

Üç Boyutlu Tekstil İle Üretilen Köpük Betonların Mekanik Özellikleri

Umut Varlı

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2021

Mechanical Properties of Foam Concrete Produced with Three-Dimensional Textile

Umut Varli

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

June, 2021

Üç Boyutlu Tekstil ile Üretilen Köpük Betonların Mekanik Özellikleri

Umut Varlı

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Canbaz

Haziran 2021

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Mehmet Canbaz danışmanlığında hazırlamış olduğum “Üç Boyutlu Tekstil ile Üretilen Köpük Betonların Mekanik Özellikleri” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 24/05/2021

Umut Varli

İmza

ÖZET

Köpük beton, hem ısı hem de ses yalıtımı açısından inşaat mühendisliğinde potansiyel kullanıma sahip olabilen yüksek kaliteli bir yapı malzemesidir. Bununla birlikte, çimento malzemesinin doğası ve yüksek gözenekliliği nedeniyle köpük beton, çekme yüklerine karşı çok zayıftır; bu nedenle, genellikle kururken çekme sırasında plastik bir durumda ve ayrıca katı halde çatlar. Bu çalışmada, 3 boyutlu tekstil (3B) takviyeli köpük beton üretmek için kapsamlı bir deney programı oluşturulmuştur. Bu amaçla, temel teşkil edebilecek köpürtücü ajan, 3B tekstil, silis dumanı ve diğer bileşenler ayrıntılı olarak incelenip ve tartışılmıştır.

3B tekstil takviyesinin köpük beton üzerindeki mekanik özellikleri 28 günlük ve 56 günlük küre maruz kalmış numunelerde 0,3; 0,2; 0,1 oranlarında kum-bağlayıcı, 0,5; 0,45; 0,40 oranlarında su-bağlayıcı ve 10; 15; 20 oranlarındaki silis dumanı miktarları için eğilme ve basınç dayanımları belirlenmek üzere test edilmiştir. Bunun yanında, hazırlanan numuneler, mikroskobik boyutlarda incelenmiş ve tekstil etkisi, numuneler içinde görülen boşluk oranları ile ilişkilendirilmiştir.

Elde edilen bulgular, 3B tekstil kullanımının deney numunelerinin mekanik özellikleri üzerindeki olumlu etkisini kanıtlamıştır. Eğilme dayanım sonuçlarında, %46'ya, basınç dayanım değerlerinde ise %23'e varan artışlar gözlenmiştir. Ayrıca, kum/bağlayıcı (K/B) oranının en düşük olduğu durumda, numune içerisindeki boşluğun en az olduğu, bu oranın artmasıyla boşluk oranının da arttığı mikroskobik inceleme sonucu bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Köpük beton, 3 boyutlu tekstil, Basınç Dayanımı, Eğilme dayanımı, Mikro-CT analiz

SUMMARY

Foam concrete is a high quality building material that can have potential use in civil engineering, both in terms of heat and sound insulation. However, due to the nature of the cement material and its high porosity, foam concrete is very weak against tensile loads; for this reason, it usually cracks in a plastic state during shrinkage when drying, and also in a solid state. In this study, a comprehensive test program has been created to produce 3 dimensional (3D) textile reinforced foam concrete. For this purpose, the foaming agent, 3D textile, silica fume and other components that can be the basis are studied and discussed in detail.

The mechanical properties of 3D textile reinforcement on foam concrete were tested to determine bending and compressive strengths for amounts of 0,3; 0,2; 0,1 sand-binder, 0,5; 0,45; 0,40 water-binder and 10; 15; 20 silica fume in samples exposed to curing at 28 days and 56 days. Besides, the prepared samples were examined in microscopic dimensions and the textile effect was interpreted with the void ratios seen in the samples.

The findings obtained proved the positive effect of the use of 3D textiles on the mechanical properties of test specimens. Bending strength, in 46%, while the compressive strength increases up to 23% was observed. In addition, it has been found that in the case where the sand / binder (K / B) ratio is the lowest, the space in the sample is the least, and with the increase of this ratio, the void ratio increases.

Keywords: Foam concrete, 3D textile, Compressive Strength, Flexural strength, Micro-CT analysis

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ (devam).....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ (devam).....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1 GİRİŞ ve AMAÇ	1
2 KÖPÜK BETONA GENEL BAKIŞ.....	4
2.1 İnce Agrega İçermeyen	4
2.2 Gaz Beton	5
2.3 Hafif Agrega İçeren	5
2.4 Köpük Beton Malzemeleri.....	5
2.5 Köpük Beton İmalatı.....	8
2.6 Köpük Betonun Kürü.....	10
2.7 Köpük Betonun Özellikleri	11
2.8 Karışım Tasarımı ve Karıştırma Prosedürü	12
2.9 Köpük Betonun Hazırlanması.....	13
2.10 Köpük Betonun Özellikleri	14
2.11 Mekanik Özellikleri	18
2.11.1 Basınç Dayanımı	18
2.11.2 Köpük Betonun Dayanıklılığı.....	20
2.12 Köpük Beton Uygulamaları	22
3 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	23
3.1 Tekstil Takviyeli Betonun Yapısı, Özellikleri ve Uygulanması.....	25

3.2	Tekstil Yapıları	30
3.3	Tekstil Kumaşlarda İplik Dizilimi	32
3.4	Köpük Betonda Sıcaklık Etkisi	33
3.5	Köpük Beton için Isıl İletkenlik Ölçüm Yöntemleri	34
3.6	Görüntü İşleme Analizi	35
4	MATERYAL ve YÖNTEM	38
4.1	Kullanılan malzemeler	38
4.2	Karışım Tasarımı	43
4.3	Deney Numunelerinin Hazırlanması	44
4.4	Uygulanan Deneyler	45
4.4.1	Basınç dayanımı testi	45
4.4.2	Eğilme dayanımı testi	46
4.4.3	Dijital görüntü işleme ve analizi	47
5	BULGULAR ve TARTIŞMA	49
5.1	Referans Karışımlarda Eğilme Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi	49
5.2	Referans Karışımlarda Basınç Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi	55
5.3	Dijital Görüntü İşleme ve Analiz Sonuçları	61
6	SONUÇ VE ÖNERİLER	65
	KAYNAKLAR DİZİNİ	68
	KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	69

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Temel Form Hafif Beton (Newman & Ban, 2003), (a) ince agregaya içermeyen, (b) gaz beton, (c) hafif agregaya içeren.....	4
2.2. Köpük beton üretim süreci	8
2.3. Önceden şekillendirilmiş köpürtme işlemi yoluyla köpük beton üretiminin akış şeması	12
2.4. Kuru Yoğunluğun Su Absorpsiyon Üzerindeki Etkisi (Kearsley & Wainwright, 2001).....	17
2.5. Farklı İncelikte Kumlu Karışımlar için Dayanım Yoğunluk Değişimi	19
2.6. Bazı köpük betonun uygulamaları (www.dr-luca.com, 2009)	22
3.1. İnce tekstil takviyeli beton (TRC) ürünlerinin tipik bölümleri: a) birkaç kat 2B tekstil takviyesi veya b), c) bir kat 3B tekstiller.....	23
3.2. Bazı liflerin görünümü (Amran vd., 2020).....	25
3.3. TRC'nin mikro yapısı.....	26
3.4. Farklı türde tekstiller	27
3.5. TRC bileşenlerinin üretimi: a) el ile yerleştirme, b) mekanize işlemlerle yerleştirme (Bramshuber, W ve ark.,2006)	28
3.6. TRC'nin yapısal ve mimari bileşenleri: a) köprü profilleri, b) perde duvarlar (Hegger, J. ve ark., 2006)	29
3.7. Beton bileşenlere harici bir tekstil tabakası uygulayarak onarım ve güçlendirme	29
3.8. Kompozit malzemeler için takviye tekstillerinin yapıları: a) Atkılı örgü, b) Çözü örgü, c) Çözü çok eksenli örgü, d), e) Dokuma, f) Bağlı, g) 3B tekstil, h) Örgülü 2B tekstil, i) Örgülü 3B tekstil	31
3.9. 2B Tekstil	32
3.10. 3B Tekstil	33
3.11. Farklı ısı yalıtım ölçüm yöntemleri	34
3.12. Dijital görüntü işleme süreci (Yolcu, 2014)	35
3.13. Görüntü işleme yöntemleri	36
3.14. Mikro-CT çalışma prensibi.....	37

4.1. Köpük beton üretiminde kullanılan malzemeler	38
---	----

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.2. Agrega tane boyutları- gradasyon eğrisi.....	39
4.3. Köpük solüsyonu	41
4.4.Çalışmada kullanılan silis dumanı.....	42
4.5. 3B tekstilin kalıplara yerleştirilmesi: (a) Kalıbın yağlanması, (b) 3B tekstil yerleştirilmesi, (c) Beton harcının dökülmesi	42
4.6. Köpük solüsyonunun hazırlanması.....	45
4.7. Basınç dayanım testi	46
4.8. Yüklene kırışte oluşa deformasyon	46
4.9. Eğilme dayanımı testi	47
5.1. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,3 olan köpük betonda 28 günlük eğilme dayanımının değişimi	49
5.2. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,2 olan köpük betonda eğilme dayanımının değişimi....	50
5.3. Kum-Bağlayıcı (K/B) oranı 0,1 olan köpük betonda eğilme dayanımının değişimi....	51
5.4. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,3 olan köpük betonda 56 günlük eğilme dayanımının değişimi	52
5.5. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,2 olan köpük betonda 56 günlük eğilme dayanımının değişimi	53
5.6. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,1 olan köpük betonda 56 günlük eğilme dayanımının değişimi	54
5.7. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,3 olan köpük betonda 28 günlük basınç dayanımının değişimi	55
5.8. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,2 olan köpük betonda 28 günlük basınç dayanımının değişimi	56
5.9. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,1 olan köpük betonda 28 günlük basınç dayanımının..	57
5.10. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,3 olan köpük betonda 56 günlük basınç dayanımının değişimi	58
5.11. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,2 olan köpük betonda 56 günlük basınç dayanımının değişimi	59

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.12. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,1 olan köpük betonda 56 günlük basınç dayanımının değişimi	60
5.13. K-B oranı 0,1, S-B oranı 0,4, SD-B oranı 0,2 olan köpük betonun dijital görüntü analizi	61
5.14. K-B oranı 0,2, S-B oranı 0,4, SD-B oranı 0,2 olan köpük betonun dijital görüntü analizi	62
5.15 K-B oranı 0,3, S-B oranı 0,4, SD-B oranı 0,2 olan köpük betonun dijital görüntü analizi	63
5.16. Mikro-CT analiz sonuçları	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.1. CEM I - 42,5 teknik özellikleri (TS EN 197-1).....	39
4.2. Ankara şebeke suyu kimyasal analiz sonuçları (ASKİ, 2021)	40
4.3. Köpük ajanı teknik özellikleri (AYDOS kimya).....	41
4.4. Deney malzeme oran ve ağırlıkları.....	44
5.1. 28 günlük eğilme dayanım deney sonuçları	52
5.2. 56 günlük eğilme dayanım deney sonuçları	55
5.3. 28 günlük basınç dayanım deney sonuçları.....	58
5.4. 56 günlük basınç dayanım deney sonuçları.....	61

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
2B	İki boyutlu
SEM	Scanning Elektron Microscope
3B	Üç boyutlu
K/B	Kum/Bağlayıcı
S/B	Su/Bağlayıcı
SD	Silis Dumanı
TRC	Tekstil ile güçlendirilmiş beton

1 GİRİŞ ve AMAÇ

Beton, günümüzde en çok kullanılan malzemelerden biri olup, iri agregalar ve suyun homojen bir şekilde karışımı sonrası sertleşip dayanım kazanan bir yapı malzemesidir. Düzgün bir şekilde tasarlanmış ve inşa edilmiş beton yapılar, çelik ve ahşap gibi diğer yapısal malzemelerden yapılmış yapılarla ekonomi, dayanıklılık ve işlevsellik açısından olumlu bir şekilde karşılaştırılır. Betonun avantajlarından biri, hemen hemen herhangi bir gerekli şekle kolayca kalıplanabilmesidir. Beton, çok çeşitli binalar, köprüler ve inşaat mühendisliği yapıları için tercih edilen inşaat malzemesidir.

Yapısal bir bakış açısından, betonarme bir yapıda, yapı üzerindeki toplam ağırlığın büyük bir kısmı beton öz-ağırlığından gelir; bu nedenle yoğunluğunun azaltılması önemli bir fayda sağlar. Bir yapı üzerindeki ölü yükü azaltmak için en etkili yaklaşımlardan biri hafif beton kullanmaktır.

Hafif Köpük Beton (LFC), inşaat mühendisliğinde çok çeşitli inşaat projelerinde kullanılabilen beton teknolojisindeki son gelişmelerden biri olarak temsil edilebilir (S.K. Lim vd., 2015). Üretim ekipmanında ve daha kaliteli yüzey aktif maddelerde (köpürme ajanları) son 20 yılda önemli gelişmeler köpük betonun daha geniş ölçekte kullanılmasını sağlamıştır. İyi mekanik özelliklere ve dayanıklılığa sahip olan yapısal hafif köpük betonun kullanılması, normal ağırlıklı betona kıyasla birçok avantaj sağlar. Bu nedenle yapısal hafif köpük beton yapısal elemanlarda daha verimli dayanım - ağırlık oranı sağlayan nispeten yeni bir yapı malzemesidir.

Günümüzde kompozit malzemeler, hafif ve yüksek dayanımları nedeniyle havacılık, otomotiv, denizcilik, inşaat, kimyasal işleme ve spor alanları gibi yapısal bileşenlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Mouritz A, vd., 1999). Son zamanlarda, 3B tekstil takviyeli kompozitler özel olarak dikkate alınmıştır. Tekstil mimarisine göre tekstil kompozitler, iki boyutlu (2B) ve / veya üç boyutlu (3B) takviyeli kompozitler olarak kabul edilebilir. 2B ile güçlendirilmiş kompozitler, lamine malzemeye alternatif olarak kullanılır. Bu tür kompozitler, dokuma, örme ve örgü dahil olmak üzere farklı işlemlerle yapılır. Kalınlıktaki iplik eksikliğinden, 2B takviyeli kompozit tabakaların birbirinden ayrılmasına karşı hassastır ve statik, dinamik ve darbe yükleri altında kalınlıkta zayıf dayanım ile karakterizedir (Chou S and Chen H-E.,1995). 3B takviyeli kompozitler, hafif olmalarının yanı sıra yüksek lif

hacim oranı nedeniyle birçok araştırmacı tarafından değerlendirilmektedir. 3B takviyeli kompozitlerde ipliklerin farklı yönlerde bulunması harici yüklere karşı yüksek bir dirençle sonuçlanır (Chiu C-H and Cheng C-C.,2003).

Beton, doğası gereği kırılğan bir yapıya ve pratik kullanımda zayıf deforme olabilirlik ve zayıf çatlama direnci gibi bazı dezavantajlara sahiptir. Lifler, hafif köpük betonun kırılğan yapısını iyileştirmek için kullanılır. Betonda kullanılan lifler iki guruba ayrılır. Bunlar, polipropilen ve polietilen gibi yüksek uzama miktarına, düşük modülüse sahip olanlar ve yüksek modülüse sahip yüksek dayanımlı liflerdir. Bu tür, büyük enerji soğurma özelliklerine sahiptir ve basınç dayanımını iyileştirmez. İkinci grup lifer, çelik, cam ve karbon gibi yüksek dayanımlı güçlü kompozitler üretir. Farklı liflerin kombinasyonu, beton özelliklerinin iyileştirilmesinde potansiyel avantajlar sağlayabilir. Düşük ve yüksek modüllü liflerin kombinasyonu, mikro düzeyde olduğu kadar makro düzeyde de çatlakları durdurabilir ve dayanımı artırabilir.

Çalışma kapsamında, önceden şekillendirilmiş köpük yöntemi kullanılarak, yarı yapısal veya yapısal amaçlara uygun, iyi yalıtım ve dayanıklılık özelliklerine sahip köpük beton karışımları tasarlanmış ve üretilmiştir. Daha sonra mekanik davranışları ve mikroyapının makro özelliklerine etkisi belirlenmiştir. Sonuç olarak, köpük betonun, 3B tekstil ve katkı maddesi (silis dumanı) dahil edilmesinden kaynaklanan mikroyapısındaki değişikliklerle ilişkili mekanik özellikleri araştırılmıştır.

Bu çalışmada ek olarak, üç boyutlu tekstil ve çimento esaslı malzemeler arasındaki etkileşimi, numunenin kesimden sonra kesilen bir yüzeyin mikroyapısal karakterizasyonu yoluyla tespit edilmiştir. Tekstil ve çimento bazlı malzemeler arasındaki ilişkinin uygulanması şart olduğundan bu durum önem taşımaktadır. Ayrıca, bu çalışma, çimento esaslı malzemeler ile 3B tekstil kullanımı ile ilgili çeşitli alanlara katkıda bulunacak olan çimento esaslı malzemelerin mikroyapısal özelliklerini anlamamıza yardımcı olabilir. Mikroyapısal özellikler, mikro-CT mikroanalizi ile belirlenmeye çalışılmıştır.

Betonun üç boyutlu tekstil ile olan etkileşiminin anlaşılması, ince kesitlerinin incelenmesinden geçmekte olup bu kesitlerin mikro-CT analizi yapılmıştır. Çalışma kapsamında hacimce % 74 köpük solüsyonu, % 26 harç kullanılarak 3 farklı oranda silis dumanı ile üç boyutlu tekstil katkılı ve katkısız olmak üzere 4 adet deney gurubu hazırlanmıştır. Deney numuneleri, 0,3; 0,2 ve 0,1 oranlarındaki kum/bağlayıcı (K/B) oranı

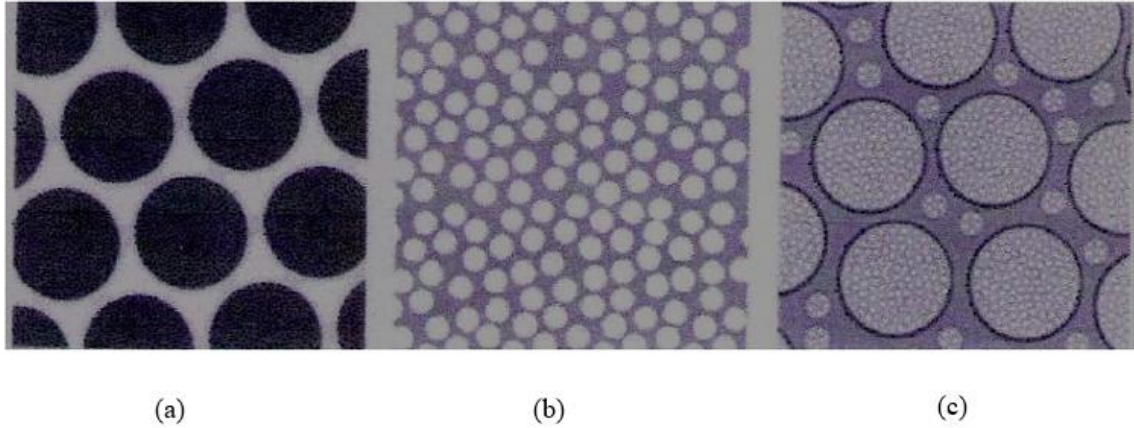
esas alınarak, her K/B oranı için 0,50; 0,45; 0,40 su/bağlayıcı (S/B) oranlarıyla, %0,10; 0,15; 0,20 silis dumanı ikamesi ile hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler, 28 ve 56 gün küre maruz bırakılmış, sonrasında basınç ve eğilme dayanım testleri uygulanmış, kendi aralarındaki dayanım ve fiziksel farklılıklar incelenmiştir. Daha sonra dijital görüntü analizi yapılarak birbirleriyle ve normal beton ile karşılaştırması yapıp olası farklılıklar yorumlanmaya çalışılmıştır. Çalışmanın amacı; 3B tekstil kullanımının köpük beton karışımlarındaki etkisinin farklı değişkenlere bağlı olarak incelenmesine dayanmaktadır. Bu değişkenler, kum/bağlayıcı, su/bağlayıcı ve silis dumanı ikamesi ve hazırlanan numunelerin küre maruz bırakılma süreleridir.



2 KÖPÜK BETONA GENEL BAKIŞ

Beton, günümüzde çeşitli uygulamalarda dünya çapında en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Beton yapımında beton ağırlığının azaltılmasında önemli avantajların olduğu aşikardır. Çok katlı bir binada toplam yükü azaltmak için en başarılı yaklaşımlardan biri, hafif yapı malzemeleri kullanarak ağırlığını azaltmaktır.

Hafif beton, 16 MPa'dan yüksek basınç dayanımına ve iyi bir ısı yalıtımına sahip hafif bir yapı malzemesidir. Böylelikle sadece yapıdan gelen toplam yükün azaltılmasında değil, aynı zamanda enerji tasarrufu avantajlarının elde edilmesinde ve ısıtma / iklimlendirme maliyetlerinin azaltılmasında da faydalıdır. Şekil 2.1'de şematik olarak gösterildiği gibi üç tip hafif beton vardır:



Şekil 2.1. Temel Form Hafif Beton (Newman & Ban, 2003), (a) ince agrega içermeyen, (b) gaz beton, (c) hafif agrega içeren

2.1 İnce Agrega İçermeyen

Gözenekli bir yapı malzemesi üretmek için birleştirilen çimento, su ve tek boyutlu iri agrega karışımıdır. İri agrega tercihen tek boyutlu bir malzeme olmalıdır (nominal en büyük boyutlar 10 mm ve 20 mm en yaygın olanlardır).

Bununla birlikte, farklı dane büyüklüğüne sahip agrega karışımlarının (10 ve 7 mm; ve 20 ve 14 mm) tatmin edici bir performans gösterdiği bulunmuştur.

Bu beton türü, geleneksel beton kaplamalarla ilişkili çevresel sorunları azaltan suyun malzemeye nüfuz etmesine izin verme özelliğine sahiptir. En yaygın uygulaması, düşük trafik hacimli alanlardır (otoparklar, mesken yolları, oto yolları ve kaldırımlar).

2.2 Gaz Beton

Gaz beton, iri agregaya içermeyen, hava ilaveli bir harç olarak kabul edilebilir. Tipik olarak, gaz beton, havanın bir çimento bulamacı ile ince kuma katılmasıyla yapılır. Ticari uygulamada, kumun yerini yakıt külü veya diğer silisli malzeme alır ve çimento yerine kireç kullanılabilir.

2.3 Hafif Agregalı İçeren

Bu hafif betonda sıradan beton yerine düşük özgül ağırlık (ortalama 1600) kullanılır. Hafif agregası, süngertaşı, tüm volkanik kökenli olanlar gibi doğal agregası ve genişletilmiş yüksek fırın cürufu ve klinker agregası gibi yapay agregası olabilir.

Hafif agregalı beton, uygulamasına göre iki türe ayrılabilir. Biri kısmen sıkıştırılmış hafif agregalı beton, diğeri ise yapısal hafif agregalı betondur. Kısmen sıkıştırılmış hafif agregalı beton, esas olarak iki amaç için kullanılır; bunlar, prekast beton bloklar veya paneller ve yerinde dökülen çatılar ve duvarlar içindir. Bu tip betonun temel şartı, en iyi ısı yalıtımını elde etmek için yeterli dayanıma ve düşük yoğunluğa ve çatlamayı önlemek için düşük kuruma büzülmesine sahip olmasıdır. Yapısal olarak hafif agregalı beton, yoğun agregalı normal betonarme betona benzer şekilde tamamen sıkıştırılır. Çelik ile beton arasında iyi bir bağ oluşturacak şekilde çelik donatı ile kullanılabilir (Mohd ve Samidi, 1997).

