

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HAFİF AGREGA İÇEREN YALIN VE PVA LİF İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ
YAPISAL BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat Emre DİLLİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HAFİF AGREGA İÇEREN YALIN VE PVA LİF İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ
YAPISAL BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Murat Emre DİLLİ
(501111039)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hakan Nuri ATAHAN

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501111039 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Murat Emre DİLLİ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**HAFİF AGREGA İÇEREN YALIN VE PVA LİF İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ YAPISAL BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Hakan Nuri ATAHAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Bekir Yılmaz PEKMEZCİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Nilüfer ÖZYURT ZİHNİOĞLU
Boğaziçi Üniversitesi

Teslim Tarihi : **12 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **20 Ocak 2015**

Anneannem Müzeyyen KARADENİZ'in değerli anısına,

ÖNSÖZ

Çalışmalarım sırasında çok önemli bilgi, yol gösterme ve yorumları ile her zaman yanımda olan çok değerli tez hocam Doç. Dr. Hakan Nuri ATAHAN'a, tez savunma sınavımın değerli jüri üyeleri, hocalarım Yrd. Doç. Dr. Bekir Yılmaz PEKMEZCİ'ye ve Doç. Dr. Nilüfer ÖZYURT ZİHNİOĞLU'na, çalışmalarına ilgiyle yaklaşan ve hiçbir konuda yardımını esirgemeyen hocam İnş. Yük. Müh. Cengiz ŞENGÜL'e, deneysel çalışmalarına yaptıkları malzeme desteklerinden dolayı Akçansa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye ve mühendislerine, deneysel çalışmalarında yapmış oldukları yardım ve destekleri dolayısıyla İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nın emektar çalışanları Murat MEYDAN'a, Oktay YALÇINKAYA'ya, Hakan ÖZMEN'e, Mübin USLU'ya ve Hamdi ATEŞ'e, aynı şekilde İ.T.Ü. Marmaray Laboratuvarı'nın müdürü değerli hocam Prof. Dr. Yılmaz AKKAYA başta olmak üzere, laboratuvarın değerli çalışanları Namık Kemal ÖZKAN'a, Rıfat ÖZER'e, Cüneyt YILDIZ'a, Erdoğan KILAVUZ'a ve Ali ÇAKIR'a, gösterdikleri sevgi, hoşgörü ve manevi destekleri için babam İzzet DİLLİ'ye, annem Nurhayat DİLLİ'ye ve kardeşim Sedat DİLLİ'ye, tezime yaptığı teknik katkıdan ötürü kıymetli dostum İnş. Müh. Serkan KARTAL'a ve her an yanımda olan diğer tüm dostlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Ocak 2015

Murat Emre DİLLİ
İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1 Betonun Bileşenleri	3
2.1.1 Çimento	3
2.1.2 Agrega	4
2.1.3 Karma suyu	4
2.1.4 Katkı maddeleri	5
2.1.4.1 Kimyasal katkılar	5
2.1.4.2 Mineral katkılar	6
Puzolanik reaksiyon	6
Uçucu kül	7
2.1.5 Lifler.....	8
2.1.5.1 PVA lifler	10
2.2 Betonun Mekanik Davranışı.....	11
2.3 Hafif Betonlar	13
2.3.1 Hafif betonların tarihçesi	13
2.3.2 Hafif betonların tanımı	14
2.3.3 Hafif betonların sınıflandırılması	14
2.3.4 Hafif beton yapımında kullanılan agregalar.....	16
2.3.4.1 Genleştirilmiş kil agregası.....	17
2.3.5 Hafif betonun üstünlükleri ve sakıncaları	19
2.3.6 Hafif betonun mekanik davranışı	20
2.3.7 Genleştirilmiş kil agregasıyla yapılmış bazı çalışmalar.....	21
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	25
3.1 Kullanılan Malzemeler ve Karışım Serileri	25
3.2 Üretimin Aşamaları	26
3.3 Numune Boyutları ve Kodlama.....	27
3.4 Karışımların Özellikleri.....	27
3.5 Betonlara Uygulanan Deneyler	29
3.5.1 Taze beton deneyleri ve sonuçları.....	29
3.5.1.1 Çökme deneyi.....	29
3.5.1.2 Taze birim ağırlık belirleme.....	29
3.5.1.3 Sonuçlar	29

3.5.2 Sertleşmiş beton deneyleri ve sonuçları	30
3.5.2.1 Kuru birim ağırlık belirleme	30
3.5.2.2 Basınç dayanımı ve elastik modül belirleme.....	30
3.5.2.3 Poisson oranı belirleme	30
3.5.2.4 Yarmada çekme dayanımı belirleme.....	31
3.5.2.5 Eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi belirleme	31
3.5.2.6 Sonuçlar.....	33
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	35
4.1 Basınç Dayanımı – Kuru Birim Ağırlık İlişkisi	35
4.2 Basınç Dayanımı – Kür Süresi İlişkisi	38
4.3 Elastik Özelliklerin İncelenmesi ve Tahmin Modelleri.....	39
4.4 Eğilme Dayanımı ve Kırılma Özelliklerinin İncelenmesi	43
5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	49
KAYNAKLAR.....	53
EKLER.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	65

