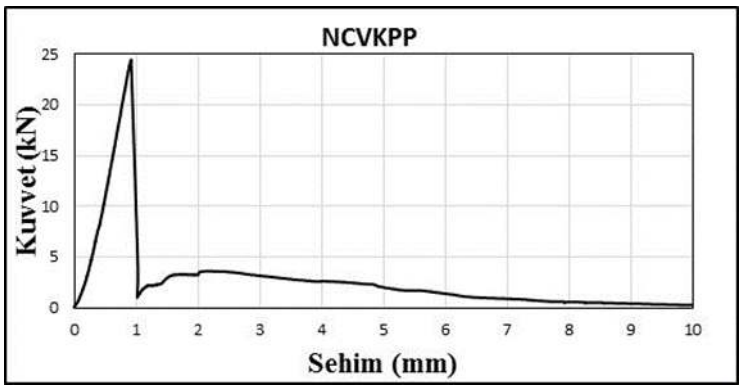
Şekil 4.22. NVR betonların kiriş eğilme grafiği



Şekil 4.23. NAVKPP lifli betonların yük-sehim grafiği

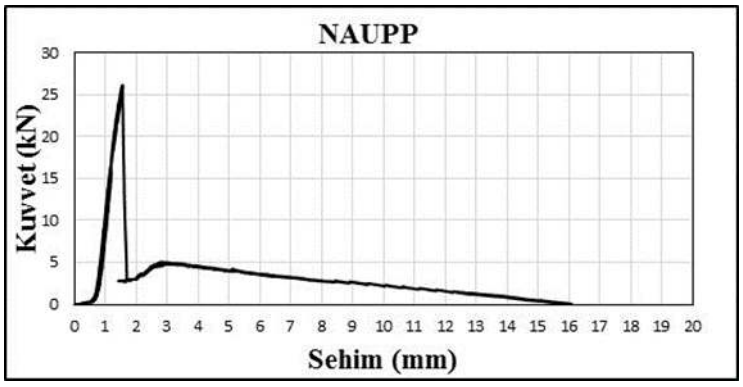


Şekil 4.24. NBVKPP lifli betonların yük-sehim grafiği

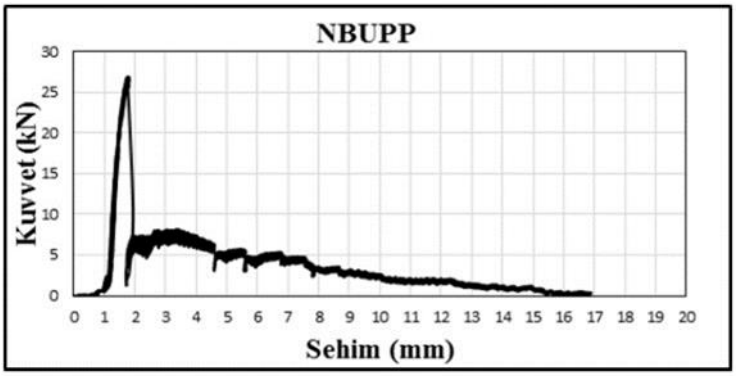


Şekil 4.25.NCVKPP lifli betonların yük-sehim grafiği

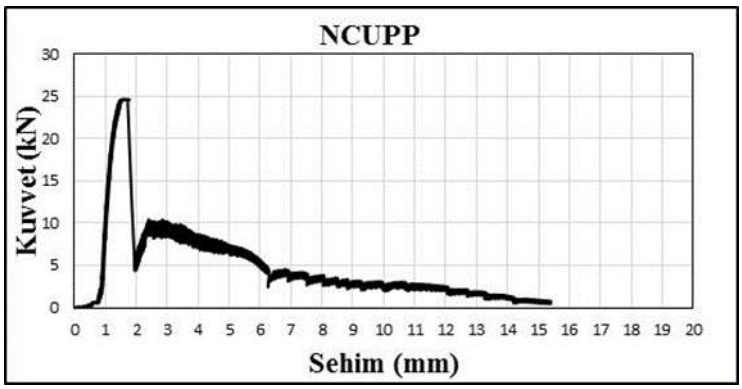
C 25/30 Referans betonlara yapılan uzun PP lif takviyesi; NR'ye (Şekil 4.18) göre NAUPP, NBUPP ve NCUPP (Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28) betonlarının sırasıyla; ~%37, ~%42, ~%32 daha yüksek kırılma yükü değerlerine sahip oldukları görülmüştür. En yüksek kırılma yükü değerinin NBUPP lifli betonda olduğu görülmüştür.



Şekil 4.26. NAUPP lifli betonların yük-sehim grafiği

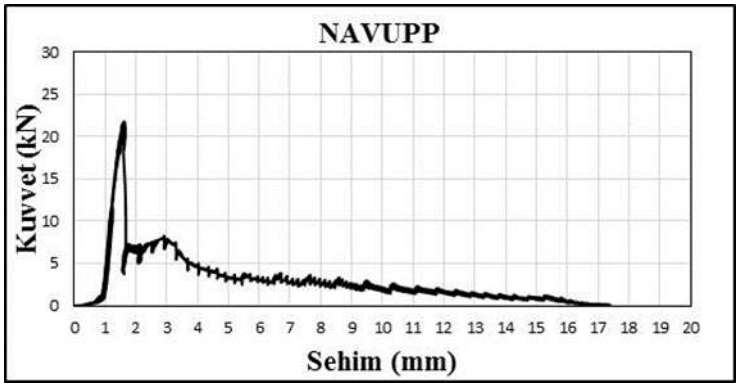


Şekil 4.27. NBUPP lifli betonların yük-sehim grafiği

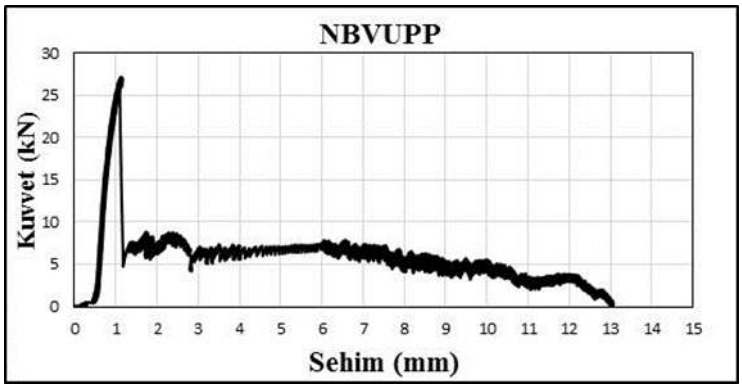


Şekil 4.28. NCUPP lifli betonların yük-sehim grafiği

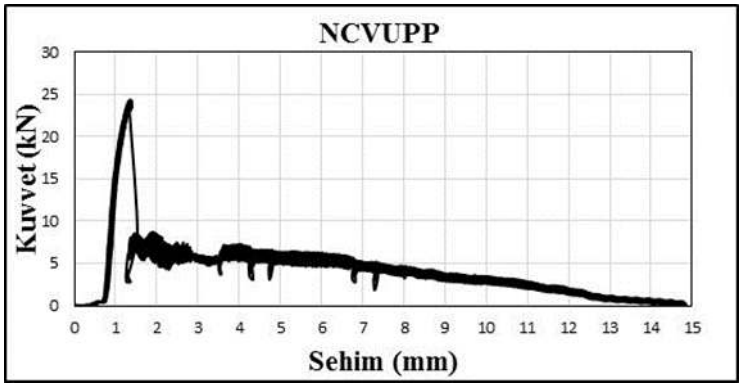
C25/30 Vakumlu betonlara yapılan uzun PP lif takviyesi; NVR'ye (Şekil 4.22.) göre NBVUPP (Şekil 4.30.) betonunun aynı kırılma yüküne, NAVUPP (Şekil 4.29.) ve NCVUPP (Şekil 4.31.) betonlarının ise sırasıyla; ~%15 ve ~%8 daha düşük kırılma yükü değerlerine sahip oldukları görülmüştür. En yüksek dayanımın NBVUPP lifli betondan elde edildiği sonucuna ulaşılır.



Şekil 4.29. NAVUPP lifli betonların yük-sehim grafiği

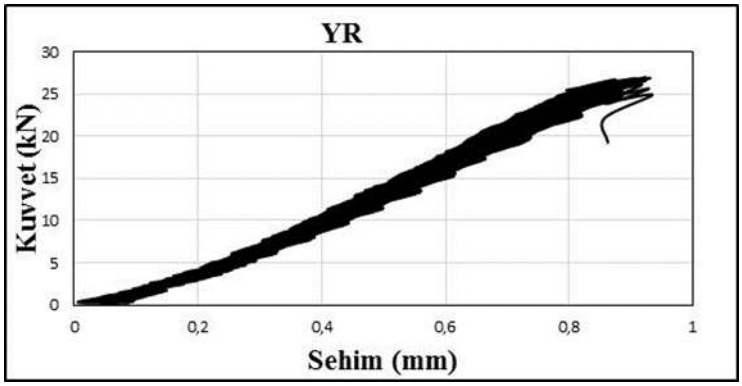


Şekil 4.30. NBVUPP lifli betonların yük-sehim grafiği

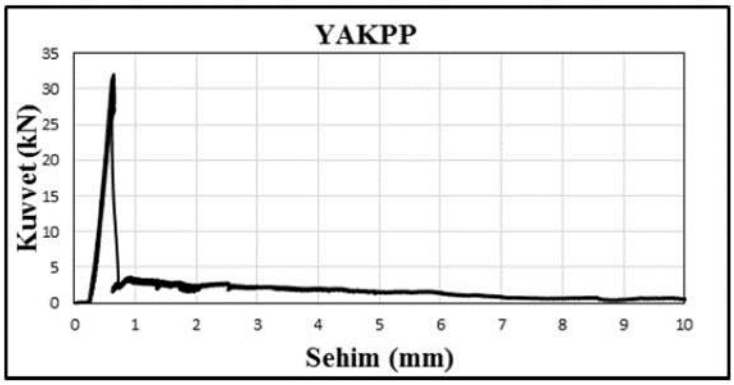


Şekil 4.31. NCVUPP lifli betonların yük-sehim grafiği

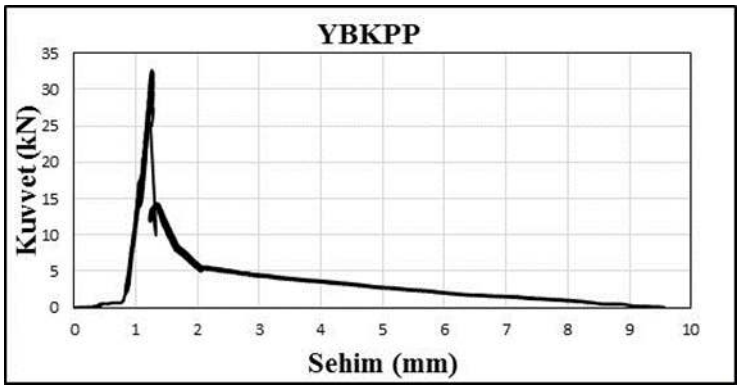
C35/45 Referans betonlara yapılan kısa PP lif takviyesi; YR'ye (Şekil 4.32.) göre NAKPP, NBKPP ve NCKPP (Şekil 4.33. Şekil 4.34. ve Şekil 4.35.) betonlarının sırasıyla; ~%19, ~%22 ve ~%15 daha yüksek kırılma yükü değerlerine sahip oldukları görülmüştür. En yüksek kırılma yükü değerinin NBKPP lifli betonda olduğu görülmüştür.



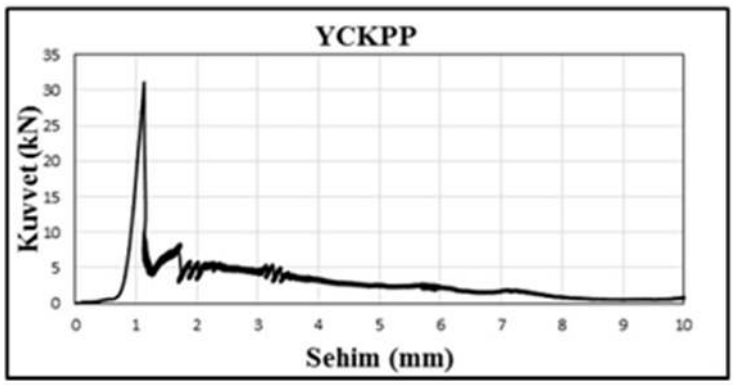
Şekil 4.32. YR betonların kiriş eğilme grafiği



Şekil 4.33. YAKPP lifli betonların yük-sehim grafiği

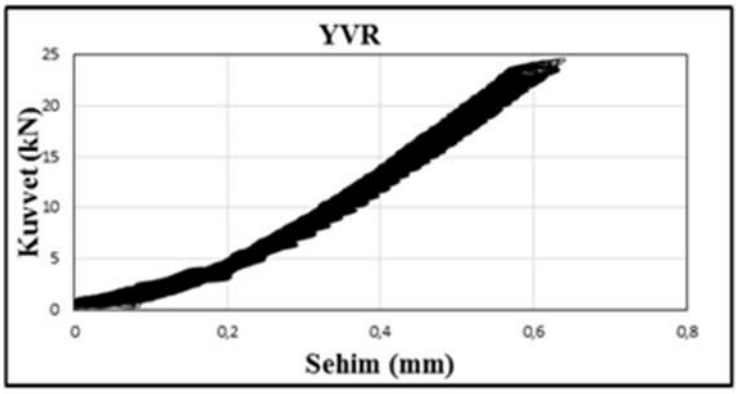


Şekil 4.34. YBKPP lifli betonların yük-sehim grafiği

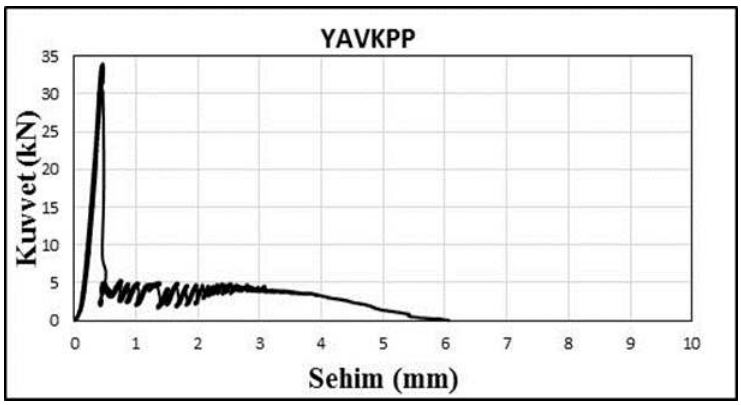


Şekil 4.35. YCKPP lifli betonların yük-sehim grafiği

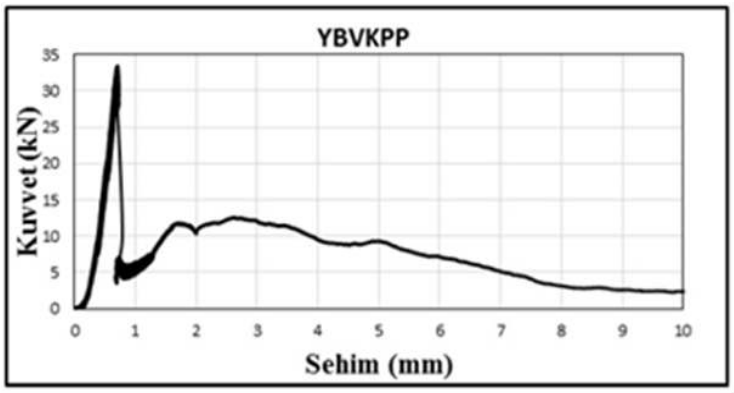
C35/45 Vakumlu betonlara yapılan kısa PP lif takviyesi; YVR'ye (Şekil 4.36.) göre YAVKPP (Şekil 4.37.) ve YBVKPP (Şekil 4.38) betonlarının ~%36, YCVKPP (Şekil 4.39) betonunun ise ~%32 daha yüksek kırılma yükü değerlerine sahip oldukları görülmüştür. En yüksek kırılma yükü değerlerinin YAVKPP ve YBVKPP betonlarında olduğu görülmüştür.



