

T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



SİLİS DUMANI VE ÇELİK LİF KATKILI HAFİF BETON
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Abdullah Sasi Abdullah ALTABEEB

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Dr. Öğr. Üyesi Selçuk MEMİŞ

NİSAN - 2021
KASTAMONU

TEZ ONAYI

Abdullah Sası Abdullah ALTABEEB tarafından hazırlanan “**Çelik Lif ve Silis Dumanı Katkılı Hafif Betonların Özelliklerinin İncelenmesi**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **27.04.2020** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Dr. Öğr. Üyesi Selçuk Memiş Kastamonu Üniversitesi
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Hasbi YAPRAK Kastamonu Üniversitesi
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN Atatürk Üniversitesi

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü	Prof. Dr. İzzet ŞENER
----------------	-----------------------	-------

TAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Abdullah Sası Abdullah ALTABEEB

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SİLİS DUMANI VE ÇELİK LİF KATKILI HAFİF BETON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ABDULLAH SASI ABDULLAH ALTABEEB

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DANIŞMAN: Dr. Öğr. Üyesi Selçuk MEMİŞ

Hafif betonlar, normal betonlarla kıyaslandığında; hafiflik, ses ve ısı yalıtımı sağlama, yangına karşı dayanım gibi birçok üstünlükleri olan bir malzemedir. Üretiminde farklı metotlar olmasına rağmen en çok kullanılan hafif agrega ile üretilmiş betonlar, mühendislere tasarım aşamasında esneklik sağlamaktadır. Yapılardaki sabit yükün azaltılmasıyla, boyutlarda küçültme yapılabilen yapı elemanları, daha az temel maliyeti, ısı ve ses yalıtım performansı, sismik etkilere karşı güçlendirilmiş performans gibi önemli avantajlar elde edilmektedir. Fakat betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin beton bileşiminde var olan agregaların özellikleri ile doğrudan ilgili olması nedeniyle hafif agregalı betonlar yeterli dayanıma ulaşırlar bile bazen elastik özellikleri bakımından daha olumsuz durumda olabilmektedirler. Bu çalışmayla Taguchi tekniği kullanılarak 16 farklı karışım tasarlanmıştır; silis dumanı (SD) %0, %5, %10 ve %15 ; pomza/kum %0, %50, %75 ve %100; pomza/iri agrega %0, %50, %75 ve %100; çelik lif oranı ise %0, %0,5, %1 ve %2 oranlarında seçilmiştir. SD çimento yerine; pomza ise agrega yerine ikame edilerek, mineral katkıların hafif betonun performansı üzerine etkisi araştırılmıştır. Numuneler su kürü olmak üzere kürlenmiş, sertleşmiş numunelere 3, 7, 28, 90 ve 180. günün sonunda bazı fiziksel özellikler ile eğilme, basınç, aşınma ve yangın dirençleri ölçülmüştür. Deney sonuçları pomza/kum oranının %50-100 arasında ve SD'nin %15 kullanımı durumunda 39 MPa bir dayanıma ulaşabileceğini, SD kullanılmadığında ise %75 pomza/kum ve %75pomza/iri agrega oranında ancak 37 MPa dayanımlara ulaşabileceğini göstermiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Pomza, silis dumanı, hafif beton, çelik lif, basınç dayanımı

Nisan 2021, 68 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT CONCRETE ADDED WITH SILICA FUME AND STEEL FIBER

ABDULLAH SASI ABDULLAH ALTABEEB

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING**

SUPERVISOR: ASSİST. PROF. DR. SELÇUK MEMİŞ

When lightweight concretes are compared with normal concretes; It is a material with many advantages such as lightness, sound and heat insulation, and fire resistance. Although there are different methods in its production, the most widely used lightweight aggregate concrete provides flexibility to engineers at the design stage. By reducing the constant load in the buildings, significant advantages such as reduced size of the building elements, less foundation cost, heat and sound insulation performance, reinforced performance against seismic effects are obtained. However, due to the fact that the physical and mechanical properties of concretes are directly related to the properties of the aggregates present in the concrete composition, even though lightweight aggregate concretes reach sufficient strength, they can sometimes be in a more negative situation in terms of elastic properties. With this study, 16 different mixtures were designed using the Taguchi technique; silica fume (SD) 0%, 5%, 10% and 15%; pumice/sand 0%, 50%, 75% and 100%; pumice/coarse aggregate 0%, 50%, 75% and 100%; steel fiber ratio was chosen as 0%, 0.5%, 1% and 2%. The effect of mineral additives obtained by substituting SD instead of cement and pumice instead of aggregate on the performance of lightweight concrete was investigated. At the end of the 3rd, 7th, 28th, 90th and 180th days, some physical properties and flexural strength, compressive strength, abrasion and fire resistances were measured on the water cured and hardened samples. The test results showed that if the pumice/sand ratio is between 50-100% and SD is used at 15%, a strength of 39 MPa can be achieved. But when SD is not used, only 37 MPa strengths can be achieved at 75% pumice/sand and 75% pumice/coarse aggregate.

KEYWORDS: Pumice, silica fume, lightweight concrete, steel fiber, compressive strength

April 2021, 68 Page

TEŞEKKÜR

Her şeye gücü yeten, bizlere merhameti ile muamele eden, bu çalışmayı yürütme ve sonlandırma gücünü bana veren Yüce Rabbime sonsuz şükranlarımı sunuyorum.

Tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Selçuk MEMİŞ'e bana verdiği ilham, teşvik, dikkat çekici yardım ve sürekli destek için, derin şükran ve takdirle teşekkürlerimi sunuyorum. Aynı zamanda Prof. Dr. Hasbi YAPRAK ve Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN hocalarıma da araştırmalarımda yaptığı rehberlik, verdiği teknik destek ve önerileri için içten teşekkürlerimi iletmek istiyorum. Ayrıca laboratuvar çalışmasından sonraki analiz sürecinde tüm istatistiksel veri analizi, optimizasyon ve istatistiki çalışmada yardımlarını esirgemeyen hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, dua ve destekleriyle gelişmeme ve yeni hedeflere ulaşmama yardımcı olan ebeveynlerime, aile üyelerime ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Abdullah Sasi Abdullah ALTABEEB

Kastamonu, 2021

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ ONAYI	ii
TAHHÜTNAME	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ	5
2.1 Hafif Beton	5
2.2 Hafif Betonun Avantajları ve Dezavantajları	7
2.3 Malzemelerin Hafif Betona Etkisi.....	9
2.3.1 Çimento.....	9
2.3.2 Hafif Agrega	10
2.3.3 Silis dumanı	11
2.3.4 Pomza.....	14
2.3.5 Çelik lif	18
2.3.6 Kimyasal Katkı (Süper akışkanlaştırıcı)	21
2.4 Kürleme Yönteminin Etkisi	23
2.5 Hafif Beton Uygulamaları	26
3. MATERYAL VE METOD	29
3.1 Materyal.....	29
3.1.1 Portland Çimentosu (PÇ)	29
3.1.2 Silis Dumanı (SD).....	29
3.1.3 Çelik Lif	30
3.1.4 İri Agrega (Çakıl).....	30
3.1.5 İnce Agrega (Kum)	31
3.1.6 Volkanik Pomza (VP).....	32
3.1.7 Su	32
3.1.8 Süperakışkanlaştırıcı (SA)	33
3.2 Deneysel Program	33
3.3 Yöntem	35
3.3.1 Çökme Testi.....	35
3.3.2 Yoğunluk, Su Emme Oranı ve Prozite Testi.....	36
3.3.3 Basınç Dayanımı Testi.....	37
3.3.4 Yarmada Çekme Dayanımı Testi.....	38
3.3.5 Yangın Dayanım Testi	39
3.3.6 Aşınma Direnci	40
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	41
4.1 Çökme Testi	41
4.2 Taze Birim Hacim Ağırlık.....	43
4.3 Yoğunluk	45

4.4 Porozite.....	48
4.5 Su Emme Oranı	50
4.6 Basınç Dayanımı	52
4.7 Yarmada Çekme Dayanımı	56
4.8 Yüksek Sıcaklık Etkisi Testi	59
4.9 Aşınma Direnci.....	61
5. SONUÇLAR.....	63
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	68

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1 Çelik lif	30
Şekil 3.2 Karışımlarda kullanılan iri agrega	31
Şekil 3.3 LWAC karışımlarında kullanılan pomza ve kurutma işlemi	32
Şekil 3.4 Çökme test aparatı.....	36
Şekil 3.5 Basınç dayanımı testi	38
Şekil 3.6 Yarmada çekme dayanımı deneyi	38
Şekil 3.7 Malzemeleri kurutmak için kullanılan fırın	39
Şekil 3.8 Test için kullanılan elektrik fırını	39
Şekil 4.1 LWAC çökme testindeki değişimler.....	41
Şekil 4.2 Değişkenlerin çökme sonuçlarına etkisi	42
Şekil 4.3 Taze BHA sonuçlarındaki değişim	43
Şekil 4.4 Değişkenlerin taze BHA sonuçlarına etkisi	44
Şekil 4.5 Taze BHA ve çökme arasındaki ilişki	45
Şekil 4.6 Karışımların yoğunluklarındaki değişimi	46
Şekil 4.7 Beton yoğunluk değerleri.....	47
Şekil 4.8 Değişkenlerin yoğunluk üzerine etkisi	47
Şekil 4.9 Çökme ile görünür yoğunluk arasındaki ilişki.....	48
Şekil 4.10 Porozite oranlarındaki değişim	48
Şekil 4.11 Çelik lif, SD, pomza/iri agrega ve pomza/kum porozite sonuçlarına etkisi	49
Şekil 4.12 Su emme oranlarındaki değişim.....	50
Şekil 4.13 Değişkenlerin su emme oranına etkisi	51
Şekil 4.14 Su emme oranı ile porozite arasındaki ilişki.....	52
Şekil 4.15 Basınç dayanımlarının zamansal değişimi.....	53
Şekil 4.16 Basınç dayanımlarındaki değişim	53
Şekil 4.17 Değişkenlerin basınç dayanımına etkisi	54
Şekil 4.18 Basınç dayanımı ile çökme arasındaki ilişki.....	55
Şekil 4.19 Basınç dayanımı ile taze BHA arasındaki ilişki.....	55
Şekil 4.20 Hacimsel kuru yoğunluk ve basınç dayanımı arasındaki ilişkisi	56
Şekil 4.21 Yarmada çekme dayanımı değerlerindeki değişim.....	57
Şekil 4.22 Yarmada çekme dayanımlarının zamansal değişimi	57
Şekil 4.23 Çekme dayanımı ile çökme yüksekliği arasındaki ilişki.....	57
Şekil 4.24 Çekme dayanımı ile taze BHA arasındaki ilişki	58
Şekil 4.25 Çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki	58
Şekil 4.26 Karışımların yangına dayanıklılık testi	59
Şekil 4.27 Guruplara bağlı yangın dayanımı değişimi	60
Şekil 4.28 Değişkenler göre 650 °C'de yangın dayanımı değişimi	60
Şekil 4.29 Aşınma direnci test sonuçları	61
Şekil 4.30 Değişkenlerin aşınma direncine etkisi	62

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1 Birim ağırlığına göre beton sınıfları	5
Tablo 3.1 Çimento mekanik ve fiziksel özellikler	29
Tablo 3.2 Çimentonun kimyasal özellikleri	29
Tablo 3.3 Silis dumanı teknik özellikleri	30
Tablo 3.4 Çelik lifin özellikleri	30
Tablo 3.5 Agrega elek analizi sonuçları.....	31
Tablo 3.6 Kumun derecelendirilmesi.....	31
Tablo 3.7 VP elek analizi sonuçları	32
Tablo 3.8 Lab Bet 8109'un teknik özellikleri	33
Tablo 3.9 Beton karışımındaki agrega miktarı.....	33
Tablo 3.10 Silis dumanı karışım oranları.....	34
Tablo 3.11 Beton karışımındaki çelik lif ağırlığı ve yüzdesi	34
Tablo 3.12 Uygulanan test faktörleri ve düzeyleri.....	34
Tablo 3.13 Dört seviyeli ortogonal diziler (L16).....	34
Tablo 3.14 Karışım detayları.....	35
Tablo 4.1 Çökme testi sonuçları	41
Tablo 4.2 Taze BHA sonuçları	43
Tablo 4.3 Karışımların yoğunluk test sonuçları	45
Tablo 4.4 Su emme testi sonuçları	50
Tablo 4.5 Basınç dayanımı sonuçları	52
Tablo 4.6 Yarmada çekme dayanımı testi.....	56
Tablo 4.7 Karışımların yangına dayanıklılık testi.....	59
Tablo 4.8 Aşınma direnci deneyi sonuçları.....	61

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

ACI	: Amerikan Beton Enstitüsü
ASTM C	: Amerika Test ve Materyalleri Topluluğu
kN	: Kilonewton
LOI	: Kızdırma Kaybı
LWAC	: Hafif Agregalı Beton
MPa	: MegaPaskal
VP	: Volkanik Pomza

1. GİRİŞ

Uygarıkları ve yapıların gelişiminde önemli bir yere sahip olan beton, modern binalarının inşasında kendine önemli ölçüde yer bulmuş ve kendisine olan bağımlılığı son yüzyıllarda giderek arttırmış bir malzemedir. Beton kelimesi, "birlikte büyüme" anlamına gelen Latince "*Concretus*" kelimesinden türetilen ve üç bileşenle yan yana geldiğinde, tam olarak "birlikte büyüme" kavramının ifade eden bir tanımdır. Bu üç bileşen;

- İnce ve iri agrega: kum, çakıl, büyük kırma taş parçaları, cam ve geri dönüştürülmüş beton parçalarından oluşan karışımın % 60 ila 70'ini oluşturan kısmı
- Çimento: kalsiyum ve alüminyum silist esaslı bir bağlayıcı
- Su: Çimentonun sertlik kazanmasında temel unsurudur.

Bileşenlerin ayrı ayrı sahip oldukları özelliklerin yan yana getirilmesiyle hazırlanan bu kompozit karışım, bileşenlerinin tek başına istenilen ölçüde sağlayamadığı güç, sertlik ve dayanıklılık gibi kendilerinden beklenilenden çok daha iyi sonuçlar elde edilemesini sağlayan bir malzemedir. Bu kompozit malzeme destek ve takviye görevini üstlenen, çeşitli şekil ve boyutlardaki taşlar (agregalar) ve yapıştırma malzemesi görevi gören koyu renkli çimento ile birbirlerine bağlanmasıyla oluşturulmaktadır. Bu bağ, çimentoya eklenen suyun, çimento içinde reaksiyona girerek hidrat kristalleri (C-S-H) oluşturması ve bu kristallerin çakıl ve kum arasında bir yapıştırıcı görevi üstlenmesine bağlıdır. Betona mukavemetini veren ve kendisinden istenilen özelliklerini sağlayan bu kademeli kristal oluşumdur. Ancak bu bağın istenilen seviyede olması; betonun pürüzsüz süresince nemli tutulması ve dolayısıyla sertliğini arttırmak için çimento içindeki kimyasal reaksiyonun zayıf bir bağ olarak kalmasının engellenerek güçlü bir bağ yapısı oluşturmasına bağlıdır.

Kompozit bir yapı malzemesi olan betonun yüksek katlı bina yapımından, geniş açıklıkların yapılmasına imkan sağlaması gibi çok farklı konularda bir çok avantajı

olmasına karşılık, bazı dezavantajları da olan bir malzemedir. Betonun sahip olduğu bu dezavantajlar;

- Basınç dayanımının % 10 ile % 20'si arasında değere sahip olan zayıf çekme dayanımına sahip bir malzeme olması (Bu zayıflık çelik ve beton sektörlerinden oluşan kompozit malzeme olarak kullanılan betonarme ile giderilmiştir.)
- Betonun sahip olduğu nispi yoğunluğu ve ağırlığı (Beton yoğunluğu 2 ton/m³ ile 2,2 ton/m³ arasında değişmiş ve bu orijin ağırlığının büyük bir yüzdesini oluşturmuştur. Bu duruma, pomza taşı ve benzeri diğer hafif agrega malzemelerin eklenmesi yoluyla hafif beton üretilerek yoğunluğu ve ağırlığı azaltma yoluna gidilmektedir.)

Yapı malzemelerinde pratik alternatiflerin olmaması, yapıların inşasında belirli malzemelere güvenilmesi ve inşaat malzemelerinin yüksek maliyetli oluşları komplekslerin ve konutların inşasının önündeki önemli engellerdir. Bu durum mevcut geleneksel malzemeler üzerindeki baskıyı azaltmak için yaygın olarak kullanılabilen "hafif beton" veya "boşluklu beton" gibi bir dizi alternatifin malzeme kullanılmasını gerekli kılmıştır.

Yapı malzemelerinde düşük yoğunluğunun avantajı sayesinde, özellikle yüksek katlı binalar, açık deniz yapıları ve uzun açıklıklı köprülerin yapımı gibi bir çok alanda hafif beton kullanım alanlarını artırmakta ve yük taşıyıcı elemanlar açısından daha küçük kesitli olması gibi önemli faydalar sağlayabilmekte ve buna bağlı olacak şekilde de temelin boyutunda bir küçülmeye neden olabilmektedir (ACI Komitesi, 2003).

Sahip olduğu fiziksel ve mekanik özellikleri sayesinde birçok avantajları olan hafif beton üretiminde karışımın içine:

1. Alüminyum tozu veya köpük oluşturucu kimyasal maddeler ile hava boşluğu oluşumu sağlayacak malzemelerin karışıma ilave edilmesi,
2. Perlit, vermikülit, pomza, genişletilmiş şeyl, arduvaz, kil gibi hafif agrega kullanılarak beton üretmek,

3. Agrega olarak yoğunluğu düşük plastik granüller (örneğin; polistiren veya diğer polimer malzemeler) kullanmak sayılabilir.

İlk iki yöntemle yapılan düşük yoğunluklu hafif betonlar, hafif olmasına karşılık içerdiği yüksek boşluk nedeniyle gerekli önlemler alınmadığında yapı ağırlığını artıran yüksek miktarda suyu (ağırlıkça % 20-50 kuru beton) absorbe edebilme özelliğine sahiptirler (Bagon ve Frondistov, 2003; Kearsley ve Wainwright, 2001). Özellikle yüzen deniz yapılarının tasarımında kullanıldığı bilinen düşük yoğunluğa sahip plastiklerin agrega olarak kullanılmasında ise yapının ağırlığı önemli bir faktör olmaktadır. Emici olmayan, yapay ultra-hafif (300 kg/m^3 'ten az yoğunluk) Genleştirilmiş Polistiren Sert Köpük (EPS-Expanded Polystyrene Foam) agregası ile yapılan hafif beton, su üzerinde yüzen hafif bir beton üretmek için kullanılabilir (Kinniburg ve Short, 2001). Polistiren beton, çimento, kum ve polistiren agregası (EPS) karışımından yapılır. Polistiren, başlangıçta katı formda Genleştirilmemiş Polistiren (Un-Extended Polystyrene (UEPS)) olan termoplastik bir polimerik malzeme olup, buhar ve genleştirici maddeler kullanılarak genleştirilebilir (Swamy, 1983). Üretim santrallerinin çoğunun Rusya ve Avrupa'da yoğunlaştığı diğer yapay hafif agregaların (genişletilmiş kil, şist, arduvaz, sinterlenmiş pfa vb.) aksine EPS agregaları dünya çapında ticari olarak ulaşılabilir malzemelerdir. EPS agregası, esas itibariyle %98 havadan oluşan kapalı hücre yapısına sahiptir. Farklı hacimlerde EPS agregayı beton, harç veya çimento hamuruna dahil ederek geniş bir yelpazede beton yoğunlukları üretilebilir. Polistiren (EPS) agrega, bina uygulamaları için gerekli olan düşük yoğunluklu betonları üretmek için kullanılabilir (Swamy, 1983). Ayrıca, yüzer deniz yapıları, deniz yatakları ve deniz çitleri için inşaat malzemesi olarak, kaldırım ve demiryolu ray yatağı için alt temel malzemesi olarak, toprağa gömülü askeri yapılarda enerji emici malzeme olarak ve açık deniz petrol platformlarında tampon görevi gören siperlik olarak kullanım gibi bazı diğer özel uygulama alanları da bulunmaktadır (Kinniburg ve Short, 2001; Bisehoff ve ark, 1990). Bunun yanı sıra, eşit beton yoğunlukları için EPS agregalı beton, vermikülit veya perlit agregalı betona göre % 70-270 daha yüksek basınç dayanımı sergileyen bir malzeme olarakta bilinmektedir ve yangına dayanıklı olduğu, dolayısıyla bina yapımında iyi bir ısı yalıtım malzemesi olarak kullanıldığı görülmektedir (Sussman, 1972).

Bu araştırmanın amacı; çelik lif katkılı pomza esaslı hafif beton yapımında, karışımlara eklenen pomzanın basınç dayanımı ve yoğunluk gibi beton özellikleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi, karışım oranlarının belirlenmesi ve pomza esaslı hafif betonun kısa süreli mühendislik özelliklerinin incelenmesi temel araştırma konusunu oluşturmaktadır. Bu amaçla çelik lif katkılı hafif beton üretiminde agrega ile yer değiştirerek elde edilecek hafif betonun dayanıklılığına olan etkileri araştırılmıştır. Araştırma, Taguchi L16 matrisi kullanılarak oluşturulan gruplarda; basınç ve çekme dayanımı, yüksek sıcaklık etkisi, aşınma direnci ve hafif betonun bazı fiziksel özellikleri araştırılmıştır.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1 Hafif Beton

Beton, üretiminde yer alan hammaddelerin (çimento, agrega ve su) dayanıklılık, çalışabilirlik, direnç ve kolay bulunabilirlik gibi olumlu özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesidir. Agrega parçacıklarından oluşan ve bağlayıcı madde (çimento) içeren kompozit bir malzeme olan beton, farklı tiplerde üretilebilir (Mohammad Reza Moallem, 2010).

Li (2011) ve J. M. Monterio ve Paulo (2006)' ya göre beton aşağıdaki özelliklere göre sınıflandırılmaktadır:

- Birim ağırlık
- Basınç dayanımı
- Katkı maddeleri

Hafif betonların en önemlisi olan birim ağırlıklarına göre Tablo 2.1'de gösterildiği gibi dört kategoriye ayrılabilir. Ultra hafif beton sadece yapısal olmayan elemanlar oluşturmak için kullanılabilir. Hafif beton, özel bileşimine bağlı olarak hem yapısal olmayan hem de yapısal elemanları oluşturmak için kullanılabilir. Normal ağırlıklı betonlar, altyapı ve binaların yapımında yaygın olarak kullanılan betonlardır. Ağır beton, insan sağlığı üzerindeki etkisini en aza indirmek için radyoaktif korumaya ihtiyaç duyulan laboratuvarlar, hastane muayene odaları ve nükleer santral gibi bazı özel yapıların inşasında kullanılmaktadır (Li, 2011).

Tablo 2.1 Birim ağırlığına göre beton sınıfları (Li, 2011)

Sınıf	Birim Ağırlık (Kg/m ³)
Ultra-Hafif Beton	<1200
Hafif Beton	1200 < UW < 1800
Normal Ağırlıklı Beton	~2400
Ağır Beton	>3200

Hafif agregalı beton, beton teknolojisi açısından yeni sayılabilecek bir buluş değildir. Hafif agregalı beton antik dönemlerden beri bilinmektedir ve bu nedenle, kullanımı ile ilgili çok sayıda referans bulmak mümkündür. Pomza, volkanik cüruf vb. gibi volkanik kökenli doğal agregalar kullanılarak üretilmiştir. Sümerler, MÖ 3. binyılda Babil'in inşası için hafif agregalı beton kullanmışlardır. Yunanlılar ve Romalılar ise yapılarında pomzadan faydalanmışlardır. M.S. 4. yüzyılda İmparator Jüstinyen tarafından yaptırılan ve günümüzde İstanbul / Türkiye'de bulunan St. Sofia Katedrali veya mevcut adıyla Ayasofya Camii; M.S.118 ve128 yılları arasında dikilmiş olan Roma Tapınağı, Pantheon; M.S. 14 yılı civarında inşa edilmiş olan prestijli Su Kemeru Pont du Gard ve M. S. 70 ve 82 yılları arasında inşa edilen büyük Roma Amfitiyatrosu Kolezyum günümüze kadar gelmiş olan bu muhteşem yapılardan bazıları olarak sayılabilir. Hafif ağırlıklı agregaya olan talebin artması ve agregaların kolay bulunur olmaktan çıkması ile birlikte, hafif agrega üretimine yönelik teknolojilerin geliştirilmesi hız kazanmıştır (Aşık, 2006).