2.4 Köpük Beton Malzemeleri

- Köpük Ajanı

Köpük ajanları aynı zamanda hava sürükleyici ajan olarak da tanımlanmaktadır. Hava sürükleyici maddeler organik malzemelerdir. Karışım suyuna köpürtücü ajanlar

eklendiğinde, çimento hamuru ile birleşen ayrı kabarcıklar boşlukları oluşturacaktır. Köpük betonun özellikleri, köpüğün kalitesine kritik derecede bağlıdır. İki tür köpürtücü ajan vardır:

- i. Sentetik - $1000 \text{ kg} / \text{m}^3$ ve üzeri yoğunluklar için uygundur.
- ii. $400 \text{ kg} / \text{m}^3$ ila $1600 \text{ kg} / \text{m}^3$ yoğunluklar için uygundur.

Protein bazlı köpüklerin ağırlığı yaklaşık 80 g 'dır. Protein bazlı köpürtücü ajanlar boynuz, kan, inek kemiklerinden, domuzlardan ve diğer hayvan leşlerinden elde edilen hayvansal proteinlerden gelir. Bu, farklı partilerde kullanılan farklı hammaddeler nedeniyle sadece ara sıra kalite değişikliklerine değil, aynı zamanda bu tür köpük yapıcı maddelerin çok yoğun bir kokusuna da yol açar.

Sentetik köpüklerin ağırlığı yaklaşık 40 g 'dır. Sentetik köpürtücü ajanlar tamamen kimyasal ürünlerdir. $1000 \text{ kg} / \text{m}^3$ üzerindeki beton yoğunluklarında çok kararlıdır ve iyi bir dayanım sağlarlar. Sızdırmaz koşullarda raf ömürleri yaklaşık 1 yıldır. Sentetik köpük, proteine kıyasla daha ince kabarcık boyutlarına sahiptir, ancak genellikle özellikle $1.000 \text{ kg} / \text{m}^3$ 'ün altındaki yoğunluklarda daha düşük dayanımlı köpük beton verirler (Brady & Jones, 2001).

- Çimento

Portland çimentosu genellikle köpük beton için ana bağlayıcı olarak kullanılır. Portland çimentosu, su ile uygun oranlarda karıştırıldığında su altında (havada olduğu gibi) sertleşecek bir hidrolik çimentodur. Portland çimentosunun temel bileşeni şunlardan oluşur:

- i. Kireçtaşı, deniz kabukları ve tebeşir gibi kireç açısından zengin malzemeler,
- ii. Kil, şist, uçucu kül veya kum;
- iii. Demir veya demir içeren bileşeni sağlamak için demir cevheri veya benzeri malzeme.

- Su

Su, köpük beton için önemli malzemelerden biridir. Suyun taşınabilirlik kriteri mutlak değildir ve pH oranı 6-8 aralığında olan su kullanıma uygundur. Hafif asidik olan doğal su zararsızdır ancak diğer organik asitler içeren su betonun sertleşmesini olumsuz

etkileyebilir. Karışım suyunda yosun bulunması, hava sürüklenmesine ve sonuçta güç kaybına neden olacaktır. Suyun sertliği, hava sürükleyici katkıların verimini etkilemez. Deniz suyunun karışım suyu olarak kullanılması düşünülmelidir. Deniz suyu tipik olarak yaklaşık % 3,5 'luk toplam tuzluluğa sahiptir. Betonun uzun süreli dayanımının düşmesine neden olabilir. Deniz suyu ayrıca çok miktarda klorür içerir ve donatı betonunda korozyona neden olabilir. Dolayısıyla, karışım suyu berrak ve görünüşte temiz olacaktır (Neville & Brooks, 2001).

- İnce Agrega

Genel olarak ince agrega, doğal kum, işlenmiş kum veya bunların kombinasyonundan oluşacaktır. Islanmaya, uzun süre nemli atmosfere maruz kalan veya nemli zemin ile temasa maruz kalan beton için ince agrega, harç betonunun aşırı genişlemesine neden olacak şekilde çimento içinde zararlı bir şekilde reaktif olan herhangi bir malzeme içermeyecektir.

Sach & Seifert (1999), köpük beton için sadece 4 mm'ye kadar partikül boyutlarına ve eşit boyut dağılımına sahip uygun ince kumların kullanılmasını önermektedir. Bunun başlıca nedeni, daha iri agreganın hafif bir karışıma çökmesi ve karıştırma sırasında köpüğün çökmesine yol açabilmesidir. Pratik nedenlerden ötürü, çoğu kum sadece yaklaşık 1200 kg / m³'ü aşan kuru yoğunluğa sahip köpük beton üretmek için kullanılabilir.

Bununla birlikte, uçucu kül, kuru yoğunluğu yaklaşık 1400 kg / m³'ün altında olan köpük beton üretmek için kumun kısmen veya tamamen ikamesi olarak kullanılabilir. Uçucu külün iki genel sınıfı vardır:

- Düşük kalsiyum uçucu kül ve
- Yüksek kalsiyum uçucu kül.

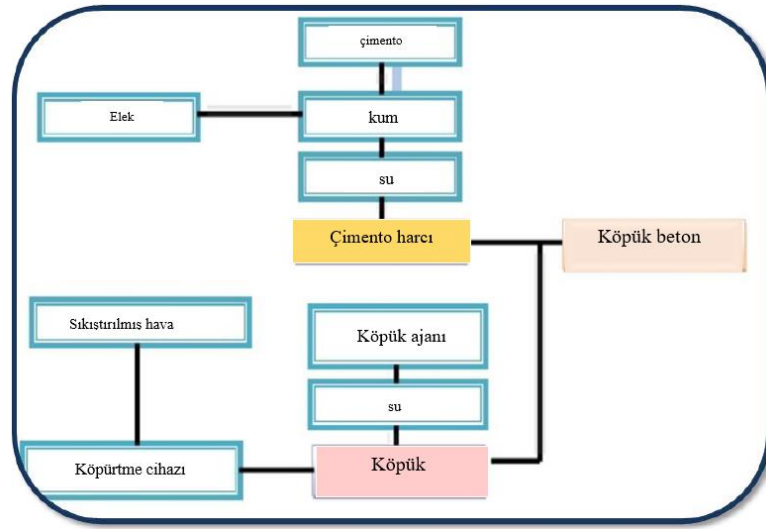
Düşük kalsiyum uçucu kül, antrasit veya bitümlü kömür yakılarak üretilir. Alüminyum ve demir ile modifiye edilmiş silikat camdan oluşan bir malzeme olan normal bir puzolan olarak kategorize edilir. CaO içeriği % 10'dan azdır. Yüksek kalsiyum uçucu kül, linyit veya alt bitümlü kömürün yakılmasıyla üretilirken, CaO % 20'den büyük olduğunda çimentolu malzeme olarak veya CaO'nun % 10 ila % 20 arasında değiştiğinde çimentolu ve puzolanik malzeme olarak sınıflandırılabilir. Bu nedenle uçucu kül, endüstriyel

yan ürünlerden biridir ve kullanımı ekonomi ve çevre üzerinde büyük önem taşımaktadır (Papadakis, 2000).

2.5 Köpük Beton İmalatı

Köpük beton, bir köpürme ajanı çözeltisinin havalandırılmasıyla hazırlanan köpüğün çimento hamuruna veya çimento harcına ilave edilmesiyle üretilen hafif, serbest akışlı bir malzemedir. Şekil 2.2 köpük betonun üretim sürecini göstermektedir. Köpük beton üretiminin 3 temel yöntemi şunlardır:

1. Pre-foam yöntem
2. Inline ıslak yöntem
3. Inline kuru yöntem.



Şekil 2.2. Köpük beton üretim süreci

Pre-Foam (Ön Köpük) Yöntem

Pre-Foam yöntem, yarım veya daha az miktarda temel malzemesinin bir hazır karışım vagonu içinde şantiyeye teslim edilmesini, sonrasında hızlı dönüş halindeyken doğrudan hazır karışım vagonunun arkasına enjekte edilmesini içerir. Köpüğün enjeksiyonu, yoğunluğu düşürürken malzemeyi tam yüke kadar yükler (Aldridge, 2005).

Kullanılan çeşitli köpürtücü ajanlar; deterjanlar, reçine sabunu, tutkal reçineleri, saponin ve hidrolize proteinlerdir. Normal olarak, hidrolize protein esaslı köpürtücü ajan, önceden köpüklenmiş betonun üretiminde kullanılmıştır. Jeneratörün içinde, ajan, suyla seyreltilerek bir ön köpükleme çözeltisi elde edilir ve bu daha sonra köpükleme borusu boyunca yüksek basınçta zorlanır. Bu, ön köpürtme çözeltisinin hacminin yaklaşık 20 ila 25 katı olan bir homojen ve kararlı köpük üretir. Çimento hamurunun harmanlanması sırasında, bir reaksiyonu meydana gelecektir. Bu yöntemin üç ana dezavantajı şunlardır:

- Üretilen hacim, kamyonun boyutuna bağlıdır.
- Köpük betonun kalitesi, betonun karıştırma etkisine bağlıdır.
- Malzeme yönetmelik dışı ise, tamamı reddedilir.

Çalışmalar göstermiştir ki, bazı kamyonların diğerlerinden daha iyi karıştığı ve bu durumun hem yoğunluğu hem de köpük malzemenin verimi ile büyük tutarsızlıklara yol açabileceği bilinmektedir. Bununla birlikte, modern bir kamyon mikser filosu ve doğru şekilde belirlenmiş köpük beton ile birlikte iyi güvenilir köpük üreteçleri kullanılırsa, sonuçlar yeterli olabilir (Aldridge, 2005).

Inline ıslak yöntem

Bu yöntem hem daha yüksek ürün kalite kontrolü ihtiyacı hem de daha düşük yoğunluklu malzeme için ticari bir gereklilik nedeniyle ana kısımda yönlendirilmiştir. Bu sistemler, ön köpük yönteminde kullanılanla aynı tipte köpük oluşturun ve köpürtücü kimyasalları içerir, ancak ıslak baz malzemelerini yerleşik bir huniye hariç tutması ve köpüğü tamamen ayrı bir işlemle eklemesi bakımından farklılık gösterir.

Bu yöntemde kullanılan temel malzemeler genellikle ön köpük yönteminde kullanılanlardan daha ıslaktır ancak aynı malzemelerden oluşur. Bu sistemler, temel malzemeyi ve köpüğü (yalnızca kuru tip) iki bileşenin birbirine karıştırıldığı bir dizi statik hat içi karıştırıcıdan besleyerek çalışır. Bu karıştırıcılar, köpük ve esaslı malzemeleri birlikte tamamen homojenleştirilmiş bir karışım halinde harmanlama etkisine sahiptir ve sürekli

olarak yerleşik yoğunluk monitörü aracılığıyla sürekli bir kontrol prosedürü ile birlikte tamamen tekrarlanabilir bir karıştırma işlemi sağlar.

Inline ıslak yönteminin bir diğer avantajı da, üretim yöntemi nedeniyle çıktı hacminin hazır karışım vagonunun boyutuna göre belirlenmemesidir (Aldridge, 2005).

Inline kuru yöntem

Kuru yöntemdeki kullanılan sistemler nispeten yeni bir gelişmedir ve sürümleri Birleşik Krallık'ta kademeli olarak kabul edilmesine rağmen, esas olarak Avrupa'da işletilmektedir. Kuru hat içi yöntemine benzer bir prensipte çalışırlar, ancak hazır karışım tedarikçisinden ıslak malzemeleri kabul etmek yerine, yerleşik silolara ve agrega silolarına yüklenen kuru malzemeleri vardır.

Bu malzemeler daha sonra ihtiyaç duyulduğunda yerleşik karıştırıcılar aracılığıyla sahada harmanlanabilir, tartılabilir ve karıştırılabilir. Baz karışımı hazırlandıktan sonra, köpüğün kuru yöntemine benzer bir şekilde eklendiği bir karıştırma odasına pompalanır. Büyük bir dezavantaj, şantiyede büyük miktarlarda suya ihtiyaç duymalarıdır (çimento ve agregayı birbirine karıştırmak için), sıkışık şehir merkezi veya uygun oranlarda tedarik edilemeyen projeler için uygun olmamalarıdır.

2.6 Köpük Betonun Kürü

Tüm malzemelerde olduğu gibi, betonun performansı mikro yapısı tarafından belirlenir. Mikro yapısı, bileşimi, kürlenme koşulları (su, membran, hava) ve ayrıca betonu işlemek için kullanılan karıştırma yöntemi ve karıştırıcı koşulları ile belirlenir. Kürleme, köprüler, istinat duvarları, pompa binası, büyük plakalar ve yapısal temel gibi yapıların yapımında kullanılır. Kürlenme, yerleştirme ve bitirme işleminden sonra başlar, böylece beton istenen dayanımı ve sertliği geliştirebilir. Kaliteli beton elde etmek için, tatmin edici bir sıcaklık rejimini korurken betondan nem kaybını önleme süreci çok önemlidir (Narayanan & Ramamurthy, 2000). Betonun yapısal kullanımında kürlenmenin amacı, betonu aşağıdakilere karşı korumaktır:

1. Radyasyon ve rüzgar etkisine
2. Nem etkisine
3. Düşük sıcaklık ve don etkileri
4. Aşınma etkisi

2.7 Köpük Betonun Özellikleri

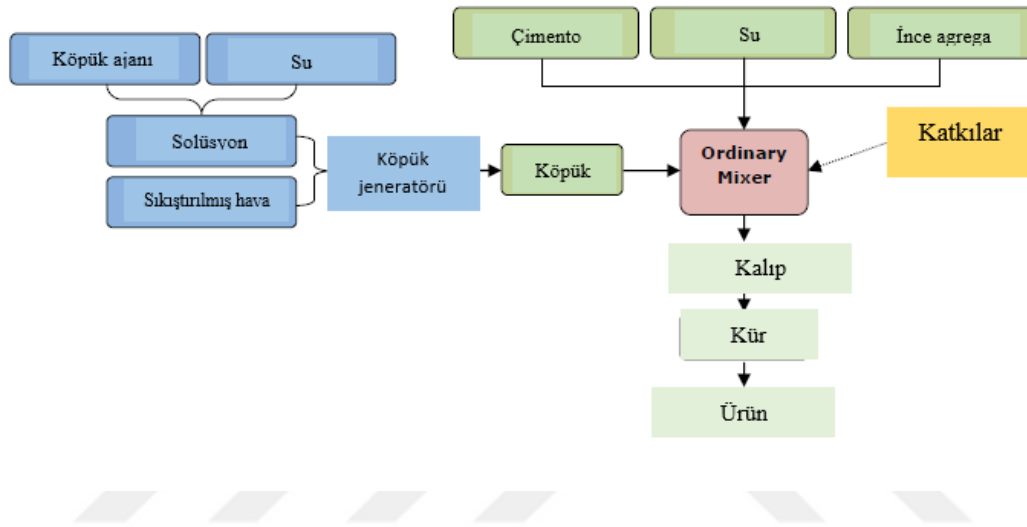
Pan vd. (2007), köpük beton hazırlama ve teknolojisi ile ilgili araştırma faaliyetlerinin J. A. Eriksson'a köpük beton patentinin verildiği 1923 yılına dayandığını belirtmiştir. Köpük beton, kabaca 0.1-1.0 mm boyutundaki sürüklenmiş hava boşluklarının oluşturduğu homojen gözenek yapısına sahip Portland çimento hamuru veya çimento dolgu matrisinden (harç) oluşan çok yönlü bir malzemedir (Nambiar ve Ramamurthy, 2007a), (Ramamurthy vd., 2009) , (Othuman ve Wang, 2011), (Jitchaiyaphum vd., 2011).

Üretim yöntemine göre köpük beton iki gruba ayrılabilir: fiziksel olarak köpük beton (köpürtücü maddeler kullanılarak) ve kimyasal olarak havalandırılmış beton (alüminyum tozu ilave edilerek) (Just ve Middendorf, 2009). Ancak Esmaily ve Nuranian (2012), gözenek oluşturma yöntemine dayalı köpük betonun üç grupta sınıflandırılabileceğini göstermiştir: hava sürüklenme yöntemi (kimyasal reaksiyon), köpük yöntem (önceden oluşturulmuş köpük yöntemi) ve kombine yöntem (havanın verilmesi ve gazla stabilize edilmesi).

Buna ek olarak, Nambiar ve Ramamurthy (2007a), köpük betonun içine gözeneklerin eklenmesinin, önceden oluşturulmuş köpürme (karışıma eklenmeden önce önceden oluşturulmuş köpük) veya karıştırılmış köpürme (köpük yapıcı maddenin matrisle karıştırılması) yoluyla mekanik olarak sağlanabileceğini bildirmiştir. Bu projede incelenen köpük betonun önceden şekillendirilmiş köpükleme yöntemi kullanılarak üretildiği unutulmamalıdır, bkz. Şekil 2-3. Ayrıca köpük beton, ortam sıcaklığında veya biraz yüksek sıcaklıkta veya 100 °C 'den yüksek basınçlı buhar ortamında kürlenebilir (Esmaily ve Nuranian, 2012).

Hava kabarcıklarının varlığından dolayı köpük beton çeşitli faydalara sahip olabilir ve inşaat projelerinde ısı, ses yalıtımı ve boşluk dolgu malzemesi olarak yaygın olarak kullanılabilir (Pan ve diğerleri, 2007). Daha yüksek dayanımın gerekli olduğu yerlerde,

köpük beton, köprü ayakları, yol alt temelleri, zemin ve çatı şapı gibi yarı yapısal uygulamalarda da kullanılabilir (Jones ve McCarthy, 2006). Ayrıca, havalimanı apronlarındaki araç durdurucuları, balistik menzil hedefleri ve karayolu çarpma bariyerleri gibi bazı uygulamalar köpük betonun enerjiyi emme kabiliyetinden yararlanır (Tikalsky vd., 2004).



Şekil 2.3. Önceden şekillendirilmiş köpürtme işlemi yoluyla köpük beton üretiminin akış şeması

2.8 Karışım Tasarımı ve Karıştırma Prosedürü

Genel olarak, betonun özellikleri, hammaddelerinin oranlarına bağlıdır. ACI 523.3R-93 (1993), köpük betonun karışım oranlamasının ıslak yoğunluğu, çimento içeriği ve su/bağlayıcı oranının seçimi ile başladığını ve daha sonra karışımın mutlak hacimler yöntemi ile tasarlandığını belirtmiştir.

Köpük beton üretimi için, birkaç araştırmacı tarafından benimsenen karıştırma prosedürü şu şekildedir: Hammadde miktarı belirlendikten sonra, kuru bileşenler sıradan bir karıştırıcıda birkaç dakika karıştırılacaktır. Ardından kademeli olarak karıştırma suyu ilave edilecektir. İyice karıştırdıktan sonra, önceden oluşturulmuş köpük ıslak bulamaca eklenecektir. Köpüğün harç ile tamamen karıştırılması gerekmesine rağmen yoğunluk ve kıvamda değişiklik olasılığı nedeniyle aşırı karışımdan kaçınılmalıdır. Ruiwen (2004) köpük

betonun bileşen malzemelerinin aşağıdaki gibi üç farklı sıra ile bir mikserle eklenebileceğini belirtmiştir:

- I. Kuru malzemeler ve köpük içinde çözölmüş katkılarla su (Valore, 1954)
- II. Kuru malzemeler ve köpük içinde çözölmüş katkı maddeli su (Amerikan Beton Enstitüsü, 1993).
- III. Kısmi su, kısmi kuru malzemeler, kısmi su, kısmi kuru malzemeler ve köpük (E-A-B Associates Bayley-Edge Limited).

2.9 Köpük Betonun Hazırlanması

Kalıplama açısından ASTM C 495-99a (1999), dolgu işlemi sırasında betonun yaklaşık iki eşit katmana yerleştirilmesi ve katman yüzeyi düzleme oturana kadar kalıbın kenarlarına kauçuk çekiçe hafifçe vurulması gerektiğini belirtmiştir. . Daha sonra üst yüzey bitirilerek plastik bir torba ile kapatılmalıdır.

Ancak istenirse kapaksız test açısından uygun bir yüzey elde etmek için bir cam veya metal plaka kullanılmalıdır. Kalıptan çıkarma söz konusu olduğunda ve tüm beton türlerinde olduğu gibi, köpük beton numuneler, hasar tehlikesi varsa kalıplardan çıkarılmamalıdır. Bununla birlikte, her durumda, numunelerin kalıplanmasından sonraki 7 gün içinde kalıplardan çıkarılması ASTM C 495-99a (1999) tarafından tavsiye edilmektedir.

Kürleme ile ilgili olarak, numune suyunun kaybını önlemek için benimsenen birkaç yol vardır. Hem ASTM C796 (1997) hem de ASTM C495 (1999) 'a göre, kalıplamadan sonraki ilk 24 saat boyunca numuneler $21.1 \pm 5.5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta muhafaza edilmelidir. Daha sonra nemli kum ve ıslak çuval bezi veya daha düşük sıcaklıkta benzeri malzemeler altında 7 gün kürlenmelidir. Daha sonra $21.1 \pm 5.5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ve 50 ± 30 bağıl nemde 18 gün saklanmalıdır.

Hem Han (2006) hem de Babu (2008) köpük beton örneklerini sertleştirmek için test gününe kadar $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta bir kür odasında nemli kürleme yöntemini benimsemiştir. Bununla birlikte, Ruiwen (2004) numuneleri nemli koşullarda 7 gün boyunca ve havada $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta çekme dayanımını uygulamak için iyileştirmiştir.

Jones ve McCarthy (2005) tarafından açıklanan yapısal bir malzeme olarak köpük beton potansiyeline ilişkin ön görüşlerde, numuneler sızdırmaz olacak şekilde sertleştirilmiştir (streç filme sarıldı ve teste kadar 20 °C 'de saklandı). Ayrıca, sızdırmaz kürlemenin köpük beton için tipik endüstri uygulamasını yansıttığını da eklemişlerdir. ASTM C330 (2003) yapısal hafif beton numunelerinin kürlenmesi için sertleşmemiş numunenin emici olmayan veya reaktif olmayan bir plaka ile örtülmesi gerektiğini ve daha sonra $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de nemli bir odada (% 95'ten az olmamak koşulu ile) bekletmişlerdir.

2.10 Köpük Betonun Özellikleri

- Taze Özellikler

Köpük beton, normal ağırlıklı betondan farklı olarak, tasarım yoğunluğunu etkileyeceği için sıkıştırılmamalı veya titreştirilmemelidir; bununla birlikte, ASTM C495-99a (1999) ve C796-97 (1997) standartları, karışım yerleştirildikten sonra kalıpların kenarlarına lastik bir çekiçe hafifçe vurulması gerektiğini belirtmiştir. Bu nedenle, akışkanlık ve kendiliğinden sıkışabilirlik, köpük betonun önemli taze durum özelliklerini temsil eder ve karışımın kıvamı ve stabilitesi açısından değerlendirilir. Köpük betonun kıvamı ve stabilitesi, baz (köpüksüz) karışımdaki su içeriğinden ve köpük miktarından etkilenir (Ramamurthy vd., 2009).

Köpük betonun stabilitesi, köpürmemiş karışımın kıvamı ile ilgilidir ve su-katı oranı cinsinden ifade edilebilir. Köpük betonun kıvamı, yayılabilirliği ve akışkanlık ölçümü ile tanımlanır. Eklenen köpük hacmine bağlı olarak veya dolgu tipine göre belirli bir yoğunlukta köpürmemiş karışıma köpük eklenerek azaltılır (Nambiar ve Ramamurthy, 2008). Bundan önce, Nambiar ve Ramamurthy (2006), ayrıca belirli bir karışım için: köpük eklendiğinde akış azalır ve bu nedenle tasarım yoğunluğunda bir azalma ile (köpük hacminde artış) hızla azalır. Bunun olası bir nedeninin, karışımdaki kabarcıklar ve katı parçacıklar arasındaki yapışmanın hamurun stabilitesini artırması ve daha düşük yoğunluklarda daha fazla kabarcık olduğuna dikkat çekerek daha az yayılabilirliğe yol açması olabileceğini eklemişlerdir.