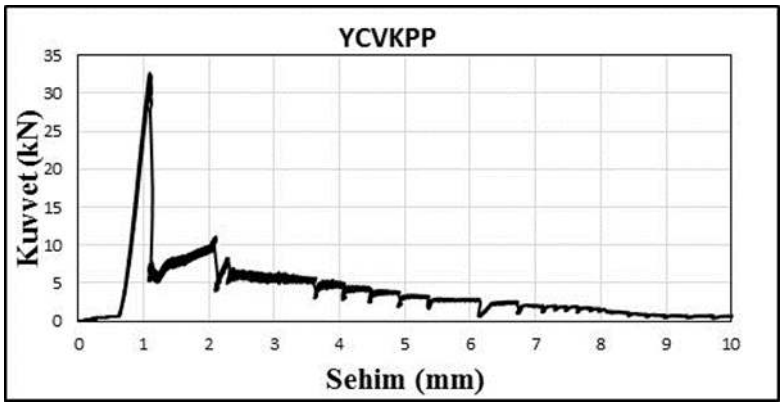
Şekil 4.36. YVR betonların kiriş eğilme grafiği



Şekil 4.37. YAVKPP lifli betonların yük-sehim grafiği

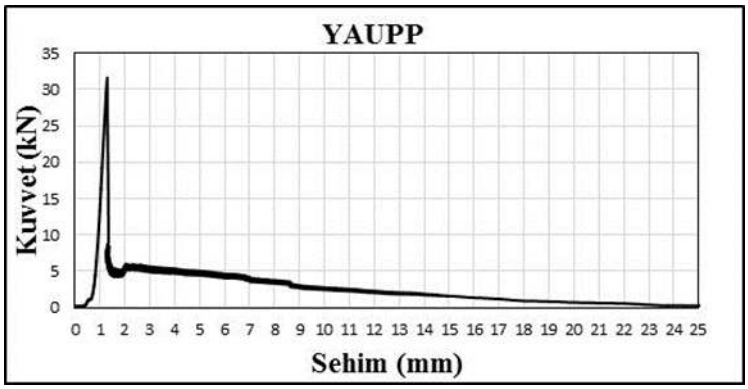


Şekil 4.38. YBVKPP lifli betonların yük-sehim grafiği

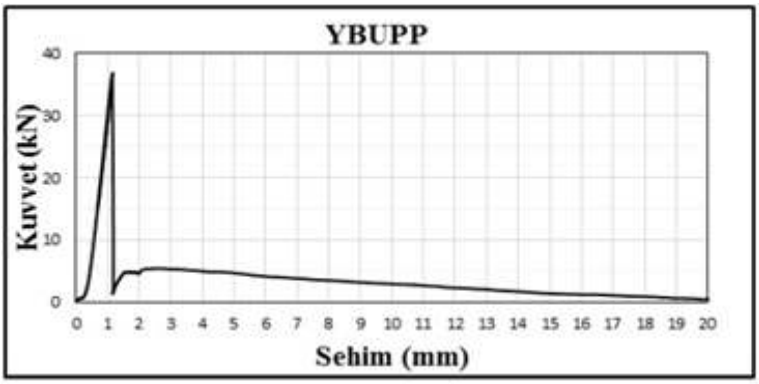


Şekil 4.39. YCVKPP lifli betonların yük-sehim grafiği

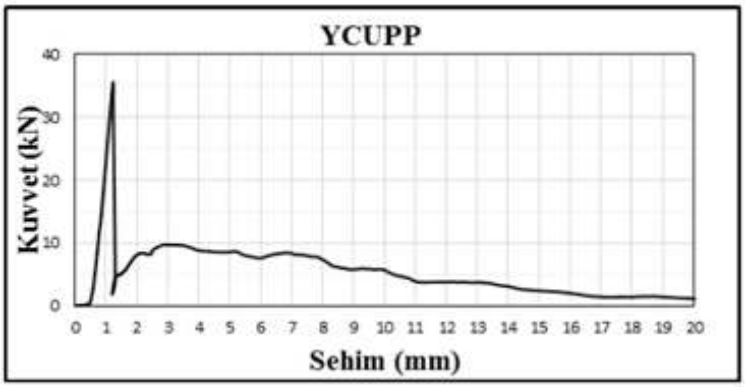
C35/45 Referans betonlara yapılan uzun PP lif takviyesi; YR'ye (Şekil 4.32.) göre YAUPP, YBUPP, YCUPP (Şekil 4.40. , Şekil 4.41. ve Şekil 4.42.) betonlarının sırasıyla; ~%19, ~%37, ~%33 daha yüksek kırılma yükü değerlerine sahip oldukları görülmüştür. En yüksek kırılma yükü değerinin YBUPP betonunda olduğu görülmüştür.



Şekil 4.40. YAUPP lifli betonların yük-sehim grafiği

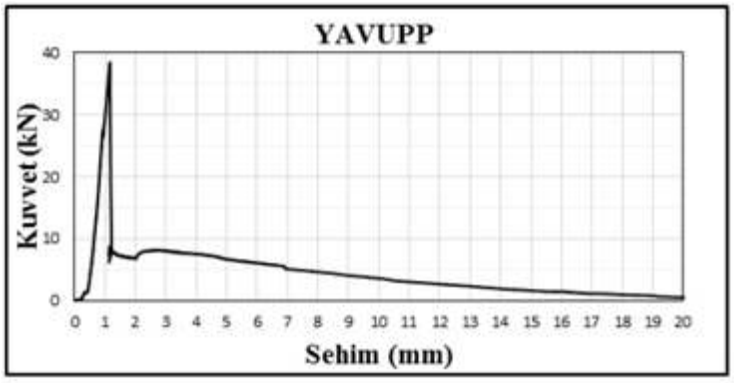


Şekil 4.41. YBUPP lifli betonların yük-sehim grafiği

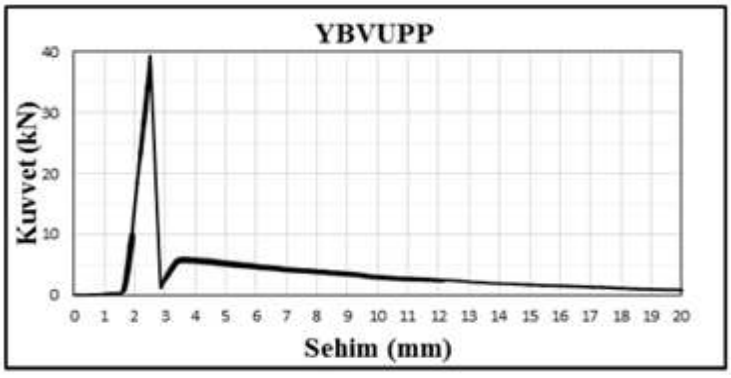


Şekil 4.42.YCUPP lifli betonların yük-sehim grafiği

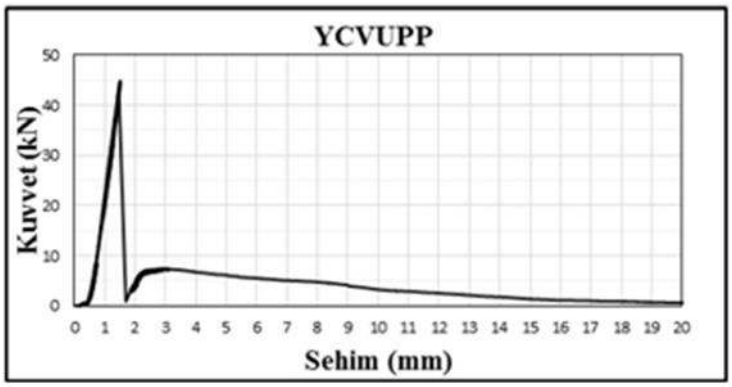
C35/45 Vakumlu betonlara yapılan uzun PP lif takviyesi; YVR'ye (Şekil 4.36.) göre YAVUPP, YBVUPP, YCVUPP (Şekil 4.43. Şekil 4.44. ve Şekil 4.45.) betonlarının sırasıyla; ~%52, ~%56, ~%80 daha yüksek kırılma yükü değerlerine sahip oldukları görülmüştür. En yüksek kırılma yükü değerinin YCVUPP betonunda olduğu görülmüştür.



Şekil 4.43. YAVUPP lifli betonların yük-sehim grafiği



Şekil 4.44. YBVUPP lifli betonların yük-sehim grafiği



Şekil 4.45. YCVUPP lifli betonların yük-sehim grafiği

4.4. Kirişlerin En Büyük Eğilme Gerilmeleri ve Öngörülen Eğilme Gerilmeleri

Kiriş numunelerin en büyük eğilme gerilmeleri ve öngörülen eğilme gerilmeleri Tablo 4.2'de gösterilmiştir.

C16/20 Referans betonlara kısa PP lif takviyesi; DR'ye göre DAKPP, DBKPP ve DCKPP betonlarının en büyük eğilme gerilmelerinin yaklaşık aynı değerlere sahip oldukları görülmüştür. DAKPP, DBKPP ve DCKPP betonlarının öngörülen eğilme gerilmelerinin yaklaşık aynı değerlere sahip oldukları görülmüştür.

C16/20 vakumlu betonlara kısa PP lif takviyesi; DVR'ye göre DAVKPP, DBVKPP ve DCVKPP betonlarının en büyük eğilme gerilmelerinin yaklaşık aynı değerlere sahip oldukları görülmüştür. DAVKPP, DBVKPP ve DCVKPP betonlarında öngörülen eğilme gerilmelerinin lif oranı arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir. En yüksek öngörülen eğilme gerilmesi değeri ise DAVKPP betonunda elde edilmiştir.

C16/20 Referans betonlara uzun PP lif takviyesi; DR'ye göre DAUPP, DBUPP ve DCUPP betonlarının sırasıyla; ~%10, ~%18, ~%23 daha yüksek en büyük Eğilme gerilmelerine sahip olduğu görülmüştür. Lif oranı attıkça en büyük eğilme gerilmesinin arttığı görülmüştür. En düşük öngörülen eğilme gerilmesi değerinin DAUPP lifli betonda olduğu görülmüştür. DBUPP ve DCUPP betonlarının ise DAUPP betonuna göre sırasıyla; ~3.4 kat ve ~2.1 kat daha yüksek öngörülen eğilme gerilmesine sahip olduğu görülmüştür.

Tablo 4.2. Beton türlerinin en yüksek eğilme ve öngörülen eğilme gerilmeleri

Beton kodu	En yüksek eğilme gerilmeleri (MPa)	Öngörülen eğilme gerilmeleri (MPa)
DR	2.61	0
DVR	3.57	0
DAKPP	2.78	2.43
DBKPP	2.57	2.93
DCKPP	2.64	2.50
DAVKPP	3.21	2.83
DBVKPP	3.49	1.42
DCVKPP	3.09	1.12
DAUPP	2.89	1.26
DBUPP	3.08	4.29
DCUPP	3.21	2.60
DAVUPP	3.49	3.37
DBVUPP	3.33	3.75
DCVUPP	3.91	1.92
NR	3.0	0
NVR	4.28	0
NAKPP	3.16	0.57
NBKPP	3.59	1.54
NCKPP	3.83	0.85
NAVKPP	3.43	1.33
NBVKPP	3.51	2.10
NCVKPP	3.98	0.95
NAUPP	4.26	3.61
NBUPP	4.39	11.02
NCUPP	4.02	6.10
NAVUPP	3.55	4.82
NBVUPP	4.43	7.60
NCVUPP	3.97	16.25
YR	4.4	0
YVR	4.0	0
YAKPP	5.23	3.41
YBKPP	5.33	4.12
YCKPP	5.07	2.68
YAVKPP	5.55	3.27
YBVKPP	5.46	10.16
YCVKPP	5.32	4.12
YAUPP	5.16	3.29
YBUPP	6.00	1.88
YCUPP	5.80	1.72
YAVUPP	6.26	1.76
YBVUPP	6.40	4.07
YCVUPP	7.31	7.79

C16/20 vakumlu betonlara uzun PP lif takviyesi; DVR'ye göre DAVUPP, DBVUPP ve DCVUPP betonlarının en büyük eğilme gerilmelerinin yaklaşık aynı değerlere sahip oldukları görülmüştür. En düşük öngörülen eğilme gerilmesi değerinin DCVUPP lifli betonda olduğu görülmüştür. DAVUPP ve DBVUPP betonlarının ise DCVUPP betonuna göre sırasıyla; ~1.7 kat ve ~2 kat daha yüksek öngörülen eğilme gerilmesine sahip olduğu görülmüştür.

C25/30 Referans betonlara kısa PP lif takviyesi; NR'ye göre NAKPP betonunun aynı kırılma yüküne, NBKPP ve NCKPP betonlarının ise sırasıyla; ~%20, ~%27 daha yüksek en büyük eğilme gerilmelerine sahip oldukları görülmüştür. Lif oranı attıkça en büyük eğilme gerilmesinin arttığı görülmüştür. En düşük öngörülen eğilme gerilmesi değerinin NAKPP lifli betonda olduğu görülmüştür. NBKPP ve NCKPP betonlarının ise NAKPP betonuna göre sırasıyla; ~2.7 kat ve ~1.5 kat daha yüksek öngörülen eğilme gerilmesine sahip olduğu görülmüştür.

C25/30 vakumlu betonlara kısa PP lif takviyesi; NVR'ye göre NAVKPP, NBVKPP ve NCVKPP betonlarının sırasıyla; ~%20, ~%18, ~%7 daha düşük en büyük eğilme

gerilmesi değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Lif oranı arttıkça en büyük eğilme gerilme değerinin arttığı yorumu yapılabilir. En düşük öngörülen eğilme gerilmesi değerinin NCVKPP lifli betonda olduğu görülmüştür. NAVKPP ve NBVKPP betonlarının ise NCVKPP betonuna göre sırasıyla; ~1.4 kat ve ~2.2 kat daha yüksek öngörülen eğilme gerilmesi değerine sahip olduğu görülmüştür.

C25/30 Referans betonlara uzun PP lif takviyesi; NR'ye göre NAUPP, NBUPP ve NCUPP betonlarının sırasıyla; ~%41, ~%46, ~%33 daha yüksek en büyük eğilme gerilmesi değerlerine sahip oldukları görülmüştür. En büyük eğilme gerilmesi değerine NBUPP lifli betonda ulaşıldığı görülmüştür. En düşük öngörülen eğilme gerilmesi değerinin NAUPP lifli betonda olduğu görülmüştür. NBUPP ve NCUPP betonlarının ise NAUPP betonuna göre sırasıyla; ~3.1 kat ve ~1.7 kat daha yüksek öngörülen eğilme gerilmesi değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

C25/30 vakumlu betonlara uzun PP lif takviyesi; NVR'ye göre NBVUPP betonunun aynı eğilme gerilme değerine, NAVUPP ve NCVUPP betonlarının ise sırasıyla; ~%17 ve ~%8 daha düşük en büyük eğilme gerilmesi değerlerine sahip oldukları görülmüştür. En büyük eğilme gerilmesi değerine NBUPP lifli betonda ulaşıldığı görülmüştür. En düşük öngörülen eğilme gerilmesi değerinin NAVUPP lifli betonda olduğu görülmüştür. NBUPP ve NCUPP betonlarının ise NAUPP betonuna göre sırasıyla;~1.6 kat ve ~3.4 kat daha yüksek öngörülen eğilme gerilmesi değerlerine sahip oldukları görülmüştür.

C35/45 Referans betonlara kısa PP lif takviyesi; YR'ye göre YAKPP, YBKPP ve YCKPP betonlarının sırasıyla; ~%9, ~%21 ve ~%15 daha yüksek en büyük eğilme gerilmesi değerlerine sahip oldukları görülmüştür. En büyük eğilme gerilmesi değerine NBKPP lifli betonda ulaşıldığı görülmüştür. En düşük öngörülen eğilme gerilmesi değerinin YCKPP lifli betonda olduğu görülmüştür. YAKPP ve YBKPP betonlarının ise YCKPP betonuna göre sırasıyla; ~1.3 kat ve ~1.6 kat daha yüksek öngörülen eğilme gerilmesi değerlerine sahip oldukları görülmüştür.

C35/45 vakumlu betonlara kısa PP lif takviyesi; YVR'ye göre YAVKPP, YBVKPP ve YCVKPP betonlarının sırasıyla; ~%38, ~%36 ve ~%33 daha yüksek en büyük eğilme gerilmesi değerlerine sahip oldukları görülmüştür. En büyük eğilme gerilmesi değerine YAVKPP lifli betonda ulaşıldığı görülmüştür. En düşük öngörülen eğilme gerilmesi değerinin YAVKPP lifli betonda olduğu görülmüştür. YBVKPP ve YCVKPP betonlarının

ise YAVKPP betonuna göre sırasıyla; ~3.1 kat ve ~1.3 kat daha yüksek öngörülen eğilme gerilmesi değerlerine sahip oldukları görülmüştür.

C35/45 Referans betonlara uzun PP lif takviyesi; YR'ye göre YAUPP, YBUPP ve YCUPP betonlarının sırasıyla; ~%18, ~%36 ve ~%32 daha yüksek en büyük eğilme gerilmesi değerlerine sahip oldukları görülmüştür. En büyük eğilme gerilmesi değerine YBUPP lifli betonda ulaşıldığı görülmüştür. En yüksek öngörülen eğilme gerilmesi değerinin YAUPP lifli betonda olduğu görülmüştür. YAUPP lifli betonun

YBUPP ve YCUPP betonlarının 1.8 katı daha yüksek öngörülen eğilme gerilmesi değerine sahip olduğu görülmüştür.

C35/45 vakumlu betonlara uzun PP lif takviyesi; YVR'ye göre YAVUPP, YBVUPP ve YCVUPP betonlarının sırasıyla; ~%56, ~%60 ve ~%82 daha yüksek en büyük eğilme gerilmesi değerlerine sahip oldukları görülmüştür. En büyük eğilme gerilmesi değerine YCVUPP lifli betonda ulaşıldığı görülmüştür. En düşük öngörülen eğilme gerilmesi değerinin YAVUPP lifli betonda olduğu görülmüştür. YBVUPP ve YCVUPP betonlarının ise YAVKPP betonuna göre sırasıyla; ~2.3 kat ve ~4.4 kat daha yüksek öngörülen eğilme gerilmesi değerlerine sahip oldukları görülmüştür.