21. yüzyıl boyunca, inşaatta talep ile birlikte teknolojinin gelişmesine bağlı olarak hafif betona (LWC) olan talep artmıştır. LWC, normal ağırlıklı betondan (NWC) belirgin şekilde farklı bazı özelliklere sahiptir. LWC, LWA'daki hava boşlukları nedeniyle yüksek mukavemet/ağırlık oranı, iyi gerilme mukavemeti ve düşük termal genişleme katsayısı, üstün ısı ve ses yalıtımı özelliği gibi belirgin avantajlara sahiptir. 1560-1960 kg/m³ aralığında yoğunluk ve orta aralıkta mukavemet ile LWC üretimi mümkün olmuştur (Geso, Güneyisi ve Öz, 2016).

Hafif beton (LC) genellikle bir yapının ölü ağırlığını azaltmak ve bir yapıdaki deprem hasarı riskini azaltmak için kullanılır. Bunun nedeni ise inşaat mühendisliği yapılarını ve binalarını etkileyecek deprem kuvvetleri bu yapıların ve binaların kütlesi ile orantılı olmasıdır. Bu nedenle, bir yapının veya binanın kütlelerinin azaltılması, deprem hasarı risklerini azaltmada büyük önem taşımaktadır (Ünal, Uygunoğlu ve Yıldız, 2007).

Al-sibahy (2012)'e göre, hafif beton üç yöntem kullanılarak üretilir. İlki, toplam beton agregasının ince kısmının (kum parçacıkları) çıkarıldığı, ince agregasız beton olarak adlandırılan yöntemdir. İkinci yöntem, mekanik köpürme ve kimyasal katkı yoluyla beton gövdesinde stabil hava kabarcıkları oluşturmaktır. Bu tip betonlar,

gözenekli beton, boşluklu beton veya gaz beton olarak bilinir. Üçüncü ve en popüler yöntem, hafif agregası kullanarak beton üretilmesidir. Bu durumda, hafif agregası doğal veya yapay kaynaklı olabilir. Bu tezde üçüncü yöntem geliştirilmiş kil kullanımını ile ele alınmaktadır.

Hafif agregalı beton, uygulama şekline göre iki tipe ayrılabilir. Biri kısmen sıkıştırılmış hafif agregası beton, diğeri ise yapısal hafif agregası betondur. Kısmen sıkıştırılmış hafif agregası beton, esas olarak, prekast beton bloklar veya paneller ve yerinde dökme çatılar ve duvarlar için kullanılır. Bu tip betondan beklenen temel özellik, en iyi ısı yalıtımını elde etmek için, betonun yeterli dayanıma ve düşük yoğunluğa sahip olması ve çatlamayı önlemek için düşük kuruma rötresine sahip olmasıdır (Al-Sod, 2011).

Yapısal olarak hafif agregası beton, yoğun agregadan oluşan normal betonarme betona benzer şekilde tamamen sıkıştırılır. Çelik ile beton arasında iyi bir bağ oluşturacak şekilde çelik donatı ile birlikte kullanılabilir. Beton, çeliğin korozyonuna karşı yeterli koruma sağlamalıdır. Agregası parçacıklarının şekli ve dokusu ile ince agreganın kaba yapısı sert beton karışımları üretme eğilimindedir. Sadece daha yoğun hafif agregası çeşitleri yapısal betonda kullanıma uygundur (Al-Sod, 2011).

2.2 Hafif Betonun Avantajları ve Dezavantajları

Hafif beton, farklı yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır ve tüketimi her yıl küresel bazda artmaktadır. Bunun nedeni hafif beton kullanımının birçok avantajının olmasıdır (Al-sibahy, 2012). Al-sibahy (2012), Jic, Wang ve Lachemi (2010), Aşık (2006), Tanyıldızı ve Coşkun (2008) ve Sajedi ve Shafiqh (2012) tarafından belirtildiği gibi, hafif betonun avantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- a. Binanın ölü yükünde azalma. Özellikle daha uzun açıklıklı köprüler için azaltılmış ölü yük sayesinde yapısal malzemede tasarruf sağlanabilir. Bu tasarruflar, temellerin maliyetine (özellikle kazıkların gerekli olduğu yerlerde) ve kalıp maliyetlerine de yansır. Daha hafif ağırlık aynı zamanda malzemelerin, prefabrik elemanların vb. taşınmasında ve işlenmesinde de

tasarruf sağlar. Daha hafif ağırlık, daha uzun açıklıkların kullanılmasına izin vererek gerekli destek sayısında azalma sağlar.

- b. Daha iyi fiziksel özellikler: LWAC'ın birçok özelliği bazı faydalar sağlayabilir. Düşük modül, daha düşük ön gerilim kayıplarına yol açar ve sürekli köprülerde farklı oturmaların olumsuz etkilerini azaltır. Düşük termal genleşme katsayısı, indüklenen termal hareketleri azaltır, bu da uzun köprülerde gereken ek yeri bağlantılarının sayısını azaltır.
- c. Ucuz döküm, taşıma ve nakliye işlemleri ile daha hafif ve daha küçük prekast elemanların üretimi,
- d. Düşük maliyet: LWAC normal betondan daha pahalı olmakla birlikte, daha düşük ölü yükleri ve diğer malzeme ve inşaat maliyetlerinde azalma nedeniyle tasarruf sağlayabilir.
- e. Yıkım: Betonarme bir yapı yıkıma hazır olduğunda, betonun bir SLWAC türü olması önemli bir avantaj sağlar. Normal betona göre daha düşük yoğunluğa sahiptir ve parçalanma işlemi sırasında taş kırıcıda daha kolaydır. Geri dönüştürülmüş malzeme beton üretimi için veya dolgu kütlesi olarak kullanılabilir. Ezilmiş LWAC, puzolanik ve bağlayıcı özelliklere bile sahip olabilir.
- f. Deprem hasar riskinde azalma
- g. Artan ısı yalıtımı ve yangın direnci

Aşık (2006) ise, LWC'nin dezavantajlarını şu noktalarla özetlemiştir:

- a. Ön gerilimli ankrajlarda veya mesnetlerde meydana geldikleri için lokal olarak konsantre yüklere karşı daha az dirence sahiptir, bu nedenle artan sınırlayıcı takviyeye ihtiyaç vardır.
- b. LWAC, yüksek dayanımlı çimento hamuru nedeniyle daha kırılıgandır.
- c. LWAC, seçilen agregaya bağlı olarak daha fazla çimento gerektirebilir.
- d. Hidratasyon ısısından kaynaklanan sıcaklık artışı daha fazladır.
- e. Hidrokarbon yangınına maruz kaldığında beton kaplama kabarrır.
- f. Dayanım ve işlenebilirlik gerekliliklerini korumak için su içeriği ve karışım özelliklerinin denetimine daha fazla özen gösterilmesi gerekir.

- g. Gözenekli agregalar, pompalanabilir beton için özel önlemler gerektirir.

2.3 Malzemelerin Hafif Betona Etkisi

2.3.1 Çimento

Çimento, su ile karıştırıldığında plastik kütle oluşturan, şekillendirilmesi (macun) kolay, zamanla priz alan ve mukavemet artışı ile giderek sertleşen toz bir bağlayıcıdır. Birçok standartta Portland çimentosunun tanımı daha açık ve anlaşılır şekilde ortaya konmaktadır. Böyle bir açık tanımlama yapılmasının nedeni, çimento adının, örneğin anhidrit veya magnezyum oksiklorür gibi diğer bağlayıcı malzemelere de veriliyor olmasından dolayıdır (S. Mindess ve Darwin, 2014).

Bir beton karışımına su eklendiğinde çimento hamuru oluşur. Çimento hamurunun betonda üç işlevi vardır: bağ oluşumu, agrega tane yüzeyini kaplama ve boşlukları doldurmak (yağlama). Çimento hamuru, bireysel agregalara, takviye çubuklarına ve liflere bağlanma sağlar ve kendine özgü bir malzeme oluşturmak için bunları birbirine yapıştırır. Çimento hamuru ayrıca betonun taze aşamasında agregaların ve liflerin yüzeyini kaplar. Kaplamadan sonra hamurun geri kalanı, bir yağlama maddesi gibi, agregaların veya liflerin hareketini kolaylaştırabilir. Çimento içeriği, taze aşamada beton işlenebilirliğini, hızlı hidrasyon aşamasında ısı yayma oranını, ve sertleştirilmiş aşamada ise hacim stabiliteğini etkiler. Kütle betondaki çimento miktarı aralığı $160\text{--}200\text{ kg/m}^3$, normal dayanımlı betonda 400 kg/m^3 'ten az, yüksek dayanımlı betonda $400\text{--}600\text{ kg/m}^3$ 'tür (Li, 2011).

S. Mindess; F. J. Young ve D. Darwin (2014) tarafından belirtildiği gibi, sınıflandırılmaların temelini oluşturan çimentoların temel performans özellikleri şunlardır:

- 28 günlük sertleşme sonrası harç dayanımı (çimento sınıfı)
- Dayanım geliştirme hızı: 2 günlük sertleşmeden sonrası ve istisnai olarak 32,5 N çimentoda 7 gün sonrası dayanım
- Priz zamanı

Portland çimentosu, Silisli (ASTM C618 Sınıf F) Uçucu Kül, Kalkerli (ASTM C618 Sınıf C) Uçucu Kül, cüruf çimentosu ve silis dumanı olmak üzere birkaç farklı çimento türü vardır. Bu türler kimyasal bileşimlerinde farklılık gösterirler. SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO ve SO_3 açısından yukarıdaki çimento tiplerinin bileşimlerini vermektedir ve geri kalanlar Na_2O ve K_2O gibi diğer malzemeler olabilir (Dunuweera ve Rajapakse, 2018).

Yüksek su ihtiyacı nedeniyle inceliği yüksek çimento kullanımından kaçınılmalıdır. Reolojik özellikler ve mekanik performans açısından en iyi çimento, yüksek silis modüllü çimentodur. Bununla birlikte, bu tip çimento, belirli uygulamalarını engelleyen çok yavaş bir priz hızı dezavantajına sahiptir. Geleneksel hızlı sertleşen yüksek performanslı çimento, daha yüksek su talebine rağmen çok benzer mekanik performans sergiler (Ahmad, Zubair ve Maslehuddin, 2015).

2.3.2 Hafif Agregalar

LWC üretiminin en popüler yolu hafif agregalar (LWA) kullanmaktır (Aslam, Shafiq ve Jumaat, 2015). Hafif agregalar, yığın yoğunluğu 1200 kg/m^3 'ten az veya tane yoğunluğu 2000 kg/m^3 'ten az olan granüller bir malzemedir. Hafif agregalar genellikle üretim süreci ve üretim yöntemine göre sınıflandırılır. Hafif agregalar doğal veya suni malzemelerden üretilir. Doğal hafif agregalar, pomza ve tuf gibi magmatik kayalar veya kila, arduvaz ve şeyl gibi tortul ve metamorfik kayalar gibi farklı jeolojik malzemelerden sağlanabilir. Yapay hafif agregalar, cam, uçucu kül ve cüruf gibi atıklardan ve endüstriyel yan ürünlerden üretilir. Hem doğal hem de yapay hafif agregalar, ASTM C330 gerekliliklerini karşılamalıdır (İpek, 2013).

Hafif betonun iri agregalarla ikamesi için suni hafif agregalar ve ince agregalar yerine normal ağırlıkta kum kullanılması inşaat sektöründe artık yaygın bir uygulamadır. Genleştirilmiş kil ve şeyl gibi yapay hafif agregalar örnekleri, yapısal kalitede hafif beton üretimi için en uygun oldukları için üretilirler. Ticari olarak temin edilebilen bu tip hafif agregalar, sinterleme işlemi sıcaklığı $1000-1200 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak da bilinen ısıtma işlemiyle elde edilir. Bu yüksek sıcaklık işlemi nedeniyle, genel üretim süreci daha yüksek yakıt maliyetlerine ulaşacaktır. Sonuç olarak, genel inşaat maliyeti artacaktır. Bu nedenle, doğal bir kaynaktan hafif bir agregalar bulmak çok faydalıdır. Bununla birlikte, bu tür

hafif agregaların artan kullanımı doğal kaynakların ciddi şekilde tükenmesi sonucunu doğuracaktır. Hafif agrega için alternatif bir kaynak olarak, yapay hafif agrega kullanılır. Alternatif yapı malzemesi olarak bu yapay agregalar, toplam inşaat maliyetinde kesinlikle önemli bir tasarruf sağlayacak ve aynı zamanda doğal çevreyi koruyacaktır (İbrahim ve ark., 2016).

M.S. 2. yüzyıldan bu yana, köpüklü cüruf, diatomit, pomza, volkanik cüruf, cüruf, tuf, geliştirilmiş kil, şeyl, arduvaz, perlit ve vermikülit gibi farklı doğal ve üretilmiş LWA'lar ve sinterlenmiş toz haline getirilmiş yakıt külü gibi endüstriyel yan ürünler olarak ortaya çıkan malzemeler, sinterlenmiş arduvaz ve kömür ocağı atıkları, köpüklü veya geliştirilmiş yüksek fırın cürufu inşaat malzemesi olarak kullanılmıştır (Aslam, Shafiqh ve Jumaat, 2015).

2.3.3 Silis dumanı

Silis dumanı (SD), silikon ve ferrosilikon endüstrisindeki eritme işleminin bir yan ürünüdür. 1 mikrondan küçük partikül boyutu ve ortalama 0,1 mikron ortalama çapı ile ortalama çimento partiküllerinden yaklaşık 100 kat daha küçük olan silis dumanı son derece incedir. Davranışı, yüksek amorf silis içeriği (>%90) ile ilgilidir. Yüksek saflıkta kuvarsın 2.000°C'ye kadar olan sıcaklıklarda silikona indirgenmesi, düşük sıcaklık bölgesinde oksitlenen ve kristal olmayan silisden oluşan küçük parçacıklara yoğunlaşan SiO₂ buharları üretir (Imam, Kumar ve Srivastava, 2018).

Silis dumanı, bağlama dayanımında artış (agregadan matrise / betondan donatıya), aşınma dayanımında artış, geçirgenlikte azalma, aşındırıcı kimyasallara karşı dirençte artış, betondaki güçlendirilmiş çeliğin korozyon direncinde artış ve ASR fenomeni nedeniyle genişlemede azalma gibi, betonun bazı özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. Silis dumanı üç mekanizma vasıtasıyla çalışır: 1- gözenek boyutu takviyesi ve matris yoğunlaşması, 2- serbest kireç ile reaksiyon (çimentonun hidrasyonundan), 3-çimento harcı agregalarının arayüzey arıtımı (Motahari ve ark., 2017).

El-louh (2014) tarafından belirtildiği gibi, silis dumanının (SD), beton teknolojisinde kullanımını aşağıdaki gibi dört ana işleve yöneliktir:

1. Büyük sınıf partiküller (çimento) arasındaki boşlukların doldurulması
2. Çimento hamuru matrisinin geçirgenliğini azaltarak betonun direncinin ve dayanıklılığının geliştirilmesi
3. Birincil hidrasyondan kaynaklanan kireç ile ikincil hidrasyon üretilmesi
4. Betonun aşındırıcı kuvvetlere karşı daha dayanıklı hale getirmilmesi ve alkali-agremanın oluşturduğu genleşmenin azaltılması

Siddique (2011) tarafından silis dumanı kullanımının sağladığı avantajlar ise şu şekilde sıralanmıştır:

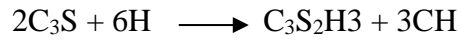
- Yüksek erken basınç dayanımı
- Yüksek çekme, eğilme dayanımı ve elastisite modülü
- Artan tokluk
- Yüksek bağ gücü
- Yüksek durabilite
- Klorür ve su girmesine karşı çok düşük geçirgenlik
- Artan aşınma direnci
- Klorürler, asitler, nitratlar ve sülfatlar vb. kaynaklı kimyasal saldırılara karşı üstün direnç
- Yüksek elektrik direnci ve düşük geçirgenlik

Lee, N. P. ve Chisholm (2006) tarafından silis dumanı betonda kullanılmak üzere aşağıdaki gereksinimleri düzgün bir şekilde yerine getirmesi gerektiği ifade edilmiştir. Bu gereksinimler:

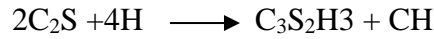
- Çimento tanelerinin etrafına yakın bir şekilde paketlenen, kompozit matrisin yoğunluğunu artıracak ve parçacıklar arasındaki boşlukların potansiyelini en aza indirecek kadar ince olmalıdır.
- Önemli puzolanik aktiviteye sahip olmalıdır. (Çimentonun hidratasyonu ile üretilen çimentosuz portlandit kristalleri $[Ca(OH)_2]$, ilave C – S – H jeli oluşturmak üzere silis ile reaksiyona girer ve kompozitin bağlanmasını güçlendirir.)

- Parçacıklar, taze karışım içinde bir yağlayıcı gibi hareket etmesi için temel olarak küresel bir şekle sahip olmalı, böylece akma ve kalıplara dökülebilme yeteneğini geliştirmelidir.

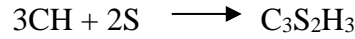
Bir pozzolana olarak SD, C₃S ve C₂S hidrolizi ile salınan kalsiyum hidroksit (CH) ile reaksiyona girer. CH, hidrasyon ürünlerinin hacminin yaklaşık %20-25'ini oluşturur ve CH kristalleri çözelti içinde büyür. Morfolojileri nispeten zayıf, gevrek ve çimentosuzdur. Bu nedenle, özellikle çimento hamuru matrisi ve agregalar arasındaki arayüzde, CH kristallerinin bulunduğu bölgelerde çatlaklar kolayca artabilir (Rao, 2003). Rao (2003) ' e göre, reaksiyon süreci aşağıdaki gibi özetlenmiştir:



Portland çimentosu



Silis dumanı



Burada, C = CaO; S = SiO₂; H = H₂O

Katkhuda, Hanayneh ve Shatarat (2009), silis dumanının yüksek dayanımlı hafif beton üzerinde çekme, basınç ve eğilme dayanımları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmalarında silis dumanı, 0.26 ila 0.42 arasında değişen bir su-bağlayıcı oranları için %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 ile oranlarında ikame edilmiştir. Sonuçlar ise silis dumanı ilavesi ile çekme, basınç ve eğilme dayanımının arttığını, ancak karışımın su-çimentolu malzeme (w/c) oranına bağlı olduğundan optimum ikame yüzdesinin sabit olmadığını göstermiştir. Bu sonuçlar, hafif yüksek dayanımlı betonun maksimum 28 günlük basınç dayanımını elde etmek için optimum SD ikame yüzdeslerinin karışımın w/c oranına bağlı olarak %15 ile %25 arasında değiştiğini göstermiştir.

Sajedi ve Shafigh (2012) yüksek dayanımlı LWC üretmeyi amaçlamışlar ve SD kullanılarak yüksek mukavemetli LWC elde edilebileceğini aktarmışlardır. Çalışmalarında, yüksek dayanımlı LWC üretiminde SD'nin ana rolünün boşlukları doldurmak ve betonun mukavemetini artırmak olduğunu ifade etmişlerdir.

Mortazavi ve Majlessi (2013) silis dumanının yapısal hafif betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Karışımlar %0, %5, %10, %15, %20, %25 silis dumanı içermiştir. Test sonuçları, artan silis dumanının basınç dayanımında önemli bir artışa neden olduğunu ve yüksek oranda silis dumanında dayanım kazanım hızının yavaşladığını ve silis dumanının ayrıca betonun, normal ağırlıklı beton ile karşılaştırıldığında, belirli bir zamanda daha yüksek ilk basınç dayanımı elde etmesine neden olduğunu göstermiştir.

Meyyappan, Sutharsan ve Ahamedazik Ali (2019), pomza taşı varlığında, ilave %5 silis dumanı içeriğinin dayanım parametrelerinde dolgu malzemesi olarak betonun mikro gözeneklerini durduracak % 5 ila % 7 civarında artış gösterdiği ve böylece daha iyi işlenebilirlik elde edilmesine yardımcı olduğu sonucuna varmıştır.

2.3.4 Pomza

Pomza, yapılarda kullanılan en eski hafif agregalardan biridir. Lavın katılaşması sırasında gazların salınmasıyla üretilen volkanik kökenli doğal bir malzemedir. Pomzanın hücreli yapısı, volkanlardan akan erimiş lavda bulunan gazlar soğutma sırasında sıkıştığında kabarcıkların veya hava boşluklarının oluşmasıyla oluşur. Hücreler uzun ve birbirine paraleldir ve bazen birbirine bağlıdır. Volkanik pomza (VP), dünyanın birçok ülkesinde hafif beton üretiminde agrega olarak kullanılmıştır. Şimdiye kadar, pomza kullanımı bulunabilirlik durumuna bağlıydı ve yerel olarak mevcut olduğu veya kolayca ithal edildiği ülkelerle sınırlıydı. Yüksek emme ve büzülme ile iyi yalıtım özelliklerine sahip, normal betondan iki ila üç kat daha hafif olan tatmin edici beton VP kullanılarak üretilebilir (Anwar Hossain, 2004; Parhizkar, Najimi ve Pourkhorshidi, 2012).

Pomza kelimesi, köpük anlamına gelen Latince *pumex* kelimesinden türetilmiştir. Pomza taşı, bileşiminde çoğunlukla riyolitik olan erimiş lavın (volkanik madde) hızlı soğuması ve katılaşması sırasında oluşan, süngerimsi, doğal, hafif bir agregadır. Pomzanın gözenekli yapısı, erimiş volkanik maddedeki gazlar soğutma boyunca hapsedildiğinde milyonlarca küçük hava boşluğunu veya kabarcık oluşumunu hapsederek şekillendirilir. Hava boşlukları birbirine paralel, uzun ve bazen birbirine bağlıdır (Rashad, 2020).

Pomza düşük yoğunluklu, iyi yangın direnci, iyi ısı yalıtımı ve ses yalıtımı, makul basınç dayanımı ve tatmin edici elastikiyet, düşük geçirgenliğe sahip gözenekli yapıya ve yanmazlığa sahiptir, bu da onu hafif agrega için uygun hale getirir. Öğütülmüş pomza, onu çimento ikamesi için uygun hale getiren puzolanik bir aktiviteye sahiptir. Aşındırıcı olarak, özellikle bilgisayar devre kartlarında, televizyon camlarında, cilt yumuşatma ve cilt soyma işlemlerinde ve kumaşların taşlanması ve ağartılması gibi daha hafif uygulamalarda kullanılır. Pomza, büyük mutfak su sistemlerinde filtrasyon ortamı olarak kullanılabilir. Pomzanın toprağa eklenmesi, toprağın nemi tutma kabiliyetini artırabilir. Pomza agregası, meyve ağaçları ve çimler için malç olarak makul olduğunu ispatlamıştır. Pomza haşerelere karşı dayanıklı bir malzemedir.

Kimyasal bileşimine bağlı olarak, Pomzanın rengi, genellikle beyaz veya gridir veya beyazdan altına, kahverengiden siyaha kadar değişir. Pomza cevheri esas olarak SiO₂ (%60–75), Al₂O₃ (%13–17), Na₂O-K₂O (%7–8), Fe₂O₃ (%1–3), CaO (%1–2) ve düşük miktarda TiO₂ ve SO₃ içerir. Özgül ağırlığı sırasıyla toz, ince agrega ve iri agrega durumunda 2.04 ila 2.85, 1.18 ila 2.52 ve 0.82 ila 2.17 arasında değişmektedir. Mohs sertlik ölçeğine göre, sertlik değeri 5.5–6 aralığında, pH değeri ise ISO 10390'a göre 7 civarındadır. Parçacık gözenekliliği %85'e kadar ulaşabilir. Bir başka deyişle, toplam hacmin yalnızca %15'i katı maddeden ve %85'i de havadan oluşur. Füzyon noktası yaklaşık 2450 ° F'dir. Özellikle Türkiye, İtalya, Yunanistan, Ekvador, Şili, Etiyopya, Uganda, Guatemala, Suudi Arabistan, ABD, Kamerun, Cezayir, Tanzanya, Fransa, Suriye, İspanya, Guadeloupe ve diğer ülkelerde bulunabilir (Rashad, 2020).