Nambiar ve Ramamurthy (2006) 'ye göre standart bir akış konisi kullanılarak karışımın köpük ilave edilmeden önceki kıvamı ve köpük ilave edildikten sonraki akış

özellikleri, akış %' si ölçülerek belirlenebilir (ASTM C230). Farklı dolgu tipi karışımlar için su-katı oranları ile yoğunluk oranı 1000 ila 1500 kg / m³ arasında değişir.

Daha düşük w - s oranlarında, daha düşük tutarlılıkta, yoğunluk oranı birim başına daha yüksektir. Bunun nedeni, karışımın karıştırılamayacak kadar sert olması ve karıştırma sırasında kabarcıkların kırılması nedeniyle artan yoğunluğa neden olmasıdır. Diğer yandan, daha yüksek su-katı oranlarında yoğunluk oranında bir artış da vardır çünkü daha yüksek su içerikleri, bulamacın kabarcıkları tutamayacak kadar ince hale getirilerek karışımdan köpük ayrılmasına neden olabilir ve böylece ölçülen yoğunlukta bir artışa neden olabilir.

Nambiar ve Ramamurthy (2008), uygun bir işlenebilirlik elde etmek için süperakışkanlaştırıcıların kullanılmasına rağmen, köpük stabilitesini azaltabileceklerini belirtmişlerdir. Alternatif olarak, 1997'de Marsh konisi, bir hamurun bir koniden akması için gereken süreyi ölçerek akışkanlığı belirlemek için küçük bir açıklıkla Marata ve Suzuki tarafından kullanılmıştır.

Daha sonra kum parçacıklarını hesaba katmak ve köpük beton kıvamını akış süresine göre sınıflandırmak amacı ile bu test Jones vd. (2003) tarafından orifis çapını 8 mm yerine 12,5 mm ve akıntı hacmini 200 ml yerine 1 litre yaparak geliştirilmiştir. Ek olarak, Brewer yayılma testi ve BS 4551-1'e göre çökme akış testi Jones ve diğerleri tarafından kullanılmıştır.

Yukarıdaki tartışmadan, köpük betonun stabilite ve kıvam gibi taze özelliklerinin köpük hacmi ve su-katı oranından etkilendiği açıktır. Köpük betonun stabilitesi değerlendirilerek, 1'e yakın bir yoğunluk oranı elde etmek için su gereksinimi, denemelerle belirlenir. Ayrıca, yayılabilirlik ve akışkanlık, sırasıyla standart bir akış konisi (ASTM C230-1998) ve modifiye edilmiş Marsh koni testi (Nambiar ve Ramamurthy, 2006) kullanılarak ölçülebilir.

- Sertleşmiş Özellikler

Birim ağırlık

Köpük beton, köpük ajanı kullanılarak çimento hamuruna nispeten büyük hacimde hava katılarak üretilir. Yüksek hacimli hava içeriği, daha düşük yoğunluklara ve daha yüksek gözenekliliğe neden olmaktadır.

Yoğunluk taze veya sertleştirilmiş durumda olabilir. Karışım tasarımı ve döküm kontrolü amaçları için taze birim ağırlık gereklidir. Köpüğün boşaltılmasından sonra devam eden genişlemesi, karıştırma sırasında köpük kaybı dahil olmak üzere bir dizi faktörün neden olduğu sonuçlarda dağılma olabileceğinden, taze yoğunluğu bulmak için teorik bir denklem uygulanamayabilir. Köpük betonun birçok fiziksel özelliği, sertleşmiş haldeki yoğunluğuna bağlıdır. Yoğunluğu belirtirken, farklı kaynaklardan gelen köpük betonun özelliklerinin karşılaştırılmasının, kuruluk derecesinin yakın bir tanımı olmaksızın çok az anlamı olabileceğinden, nem koşulunun belirtilmesi gerekir.

Pretoria Üniversitesi'nden Kearsley & Mostert (2005), köpük beton karışımı için bir karışım tasarımı ortaya çıkmıştır. Buna göre döküm yoğunluğunun karışım tasarımının uygun olduğunu açıkça göstermesi hedeflenen ve gerçek ile ölçülen yoğunluklar arasındaki farkın % 5 olduğu içerik oluşturulmalıdır.

Bunun yanı sıra, Dundee Üniversitesi'nden Jones & McCarthy (2005), köpük beton, beton plastiğine bağlı olarak toplam karışım suyunun 50 ila 200 kg / m³'ünü desorbe edeceğinden, belirli bir kuru yoğunluk için tasarım yapmanın zor olduğunu göstermektedir.

McCormick (2005), ince agrega türlerinin, agrega gradasyonunun, köpük tipi ve kum-çimento oranının köpük betonun ıslak yoğunluğu üzerindeki etkisini araştırmış ve tasarım yoğunluklarının yaklaşık% 5'i kadar ıslak yoğunlukların katı kullanılarak elde edilebileceğini bildirmiştir.

Kıvam

Köpük beton, serbest akan, kendiliğinden yayılan bir malzemedir. Bu nedenle, ne normal ağırlıklı beton için çökme testi ne de yüksek çökmeli beton için akış testi uygulanabilir. Sonuç olarak, köpük betonun işlenebilirliği yayılma yeteneği testi kullanılarak ölçülebilir. Görsel olarak değerlendirilir: Çoğu durumda, işlenebilirliğin kabul edilemez derecede düşük olduğu zamanı tespit etmek zor olmaz.

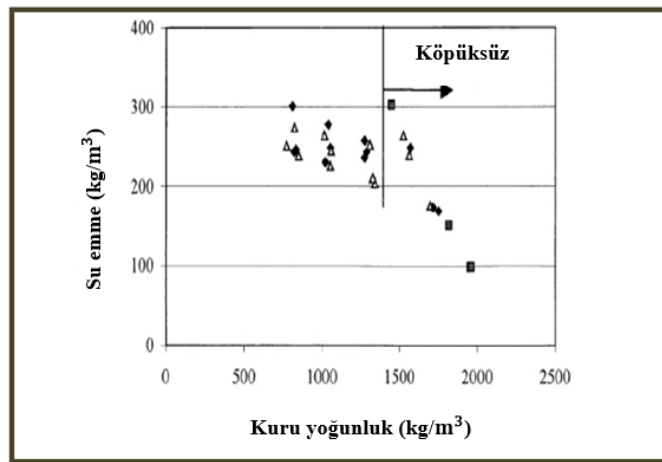
Sürfaktan (solunum yollarındaki yüzey geçirimsizliğini düzenleyen bir lipid-protein kompleksi) türünün köpük betonun özelliklerine etkisi Dundee Üniversitesi'nde araştırılmıştır. Çeşitli beton türlerinin 'yayılabilirliği' makul derecede benzerdir, ancak başka türlü özdeş karışımlar için, protein bazlı bir yüzey aktif maddeden oluşturulan beton daha kısa bir akış süresine sahiptir, bu da çok daha düşük bir plastik viskozitenin göstergesidir.

Bununla birlikte, protein bazlı yüzey aktif maddelerden oluşturulmuş beton karışımları, muhtemelen yüzey aktif maddenin süperplastikleştirici ile uyumsuzluğundan dolayı ayrışmaya eğilimlidir.

Su absorpsiyonu

Kearsley & Wainwright (2001), hamurun ve köpük beton karışımlarının su emiliminin (kuru kütlenin yüzdesi olarak kütlenin artmasıyla ifade edildiği gibi), Şekil 2.4'te gösterildiği gibi kuru yoğunluğun bir fonksiyonu olarak çizildiğini araştırmaktadır. Bu sonuçlardan, düşük yoğunluklu karışımların yüksek yoğunluklara göre daha fazla su emdiği sonucuna varılabilir. Bununla birlikte, su absorpsiyonu, kuru kütle birimi başına kütledeki artış olarak ifade edilebilir.

Belirlenen köpük beton karışımları için, yoğunluklar arasında (1000 ila 1500 kg /m³) önemli farklılıklar vardır ve Şekil 2.4'te gösterildiği gibi birim hacim başına kütledeki artış olarak su emilimini ifade eder. Düşük yoğunluklu köpük beton karışımlarının, yüksek yoğunluklulardan yalnızca çok az miktarda daha fazla su emdiği artık açıktır. Kül içermeyen çimento hamuru karışımının (S / Ç = 0.6) köpük beton karışımlarının herhangi birinden daha fazla su emdiği de açıktır. Tüm karışımlar için azalan yoğunluk ile artan bir absorpsiyon eğilimi olduğu da görülebilir, ancak artan absorpsiyon, köpük beton karışımlarına kıyasla hamur (köpüksüz) karışımlarında çok daha önemlidir.



Şekil 2.4. Kuru Yoğunluğun Su Absorpsiyon Üzerindeki Etkisi (Kearsley & Wainwright, 2001)

Kuru Büzülme

Beton büzülmesi, betonun büzülme mekanizmaları, plastik büzülme, kendiliğinden büzülme (kendi kendine kuruma olarak bilinen bir işlem), kuruma büzülmesi ve karbonatlaşma büzülmesinden oluşur. Otojen büzülme, susuz çimento partikülleri tarafından kılcal gözeneklerden suyun çekilmesinin bir sonucudur. Otojen büzülmenin çoğu, çimentonun hidrasyonunun erken yaşlarında gerçekleşmektedir.

Bununla birlikte, çok düşük S - Ç oranına sahip beton karışımları için, nem varsa bu prosedür daha uzun sürebilir. Plastik rötre ve kuruma büzülmesi, betonun içi ile hava arasındaki nem gradyanı koşulu altında betondan suyun çekilmesinden kaynaklanır. Bunlar erken yaşta betonun çatlamasına katkıda bulunan iki ana faktördür.

Köpük beton, agrega olmamasından yüksek kuruma büzülmesine sahiptir, normal ağırlıklı betonda gözlenenenden 10 kat daha fazladır. Köpük beton için daha yüksek değerler, (nispeten) yüksek çimento içeriğine, yüksek su içeriğine ve karışımda iri agrega bulunmamasına bağlanabilir. Kuruma büzülme miktarı, köpük içeriği arttıkça (yani betonun yoğunluğu azaldıkça) ve artan sıcaklıkla artma eğilimindedir. McGovern'a (2000) göre, büzülme genellikle dökümden sonraki 20 gün içinde gerçekleşir.

2.11 Mekanik Özellikleri

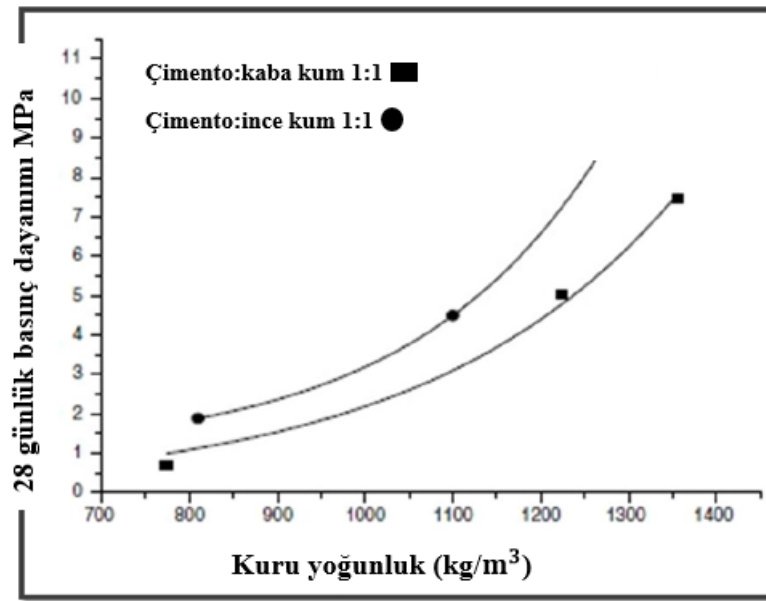
2.11.1 Basınç Dayanımı

Betonun dayanımı, sertleşen çimento hamurunun dayanımından kaynaklanır, bu da hidrasyon ürünlerinden kaynaklanır. Köpük betonun basınç dayanımı, yoğunluk, yaş, kütleme yöntemi, bileşen ve karışım oranı gibi birçok faktörden etkilenir.

Kunhanandan Nambiar & Ramamurthy'ye (2006) göre, aşağıdaki karışımlar, temel dolgu malzemesi ve çimento oranı ağırlıkça 1:1 oranında sabit tutularak incelenmiştir. Üç farklı yoğunluğa sahip köpük beton (800, 1250 ve 1500 kg / m³) için gerekli köpük. Çimento – kum - uçucu kül karışımlarında kumun % 50 'si uçucu kül, çimento - uçucu kül karışımlarında ise tüm kumun yerini uçucu kül alır.

Yukarıda belirtilen yoğunluklar için, karışımın uçucu kül içeriğindeki bir artış, dayanımın artmasına neden olur. Dolgu maddesi olarak uçucu kül esaslı köpük beton

karışımları, tüm yoğunluk değerleri için kuma dayalı olanlara göre daha yüksek dayanım - yoğunluk oranları göstermiştir. Şekil 2.5, kumun inceliğindeki bir artışın köpük betonun dayanımında bir artışa neden olduğunu gösterir. Belirli bir yoğunluk için, ince kumla karışım, kaba kumla yapılan karışıma göre daha yüksek dayanım sağlamıştır ve bu farklılık, daha yüksek yoğunlukta daha yüksektir. Bu, kaba kumun kabarcıkların kümelenmesinin düzensiz geniş gözenekler oluşturmaya neden olduğunu gösterir. Bu nedenle, ince kumun, kabarcıkların homojen dağılımına ve dolayısıyla belirli bir yoğunlukta kaba kumdan daha yüksek dayanıma neden olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 2.5. Farklı İncelikte Kumlu Karışımlar için Dayanım Yoğunluk Değişimi

Hem Narayanan ve Ramamurthy (2000) hem de Ramamurthy vd. (2009), yüksek toplam gözenekliliği (toplam hacme göre % 40 - 80) ve agrega bulunmaması nedeniyle köpük betonun normal beton için gözlenenden 10 kat daha fazla kuruma büzülmesine sahip olduğunu bulmuştur. Ayrıca hücreli betonun kuruma büzülmesinin kimyasal bileşiminden çok jelin fiziksel yapısına bağlı olması nedeniyle, süper akışkanlaştırıcı gibi katkı maddeleri ve silika dumanının büzülme üzerinde çok az etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca, hafif agrega kullanımının köpük betonun büzülmesini azaltabileceği bildirilmektedir. Ayrıca, mineralojik bileşimdeki değişikliklerin bir sonucu olarak, otoklavlanmanın kuruma büzülmesini nemli kürlenmelere göre % 12 - 50 oranında önemli ölçüde azalttığı bildirilmiştir. Ancak, Nambiar ve Ramamurthy (2009) şu sonuca varmıştır: köpük betonun büzülmesi, karşılık gelen köpürmemiş karışımdan daha düşüktür. Örneğin, %

50 köpük hacmiyle, köpük betonun büzülmesinin, köpürmemiş bir karışıma göre yaklaşık %36 daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, köpük içeriğindeki artışla azalır, çünkü daha yüksek köpük içeriği, daha düşük hamur içeriği ile sonuçlanır ve böylece büzülme, hamur içindeki daha düşük gözenek içeriğinden etkilenecektir.

Termal Özellikler

Hava sürüklenmiş beton için, ısı iletkenlik yoğunluğa, nem içeriğine ve malzemenin bileşenlerine bağlı olduğundan, ürünün nemli kürlenmesi çok önemli değildir (Narayanan ve Ramamurthy, 2000). Hücreli mikro yapısı sayesinde köpük beton, mükemmel ısı yalıtım özelliklerine sahiptir. Jones ve McCarthy'ye (2006) göre, yoğunluğu 1000 ile 1200 kg / m³ arasında olan köpük beton, 0.23 ile 0.42 W / mK arasında tipik ısı iletkenlik sergilemiştir.

Ayrıca uçucu kül ve hafif agrega kullanımının ısı iletkenliği azaltmada avantajlı olduğu gözlemlenmiştir. Narayanan ve Ramamurthy (2000), ısı iletkenlik nem içeriğinden etkilendiği için (kütlece nemdeki % 1'lik bir artış, ısı iletkenliği yaklaşık % 42 artırır), bunun fırında kuru bir durumda rapor edilmemesi gerektiğini öne sürmüşlerdir.

Daha önceki çalışmaları gözden geçiren Narayanan ve Ramamurthy (2000), hücreli betonun yangın direncinin, nispeten homojen olması ve farklı genleşme, çatlama ve çatlama oranlarına yol açabilecek iri agrega içermemesi nedeniyle normal betondan daha fazla veya daha iyi olduğunu tahmin etmişlerdir. Othuman ve Wang (2011) tarafından köpük betonun yangına dayanıklılığı ile ilgili bir çalışma sonuçlanmıştır.

Köpük beton, bölme duvarlar için yapı malzemesi olarak alçıya uygun bir alternatif sunar. Özetle, bağlanan gözeneklerin toplam gözeneklere oranı daha düşük olduğu için köpük beton daha düşük ısı iletkenliğe ve yangına karşı yüksek dirence sahiptir.

2.11.2 Köpük Betonun Dayanıklılığı

Genelde betonun dayanıklılığı, gözenek sisteminden geçen akışkanın (gaz veya sıvı) taşınmasından etkilenecek bozulmasına neden olur. Agresif sıvıların betona taşınması, betonun hizmet ömrünü etkileyen en önemli faktörleri temsil eden geçirgenlik, su emme ve soğurma (Nambiar ve Ramamurthy, 2007b) gibi geçirgenlik özelliklerine bağlıdır (Sanjuan

ve Munoz-Martialay, 1996b). Sonuç olarak, somut uzun vadeli dayanıklılığın önemli bir göstergesi, agresif bir maddenin betona nüfuz edebilme kolaylığı olan geçirgenliğidir (Sanjuan ve Munoz-Martialay, 1996b, Alshamsi ve Imran, 2002, Neville, 2011). Betonun dayanıklılığı, harici agresif maddeler tarafından nüfuz etme direnciyle yönetildiğinden, geçirgenlik özelliği, kalitesinin güvenilir bir tahmincisi gibi görünmektedir (Sanjuan ve Munoz-Martialay, 1996a, Sanjuán ve Muñoz-Martialay, 1997). Dahası, taşıma özelliklerinin gözenek yapısından etkilendiği iyi bilinmektedir (Yang vd., 2006).

Geçirgenlik özellikleri açısından köpük beton ve çimento hamurunda gözeneklilik ve su buharı geçirgenliği arasındaki ilişki Kearsley ve Wainwright (2001b) tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada, köpük ve köpüksüz karışımlar için benzer eğilim çizgileri ile su buharı geçirgenliğinin gözenekliliğin artmasıyla veya yoğunluğun azalmasıyla arttığı sonucuna varılmıştır. Yazarlar, köpük beton durumunda, sürüklenen hava boşluklarının bir agrega olarak kabul edilebileceğini ve bunların dahil edilmesinin, yalnızca akışı engelleyerek değil, aynı zamanda hava boşlukları ile hava boşlukları arasındaki arayüzde mikro çatlak olmaması nedeniyle de geçirgenliği azaltabileceğini iddia etmişlerdir.

Birkaç çalışmaya dayanarak, Ramamurthy vd. (2009) köpük betonun geçirgenlik katsayısının gözenek içeriği ile orantılı olduğunu belirtmiştir. Ek olarak, su geçirme özelliği geçirgenlikten ziyade emicilik, suyu kapilerite ile emme ve iletme ile daha iyi açıklanabilir. Nambiar ve Ramamurthy (2007b), belirli bir karışım tipi köpük beton için, su emiliminin esas olarak kılcal gözeneklilik tarafından kontrol edildiği ve yoğunlukta bir azalma ile azaldığı sonucuna varmıştır. Bunun nedeni, köpük betonun su emiliminin esas olarak azaltılmış hacme sahip hamur fazından etkilenmesi ve hava boşluklarının su emilimine katılmamasıdır.

Ramamurthy ve ark. (2009), köpük betonun iyi donma-çözülme direnci ve agresif kimyasal saldırılara karşı iyi direnç sağladığını bildirmiştir. Bununla birlikte, Scheffler ve Colombo'ya (2005) göre, daha yüksek gözeneklilik, geçirgenlikte bir artışa yol açarak, donma ve çözülme, ayrıca donma-çözülme etkilerine karşı duyarlılıkta bir artışa neden olmuştur. Ayrıca sülfat saldırısı beklendiğinde, bitüm esaslı malzemeler kullanılarak koruyucu önlemler alınmalıdır (Narayanan ve Ramamurthy, 2000). Jones ve McCarthy (2005), düşük yoğunluklu betonun nispeten daha yüksek bir oranda karbonatlaştığını ancak CO₂'ye maruz kalma şiddetli olmadığı sürece çok ciddi olmadığı sonucuna varmıştır. Kürleme yöntemine bağlı olarak, havalandırılmış beton, normal kürlenmiş gaz betondan

daha dayanıklıdır, çünkü ilki, ikincisinde oluşturulan ürünlerden çok daha kararlı olan kalsiyum silikat hidrat minerali içerir (Narayanan ve Ramamurthy, 2000).

2.12 Köpük Beton Uygulamaları

Köpük betonun en belirgin avantajı, ölü yükün azalmasına (ek önemli tasarruflar elde edilir), işleme ve nakliye maliyetlerinde azalma, daha hızlı inşaat oranları (insan gücünde azalma), iyi ısı yalıtım özellikleri ve iyi akustik özellikleridir. Köpük beton uygulaması üç ana alana ayrılabilir:

- Ön döküm elemanları (duvar ve tavan panelleri),
- Blok üretimi (büyük bloklardan kesilmiş veya belirli kalıplarda dökülmüş)
- Yerinde dökme (döşeme sistemi, çatı yalıtımı ve duvar dolgusu) Şekil 2.6'da uygulama alanları gösterilmiştir.



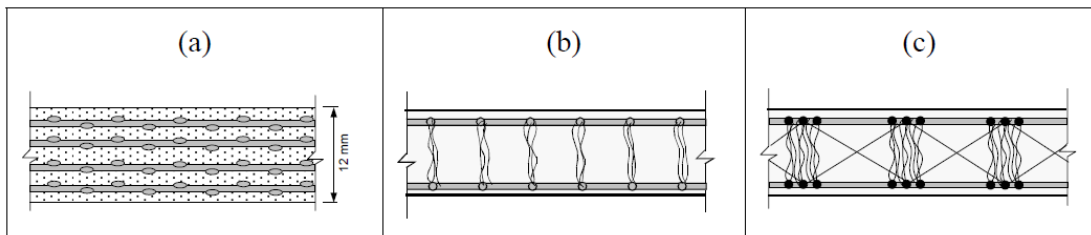
Şekil 2.6. Bazı köpük betonun uygulamaları (www.dr-luca.com, 2009)

3 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Geleneksel büyük ölçekli yapısal beton uygulamalarında, içinde “gerçek beton” un ima edildiği tekstil ile güçlendirilmiş beton (TRC) olarak adlandırılan yeni bir yapısal kompozitin tanımlanacağını varsayarsak, tekstil ile güçlendirilmiş beton tanımı geleneksel güçlendirilmiş beton tanımı ile aynı olacaktır. Burada gözlenen farklılık takviyenin, takviye edici çelik çubuklar yerine metalik olmayan veya polimer esaslı çubuklardan veya dokumalardan oluşmasıdır.