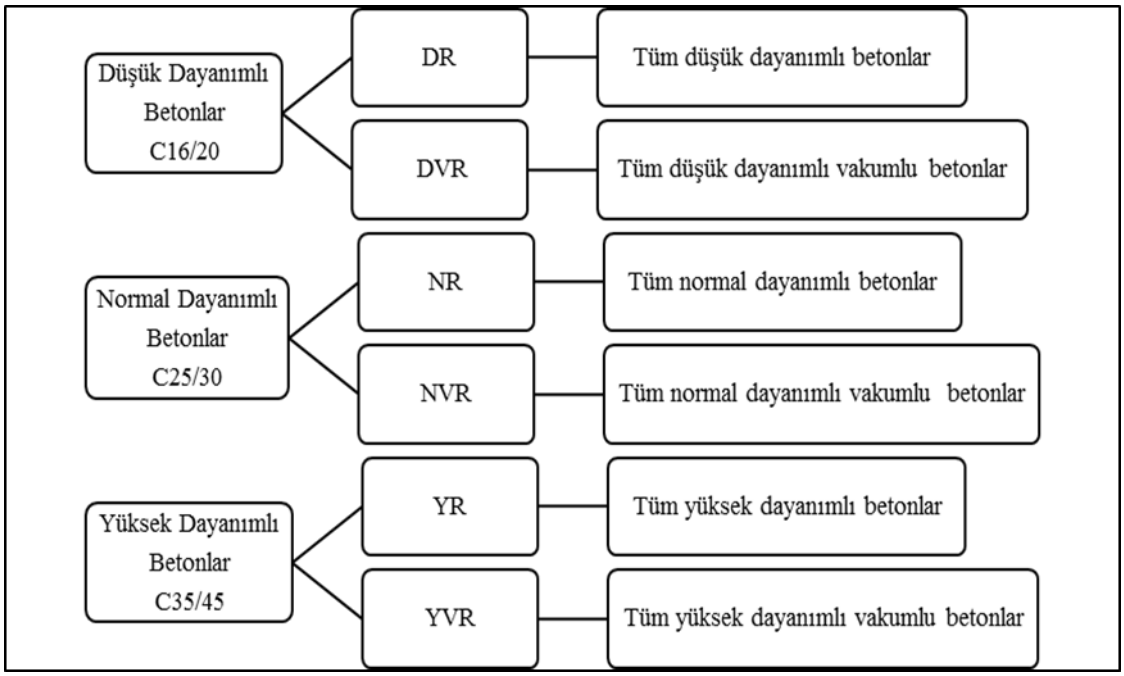
Betonların kırılma şekillerinde de farklılıklar görülmüştür. Lifsiz betonların tümü en yüksek yük altında kırılmıştır. Lifli betonlarda da betonlar en yüksek gerilmede kırılmıştır, ancak lifler kirişlerin hem momentin en yüksek olması gereken kırılma yerini değiştirmiş, hem de lif oranına bağlı olarak kırılmalar dağınık bir şekilde olmuştur. Şekil 4.46'de PP lifli, betonların kırılma şekilleri görülmektedir. Kırıldıktan sonraki resimlere bakıldığında genel olarak liflerin oranı arttıkça homojen dağılımın zayıfladığı görülmektedir.

Genel olarak kiriş eğilme testlerinde betonlardaki lif dağılımı ve kırılma davranışı plak testlerindeki gibi görülmüştür.

Şekil 4.46. PP lifli betonların kiriş eğilme testleri

4.5. Enerji Yutma Kapasitesi (Plak Testi)

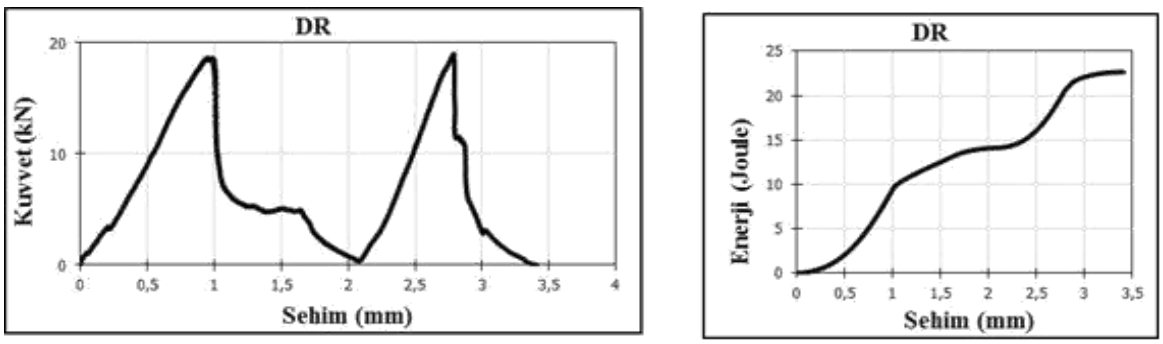
Bu çalışmada 42 tür beton olmasından dolayı plak testlerinin ve enerji yutma kapasitelerinin birçok yönden ele alınarak değerlendirilmesi mümkündür. Ancak değerlendirmelerin boyutunu genişletmeme adına tek bir değerlendirme yolu tercih edilmiştir. Plak testleri ve enerji yutma kapasiteleri üzerine Şeki1 4.47'de belirtildiği şekilde değerlendirmeler yapılmıştır.



Şekil 4.47. Plak testleri bulgularının değerlendirme şeması

C16/20 betonların enerji yutma kapasitesi değerlendirmesinde;

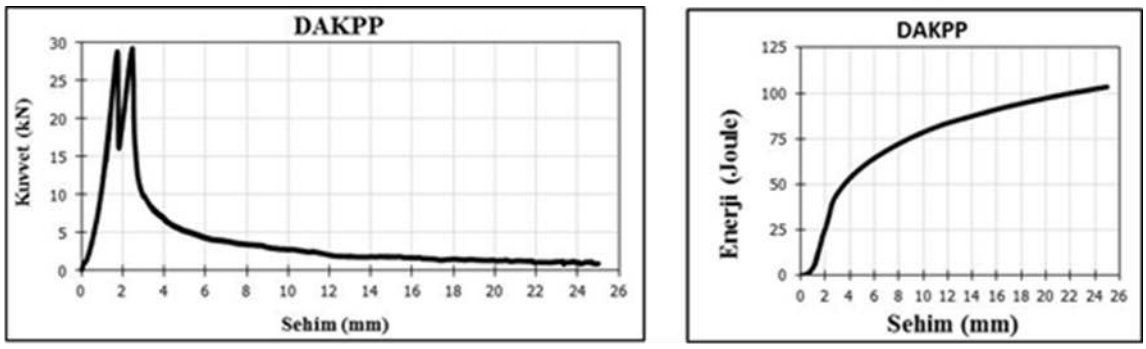
Dayanımı düşük normal üretim kısa PP lifli betonların ilk kırılma yüklerine bakıldığında; DR'ye göre (Şekil 4.48) DAKPP (Şekil 4.49)ve DBKPP (Şekil 4.50) betonları ~%55 daha yüksek, DCKPP (Şekil 4.51) betonu ise DR ile aynı ilk kırılma yüküne sahip olduğu görülmüştür. DAKPP ve DBKPP oranlarında lif katkısı betonun ilk kırılma dayanımına önemli katkı sağlarken, lif oranı en çok olan DCKPP betonunda ilk kırılma yükünde önemli düşüş görülmüştür. Genel olarak DAKPP ve DBKPP oranlarında lif katkısı betonun ilk kırılma dayanımına önemli katkı sağlarken, lif oranı en çok olan DCKPP betonunda ilk kırılma yükünde önemli düşüş görülmüştür.



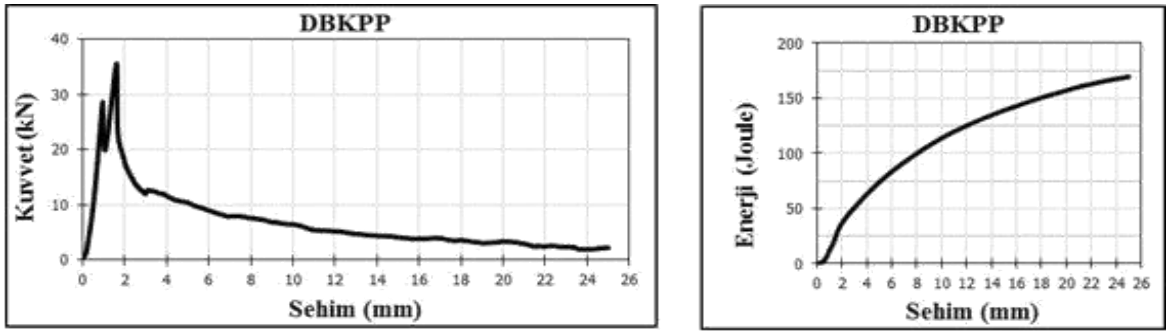
Şekil 4.48. DR betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

Dayanımı düşük normal üretim kısa PP lifli betonların ikinci kırılma yüklerine bakıldığında; DR'ye göre DAKPP, DBKPP ve DCKPP betonlarında sırasıyla ~%50, ~%90 ve ~%31 daha yüksek ikinci kırılma yüküne sahip oldukları görülmüştür. PP lif oranı en az ve en çok olan DAKPP ve DCKPP betonlarının ikinci kırılma yükleri DBKPP'ye göre daha az olduğu görülmüştür. Genel olarak PP lifler betonların ikinci kırılma yük dayanımlarını arttırmaktadır. Ancak bu artış liflerin az olması ve gereğinden çok olması durumunda daha az görülmektedir.

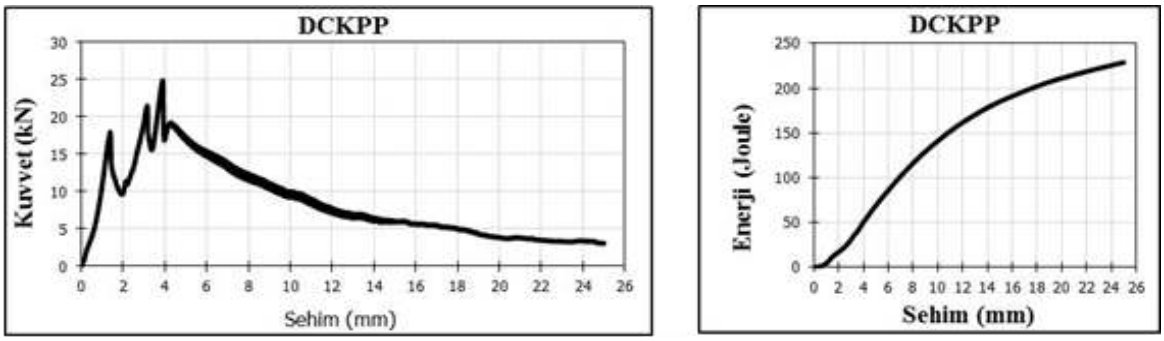
Dayanımı düşük normal üretim kısa PP lifli betonların enerji yutma kapasitelerine bakıldığında; DR'ye göre DAKPP, DBKPP ve DCKPP betonlarında sırasıyla ~4.5, ~7.4 ve ~10 kat daha yüksek enerji yutma kapasitelerine sahip oldukları görülmüştür. PP lif oranı arttıkça betonların enerji yutma kapasiteleri de artmaktadır. Genel olarak DRB'larda PP lif oranı arttıkça betonların enerji yutma kapasiteleri de artmaktadır.



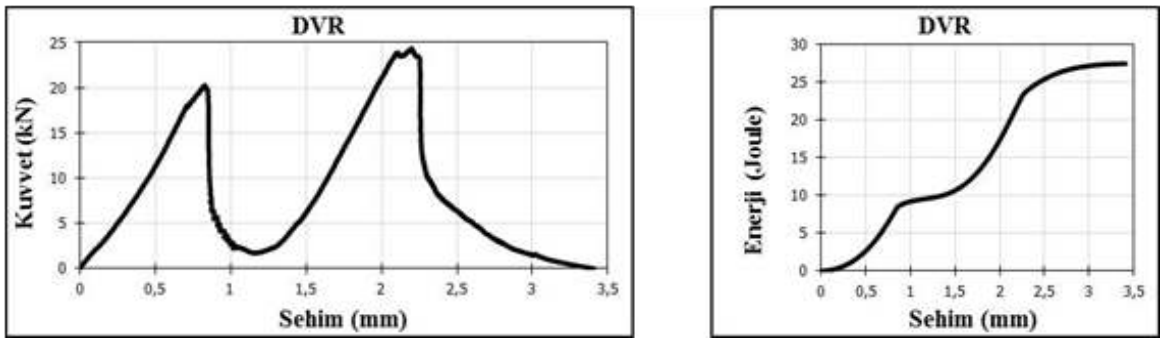
Şekil 4.49. DAKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri



Şekil 4.50. DBKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri



Şekil 4.51. DCKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

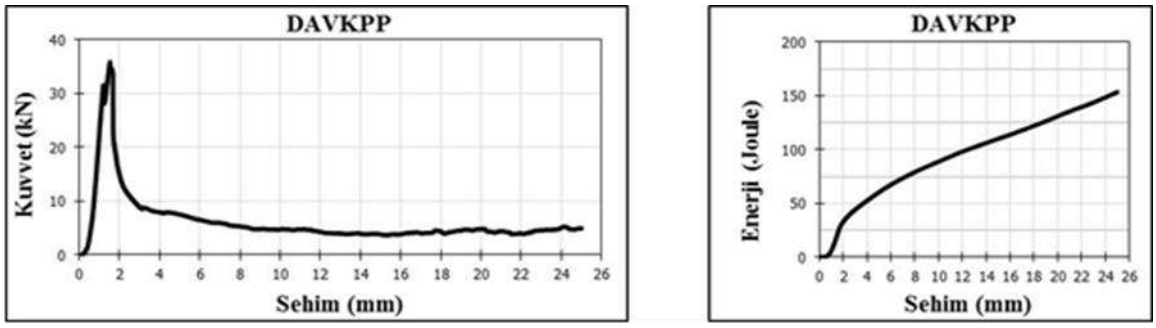


Şekil 4.52. DVR betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

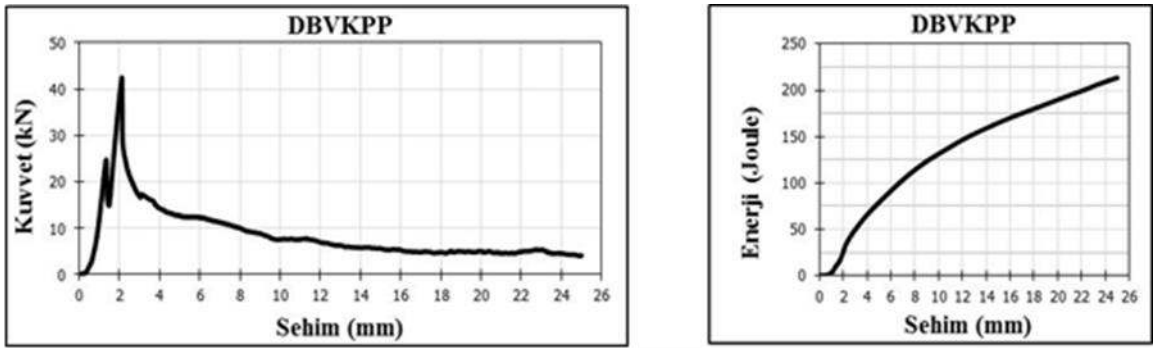
Dayanımı düşük vakumlu kısa PP lifli betonların ilk kırılma yüklerine bakıldığında; DVR'ye (Şekil 4.52) göre DAVKPP (Şekil 53), DBVKPP (Şekil 4.54) ve DCVKPP (Şekil 4.55) betonlarında sırasıyla ~%60, ~%25 ve ~%40 daha yüksek ilk kırılma yüküne sahip oldukları görülmüştür. Vakum uygulaması tüm betonlarda ilk kırılma yükünü arttırmıştır.

Dayanımı düşük vakumlu kısa PP lifli betonların ikinci kırılma yüklerine bakıldığında; DVR'ye göre DAVKPP, DBVKPP ve DCVKPP betonlarında sırasıyla ~%50, ~%67 ve ~%17 daha yüksek ikinci kırılma yüküne sahip oldukları görülmüştür. DAVKPP, DBVKPP PP lif oranına sahip betonların ikinci kırılma yüklerinin DCVKPP'ye göre daha az olduğu görülmüştür.