Volkanik olaylar sonucu oluşan ve süngerimsi bir yapıya sahip olan pomza taşı oluşumlarına dünya genelinde volkanik faaliyetlerin gerçekleştiği birçok bölgede rastlanmaktadır. Pomza, oluşumu sırasında bünyesinde barındırdığı gazların ani salınımı ve ani soğuması nedeniyle oluşan makro ölçekten mikro ölçeğe kadar çok sayıda gözenek içerir. Gözenekler arasında bağlantısız oyuklar bulunduğundan geçirgenliği düşük, ısı ve ses yalıtımı oldukça yüksektir. Dünya genelinde tespit edilen pomza kaynakları yaklaşık 18 milyar m³tür. Pomza tanesi büyüdükçe tane özgül ağırlığı azalır. Tane boyutları arttıkça gözenek yüzdesi artar. Pomza, volkanik patlama sırasında şekillenen çok hafif, piroklastik bir magmatik kaya türüdür. Lav, gaz köpüğü olarak havaya fıskırdığı süre boyunca gaz kabarcıkları da dahil olmak üzere sıvı halde

şekillendirilir. Pomza özellikle tras çimento üretiminde kullanılmaktadır. Pomza taşları, çimento inceliğinde öğütülerek çimento veya kireç ile karıştırıldığında bağlayıcı özellik kazanır (Bakış, 2019).

Makro ve mikro boyutlarda önemli miktarda gözeneklere sahip olan pomzanın basınç dayanımı çok düşük olduğundan inşaat sektöründe kullanım alanları sınırlı kalmış ve ağırlıklı olarak yalıtım amaçlı duvar ve sıva yapımında, su arıtma ünitelerinde filtre malzemesi üretiminde, tekstil endüstrisinde taşlama ve cila işlerinde, kibrit fabrikalarında ateşleme materyali üretiminde ve benzeri sektörlerde kullanım alanı bulmuştur (Bakış, 2019).

Pomza aslında patlayıcı volkanizmanın hücreli yapısıyla şekillendirilmiş bir alüminyum silisttir ve hücreli yapısı, hafifliği ve yalıtım özellikleri nedeniyle yapı malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. 2013 yılında 269.000×10^6 ton olan kullanılan veya satılan pomza ve pomza üretimi, 2014 yılında 285.000×10^6 'a yükselmiştir. Türkiye ve İtalya, pomza ve pomza taşının önde gelen üreticileridir. Toplamda kullanılan pomzanın yaklaşık %56'sı yapı taşı üretiminde; %18'i bahçevanlık ve tarımsal uygulamalarda, %12'si beton katkısı ve agrega olarak, %10'u aşındırıcı olarak ve geriye kalan %4'ü ise emici olarak, filtrasyon görevi için, taşla yıkama ve diğer uygulamalar için kullanılmaktadır (Karataş, 2017).

Volkanik pomzanın (VP) hafif beton üretiminde çimento ikame malzemesi olarak ve iri agrega olarak kullanılmasının uygunluğu üzerine yapılan araştırmaların sonuçları Anwar Hossain, (2004) tarafından yapılan çalışmada rapor edilmiştir. Ağırlıkça %0 ila %25 çimento ve hacimce %0 ila %100 iri agrega ikame edilen beton üzerinde testler yapılmıştır. VPC'nin yapısal hafif beton olarak kabul edilebilecek yeterli dayanıma ve yeterli yoğunluğa sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, kontrol betonu ile karşılaştırıldığında, VPC'nin elastisite modülü daha düşüktür ve daha fazla geçirgenliğe ve ilk yüzey emilimine sahiptir.

Hossain, Ahmed ve Lachemi (2011), pomza bazlı ASTM Tip I karışimli çimento (PVPC) ve agregalar (hem kaba hem de ince) kullanılarak hafif volkanik pomza betonunun (VPC) geliştirilmesini ele almıştır. Çalışmadaki değişkenler: normal

ağırlıktaki iri çakıl agregasının iri hafif volkanik pomza agregası (VPA) ile yer değiştirme yüzdesi (hacimce %0, %50, %75 ve %100), ince agreganın yer değiştirmesi (hacimce %100) (kum) ince VPA'ya göre, kütleyle göre sabit (0,45)/değişken (0,37–0,64) su/bağlayıcı oranıdır. Çalışma, hafif beton üretiminde pomza kullanımının uygulanabilirliğini ve özellikle de volkanik alanlardaki düşük maliyetli inşaatlarda kullanılabilir oluşunu doğrulamıştır. Ayrıca normal iri çakıl /ince agrega (kum)/her ikisi yerine pomza agregasının artmasıyla 28 günlük yoğunluk, basınç/çekme dayanımı ve elastisite modülünün azaldığı (hava içeriği artarken) belirtilmiştir. Ayrıca %20 pomza ile PVPC kullanımı, VPC karışımlarının yoğunluğunu, basınç/çekme dayanımını ve elastisite modülünü azalmıştır.

Parhizkar, Najimi ve Pourkhorshidi (2012) volkanik pomza hafif agregalı betonların özellikleri üzerine deneysel bir araştırma yürütmüşlerdir. Bu amaçla iki grup hafif beton (hafif iri doğal ince agregalı beton ve hafif iri ve ince agregalı beton) hazırlanmış ve bunların fiziksel/mekanik ve durabilite yönleri incelenmiştir. Basınç dayanımı, çekme dayanımı ve kuruma rötresi sonuçları, bu hafif betonların yapısal hafif betonun gereksinimlerini karşıladığını göstermektedir. Ayrıca, çimento içeriği, hafif agregalı betonların performansında en önemli parametre olarak kabul edilmektedir.

Anwar ve ark. (2012), PPC'nin bir matris görevi gördüğü ve pomzanın beton yoğunluğunu azaltma görevi gördüğü SCLWAC üretiminde pomzanın hafif kaba agrega olarak rolünü tartışmıştır. Sonuçlar, taze beton ve sertleşmiş betonun iyi özelliklerini sergileyen SCLWAC imalatında hafif pomza agregasının başarıyla kullanıldığını göstermiştir. Ayrıca, yoğunluğu 2100-2400 kg/m³ olan sıradan betonla karşılaştırıldığında, hafif pomza agrega, betonun yoğunluğunu 28 günde 2008.7 kg/m³ olacak şekilde düşürür ve 28 günde 42.2 MPa'lık bir beton basınç dayanımı sağlar.

Minapu ve ark. (2014), M30 karışımını kullanarak ve mineral katkı olarak normal ağırlıklı iri agrega, uçucu kül ve silis dumanı yerine hafif agrega pomza taşı kullanarak yapısal sınıf hafif betonun mekanik özelliklerini incelemiştir. Uçucu kül ve silis dumanı iyi bir dayanım sağlamış, ancak pomza taşı %20 oranında ikame edildiğinde, dayanım bu orandan daha fazla azalmıştır.

Rao Kumari ve ark.(2013) tarafından lif takviyeli hafif agrega (doğal pomza taşı) betonu incelenmiştir. Bu çalışmada, kullanılan karışım tasarımı C20 olup, hafif agrega pomza taşının %20'sinde normal ağırlıktaki kaba agregaya kısmi bir ikame olarak ve %1.5 lif ile en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, ortalama dayanıma sahip ortalama hedef, C20 beton karışımı ile ve %40 pomza ve %0.5 lif kullanılarak elde edilmiştir.

Rajeswari S. (2015) tarafından normal ağırlıklı agreganın farklı yüzdelerde pomza hafif agrega ile ikamesinin etkisini araştırmak için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Çalışma, C25 karışımını kullanmış ve hafif beton üretmek ve daha sonra normal ağırlıktaki betonla karşılaştırmak için %50, %60 ve %70'lik farklı yüzdelerde pomza (20mm) kullanmıştır. Maksimum basınç dayanımı değeri, Pomza'nın iri agrega ile %60 oranında ikamesi ve normal beton ile benzer olması durumunda elde edilmiştir.

Saini, Anil, Anurag ve Ashish (2018), yeni tasarlanan beton tipinin dayanım parametrelerine odaklanan deneysel bir makale yayınladı. Bu çalışmada, normal iri agrega, %8, %16 ve %24'lük oranlarda pomza agrega ile kısmen ikame edilerek ve M30 karışımı kullanılarak hafif beton üretilmiştir. Normal iri agrega yerine %16 oranında hafif pomza agregası kullanıldığında basınç dayanımı iyileşmiştir. Normal ağırlıktaki kaba agreganın pomza agregası ile ikame yüzdesinin artması durumunda, birim ağırlığın azaldığı görülmüştür. Eğer pomza taşları kaba agregayı tamamen (%100) ikame ediyorsa, yoğunluk sadece 1600 kg/m³tür, bu da yoğunluğun yaklaşık %40'lık bir azalma oranında, LWC gereklilikleri aralığında gerçekleşmiştir. Ayrıca, dayanım parametrelerinde, basınç dayanımı için %45'e kadar ve yarmada çekme ve eğilme dayanımı için ise yaklaşık %65 ila %75'e varan bir düşüş eğiliminin devam ettiğini bildirdirmişlerdir. Çalışma, bunun çimento hamuru ile agregalar arasındaki agrega bağlanma doğasının ve bağlanma dayanımının etkisinden kaynaklanabileceğini açıklamıştır. Çekme dayanımı, geleneksel beton için basınç dayanımının %12 ila %24'ü arasında değişir ve bu aralık, düşük yoğunluklu beton (hafif beton) için %12 ila %24'e düşürülür.

2.3.5 Çelik lif

Çeşitli nedenlerden dolayı, betonun çoğu çatlak. Betonun çatlamasının nedeni yapısal, çevresel veya ekonomik faktörlere bağlanabilir, ancak çatlakların çoğu, malzemenin

çekme kuvvetlerine direnme konusundaki doğal zayıflığından dolayı oluşur. Beton büzülür ve genleşmesi kısıtlandığında tekrar çatlaklar. Çelik lif takviyesinin betonu daha sert ve sünek hale getirerek çatlama sorununa bir çözüm sunduğu artık iyi bilinmektedir (Sukumar ve John, 2014).

Dixon (2003) tarafından belirtildiği gibi, günümüz mühendislerinin lifleri dahil ederek betonun özelliklerini değiştirme girişimindeki temel amaçlar şunlardır:

- a. Malzemenin reolojisini veya plastik çatlama özelliklerini taze halde veya dökümden sonra yaklaşık 6 saate kadar iyileştirmek.
- b. Çekme veya eğilme dayanımını geliştirmek.
- c. Darbe dayanımını ve tokluğu geliştirmek
- d. Çatlama-sonrası süneklik yoluyla çatlama ve kırılma modunu kontrol etmek
- e. Durabiliteyi artırmak

ASTM A820, üretimlerinde kullanılan ürüne göre çelik lifleri sınıflandırmıştır ve buna göre, soğuk çekilmiş tel lifler, kesilmiş sac lifler, eriyik ekstrakte edilmiş lifler ve diğer lifler olarak dört farklı çelik lif sınıfı tanımlanmıştır (İpek, 2013).

- Tip I (Soğuk tel lifler): Bu tip piyasada en çok bulunan çelik lif olup, çekilmiş çelik telden imal edilmiştir.
- Tip II (Kesilmiş sac lifler): Adından da anlaşılacağı gibi, bu tip çelik lifler, çelik sacların yanal olarak kesilmesiyle üretilir.
- Tip III (Eritilerek çıkarılan lifler): Bu tip çelik lifler nispeten karmaşık bir teknikte üretilir. Sıvı metal, bir çark kullanılarak erimiş bir metal yüzeyden kaldırılır. Bundan sonra, kaldırılan erimiş metal hızla donarak liflere dönüşür ve merkezkaç kuvvetiyle çarktan atılır. Hilal şeklinde enine kesitli lifler elde edilir.
- Tip IV (Diğer lifler): bu lifler uzunluk, çap, en boy oranı, minimum çekme dayanımı ve eğilme gereksinimi toleranslarına göre üretilir (ASTM, 2011).

Banthia ve Sheng (1990), betona çelik liflerin eklenmesinin, yükleme altındaki betonun davranışını etkili bir şekilde arttırdığını bildirmiştir. Çelik liflerin eklenmesi, betonun dayanabileceği maksimum yüke ulaştıktan sonra ani kırılmayı önler ve gerilme-şekil değiştirme eğrisinin azalan dalı, çelik liflerin dahil edilmesinin yumuşama etkisinden dolayı daha da düzleşir. Sonuç olarak, betona çelik liflerin eklenmesi, betonun basınç altındaki davranışını etkiler. Ayrıca, çelik liflerin eklenmesi, ultra yüksek dayanımlı betonun (LWAC) çekme dayanımını, sünekliğini ve işlenebilirliğini önemli şekilde etkiler (Al-Tikrite ve Hadi, 2018) (Li, 2015).

Ola A. Mayhoub, Nasr, Y. A. Ali, ve ark., (2020)'e göre, en-boy oranı, lif dağılımı ve çelik lif fraksiyon hacmi gibi esas olarak beton performansını etkileyebilecek çeşitli faktörler aşağıdaki gibidir:

- A. **Lif dağılımı: Betonun** mekanik performansı, çimentolu bir matristeki liflerin dağılımına büyük ölçüde bağlıdır. Suda çözünür bir sakız ile birlikte daldırılan demetlenmiş liflerin tutulması tavsiye edilir.
- B. **Lif en-boy oranı (L/d) :** En-boy oranı, lif uzunluğunun lif çapına oranı olarak tanımlanır. Yüksek en boy oranı, düşük en boy oranına kıyasla daha iyi performans sağlar.
- C. **Çelik liflerin hacim fraksiyonu:** Liflerin hacim fraksiyonu arttıkça, mikro çatlakların büyümesi kısıtlanmıştır, burada hem kırılma tokluğunda hem de dolaylı gerilme dayanımında (yarma dayanımı) bir artış olmuştur. Belirgin bir lif kilitleme ve işlenebilirlik kaybı, betona yüksek hacimli çelik liflerin dahil edilmesi ile birlikte ortaya çıkar. Sonuç olarak, verilen herhangi bir RPB matrisi için optimum bir lif içeriği vardır.

Araştırmacılar, çelik lifin mekanik özellikler üzerindeki etkisi üzerine çok sayıda çalışma yürütmüştür. Çalışmalar, çelik lif içeriğinin ve basınç dayanımı tipinin belirgin geliştirme etkilerine sahip olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, sonuçlar kullanılan çelik lifin boyut ve tipindeki farklılıklar nedeniyle değişmektedir (Zhong ve ark., 2019).

Campione, Miraglia ve Papia (2001), hacim fraksiyonundaki artışla birlikte lif ilavesinin hafif betonun gevrek davranışını düzelttiği, daha yüksek pik sonrası gerilme ve emilen enerji değerleri sağladığı sonucuna varmışlardır. Long ve ark. (2002) ise, çelik lif içeriğinin artmasıyla eğilme dayanımının basınç dayanımına oranının arttığını bulmuştur. Ayrıca, çelik liflerin uzunluk/çap oranı (L/D) ne kadar büyük olursa, çok yüksek performanslı betonun tokluğunun o kadar iyi olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Mahoutian, Shekarchi ve Ali Libre (2011) tarafından yapılan diğer bir çalışmanın deneysel sonuçları ise, çelik lif takviyeli hafif betonun basınç dayanımındaki artışın, normal ağırlıktaki betonun basınç dayanımındaki artıştan daha fazla olmasına rağmen, çelik liflerin hafif agregalı betonun basınç ve çekme dayanımı üzerinde nispeten küçük etkileri olduğunu göstermiştir. Çelik lif takviyesi, hafif agregalı betonun eğilme dayanımı ve tokluğunda önemli kazanımlara yol açmıştır.

Ye ve ark. (2020), çelik lifin ve lifin hacim içeriği oranının HLAC'nin basınç, yarma çekme ve eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini incelemek için yürüttükleri bir çalışmada, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan üç farklı çelik lif türünü- mikro (M), uç kancalı (H) ve oluklu (C)- yüksek dayanımlı hafif agregalı betona (HLAC) ilave etmişlerdir. İncelenen çelik lif hacim içeriği fraksiyon aralığı %0.5 ila %2.0'dır. Araştırma, farklı çelik lif türlerinin HLAC'ın mekanik özellikleri ve tokluğu üzerinde farklı etkileri olduğunu göstermektedir. Mikro (M) çelik lifleri mekanik özellikler üzerinde en iyi takviye performansına sahiptir. Çalışma aynı zamanda M çelik liflerinin tokluğunun aynı lif içeriğiyle en iyisi olduğunu göstermektedir.

2.3.6 Kimyasal Katkı (Süper akışkanlaştırıcı)

Kimyasal katkı, taze ve sertleşmiş betonların özelliklerini iyileştirmek için bağlayıcı malzemenin (çimento + öğütülmüş mineral katkı) kütlesinin %5'inden daha az bir oranda betona eklenen bileşiktir. Beton karışım oranlarında çimentonun yerini tutmaz ve bu nedenle çimento kütlesine dahil edilmez. Su azaltıcı maddeler ve süperakışkanlaştırıcılar, geciktiriciler, çekme azaltıcı maddeler, dayanıklılık geliştirici maddeler, hava sürükleyici maddeler, hızlandırıcılar, hızlı sertleşen katkıları, donma önleyici maddeler vb. gibi katkı maddeleri kimyasal katkı maddelerine örnek olarak verilebilir. Süper yüksek-mukavemetli yüksek performanslı betonda kullanılanlar esas

olarak süperakışkanlaştırıcılar ve geciktiricilerdir. Büyük miktarlarda eklenen bir genişleme katkısı bağlamaya dahil edilmelidir (Xincheng, 2012).

Yüksek oranda su azaltıcı katkıları olarak da bilinen süperakışkanlaştırıcılar, yüksek verimli su azaltıcılarıdır. 1960'ların sonlarında Japonya'da naftalin sülfonat bazlı ürünler geliştirilmesi ve aynı zamanda Batı Almanya'da melamin sülfonat ürünleri tanıtılmasıyla yapı sektöründe kullanımına başlandığı görülmektedir. Karışımın anyonik uzun zincirli molekülleri, elektriksel itme yoluyla suda etkin bir şekilde dağılan çimento parçacıklarının yüzeyinde adsorbe olur (Mehta, 1970).

Süper akışkanlaştırıcılar, temel olarak, Kabir ve Sadeghi (2017) tarafından belirtildiği gibi, aşağıdaki gerçeklerden dolayı hem taze hem de sertleştirilmiş formlarda betonun çeşitli özelliklerini etkiler:

1. Ara yüzey geriliminde azalma
2. Çimento parçacıkları arasında sıkışan suyun serbest bırakılması
3. Çimento hidratasyonunun etkisinin geciktirilmesi
4. Hidratlı çimentonun morfolojisinin değiştirilmesi

Hamah Sor (2018), farklı dozlarda süperakışkanlaştırıcının (SP), kaba agrega pomza içeren kendiliğinden sıkışan hafif betonun (SCLC) taze özellikleri üzerindeki etkisini, bağlayıcı ağırlığının %1, %1.3, %1.5, %1.7 ve %2'lik oranları için beş farklı SP yüzdesi kullanılarak incelemiştir. SCLC'ler, 550 kg/m³ sabit bağlayıcı içeriği ve 0.26 su-bağlayıcı oranı ile üretilmiş ve Portland çimentosunun %20'si ağırlıkça uçucu kül ile ikame edilmiştir. Sonuçlar, beton karışımındaki SP dozajının fazlalaşmasıyla birlikte akışkanlığın arttığını göstermiştir. Ancak, optimum bir SP değeri vardır. SP dozajının artışına, optimum seviyeye ulaşana kadar T500 çökme akışı ve V-hunisi süresinin azalması eşlik eder. Bununla birlikte, SP'nin aşırı kullanımı çökme-yayılma akış çapının artmasına neden olmuştur.

Collepari ve ark. (1990), süperakışkanlaştırıcı dozaj oranındaki %2 ila %4 bir değişikliğin, yüksek dayanımlı beton için silis dumanı varlığında basınç dayanımını önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, süperakışkanlaştırıcının

aşırı dozu, kimyasal uyumsuzluk sorunlarına ve priz süresinin aşırı gecikmesine neden olabildiğini bildirmişlerdir (Kwan, 2003).

2.4 Kürleme Yönteminin Etkisi

Kürleme, hidratlı çimento hamuru ve betonda dahili kimyasal reaksiyonların seri teşvikini açıklamak için kullanılan bir terimdir; kürleme işlemi, zamanla yeterli su ve ısı ile sertleştirilmiş çimento hamurunun özelliklerini geliştirir. Kürleme, hidratasyonu teşvik eder, betonda su kaybını önler ve malzemeyi mümkün olduğunca uzun süre veya yeterli bir süre boyunca doygun veya hemen hemen doygun halde tutar. (Al Saffar, Al Saad ve Tayeh, 2019).

Kürleme, sertleşmiş betonun durabilite, dayanım, geçirgenlik ve hacim kararlılığı gibi özellikleri üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Ayrıca, yetersiz veya yersiz kürleme, aşınma direnci düşük, zayıf, tozlu yüzeylere katkıda bulunan ana faktörlerden biridir ve ayrıca betonun hızlı kurmasına izin verilirse, beton önemli ölçüde erken yaşta kuruma rötresine maruz kalabilir (Özerkan ve Yaman, 2013).

Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), kürlemeyi, hidrolik-çimento betonunun, yeterli su ve ısı varlığında çimentonun sürekli hidratasyonunun bir sonucu olarak olgunlaşması ve sertleştirilmiş özellikler geliştirilmesi süreci olarak tanımlar (ACI 308R). Bu nedenle, tamamlanmamış bir hidratasyon işlemi, üretilen betonun hem dayanımını hem de durabilitesini etkileyecektir. Kürlemenin sertleşmiş beton üzerinde güçlü bir etkisi vardır; yeterli kürleme, istenen durabilite, dayanım, su geçirmezlik, aşınma direnci, hacim stabilitesi ve donma ve çözülme ve buz çözücülere karşı direncin elde edilmesine yardımcı olacaktır (ACI 308R).

Beton ile sıvama sırasında veya sonrasında oluşan su kaybı (örneğin; buharlaşma), yeterli hidratasyonun oluşmasını geciktirebilir veya önleyebilir. Uygun kürleme, tam bir hidratasyon işleminin gerçekleşmesini sağlamak için suyu tutmalı veya betondaki su kaybını telafi etmelidir. Bu, betonun dayanım gelişimine imkan verecektir. Farklı kürleme sürelerinin dayanım kazanımı üzerindeki etkisini göstermektedir; erken yaşlarda hızla iyileşen dayanım daha sonra belirsiz bir süre boyunca yavaş yavaş devam eder (Afifi ve Abou-Zeid, 2016).

Dışsal ve İçsel Kürleme için kullanılan çeşitli yöntemler mevcuttur. Geleneksel yöntemlerin çoğu dışsal kürlemeye dayanır. Genel olarak dışsal kürleme şu şekilde gruplandırılabilir (Aitcin 1998):

- A. Su Ekleyerek Kürleme – su kaybını önlemek/telafi etmek için ek nem sağlanmasıdır. Gölleme, su püskürtme veya ıslak çuval bezi gibi su kaplamaları ile ek nemlendirme sağlanır.
- B. Sızdırmaz kürleme – nem kaybının önlenmesini sağlar. Bu, su geçirmez kağıt, plastik kaplama ve zar oluşturan bileşikler (kürleme bileşikleri olarak da bilinir) ile sağlanır.

Dışsal kürleme geometri veya erişilebilirlik nedeniyle zor olabilir ve genellikle yoğun emek isteyen, pahalı bir işlemdir. Su/çimento oranı (w/c), düşük gözenekliliği ve geçirgenliği olan bu karışımlar için, kür suyu betonun sadece yüzey tabakasına nüfuz ettiğinden harici kür etkili olmayabilir. Dışsal kürlemeye bir alternatif, beton karışımına iç su rezervuarlarının eklenmesinden oluşan iç kürlemedir (Lura ve ark., 2014).