Bununla birlikte, TRC'yi bugünün pazarında rekabetçi olabileceği ince ürünlerle sınırlandırırsak ve bunu tanımlamamız gerekirse, bu tanım ne olabilir? Öncelikle, herhangi bir üretim sürecine veya malzemeye atıfta bulunmadan, bir 2 boyutlu (2B) tekstil veya 3 boyutlu (3B) tekstil gibi genel terimlerle bir tekstili tanımlamamız gerekir. Bu durumda:

“ Tekstil takviyeli beton, genellikle yakın aralıklı ve sürekli 2B tekstillerin birkaç katmanı veya bir veya birkaç 3B tekstil katmanı ile güçlendirilmiş hidrolik-çimento matrisinden yapılmış bir betonarme türüdür (Şekil 3.1). Ortaya çıkan yapının her birinin yakınına en az bir tekstil katmanı yerleştirilmelidir. Tekstiller, polimer, sentetik, metalik, organik veya diğer uygun malzemelerden yapılabilir. Çimentolu matrisin inceliği ve bileşimi, kapsüllemesi amaçlanan tekstil armatür sistemi ile uyumlu olmalıdır. Matris, süreksiz lifler veya uygun boyutlarda mikro lifler içerebilir” şeklinde tanımlanabilir.



Şekil 3.1. İnce tekstil takviyeli beton (TRC) ürünlerinin tipik bölümleri: a) birkaç kat 2B tekstil takviyesi veya b), c) bir kat 3B tekstiller

İnşaat sürecini basitleştirmek ve inşaat işçiliği maliyetini düşürmek isteyen pek çok betonarme kullanıcısı tarafından demir çelik uygulamaları için 3B güçlendirme sistemleri düşünülmüştür. Tipik olarak, demirli ve lamine çimentolu kompozitlerdeki takviye, eşit aralıklarla yerleştirilmiş birkaç ağ tabakasından oluşur. Betonarme betona benzer şekilde, ağ

takviyesinin imalatı ve yerleştirilmesi, önemli bir işçilik taahhüdü gerektirir. Örneğin, çelik hasırların kullanıldığı demirlemede işçilik maliyeti, kompozitin toplam maliyetinin % 50'si kadar yüksek olabilir (Naaman, A.E., 2000). Önceden tasarlanmış bir 3B güçlendirme sistemi kullanmak, bu nedenle nihai maliyet üzerinde muazzam bir etkiye sahip olabilir. 1970'lerin sonlarında ince çimento ürünleri için yalnızca bir 3B çelik tipi ticari olarak üretildi, ancak sonunda yüksek üretim maliyeti nedeniyle sona erdirildi (Naaman, A.E., 2000). Nitekim, yüksek dayanımlı sert yaylı çelik telleri, tekstil tipi bir makinede kullanmak, cam veya aramid gibi polimer tekstillerde olduğu kadar kolay değildir.

Yüksek performanslı lifler (karbon, Kevlar, Spectra) kullanan 2B tekstiller veya kumaşlar 1990'ların başından beri betonarme uygulamaları için değerlendirilirken, yalnızca 1990'ların sonlarında ve 2000'lerin başlarında, araştırma çalışmaları uygun hale geldi (Brameshuber, W., Ed., (2006). Özellikle Almanya'daki Aachen Tekstil Enstitüsü (ITA), Almanya Dresden Teknik Üniversitesi ile birlikte ince çimento ve beton kompozitlerdeki uygulamalar için bir dizi 3B tekstil kullanımının önemini araştıran çalışmaya öncülük etti. TRC teriminin Almanya'da ve Avrupa'nın çoğunda bu tür uygulamalar için kullanıldığına dikkat çekildi (Hegger, J. vd., 2006). Tekstil teknolojisi, tasarımın gerektirdiği kadar takviye (genellikle kompozit hacmine göre % 4'ten az) ve tam olarak ihtiyaç duyulan yere yerleştirme ve kumaş özelliklerini ve kabuk hacmini belirli uygulamalar için özelleştirme avantajı sunar. Ayrıca inşaat sürecini basitleştirmede ve işçilik maliyetinden tasarrufta büyük bir avantaj sunarlar. 3B tekstil bir kalıba yerleştirilir ve çimento bazlı bir malzeme ile birleştirilir. Böylelikle açık kutu şeklindeki bir kalıp ile ince bir düz takviyeli çimento levhası kolaylıkla üretilebilir. 3B tekstiller, yaklaşık 10 ila 50 mm kalınlıklarda kolayca üretilebilir, bu aralık, lamine çimentolu kompozit uygulamaları veya eşdeğer ince TRC uygulamaları için mükemmel bir şekilde uygundur.

TRC, yapısal sağlamlığını artıran lifli malzeme içeren bir betondur (AlTaan, S.A vd., 2012). Beton imalatındaki çeşitli tekstil türleri, darbeye, aşınmaya ve tahribata karşı daha mükemmel direnç gösterir. Daha yüksek uzunlukta çelik veya sentetik lifler, belirli durumlarda takviye veya çeliğin yerini tamamen alabilir (Klyuev, S.V. vd., 2018). Yapay ve doğal lifler çeşitli beton özellikler verir. Ayrıca; TRC, beton ve lifli malzemeler, geometri, dağılım, yönelim ve yoğunluktaki çeşitliliklerle değişir. Bazı lif türlerinin görünümü Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2.Bazı liflerin görünümü (Amran vd., 2020)

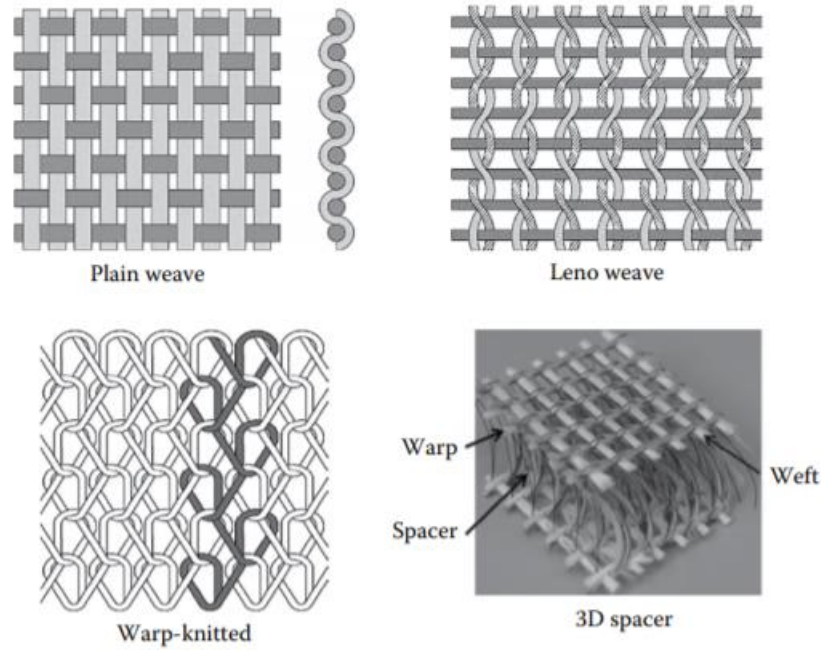
3.1 Tekstil Takviyeli Betonun Yapısı, Özellikleri ve Uygulanması

TRC, son yıllarda yeni ve değerli bir yapı malzemesi olarak ortaya çıkmıştır (Bramshuber, 2006, 2010; Curbach ve Heeger, 1998; Hegger ve ark., 2006). Portland çimentosu bağlayıcısı ve küçük boyutlu agregalardan oluşan çimentolu bir matrise dahil edilmiş sürekli bir tekstil kumaştan meydana gelir. Bu malzeme gerinimle sertleşen veya gerinimle sertleşen / sehimle sertleşen çimento kompoziti olarak kategorize edilebilir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. TRC'nin mikro yapısı

Gerinim ile sertleşen çimento kompozitleri, kısa ve dağınık iplikler kullanan özel formülasyonlardan sürekli tekstil kumaşlarına kadar çeşitli modlarla elde edilebilir. Bu tür kompozitlerin geliştirilmesindeki ilerleme, büyük ölçüde, bu tür sistemlerin mikromekaniğinin daha derinlemesine anlaşılmasına dayanmaktadır ve bu da, % 10'dan daha az olan mütevazı bir lif takviyesi içeriğinin kullanılmasıyla gerinim sertleşmesinin başarılmasını mümkün kılmaktadır. ve hatta birçok durumda %5'in altına inmektedir (Bentur ve Mindess, 2007; Reinhardt ve Naaman, 2007; Toledo Filho ve ark., 2011). Bu, elbette, çok daha uygun maliyetli bir kompozit sağlayarak, uygulamasını çok daha uygun hale getirir. Ayrık kısa takviyeden (iplikler, lifler) oluşan gerinimle sertleşen kompozitler, mikromekanik etkileşimlerin kontrolü yoluyla gerinim sertleştirme etkisini elde etmek için takviyenin ve matrisin özel olarak ayarlanmasını gerektirir (Şekil 3.4). Bu, matrisin partikül derecelendirmesinin özel kontrolünü ve yüksek performanslı kimyasal katkıların kullanımını gerektirir.



Şekil 3.4. Farklı türde tekstiller

TRC içeren çimentolu matris, yüksek kalitede olmasına rağmen, çok sıkı formülasyon veya geleneksel olanlardan önemli ölçüde farklı bileşenlerin kullanılmasını gerektiren tür değildir. Böylece, büyük ölçüde geleneksel çimento esaslı bir matrisle, bir ucta elastik-plastik davranışa ve diğer ucta çok etkili bir gerinim sertleşmesine sahip etkileyici bir dizi mekanik özellik elde etmek mümkündür.

Tekstil uygulaması ile oluşturulan çimento kompozitleri, üretimlerinin basit ve saha dostu olması açısından büyük avantaj sağlar. Yine de, TRC'nin önemli bir avantajı, yapısal ve yarı yapısal uygulamalar için çok önemli olan, doğası gereği yüksek verimlilik ve güvenilirlik sağlayan ipliklerin sürekliliğidir. Bu avantaj, karbon gibi yüksek performanslı ipliklerin kullanımının en uygun hale getirilmesi ve uyum kontrolü ile yapısal performans, statik analizi ve darbe durumlarında için uyarlanabilen tekstil kumaşlarının üretimindeki esneklik düşünüldüğünde daha da artar.

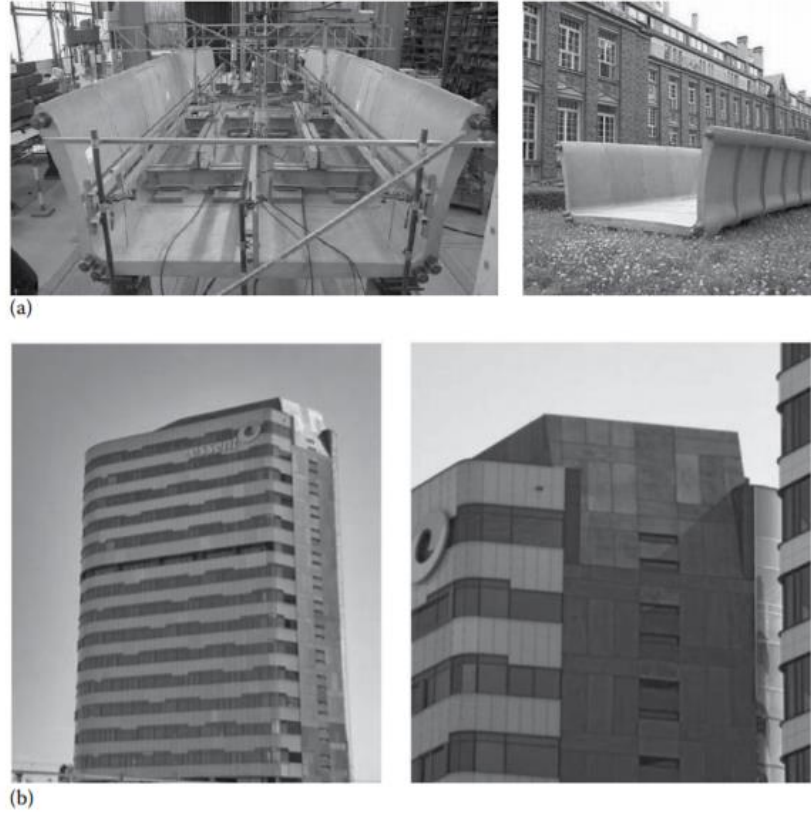
Yapısal ve yarı yapısal nitelikteki TRC bileşenlerinin üretimi, elle yerleştirme (Şekil 3.5-a) veya mekanize işlemlerle (Şekil 3.5-b) gerçekleştirilebilir (Bramhuber ve diğerleri, 2006). Daha basit el ile yerleştirme teknikleri, yerinde onarım ve güçlendirme için çok daha sıklıkla tercih edilmektedir (Curbach ve ark., 2006).



Şekil 3.5. TRC bileşenlerinin üretimi: a) el ile yerleştirme, b) mekanize işlemlerle yerleştirme (Brameshuber, W ve ark.,2006)

TRC'deki matris genellikle geleneksel betonarmenin alt sınırı olan 0.40-0.45 su - çimento oranı aralığındadır, bu da TRC'yi matris performansı açısından biraz daha dayanıklı hale getirir. Dayanıklılık açısından en büyük avantaj çatlak kontrolüdür. Bu durum, yükleme üzerine çoklu çatlama ile karakterize edilen, 100 μ m'den daha az genişlikte, genellikle yaklaşık 50 μ m'lik çatlaklar ile karakterize edilmektedir (Ahmed ve Mihashi, 2007; van Zijl ve diğerleri, 2012). burada çatlaklar genişlik olarak 0,1-0,3 mm aralığında sınırlıdır.

TRC'nin içerisinde bulunduğu bu sınıf çimento kompozitleri, kendisini daha çok yapısal ve yarı yapısal uygulamalara yönlendirir, bu durum kompozitlerin yüksek çekme dayanımı ve sünekliği ile kolaylaştırılan inşaatta yeniliğin önünü açar. Desteklenebilecek yenilik, köprüler için profiller (Şekil 3.6 a) ve bina cepheleri için perde duvarlar gibi daha ağır olan geleneksel betonarmenin yerini alacak ince kesitli bileşenlerin tasarlanmasını mümkün kılmaktır. Ayrıca şekillendirme esnekliği sayesinde mimari tasarım gereksinimleri de karşılanır (Şekil 3.6 b).



Şekil 3.6. TRC'nin yapısal ve mimari bileşenleri: a) köprü profilleri, b) perde duvarlar (Hegger, J. ve ark., 2006)

TRC ayrıca bir yapıya harici bir katman olarak dahil edilerek gelişmiş dayanıklılık sağlar. Bu özel ilgi yeni yapılardaki uygulamaların yanı sıra mevcut yapıların onarımı ve güçlendirilmesi için de uygulanmaktadır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Beton bileşenlere harici bir tekstil tabakası uygulayarak onarım ve güçlendirme

Yüksek seviyeli mekanik performans ve bozulma etkilerine karşı uzun vadeli direncin benzersiz kombinasyonu, sürdürülebilirliği sağlayacak yeni teknolojilerin inşaat endüstrisinde yenilik için büyük bir itici güç haline geldiği modern çağda özellikle ilgi çekicidir. TRC tarafından sunulan sürdürülebilirlik özellikleri geniş bir yelpazeyi kapsar:

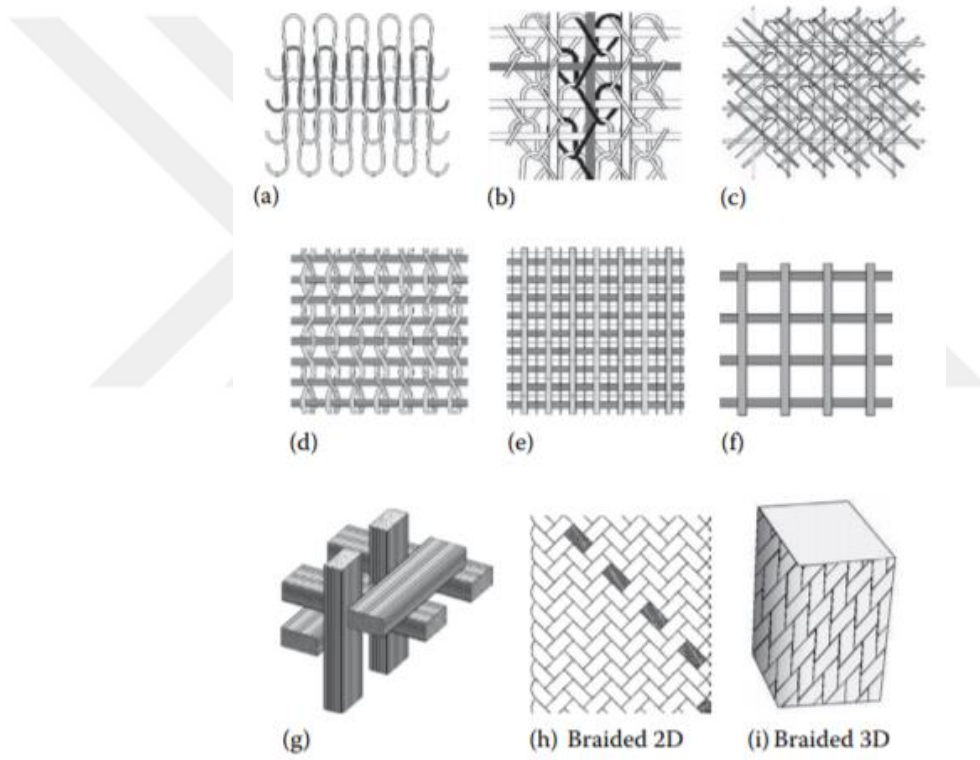
1. Önemli ölçüde daha az miktarda malzeme içeren bileşenler yapma potansiyeli (geleneksel beton yapı, olumsuz anlamda “malzeme açısından zengin” bir teknolojidir)
2. Geleneksel betona göre çok daha uzun olması beklenen servis ömrü sağlayabilen bileşenler
3. Daha yüksek statik ve dinamik yüklere dayanacak şekilde, bozulmaya uğrayan veya mekanik performanslarının yükseltilmesi gereken mevcut yapıların ömrünü uzatmak için uygulanacak teknolojilerin temelini sağlamak

Sürdürülebilirlik bağlamında, TRC sadece beton için değil, aynı zamanda çekme dayanımı, süneklik ve dayanım/ağırlık oranı açısından nicel olarak uygun mekanik performansa sahip çelik ve ahşap gibi yüksek performanslı malzemeler için de daha fazla avantaj göstermektedir.

3.2 Tekstil Yapıları

Tekstiller, esas olarak tekstil yapısını oluşturmak için ipliklerin nasıl bir araya getirildiğine göre farklılık gösteren çeşitli geometrilere üretilir. İpliklerin bağlantı yöntemi tekstil geometrisini, açılmayı, iplik geometrisini, tekstil özelliklerini ve işlemeyi etkiler. Tekstil, tipik olarak, basitten karmaşık biçimlere kadar büyük ölçüde değişebilen üretim yöntemlerine göre sınıflandırılır. Çimentolu bir matrisi güçlendirmek için tekstil kumaşları kullanmanın birkaç avantajı vardır. Kumaş tipine ve iplik yerleşimine bağlı olarak kompozit, tek bir işlem adımında gerekli tüm yönlerde güçlendirilebilir. Nispeten çok sayıda sürekli iplik, istenen yönlerde kolaylıkla birleştirilebilir. Ek olarak, tekstil, tekrarlanabilir bir doğrulukla yerleştirilebildiklerinden, değişen yük yollarına sahip kavisli, karmaşık bileşenleri güçlendirmek için çok uygundur. Son olarak, tekstilin ve ipliklerinin geometrisi, kompozit özellikler ve performans üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir.

Tekstil takviyeli çimento kompozit uygulamalarının etkinliğini belirleyen en önemli kriter, tekstilin çimento esaslı yapılara dahil edilmesi için sahip olması gereken açık ızgara yapısında ve yüksek yer değiştirme stabilitesinde oluşturulabilme derecesidir. Izgara açıklığının ortalama boyutu $\sim 10 \mu\text{m}$ olan çimento parçacıklarından ve tipik olarak 1 mm 'ye kadar olan ince agregalardan oluşan çimento esaslı matris, açıklığın iplikleri arasındaki boşluklara nüfuz edebilecek şekilde olmalıdır. Ayrıca, tatmin edici bir kullanım sağlamak için ipliklerin yer değiştirmesi olmamalıdır. Günümüzde mevcut olan ve aktif olarak kullanılan tekstil türleri şekil 3.8'de gösterilmektedir:

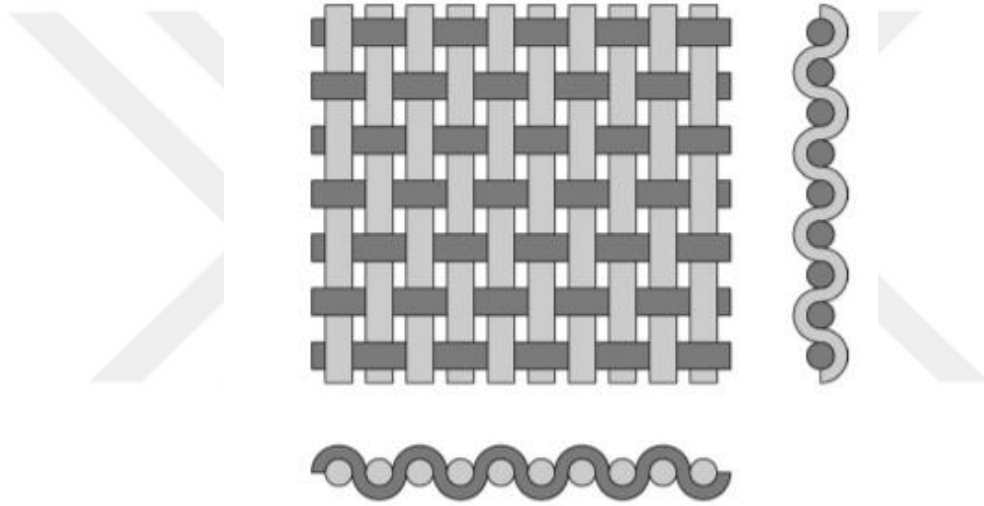


Şekil 3.8. Kompozit malzemeler için takviye tekstillerinin yapıları: a) Atkılı örgü, b) Çözü örgü, c) Çözü çok eksenli örgü, d), e) Dokuma, f) Bağlı, g) 3B tekstil, h) Örgülü 2B tekstil, i) Örgülü 3B tekstil

3.3 Tekstil Kumaşlarda İplik Dizilimi

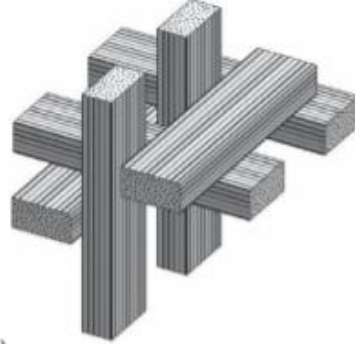
Tekstilin amaçlanan uygulamasına bağlı olarak, bileşen ipliklerinin dizilimi farklı mimariler üretmek için değiştirilebilir. Bunlar iki ana kategoriye ayrılabilir: takviye ipliklerinin sadece kumaş düzleminde olduğu düz tekstiller (2 boyutlu, 2B) ve takviye ipliklerinin farklı doğrultularda yönlendirildiği hacimli tekstiller (3 boyutlu, 3B).

Takviye ipliklerinin, iki yönde geliştirilmiş özelliklere sahip bir kompozit sağlamak için kumaş düzlemine göre karşılıklı olarak iki dik doğrultuda (0° ve 90° yönler) yerleştirildiği tekstil türü 2 boyutlu (2B) olarak adlandırılır (şekil 3.9).