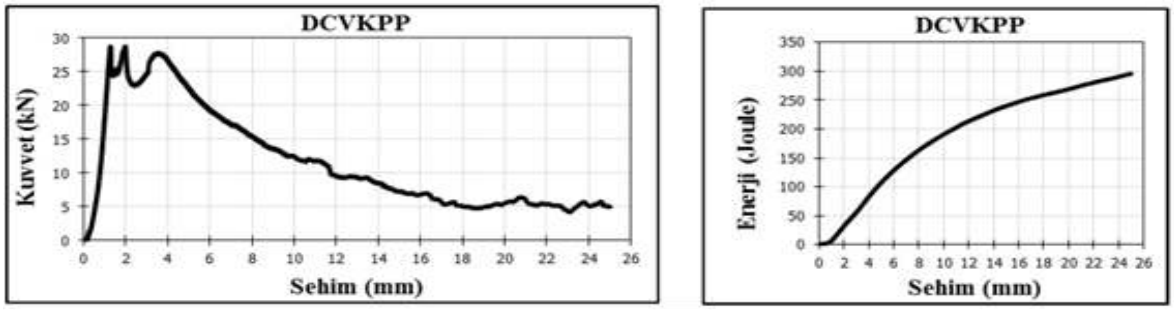
Dayanımı düşük vakumlu üretim kısa PP lifli betonların enerji yutma kapasitelerine bakıldığında; DVR'ye göre DAVKPP, DBVKPP ve DCVKPP betonlarında sırasıyla ~5.5, ~7.5 ve ~10.7 kat daha yüksek enerji yutma kapasitelerine sahip oldukları görülmüştür. PP lif oranı arttıkça betonların enerji yutma kapasiteleri de artmaktadır. Genel olarak DDVB'larda PP lif oranı arttıkça betonların enerji yutma kapasiteleri de artmaktadır.



Şekil 4.53. DAVKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri



Şekil 4.54. DBVKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri



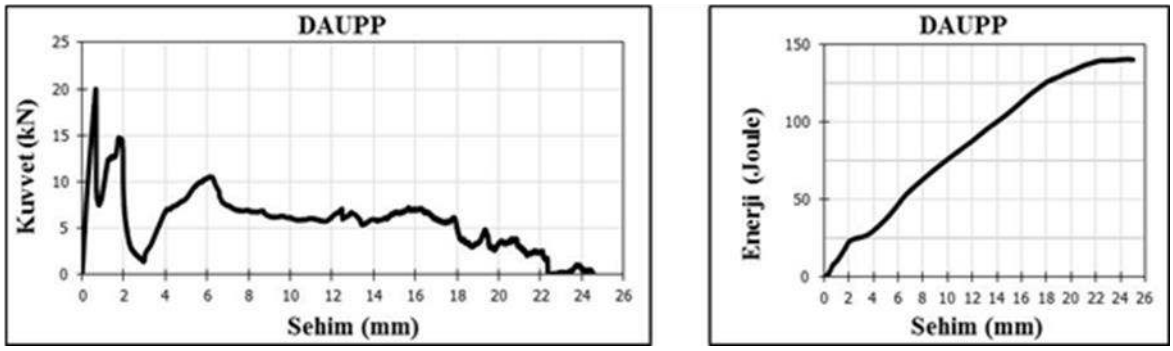
Şekil 4.55. DCVKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

Dayanımı düşük, normal üretim uzun PP lifli betonların ilk kırılma yüklerine bakıldığında; DR'ye (Şekil 4.48) göre DAUPP (Şekil 4.56), DBUPP (Şekil 4.57) ve DCUPP (Şekil 4.58) betonlarında sırasıyla; ~%11, %28 ve %39 daha yüksek ilk kırılma yüküne sahip oldukları görülmüştür. DAUPP, DBUPP ve DCUPP oranlarında lif katkısı betonun ilk kırılma dayanımına önemli katkı sağlamıştır.

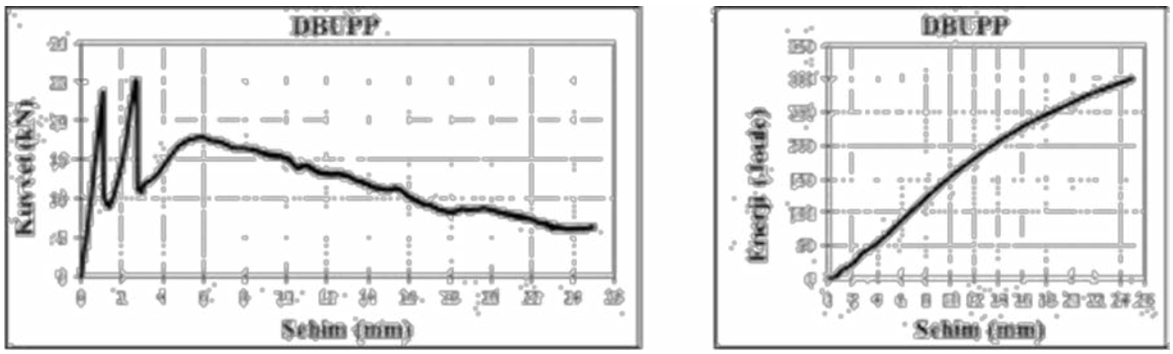
Dayanımı düşük normal üretim uzun PP lifli betonların ikinci kırılma yüklerine bakıldığında; DR'ye göre DAUPP betonun ~%50 azaldığı, DBUPP ve DCUPP betonlarının ise aynı ikinci kırılma yüküne sahip oldukları görülmüştür. DAUPP, DBUPP ve DCUPP

oranlarında lif katkısının betonun ikinci kırılma dayanımında önemli ölçüde azalmaya neden olduğu görülmüştür.

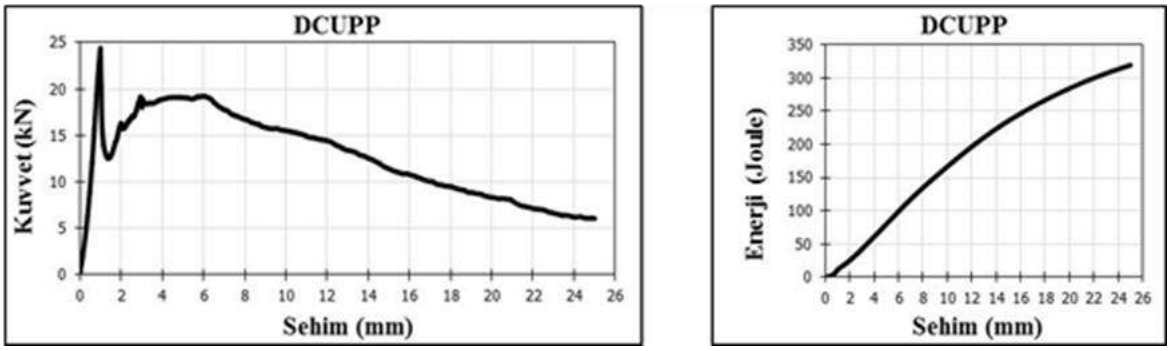
Dayanımı düşük normal üretim uzun PP lifli betonların enerji yutma kapasitelerine bakıldığında; DR'ye göre DAUPP, DBUPP ve DCUPP betonlarında sırasıyla ~6.1 ~13 ve ~13.7 kat daha yüksek enerji yutma kapasitelerine sahip oldukları görülmüştür. PP lif oranı arttıkça betonların enerji yutma kapasiteleri de artmaktadır.



Şekil 4.56. DAUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri



Şekil 4.57. DBUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

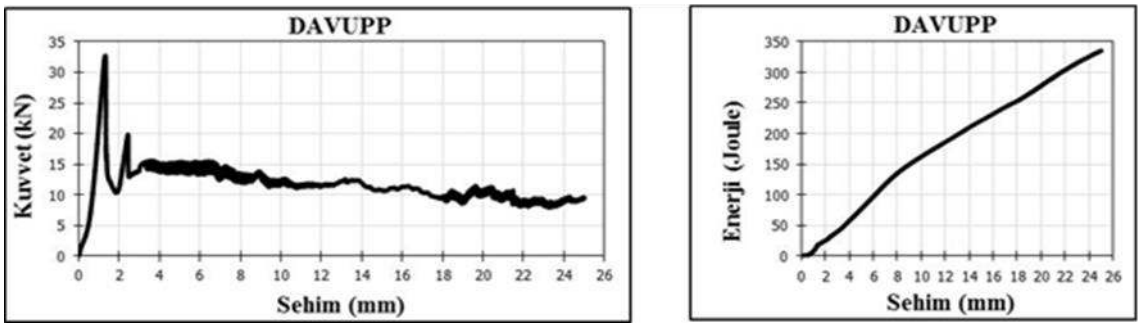


Şekil 4.58. DCUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

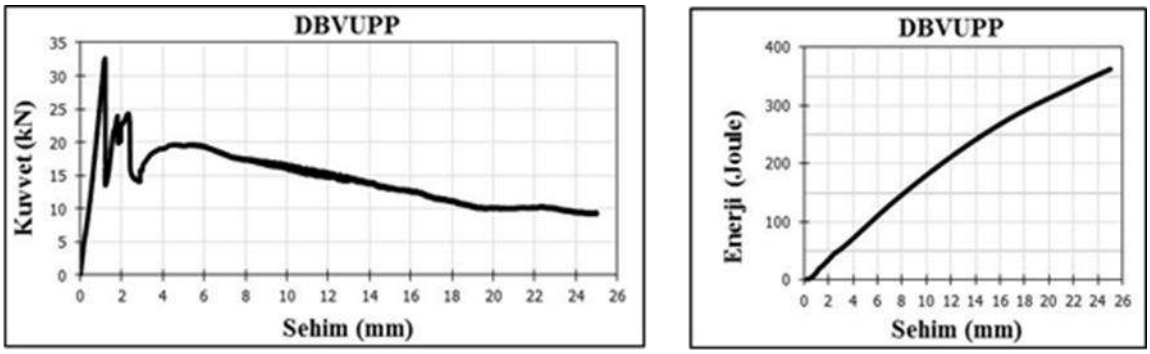
Dayanımı düşük vakumlu üretim uzun PP lifli betonların ilk kırılma yüklerine bakıldığında; DVR'ye (Şekil 4.52) göre DAVUPP (Şekil 4.59) ve DBVUPP (Şekil 4.60) betonlarının ~%60 daha yüksek, DCVUPP (Şekil 4.61) betonunun ise ~%40 daha yüksek ilk kırılma yüküne sahip olduğu görülmüştür. DAVUPP, DBVUPP ve DCVUPP oranlarında lif katkısının betonun ilk kırılma dayanımına önemli katkı sağladığı görülmüştür. Ancak en çok oranlı lif katkısı olan DCVUPP betonun DAVUPP ve DBVUPP lif katkılı betonlara göre daha az katkı sağladığı görülmektedir.

Dayanımı düşük vakumlu üretim uzun PP lifli betonların ikinci kırılma yüklerine bakıldığında; DVR'ye göre DAVUPP betonunun ~%17 daha az DBVUPP betonunun aynı DCVUPP betonunun ise ~%67 daha yüksek ikinci kırılma yüküne sahip olduğu görülmüştür. DAVUPP ve DBVUPP oranlarında lif katkısının betonun ikinci kırılma yükünde azalmaya neden olduğunu, DCVUPP oranında lif katkısının ise betonun ikinci kırılma dayanımına önemli katkı sağladığı görülmüştür.

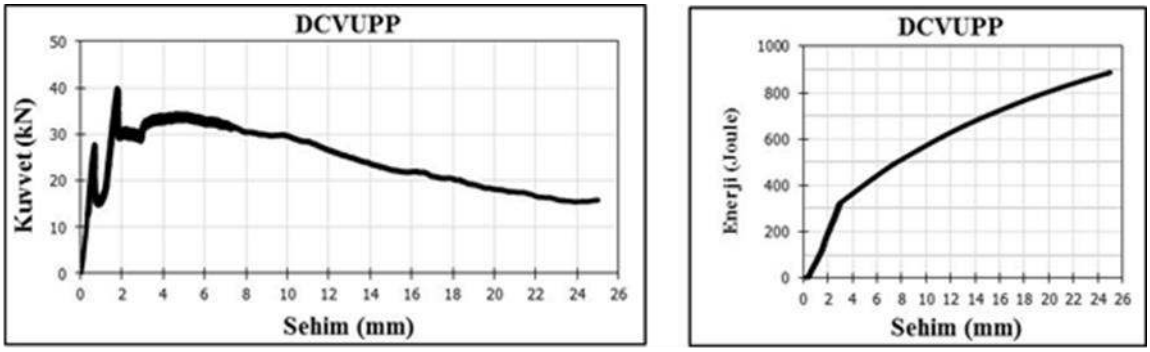
Dayanımı düşük vakumlu üretim uzun PP lifli betonların enerji yutma kapasitelerine bakıldığında; DVR'ye göre DAVUPP, DBVUPP ve DCVUPP betonlarında sırasıyla ~12.1, ~12.9 ve ~32 kat daha yüksek enerji yutma kapasitelerine sahip oldukları görülmüştür. Polipropilen lif oranı arttıkça betonların enerji yutma kapasiteleri de artmaktadır.



Şekil 4.59. DAVUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri



Şekil 4.60. DBVUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri



Şekil 4.61. DCVUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

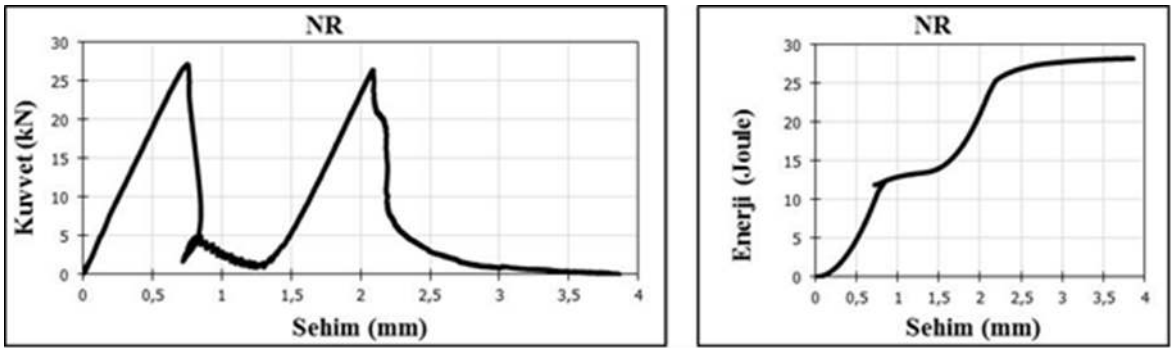
C25/30 betonların plak testi bulgularına bakıldığında;

Dayanımı orta normal üretim kısa PP lifli betonların ilk kırılma yüklerine bakıldığında; NR'ye (Şekil 4.62) göre NAKPP (Şekil 4.63) oranlı lif katkılı betonda ~%26, NBKPP (Şekil 4.64) oranlı betonda ~%41 daha yüksek ilk kırılma yüküne sahipken

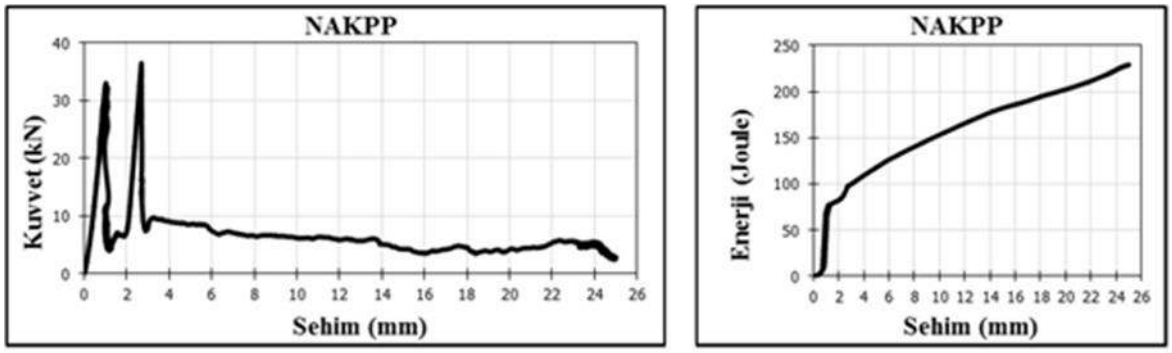
NCKPP (Şekil 4.65) oranlı betonda ise aynı kırılma yüküne sahip olduğu görülmüştür. NAKPP ve NBKPP oranlarında lif katkısı betonun ilk kırılma dayanımına önemli katkı sağlarken, lif oranı en çok olan NCKPP betonunda ilk kırılma yükünde NAKPP ve NBKPP betonlarına göre önemli düşüş görülmüştür.

Dayanımı orta normal üretim kısa PP lifli betonların ikinci kırılma yüklerine bakıldığında; NR'ye göre NAKPP ve NCKPP oranlı lif katkılı betonda ~%41, NBKPP oranlı betonda ~%96 daha yüksek ikinci kırılma yüküne sahip olduğu görülmüştür. PP lif oranı en az ve en çok olan NAKPP ve NCKPP betonlarının ikinci kırılma yüklerinin NBKPP'ye göre daha az olduğu görülmüştür.