İçsel kürleme, temel olarak beton karışımına kürleme maddesi olarak hizmet eden bir bileşenin dahil edilmesi olan diğer bir beton kürleme konseptidir. İçsel kürleme, ACI tarafından, karışım suyunun bir parçası olmayan iç suyun mevcudiyeti nedeniyle çimentonun hidrasyonunun devam ettiği süreç olarak tanımlanır (ACI 213-03R). İçsel kürleme şu şekilde sınıflandırılabilir:

- İçsel Sulu Kürleme – gömülü bileşen, suyu kademeli olarak sisteme salan bir su deposudur. En popüler yöntemler, önceden ıslatılmış hafif agregalar ve süper emici polimerlerdir (SAP).
- İçsel Sızdırmazlık – bileşen, karışım suyuna özel kimyasallar ekleyerek sistemden su kaybını geciktirmek veya önlemek içindir (Kovler ve ark, 2007).

İçsel kürlemenin, erken yaştaki çatlamaya karşı direnci ve dayanıklılığı artırılmış betonların üretiminde umut verici olduğu kanıtlanmıştır (Bentz ve ark, 2010). Bunun nedeni, beton profil içindeki artırılmış kür erişiminden kaynaklanmaktadır. Geleneksel dışsal kürleme esas olarak dış beton yüzeyine kür sağlarken, içsel kürlemede su aynı

anda betonun içine dağılır ve bu nedenle betonun daha düzgün ve uzun süreli kürlenmesini sağlar (Abou-Zeid, 2015).

Bir içsel kürlenme sisteminin verimliliği, kullanılan LWA'nın hem içeriği hem de su emme, gözenek yapısı ve tane boyutu dağılımı, açık-kapalı gözeneklilik oranı ve ayrıca mekanik özellikler gibi parametrelerle yakından ilişkilidir. Hamur-agrega yakınlığı, içsel kür suyunun kolayca nüfuz etmesi gereken mesafeyi belirleyen belirleyici bir faktördür (Suzuki, Seddik Meddah ve Sato, 2009).

En yaygın iç kürlenme maddesi olan LWA, doğal (örneğin pomza) veya yapay (örneğin genişletilmiş şeyl, genişletilmiş kil) ürünlerdir. İç kürlenme ajanları olarak verimli olmaları için, LWA, beton karıştırmadan önce şartlandırıldığında suyu (tipik olarak kütlece %10-30) hızla emmelidir. Bunun yanı sıra, LWA, betonun olgunlaşması sırasında emilen suyun önemli bir kısmını serbest bırakmalıdır. Çimentolu bir malzemedeki su erken yaşlarda yüksek hareketliliğe sahipken, iç bağıl nem (RH) hala yüksek olduğunda suyun rezervuarlardan hızla salınması gerekir. LWA'nın desorpsiyon davranışı esas olarak gözenek büyüklüğü dağılımına bağlıdır. Genel olarak, kaba bir gözenek yapısı, iç kürlenme için yararlı olan yüksek RH'de daha dik desorpsiyon izotermine yol açar (Lura ve ark., 2014).

Bazı araştırmacılar, ince hafif agreganın iç kürlenme için mevcut nemi dağıtmada kaba hafif agregadan daha etkili olduğunu, diğer araştırmacılar ise gözenek boyutunun iç kürlenme sürecinde tane boyutundan daha önemli bir rol oynadığını bildirmiştir. LWA'nın dozajı esas olarak çimento matrisine girmek için yeterli miktarda iç kürlenme suyuna sahip olmasına bağlıdır (Suzuki, Seddik Meddah ve Sato, 2009).

Afifi ve Abou-Zeid (2016), yüksek performanslı betonda içsel kürlenmenin potansiyel kullanımını araştırmıştır. İçsel kürlenme üç agrega aracılığıyla gerçekleştirilmiştir: perlit, pomza ve geri dönüştürülmüş beton agregaları. Geleneksel karışımlar hazırlanmış ve bu karışımlar kürlenmemiş karışımlarla birlikte su ve bir kürlenme bileşiği ile iyice kürlenmiştir. Sonuçlar, içsel olarak kürlenmiş betonun, geleneksel betona kıyasla 7-28 gün arasında benzer dayanım gelişimi sağladığını göstermiştir. Ancak 28-56 günlük dayanım gelişimi, betondaki bağıl nem seviyelerini koruyan

geliştirilmiş hidratasyon süreci nedeniyle içten kürlenmiş beton için önemli ölçüde daha yüksektir.

Lura (2005) tarafından yapılan çalışmada, küçük doymuş pomza agregalarının ilave edilmesi yoluyla, dayanımı artırılmış, hidratasyon derecesi artırılmış ve otojen rötresi azaltılmış harçların elde edilebileceği görülmüştür. 2 inçlik (50.8 mm) küplerin iç kürlenmesi, dayanım ve hidratasyon derecesi açısından, su altı küründen bile daha verimliydi. Kendi kendine kurumayı önlemek için yeterli miktarda sürüklenmiş su içeren LWA harcı, yarı pomza içeren harca göre biraz daha yüksek dayanım, daha yüksek hidratasyon derecesi ve çok daha az büzülme göstermiştir.

Brooke (2009), yapısal hafif ve içten kürlenmiş betonlar üretmek için pomza agregalarının kullanımı üzerine bir araştırma yayımlamıştır. Hem kısmen doymuş hem de tamamen doymuş pomza agregaları içeren hafif beton için karışım tasarımları geliştirilmiştir. Sunulan araştırma, 40 MPa'dan daha yüksek basınç dayanımlarına ulaşan, doğal olarak oluşan pomza agregaları içeren yüksek performanslı hafif betonun ticari olarak üretilme potansiyeline sahip olduğuna işaret etmektedir.

Vázquez-Rodriguez ve ark., (2020) tarafından yüksek performanslı betonun özelliklerini geliştirme amacıyla yapılan bir çalışmada, mineral agregaların (pomza taşı ve genleştirilmiş kil agregaları) ve kimyasal katkıların (süperakışkanlaştırıcılar ve büzülme azaltıcı katkıları) alternatif bir içsel kürlenme tekniği olarak etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, ince agreganın %20 pomza taşı ile ikamesinin, OPC esaslı bir betonda 180 günde maksimum basınç dayanımının (52 MPa) gelişmesini sağladığını göstermiştir.

2.5 Hafif Beton Uygulamaları

Aşık (2006), hafif beton uygulamalarına ilişkin aşağıdaki yapı örneklerini sunmuştur:

40.000 kişilik oturma kapasiteli Wellington Stadyumu, Yeni Zelanda'nın ilk modern stadyumudur. Aynı zamanda Yeni Zelanda'da hafif agregalı beton ile inşa edilen ilk büyük yapı olma özelliğine sahiptir. Oval bir kase şeklindeki yapısı içindeki tüm prekast bileşenler için LWAC üretmek amacıyla Kaliforniya, ABD'den ithal edilen

genleştirilmiş şeyl agregaları kullanılmıştır. 35 MPa'lık dayanıma sahip silindirik beton, durabilitesi nedeniyle seçilmiştir ve ayrıca tribünler, uzun açıklıklı eğimli kirişler ve önceden bitmiş çift T-şeklinde döşeme için ön germeli ünitelerin verimli üretimi için 25 MPa gecelik bir mukavemet elde etmiştir. Aktif deprem fay hatlarının yer aldığı yapı, yoğunluğu 1850 kg/m^3 olan hafif agregalı beton, sismik yükleri azaltmış ve zorlu şantiye koşulları için bir dizi tasarım ve diğer inşaat avantajları sunmuştur.

İsveç'teki ilk hafif beton köprü Ekim 1975'te tamamlandı. Köprü ön gerilimli ve döşeme çerçevesidir ve üzerinde Handen-Vendelsö otoyolu boyunca uzanan bir yaya yolu da taşımaktadır. Alt döşemeler ve ön gerilimli ankraj alanları dışında, köprü, agrega olarak LB800 adı verilen sinterlenmiş uçucu kül kullanılarak yapısal hafif agrega betonu ile inşa edilmiştir. Beton 28 günde 35 MPa küp basınç ve 1800 kg/m^3 kütle yoğunluğuna sahiptir.

Norveç'te, 1989'dan beri, yüksek-dayanımlı SLWAC kullanılarak altı büyük köprü inşa edilmiştir. İlk küçük yaya köprüsü 1987 yılında Stavanger kasabası yakınlarında inşa edilmiştir. Tüm köprülerde kullanılan LWA, yüksek dayanımlı genleştirilmiş kildir. Tipik beton dereceleri LC55 veya LC60 olup, 28 günlük karakteristik 55 MPa-60 MPa küp dayanıma ve yaklaşık 1900 kg/m^3 yoğunluğa sahiptir.

İngiltere'de hafif agregalı beton kullanılarak bilinen ilk betonarme karkas bina, 1958'de Brentford'da inşa edilen üç katlı bir ofis bloğuydu. Bunu az sayıda bina izledi. 60'ların başında inşa edilen çok önemli bir LC yapısı, British Airways hangarının uzatılan bölümüdür. Roxburgh Kent Konseyi için Roxburgh Kent Ofisi 1966/67'de inşa edildi. Bodrum katının üzerindeki tüm yapı SLWAC ile yapılmıştır.

İngiltere'de bulunan Avrupa en yüksek hastane kompleksi kuleleri olan Guys Hospital-Users Tower ve Communication Tower'ın iki kulesi sırasıyla yerden 122 m ve 145 m yüksekliktedir. Kule 1974 yılında inşa edilmiş ve sinterlenmiş uçucu kül ile 31.000 m^3 SLWAC kaba ve yaklaşık 30 MPa basınç dayanımlı ince agregalar yapımında yaygın olarak kullanılmıştır. Tüm hafif beton tırmık kirişlerinin yerden 113 m yükseklikte konsollarla donatıldığı 29. kattaki konferans salonu ilginç özelliği ile

ön plana çıkmaktadır. Destek beton kaplaması da ayrıca hafif betondur. Temelde ve çerçevelenmede önemli tasarrufların yanı sıra, hafif beton ayrıca herhangi bir ek muamele olmaksızın iki saatlik yangına dayanıklılık özelliği de kazandırmıştır.

3. MATERYAL VE METOD

3.1 Materyal

3.1.1 Portland Çimentosu (PÇ)

Bu çalışmada, LWAC üretiminde A Tipi CEM I 42,5 R (BS EN 197-1, 2011) Portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimento, Türkiye'de faaliyet gösteren Baştaş Çimento firmasından satın alınmıştır. Tedarikçiden alınan çimentonun fiziksel ve mekanik, kimyasal özellikleri Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Çimento mekanik ve fiziksel özellikler

Mekanik ve Fiziksel Özellikler		
Katılaşmaya başlama zamanı	:	≥ 60 dak.
Sağlamlık (Genleşme)	:	≤ 10 mm
Erken dayanım (2. gün)	:	≥ 20 MPa
Son dayanım (28. gün)	:	≥ 42,5 MPa
Özgül ağırlık	:	3,15

Tablo 3.2 Çimentonun kimyasal özellikleri

İsim ve Kompozisyon	Kütle Oranı (%)
SiO ₂	19,79
Fe ₂ O ₃	4,15
Al ₂ O ₃	3,85
CaO	63,84
MgO	3,22
SO ₃	2,75
Na ₂ O	-
K ₂ O	-
Kızdırma kaybı	335

3.1.2 Silis Dumanı (SD)

Mikro silis, Dost kimya firmasından tedarik edilmiştir, amorf SiO₂ yoğunlaştırılmamış formdadır ve Tablo 3.3'te gösterildiği gibi teknik özelliklere sahiptir ve ASTM C-1240 gereksinimlerini karşılamaktadır (URL-1,2019).

Tablo 3.3 Silis dumanı teknik özellikleri (URL-1,2019)

İçerik	
Amorf SiO ₂	min 93%(reel 96,1%)
H ₂ O (nem)	maks 0,3%(reel 0,19%)
LOI (Akkor kaybı)	maks 3,5%(reel 1,81%)
Elekte (45 mikron) kalan	maks 2,5%(reel 0,58%)
Yoğunluk	0,55-0,65 kg/dm ³
BET – Yüzey alanı	15-28 m ² /gr (reel 23,36 m ² /gr)

3.1.3 Çelik Lif

Bekaert firmasından temin edilen çelik lif kullanılmıştır. Kullanılan malzeme Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Lif özellikleri Tablo 3.5’te verilmiştir (Dramix, 2017).



Şekil 3.1 Çelik lif

Tablo 3.4 Çelik lifin özellikleri (Dramix, 2017)

Ürün Tipi	DRAMIX® OL 13/16
Lif şekli	düz
Uzunluk (mm)	13 mm
Çap (mm)	0,15 mm
En Boy oranı	87
Özgül ağırlık	7,8
Çekme dayanımı (Mpa)	3 000
Esneklik Modülü (GPa)	200

3.1.4 İri Agrega (Çakıl)

Çalışma kapsamında kullanılan iri agrega Şekil 3.2’de ve elek analizi sonuçları ise Tablo 3.5 de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Karışımlarda kullanılan iri agrega

Tablo 3.5 Agreganın elek analizi sonuçları

Elek	Elekte kalan ağırlık (g)	Kümülatif Elekte kalan ağırlık (g)	Kümülatif Elekte kalan (%)	Kümülatif geçen (%)
19mm	0	0	0	100
14mm	11	11	8,4	91,6
12,5mm	137	148	26,6	73,4
9,5 mm	43	191	77,8	22,2
4,75 mm	7	198	87,8	12,2
2,36 mm	2	200	88,2	11,8
Pan	300	500	100	0

ASTM C 136-2011'e göre incelik modülü = 2,49

3.1.5 İnce Agreganın (Kum)

Doğal silis kumu, Kastamonu İli sınırları içerisinde bulunan bir firmadan temin edilerek karışımlarda kullanılmıştır. LWAC gelişimi için iyi bir agreganın önemli bir bileşendir. Silis kumunun parçacık boyutu maksimum 2 mm olup kum elek analizi Tablo 3.6'da verilmiştir (ASTM C 33, 2017).

Tablo 3.6 Kumun Derecelendirilmesi

Elek	Elekte kalan ağırlık (g)	Kümülatif Elekte kalan ağırlık (g)	Kümülatif Elekte kalan (%)	Kümülatif geçen (%)	ASTMC33 (%)
9.5 mm	0	0	0	100	100
4.75 mm	0	0	0	100	95-100
2.36 mm	1	1	02	998	80-100
1.18 mm	75	76	152	84.8	50-85
600 µm	189	265	53	47	25-60
300 µm	139	404	808	19.2	5-30
150 µm	83	487	974	2.8	0-10
Pan	3	500	100	0	

ASTM C 136-2011'e göre incelik modülü = 1,492

3.1.6 Volkanik Pomza (VP)

Şekil 3.3 bu çalışmada kullanılan açık gri renkli kaba agrega içeren bir agrega olan volkanik pomza taşı (VP) göstermektedir. Bu malzeme 2 mm'lik elek altı ve üstü olmak üzere ikiye ayrılmış ve karışımlarda ince kısmı kum ile (pomza /kum) iri kısmı ise iri agrega ile yer değiştirilerek (pomza /iri agrega) karışımlarda kullanılmış olup, kullanılan pomzanın ortalama yoğunluğunun 835 kg/m^3 'tür. Pomza Nevşehir pomzası olup karışımlara ilave edilmeden önce 80 C fırında 48 saat kurutularak kullanılmıştır. Kullanılan pomzaya ait elek analizi sonuçları Tablo 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 LWAC karışımlarında kullanılan pomza ve kurutma işlemi

Tablo 3.7 VP elek analizi sonuçları

Elek	Elekte kalan ağırlık (g)	Kümülatif Elekte kalan ağırlık (g)	Kümülatif Elekte kalan (%)	Kümülatif geçen (%)	ASTMC33 (%)
10mm	0	0	0	100	100
95 mm	4	4	8	992	100
475 mm	251	259	518	482	95-100
236 mm	167	426	852	9 148	80-100
118 mm	22	448	896	104	50-85
600 μm	6	454	908	92	25-60
150 μm	9	463	926	74	0-10
Pan	37	500	100	0	

ASTM C 136-2011 = 2,49'a göre incelik modülü

3.1.7 Su

Bu çalışmada TS-EN 1008 (2003) standardına göre Kastamonu Üniversitesi kampüsünün içilebilir suyu tüm karışımlar için kullanılmıştır.

3.1.8 Süperakışkanlaştırıcı (SA)

Bu çalışmada süperakışkanlaştırıcı olarak, CHRYSO Lab Bet 8109 kullanılmıştır. Bu süperakışkanlaştırıcı, TS EN 934-2. Ç.3,1/3,2.'e uygun yüksek oranda su azaltıcı beton katkıdır. İşlenebilirliği artırarak düşük su/çimento oranı için kullanılan yeni nesil polikarboksilat bazlı Süper akışkanlaştırıcıdır ve özellikle KYB için tavsiye edilir, tedarikçi belgesine göre özetle, CHRYSO Lab bet 8109'un teknik detayları ve açıklaması Tablo 3.8'te gösterilmiştir.

Tablo 3.8 Lab Bet 8109'un teknik özellikleri

Baz	Polikarboksilat
Renk	Açık kahverengi
Özgül Ağırlık	1,082 ± 0,02
Yoğunluk	~1,075 gm/cm ³
PH	~ 4,5
Klorür İçeriği	< 0,1%

3.2 Deneysel Program

Hafif beton karışım tasarımı için Taguchi yöntemi seçilmiştir. Bu yöntemde, karışımlarda kullanılacak iri agrega ve kum oranlarının (Tablo 3.9) yerine ince pomza yüzdesi 4 seviye olarak %0,%50,%75 ve %100 ve pomza çakılı yüdeside %0, %50, %75 ve %100 yer değiştirilerek kullanılmıştır. Ayrıca karışımlarda bağlayıcı ile yer değiştirilerek kullanılan silis dumanı yüzdesi de 4 seviye olarak tercih edilmiştir. Bu seviyelerde sırasıyla %0, %5, %10 ve %15Tir. Hafif beton özelliklerinin araştırıldığı bu çalışmada pomza ve silis dumanına ilave olarak çelik lif kullanım oranının etkisinin incelenmesi için Tablo 3.11'de gösterilen karışım hacminin %'si olarak 4 farklı oranda lif kullanılmıştır.

Tablo 3.9 Beton karışımındaki agrega miktarı

Karışım	Kum (kg/m ³)	İri agrega (kg/m ³)
1	0	0
2	123,3	218,75
3	411	437,5
4	822	875

Tablo 3.10 Silis dumanı karışım oranları

Karışım	Ağırlık kg/m ³	%
1	0	0%
2	25,5	5%
3	51	10%
4	78,5	15%

Tablo 3.11 Beton karışımındaki çelik lif ağırlığı ve yüzdesi

Karışım	Ağırlık kg/m ³	%
1	0	0%
2	3,9	0,05%
3	7,8	0,1%
4	15,6	0,2%

Tüm faktörleri ve seviyeleri belirtmek için Taguchi yöntemi, L16 (4 ^ 4) gibi bir ortogonal matris ile kullanılmıştır. Taguchi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen test faktörleri ve düzeyleri Tablo 3.12’de ve toplam 16 ortogonal test grubunda Tablo 3.13’te verilmiştir.

Tablo 3.12 Uygulanan test faktörleri ve düzeyleri

Seviye	Faktörler ve Seviyeler			
	SD %	Pomza/Kum %	Pomza/İri Agrega %	Çelik Lif (%)
1	0	0	0	0
2	5	50	50	0,005
3	10	75	75	0,01
4	15	100	100	0,02

Tablo 3.13 Dört seviyeli ortogonal diziler (L16)

Karışım no.	Faktörler ve düzeyler (%)			
	SD/b	Pomza/Kum	Pomza/İri Agrega	Çelik Lif
K0A0S0L0	0	0	0	0
K0A50S5L0,5	5	0	50	0,005
K0A75S10L1	10	0	75	0,01
K0A100S15L2	15	0	100	0,02
K50A0S5L1	5	50	0	0,01
K50A50S0L2	0	50	50	0,02
K50A75S15L0	15	50	75	0
K50A100S10L0,5	10	50	100	0,005
K75A0S10L2	10	75	0	0,02
K75A50S15L1	15	75	50	0,01
K75A75S0L0,5	0	75	75	0,005
K75A100S5L0	5	75	100	0
K100A0S15L0,5	15	100	0	0,005
K100A50S10L0	10	100	50	0
K100A75S5L2	5	100	75	0,02
K100A100S0L1	0	100	100	0,01

Tablo 3.14, her grupta kullanılan malzeme miktarları verilmiştir. Karışımlarda süper akışkanlaştırıcı (SA) ön denemelerde belirlenen oranda tüm gruplarda aynı olacak şekilde karışımlara ilave edilmiştir. Karıştırma için sabit kanatlı döner pan mikser kullanılmıştır. Kuru malzemeler kuru koşullarda karıştırılmış, daha sonra hafif beton elde etmek için mikser su ilave edilmiştir.

Tablo 3.14 Karışım Detayları

Karışım Kodu	PÇ	SD	Pomza/Kum	Pomza / İri agrega	Kum	Çakıl	Çelik lif	Su	SA
Kg/m³									
Kontrol T1	510	0	0	0	822	875	0	255	4
T2SF5F05	484,5	25,5	0	140,5	822	437,5	3,9	255	4
T3SF10F1	459	51	0	210,75	822	218,75	7,8	255	4
T4SF15F2	431,5	78,5	0	281	822	0	15,6	255	4
T5SF5F1	484,5	25,5	131,99	0	411	875	7,8	255	4
T6SF0F2	510	0	131,99	140,5	411	437,5	15,6	255	4
T7SF15F0	431,5	78,5	131,99	210,75	411	218,75	0	255	4
T8SF10F05	459	51	131,99	281	411	0	3,9	255	4
T9SF10F2	459	51	224,39	0	123,3	875	15,6	255	4
T10SF15F1	431,5	78,5	224,39	140,5	123,3	437,5	7,8	255	4
T11SF0F05	510	0	224,39	210,75	123,3	218,75	3,9	255	4
T12SF5F0	484,5	25,5	224,39	281	123,3	0	0	255	4
T13SF15F05	431,5	78,5	378,6	0	0	875	3,9	255	4
T14SF10F0	459	51	378,6	140,5	0	437,5	0	255	4
T15SF5F2	484,5	25,5	378,6	210,75	0	218,5	15,6	255	4
T16SF01	510	0	378,6	281	0	0	7,8	255	4

Hesaplamalarda agreganın birim ağırlığı= 2,6 kg/m³ pomzanın birim ağırlığı= 0,835 kg/m³ alınmıştır.

3.3 Yöntem

3.3.1 Çökme Testi

Bir engel olmadığında betonun yatay serbest akışını değerlendirmek için çökme yayılma testi kullanılır (Şekil 3.11). Test yöntemi, çöküşü belirlemeye yönelik test yöntemine dayanır. Çökme testi (Akış Çökme ya da Slump Testi) betonun engeller olmadan kolayca akabilme kapasitesinin değerlendirilmesi için hızlı bir testtir. Tipik Abrams konisini tabanı temizledikten ve nemlendirdikten sonra, beton çemberin çapı betonun doldurma kabiliyeti için bir ölçüdür. Aparat aşağıdaki şekilde de gösterilmiştir:

1. Taban ölçüleri tabanda 200 mm çapında, üstten 100 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde kesik koni şeklinde kalıp.