Şekil 3.9. 2B Tekstil

3B tekstil, takviye ipliklerinin kumaşın düzlemi ve kalınlığı boyunca karşılıklı olarak dik olarak X, Y ve Z doğrultuları boyunca yer aldığı durumdur. Her üç iplik yönündeki güçlü bağlantılar nedeniyle, bu kumaşlar kompozit içinde çatlak oluşumuna ve katmanlar arasında ayrılmaya karşı direnir. Diğerlerinin yanı sıra dokuma ve örgü gibi yaklaşık yirmi farklı çeşit üretim yöntemleri, kompozit malzemelerde kullanım için uygun şekilde farklı yapılara sahip üç yönlü kumaş geliştirmek için kullanılmıştır (şekil 3.10).



Şekil 3.10. 3B Tekstil

Nispeten açık bir yapıya sahip olan üç yönlü bir kumaş, atkı eklemeli çift iğneli çubuk çözgü örme teknolojisi kullanılarak çimento esaslı kompozitler için özel olarak geliştirilmiştir (Gries ve Roye, 2006). Bu kumaş türünde, yapı, kumaşın kalınlığı (z yönü) boyunca üçüncü bir iplik grubu ile birlikte iki bağımsız örme kumaşın örülmesiyle oluşturulur. Genellikle spacer iplikler olarak anılan, tek başına duran ve çökmeye karşı dirençli sabit hacimli bir yapı sağlamak için nispeten sert olması gereken z yönündeki bağlantı iplikleri, polyester gibi düşük modüllü ipliklerden yapılır. Bu nedenle, kalınlıkları birkaç milimetreden birkaç santimetreye kadar olabilen elde edilen kumaşlar, 3D spacer kumaşlar olarak bilinir.

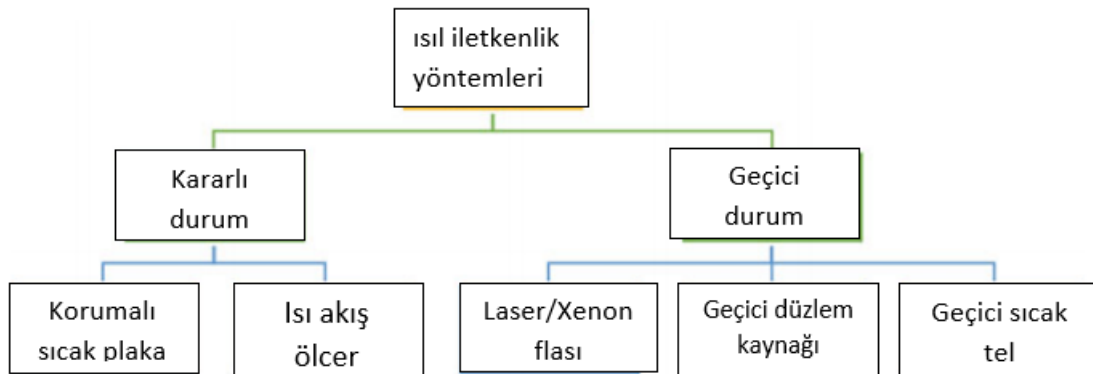
3.4 Köpük Betonda Sıcaklık Etkisi

Son yıllardaki muazzam nüfus patlaması ve sınırlı doğal enerji kaynakları göz önüne alındığında, enerji tasarrufu, ele alınması gereken bir sorun olarak göze çarpmaktadır. Birleşmiş Milletler Çevre Programı'nın (UNEP) 2009 yılında yayınladığı rapora göre, çoğu ülkede toplam enerji tüketiminin yaklaşık üçte biri ve sera gazı emisyonlarının % 30'u inşaat sektörüne atfetmektedir (Hirst, 2013). Nüfusun çoğu zamanın % 90'ını kapalı mekanlarda geçirdiğinden ısı konfor yerine enerji tasarrufunun ön planda tutulması öncelikli bir konu haline gelmektedir. Yapı tasarımı ve inşası sırasında düşük ısı iletkenliğe sahip malzemelerin kullanılması bu enerji tüketimini büyük ölçüde azaltmaya yardımcı olacaktır. Hafif beton olarak sınıflandırılan köpük beton, ısı yalıtımı açısından modern yapı endüstrisinde en uygun malzemelerden biri olarak kabul edilebilir.

3.5 Köpük Beton için Isıl İletkenlik Ölçüm Yöntemleri

Köpük betonun tüm termo-fiziksel özelliklerinden termal iletkenlik (k-Değeri), binaların enerji performansını kontrol etmek ve mevcut binaların enerji denetimlerini yapmak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Ficco vd., 2015).

Bunu göz önünde bulundurarak, araştırmacıların çoğu, Termal iletkenliği etkileyen faktörleri ele almaya çalışmıştır. Malzemenin ısı iletim kapasitesini gösteren termal iletkenlik, öncelikle malzemeler arasında farklı ısı transfer koşullarına sahip olan kararlı hal yöntemleri ve geçici yöntemler olmak üzere iki yaklaşımla ölçülür (Zhang vd., 2015). Sabit ısı transferi yaklaşımı, sıcaklık veya ısı akışının zamana bağlı olmadığı, geçici yöntemin zamana ve sıcaklık değişimlerine bağlı olduğu kararlı hal yöntemleri tarafından benimsenmiştir. Köpük betonun mevcut termal iletkenlik ölçüm yöntemlerinin grafiksel bir temsili Şekil 3.11'de gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Farklı ısı yalıtım ölçüm yöntemleri

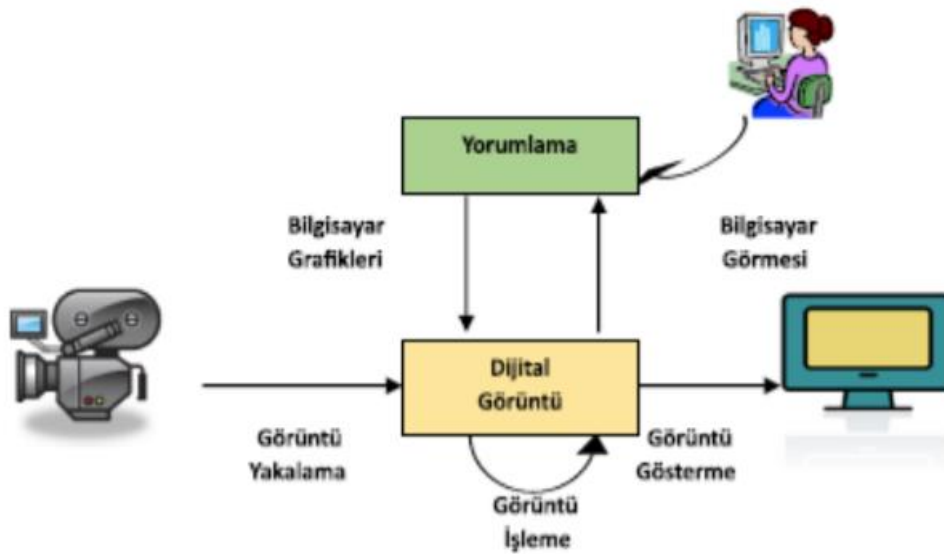
Kararlı hal yönteminde termal iletkenlik sadece bir yönde ölçülür. Kararlı durum yöntemine dayalı araçlar için gereken örneklem boyutunun, geçici yöntemeye dayalı araçlardan çok daha büyük olduğu not edilebilir (Ficco vd., 2015).

Geçici durum yöntemlerinin aksine, çok katmanlı numunelerin ısı iletkenliğinin kararlı durum yöntemini kullanarak belirlenmesi mümkündür (Ng vd., 2010). Bununla birlikte, kararlı durum yönteminin aldığı süre daha fazladır ancak k değeri ölçümleri bu yöntemde daha hassastır.

Dört farklı işlevsel birimin (soğutucu, ısı kaynağı, termometre ve numune) gerekli olduğu kararlı durum yöntemiyle karşılaştırıldığında, geçici yöntem yalnızca iki (ısı kaynağı ve numune) işlevsel birim gerektirir. Burada ısı kaynağı aynı zamanda termometre görevi görürken numuneler soğutucu görevi görür. Kesin sonuçlar için tekrarlayan denemeler gerekli olsa da, yüksek nem içeriğine sahip heterojen malzemelerin termal iletkenliği geçici yöntem kullanılarak hesaplanabilir (Gandage vd., 2013).

3.6 Görüntü İşleme Analizi

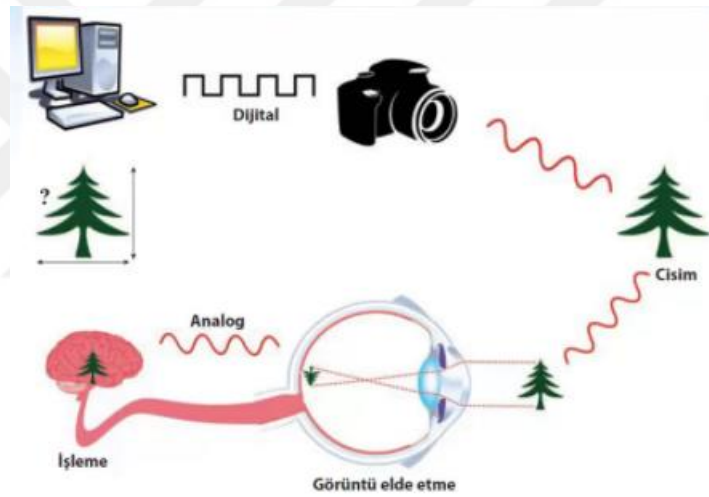
Beton gibi heterojen malzemelerin iç yapısı, dijital görüntüleri işlenerek tanımlanabilir ve ölçülebilir. Dijital bir görüntü iki veya üç boyutlu ayrık fonksiyonlar olarak düşünülebilir. 2 boyutlu görüntüleme kullanarak karakterize edilen beton karışımlar, 3B analizlere kıyasla ekonomik açıdan daha verimlidir. 2 Boyutlu görüntüler kullanılarak yakalanan ve ölçülen özellikler, temas sayısı ve agrega oryantasyonu dahil olmak üzere basit indekslerle sınırlıdır. Dahili yapının iki boyutlu görüntüleri, dijital kameralar, mikroskoplar, yüksek ve orta çözünürlüklü düz tarayıcılar dahil olmak üzere çeşitli ekipmanlar kullanılarak yakalanabilir. Dijital görüntü analizi üç ana adımı içerir. Bu adımlar resim elde etme, görüntü işleme ve görüntü analizidir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Dijital görüntü işleme süreci (Yolcu, 2014)

Dijital görüntü, kameralar, algılayıcılar veya tarayıcılar aracılığı ile elde edilen görsel, olarak adlandırılmaktadır. Genel olarak renkli, gri, siyah-beyaz olmak üzere 3 farklı görüntü formatı bulunmaktadır (Baykan, 2010). Renkli bir görüntü temel olarak kırmızı, mavi ve yeşil renkler olarak belirlenmiş olup, siyah-beyaz görüntü en basit format olarak değerlendirilmektedir.

Sinyal işleme aşaması analog görüntü işleme ve dijital görüntü işleme olarak ikiye ayrılır (Şekil 3.13). Sinyal işleme, analog ve dijital sinyallerin analizi ve işlenmesiyle ve sinyaller üzerinde depolama, filtreleme ve diğer işlemlerin uygulanmasıyla ilgilenen bir disiplindir. Bu sinyallere örnek olarak iletim sinyalleri, ses veya ses sinyalleri, görüntü sinyalleri ve diğer sinyaller verilebilir.



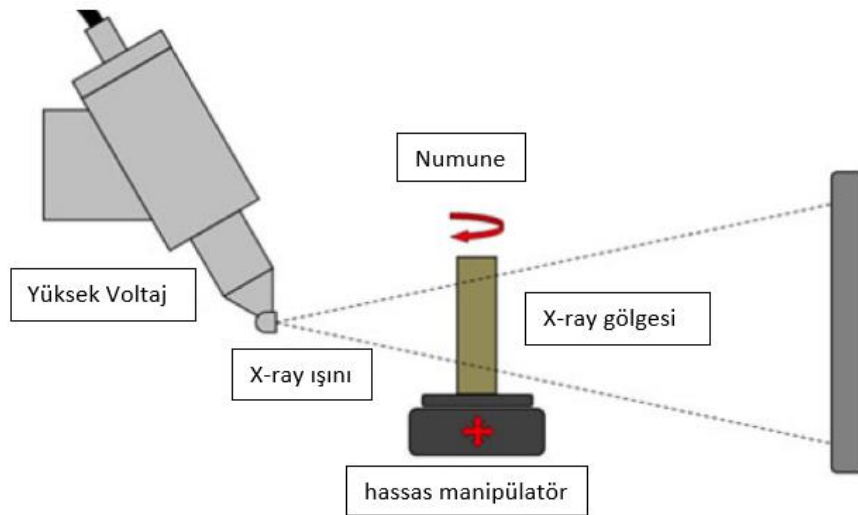
Şekil 3.13. Görüntü işleme yöntemleri

Analog görüntü işleme, analog sinyallerde yapılır ve iki boyutlu analog sinyaller üzerinde işlemeyi içerir. Bu tür işlemede, görüntüler elektrik sinyalini değiştirerek elektriksel yollarla manipüle edilir. Yaygın örnek, televizyon görüntüsüdür. Dijital görüntü işleme, daha geniş uygulama yelpazesi nedeniyle zamanın geçişi ile analog görüntü işlemeye hakim olmuştur.

Köpük betondaki gözenekler, yalıtım etkisini artırma rolüne sahipken, gözeneklilik arttıkça basınç dayanımı ve elastik rijitlik azalmaktadır. Bu nedenle, köpük betonun özelliklerini daha iyi anlamak için gözenek yapısının uygun bir şekilde araştırılması

gerekmektedir. Burada köpüklü beton numunelerdeki gözenek dağılımları, tahribatsız bir yöntem olan X-ray mikro bilgisayarlı tomografi (mikro-CT) kullanılarak açıklanmaktadır. Mikro-CT'den, mikrometre aralığında piksel boyutlarına sahip bir numunenin bir dizi 2B görüntüsü, numuneye zarar vermeden X-ışınları ile üretilebilir (Patterson ve ark., 2012). Gözenekleri ve numuneyi sınıflandırmak için orijinal CT görüntülerinin ikili görüntülere dönüştürülmesi sırasında görüntü işlemeden yararlanılır. Daha sonra, dönüştürülmüş enine kesit görüntülerin istiflenmesiyle numunenin bir 3B ikili görüntüsü elde edilir. Özellikle, düzensiz şekilli gözeneklerin tanımlanması için burada geliştirilmiş 3B algoritması kullanılır.

Köpük beton numunelerinin gözenek ve hücre özelliklerinin karakterizasyonu için olasılıksal yöntemler kullanılır. Gözenek özelliklerinin tanımlanması için genellikle olasılık fonksiyonları, iki noktalı korelasyon (Tewari ve ark., 2004) ve çizgisel yol (Chung ve Han, 2010) kullanılmıştır. Bu işlevler, sınırlı bilgiyi kullanarak gözeneklerin kümelenme düzeyini ve sürekli bağlantıyı tanımlamak için kullanılabilir. Ek olarak, köpük beton numunesindeki yerel gözenek/hücre dağılımları, yerel gözenek özellikleri ile malzemenin davranışının korelasyonunu incelemek için açıklanır (Ke ve ark., 2010). Genel prensip Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14 Mikro-CT çalışma prensibi

4 MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölüm, geleneksel köpük bir beton üretmek için kullanılan malzemeleri ve özelliklerini geliştirmek için benimsenen katkı maddelerini ve oranlarının seçildiği temeli açıklamaya odaklanmaktadır. Ayrıca kullanılan ekipman, üretim, yoğunluk ve tutarlılık hakkında bilgi verilmektedir. Son olarak, boşluk yapısı, mekanik, geçirgenlik özellikleri ve hasar ölçümü açısından test programı sunulmuştur.

4.1 Kullanılan malzemeler

Daha önce de belirtildiği gibi, köpük betonun ana hammaddeleri çimento, kum, su ve köpüktür; bununla birlikte, betonun özelliklerinde belirli bir değişiklik istendiğinde katkı maddeleri kullanılabilir. Bu nedenle, dayanımı artırılmış köpük beton üretme amacını gerçekleştirmek için; bazı katkı maddeleri, yani 3B tekstil ve silis dumanının yanı sıra hafif agrega, bu çalışma kapsamında kullanılmıştır (Şekil 4.1).



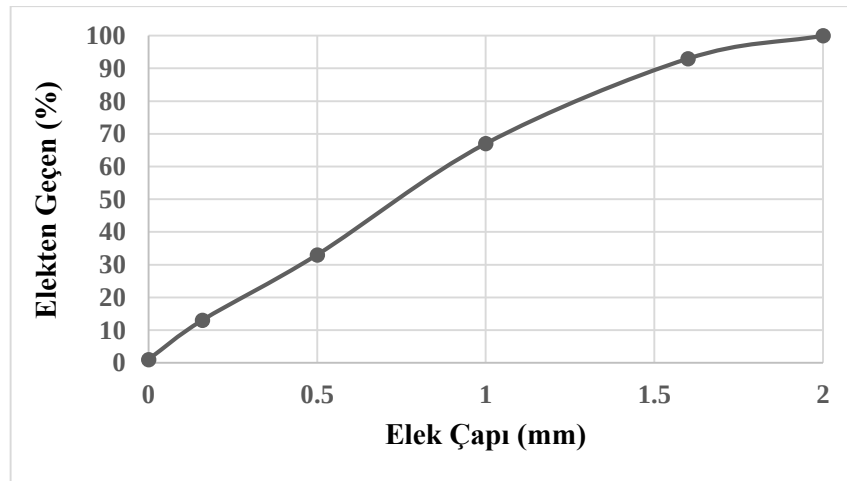
Şekil 4.1.Köpük beton üretiminde kullanılan malzemeler

- **Portland Çimentosu**, CEM I - 42,5 kullanılmıştır ve standartlar gereği aşağıdaki özellikleri taşımaktadır (Çizelge 4.1):

Çizelge 4.1. CEM I - 42,5 teknik özellikleri (TS EN 197-1)

KİMYASAL ANALİZ	
SiO_2 (%)	18.59
AlO_3 (%)	4.75
Fe_2O_3 (%)	3.41
CaO (%)	63.59
MgO (%)	1.11
Na_2O (%)	0.49
K_2O (%)	0.77
SO_3 (%)	3.39
Cl (%)	0.016
Kızdırma kaybı	3.03
Serbest CaO (%)	1.56
MEKANİK ÖZELLİKLERİ	
Priz başlangıç (dakika)	160
Priz sonu (dakika)	203
Yoğunluk (gr / cm^3)	3.15
Hacim genleşmesi (cm)	1.1
Özgül yüzey (blaine cm^2 / gr)	3740

- **İnce agreg (kum)**, 2.65 özgül ağırlıklı, 0,5 mm'den küçük partiküllere sahip olacak şekilde elenmiştir. Kullanılan gradasyon Şekil 4.2'de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.2. Agreg tane boyutları- gradasyon eğrisi

- **Su**, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Laboratuvarından temin edilen taze, temiz ve içilebilir şehir şebeke sudur. Kimyasal analizi Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Ankara şebeke suyu kimyasal analiz sonuçları (ASKİ, 2021)

Parametre	Birim	Analiz Sonucu	EPA Sınır Değer	TS 266 Sınır Değer
Bulanıklık	(NTU)	0,70	5	1,0
Koku		Yok	Yok	Yok
Bakiye Klor	(mg/l)	0,5	-	-
İletkenlik	(25°C,mS/m)	91,1	-	250
Amonyum	(mg/l)	<0,06	-	0,5
Nitrit	(mg/l)	<0,006	3,3	0,5
Sülfat	(mg/l)	162,1	250	250
Demir	(µg/l)	70	300	200
Alüminyum	(µg/l)	49	200	200

- **Köpük Ajanı**, Aydos®-Lightcon 28 hafif beton köpük üretimi için kullanıma hazır köpük ajanıdır. Bununla beraber, hafif yapay agrega ile (ALA), Aydos®-Lightcon 28 ekonomik olarak, hafif ısı yalıtımı ve ses emici köpük harç ve beton üretimini mümkün kılar (aydos yapı kimyasalları). Teknik özellikleri Çizelge 4.3’te belirtildiği gibidir. Köpük ajanına hacminin (1/38)’i oranında su eklenerek köpük solüsyonu elde edilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Köpük solüsyonu

Çizelge 4.3. Köpük ajanı teknik özellikleri (AYDOS kimya)

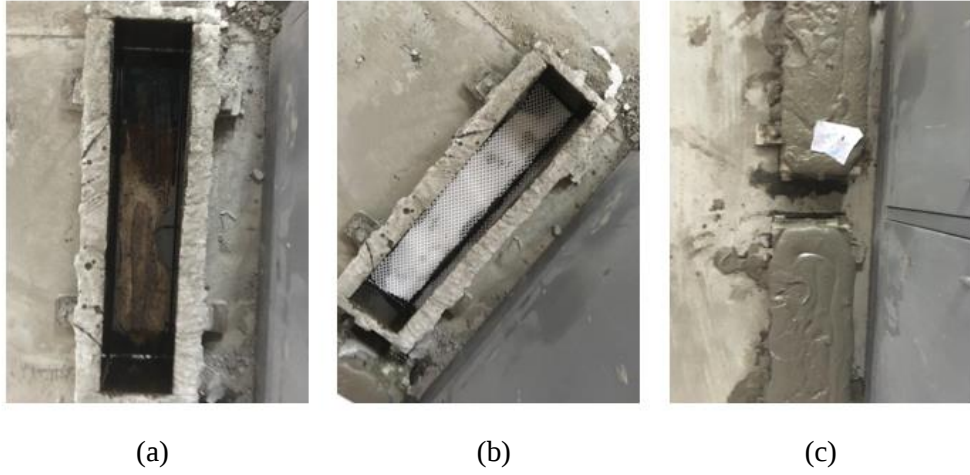
<u>Kimyasal İçeriği:</u>	Sentetik sıvı hava sürükleyici	
<u>Görünüm-Renk :</u>	Şeffaf, soluk kahverengi sıvı	
<u>Yoğunluk:</u>	1.03 ± 0.02 kg/l.	ISO 758
<u>pH Değeri:</u>	5.0 ± 1	TS 6365 EN 1262
<u>Klor İçeriği:</u>	< % 0.1	TS EN 480-10
<u>Alkali İçeriği:</u>	< % 5	TS EN 480-12
<u>Donma Noktası:</u>	- 5 °C	

- **Silis dumanı:** 2.33 özgül ağırlık, % 92 SiO₂, ortalama partikül boyutu 0.15 µm ve spesifik yüzey 20 m²/ g çimento matrisini daha yoğun ve daha güçlü hale getiren çimento partikülleri arasındaki boşluğu doldurmak için erken yaşta dayanım kazanmak ve çimento / agrega bağlarını geliştirmek amacı ile kullanılmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4.Çalışmada kullanılan silis dumanı

- **3B tekstil:** Tekstilin uygulama aşamasında, uygun kalıp boyutlarında hazırlanan kumaş, yağlanmış kalıbın üzerine serildikten sonra, üstüne beton harcı dökülür (Şekil 4.5 (a,b,c)).



Şekil 4.5. 3B tekstilin kalıplara yerleştirilmesi: (a) Kalıbın yağlanması, (b) 3B tekstil yerleştirilmesi, (c) Beton harcının dökülmesi

4.2 Karışım Tasarımı

Numunelerin hazırlanması Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemeleri Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Köpük solüsyonu; içinde bulunan köpük ajanı su karışımı kütleli olup hepsinde aynı olmakla beraber % 2.5 tir Bunun için 3 farklı kum/bağlayıcı oranı (0,3; 0,2; 0,1) kullanılmış ve her bir oran için 3 farklı su/bağlayıcı oranları (0,5; 0,45; 0,40) denenmiştir. Her varyasyon için kullanılan silis dumanı oranları değişkenlik göstermektedir (0,10; 0,15; 0,20). 3B tekstil etkisinin belirlenmesi için, kontrol ve deney grupları oluşturulmuştur. Deney gruplarının hepsinden 3'er adet numune hazırlanmıştır. (4 x 4 x 16) cm boyutlara sahip kalıplarda eğilme değerleri için test edilmiştir. Eğilme deneyinden elde edilen parçalar, basınç dayanım testlerinde kullanılmıştır. Deney matrisi çizelge 4.6'da gösterildiği gibidir. Deney matrisine göre hazırlanan numuneler 28 ve 56 gün oda sıcaklığında bekledikten sonra deneylere tabi tutulmuştur. Bu matrise göre hazırlanan deney grubu, kontrol grubundan farklı olarak 3B tekstil ile hazırlanmıştır.