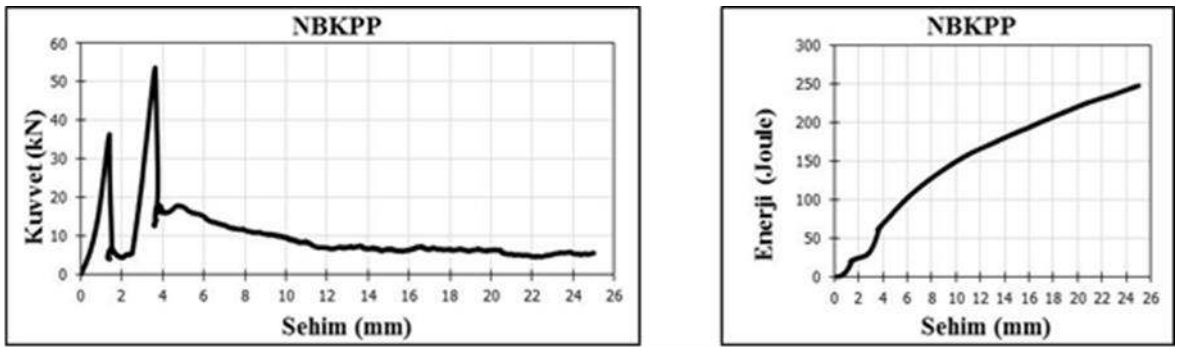
Dayanımı orta normal üretim kısa PP lifli betonların enerji yutma kapasitelerine bakıldığında; NR'ye göre NAKPP, NBKPP ve NCKPP betonlarında sırasıyla ~8, ~8.9 ve ~13.4 kat daha yüksek enerji yutma kapasitelerine sahip oldukları görülmüştür. PP lif oranı arttıkça betonların enerji yutma kapasiteleri de artmaktadır.



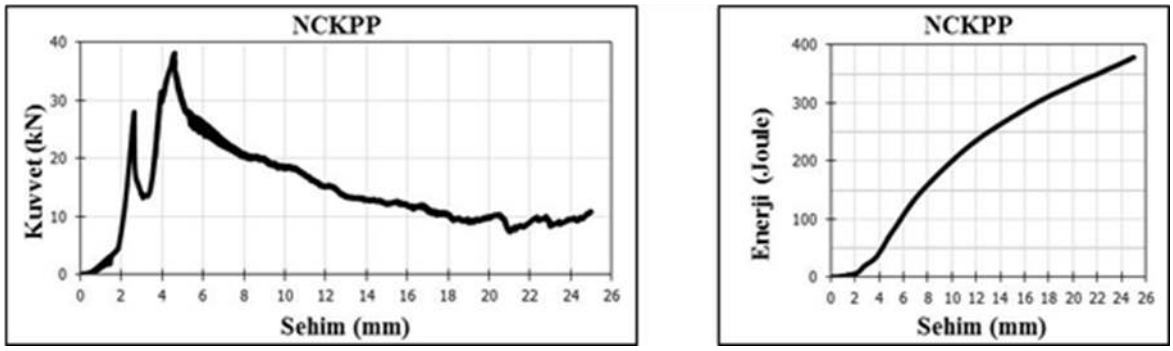
Şekil 4.62. NR lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri



Şekil 4.63. NAKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

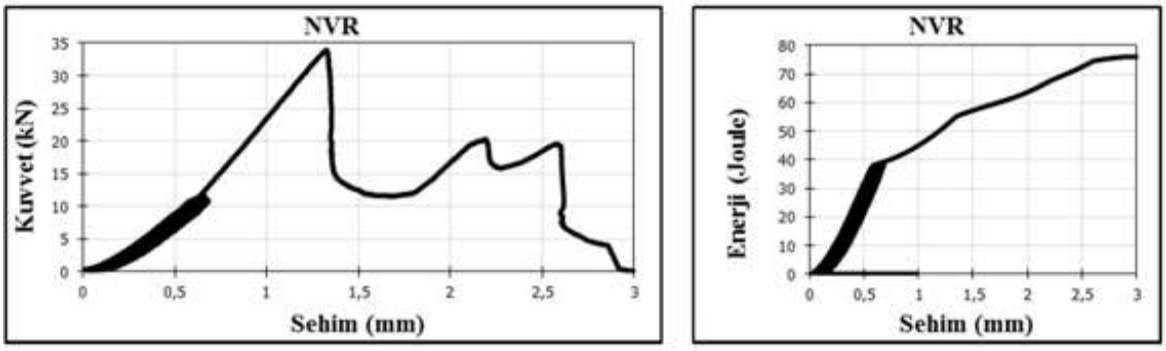


Şekil 4.64. NBKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri



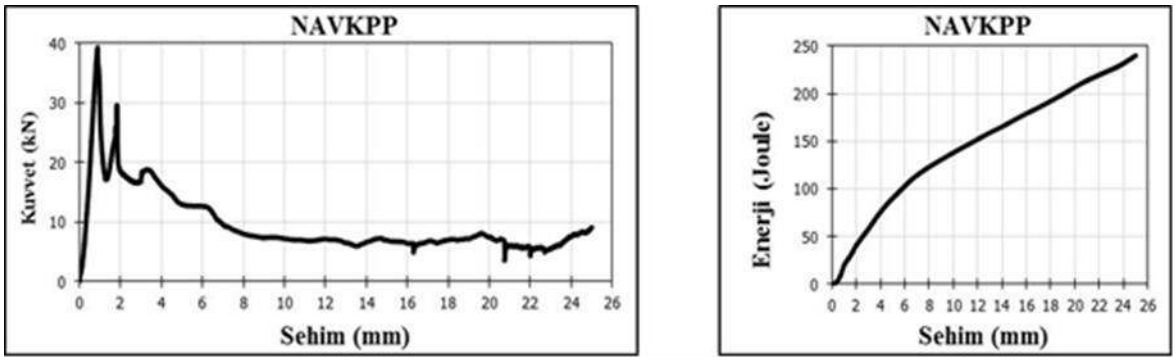
Şekil 4.65.NCKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

Dayanımı orta vakumlu üretim kısa PP lifli betonların ilk kırılma yüklerine bakıldığında; NVR'ye (Şekil 4.66) göre NAVKPP (Şekil 4.67), NBVKPP (Şekil 4.68)ve NCVKPP (Şekil 4.69) oranlı lif katkılı betonların sırasıyla; ~%14, ~%46, ~%31 daha yüksek ilk kırılma yüküne sahip olduğu görülmüştür. En önemli artışın NBVKPP lif katkılı betonda olduğu görülmüştür.

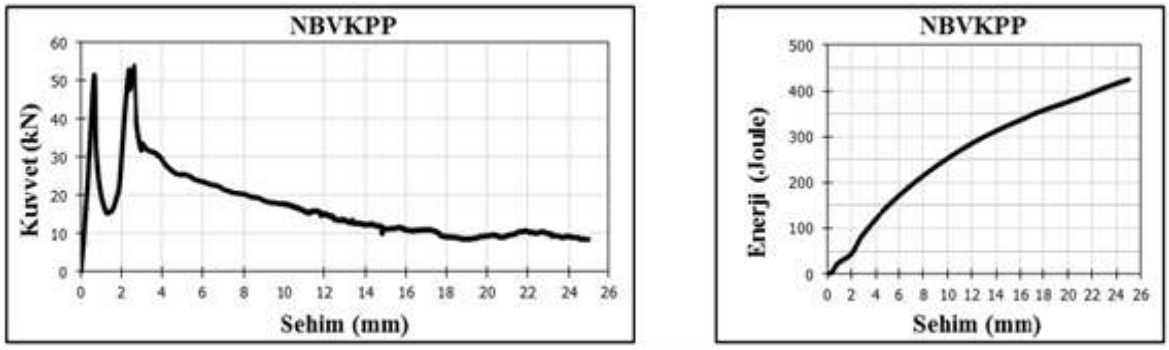


Şekil 4.66. NVR lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

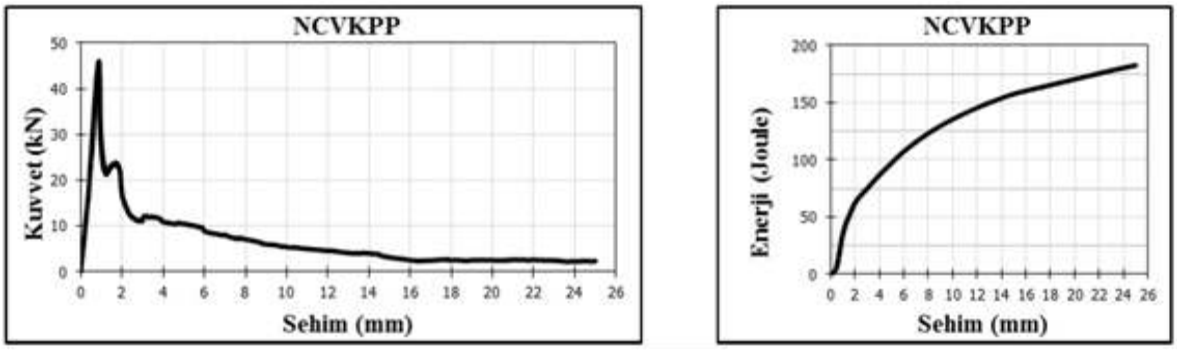
Dayanımı orta vakumlu üretim kısa PP lifli betonların ikinci kırılma yüklerine bakıldığında; NVR'ye göre NAVKPP, NBVKPP ve NCVKPP oranlı lif katkılı betonların sırasıyla; ~%50, ~%165, ~%20 daha yüksek ikinci kırılma yüküne sahip olduğu görülmüştür. En önemli artışın NBVKPP lif katkılı betonda olduğu görülmüştür.



Şekil 4.67. NAVKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri



Şekil 4.68. NBVKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri



Şekil 4.69. NCVKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

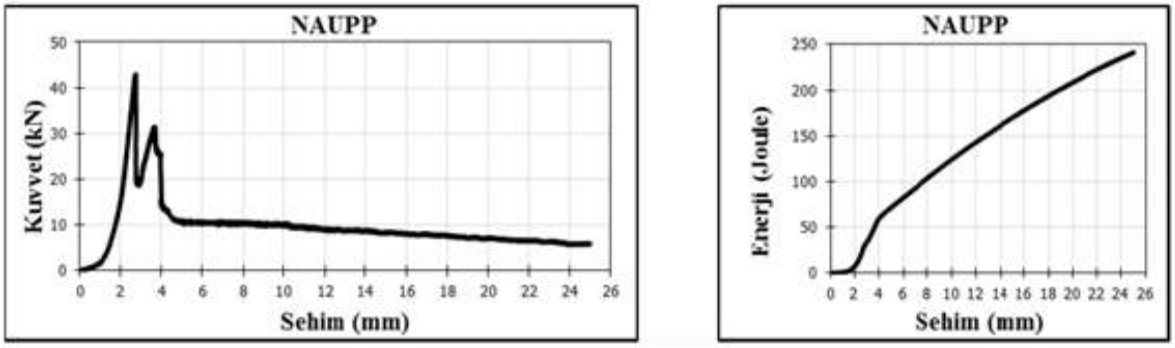
Dayanımı orta vakumlu üretim kısa PP lifli betonların enerji yutma kapasitelerine bakıldığında; NVR'ye göre NAVKPP, NBVKPP ve NCVKPP oranlı lif katkılı betonların sırasıyla; ~3.1, ~5.5, ~2.4 kat daha yüksek enerji yutma kapasitelerine sahip olduğu görülmüştür. En önemli artışın NBVKPP lif katkılı betonda olduğu görülmüştür.

Dayanımı orta normal üretim uzun PP lifli betonların ilk kırılma yüklerine bakıldığında; NR'ye (Şekil 4.62) göre NAUPP (Şekil 4.70) oranlı lif katkılı betonda ~%60, NBUPP (Şekil 4.71) oranlı betonda ~%37, NCUPP (Şekil 4.72) oranlı betonda ise ~%100

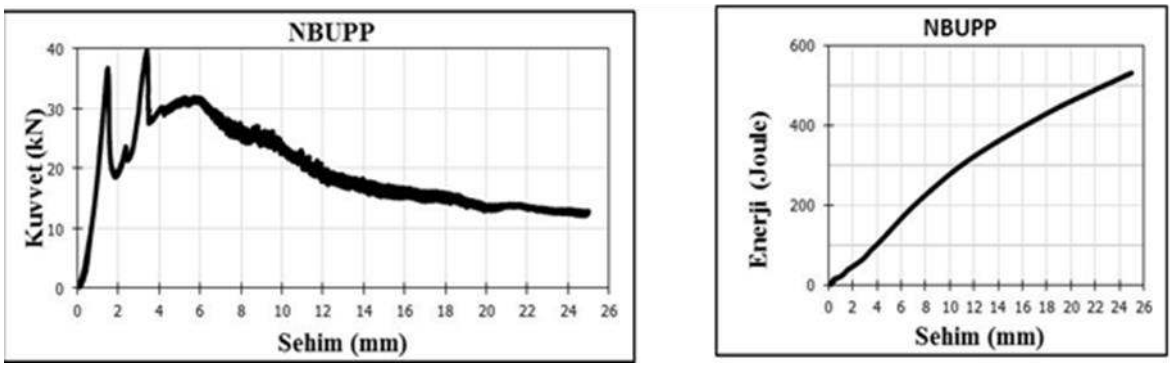
daha yüksek ilk kırılma yüküne sahip olduğu görülmüştür. En önemli artışın NCUPP oranlı betonda olduğu görülmüştür.

Dayanımı orta normal üretim uzun PP lifli betonların ikinci kırılma yüklerine bakıldığında; NR'ye göre NAUPP, NBUPP ve NCUPP oranlı lif katkılı betonların sırasıyla ~%18, ~%48, ~%66 daha yüksek ikinci kırılma yüküne sahip olduğu görülmüştür. Polipropilen lif oranı arttıkça ikinci kırılma yükünün arttığı görülmüştür.

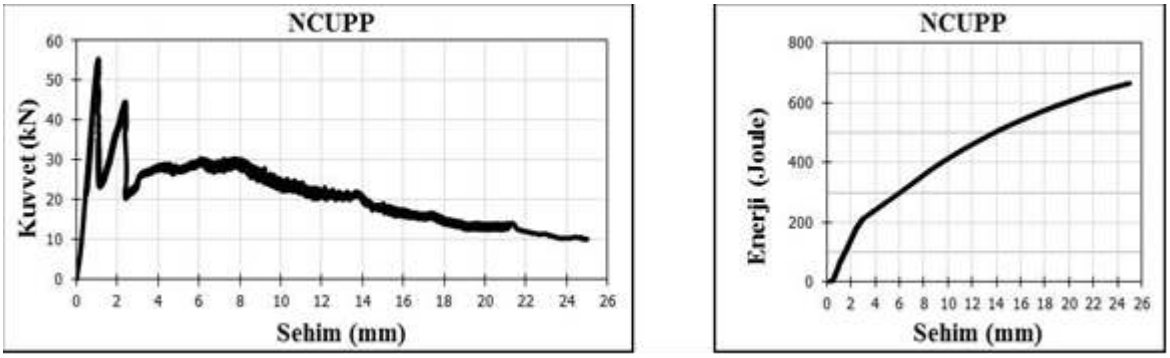
Dayanımı orta normal üretim uzun PP lifli betonların enerji yutma kapasitelerine bakıldığında; NR'ye göre NAUPP, NBUPP ve NCUPP betonlarında sırasıyla ~8.8, ~18.6 ve ~24.3 kat daha yüksek enerji yutma kapasitelerine sahip oldukları görülmüştür. PP lif oranı arttıkça betonların enerji yutma kapasiteleri de artmaktadır.



Şekil 4.70. NAUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri



Şekil 4.71. NBUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

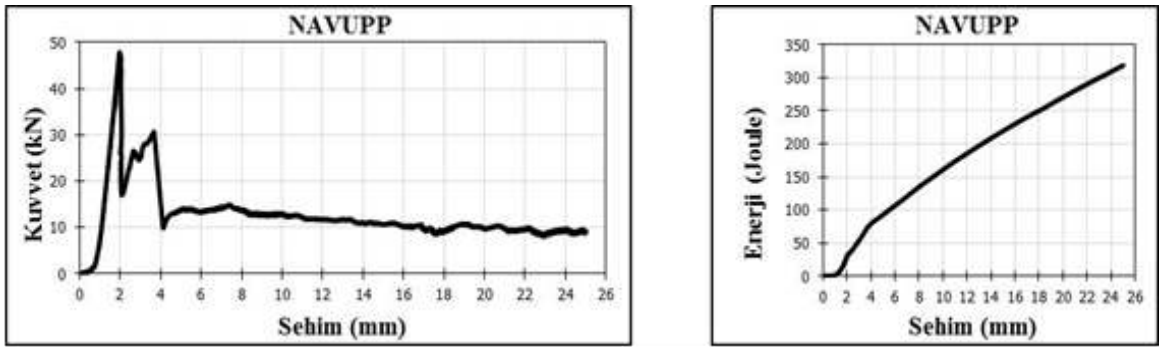


Şekil 4.72. NCUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

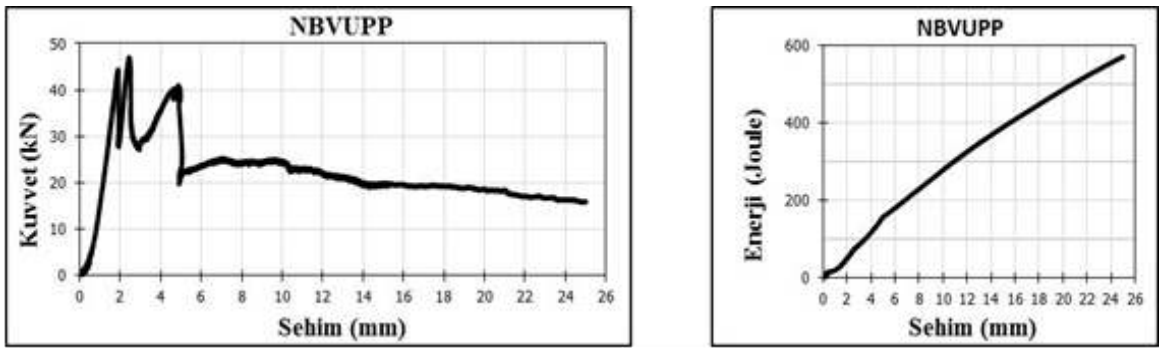
Dayanımı orta vakumlu üretim uzun PP lifli betonların ilk kırılma yüklerine bakıldığında; NVR'ye (Şekil 4.66) göre NAVUPP (Şekil 4.73), NBVUPP (Şekil 4.74) ve NCVUPP (Şekil 4.75) oranlı lif katkılı betonların sırasıyla; ~%37, ~%23, ~% 50 daha yüksek ilk kırılma yüküne sahip olduğu görülmüştür. En önemli artışın en yüksek lif katkılı NCVUPP betonunda olduğu görülmüştür.