2. Çökme konisinin merkezi konumunu işaretleyen bir daire ve 500mm çapında başka bir eşmerkezli daire ile işaretlenmiş, en az 700mm kare şeklinde, sert emici olmayan bir malzemenin taban plakası.
3. Mala
4. Cetvel
5. Kronometre (isteğe bağlı)



Şekil 3.4 Çökme test aparatı

3.3.2 Yoğunluk, Su Emme Oranı ve Prozite Testi

ASTM C642-97 yönetmeliği esasına göre yapılmıştır. Beton numunelerin yoğunluk testi, porozite ve su emme oranları ASTM C642-97'ye göre belirlenmiştir. Betonun gözenekliliği, su, hava, asit ve bazın geçebileceği küçük deliklerle dolu bir yapı anlamına gelmektedir. Gözeneklilik, bir malzemedeki tüm gözeneklerin hacminin, dökme malzemenin hacmine oranı olarak tanımlanabilir. Betonda bulunan gözenekler, karışımların kalıba yerleştirilmesi sırasında yetersiz sıkıştırmanın bir sonucudur. En önemli özellik olan betonun dayanımı de bu gözeneklerden etkilenebilmektedir. Yoğunluk direkt olarak 105°C sıcaklıkta 24 saatlik sürede aşağıdaki formülasyonlara göre (eşitlik 3,1 – 3,7) hesaplanmıştır:

$$\text{Su emme oranı} = [(B - A) / A] \times 100 \quad (3.1)$$

$$\text{Kaynama ve kür sonrası su emme oranı} = [(C - A) / A] \times 100 \quad (3.2)$$

$$\text{Hacimsel kuru yoğunluk} = [A / (C - D)]. \rho \quad (3.3)$$

$$\text{Kür sonrası hacimsel yoğunluk} = [B / (C - D)]. \rho \quad (3.4)$$

$$\text{Kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk} = [C / (C - D)]. \rho \quad (3.5)$$

$$\text{Görünür yoğunluk} = [A / (A - D)]. \rho \quad (3.6)$$

$$\text{Porozite} = (C - A) / (C - D) \times 100 \quad (3.7)$$

Eşitliklerde;

A = fırında kurutulmuş numunenin açık havadaki kütlesi, (g)

B = daldırma işleminden sonra yüzeyi kuru numunenin açık havadaki kütlesi, (g)

C = daldırma ve kaynatma işleminden sonra yüzeyi kuru numunenin açık havadaki kütlesi, (g)

D = daldırma ve kaynatma işleminden sonra suda görünen numune kütlesi, (g)

ρ = su yoğunluğu = 1 Mg / m³ = 1 g / cm³

3.3.3 Basınç Dayanımı Testi

Beton küp örneklerinden elde edilen basınç dayanımı sonuçları, betonun tüm özellikleri hakkında fikir vermektedir. Bu test, betonlama işleminin düzgün yapıp yapılmadığı anlaşılmaktadır. Genel inşaat için beton basınç dayanımı, ticari ve endüstriyel yapılarda 15 MPa (2 200 psi) ila 30 MPa (4 400 psi) ve üstü arasında değişmektedir. Amerikan Malzeme Test Etme Derneği ASTM C39/C39M, “*Beton Örneklerinin Basınç Dayanımı için Standart Test Yöntemi*” sağlamaktadır. Bu açıdan örnekler 3, 7, 28 ve 90 günlük kütleme işleminden sonra Şekil 3.16’da gösterildiği gibi basınç test cihazı ile test edilmiştir. Yükler, numuneler kırılışya kadar dakikada 140 kg/cm² oranında kademeli olarak uygulanmalıdır. Kırılma-parçalanma anındaki yükün numune alanına bölünmesi betonun basınç dayanımını vermektedir. Örnekler taşıma gücünü kaybedene kadar yavaş yavaş yükleme yapılmalıdır. Kırılma anındaki yük belirlenerek TS EN 1015-11 nolu standarta uygun olarak basınç dayanımı eşitlik (3.8) kullanılarak belirlenmiştir

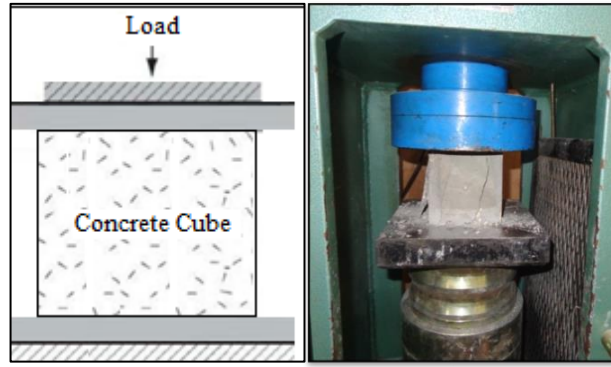
$$\sigma = P/A \quad (3.8)$$

Eşitlikte;

P: Uygulanan kuvvet (N)

A: Kesit alanı (mm²)

σ : Basınç dayanımı (N/mm²)



Şekil 3.5 Basınç dayanımı testi

3.3.4 Yarmada Çekme Dayanımı Testi

Yarmada çekme dayanımı, yapısal hafif beton elemanlarının tasarımında, betonun sağladığı kayma direncini değerlendirmek için kullanılmaktadır. İki metal kenar arasında kesildiğinde betonların vereceği yükü belirlemek için yarmada çekme dayanımı testi (Şekil 3.6) yapılmaktadır. Yarmada çekme dayanımı sonuçları, kesme yüklerine maruz kalma eğilimi gösteren film ve levha ürünleri tasarımcıları veya uygulanan kırma yüklerinin riskli olduğu uygulamalar için önemlidir. Çekme Dayanımı Testi için standart olan ASTM C 496/C 496M – 04 silindirik beton numuneler kullanılmıştır. Bölünmüş çekme dayanımı hesaplanması ise aşağıdaki formül (eşitlik 3.10) kullanılarak yapılmıştır:

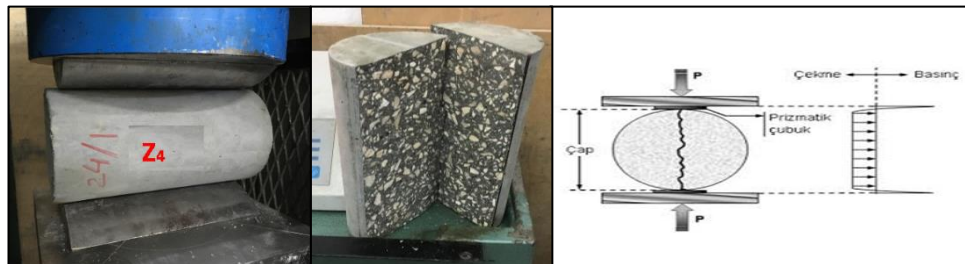
$$\text{Yarmada Çekme Dayanımı} = 2P/\pi DL \quad (3.9)$$

Eşitlikte;

P: maksimum uygulanan yük (N)

D: örnek çapı (mm),

L: örnek silindirin uzunluğu (mm)' nu ifade etmektedir.



Şekil 3.6 Yarmada çekme dayanımı deneyi

3.3.5 Yangın Dayanım Testi

Yangın dayanım testi 28'inci gün sonunda gerçekleştirildi. Isıtmadan önce, patlayıcıların salınımını kontrol etmek için genellikle kurutma işlemi gereklidir (Liang vd, 2018). Harcı ve hamur örneklerini 105 ° C'de 24 saat kurutmak için mekanik havalandırmalı fırın kullanılmıştır (Şekil 3.12). Numuneler elektrikli fırında yüksek sıcaklığa maruz bırakıldı (Şekil 3.13). Numuneler 5 ° C / dk'da aşağıdaki 300 ° C, 450 ° C ve 600 ° C (ASTM E831, 2016) sıcaklık değerlerine ısıtıldı. Test sıcaklıklarına ulaşıldığında, numunelerdeki termal alanın iyi bir homojenliğini sağlamak için numuneler bu sıcaklıkta bir saat tutuldu (Tahwia, 2017). Her bir aranın sonunda fırın kapalı konuma alındı ve fırının oda sıcaklığına dönmesi sağlandı. Mekanik testler ısıtılmadan yapılmıştır.



Şekil 3.7 Malzemeleri kurutmak için kullanılan fırın



Şekil 3.8 Test için kullanılan elektrik fırını

3.3.6 Aşınma Direnci

Aşınma direnci 100x100x100 mm boyutundaki küp numuneler 180 günlük kür süreleri bittikten sonra C944 / C944M standartı kullanılarak yapılmıştır. Kür havuzunda bekletilen olan 180 günlük 100 x 100 x 100 mm boyutlarındaki küp numunenin ayrı ayrı olmak üzere 3 farklı yüzeyine, 97 N dikey yük ile 200 rpm hıza sahip aşındırıcı diskler ile 2 dakika aralıklarla toplam 6 dakika boyunca aşındırmaya tabi tutulmuştur ve bu deney 3 numunede tekrarlanarak ortalamaları alınmıştır. Yüzde olarak ağırlık kaybı, numunenin her yüzeyi için 2 dakikalık aşındırmadan sonra belirlenmiş ve ağırlık kaybı yüzdeleri belirlenmiştir.

Ağırlık kaybının % 'sini bulmak için eşitlik 3.10 kullanılmıştır.

$$\% \text{ Ağırlık kaybı} = ((m_1 - m_2) / m_2) \times 100 \quad (3.1)$$

m_1 = Testten önceki ağırlığı

m_2 = Testten sonraki ağırlığı

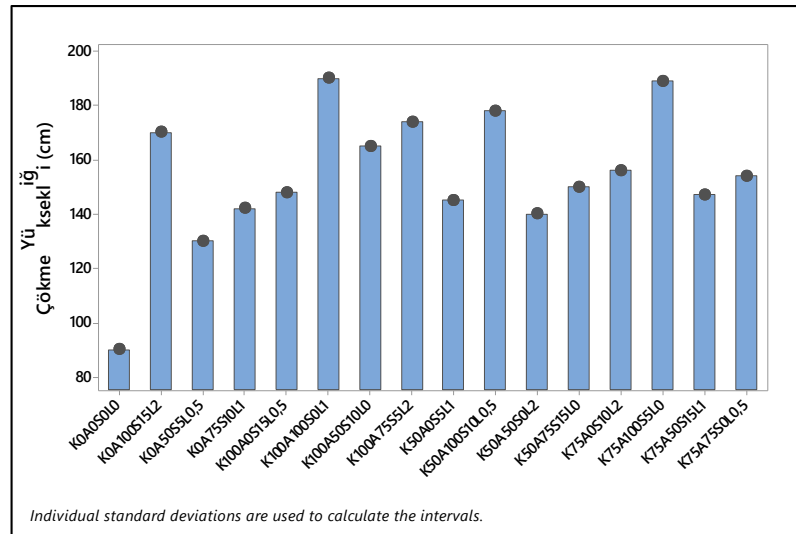
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Çökme Testi

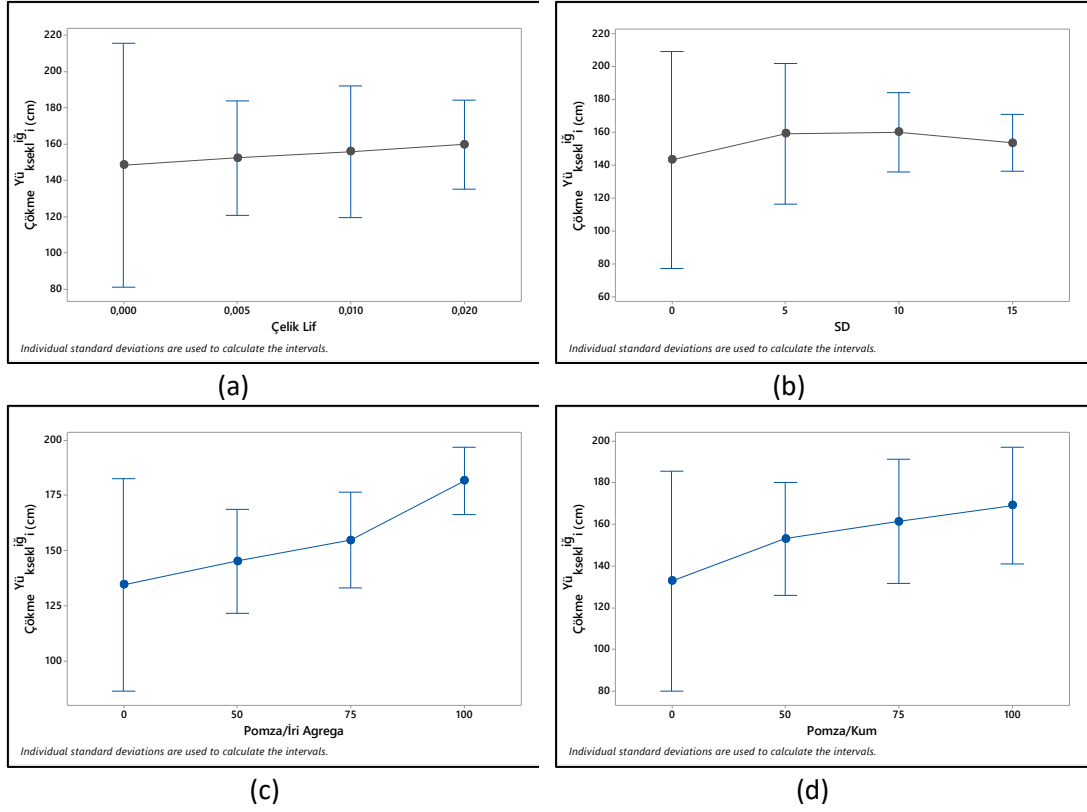
Tablo 4.1 ve Şekil 4.1 çökme testi sonuçlarını göstermektedir. Tablo 4.1 ve Şekil 4.1 incelendiğinde en yüksek çökme (190 mm) K100A100S0L1’de kaydedilirken, en düşük (90 mm) ile referans karışımı olan K0A0S0L0 grubunda görülmüştür.

Tablo 4.1 Çökme testi sonuçları

Karışım Kodu	Çökme Yüksekliği (mm)
K0A0S0L0	90
K0A50S5L0,5	130
K0A75S10L1	142
K0A100S15L2	170
K50A0S5L1	145
K50A50S0L2	140
K50A75S15L0	150
K50A100S10L0,5	178
K75A0S10L2	156
K75A50S15L1	147
K75A75S0L0,5	154
K75A100S5L0	189
K100A0S15L0,5	148
K100A50S10L0	165
K100A75S5L2	174
K100A100S0L1	190



Şekil 4.1 LWAC çökme testindeki değişimler



Şekil 4.2 Değişkenlerin çökme sonuçlarına etkisi

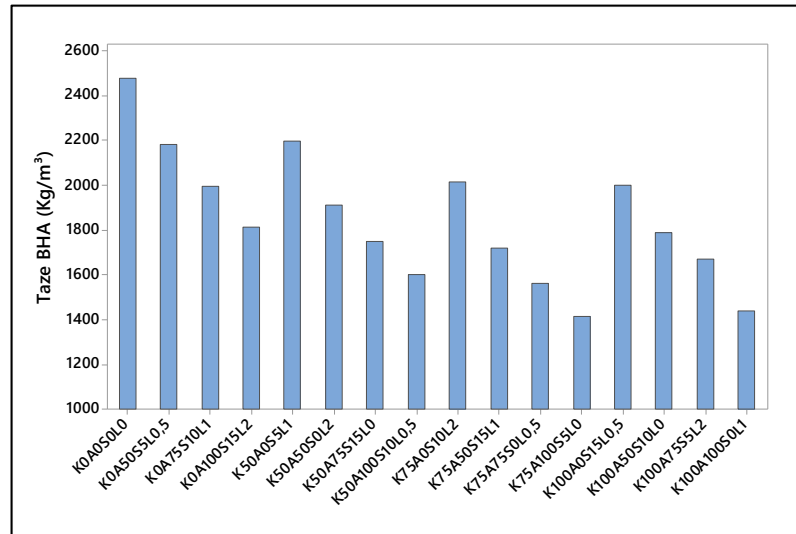
Şekil 4.2 (a), Çelik liflerin çökme testinden elde edilen sonuçlar üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil incelendiğinde, Çelik lif içeriğinin artmasının çökme sonuçlarında hafif bir iyileşme sağladığı görülebilmektedir. Şekil 4.2 (b) de, SD çökme test sonuçlarına etkisini göstermektedir. SD içeriğinin %0'dan %5'e, %10'a ve %15'e yükselmesiyle, sırasıyla 143cm, 157 cm, 158 cm ve 150 cm ortalama çökme sonuçlarına ulaşılmıştır. Sonuç olarak, SD %10'a içeriğindeki artış, çökme sonuçlarının artmasına neden olmuştur. Ancak %15'e daha fazla artış sonuçlarda belirgin bir düşüşe yol açmıştır. Nochaiya vd. (2010), SD partiküllerinin yüksek özgül yüzey özelliğinden dolayı artan su gereksinimi nedeniyle karışımın akışkanlık özelliklerini düşürdüğünü, bununla birlikte, karışımlarda daha az kuma ve ayrışma gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Şekil 4.2 (c) incelendiğinde, daha fazla Pomza/iri agrega ve Pomza/kum içeriği daha yüksek çökme değerleriyle sonuçlanmıştır. Pomza/iri agrega %0'dan 100'e artmasıyla, çökme değerleri 137 cm'den 180 cm'ye yükselmiştir. Pomza/kum durumunda (Şekil 4.2 (d)), pomzanın artışı ile çökme değerleri artmıştır.

4.2 Taze Birim Hacim Ağırlık

Tablo 4.2 ve Şekil 4.3'te taze BHA sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.3 incelendiğinde hafif beton'deki çimentonun ve agrega değiştirilmesi taze BHA sonuçlarında bir azalmaya neden olmuştur. Taze BHA'nın en yüksek sonucu 2 450 kg/m³ ile referans karışımına aitken, en düşük sonuç 1 480 kg/m³ ile K00A1S0L1 karışımı ile elde edilmiştir.

Tablo 4.2 Taze BHA sonuçları

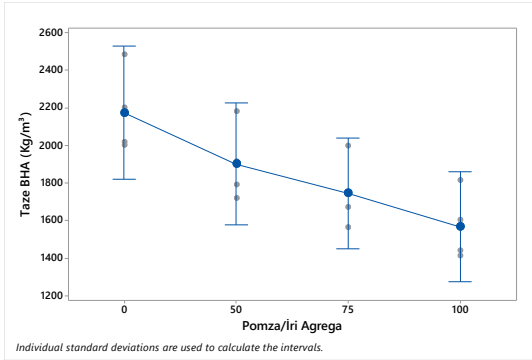
Karışım Kodu	Taze BHA sonuçları (kg/m ³)
K0A0S0L0	2480
K0A50S5L0,5	2182
K0A75S10L1	1998
K0A100S15L2	1813
K50A0S5L1	2200
K50A50S0L2	1914
K50A75S15L0	1750
K50A100S10L0,5	1603
K75A0S10L2	2016
K75A50S15L1	1720
K75A75S0L0,5	1564
K75A100S5L0	1415
K100A0S15L0,5	2000
K100A50S10L0	1790
K100A75S5L2	1670
K100A100S0L1	1442



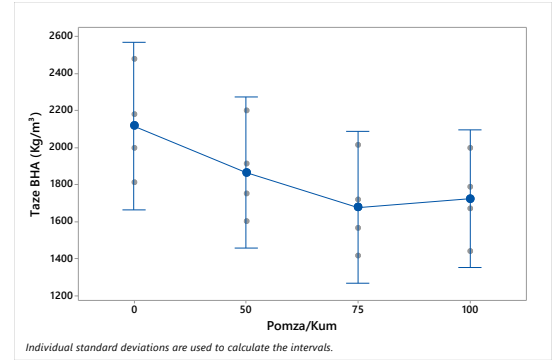
Şekil 4.3 Taze BHA sonuçlarındaki değişim

Şekil 4.4’de, Çelik lif, SD, Pomza/iri agrega ve Pomza/kum taze BHA sonuçlarına etkisi göstermektedir. Şekil 4.4 (a) incelendiğinde, Pomza/iri agrega oranının artması taze BHA değerlerinin ortalamasını düşürmektedir. Aynı durum Pomza/kum oranında artmasıyla (Şekil 4.4 (a)), taze BHA azalmaya sebep olmuştur. Bunun nedeni, iri ve ince agrage ile karşılaştırıldığında, Pomza/iri agrega ve Pomza/kum oranlarındaki artışta etkili olan pomzanın düşük özgül ağırlığıdır.

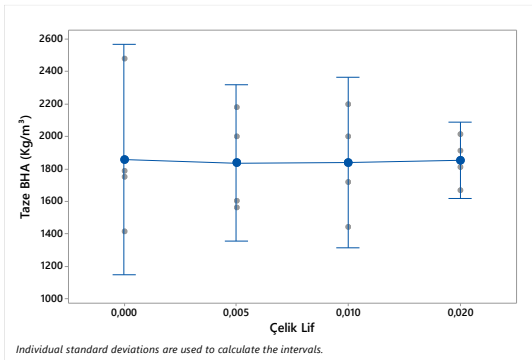
Şekil 4.4 (c) incelendiğinde çelik lif katkısında önemli bir değişimenden olmadığı, tüm gruplarda istatistiksel olarak benzer değişime sebep olduğu görülmüştür. Ancak Şekil 4.4 (d) incelendiğinde, SD ile çimentonun değiştirilmesiyle tüm karışımların taze BHA değerlerini düşürmüştür. Bu nedenle, K0A0S0L0 (referans) karışımında, taze BHA 1390 kg / m³tür, ancak çimentonun %15 değiştirilmesinde, 1350 kg/m³ün en düşük taze BHA ulaşılmıştır. Li, (2011)’e göre bunun nedeni, çimento ile karşılaştırıldığında, mineral katkıların düşük özgül ağırlığıdır.



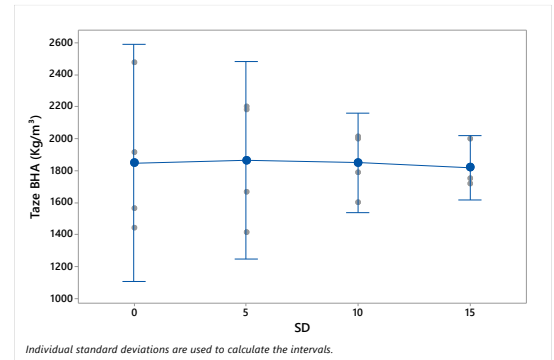
(a)



(b)

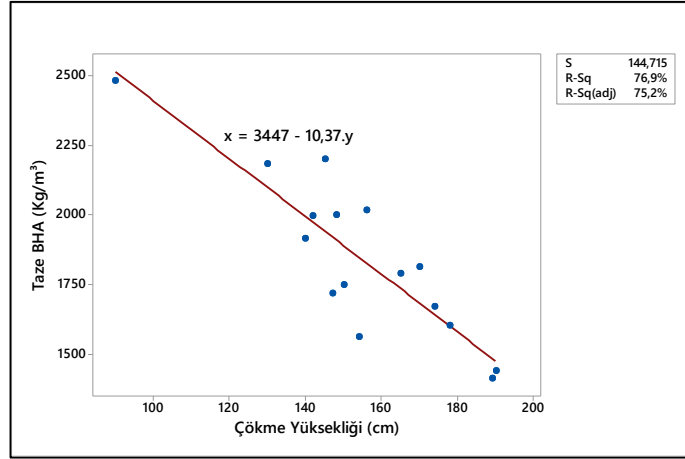


(c)



(d)

Şekil 4.4 Değişkenlerin taze BHA sonuçlarına etkisi



Şekil 4.5 Taze BHA ve çökme arasındaki ilişki

Şekil 4.5, taze BHA ile çökme sonuçları arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Çökme değerinin artmasıyla taze BHA azaldığı gözlemlenmektedir. Bu, malzemelerin ve çimento özgül ağırlıklarındaki farklılık nedeniyle taze BHA'nın azalmasına ve aynı zamanda çökme artışına neden olan SD ve Pomza/kum kullanımına atfedilebilir. İstatistiksel olarak ilişki $R^2=76,9$ ile “çökme = 3 447-10,37 taze BHA” şeklinde oluşmuştur.