Bağlayıcı oranları birbirinin yerine kütle ikameli olarak oluşturulmuş ve silis dumanı ile çimentonun bileşiminden oluşur.

Çizelge 4.4. Deney malzeme oran ve ağırlıkları

Yüzde (%)			Ağırlık					
Kum/Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı	Silis Dumanı	Çimento (kg)	Silis Dumanı (kg)	Kum (kg)	Su (kg)	Köpük Ajanı (kg)	Köpük Solüsyonu Hazırlamak için Kullanılan Su (kg)
0,30	0,50	0,10	960,20	106,70	315,00	530,00	3,31	118,34
		0,15	901,00	159,00	313,80	526,80	3,28	117,32
		0,20	843,30	210,80	312,00	523,90	3,25	116,41
	0,45	0,10	1016,10	112,90	334,20	502,40	3,43	122,86
		0,15	953,90	168,30	332,20	499,40	3,40	121,80
		0,20	892,30	223,10	330,20	496,30	3,37	120,80
	0,40	0,10	1076,90	119,70	354,20	472,60	3,57	127,70
		0,15	1010,20	178,30	351,80	469,40	3,54	126,62
		0,20	945,30	236,30	349,80	466,70	3,51	125,60
0,20	0,50	0,10	998,90	111,00	224,20	550,50	3,24	115,94
		0,15	936,90	165,30	222,70	546,70	3,20	114,80
		0,20	877,10	219,30	221,50	543,80	3,18	113,97
	0,45	0,10	1050,80	116,80	235,80	526,80	3,34	119,83
		0,15	986,60	174,40	234,50	523,50	3,31	118,40
		0,20	922,40	230,60	232,90	520,00	3,28	117,77
	0,40	0,10	1121,80	124,60	251,80	494,80	3,49	125,21
		0,15	1052,60	185,70	250,10	491,60	3,46	124,08
		0,20	983,40	245,80	248,30	488,00	3,43	122,80
0,10	0,50	0,10	1043,00	115,90	117,10	574,80	3,15	113,06
		0,15	978,50	172,70	116,30	571,00	3,12	112,00
		0,20	915,20	228,80	115,50	567,40	3,10	111,03
	0,45	0,10	1097,30	121,90	123,10	552,30	3,20	116,80
		0,15	1029,00	181,60	122,30	548,40	3,23	115,60
		0,20	962,00	240,50	121,40	544,70	3,20	114,60
	0,40	0,10	1166,70	129,60	130,90	523,70	3,39	121,64
		0,15	1094,60	193,20	130,10	520,30	3,36	120,50
		0,20	1022,90	255,70	129,10	516,60	3,33	119,40

4.3 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Karışımlardan ilk önce 3B tekstil kullanılmadan kontrol numune grubu hazırlanmıştır. Önce numune kalıpları, kalıp yağı ile yağlanıp döküme hazır hale getirildi. Malzemeler, 54 adet numune için hesaplanarak elektronik tartıda tartılıp kütlelerine göre çimento harcı hazırlandı. Şekil 3.3’de gösterilen mikserde çimento, su, silis dumanı ve kuvars kumunun yaklaşık 10-12 dakika karıştırılmasından sonra beton harcı, ayrı bir kapta köpük ajanı ve suyun ortalama 5 dakika karıştırılmasıyla elde edilen köpük solüsyonu ile birleştirildi.

Birleřtirildikten sonrada yaklaşık 2 dakika karıştırıldı. Köpük solüsyonu hazırlanırken köpük ajanı ve su kütlece % 2.5 oranında karıştırılmıştır. (şekil 4.6). Hazırlanan numuneler 24 saat prize bırakıldıktan sonra numune kalıplarından sökölüp oda sıcaklığında 27 ve 55 gün beklemek üzere konulmuştur.



şekil 4.6. Köpük solüsyonunun hazırlanması

4.4 Uygulanan Deneyler

Deneyler için hazırlanan numuneler, 28 ve 56 gün oda sıcaklığında bekletildikten sonra deney grubundan 3 adet numune dijital görüntü işleme ve analizi için 1x1x1cm'lik boyutlar halinde kesilmiştir. 4*4*16 cm'lik numuneler eğilme ve basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur.

4.4.1 Basınç dayanımı testi

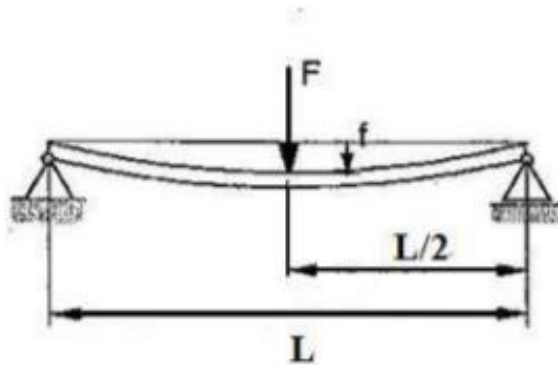
Tüm deney gruplarından 3'er adet numune 4*4*4cm'lik şekil 4.7'de gösterilen TS EN 12390-3 standardına uygun cihazda basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur.



Şekil 4.7. Basınç dayanım testi

4.4.2 Eğilme dayanımı testi

Birçok yapısal bileşen bükülmeye maruz kalır. Kaldırımlar, döşemeler ve kirişler, eğme ile yüklenen elemanlara örnektir. Temel bir örnek, merkeze yüklenen ve uçlarda desteklenen basit bir kiriştir. Bu kiriş yüklendiğinde, alt lifler (nötr eksenin altında) gerilir ve üst lifler sıkışır. Kirişin bozulması, eğer betondan yapılmışsa, betonun gerilimi basınçtan çok daha zayıf olduğu için, alt liflerde bir gerilme kırılması olacaktır. Şimdi, kirişin (betonarme) alt kısmına bir miktar çelik çubuk yerleştirirsek, çok daha büyük bir yükü destekleyebilecektir, çünkü güçlendirici çelik olarak adlandırılan çelik çubuklar yüksek bir gerilme dayanımına sahiptir (Şekil 4.8). Bunu bir adım daha ileri götürürsek, eğer takviye çeliği gerilimde ön gerilirse (öngerilmeli beton), kiriş daha da fazla yük taşıyabilir.



Şekil 4.8. Yüklenen kirişte oluşan deformasyon

Tüm deney gruplarından 3'er adet numune 4*4*16cm'lik Şekil 4.9'da görüldüğü gibi TS EN 1015-11: 2000-10 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri, 30 saniye ve 90 saniye süre içerisinde kırılma meydana gelecek şekilde 50 N/s yükleme hızı ile, sabit hızda yük uygulanarak kırılmıştır.



Şekil 4.9. Eğilme dayanımı testi

4.4.3 Dijital görüntü işleme ve analizi

Dijital Görüntü işleme ve analizi için numuneler yapılacak işleme göre kesilip Ortadoğu Teknik Üniversitesi Biyoloji Bölümündeki Biomaten Laboratuvarında analize tabi tutulmuştur. 12 adet numune sırayla Şekil 4.10'da gösterilen dijital görüntü işleme cihazına yerleştirilip taraması Hamamatsu C9300 13 MP kamera kullanılarak yapıldı. Taramada numunenin her bir katmanı 1 görüntü olarak piksel cinsinden taraması yapıldı. Tüm numunelerin görüntü analizleri yapıldıktan sonra görüntü işleme için ScanIP32-bit programı kullanıldı. Programda her bir numuneye ait görüntü verileri işlenerek numunelerdeki boşluk oranları hesaplanıp, boşluk dağılımları dijital görüntü yapılarak gösterilmiştir.



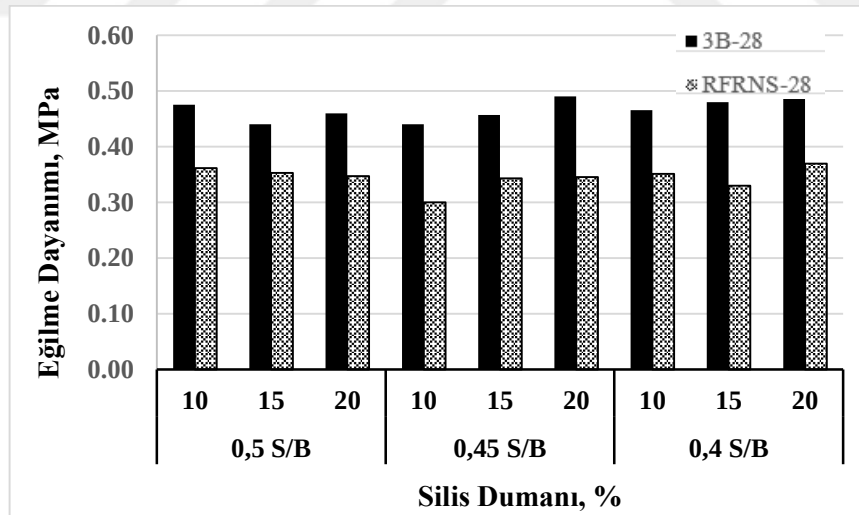
Şekil 4.10. Dijital görüntü makinesi

5 BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölüm, çalışma kapsamında gerçekleştirilen test verileri sonuçlarının değerlendirilmesini kapsamaktadır. Deneysel değişkenlerin Eğilme Dayanımı ve Basınç Dayanımı sonuçları üzerindeki etkileri incelenip, görüntü işleme yöntemi ile elde edilen görüntülerle karşılaştırması yapılmıştır.

5.1 Referans Karışımlarda Eğilme Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

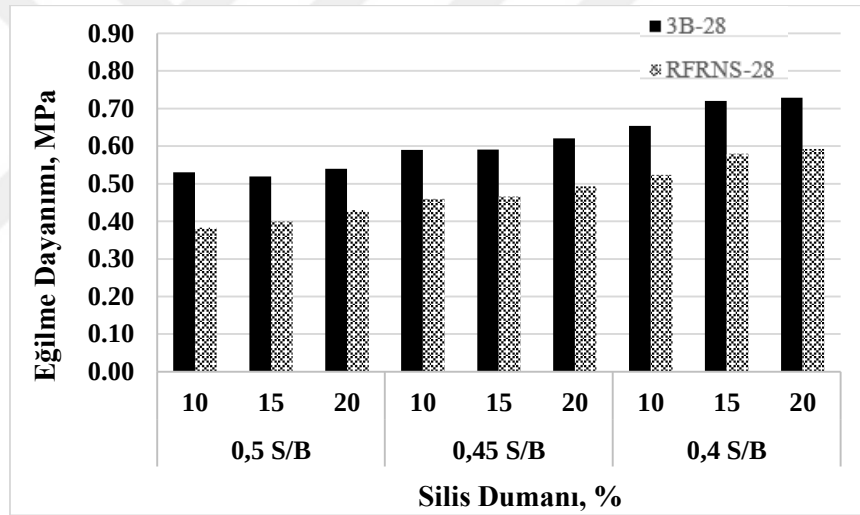
Farklı kum - bağlayıcı, su - bağlayıcı ve silis dumanı karışım oranlarında hazırlanan test numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiş eğilme dayanım test sonuçları, farklı kategorilerde değerlendirilmiştir. Herbir değişkenin dayanım sonuçları hem kendi içlerinde hem de üç boyutlu tekstil kullanımına göre grafiklerde değerlendirilmiştir. Her numune için 3 tekrar yapılmış olup, aşağıdaki matris hem 3B tekstil eklenmiş hem de eklenmemiş numuneler için 28 ve 56 günlük küre tabii tutularak uygulanmıştır.



Şekil 5.1. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,3 olan köpük betonda 28 günlük eğilme dayanımının değişimi

Şekil 5.1, üç farklı su - bağlayıcı (S-B) oranı ile hazırlanan karışımların, üç farklı oranda silis dumanı eklenmesi sonucu elde edilen numunelerdeki eğilme dayanım sonuçlarını göstermektedir. Hazırlanan numunelerin eğilme dayanım sonuçları, 3B tekstil

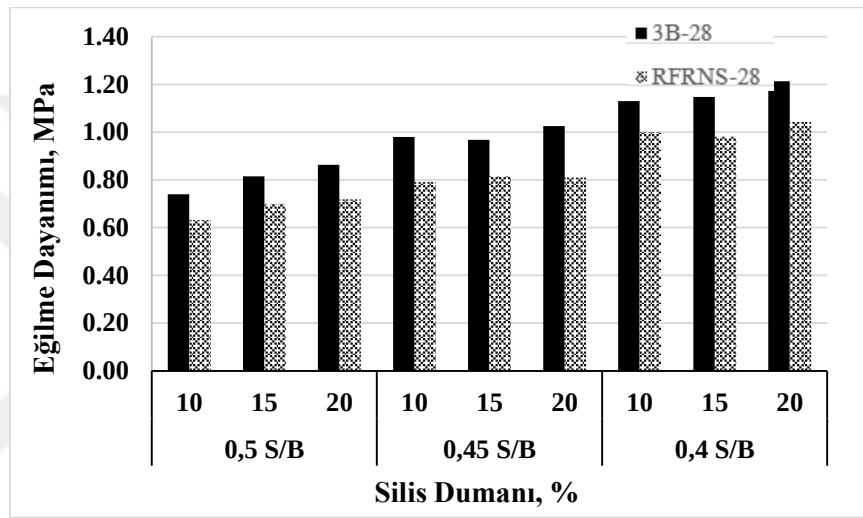
etkisinin sonuçlar üzerindeki etkisinin gözlenebilmesi açısından, referans numune sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, 3B tekstil kullanımının, referans numunelerin eğilme dayanım performansını % 29 oranına kadar yükselttiğini göstermektedir. S/B değişiminin sonuçlar üzerindeki etkisi incelendiğinde, 3B tekstil etkisinin 0,45 oranında belirgin olduğu görülmektedir. Bu oranda, eğilme dayanımı değeri, % 20 silis dumanı ikamesi ve 3B tekstil kullanılmasıyla % 29 oranında artış göstermiştir. S-B oranı arttıkça, numunenin durabilitesinin azaldığı bilinmektedir. Bunun sebebi, agrega-çimento hamurunun, geçiş bölgesinin yapısal gözenekliliğinde bir artış meydana getirmesi, bunun da çatlakların yayılmasını hızlandırması ve daha düşük gerilme yoğunluğu faktörü değerlerinin elde edilmesiyle açıklanabilir. Silis dumanının yüksek pozulanik yapısı ve boşluk doldurma özelliği nedeniyle betonun dayanımında önemli bir iyileşme vardır.



Şekil 5.2. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,2 olan köpük betonda eğilme dayanımının değişimi

Şekil 5.2, % 0,5; 0,45 ve 0,4 oranlarında su - bağlayıcı (S-B) oranı ile hazırlanan karışımların, kütle ikameli üç farklı oranda (% 10, 15, 20) silis dumanı eklenmesi sonucu elde edilen numunelerin 28 günlük eğilme dayanım sonuçlarını göstermektedir. Hazırlanan numunelerin eğilme dayanım sonuçları, 3B tekstil etkisinin sonuçlar üzerindeki etkisinin gözlenebilmesi açısından, referans numune sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, 3B tekstil kullanımının, referans numunelerin eğilme dayanım performansını % 24 oranına kadar yükselttiğini göstermektedir. S-B değişiminin sonuçlar üzerindeki etkisi incelendiğinde, eğilme dayanımı değerleri, en yüksek S-B oranında yine en yüksek

değerlerindedir ve en yüksek dayanım değerine bu oranda 3B tekstil ile hazırlanan ve % 20 silis dumanı eklenen karışımlarda ulaşılmıştır. Referans numunelerle kıyaslandığında, 3B tekstilin dayanımı en fazla artırdığı durum ise 0,5 S/B kullanımında gerçekleşmiştir. Eğilme dayanımı değeri, 3B tekstil kullanılmasıyla % 24 oranında artış göstermiştir. Bu durum, düşük S-B oranına sahip beton karışımlarında, nem gradyanının, betonun rötre değerini doğrudan etkilediğini ve betonun erken yaşta çatlamasına katkıda bulunan iki ana faktör olmasıyla desteklenebilir..



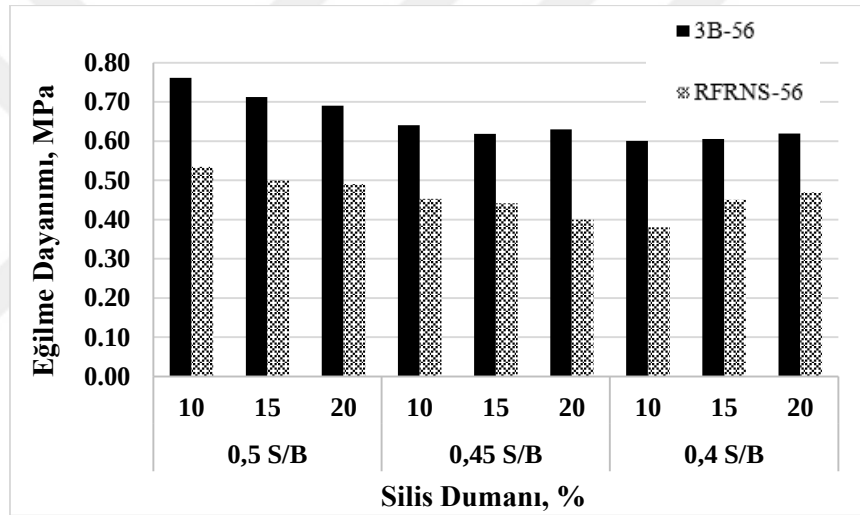
Şekil 5.3. Kum-Bağlayıcı (K/B) oranı 0,1 olan köpük betonda eğilme dayanımının değişimi

Şekil 5.3, üç farklı su - bağlayıcı (S-B) oranı ile hazırlanan karışımların, üç farklı oranda silis dumanı eklenmesi sonucu elde edilen numunelerin 28 günlük eğilme dayanım sonuçlarını göstermektedir. Hazırlanan numunelerin eğilme dayanım sonuçları, 3B tekstil etkisinin sonuçlar üzerindeki etkisinin gözlenebilmesi açısından, referans numune sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, 3B tekstil kullanımının, referans numunelerin eğilme dayanım performansını % 19 oranına kadar yükselttiğini göstermektedir. S-B değişiminin sonuçlar üzerindeki etkisi incelendiğinde, 3B tekstil etkisinin 0,45 oranında belirgin olduğu görülmektedir. Eğilme dayanımı değeri, 3B tekstil ve %20 SD kullanılmasıyla % 19 oranında artış göstermiştir. Köpük beton üretimi sırasında çimento ilavesine başvurmadan su içeriğini artırmak yerine işlenebilirliği artırmak için katkı maddelerinin kullanılmasının daha etkili olduğu görülmektedir (Yalley P P ve Sam A., 2018).

Çizelge 5.1’de 28 günlük küre maruz bırakılmış 3B tekstil içeren ve referans numunelerin deney matrisi uyarınca, değişkenlere bağlı olarak elde edilen eğilme dayanım değerleri görülmektedir.

Çizelge 5.1. 28 günlük eğilme dayanım deney sonuçları

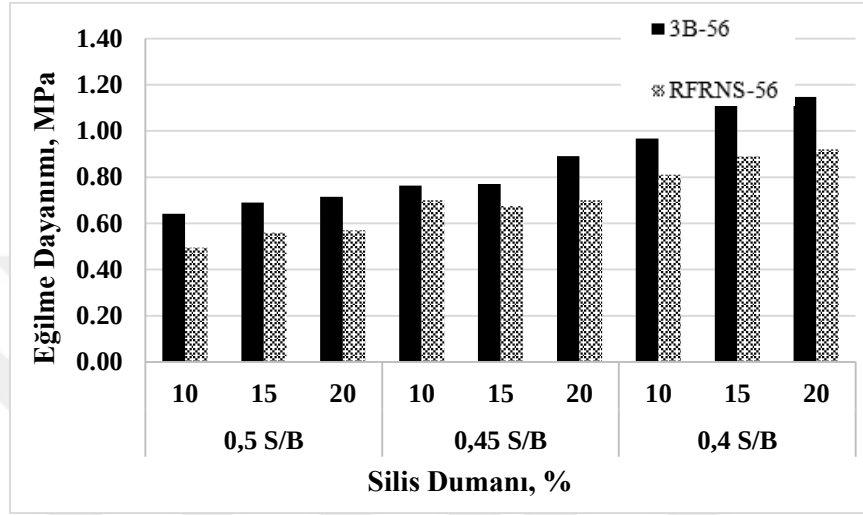
Kum-Çim	Su-Çim	SD	% Değişim
0,3	0,45	10	31,82
0,2	0,5	10	27,70
0,1	0,45	20	20,96



Şekil 5.4. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,3 olan köpük betonda 56 günlük eğilme dayanımının değişimi

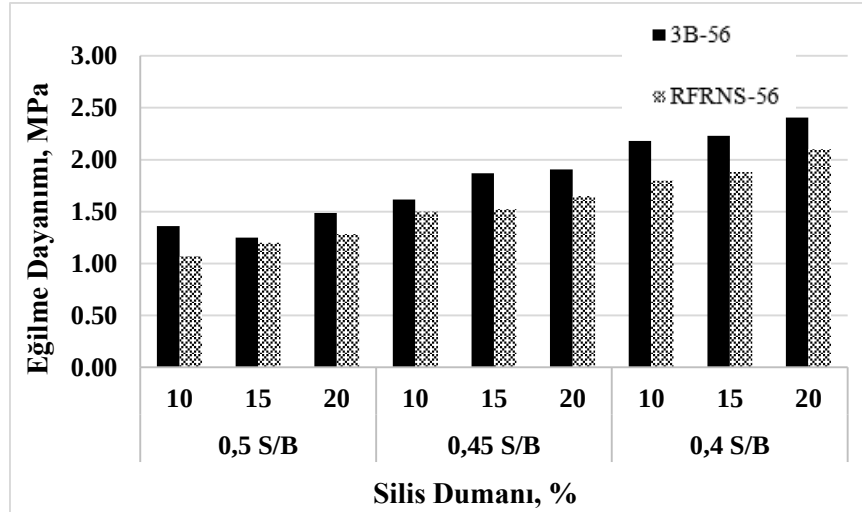
Şekil 5.4, üç farklı su - bağlayıcı (S-B) oranı ile hazırlanan karışımların, %10, 15 ve 20 oranlarında kütlece silis dumanı ikamesi sonucu elde edilen numunelerin 56 günlük eğilme dayanım sonuçlarını göstermektedir. Numunelerdeki kım-bağlayıcı oranı 0,3’te sabit tutulmuştur. Hazırlanan numunelerin eğilme dayanım sonuçları, 3B tekstil etkisinin sonuçlar üzerindeki etkisinin gözlenebilmesi açısından, referans numune sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, 3B tekstil kullanımının, referans numunelerin eğilme dayanım performansını % 32 oranına kadar yükselttiğini göstermektedir. S-B değişiminin sonuçlar üzerindeki etkisi incelendiğinde, 3B tekstil etkisinin 0,45 S-B oranında belirgin olduğu görülmektedir. Bu oranda, eğilme dayanımı değeri, %15 oranındaki silis dumanının

ikamesiyle % 32 oranında artış göstermiştir. Bu durum, agrega-çimento hamurunda, gözenekliliğin artması, çatlakların yayılımını hızlandırıp, daha düşük gerilme faktörü meydana getirmesi ve silis dumanının yüksek puzolanik yapısı ve boşluk doldurma özelliği nedeniyle betonun dayanımını iyileştirmesi ile açıklanabilir.