Dayanımı orta vakumlu üretim uzun PP lifli betonların ikinci kırılma yüklerine bakıldığında; NVR'ye göre NAVUPP oranlı lif katkılı betonda ~%50, BVUPP oranlı lif katkılı betonda ~%140 ve NCVUPP oranlı lif katkılı betonda ise ~%115 daha yüksek ikinci kırılma yüküne sahip oldukları görülmüştür. NBVUPP ve NCVUPP oranlı lif katkılı betonlarda önemli derecede artış olduğu görülmüştür.

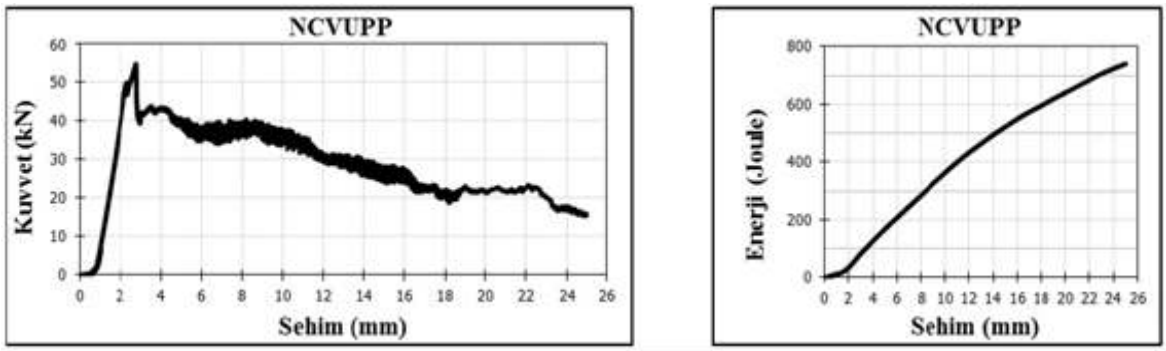
Dayanımı orta vakumlu üretim uzun PP lifli betonların enerji yutma kapasitelerine bakıldığında; NVR'ye göre NAVUPP, NBVUPP ve NCVUPP oranlı lif katkılı betonların sırasıyla; ~4.2, ~7.3, ~9.4 kat daha yüksek enerji yutma kapasitelerine sahip olduğu görülmüştür. PP lif oranı arttıkça betonların enerji yutma kapasiteleri de artmaktadır.



Şekil 4.73. NAVUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri



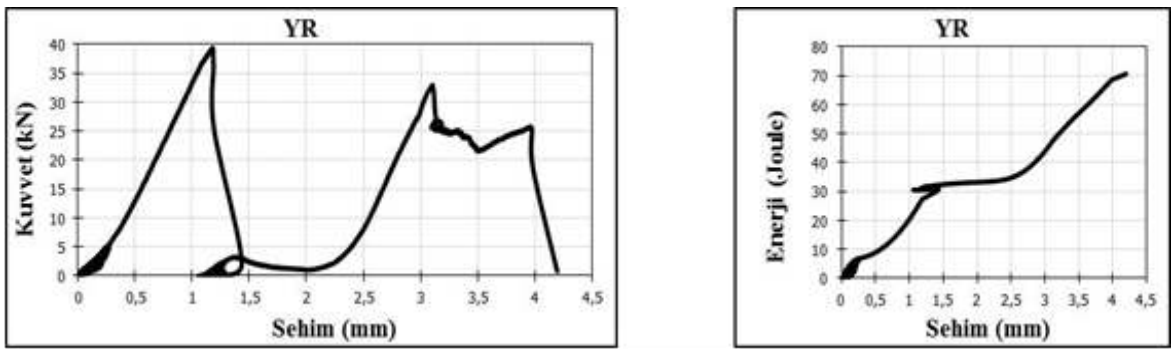
Şekil 4.74. NBVUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri



Şekil 4.75. NCVUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

C35/45 betonların plak testi bulgularına bakıldığında;

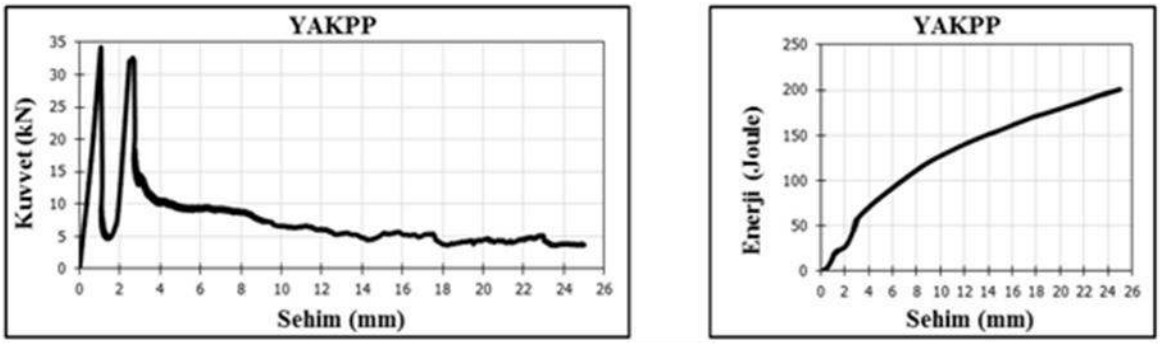
Dayanımı yüksek normal üretim kısa PP lifli betonların ilk kırılma yüklerine bakıldığında; YR'ye (Şekil 4.76) göre YAKPP (Şekil 4.77) ve YCKPP (Şekil 4.79) oranlı lif katkılı betonlarda ~%26, YBKPP (Şekil 4.78) oranlı lif katkılı betonda ise ~%22 daha düşük ilk kırılma yüküne sahip oldukları görülmüştür. En çok ve en az lif katkılı betonlarda daha fazla düşüş olduğu görülmüştür



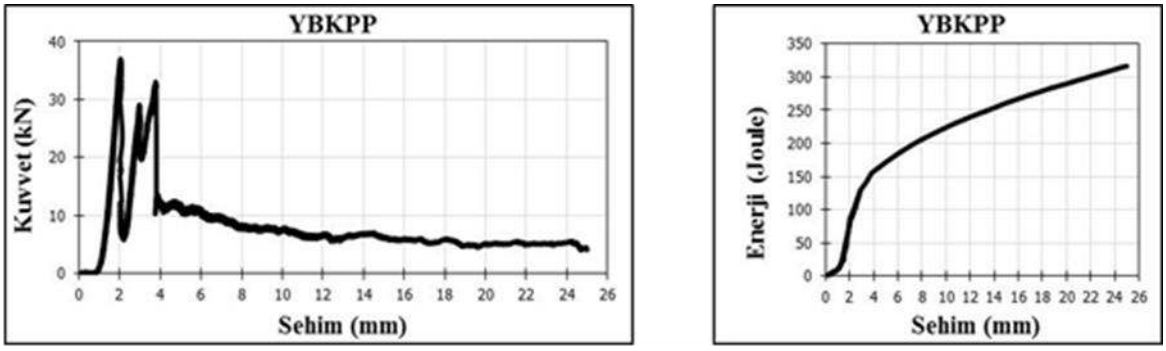
Şekil 4.76. YR lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

Dayanımı yüksek normal üretim kısa PP lifli betonların ikinci kırılma yüklerine bakıldığında; YR'ye göre YAKPP ve YBKPP oranlı lif katkılı betonlarda ~%18, YCKPP oranlı lif katkılı betonda ise ~%50 daha yüksek ikinci kırılma yüküne sahip oldukları görülmüştür. En önemli artışın YCKPP oranlı lif katkılı betonda olduğu görülmüştür.

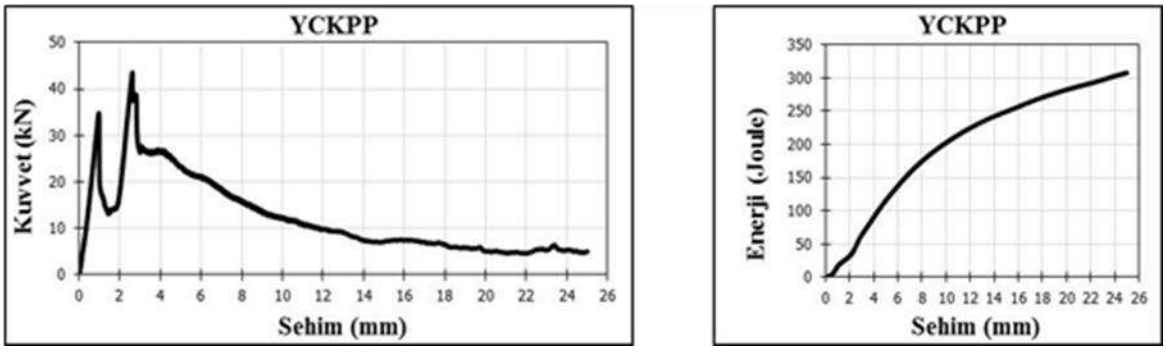
Dayanımı yüksek normal üretim kısa PP lifli betonların enerji yutma kapasitelerine bakıldığında; YR'ye göre YAKPP, YBKPP ve YCKPP betonlarında sırasıyla ~4.2, ~6.7 ve ~6.5 kat daha yüksek enerji yutma kapasitelerine sahip oldukları görülmüştür. En yüksek artışın YBKPP oranlı betonda olduğu görülmüştür



Şekil 4.77. YAKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri



Şekil 4.78. YBKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

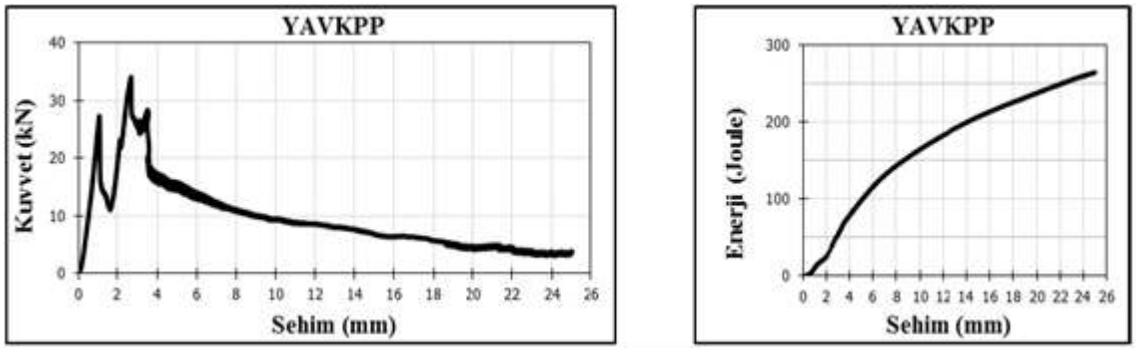


Şekil 4.79. YCKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

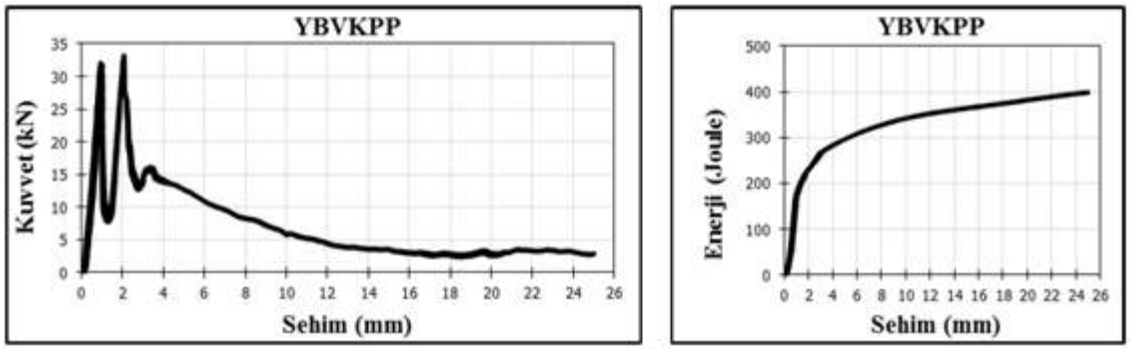
Dayanımı yüksek vakumlu üretim kısa PP lifli betonların ilk kırılma yüklerine bakıldığında; YVR'ye (Şekil 4.86) göre YAVKPP (Şekil 4.80), YBVKPP (Şekil 4.81) ve YCVKPP (Şekil 4.82) oranlı lif katkılı betonların sırasıyla; ~%50, ~%40, ~%36 daha düşük ilk kırılma yüküne sahip olduğu görülmüştür. PP lif oranı arttıkça ilk kırılma yükünde artış görülmüştür.

Dayanımı yüksek vakumlu üretim kısa PP lifli betonların ikinci kırılma yüklerine bakıldığında; YVR'ye göre YAVKPP ve YBVKPP oranlı lif katkılı betonlarda ~%21, YCVKPP oranlı lif katkılı betonda ise ~%12 daha düşük ikinci kırılma yüküne sahip olduğu görülmüştür. PP lif oranı arttıkça ikinci kırılma yükünde artış görülmüştür.

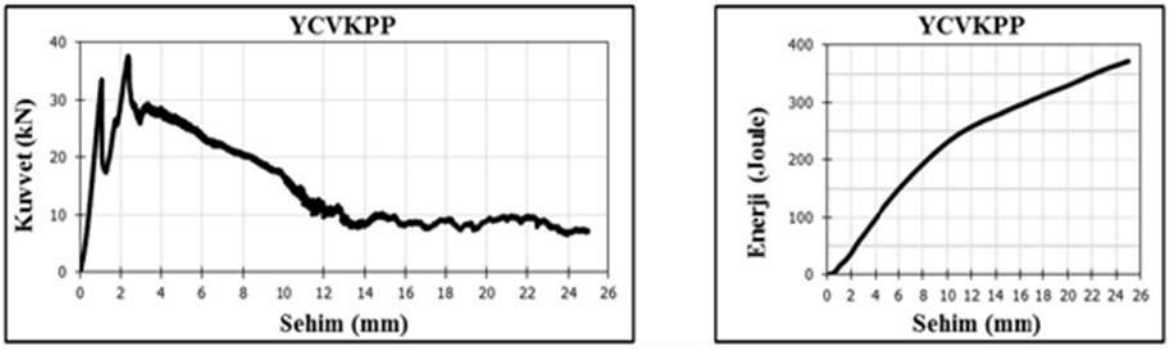
Dayanımı yüksek vakumlu üretim kısa PP lifli betonların enerji yutma kapasitelerine bakıldığında; YVR'ye göre YAVKPP, YBVKPP ve YCVKPP oranlı lif katkılı betonların sırasıyla; ~2.8, ~4.2, ~3.9 kat daha yüksek enerji yutma kapasitelerine sahip olduğu görülmüştür. En önemli artışın YBVKPP lif katkılı betonda olduğu görülmüştür



Şekil 4.80. YAVKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri



Şekil 4.81. YBVKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

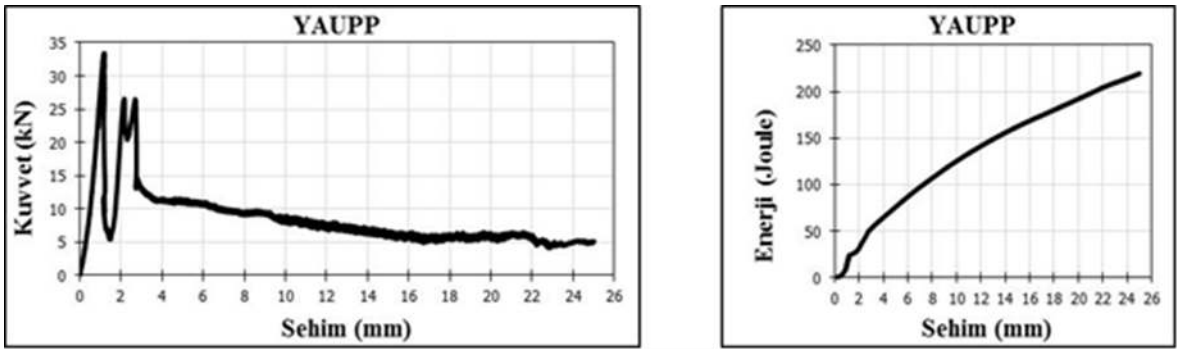


Şekil 4.82. YCVKPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

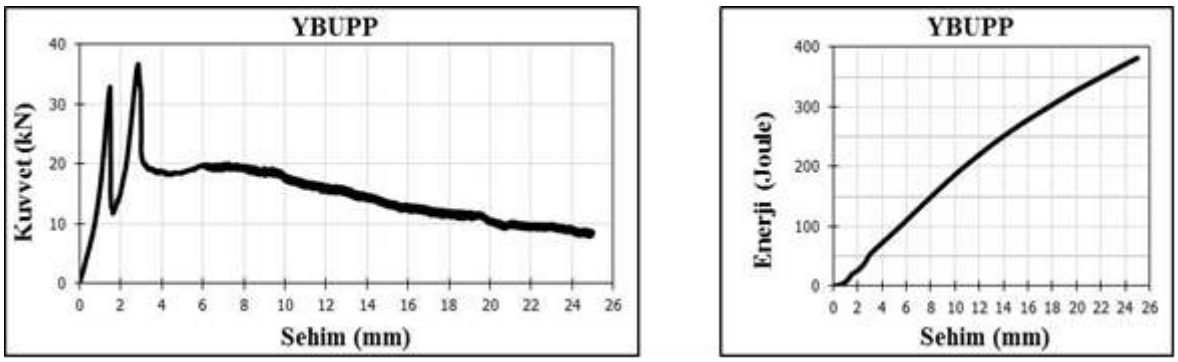
Dayanımı yüksek normal üretim uzun PP lifli betonların ilk kırılma yüklerine bakıldığında; YR'ye (Şekil 4.76) göre YAUPP (Şekil 4.83) ve YBUPP (Şekil 4.84) oranlı lif katkılı betonlarda ~%30, YCUPP (Şekil 4.85) oranlı lif katkılı betonda ise ~%50 daha düşük ilk kırılma yüküne sahip oldukları görülmüştür. Lif oranı arttıkça ilk kırılma yükünde azalma olduğu görülmüştür.