4.3 Yoğunluk

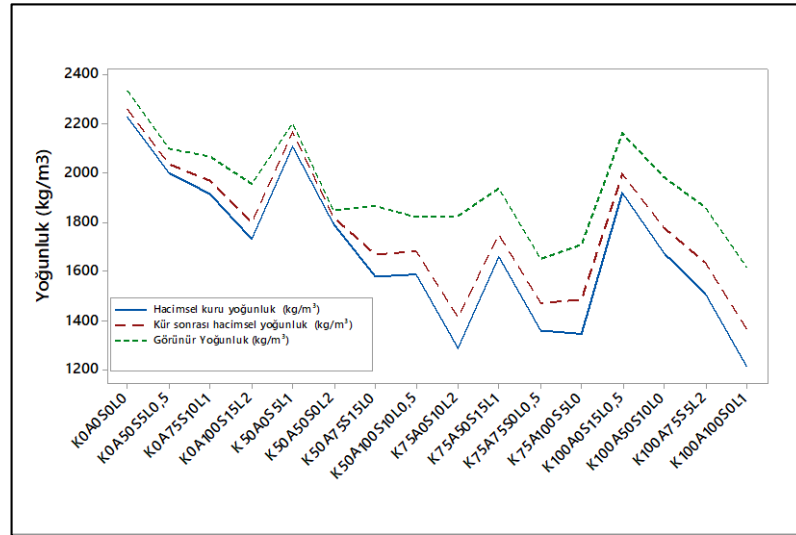
Tablo 4.2 ve Şekil 4.6 yoğunluk deney sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 4.3 Karışımların yoğunluk test sonuçları (kg/m³)

Karışım Kodu	Hacimsel kuru yoğunluk	Kür sonrası hacimsel yoğunluk	Kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk	Görünür Yoğunluk
K0A0S0L0	2228	2261	2274	2336
K0A50S5L0,5	2000	2034	2047	2099
K0A75S10L1	1913	1970	2000	2069
K0A100S15L2	1730	1800	1844	1953
K50A0S5L1	2105	2166	2148	2201
K50A50S0L2	1794	1819	1823	1847
K50A75S15L0	1581	1670	1733	1865
K50A100S10L0,5	1587	1681	1716	1822
K75A0S10L2	1287	1415	1582	1825
K75A50S15L1	1660	1749	1803	1937
K75A75S0L0,5	1361	1471	1537	1652
K75A100S5L0	1345	1487	1558	1708
K100A0S15L0,5	1921	1995	2032	2162
K100A50S10L0	1673	1778	1830	1983
K100A75S5L2	1511	1638	1699	1861
K100A100S0L1	1211	1364	1461	1615

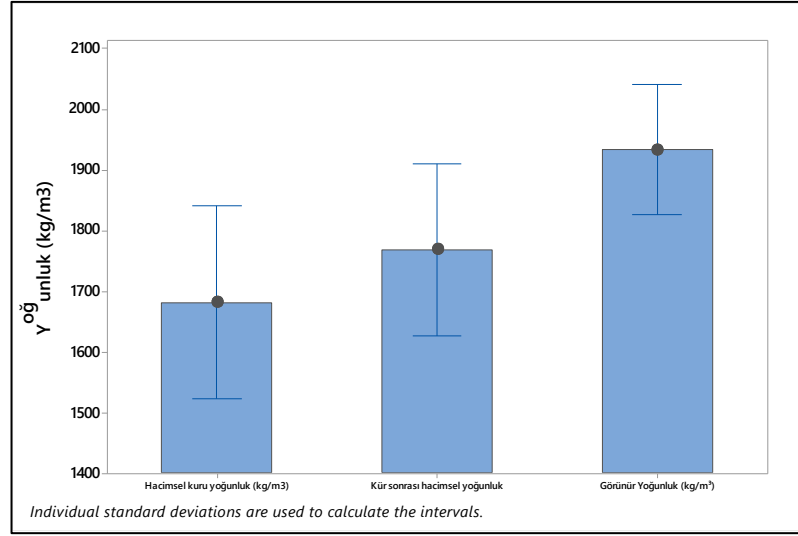
Tablo 4.2 incelendiğinde görünür yoğunlukların 1211 ila 2228 kg/m³ arasında değiştiği görülmüştür. Hafif beton karışımlarına SD, Pomza/kum ve Pomza/iri agrega eklenmesi, Şekil 4.6'da gösterildiği gibi, farklı miktarda içerikle yoğunlukları nispeten azaltmıştır. Buna ek olarak, Şekil 4.8, 4.9, mineral katkı maddelerinin birim ağırlığının azalması ile ters ilişkisini göstermiştir; bu, mineral katkı maddelerinin özgül ağırlığının (SD için 2,26, Pomza/iri agrega için 2,68) çimentonun özgül ağırlığından (3,15) daha az olması ile açıklanabilir.

Şekil 4.7 incelendiğinde, istatistiksel ortalamalara bağlı ortalama hacimsel kuru yoğunluk ile görünür yoğunluk arasında %10-12 lik bir fark olduğu görülmüştür. Ortalamalar arasındaki bu farkın boşluk yapıdaki hapsolan su ile görünür yoğunluğun değerlerinin yüksek olmasıdır.

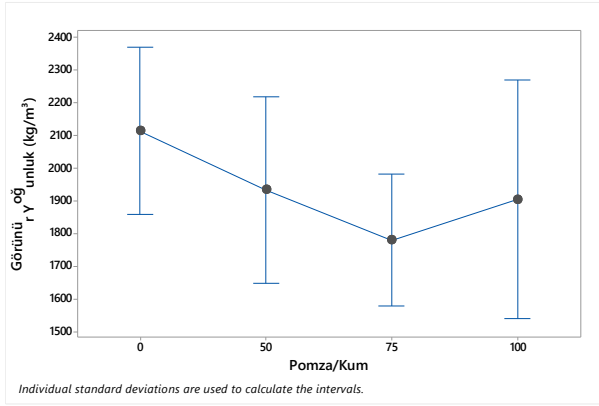


Şekil 4.6 Karışımların yoğunluklarındaki değişimi

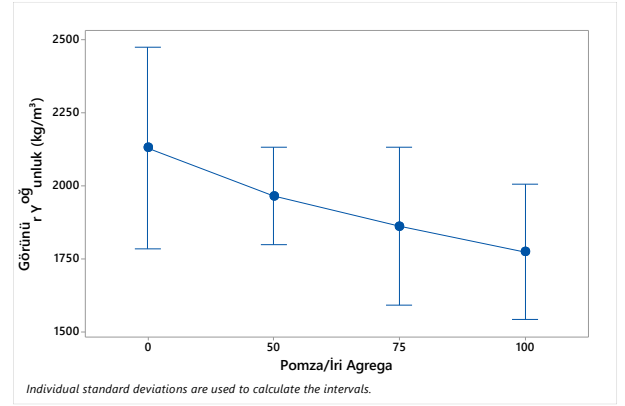
Şekil 4.8 incelendiğinde artan pomza kullanımında ince agrega ile yer değiştirme oranı %75 değerine kadar kullanıldığında azalışa neden olurken, bu oranın üzerindeki değerlerde bu azalışın tekrar artışa geçtiği görülmüştür. Bu durum ince madde oranının artan miktarındaki değişimine atfedilmiştir. Bu durum iri agrega değişiminde ise (Şekil 4.8 (b)) artan miktarla paralel olarak bir azalış olarak gerçekleşmiştir. SD katkısının (Şekil 4.8 (c)) etkisi artan kullanımı ile yoğunlukta küçük bir artışa neden olmasına sebebiyet vermiştir. Ancak çelik lif katkısı (Şekil 4.8 (d)) %0,1'e kadar bu testte önemli bir değişime neden olmadığı görülmüştür.



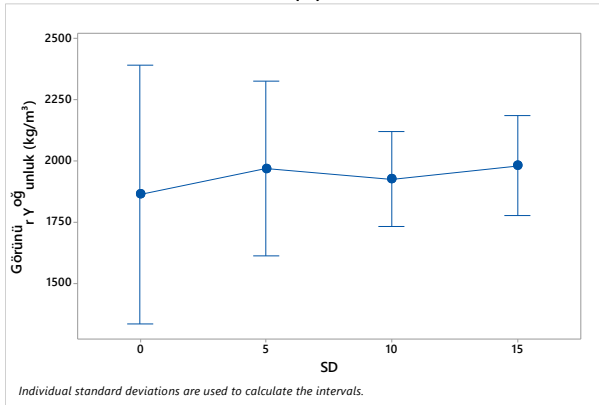
Şekil 4.7 Beton yoğunluk değerleri



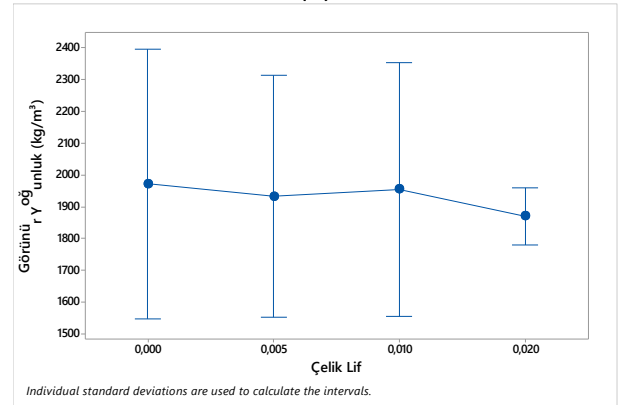
(a)



(b)

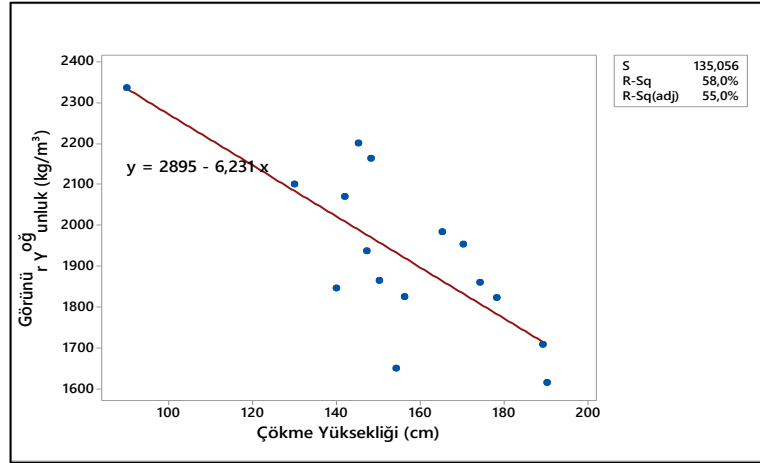


(c)



(d)

Şekil 4.8 Değişkenlerin yoğunluk üzerine etkisi

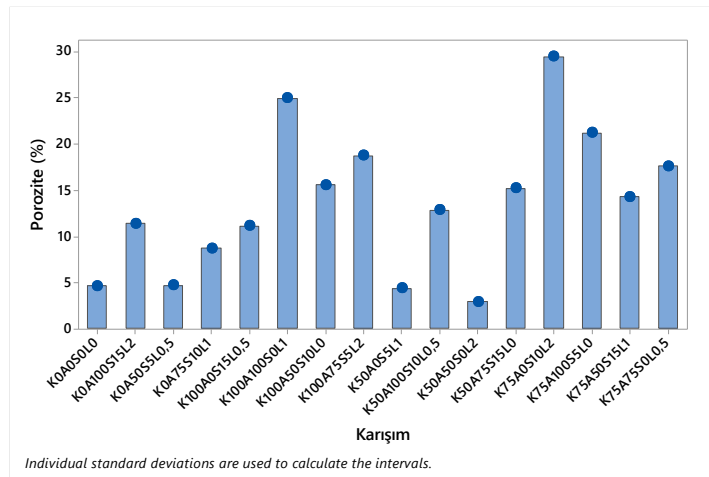


Şekil 4.9 Çökme ile görünür yoğunluk arasındaki ilişki

Şekil 4.9, çökme ile görünür arasındaki ilişki gösterilmiştir. Çökme miktarının artmasıyla görünür yoğunluk azaldığı gözlemlenmektedir. İstatistiksel olarak ilişki $R^2=58$ ile düşük bir ilişki olarak değişkenlik gösterirken, “Görünür yoğunluk=2 895-6,231 çökme” bir eşitlik elde edilmiştir.

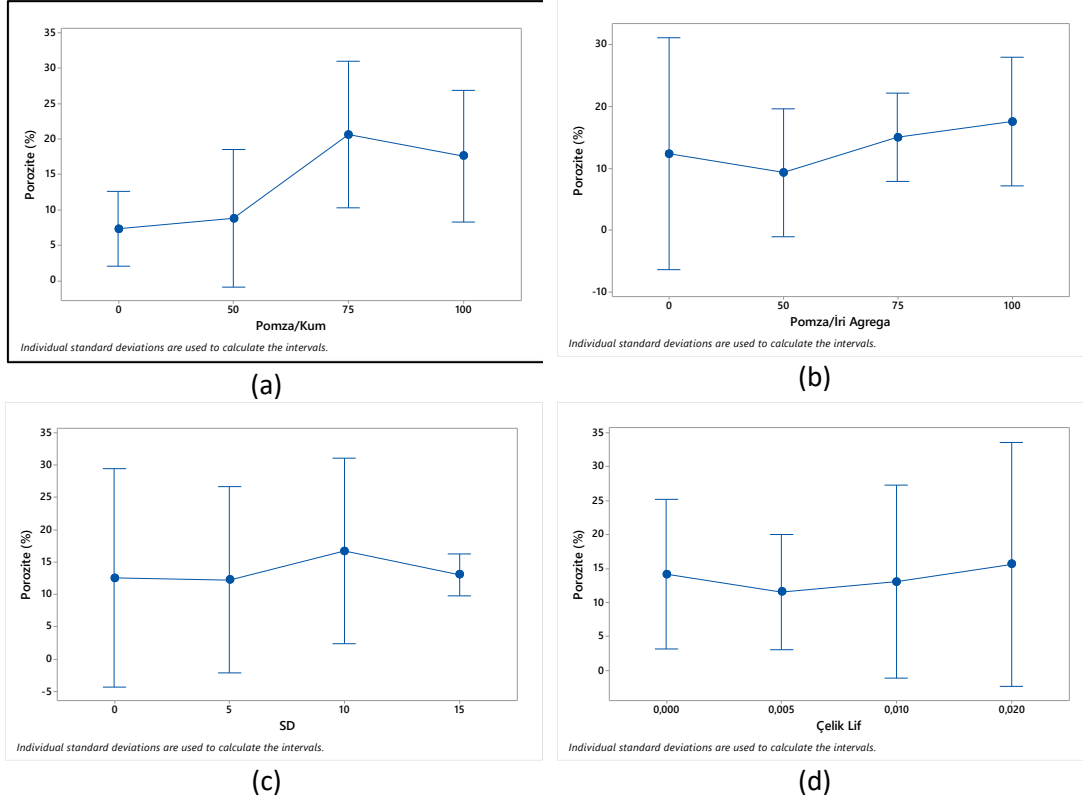
4.4 Porozite

Porozite, gözeneklerle dolu ve genellikle yüzde olarak ifade edilen ve betonun toplam hacminin oranını tanımlamak için kullanılan bir değerdir. Geçirgen olduğunu bildiğimiz bir malzemede porozite önemli bir faktördür. Ancak bu gözenekler yalnızca birbirleri ile bağlı olduklarında akışa izin vermektedirler. 16 farklı karışım için hafif beton'nin porozite değerleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Porozite oranlarındaki değişim

Maksimum porozite değerinin %28 ile %30 K75A05S10L2 karışımında gözlemlenmiştir. Bu karışım çok fazla yayılma akışı gösteren bir grup olma özelliği ile öne çıkmaktadır. Düşük değer ise K50A0S5L1 karışımında %3,5 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.11 Çelik lif, SD, pomza/iri agrega ve pomza/kum porozite sonuçlarına etkisi

Şekil 4.11, porozite sonuçları üzerindeki çelik lif, SD, pomza/iri agrega ve pomza/kum'nin etkisini göstermektedir. Şekil 4.12 incelendiğinde, pomza/iri agrega içeriği ve pomza/kum içeriğindeki artış, tüm karışımlar için porozite değerlerinde artışa yol açmıştır. SD kullanılmasında ise artan kullanım oranına paralel olarak porozite değerlerinde azalışa neden olmuştur. Ancak her iki malzemenin birlikte kullanılmasında kritik oran geçildiğinde ince malzeme miktarındaki artışla bu malzemeler arasında toplam boşluğun artmasıyla açıklanabilir.

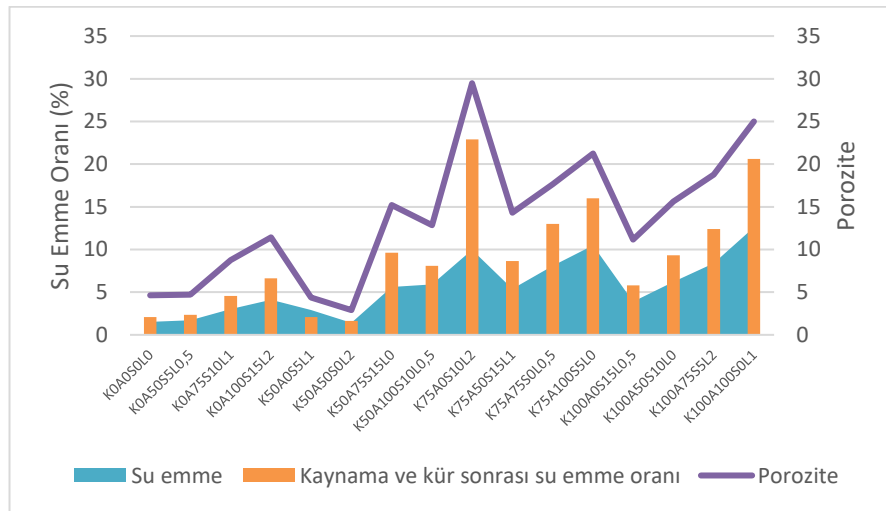
4.5 Su Emme Oranı

Bu test, su emme özelliklerini değerlendirmek için gerçekleştirilmiş olup, su emme oranı test sonuçları Tablo 4.3 ve Şekil 4.12’de verilmiştir.

En düşük su emme oranı K0A0S0L0 kodlu numunede oluşmuş, %0,5 Çelik lif ilavesi hafif beton’ nin su emme oranını arttırmıştır. K75A100S5L0 ve K100A100S0L1 serisi numunelerin su emme değerleri en yüksek değerler elde edilmiştir.

Tablo 4.4 Su emme testi sonuçları

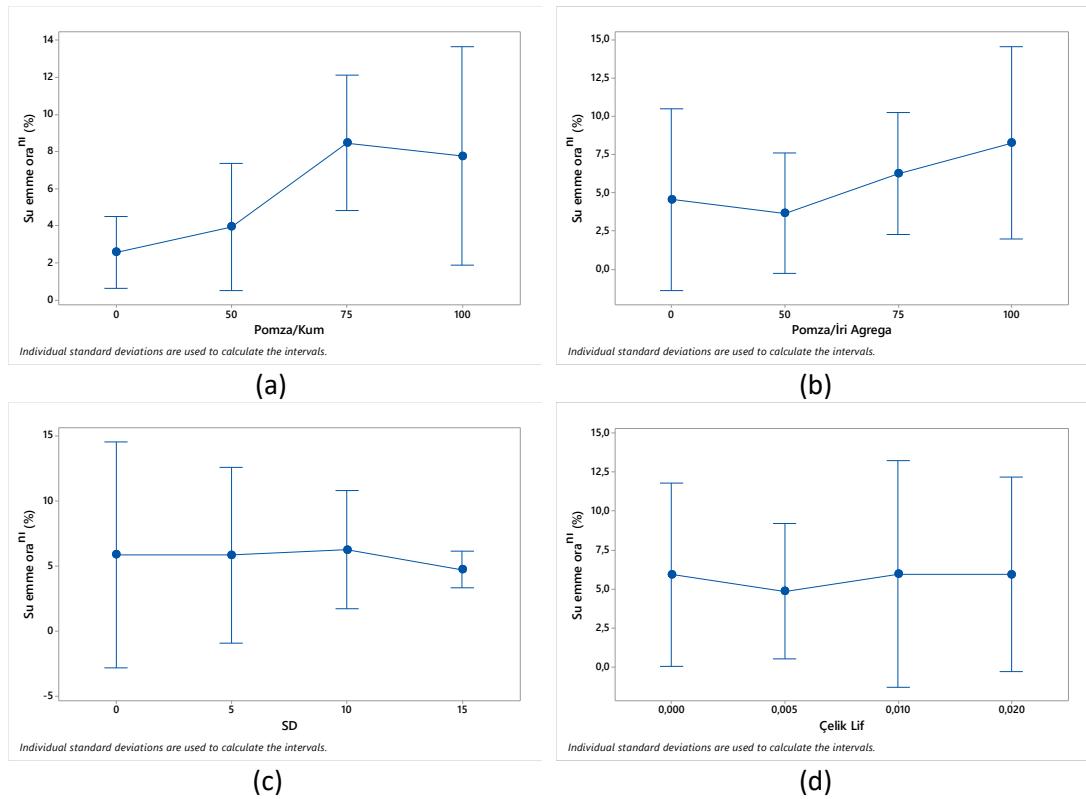
Karışım Kodu	Kaynama ve kür sonrası su emme oranı	Su emme oranı
	%	%
K0A0S0L0	2,09	1,51
K0A50S5L0,5	2,35	1,70
K0A75S10L1	4,57	3,02
K0A100S15L2	6,61	4,09
K50A0S5L1	2,07	2,91
K50A50S0L2	1,62	1,42
K50A75S15L0	9,62	5,59
K50A100S10L0,5	8,10	5,90
K75A0S10L2	22,90	9,97
K75A50S15L1	8,63	5,40
K75A75S0L0,5	13,00	8,08
K75A100S5L0	16,00	10,50
K100A0S15L0,5	5,81	3,89
K100A50S10L0	9,33	6,22
K100A75S5L2	12,40	8,39
K100A100S0L1	20,60	12,60



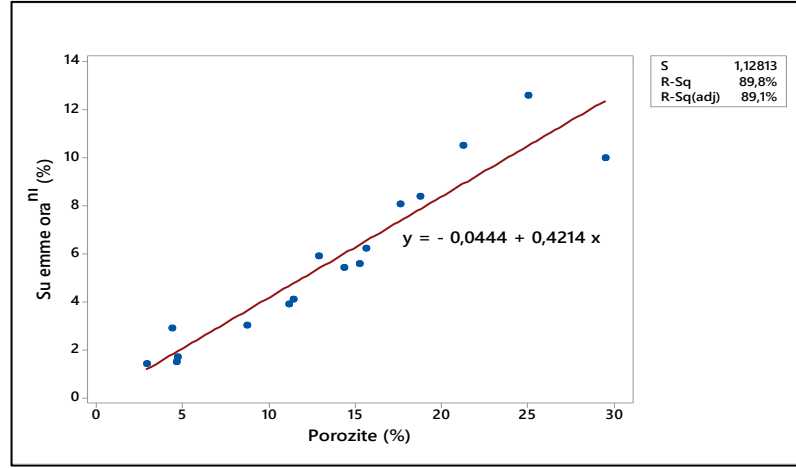
Şekil 4.12 Su emme oranlarındaki değişim

Şekil 4.12 incelendiğinde K75A0S10L2 ve K100A100S0L1 gruplarında görülen yüksek porozite ve buna bağlı olarak elde edilen yüksek su emme oranları artan ince madde miktarı ile ilişkili görülmüştür. Bu durum ise kullanılan oranların grupların prozitesinde fazla bir değişime neden olmadığı, aksine su emme oranının tüm gruplarda poroziteye yakın sonuçların iki grup dışında benzer olmasından kaynaklanmıştır. Bu iki grupta ise değişimin beklenen fazla olması üretimden kaynaklı bir durum olabileceği görülmüştür.

Şekil 4.13, Pomza/kum, pomza/iri agrega, SD ve çelik lif su emilimi üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 4.13 (a) ve (b) incelendiğinde, pomza/kum ve pomza/iri agrega içeriğindeki artış, %0 çimento ikamesi içeren K0A0S0L0 karışımına göre daha yüksek su emme oranı sonuçları elde edilmesine yol açmıştır.



Şekil 4.13 Değişkenlerin su emme oranına etkisi



Şekil 4.14 Su emme oranı ile porozite arasındaki ilişki

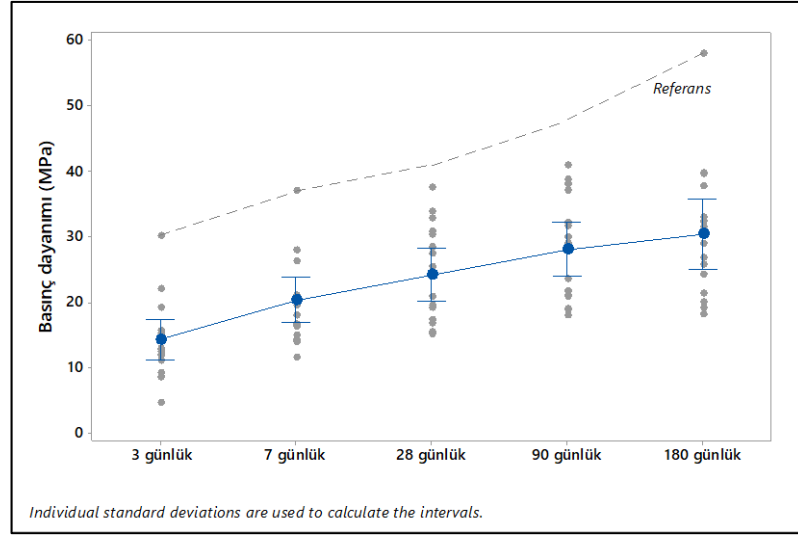
Porozite ile su emme oranı arasındaki regresyon ilişkisi Şekil 4.14'te verilmiştir. Bu ilişki incelendiğinde artan poroziteye bağlı olarak, su emme oranında da artış olduğu görülmüştür. Bu artışın istatistiksel olarak R^2 %89,8 ile yüksek bir ilişkisi olduğu, su emme oranı = $-0,0444 + 0,4214 \cdot \text{porozite}$ eşitliği ile ifade edilebileceği görülmüştür.