Şekil 5.5. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,2 olan köpük betonda 56 günlük eğilme dayanımının değişimi

Şekil 5.5, K-B oranının 0,2’de sabit tutulması ile, üç farklı su - bağlayıcı (S-B) oranı ile hazırlanan karışımların, kütlece % 10, 15, 20 oranlarında silis dumanı ikamesi sonucu elde edilen numunelerin 56 günlük eğilme dayanım sonuçlarını göstermektedir. Hazırlanan numunelerin eğilme dayanım sonuçları, 3B tekstil etkisinin sonuçlar üzerindeki etkisinin gözlenebilmesi açısından, referans numune sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, 3B tekstil kullanımının, referans numunelerin eğilme dayanım performansını % 21 oranına kadar yükselttiğini göstermektedir. S-B değişiminin sonuçlar üzerindeki etkisi incelendiğinde, 3B tekstil etkisinin 0,5 oranında belirgin olduğu görülmektedir. Eğilme dayanımı değeri, 3B tekstil kullanılmasıyla % 21 oranında artış göstermiştir. S-B değişiminin 0,4 oranında sabit tutulması ile elde edilen sonuçlar da 3B tekstil kullanımının benzer oranda (%19) eğilme dayanımının arttığını göstermektedir. SD ikamesinin, 3B tekstil ile beraber kullanımının, köpük beton dayanımı üzerindeki olumlu etkisi, katkı maddelerinin kullanımının beton dayanımı üzerindeki olumlu etkisini desteklemektedir.



Şekil 5.6. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,1 olan köpük betonda 56 günlük eğilme dayanımının değişimi

Şekil 5.6, üç farklı su - bağlayıcı (S-B) oranı ile hazırlanan karışımların, üç farklı oranda silis dumanı ikamesi sonucu elde edilen numunelerin 56 günlük eğilme dayanım sonuçlarını göstermektedir. Hazırlanan numunelerin eğilme dayanım sonuçları, 3B tekstil etkisinin sonuçlar üzerindeki etkisinin gözlenebilmesi açısından, referans numune sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, 3B tekstil kullanımının, referans numunelerin eğilme dayanım performansını % 15 oranına kadar yükselttiğini göstermektedir. S-B değişiminin sonuçlar üzerindeki etkisi incelendiğinde, 3B tekstil etkisinin 0,4 oranında belirgin olduğu görülmektedir. Eğilme dayanımı değeri, 3B tekstil kullanılmasıyla % 15 oranında artış göstermiştir. S-B değişiminin 0,45 ve 0,5 oranlarında sabit tutulması ile elde edilen sonuçlar da 3B tekstil kullanımının, numunelerin eğilme dayanımını çok benzer oranlarda (% 13) arttığını göstermektedir. Boşluk oranının fazla olduğu, düşük S-B oranına sahip karışımlarda, 3B tekstil ve SD etkisi, boşlukların doldurulması ve puzolanik etki ile birlikte, dayanımın arttığını göstermektedir.

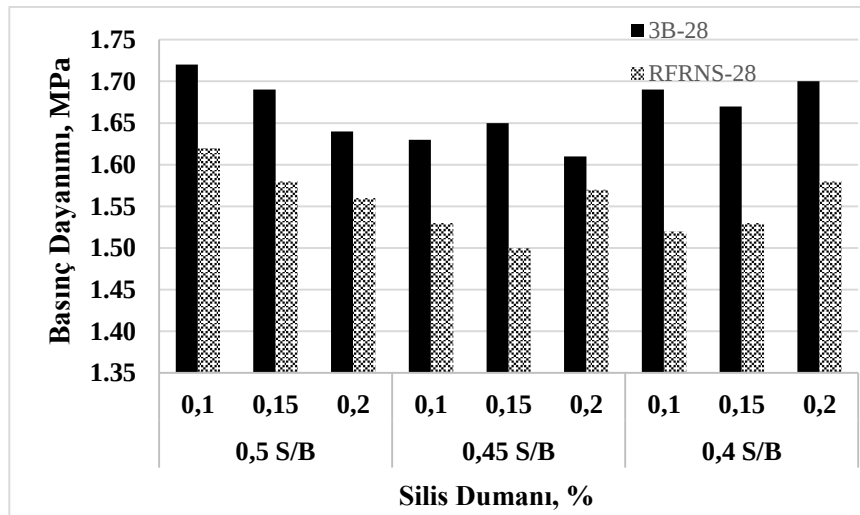
Çizelge 5.2’de 56 günlük küre maruz bırakılmış 3B tekstil içeren ve referans numunelerin deney matrisi uyarınca, değişkenlere bağlı olarak elde edilen eğilme dayanım değerleri görülmektedir.

Çizelge 5.2. 56 günlük eğilme dayanım deney sonuçları

Kum-Çim	Su-Çim	SD	% Değişim
0,3	0,45	20	36,51
0,2	0,5	10	22,89
0,1	0,45	15	18,47

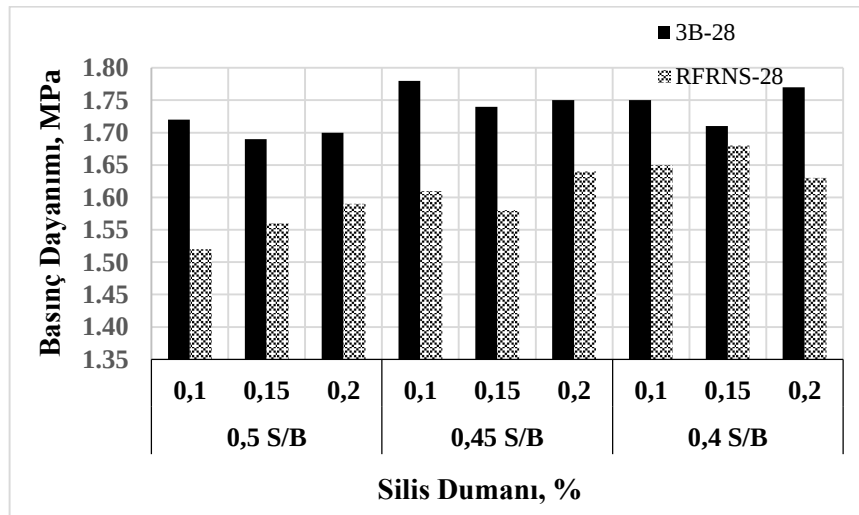
5.2 Referans Karışımlarda Basınç Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Üç farklı kum-bağlayıcı, su - bağlayıcı oranlarına % 10, 15, 20 kütle ikameli olarak eklenerek silis dumanı ile hazırlanan test numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiş basınç dayanım test sonuçları, farklı kategorilerde değerlendirilmiştir. Herbir değişkenin dayanım sonuçları hem kendi içlerinde hem de üç boyutlu tekstil kullanımına göre grafiklerde değerlendirilmiştir. Her numune için 3 tekrar yapılmış olup, aşağıdaki matris hem 3B tekstil eklenmiş hem de eklenmemiş numuneler için 28 ve 56 günlük küre tabii tutularak uygulanmıştır.



Şekil 5.7. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,3 olan köpük betonda 28 günlük basınç dayanımının değişimi

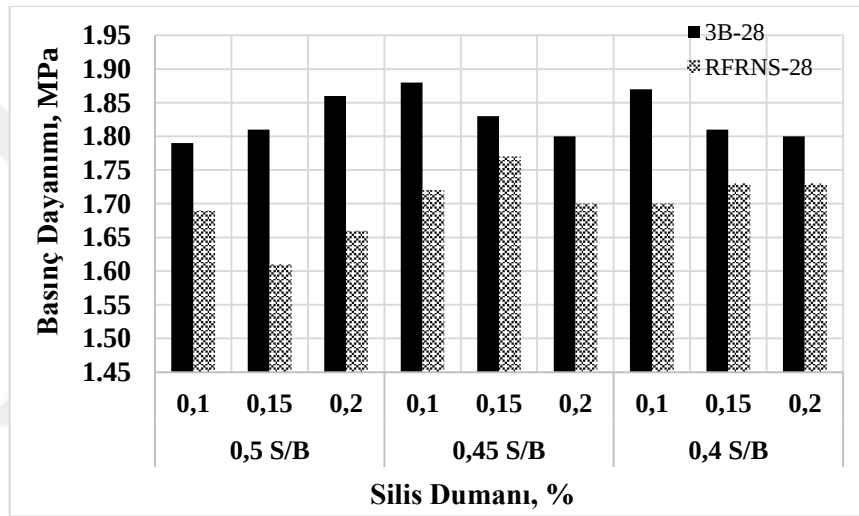
Şekil 5.7, üç farklı su - bağlayıcı (S-B) oranı ile hazırlanan karışımların, üç farklı oranda silis dumanı eklenmesi sonucu elde edilen numunelerin 28 günlük basınç dayanım sonuçlarını göstermektedir. Hazırlanan numunelerin basınç dayanım sonuçları, 3B tekstil etkisinin sonuçlar üzerindeki etkisinin gözlenebilmesi açısından, referans numune sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, 3B tekstil kullanımının, referans numunelerin basınç dayanım performansını % 9 oranına kadar yükselttiğini göstermektedir. S-B değişiminin sonuçlar üzerindeki etkisi incelendiğinde, 3B tekstil etkisinin 0,4 oranında belirgin olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı değeri, 3B tekstil kullanılmasıyla % 9 oranında artış göstermiştir. S-B değişiminin 0,45 ve 0,5 oranlarında sabit tutulması ile elde edilen sonuçlar da 3B tekstil kullanımının, numunelerin basınç dayanımını çok benzer oranlarda (% 6) arttığını göstermektedir. Bunun sebebi, agrega-çimento hamurunun, geçiş bölgesinin yapısal gözenekliliğinde bir artış meydana getirmesi, bunun da çatlakların yayılmasını hızlandırması ve daha düşük gerilme yoğunluğu faktörü değerlerinin elde edilmesiyle açıklanabilir. Silis dumanının yüksek puzolanik yapısı ve boşluk doldurma özelliği nedeniyle betonun basınç dayanımında önemli bir iyileşme vardır.



Şekil 5.8. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,2 olan köpük betonda 28 günlük basınç dayanımının değişimi

Şekil 5.8, üç farklı su - bağlayıcı (S-B) oranı ile hazırlanan karışımların, üç farklı oranda silis dumanı eklenmesi sonucu elde edilen numunelerin 28 günlük basınç dayanım sonuçlarını göstermektedir. Hazırlanan numunelerin basınç dayanım sonuçları, 3B tekstil

etkisinin sonuçlar üzerindeki etkisinin gözlenebilmesi açısından, referans numune sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, 3B tekstil kullanımının, referans numunelerin basınç dayanım performansını % 9 oranına kadar yükselttiğini göstermektedir. S-B değişiminin sonuçlar üzerindeki etkisi incelendiğinde, 3B tekstil etkisinin 0,5 ve 0,45 oranlarında belirgin olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı değerleri, 3B tekstil kullanılmasıyla % 9 oranında artış göstermiştir. En belirgin 3B tekstil etkisinin, boşluk oranı daha yüksek ve kırılma dayanımı daha düşük numunelerde görülmesi, yüksek dayanıma ve iyi bağ kombinasyonuna sahip olmasından kaynaklanır (Naaman, A. E., 2010).



Şekil 5.9. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,1 olan köpük betonda 28 günlük basınç dayanımının

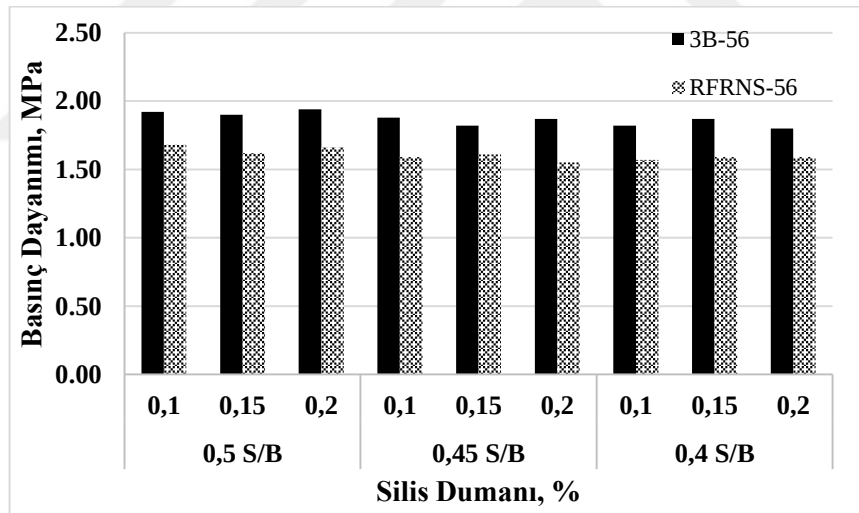
Şekil 5.9, üç farklı su - bağlayıcı (S-B) oranı ile hazırlanan karışımların, üç farklı oranda silis dumanı eklenmesi sonucu elde edilen numunelerin 28 günlük basınç dayanım sonuçlarını göstermektedir. Hazırlanan numunelerin basınç dayanım sonuçları, 3B tekstil etkisinin sonuçlar üzerindeki etkisinin gözlenebilmesi açısından, referans numune sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, 3B tekstil kullanımının, referans numunelerin basınç dayanım performansını % 10 oranına kadar yükselttiğini göstermektedir. S-Ç değişiminin sonuçlar üzerindeki etkisi incelendiğinde, 3B tekstil etkisinin 0,5 oranında belirgin olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı değerleri, 3B tekstil kullanılmasıyla % 10 oranında artış göstermiştir. 3B tekstil etkisinin 0,45 ve 0,4 oranlarında belirgin olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı değerleri, 3B tekstil kullanılmasıyla % 6 oranında artış göstermiştir. Bu

durum, beton karışımlardaki deformasyonun geri kazanımının, kontrollü matris genişmesi ve 3B tekstil kombinasyonu ile mümkün olduğu ile açıklanabilir (Naaman, A. E., 2010).

Çizelge 5.3'te 28 günlük küre maruz bırakılmış 3B tekstil içeren ve referans numunelerin deney matrisi uyarınca, değişkenlere bağlı olarak elde edilen basınç dayanım değerleri görülmektedir.

Çizelge 5.3. 28 günlük basınç dayanım deney sonuçları

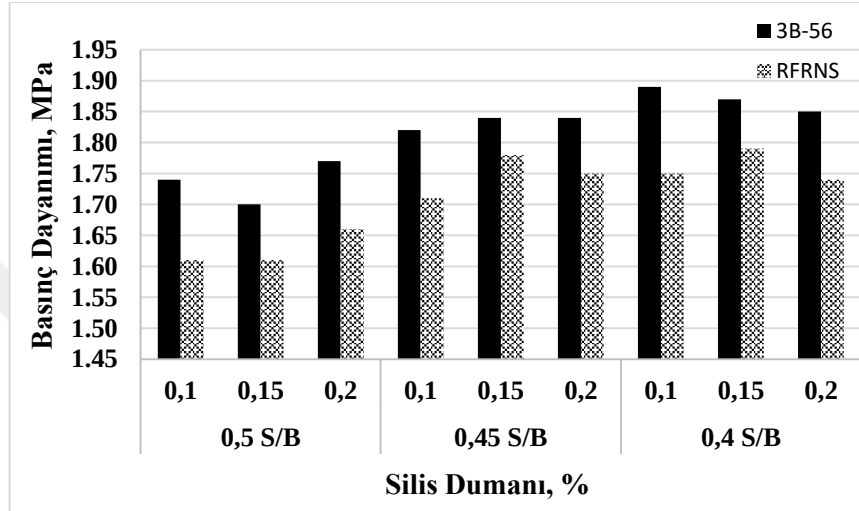
Kum-Çim	Su-Çim	SD	% Değişim
0,3	0,45	15	10,00
0,2	0,5	10	13,16
0,1	0,5	15	12,42



Şekil 5.10. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,3 olan köpük betonda 56 günlük basınç dayanımının değişimi

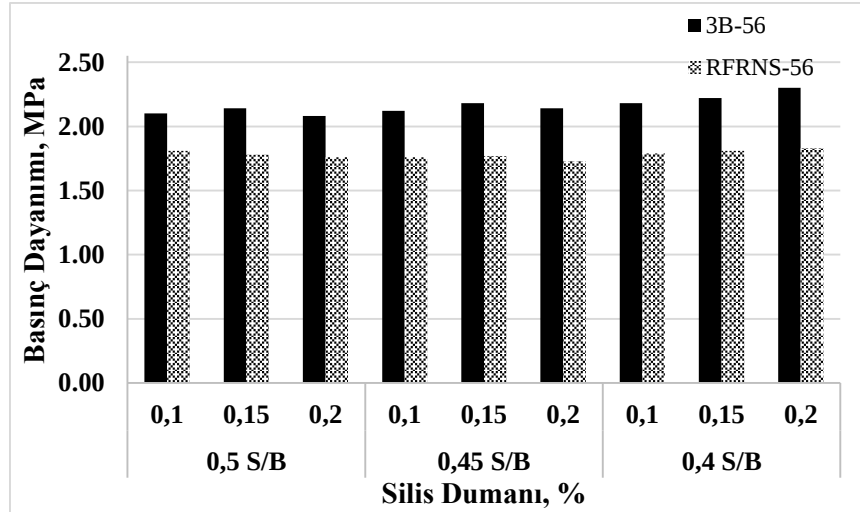
Şekil 5.10, üç farklı su - bağlayıcı (S-B) oranı ile hazırlanan karışımların, üç farklı oranda silis dumanı eklenmesi sonucu elde edilen numunelerin 56 günlük basınç dayanım sonuçlarını göstermektedir. Hazırlanan numunelerin basınç dayanım sonuçları, 3B tekstil etkisinin sonuçlar üzerindeki etkisinin gözlenebilmesi açısından, referans numune sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, 3B tekstil kullanımının, referans numunelerin basınç dayanım performansını % 17 oranına kadar yükselttiğini göstermektedir. S-B değişiminin

sonuçlar üzerindeki etkisi incelendiğinde, 3B tekstil etkisinin 0,45 oranında belirgin olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı değerleri, 3B tekstil kullanılmasıyla % 17 oranında artış göstermiştir. Benzer şekilde, 0,5 S-B durumunda da basınç dayanımının 3B tekstil kullanımıyla % 16 arttığı gözlenmiştir.



Şekil 5.11. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,2 olan köpük betonda 56 günlük basınç dayanımının değişimi

Şekil 5.11, üç farklı su - bağlayıcı (S-B) oranı ile hazırlanan karışımların, üç farklı oranda silis dumanı eklenmesi sonucu elde edilen numunelerin 56 günlük basınç dayanım sonuçlarını göstermektedir. Hazırlanan numunelerin basınç dayanım sonuçları, 3B tekstil etkisinin sonuçlar üzerindeki etkisinin gözlenebilmesi açısından, referans numune sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, 3B tekstil kullanımının, referans numunelerin basınç dayanım performansını % 7 oranına kadar yükselttiğini göstermektedir. S-B değişiminin sonuçlar üzerindeki etkisi incelendiğinde, 3B tekstil etkisinin 0,5 oranında belirgin olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı değerleri, 3B tekstil kullanılmasıyla % 7 oranında artış göstermiştir. Bu durum, 3B tekstilin, köpük betonun elastik modülüne mümkün olduğunca yakın bir eşdeğer elastik modül elde etmeyi destekleyen tekstil mimarisi ile desteklenebilir.



Şekil 5.12. Kum-Bağlayıcı (K-B) oranı 0,1 olan köpük betonda 56 günlük basınç dayanımının değişimi

Şekil 5.12, üç farklı su - bağlayıcı (S-B) oranı ile hazırlanan karışımların, üç farklı oranda silis dumanı eklenmesi sonucu elde edilen numunelerin 56 günlük basınç dayanım sonuçlarını göstermektedir. Hazırlanan numunelerin basınç dayanım sonuçları, 3B tekstil etkisinin sonuçlar üzerindeki etkisinin gözlemlenmesi açısından, referans numune sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, 3B tekstil kullanımının, referans numunelerin basınç dayanım performansını % 24 oranına kadar yükselttiğini göstermektedir. S-B değişiminin sonuçlar üzerindeki etkisi incelendiğinde, 3B tekstil etkisinin 0,45 ve 0,4 oranlarında belirgin olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı değerleri, 3B tekstil kullanılmasıyla % 23 oranında artış göstermiştir.

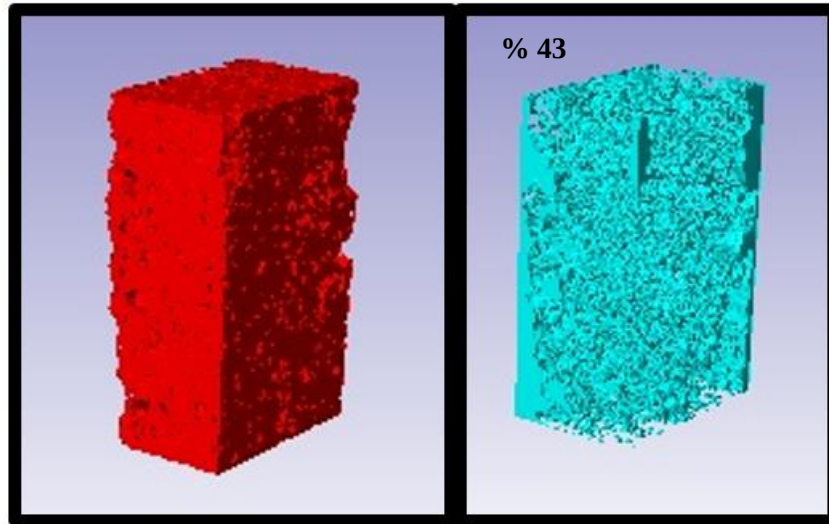
Çizelge 5.4'te 56 günlük küre maruz bırakılmış 3B tekstil içeren ve referans numunelerin deney matrisi uyarınca, değişkenlere bağlı olarak elde edilen basınç dayanım değerleri görülmektedir.

Çizelge 5.4. 56 günlük basınç dayanım deney sonuçları

Kum-Çim	Su-Çim	SD	% Değişim
0,3	0,45	20	25,65
0,2	0,5	10	8,07
0,1	0,40	20	25,68

5.3 Dijital Görüntü İşleme ve Analiz Sonuçları

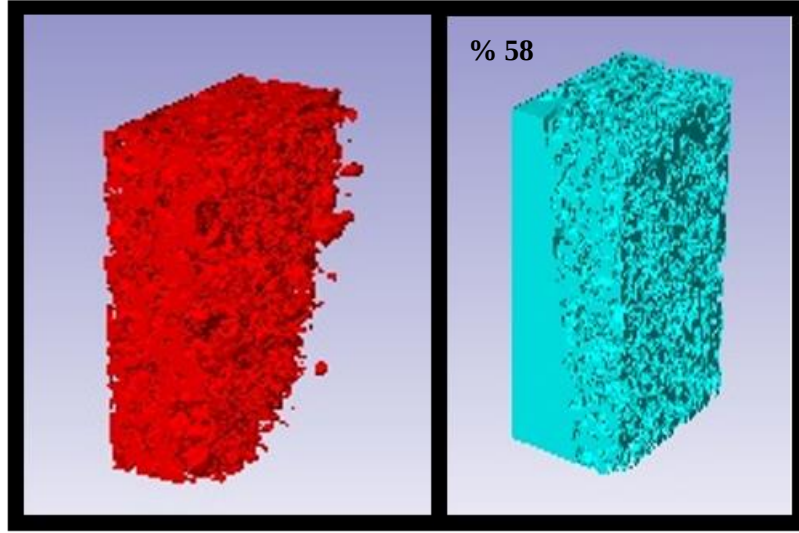
Analiz edilecek numuneler, gerekli boyutlarda kesilip Ortadoğu Teknik Üniversitesi Biyoloji bölümü, Biomaten Laboratuvarında Hamamatsu C9300 13 MP kamera kullanılarak analiz edilmiştir. 3 adet numunenin analizi gerçekleştirilmiş ve taramada numunenin her bir katmanı 1 görüntü olarak piksel cinsinden taraması yapıldı. Tüm numunelerin görüntü analizleri yapıldıktan sonra görüntü işleme için ScanIP32-bit programı kullanıldı. Programda her bir numuneye ait görüntü verileri işlenerek numunelerdeki boşluk oranları hesaplanıp, boşluk dağılımları dijital görüntü yapılarak gösterilmiştir.