Dayanımı yüksek normal üretim uzun PP lifli betonların ikinci kırılma yüklerine bakıldığında; YR'ye göre YBUPP oranlı betonun ~%36, YCUPP oranlı betonun ~%29 daha yüksek, YAUPP oranlı betonun ise aynı ikinci kırılma yüküne sahip olduğu görülmüştür. En önemli artışın YBUPP oranlı betonda olduğu görülmüştür.

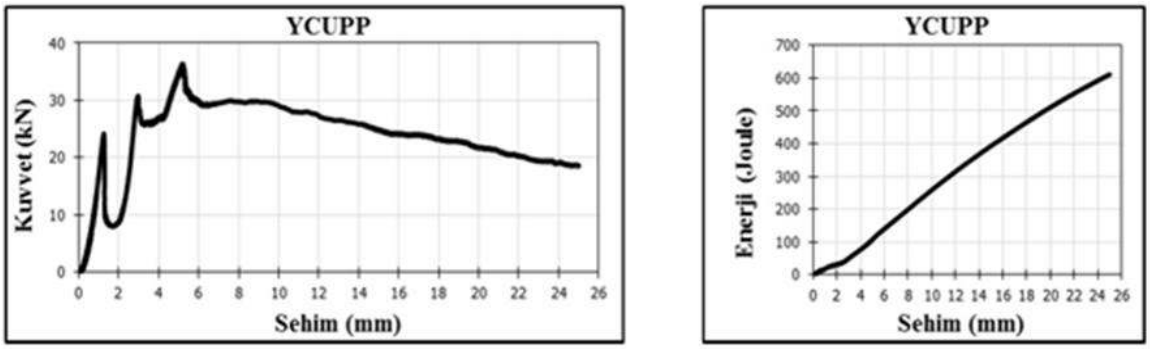
Dayanımı yüksek vakumlu üretim uzun PP lifli betonların enerji yutma kapasitelerine bakıldığında; YVR'ye göre YAVUPP, YBVUPP ve YCVUPP betonlarının sırasıyla 3.7, 5.3 ve 6.7 kat daha yüksek enerji yutma kapasitelerine sahip olduğu görülmüştür. Lif oranı arttıkça enerji yutma kapasitesinin arttığı görülmüştür



Şekil 4.83. YAUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

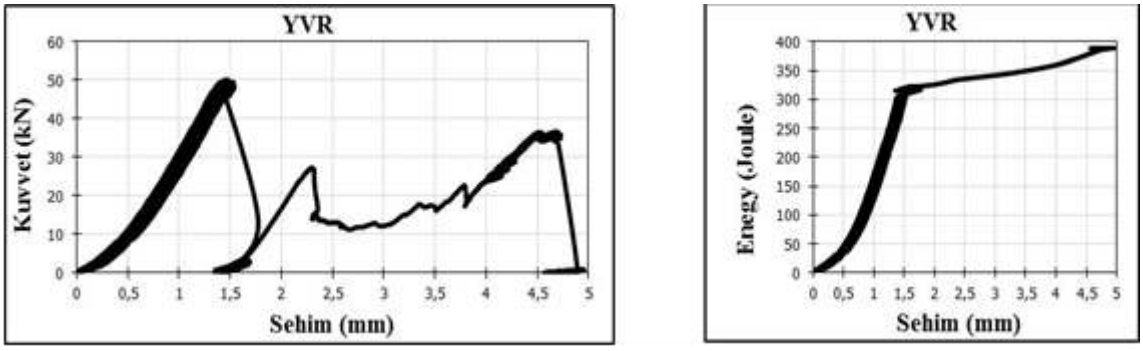


Şekil 4.84. YBUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri



Şekil 4.85. YCUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

Dayanımı yüksek vakumlu üretim uzun PP lifli betonların ilk kırılma yüklerine bakıldığında; YVR'ye (Şekil 4.86) göre YAVUPP (Şekil 4.87), YBVUPP (Şekil 4.88), YCVUPP (Şekil 4.89) oranlı lif katkılı betonların sırasıyla; ~%38, ~%48, ~%19 daha düşük ilk kırılma yüküne sahip oldukları görülmüştür. En çok lif katkılı betonun daha yüksek ilk kırılma yüküne sahip olduğu görülmüştür

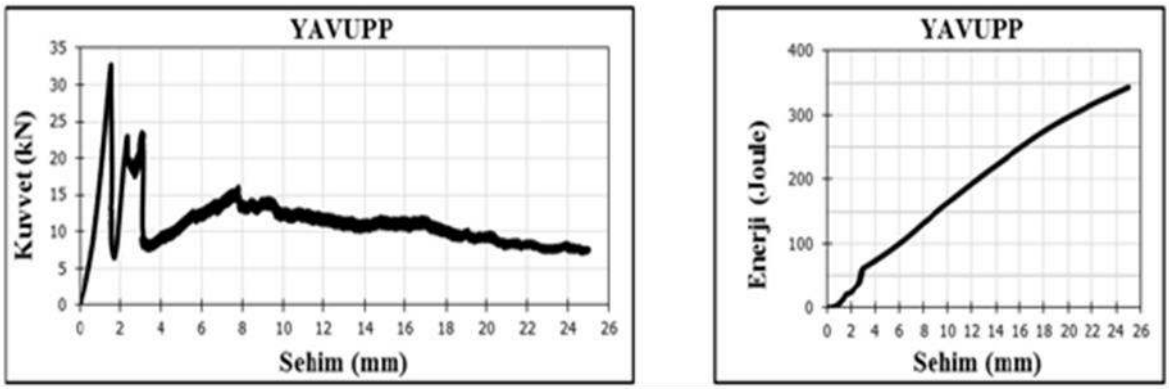


Şekil 4.86. YVR lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

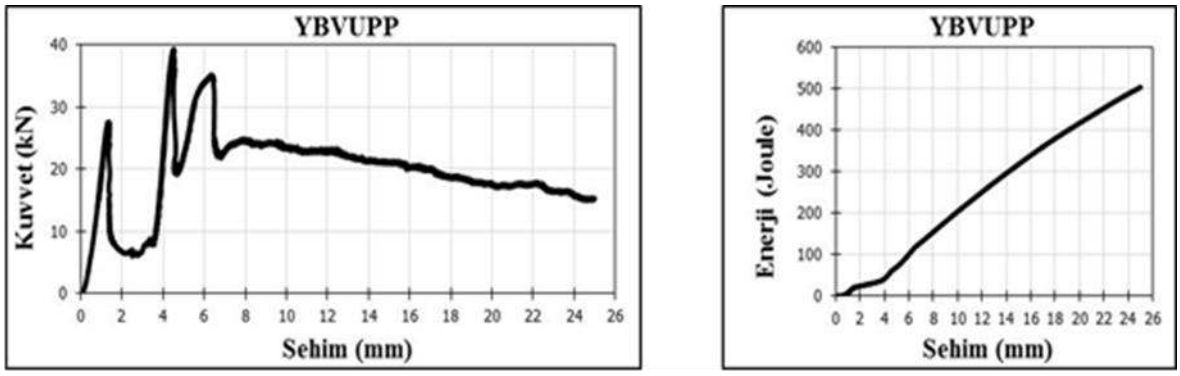
Dayanımı yüksek vakumlu üretim uzun PP lifli betonların ikinci kırılma yüklerine bakıldığında; YVR'ye göre YAVUPP oranlı betonun ~%45, YBVUPP oranlı betonun ~%7,

YCVUPP oranlı betonun ise ~%7 daha düşük ikinci kırılma yüküne sahip olduğu görülmüştür. En önemli artışın YBVUPP oranlı betonda olduğu görülmüştür.

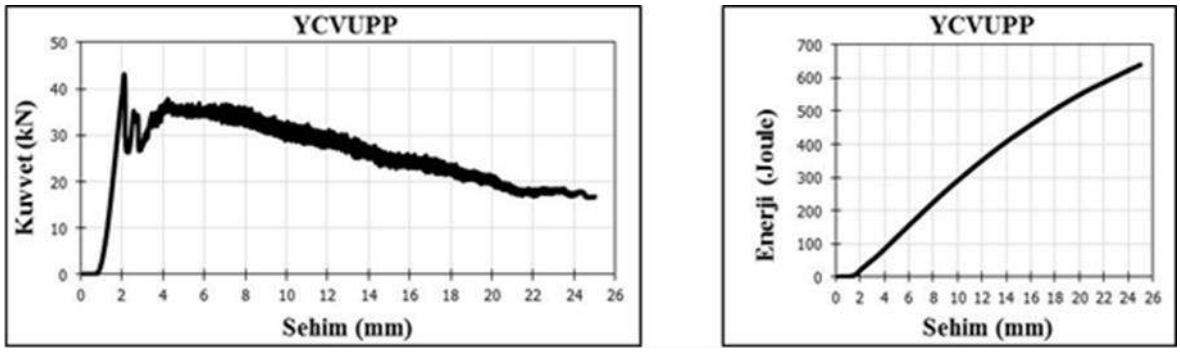
Dayanımı yüksek vakumlu üretim uzun PP lifli betonların enerji yutma kapasitelerine bakıldığında; YVR'ye göre YAVUPP, YBVUPP ve YCVUPP betonlarının sırasıyla 3.7, 5.3 ve 6.7 kat daha yüksek enerji yutma kapasitelerine sahip olduğu görülmüştür. Lif oranı arttıkça enerji yutma kapasitesinin arttığı görülmüştür.



Şekil 4.87. YAVUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri



Şekil 4.88. YBVUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri



Şekil 4.89. YCVUPP lifli betonların yük-sehim ve enerji-sehim grafikleri

Plak testleri sonucunda lifli betonlarla ve lifsiz betonlar arasında çeşitli farklılıklar görülmüştür. DR, DVR, NR, NVR, YR ve YVR betonlarında lif olmadığı için 25 mm sehime kadar bir eğilme olmamıştır. Bu betonlar en yüksek taşıma yükünden sonra kırılmış ve test sona erdirilmiştir. Bu betonlar genel olarak düzenli bir şekilde 4 parçaya bölünmüştür (Şekil 4.48.) Dayanım sınıfının artışına bağlı olarak kırılma yük değerleri de artış göstermiştir (Şekil 4.49.) Vakum uygulaması da kırılma yükü değerini nispeten arttırmıştır.

Plak testleri sonucunda lifli betonlarla ve lifsiz betonlar arasında çeşitli farklılıklar görülmüştür. DR, DVR, NR, NVR, YR ve YVR betonlarında lif olmadığı için 25 mm sehime kadar eğilme olmamıştır. Bu betonlar en yüksek taşıma yükünden sonra kırılmış ve test sona erdirilmiştir. Bu betonlar genel olarak düzenli bir şekilde 4 parçaya bölünmüştür (Şekil 4.48.) Dayanım sınıfının artışına bağlı olarak kırılma yük değerleri de artış göstermiştir. Lif katkılı beton plaklarda kırılmalar düzensizdir ve kırılan beton parçaları liflerden dolayı bir birinden ayrılmamıştır (Şekil 4.49.) Vakum uygulaması da kırılma yükü değerini nispeten arttırmıştır.

Şekil 4.90. Referans beton plakların kırılma şekilleri

Şekil 4.91. Lifli beton plakların kırılma şekilleri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Farklı oranlarda PP lif takviyesi ve/veya vakum uygulaması yapılarak üretilen 42 çeşit beton üzerinde yapılan 15x15x15 cm küp numunelerle beton basınç dayanımları, 60x15x15 cm numunelerle kiriş eğilme testleri ve 10x60x60 cm numunelerle plak testleri neticesinde elde edilen verilere göre yapılan değerlendirmeler sonunda;

Basınç dayanımı;

Beton karışımlara ilave edilen PP lifler betonun basınç dayanımını arttırmıştır. Dayanımı düşük betonlar dışındaki numunelerde kısa PP lif takviyeli betonlar uzun PP lif takviyeli betonlara göre basınç dayanımına daha fazla katkıda bulunmuştur. Betonlara uygulanan vakum işlemi ise referans betona kıyasla dayanımı yükseltmiş ve dayanımı yüksek betonlar dışında uzun PP lif takviyeli betonlar kısa PP lif takviyeli betonlara göre basınç dayanımını daha fazla arttırmıştır.

Kiriş eğilme dayanımı;

Kiriş eğilme testinde betonların en yüksek ve öngörülen eğilme gerilme değerleri irdelenmiştir. PP lif takviyesi yapılmayan numunelerde ise kiriş eğilme testindeki sehim değeri 3 mm'ye ulaşamadığı için öngörülen eğilme gerilmesi değeri hesaplanamamıştır. Yapılan testlerde numuneler iki parçaya ayrılana kadar devam etmiş ve kırılma şekillerinde de farklılıklar görülmüştür. Lifsiz ve lifli betonların tümü en yüksek yük altında kırılmış ancak lifli betonlarda lifler kirişlerin hem momentin en yüksek olması gereken kırılma yerini değiştirmiş hem de lif oranına bağlı olarak kırılmalar dağınık bir şekilde olmuştur. Beton karışımlara ilave edilen PP lifler hem kırılma yükünü hem de sehim miktarını arttırmış ve böylece betonun en yüksek eğilme gerilmesi de arttırmıştır. Uzun PP lifler kısa PP liflere göre dayanımı düşük betonlar haricinde en yüksek eğilme gerilmesine daha çok katkı sağlamıştır. Betona uygulanan vakum işlemi ise dayanımı yüksek betonlar dışındaki numunelerde referansa göre en yüksek eğilme gerilmesini yükseltmiş ve dayanımı düşük betonlar haricinde en yüksek eğilme gerilmesine uzun PP lifler kısa PP liflere göre daha çok fayda sağlamıştır. 3 mm sehimdeki öngörülen eğilme gerilmelerine bakıldığında ise hem vakum uygulamalı hem de uzun PP lifli karışımların değerleri en yüksek olmuştur. Yüksek dayanımlı betonlara ise vakumlu kısa PP lifli ve vakumlu uzun PP lifli betonların öngörülen eğilme gerilme değerleri ise birbirine çok yakın çıkmıştır

Plak deneyleri ve enerji yutma;

Betona katılan PP lifler, sehim miktarını ve dayanımı yüksek, kısa ve uzun PP lif takviyeli betonlar dışındaki numunelerin ilk kırılma yüklerini arttırmıştır. Böylece kırılma yüklerinde meydana gelen artışlardan ziyade sehim miktarındaki artışlar betonun enerji yutma kapasitesini yükseltmiştir. PP lif takviyeli betonlara yapılan plak deneylerinde, uzun lifli betonların kırılmaları kısa liflere göre daha az olmuştur. Karışımlardaki uzun veya kısa lif miktarı arttıkça lif homojen dağılımı zayıflamış ve uzun lif miktarının artması sonucunda da topaklaşmalar oluşmuştur. Beton numunelerinin kırılmalarına bakıldığındaysa PP liflerin şekli ve aderansına bağlı olarak düzensiz olmuş ancak kısa PP lifi az olan betonlar aynı lifsiz betonlardaki gibi kırılmaları düzenli olmuştur. PP lif miktarı fazla olan numuneler genellikle plak testlerinde oldukça yüksek direnç göstermiş ve özellikle uzun PP lif katkılı betonların parçalanmalarında büyük güçlükler meydana gelerek baskı uygulanan alanda zımbalama etkisi görülmüş ve bu betonlarda enerji yutma kapasitesi hayli yüksek olmuştur. Betona uygulanan vakum işlemi de kırılma yükü ve enerji yutma kapasitesini arttırsa da PP lif takviyesindeki kadar etkili olamamıştır. Yapılan beton karışımlarından en yüksek enerji yutma kapasitesi ise vakum uygulamalı uzun PP lif takviyeli betonlarda görülmüştür.