4.6 Basınç Dayanımı

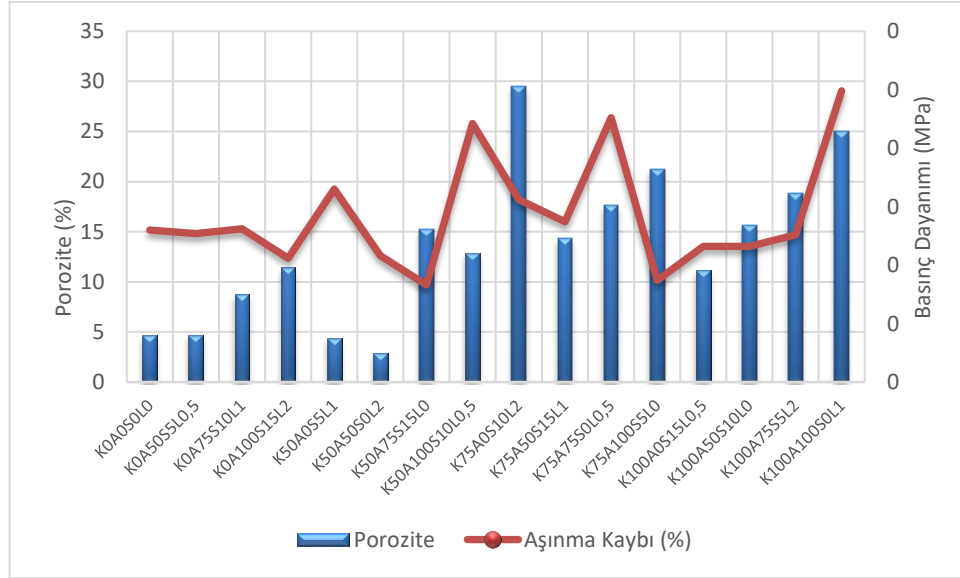
Hafif beton'larda SD, pomza/iri agrega, pomza/kum ve çelik lif etkisinin incelendiği bu tez çalışması kapsamında hazırlanan karışımlara ait basınç dayanımı değerlerindeki değişim Tablo 4.5, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir.

Tablo 4.5 Basınç dayanımı sonuçları

Karışım Kodu	Basınç dayanımı (Mpa)				
	3 gün	7 gün	28 gün	90 gün	180 gün
K0A0S0L0	30,17	36,97	37,49	40,80	57,90
K0A50S5L0,5	21,99	27,97	30,34	32,10	32,90
K0A75S10L1	14,38	21,06	27,47	28,90	29,00
K0A100S15L2	14,37	19,47	28,39	30,00	31,50
K50A0S5L1	12,91	26,20	33,87	38,76	39,47
K50A50S0L2	11,97	20,93	25,42	29,00	30,67
K50A75S15L0	12,40	17,93	19,14	21,00	26,65
K50A100S10L0,5	19,10	20,95	30,81	31,61	32,32
K75A0S10L2	11,05	14,27	15,44	19,00	19,10
K75A50S15L1	15,31	16,30	19,49	20,90	21,33
K75A75S0L0,5	12,82	14,94	15,03	37,04	37,76
K75A100S5L0	9,20	11,53	16,73	18,00	18,18
K100A0S15L0,5	4,64	26,16	32,76	38,00	39,64
K100A50S10L0	15,53	19,76	20,85	21,61	25,64
K100A75S5L2	14,37	16,57	17,28	18,89	20,02
K100A100S0L1	8,62	14,00	15,52	23,53	24,21



Şekil 4.15 Basınç dayanımlarının zamansal değişimi



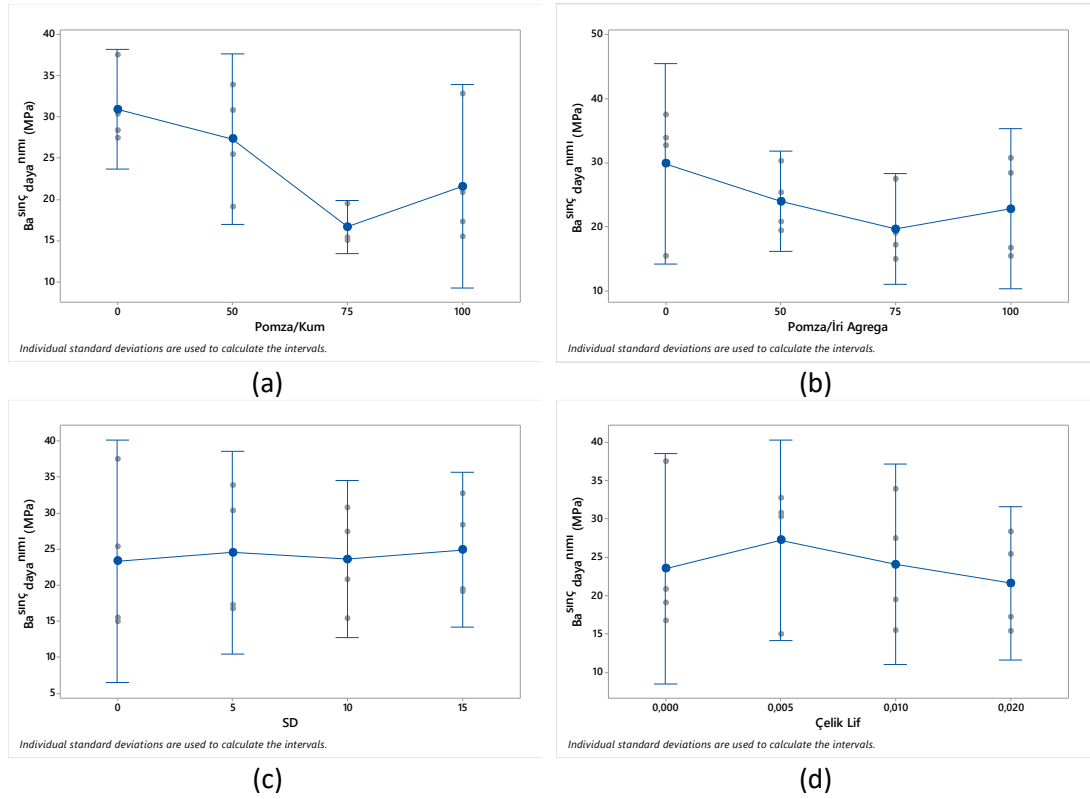
Şekil 4.16 Basınç dayanımlarındaki değişim

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 incelendiğinde; artan yaşa bağlı olarak dayanımlarda artış olduğu, bu referans olarak kabul edilen K0A0S0L0 grubundaki artışa göre artan yaş ile paralel olmadığı görülmüştür. 28 günlük basınç dayanımları karşılaştırıldığında ise düşük porozitede yüksek dayanım ile yüksek porozitede düşük dayanımlar elde edilmiştir.

Silis dumanı, basınç dayanımını önemli ölçüde artırır. 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması, SD ilavesinin, (Şekil 4.17), kontrol ile karşılaştırıldığında, basınç dayanımında küçük bir artışa neden olduğunu

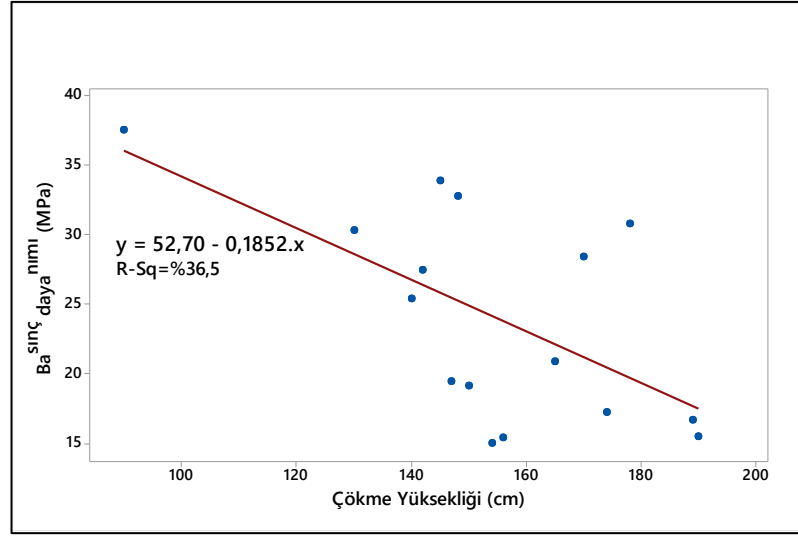
göstermektedir. SD ilavesinin etkisi, Erdem ve Kirca (2008), Elahi vd. (2010), SD'nin sahip olduğu yüksek incelik ve puzolanik aktivitesi nedeniyle erken yaşlardaki mekanik dayanım üzerinde pozitif bir etki oluşturduğunu, amorf SiO₂ nin CH ile reaksiyona girerek C-S-H jelleri oluşturarak erken yaşlardaki mekanik dayanımı artırmasıyla açıklanmıştır.

Pomza/kum ve pomza/iri agrega için şekil 4.17 (a) ve (b)'de gösterildiği gibi, pomza kumu ve pomza çakıllarının artan içeriği ile 28 günlük basınç dayanıklılığında bir azalmaya neden olmuştur. Bu, erken beton ömründe dayanıklılığı 28 güne kadar azaltan pomza kumu kullanımından kaynaklanabilir (Yeginobali, 1998).



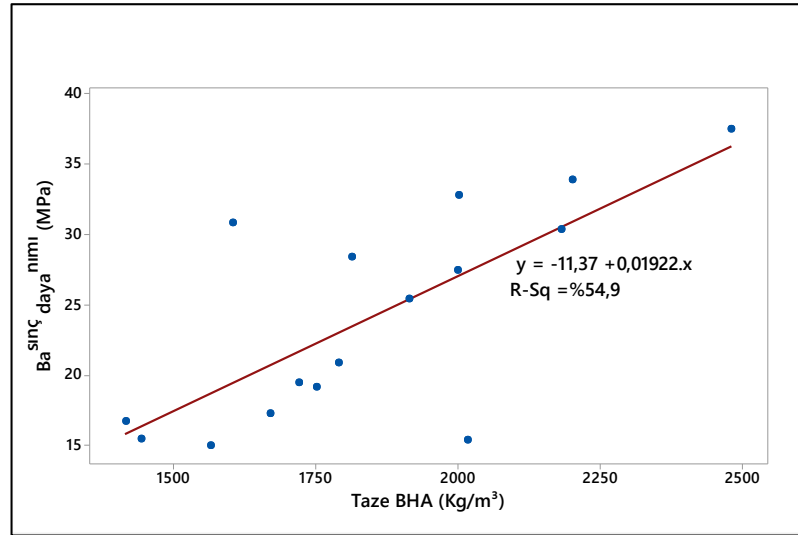
Şekil 4.17 Değişkenlerin basınç dayanımına etkisi

Şekil 4.18, 28 Günlük basınç dayanımı ile çökme sonuçları arasındaki ilişkiyi gösterilmiştir. Çökme değerindeki artışla basınç dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu, basınç dayanımında bir azalmaya neden olurken çökme sonuçlarını iyileştiren SD'nin varlığına atfedilmektedir. İstatistiksel olarak ilişki $R^2=36,5$ ile düşük ve “Basınç dayanımı=52,7-0,1852 çökme” şeklinde elde edilmiştir.



Şekil 4.18 Basınç dayanımı ile çökme arasındaki ilişki

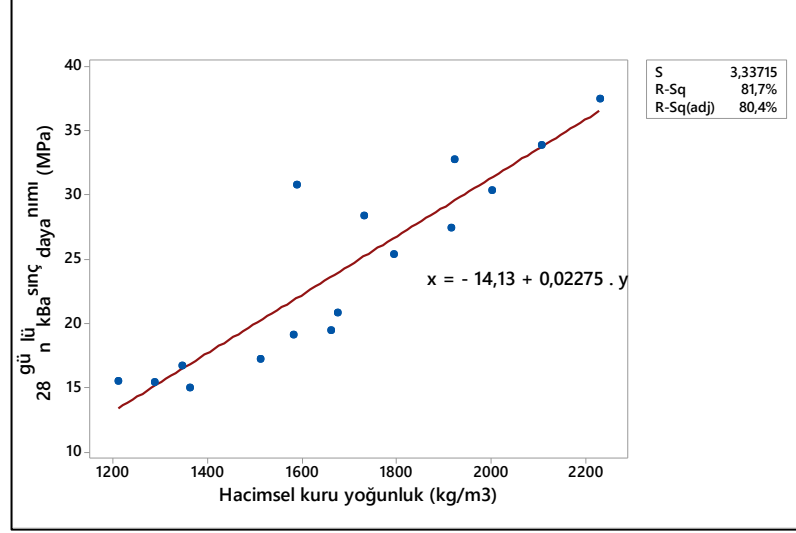
Şekil 4.19, 28 günlük basınç dayanımı ile taze BHA sonuçları arasındaki ilişkiyi incelenmiştir. İlişki, basınç dayanımındaki artışın taze BHA sonuçlarının artışına karşılık geldiğini ifade eder niteliktedir. Bu artış, $R^2=54,9$ orta ilişkisi ile bu denklemde “Basınç dayanımı = - 11,37+0,01922 BHA” şeklinde sunulmuştur. Bu durum SD, Pomza/iri agrega ve Pomza/kum kullanımına atfedilebilir ki bu da basınç dayanımını 28 güne kadar düşürürken, aynı zamanda BHA'nın da azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.19 Basınç dayanımı ile taze BHA arasındaki ilişki

Şekil 4.20, hacimsel kuru kütle yoğunluğu ve 28 günlük basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekil'de olduğu gibi, kuru kütle yoğunluğu ile 28 günlük

basınç dayanımı arasındaki ilişki de pozitif bir ilişkidir, kuru kütle yoğunluğu arttıkça basınç testi sonuçları da yükselmiştir.



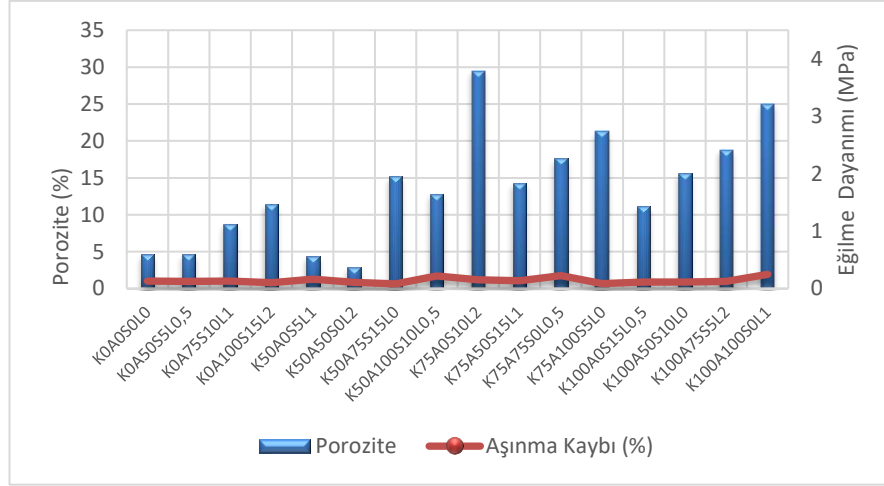
Şekil 4.20 Hacimsel kuru yoğunluk ve basınç dayanımı arasındaki ilişkisi

4.7 Yarmada Çekme Dayanımı

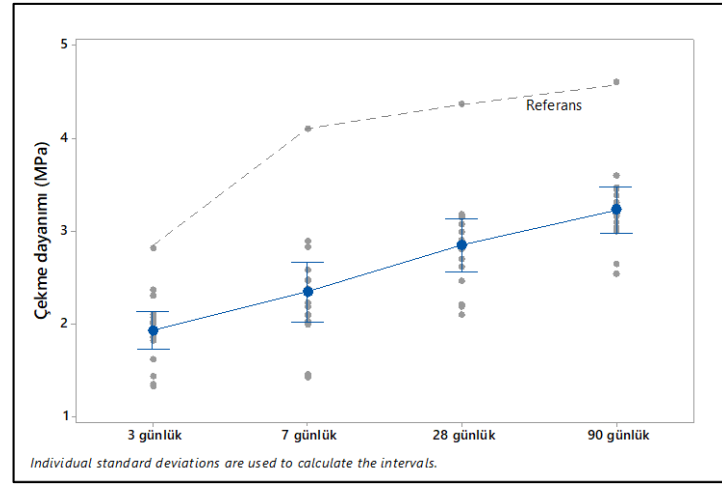
Hafif beton karışımlarının yarmada çekme dayanımı, testi sonuçları Tablo 4.6, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’ de verilmiştir. Tablo 4.6, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22 incelendiğinde yarmada çekme dayanımlarının beton yaşı boyunca kademeli olarak arttığı göstermektedir.

Tablo 4.6 Yarmada çekme dayanımı testi

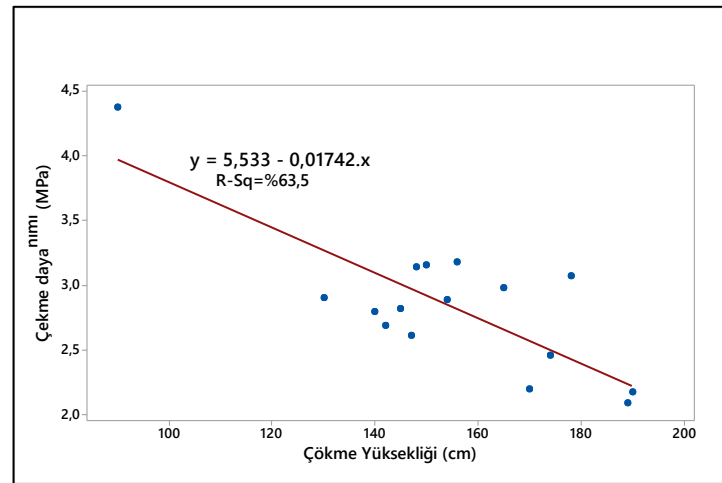
Karışım Kodu	Eğilmede çekme dayanımı (Mpa)			
	3 günlük	7 günlük	28 günlük	90 günlük
K0A0S0L0	2,81	4,10	4,37	4,60
K0A50S5L0,5	2,37	2,46	2,90	3,03
K0A75S10L1	2,30	2,38	2,69	3,02
K0A100S15L2	1,43	2,09	2,20	3,15
K50A0S5L1	1,85	2,47	2,82	3,00
K50A50S0L2	1,82	2,18	2,80	3,18
K50A75S15L0	2,06	2,89	3,15	3,20
K50A100S10L0,5	2,01	2,83	3,07	3,31
K75A0S10L2	2,00	2,22	3,17	3,59
K75A50S15L1	2,09	2,33	2,61	3,03
K75A75S0L0,5	1,84	2,02	2,89	3,45
K75A100S5L0	1,32	1,45	2,09	2,53
K100A0S15L0,5	2,00	2,58	3,14	3,38
K100A50S10L0	1,94	1,98	2,98	3,10
K100A75S5L2	1,61	2,08	2,46	3,46
K100A100S0L1	1,34	1,42	2,18	2,64



Şekil 4.21 Yarmada çekme dayanımı değerlerindeki değişim

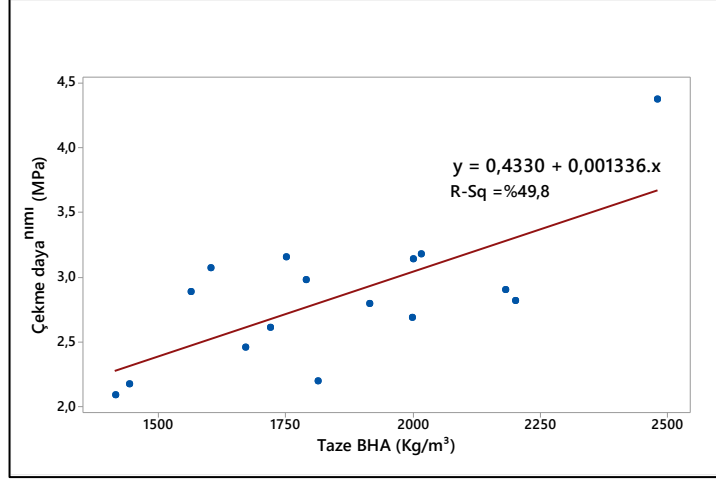


Şekil 4.22 Yarmada çekme dayanımlarının zamansal değişimi



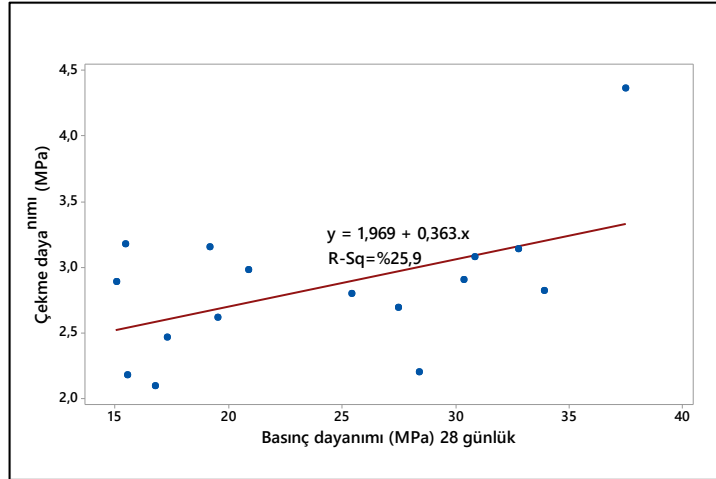
Şekil 4.23 Çekme dayanımı ile çömke yüksekliği arasındaki ilişki

Şekil 4.23, 28 Günlük çekme dayanımı ile çökme sonuçları arasındaki ilişkiyi gösterilmiştir. İlişki, çökme sonuçlarındaki artışın çekme dayanımlar sonuçlarının düşmeyi karşılık geldiğini ifade eder niteliktedir. Bu artış, $R^2= \%63,5$ orta ilişkisi ile bu denklemde “Çekme = 5,533-0,01742 çökme” şeklinde sunulmuştur.



Şekil 4.24 Çekme dayanı ile taze BHA arasındaki ilişki

Şekil 4.24, 28 günlük çekme dayanımı ile taze BHA sonuçları arasındaki ilişkiyi gösterilmiştir. İlişki, çekme dayanımındaki artışın taze BHA sonuçlarının artışına karşılık geldiğini ifade eder niteliktedir. Bu artış, $R^2= \%49,8$ orta ilişkisi ile bu denklemde “Çekme = 0,4330+0,001336 çökme” şeklinde sunulmuştur.