Şekil 5.13. K-B oranı 0,1, S-B oranı 0,4, SD-B oranı 0,2 olan köpük betonun dijital görüntü analizi

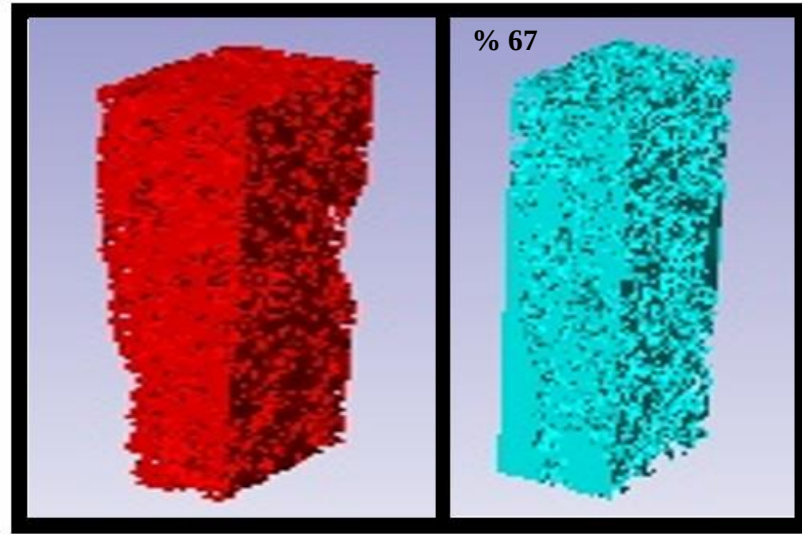
Şekil 5.13'te K-B oranı 0,1, S-B oranı 0,4, SD-B oranı 0,2 olan, beton numunelerine ait sırasıyla beton hacmi ve boşluk hacmi görülmektedir. Dijital görüntü analizi sonuçları,

numune yapısındaki boşlukların % 43 seviyesinde olduğunu ve yer yer birbirleriyle temas halinde olmalarına rağmen, homojen dağılmadığını göstermektedir.



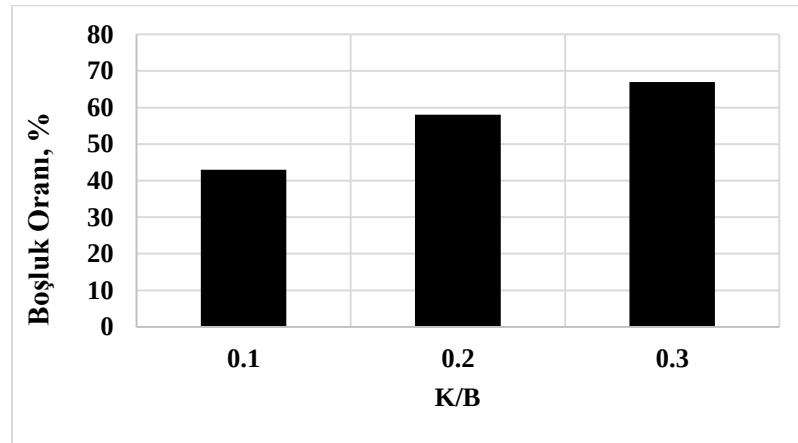
Şekil 5.14. K-B oranı 0,2, S-B oranı 0,4, SD-B oranı 0,2 olan köpük betonun dijital görüntü analizi

Şekil 5.14, K-B oranı 0,2, S-B oranı 0,4, SD-B oranı 0,2 olan numuneden dijital görüntü analizi sonucu elde edilen beton hacmi ve boşluk oranlarını göstermektedir. Numune yapısındaki boşlukların % 58 seviyesinde olduğu ve yer yer birbirleriyle temas halinde olmalarına rağmen, homojen dağılmadığını göstermektedir.



Şekil 5.15 K-B oranı 0,3, S-B oranı 0,4, SD-B oranı 0,2 olan köpük betonun dijital görüntü analizi

Şekil 5.15, dijital görüntü analizi sonucu elde edilen K-B oranı 0,3, S-B oranı 0,4, SD-B oranı 0,2 olan numune için beton hacmi ve boşluk oranlarını göstermektedir. Numune yapısındaki boşlukların % 67 seviyesinde olduğu ve yer yer birbirleriyle temas halinde olmalarına rağmen, homojen dağılmadığını göstermektedir.



Şekil 5.16. Mikro-CT analiz sonuçları

Mikro-CT analiz sonuçları, sabit oranda tutulan Su-Bağlayıcı (S-B) ve Silis Dumanı-Bağlayıcı (SD-B) oranlarına karşın, Kum-Bağlayıcı (K-B) oranlarının değiştirilmesi ile elde

edilen üç numuneden elde edilmiştir. Şekil 5.16, sabit oranlardaki S-B ve SD-B oranlarında, K-B oranının artmasının boşluk oranını artırdığını göstermektedir.



6 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, yapısal amaçlara uygun, iyi yalıtım ve dayanıklılık özelliklerine sahip köpüklü beton karışımları üretmeyi ve hasar davranışlarını değerlendirmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda diğer çalışmalardan farklı olarak, köpüklü betona 3B tekstil eklenmiştir. 3B tekstil etkisinin anlaşılabilmesi açısından bir dizi deney programı oluşturulmuş ve her deney, referans numuneleri ve 3B tekstil içeren numuneler olarak iki grup için, 28 ve 56'şar günlük küre maruz bırakılan numunelere uygulanmıştır. Buna ek olarak, 3B tekstil ilave edilen köpük beton numunelerinin mikroyapısındaki değişikliklerle ilişkili mekanik yükler altındaki davranışı araştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Eğilme dayanım deney sonuçları, gerek 28, gerekse de 56 günlük açık havada küre maruz bırakılmış numuneler açısından incelendiğinde, 3B tekstilin dayanım değerlerinde %32'ye varan artışla oldukça etkili olduğu gözlenmiştir.
- 28 günlük küre tabii tutulmuş numunelerde Kum-Bağlayıcı oranının en yüksek olduğu 0,3 durumunda, 3B tekstil, dayanımı % 26 artırmış; kum-bağlayıcı oranının azalması ile (0,2 ve 0,1) 3B tekstil etkisi, eğilme dayanım değerleri üzerindeki % 21,5 ve %16 ile daha düşük gözükmemektedir. Fakat her üç değer için de 3B tekstil kullanımının eğilme dayanımları üzerindeki olumlu etkisi açıktır.
- 28 günlük küre tabii tutulmuş numunelerde eğilme dayanım deney sonuçları üzerindeki 3B tekstil etkisi, S-B bazında karşılaştırıldığında, en yüksek etkinin 0,45 S-B oranında %29 oranı ile gözlenmiştir. Buna ek olarak, 0,5 S-B oranında da 3B tekstil ilavesinin, değerler üzerindeki etkisinin oldukça yakın olduğu gözlenmiştir (% 24).
- 56 günlük küre tabii tutulmuş numunelerde eğilme dayanım deney sonuçları üzerindeki 3B tekstil etkisi, kum-bağlayıcı bazında karşılaştırıldığında, en yüksek etki, oranın 0,3 olduğu durumda % 30 olarak gözlenmiştir. Kum-bağlayıcı oranının

azalması, 3B tekstil etkisini düşürmekte, fakat en düşük olan 0,1 kum-bağlayıcı oranındaki iyileştirme etkisi de %14 ile kabul edilebilir düzeydedir.

- 56 günlük küre tabii tutulmuş numunelerde eğilme dayanım deney sonuçları üzerindeki 3B tekstil etkisi, S-B bazında karşılaştırıldığında, en yüksek etkinin 0,45 S-B oranında % 31,5 oranı ile gözlenmiştir. Buna ek olarak, 0,5 S-B oranında da 3B tekstil ilavesinin, değerler üzerindeki etkisinin oldukça yakın olduğu gözlenmiştir (% 30).
- 28 günlük küre tabii tutulmuş numunelerde Kum-Bağlayıcı oranının 0,2 olduğu durumunda, 3B tekstil basınç dayanımını % 8 artırmış; fakat diğer kum-bağlayıcı oranlarında da, 3B tekstil basınç dayanımını yakın değerlerde artırmıştır (%7,5).
- 28 günlük küre tabii tutulmuş numunelerde S-B oranının 0,5 olduğu durumunda, 3B tekstil basınç dayanımını % 9,5 artırmıştır.
- 56 günlük küre tabii tutulmuş numunelerde Kum-Bağlayıcı oranının 0,1 olduğu durumunda, 3B tekstilin, basınç dayanımını % 21 artırdığı gözlenmiştir.
- 28 günlük küre tabii tutulmuş numunelerde S-B oranının 0,4 olduğu durumunda, 3B tekstilin, basınç dayanımını % 26 artırdığı gözlenmiştir.
- Mikro-CT analiz sonuçları, sabit oranlardaki S-B ve Silis Dumanı-Bağlayıcı (SD-B) oranlarında, Kum-Bağlayıcı (K-B) oranının artmasının boşluk oranını artırdığını göstermektedir.

Çalışma kapsamında yapılan labaratuvar deney sonuçları, 3B tekstil kullanımının gerek 28 gün, gerekse de 56 günlük kürlerde hem eğilme, hem de basınç dayanım değerlerini gözle görülür derecede artırdığını göstermiştir. Bu etki, eğilme dayanım sonuçları açısından değerlendirildiğinde, kum - bağlayıcı oranının en yüksek (0,3) olduğu durumda daha belirgin olarak göze çarpmaktadır. Su - bağlayıcı açısından değerlendirildiğinde, en yüksek eğilme dayanım değerleri, %50 ve 45 oranlarındaki %10 silis dumanı ikamesinde gözlenmiştir. Sonuçlar basınç dayanımı açısından değerlendirildiğinde, 0,1 kum-bağlayıcı oranındaki, 0,40 S-B oranına karşılık, 0,2 silis dumanı ikamesiyle en yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir.

Bu çalışmanın sonucunda, 0,3 kum-bağlayıcı oranına ek olarak, 0,45 su-bağlayıcı ve %20 silis dumanı eklenmesiyle oluşturulan köpük beton numunelerin 3B tekstil ile güçlendirilmesi, yüksek dayanıma sahip olmaları nedeni ile önerilir. Gelecek çalışmalar için beton üzerinde 3B tekstil kullanımının, sıcaklık değişimi ile eğilme ve basınç dayanımı üzerindeki etkilerinin incelenmesi önerilir. Buna ek olarak tekstil kullanımının oluşturacağı ekonomik katkılar da araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- ACE Committee 544, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI Concrete International, 4(5): 9-30 (May, 1982).
- Ahmed, S. F. U. and Mihashi, H., A review on durability properties of strain hardening fibre reinforced cementitious composites, Cement and Concrete Composites, 29, 265–376, 2007.
- AlTaan, S. A., Mohammed, A. A., & Al-Jaffal, A. A. (2012). Breakout capacity of headed anchors in steel fibre normal and high strength concrete. Asian Journal of Applied Sciences, 5(7), 485-496.
- Batool, F., & Bindiganavile, V. (2020). Fresh properties of fiber reinforced cement-based foam with Pozzolans. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 1-12.
- Baykan, N., 2010. Robotik Bir Mikroskop Sisteminden Elde Edilen Görüntülerin Görüntü İşleme Ve Yapay Zekâ Yöntemleri İle Analizi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 151s, Konya.
- Bejan, A., Fowler, A. J., & Stanescu, G. (1995). The optimal spacing between horizontal cylinders in a fixed volume cooled by natural convection. International journal of heat and mass transfer, 38(11), 2047-2055.
- Bentur, A. and Mindess, S., Fibre Reinforced Cementitious Composites, Taylor & Francis, London, U.K., 2007.
- Bindiganavile, V., Batool, F., Suresh, N.: Effect of fly ash on thermal properties of cement based foams evaluated by transient plane heat source. Ind. Concr. J. 86(11), 7–14 (2012)
- Bing, C., Zhen, W., & Ning, L. (2012). Experimental research on properties of high-strength foamed concrete. Journal of materials in civil engineering, 24(1), 113-118.
- Bramshuber, W. (2006). Textile reinforced concrete-state-of-the-art report of RILEM TC 201-TRC. Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Materiaux, Systemes de Construction et Ouvrages (RILEM).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Brameshuber, W. (2010). International RILEM Conference on Material Science-2nd ICTRC-Textile Reinforced Concrete-Theme 1.
- Brameshuber, W. (ed.), Textile Reinforced Concrete: State of the Art Report, RILEM TC 201-TRC, RILEM Publications, Paris, France, 2006.
- Brameshuber, W., Ed., (2006), “Textile Reinforced Concrete,” State-of the-Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC, Report 36, RILEM Publications, Bagneux, France, 273 pages.
- Brewer, W.E. Controlled low strength materials (CLSM). In Radical Concrete Technology; Dhir, R.K., Hewlett, P.C., Eds.; E and FN Spon: New York, NY, USA, 1996; pp. 655–667.
- Chiu, C. H., & Cheng, C. C. (2003). Weaving method of 3D woven preforms for advanced composite materials. Textile research journal, 73(1), 37-41.
- Chou, S., & Chen, H. E. (1995). The weaving methods of three-dimensional fabrics of advanced composite materials. Composite structures, 33(3), 159-172.
- Chung, S.-Y.; Han, T.-S. Reconstruction of random two-phase polycrystalline solids using low-order probability functions and evaluation of mechanical behavior. Comput. Mater. Sci. 2010, 49, 705–719. [Google Scholar] [CrossRef]
- Curbach, M. and Heeger, J. (eds), Sachstandbericht zum Einsatz von Textilien im Massivbau (German State of the Art Report for the use of technical textiles in massive structure, DAfStb, Heft 488, Beuth, Berlin, 1998
- Curbach, M., Ortlepp, R., and Triantafillou, T. C., TRC for rehabilitation, Chapter 7, in W. Brameshuber (ed.), Textile Reinforced Concrete: State of the Art Report, RILEM TC 201-TRC, RILEM Publications, Paris, France, 2006, pp. 221–236
- Ficco, G., Iannetta, F., Ianniello, E., Alfano, F. R. D. A., & Dell’Isola, M. (2015). U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings. Energy and Buildings, 104, 108-121.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gandage, A. S., Rao, V. V., Sivakumar, M. V. N., Vasan, A., Venu, M., & Yaswanth, A. B. (2013). Effect of perlite on thermal conductivity of self compacting concrete. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 104, 188-197.
- Gokhale, A.; Tewari, A.; Garmestani, H. Constraints on microstructural two-point correlation functions. *Scr. Mater.* 2005, 53, 989–993. [Google Scholar] [CrossRef]
- Graham P. (2009): Building ecology: First principles for a sustainable built environment. Wiley.com
- NORAN Instruments (1999) Energy dispersive X-ray microanalysis: An introduction. Middleton, Wisconsin
- Gries, T., Roye, A., Offermann, P., Engler, T., and Peled, A., Textiles, Chapter 3, in W. Brameshuber (ed.), *Textile Reinforced Concrete: State of the Art Report*, RILEM C 201-TRC, RILEM Publications, Paris, France, 2006, pp. 11–27.
- Hegger, J., Will, N. et al. 2006. Applications of Textile Reinforced Concrete Textile. In Brameshuber, W. *State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC*. RILEM Report 36, RILEM Publications, Bagneux, France, 2006.
- Hoff, G.C. Porosity-strength considerations for cellular concrete. *Cem. Concr. Res.* **1972**, 2, 91–100. [CrossRef]
- James, I. D. (1996). ACI Committee 544, “State-of-the-art report on fiber reinforced concrete”, ACI Committee 544 report 544.1 R-96. Detroit: American Concrete Institute.
- Karahan, O.; Yakupoglu, A. Resistance of alkali-activated slag mortar to abrasion and fire. *Adv. Cem. Res.* **2011**, 23, 289–297. [CrossRef]
- Ke, Y.; Beaucour, A.L.; Ortola, S.; Dumontet, H.; Cabrillac, R. Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete. *Constr. Build. Mater.* 2009, 23, 2821–2828. [Google Scholar] [CrossRef]
- Kearsley, E.P.; Wainwright, P.J. The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete. *Cem. Concr. Res.* **2001**, 31, 105–112. [CrossRef]

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Klyuev, S.V.; Khezhev, T.A.; Pukhareno, Y.V.; Klyuev, A.V. Fiber Concrete on the Basis of Composite Binder and Technogenic Raw Materials. *Mater. Sci. Forum.* **2018**, 931, 603–607. [CrossRef]
- Lee, Y.H.; Lim, M.H.; Lee, Y.L.; Lee, Y.Y.; Tan, C.S.; Mohammad, S.; Ma, C.K. Compressive strength of lightweight foamed concrete with charcoal as a sand replacement. *Indian J. Eng. Mater. Sci.* **2018**, 25, 98–108. [CrossRef]
- Lee, Y.L. Structural Behaviour of Slab Panel System with Embedded Cold-Formed Steel Skeletal Frame. Ph.D. Thesis, Universiti Teknologi Malaysia, Johor Bahru, Malaysia, 2016.
- Lu, B.; Torquato, S. Lineal-path function for random heterogeneous materials. *Phys. Rev. A* 1992, 45, 922–929. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
- Luca, S. Preparing Foamed Concrete for Wall Backfillings, Comprises Forming Cement Paste Comprising Cement, Water and Network Agent by Mixing of the Components in Planet Mixer, Forming a Foam by Foam Generator, and Mixing the Paste and the Foam. DE Patent App. DE201-010-062-762, 14 June 2012. [Google Scholar]
- Meilin, P. Development of Structural Grade Foamed Concrete. Ph.D. Thesis, University of Dundee, Scotland, UK, 1999.
- Mo, K.H.; Alengaram, U.J.; Jumaat, M.Z. Bond properties of lightweight concrete—A review. *Constr. Build. Mater.* **2016**, 112, 478–496. [CrossRef]
- Mouritz A, Bannister M, Falzon P, et al. Review of applications for advanced threedimensional fibre textile composites. *Compos Part A: Appl Sci Manuf* 1999; 30: Naaman, A.E., (2000). “Ferrocement and Laminated Cementitious Composites.” Techno Press 3000, Ann Arbor, Michigan, USA, ISBN0-9674939-0-0, 370 pages, (www.technopress3000.com).
- Nandi, S.; Chatterjee, A.; Samanta, P.; Hansda, T. Cellular Concrete and its facets of application in Civil Engineering. *Int. J. Eng. Res.* **2016**, 5, 37–43. [CrossRef]
- Narayanan, N. Influence of Composition on the Structure and Properties of Aerated Concrete; IIT Madras: Chennai, India, 1999.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Natesayer, K.; Chan, C.; Sinha-Ray, S.; Song, D.; Lin, C.L.; Miller, J.D.; Garboczi, E.J.; Foster, A.M. X-ray CT imaging and finite element computations of the elastic properties of a rigid organic foam compared to experimental measurements: Insights into foam variability. *J. Mater. Sci.* 2015, 50, 4012–4024. [Google Scholar] [CrossRef]
- Neithalath, N.; Sumanassoriya, M.S.; Deo, O. Characterizing pore volume, size, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. *Mater. Charact.* 2010, 61, 802–813. [Google Scholar] [CrossRef]
- Newman, J. & Ban, S. C (2003). *Advanced concrete technology constituent Materials*, Oxford: Butterworth – Heinemann, P.P, 1/8
- Ng, Soon-Ching, and Kaw-Sai Low. "Thermal conductivity of newspaper sandwiched aerated lightweight concrete panel." *Energy and Buildings* 42.12 (2010): 2452-2456.
- Papadopoulos, A.M.; Giama, E. Environmental performance evaluation of thermal insulation materials and its impact on the building. *Build. Environ.* **2007**, 42, 2178–2187. [CrossRef]
- Patterson, B.M.; Escobedo-Diaz, J.P.; Dennis-Koller, D.; Cerreta, E. Dimensional quantification of embedded voids or objects in three dimensions using X-ray tomograph. *Microsc. Microanal.* 2012, 18, 390–398. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
- Persson, B. The effect of silica fume on the principal properties of concrete. *Adv. Des. Concr. Struct.* **1997**, 161–168.
- Plastics–Determination of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity–Part 2: Transient Plane Heat Source (Hot Disk) Method; ISO 22007-2:2015, DIN EN 1990; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2015.
- Rahyan, F.; Mohd, Z.S. Paper Fiber Reinforced Foam Concrete. In *Proceedings of the 2nd International conference on Built Environment in Developing Countries ICBEDC*, Penang, Malaysia, 3–4 December 2008.
- Reinhardt, H. W. and Naaman, A. E. (eds.), in *Fifth International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC5)*, 2007.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Silva, M.A.G.: Influence of environmental aging on properties of polymeric mortars. *J. Mater. Civ. Eng.* 16(5), 461–468 (2004)
- Tewari, A.; Gokhale, A.M.; Spowart, J.E.; Miracle, D.B. Quantitative characterization of spatial clustering in three-dimensional microstructures using two-point correlation functions. *Acta Mater.* 2004, 52, 307–319. [Google Scholar] [CrossRef]
- Toledo Filho, R. D., Silva, F. A., Koenders, E. A. B., and Fairbairn, E. M. R. (eds.), in *Second International RILEM Conference on Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC2-Rio)*, 2011.
- Torquato, S. *Random Heterogeneous Materials*; Springer: New York, NY, USA, 2002; pp. 327–335. [Google Scholar]
- Van Zijl, G. P. A., Wittman, F. H., Oh, B. H., Kabele, P., Toledo Filho, R. D., Fairbarin, E. M. R., Slowik, V. et al., Durability of strain hardening cement based composites (SHCC), *Materials and Structures*, 45, 1447–1463, 2012.
- Wang, X.; Huang, J.; Dai, S.; Ma, B.; Jiang, Q. Investigation of silica fume as foam cell stabilizer for foamed concrete. *Constr. Build. Mater.* **2020**, 237, 117514. [CrossRef]
- Wong, H.S. & Buenfeld, N.R. (2006c), Monte Carlo simulation of electron-solid interactions in cement-based materials, *Cement and Concrete Research.*, Vol. 36, No. 6, pp. 1076-1082
- WULFHORST, B., Franzke, G., Will, N., ARNOLD, R., BISCHOFF, T., DEUSSER, S., & Schorn, H. (1998). Sachstandbericht zum Einsatz von Textilien im Massivbau. *Deutscher Ausschuss fuer Stahlbeton*, (488).
- Yalley, P. P., & Sam, A. (2018). Effect of sand fines and water/cement ratio on concrete properties. *Civil Engineering Research Journal*, 4(3), 1-7.
- Yio, M.H.N., Wong, H.S. & Buenfeld, N.R. (2016), 3B Monte-Carlo simulation of backscattered electron signal variation across pore-solid boundaries in cement-based materials, *Cement and Concrete Research*, Vol. 89, pp. 320-331

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Yolcu, G., 2014. Kinect Destekli Gerçek Zamanlı Sanal Ayna Tasarımı. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 64s, Sakarya.
- Zhang, Weiping, et al. "Mesoscale model for thermal conductivity of concrete." *Construction and Building Materials* 98 (2015): 8-16