Sonuç olarak, beton karışımlarına ilave edilen PP liflerin, lif boyu ve lif oranı gibi parametrelerinin enerji yutma kapasitelerinde, basınç dayanımlarında ve eğilme gerilmelerinde büyük bir önemi vardır. Dayanımı düşük, normal ve yüksek betonlar sınıflarında uzun PP liflerin betonda gereğinden çok kullanılması basınç dayanımını olumsuz etkilediği ve lifsiz vakumlu betonlar ile lifli vakumlu betonlar arasında önemli bir basınç dayanımı farkı olmuştur. Genel itibariyle en iyi sonuçlar uzun PP lif takviyeli betonlarda görülse de fazla katılan lif miktarı beton homojenliğinde olumsuz sonuçlar meydana getirerek topaklaşmalara ve böylece beton performansında düşüşlere sebep olmaktadır. Betona uygulanan vakum işlemi de beton performansını arttırsa da PP lif takviyesi kadar etkili olmamıştır.

6. KAYNAKLAR

ACI 544.1R-96, 1996. "State-of-the-art report on fiber reinforced concrete", American Concrete Institute (ACI), Cilt:2, Sayı:8.

Akman, S. 1990. "Yapı Malzemeleri", İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, 2. Baskı, İstanbul.. Albrecht, W., Fuchs, H., Kittlemann, W. Nonwoven Fabrics, 2003.

Arazsu, U. 2012. Polipropilen Lifli Betonların Taze ve Sertleşmiş Beton Özellikleri. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, Elazığ,

Arslan, A., Kasım-Aralık 1999. Aydın A., Lifli Betonların Genel Özellikleri , Hazır Beton Dergisi, s. 67-73.

ASTM C 1550–05, 2005. "Standard test method for flexural toughness of fiber reinforced concrete (Using centrally loaded round panel)", Current edition, s. 1-13.

ASTM C 39, 1994. Standard Test Method for Compressive Strength of Clindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standartds.

Banthia, N., Yan, N. ve Bindiganalive, V., 2000. "Development and application of high performance hybrid fiber reinforced concrete", 5. RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), Lyon, France, s. 380-393.

Baradan, B., Yazıcı H., Ün, H., 2002. "Betonarme .Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)", DEÜ Müh. Fak. Yayınları, İzmir, Cilt: 298, s. 49-157.

Başer, İ., 1992. Elyaf Bilgisi, Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yayınları, Yayın No:7, İstanbul.

Başer, İ., 1985. Tekstil Kimyası ve Teknolojisi, İstanbul Üniversitesi Yayınları, Sayı: 3224, İstanbul.

Bayramov, F., İlki, A., Taşdemir, C., Taşdemir, M.A. ve Yerlikaya, M., 2004. "Yoğun trafiğe maruz beton yollarda çelik lif donatılı betonlar, 9. Uluslararası Beton Yollar Sempozyumu, İstanbul, s. 287-304.

Bekaert, 1998. Duomix Hakkında Genel Bilgiler Kılavuzu.

Betterman, L.R., Ouyang C., ve Shah, S.P., 1995. "Fiber-matrix ınteraction in microfiber-reinforced mortar", Advanced Cement Based Materials, Cilt: 2, s. 53-61.

Bolat, H., 2009. "Polyester ve Polipropilen Telli Betonların Yol Kaplaması Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması", Gazi Üni. FBE. Doktora Tezi, Ankara.

Bolat H., 2002. “Vakumlu Betonun Basınç Dayanımı Üzerine Bir Araştırma” Y. Lisans Tezi, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi A.B.D., Ankara.

Bolat, H. ve Çullu, M., 2016. “Effects of Concrete Compressive Strength of Macro and Micro Polypropylene Fiber Admixtures and Vacuumed Dewatering Application”. International Journal of Mat. and Mec. Eng. (IJMME). Cilt: 5, s 1-10.

Bolat, H. ve Çullu, M., 2016. “Effects of Concrete Compressive Strength of Steel and Polyester Fiber Admixtures and Vacuumed Dewatering Application”. International Journal of Material and Mechanical Engineering (IJMME). Cilt: 5, s. 11-18.

Bolat, H., Çullu, M., ve Tekin, İ., 2008. “Bir Saha Beton Uygulaması: Vakumlu Beton”, Beton 2008 Uluslararası Hazır Beton Kongresi, İstanbul.

Bolat, H. ve Şimşek, O., 2015. “Evaluation of Energy Absorption of Macro Synthetıc and Steel Fiber Reinforced Concretes” Romanian Journal of Materials, Cilt: 45, Sayı: 2, s. 123 – 132.

Bolat, H., Şimşek, O., Çullu M., Durmuş, G. ve Can, Ö., Mayıs 2014. “The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete”, Composites Part B: Engineering, Cilt: 61, s.191–198.

Bolat, H., Şimşek, O. ve Çullu, M., 2006. "Beton yol kaplamalarında su-çimento oranının durabiliteye etkisi," 3.Uluslararası Trafik ve Yol Güvenliği Kongresi.

Bolat, H., 2010. “Polyester ve Polipropilen Telli Betonların Yol Kaplaması Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması”. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Bolat, H., Subası, S., Çullu, M., ve Akaya, U., 2010. “Beton Yolları Bekleyen Tehlikeler” Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt: 6, Sayı: 1, s. 30-37.

Boucher, P., 2007. “Building better highways in Canada”, Concrete Thinking in Transportation Solutions, Cement Association of Canada, s. 3-32.

Celasun, H., ve Polat, Z., 1974. Ön Gerilmeli Beton, İDMM akademisi yayınları, Sayı 123, Kurtulmuş Matbaası, İstanbul.

Cengiz, O. ve Turanli, L.,2004. “Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test”, Cement and Concrete Research, Cilt: 34, s. 1357-1364.

Chen, S., 2004. “Strength of steel fibre reinforcement concrete ground slabs”, Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Structures and Buildings, Cilt: 157, Sayı: 2, s. 157-163.

CIRIA, 1984. Spalling of concrete in fires, Technical Note, s. 118.

Cimilli, T., 1978. “ Donatılı Betonlarda Matrix- Lif Aderansı” Türkiye İnş. Müh. 7. Teknik Kongresi, Ankara, s. 28-32.

Dalak, H. ve İlgün, H., 2007. "Karayollarında Ağırlık Kontrolü Ve Uygulamaları", TCK, s. 5-98.

Demiryürek, O., 2009. Polyester/Viskon Karışımlı Open-End Rotor İplik Özelliklerinin Yapay Sinir Ağları ve İstatistiksel Modeller Kurularak Tahmin Edilmesi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi, Adana.

Dramix Beton İçin Çelik Teller El Kitabı, 2008. Beksa Çelik Kord. San. ve Tic. AŞ., İzmit, s. 1-21.

EFNARC (The European Specification for Sprayed Concrete Committee), 1996. Energy absorption class (plate test), Farnham, Surrey EN, UK, s. 9-15.

Elsaigh, W.A., Kearsley, E.P. ve Robberts, J.M., 2005. "Steel fibre reinforcement concrete for road pavement applications", Proceedings of the 24th Southern African Transport Conference (SATC), University of Pretoria, s. 191-193.

EN 14488-5, 2006. "Testing sprayed concrete - Part 5: Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens", s. 2-8.

Erdoğan ve Y. Turhan., 2010. "Concrete. 3rd ed.' Metu Advances Foundation Publications, s. 66–115.

Falcon İş ve Yapı Mak. San. ve Tic. Ltd. Şti. Tanıtım broşürü, 2002. http://www.falcon-is.com, Ankara.

Fanella, D. A. ve Naaman, A. E., 1985. Stress-Strain Properties of Fiber Reinforced Concrete in Compression, ACI Journal, Cilt: 8, Sayı: 4, s. 475.

Fanella, D.A. ve Naaman, A.E., 1985. "Stress-Strain Properties of Fiber Reinforced Concrete in Compression", ACI Materials Journal, Cilt: 82, Sayı: 4, s. 475-483.

Granju, J.L. ve Balouch, S.U., 2005."Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks", Cement and Concrete Research, Cilt: 35, s. 572-577.

Halm, J., 2002. "Concrete road constructıons state of the art and new development", Natıonal Meetıng On Concrete Roads, Ankara, s. 89-99.

İyina, Ş. ve Ağar, E., 2004. "Karayollarında hazır beton", Beton 2004 Kongresi, İstanbul, s. 66-72.

Johnston, C.D., 1985. "Toughness of steel fibre reinforcement concrete", Proceedings of Steel Fibre Concrete US-Sweeden Joint Seminar (NSF-STU), Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, s. 333-360.

Khaloo, A.R., ve Afshari, M., 2005. "Flexural behaviour of small steel fibre reinforced concrete slabs", Cement & Concrete Composites, Cilt: 27, s. 141–149.

Lambrechts, A.N., 2005. “The technical performance of steel and polymer based fibre concrete” The Institute of Concrete Technology, Annual Technical Symposium, (Rilem TC 162 TDF - Materials and Structures, “Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, σ-ε design method, Rilem Technical Committees Final Recommendation”), Belgium, Cilt: 36, s. 560-567.

Löfgren, I., 2005. “Fibre-reinforced concrete for ındustrial construction”, Ph.D. Thesis, Chalmers Unıversity of Technology, Göteborg, Sweden, s. 39-50.

Mehta, P. K. ve Monteiro, J.M. P., 2006, “Concrete: microstructure, properties and materials.” The McGraw-Hill Companies, s.33–187.

Nelson P.K.. Li V.C. ve Kamada T., 2002. Fracture Toughness of Microfiber Reinforced Ce-ment Composites, Journal of Materials in Civil Engineering, Cilt: 14, Sayı: 5, s. 384.

Neville, A.M., 2001. Su ve Beton: “Bir Sevgi Nefret İlişkisi” (Çeviren: Yeğinboğalı, A.,. “Concrete International” makalesinden Cilt: 22, Sayı: 12, 2000)., Çimento ve Beton Dünyası dergisi, Sayı: 29, Ankara.

Neville, A. M., 2011. “Properties of concrete. 5th edition.” Trans-Atlantic Publications, s. 108–178.

Özdemir, Ö., 1999. “Experimental Study on vacuum processed concrete for floor constructions” Industrial Floors sempozyumu bildiri notları, Almanya.

Soroushian P. ve Marikunte S., 1992. High Performance Cellulose Fiber Reinforced Cement Composites, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Edited by H.W.Reinhardt & A.E. Naaman, Londra.

Qian, C., Stroven, P., Dalhuisen, D.H. ve Moczko, A., 2000. “Fracture properties and acoustic emission response of hybrid polypropylene-steel fibre reinforced concrete”, 5. RILEM Symposium on FRC, Lyon, France, s. 491-500.

Roesler, R.J., Altoubat, A.S., Lange, A.D., Rieder, K.A. ve Ulreich, R.G., 2006. “Effect of synthetic fibers on structural behavior of concrete slabs-on-ground” ACI Materials Journal, Cilt: 103, Sayı:1, s. 3-8.

Rossi, P., 2000. “Ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPFRC): an overview”, 5. RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), Lyon, France, s. 87-100.

Saeed, H.H., ve Ezzulddin, A.A., 2014. “Study a new technique for producing Vacuum-dewatered concrete” . International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering, Cilt: 3, Sayı: 10, s. 1-6.

Subaşı, S., 2008. Vakumlu Betonlarda Farklı Derinliklerdeki Beton Yoğunluğunun Alternatif Yöntemler ile Tahmin Edilmesi. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi Sayı: 2, s. 53-61.

Sundrani, D. ve Inamdar, Y., 2012. "Exploring Methods of Replacement of Concrete Road in Two Days" International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN, Cilt: 2, Sayı: 1, s. 2249 – 8958.

Şahin, Y., ve Köksal, F., 2007. "Çelik tel ve matris dayanımlarının betonların kırılma enerjisine ortak etkisi", 7. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, s. 363-371.

Taşdemir, M.A., Bayramov F., Kocatürk Necip A. ve Yerlikaya M., 2004. "Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler", Beton Kongresi, İstanbul.

Taşdemir, M.A., Bayramov F. ve Yerlikaya M., Geleneksel Ve Yüksek Performanslı Çelik Donatılı Betonlar. Türkiye Mühendislik Haberleri, s. 426, 476.

Taşdemir, M.A., Şengül, Ö., Şamhal, E. ve Yerlikaya, M., 2006. "Endüstriyel zemin betonları", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, Maya Basın Yayın, İstanbul, s. 54-272.

Taşdemir, M.A. ve Yerlikaya, M., 2003. "Çelik tel donatılı betonlar semineri", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara şubesi, Ankara, s. 15-18.

Tremix Ltd., 2008. www.tremix.com, Sweden, February.

Troxell, G.R., Davis, H.F., ve Kelly, J.W., 1968. Compression and Properties of Concrete, McGraw-Hill Book Company, New York.

TS 3323, 2012. Beton - Basınç deney numunelerinin hazırlanması, hızlandırılmış küre tabi tutulması ve deneyleri, Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara, s.1-16.

TS 802, 2016. Beton karışım tasarımı hesap esasları, Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara, s. 1-43.

TS 10514, 2015. Lif takviyeli betonun karışım oranları ve imalatı için kurallar, Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara. s.1-23.

TS EN 14651+A1, 2015. Metal lifli beton - Deney yöntemi - Eğilmede çekme dayanımının tayini(Kalıcı orantısal sınır (LOP)), Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara, s. 1-18.

TS EN 197-1, 2012. Çimento sınıflarının bileşimini, özelliklerini ve uygulama kriterlerini içeren tanımlayıcı bir standart Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara, s. 1-29.

TS EN 1008, 2003. Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dâhil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara, s.1-18.

TS EN 934–2, 2002. Kimyasal katkılar- Beton, harç ve şerbet için- Bölüm 2: Beton katkıları-Tarifler ve özellikler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme, Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara, s.1-25.

TS EN 12390-3, 2010. "Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini" Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara, s.1-19.

TS EN 12504-1, 2010. “Beton - Yapıda Beton Deneyleri - Bölüm 1: Karot Numuneler - Karot Alma, Muayene ve Basınç Dayanımının Tayini”, Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara, s.1-11.

TS EN 12350 – 2, 2010. “Beton – Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slamp) deneyi”, Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara, s.1-9.

Türker, T., 2000. “Betonarmede oluşan iç gerilimlere karşı gerçek önlem”, İnşaat ve Malzeme, Cilt: 150, s. 24-25.

Uğurlu, A., 1999. “Çelik liflerle güçlendirilmiş beton”, DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Baş., Ankara, MLZ-878: s. 175-190.

Ünal, O., Uyan, M., ve Uygunoğlu T., 2007. “Isıl işlem görmüş lifli betonda gerilme şekil değiştirme ilişkisi”, 7. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, s. 109-117.

Vural, A., sözlü görüşme, 2014. Gümüşhane Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Bağlarbaşı, Gümüşhane, vural@gumushane.edu.tr.

Yakartepe, TKAM Tekstil Hapı, 1996. Tekstil ve Konfeksiyon araştırma Merkezi Ltd. Şti, Birinci Baskı, İstanbul.

Yalçın, H., ve Koç, T., 2004. “Betonarme Demirlerinin Korozyonu ve Önlenmesi”, CMS Ltd. yayını, Ankara.

Yalçın, M., Taşdemir, C., Gökalp, İ., Ekim, H. ve Yerlikaya, M., 2007. “Çelik tel donatılı betonların kullanılabilirlik ve taşıma gücü sınır durumlarına göre tasarımı”, 7. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, s. 353-362.

Yamaguchi, T. ve Muramatsu, A., 1999. “Finishing concrete floor by modified vacuum dewatering”, paper presented at 4th International Colloquia, “Industrial Floors,” Stuttgart, Almanya.

Yardımcı, M.Y., 2007. Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik, Mekanik, Kırılma Parametrelerinin Araştırılması Ve Optimum Tasarımı. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.

Yerlikaya, M., 2005. “Çelik tel donatılı zemin betonları tasarım ve yapım ilkeleri”, Beksa Çelik Kord San ve Tic AŞ. Tanıtım Kitapçığı, 1-21.

Yıldırım, T.S. ve Ekinci, E.C., 2006. “Çelik, cam ve polipropilen lifli betonlarda donma-çözülme etkilerinin araştırılması”, Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi, Cilt: 18, Sayı: 3, s. 359-366.

Yörükoğulları E., 2005. “Doğal Zeolitlerin Karayollarında Buz/Kar Çözücü Olarak Kullanımı”, Madencilik Bülteni İnceleme, s. 40-42.

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Diyarbakır'da doğdu. Sırasıyla Silvan İlköğretim Okulu, Silvan Lisesi'nden mezun oldu. 2005 yılında Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne girdi, 2009 yılında mezun oldu. 2011 yılında Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2009-2010 yılı arasında Diyarbakır Silvan İlçesinde kendine ait mühendislik bürosunda, 2010-2011 yılı arasında Iğdır Bayındırlık ve İskân Müdürlüğünde ve 2011'den bu yana Şanlıurfa Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü'nde İnşaat Mühendisi olarak görev yapmakta olup, evlidir.