Şekil 4.25 Çekme dayanı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

Şekil 4.25, 28 Günlük çekme dayanımı ile basınç dayanımlar sonuçları arasındaki ilişkiyi göstermektedir. İlişki, çekme dayanımındaki artışın basınç dayanımı

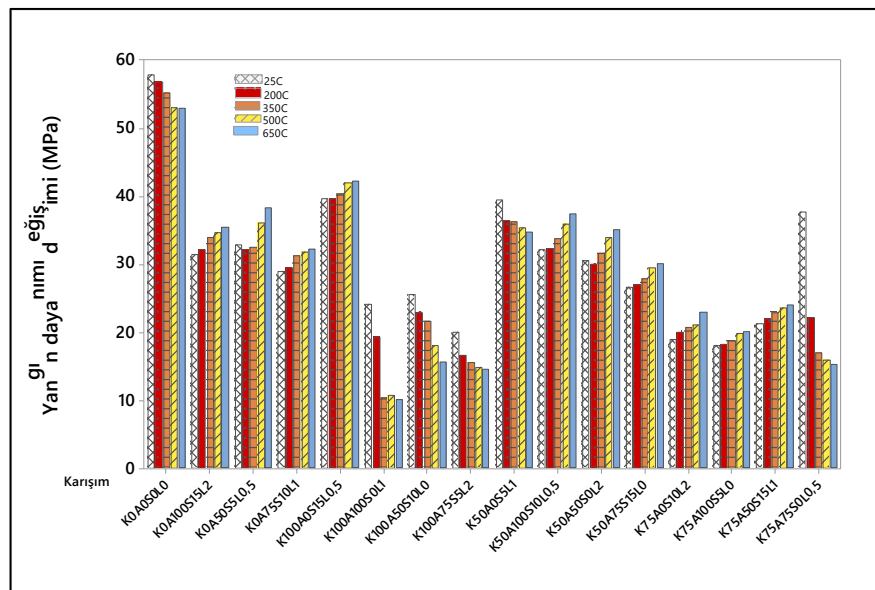
sonuçlarının artışına karşılık geldiğini ifade eder niteliktedir. Bu artış, $R^2=25,9$ düşük ilişkisi ile bu denklemde “Çekme = 1,969+0,363 basınç dayanımı” şeklinde bulunmuştur.

4.8 Yüksek Sıcaklık Etkisi Testi

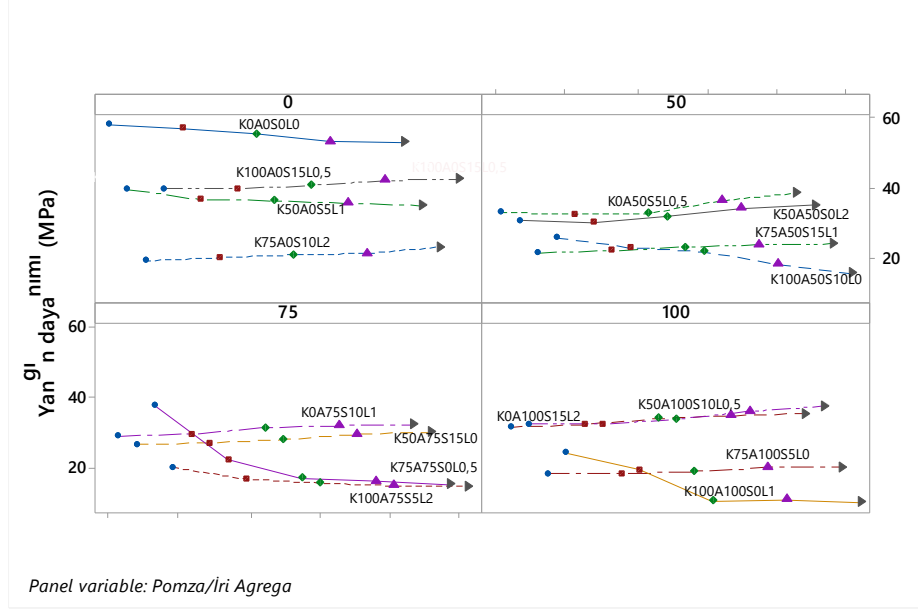
Hafif beton küp numuneler, bir saat süreyle 25°C, 200°C, 350 °C, 500°C ve 5 600 °C 'lik yüksel sıcaklığa tabi tutulmuştur. Yüksek sıcaklık etkisinin incelenmesinde kullanılan basınç dayanımı Tablo 4.5 ve Şekil 4.26 'da gösterilmiştir.

Tablo 4.7 Karışımların yangına dayanıklılık testi

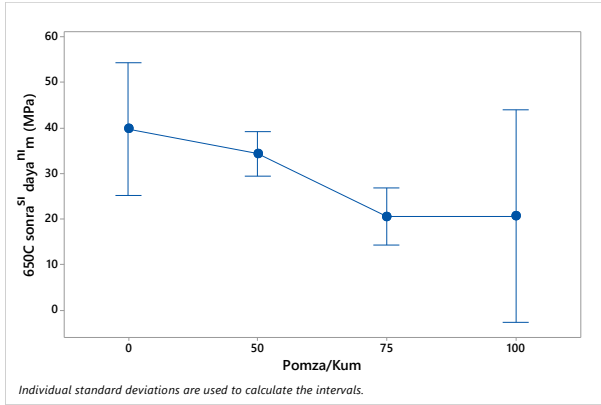
Karışım Kodu	Dayanımlar (MPa)				
	25 °C	200 °C	350 °C	500 °C	600 °C
K0A0S0L0	57,90	56,89	55,21	53,06	52,90
K0A50S5L0,5	32,90	32,30	32,63	36,18	38,39
K0A75S10L1	29,00	29,52	31,29	31,92	32,25
K0A100S15L2	31,50	32,20	34,00	34,80	35,36
K50A0S5L1	39,47	36,56	36,26	35,48	34,78
K50A50S0L2	30,67	30,00	31,67	34,00	35,00
K50A75S15L0	26,65	27,02	28,00	29,49	30,10
K50A100S10L0,5	32,32	32,35	33,78	36,00	37,39
K75A0S10L2	19,10	20,00	20,80	21,20	23,00
K75A50S15L1	21,33	22,00	23,00	23,70	24,00
K75A75S0L0,5	37,76	22,26	16,99	16,04	15,20
K75A100S5L0	18,18	18,25	18,84	19,99	20,00
K100A0S15L0,5	39,64	39,69	40,53	42,00	42,29
K100A50S10L0	25,64	22,86	21,64	18,13	15,56
K100A75S5L2	20,02	16,75	15,55	14,83	14,63
K100A100S0L1	24,21	19,36	10,46	10,75	10,17



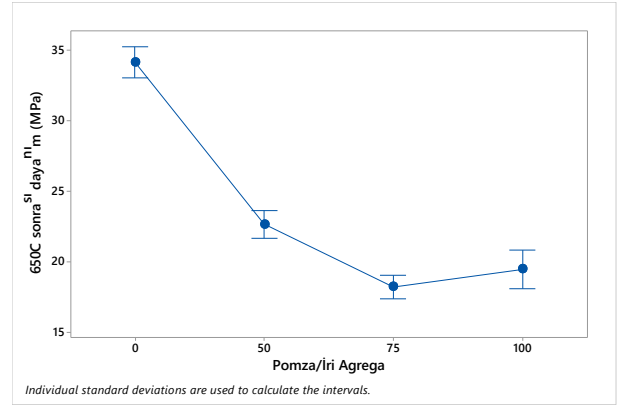
Şekil 4.26 Karışımların yangına dayanıklılık testi



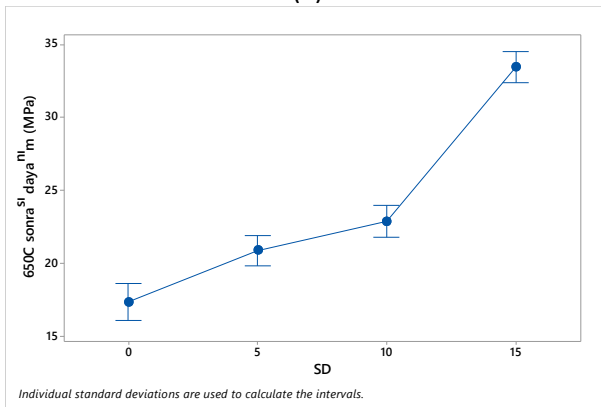
Şekil 4.27 Guruplara bağlı yangın dayanımı değişimi



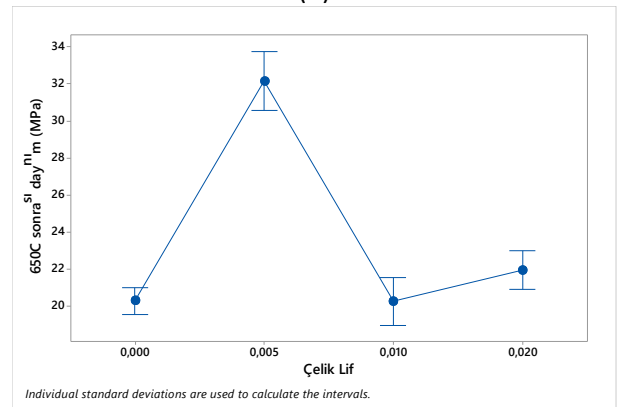
(a)



(b)



(c)



(d)

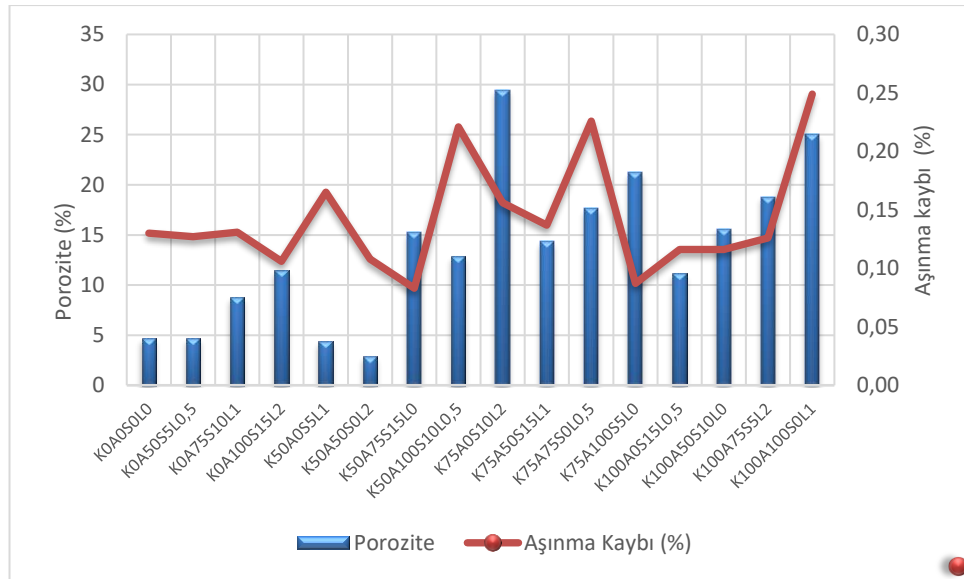
Şekil 4.28 Değişkenler göre 650 °C'de yangın dayanımı değişimi

4.9 Aşınma Direnci

Beton kaplamaların aşınma direnci, esas olarak yüzey tabakası özelliklerinin kalitesine bağlı bir yüzey özelliğidir. Üst 1-3 mm, beton ürünün aşınma direnci için en önemli kısımdır. Çimento içeriği, su / çimento oranı, çimento türü, agrega türü, pigment kullanımı ve işleme sistemi korozyon direncini etkileyen faktörlerdir.

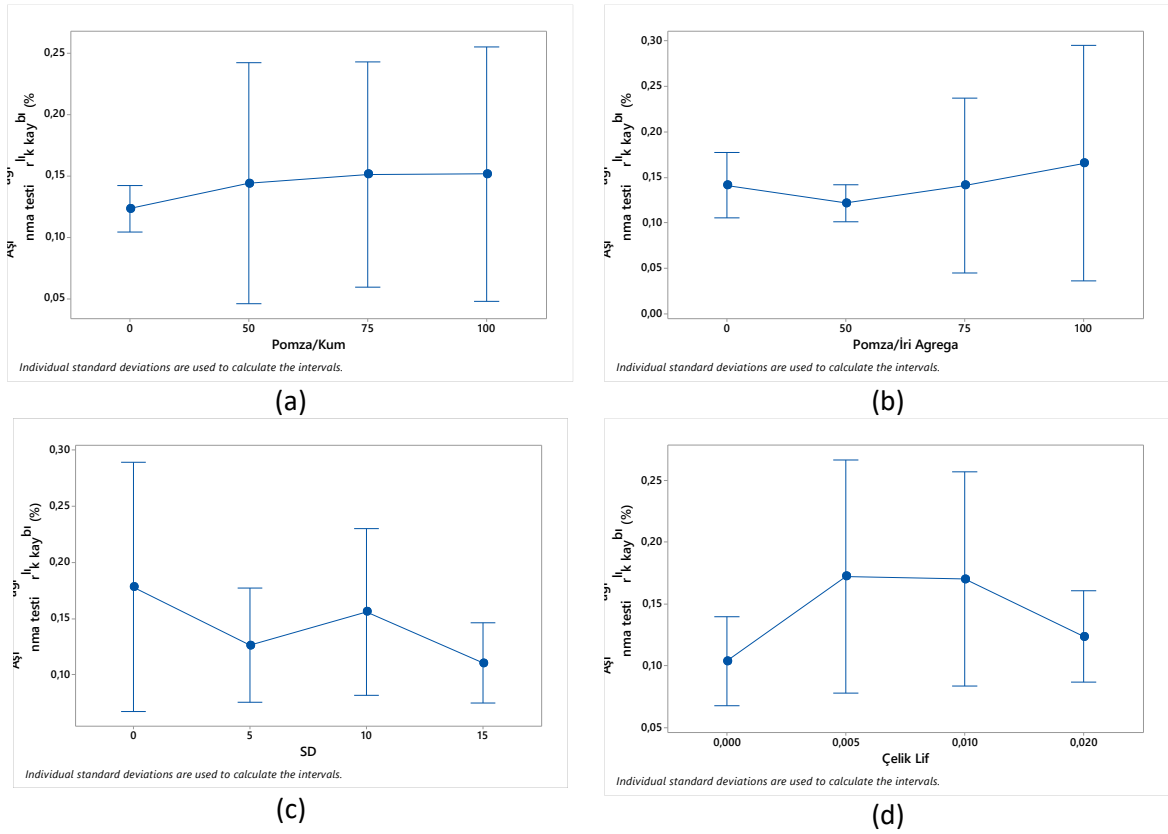
Tablo 4.8 Aşınma direnci deneyi sonuçları

	Aşınma direnci %			ortalama
	2 grup	3 grup		
K0A0S0L0	0,132	0,128	0,13	0,130
K0A50S5L0,5	0,134	0,118	0,13	0,127
K0A75S10L1	0,138	0,120	0,14	0,131
K0A100S15L2	0,103	0,099	0,11	0,106
K50A0S5L1	0,169	0,167	0,16	0,165
K50A50S0L2	0,104	0,110	0,11	0,108
K50A75S15L0	0,073	0,098	0,08	0,083
K50A100S10L0,5	0,241	0,213	0,21	0,221
K75A0S10L2	0,161	0,149	0,158	0,156
K75A50S15L1	0,139	0,135	0,14	0,137
K75A75S0L0,5	0,232	0,230	0,22	0,226
K75A100S5L0	0,084	0,091	0,09	0,087
K100A0S15L0,5	0,114	0,110	0,13	0,116
K100A50S10L0	0,110	0,120	0,12	0,116
K100A75S5L2	0,128	0,120	0,13	0,126
K100A100S0L1	0,259	0,238	0,25	0,249



Şekil 4.29 Aşınma direnci test sonuçları

Tablo 4.8, aşınma direnci test sonuçlarını göstermektedir. Sonuçlara göre, beton numunelerinin aşınma direnci, matrisin agrega-çimento oranından büyük ölçüde etkilenmektedir. Çimento içeriğindeki artış, daha bağlayıcı bakımından zengin ve yoğun bir blok yüzeyi oluşumu ile sonuçlanır ve bu da yüzey kalitesini ve aşınmaya karşı direnci artırır. En düşük aşınma direnci değeri 0,083 ile K50A75S15L0 karışımında kaydedilirken, en yüksek değer 0,249 ile K100A100S0L1 numunesinde kaydedilmiştir.



Şekil 4.30 Değişkenlerin aşınma direncine etkisi

Şekil 4.25 incelendiğinde, aşınma direnci üzereni etkileri incelendiğinde pomza kullanımında iri agregası yerine kullanımı aşınma direncini düşürürken, kum yerine kullanımında artan oranlarında bir miktar direnci arttırmıştır. Ancak direncin artışını sağlayan en etkili malzemenin çelik lif olduğu görülmüştür. Buna rağmen artan kullanım oranına göre doğrusal olarak direnci arttırmayarak bir noktadan sonra tekrar direnci azaltıcı etkiside görülmüştür. SD'nın etkisi ise hafif betonlarda değişkenlik göstermiştir.

5. SONUÇLAR

Silis dumanı ve çelik lif kullanılarak üretilen hafif betonlarda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Çökme testi sonuçları, en yüksek yayılmanın 190 mm ve en düşük yayılmanın 130 mm gerçekleştiğini göstermiştir. Pomza (çakıl ve kum) ile yayılma arasındaki ilişki incelenmiş ve pomza oranındaki artışla birlikte yayılmada artmıştır.
- Taze birim hacim ağırlıklara göre 1800 kg/m^3 'ten daha düşük hafif beton üretilebilmesi için %75 pomza/kum yada pomza/iri agrega oranı kullanılmalıdır.
- Silis dumanı ve çelikleli katkıları, basınç dayanımını artırmış ancak bu artışın artan kullanımla paralel olmadığı görülmüştür. 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırıldığında ise, silis dumanı eklenmesi basınç dayanımının iyileştirmiştir.
- Pomzanın ince veya iri kullanımında artan içeriği ile 28 günlük basınç dayanımında bir azalmaya neden olmuştur.
- Yarmada çekme dayanımı açısından kullanılan malzeme oranlarına göre dayanım kayıpları belirlenmiştir. Ancak çelik lif katkısında bu dayanım kaybı oranı azalmıştır.
- Pomza ilavesi aşınma direncinde (malzeme kompozitesine göre değişmekle birlikte) bir miktar artışa neden olmuştur. Ancak %100 iri veya toz pomza kullanımında bu direnç azalmıştır. Ayrıca SD'a göre çelik lifin aşınma direncine olumlu katkısı daha fazladır.
- Yüksek sıcaklık sonrası dayanımlarda, artan SD katkısı ve artan pomza ile birlikte numunelerde dayanım artışı olmuştur. Ancak bu artışa benzer olarak çelik lif katkısının %0,5 olması durumunda gerçekleşmişken, artan oranlarında dayanım kaybına neden olmuştur.

- Pomza kullanılmı ile yangın dayanımı arasında pomza oranının %75 ve üzeri kullanımında olumlu etkisi olmuştur.

Dayanımlar açısından bakıldığında, Taguchi tekniği ile hazırlanan bu çalışma kapsamında istatiksek açıdan pomza/kum oranının %50, pomza / iri agrega oranının 75, SD'nın %10 ve %1 çelik lif kullanımı uygun olduğu görölmüştür.

KAYNAKLAR

- A. C. I. Committee, "Guide for structural lightweight aggregate concrete," *American Concrete Institute Committee: Farmington Hills, MI, USA*, 2003.
- A. J. Hamad, "Materials, production, properties and application of aerated lightweight concrete," *International journal of materials science and engineering*, vol. 2, pp. 152-157, 2014.
- A. Yeğınobalı, *High strength natural lightweight aggregate concrete with silica fume*: ACI International, 1998.
- C. Bagon ve S. Frondistou-Yannas, "Marine floating concrete made with polystyrene expanded beads," *Magazine of Concrete Research*, vol. 28, pp. 225-229, 1976.
- D. J. Akers, R. D. Gruber, B. W. Ramme, M. J. Boyle, J. G. Grygar, S. K. Rowe, ve ark., "Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete," *ACI 213R-03. American Concrete Institute (ACI), Michigan*, 2003.
- D. Teo, M. Mannan, ve V. Kurian, "Durability of lightweight OPS concrete under different curing conditions," *Materials and structures*, vol. 43, p. 1, 2010.
- E. Kearsley ve P. Wainwright, "Porosity and permeability of foamed concrete," *Cement and concrete research*, vol. 31, pp. 805-812, 2001.
- F. Sanchez ve K. Sobolev, "Nanotechnology in concrete—a review," *Construction and building materials*, vol. 24, pp. 2060-2071, 2010.
- H. Du, S. Du, ve X. Liu, "Effect of nano-silica on the mechanical and transport properties of lightweight concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 82, pp. 114-122, 2015.
- I. S. Slamet Widodo, Sri Tudjono, "Experimental study on the potential use of pumice breccia as coarse aggregate in structural lightweight concrete " *International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology*, vol. Vol 5, No 1, 2014, 2014
- İ. Uğur, "Improving the strength characteristics of the pumice aggregate lightweight concretes," in *18th International Mining Congress and Exhibition at Turkey-IMCET*, 2003.
- J. An, J. Kim, and B. H. Nam, "Investigation on Impacts of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash on Cement Hydration," *ACI Materials Journal*, vol. 114, pp. 701-711, 2017.
- Liu, K., Yu, R., Shui, Z., Li, X., Ling, X., He, W., ... & Wu, S. (2019). Effects of pumice-based porous material on hydration characteristics and persistent shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC). *Materials*, 12(1), 11.

- K. H. Al-Rawi, M. T. Al-Kuttan, and A. Rawa'a, "Some mechanical properties of pumice lightweight aggregate concrete incorporating rice husk ash," *AL-TAQANI*, vol. 22, pp. 147-159, 2009.
- K. M. A. Hossain, "Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete," *Cement and concrete research*, vol. 34, pp. 283-291, 2004.
- K. M. Hossain and M. Lachemi, "Mixture design, strength, durability, and fire resistance of lightweight pumice concrete," *ACI Materials Journal*, vol. 104, p. 449, 2007.
- L. Gündüz ve İ. Uğur, "The effects of different fine and coarse pumice aggregate/cement ratios on the structural concrete properties without using any admixtures," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 1859-1864, 2005.
- L. Gündüz, "The effects of pumice aggregate/cement ratios on the low-strength concrete properties," *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 721-728, 2008.
- M. Mortazavi ve M. Majlessi, "Evaluation of silica fume effect on compressive strength of structural Lightweight Concrete containing LECA as lightweight aggregate," in *Advanced Materials Research*, 2013, pp. 344-349.
- M. S. Moayeri, H. R. Ashrafi, ve P. Beiranvand, "Investigating the Physical Characteristics of Non-Structural Lightweight Aggregate Blocks of Built with Region Materials," *Buildings*, vol. 7, p. 2, 2017.
- N. Yazdani ve E. Goucher, "Increasing durability of lightweight concrete through FRP wrap," *Composites Part B: Engineering*, vol. 82, pp. 166-172, 2015.
- P. Bischoff, K. Yamura, and S. Perry, "Polystyrene aggregate concrete subjected to hard impact," in *Institution of Civil Engineers, Proceedings, Pt 2*, 1990.
- P. Bhuvaneshwari, U. Priyadarshini, S. Gurucharan, and B. Mithunram, "Strength characteristics of light weight concrete blocks using mineral admixtures," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, p. 01,2003.
- P. Domone ve J. Illston, "Construction materials: their nature and behaviour/edited by Peter Domone and John Illston," ed: Milton Park, Abingdon, Oxon; New York: Spon Press, 2010.
- P. K. Mehta ve P. J. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*, 2006.
- P. Zhang, N. Xie, X. Cheng, L. Feng, P. Hou, and Y. Wu, "Low dosage nano-silica modification on lightweight aggregate concrete," *Nanomaterials and Nanotechnology*, vol. 8, p. 1847980418761283, 2018.
- R. Swamy, *New concrete materials* vol. 1: Surrey University Press, 1983.

- R. W. Kluge, M. M. Sparks, and E. C. Tuma, "Lightweight aggregate concrete," in *Journal Proceedings*, 1949, pp. 625-642.
- S. Green, N. Brooke, and L. McSaveney, "Pumice aggregates for structural lightweight and internally cured concretes," *New Zealand Concrete Construction*, vol. 4, pp. 183-195, 2010.
- T. Parhizkar, M. Najimi, and A. Pourkhorshidi, "Application of pumice aggregate in structural lightweight concrete," 2012.
- V. Sussman, "Expanded polystyrene beads lighten the load," *Society of Plastics Engineering Journal*, vol. 28, 1972.
- W. Kinniburgh ve A. Short, "Lightweight concrete," *Applied Science Publishers Ltd., London Shetty MS (1993) Concrete technology. S. Chand and Company Ltd., India Mannan MA, Ganapathy C (2001) Mix design for oil palm shell concrete. Cement Concr Res*, vol. 31, pp. 1323-1325, 1978.
- Z. Hong-xia, "Research On Durability Of Lightweight Concrete [J]," *Low Temperature Architecture Technology*, vol. 3, 2003.