KISALTMALAR

ACI	: American Concrete Institute
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CC	: Conventional concrete
CEB-FIB	: Comité Euro-International du Béton – Fédération International de la Précontrainte
ÇAAD	: Çatlak ağzı açılma deplasmanı
EC	: Expanded clay
EM	: Elastik modül
GKA	: Genleştirilmiş kil agregası
HRWR	: High range water reducer
ITZ	: Çimento hamuru – agrega arayüzü
LVDT	: Linear variable differential transformer
LWC	: Lightweight concrete
MOE	: Modulus of elasticity
PVA	: Polivinil alkol
RILEM	: The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
TS EN	: Türk Standartları Enstitüsü
YKSD	: Yüzey kuru suya doymuş

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Klinker bileşenleri	3
Çizelge 2.2 : Kimyasal katkı tipleri	5
Çizelge 2.3 : Pozolanların sınıflandırılması ve pozolan türleri	6
Çizelge 2.4 : Farklı tip liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	9
Çizelge 2.5 : Hafif beton sınıfları	15
Çizelge 2.6 : Hafif betonların işlevlerine göre sınıflandırılması	16
Çizelge 2.7 : Hafif beton için basınç dayanımı sınıfları	16
Çizelge 3.1 : PVA lif özellikleri	25
Çizelge 3.2 : Agregaların fiziksel özellikleri	26
Çizelge 3.3 : Agregaların tane boyut dağılımları.....	26
Çizelge 3.4 : Karışımların granülometrisi	28
Çizelge 3.5 : Lifsiz karışımların özellikleri	28
Çizelge 3.6 : Lifli karışımların özellikleri	28
Çizelge 3.7 : Lifsiz karışımların taze beton deneyleri sonuçları	29
Çizelge 3.8 : Lifli karışımların taze beton deneyleri sonuçları.....	29
Çizelge 3.9 : Lifsiz betonların 28 günlük deney sonuçları	34
Çizelge 3.10 : Lifsiz betonların 120 günlük deney sonuçları	34
Çizelge 3.11 : Lifli betonların 28 günlük deney sonuçları	34
Çizelge 3.12 : Lifli betonların 120 günlük deney sonuçları	34
Çizelge 4.1 : Betonların elastik modülleri için tahmin modelleri.....	39

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Lifli – lifsiz beton gerilme – şekil değiştirme grafiği.....	9
Şekil 2.2 : PVA liflerin yapısı	10
Şekil 2.3 : Çimento hamuru, agregası ve betonun gerilme – şekil değiştirme eğrileri	12
Şekil 2.4 : Hafif betonların sınıflandırılması	15
Şekil 2.5 : Basınç kuvvetlerinin normal (sol) ve hafif betonlarda (sağ) aktarımı	20
Şekil 3.1 : Üç noktalı eğilme deneyi düzeneği.....	32
Şekil 3.2 : Yük – sehim eğrisi altında kalan alan.....	33
Şekil 4.1 : Lifsiz beton basınç dayanımı – kuru birim ağırlık ilişkisi.....	35
Şekil 4.2 : Lifli beton basınç dayanımı – kuru birim ağırlık ilişkisi	37
Şekil 4.3 : Kür şartlarının numuneler üzerindeki etkisi	38
Şekil 4.4 : Normal betonların basınç dayanımı – elastik modül ilişkisi.....	40
Şekil 4.5 : Bazı tahmin modellerinin karşılaştırılması	41
Şekil 4.6 : Oluşturulan modelin sonuçları ve karşılaştırılması.....	42
Şekil 4.7 : Düzenlenmiş CEB-FIB modeli	43
Şekil 4.8 : Betonların yarmada çekme dayanımları	44
Şekil 4.9 : Hafif ve normal betonların eğilme dayanımları	45
Şekil 4.10 : Hafif ve normal betonların kırılma enerjileri	46
Şekil 4.11 : Yalın betonların yük – sehim grafikleri.....	47
Şekil 4.12 : Lifli betonların yük – sehim grafikleri.....	48
Şekil A.1 : GKA-1 agregalı hafif betonun su/bağlayıcı oranlarına göre yük – sehim ve yük – çaad grafikleri	59
Şekil A.2 : GKA-2 agregalı hafif betonun su/bağlayıcı oranlarına göre yük – sehim ve yük – çaad grafikleri	60
Şekil A.3 : Kireçtaşı agregalı hafif betonun su/bağlayıcı oranlarına göre yük – sehim ve yük – çaad grafikleri	61
Şekil A.4 : 0,34 su/bağlayıcı oranına sahip betonların birim ağırlıklarına göre yük – sehim ve yük – çaad grafikleri	62
Şekil A.5 : 0,42 su/bağlayıcı oranına sahip betonların birim ağırlıklarına göre yük – sehim ve yük – çaad grafikleri	63
Şekil A.6 : 0,50 su/bağlayıcı oranına sahip betonların birim ağırlıklarına göre yük – sehim ve yük – çaad grafikleri	64

HAFİF AGREGA İÇEREN YALIN VE PVA LİF İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ YAPISAL BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Yapısal uygulamalar çerçevesinden bakıldığında, hafif agregalı betonların son derece hafif olma, ısı ve ses yalıtımı sağlama gibi üstünlükleri mevcuttur. Özellikle geleneksel normal betonlarla kıyas yapılabilecek kadar yeterli dayanım performansı sağlaması durumunda bu betonların yapısal uygulamalardaki potansiyeli kritik bir öneme sahip olmaktadır. Hafif agregalı betonların hafiflik özelliği mühendisler tarafından tasarımlarda esneklik sağlamaktadır. Yapılardaki zati ağırlığın azaltılmasıyla ince kesitli ve boyutu azaltılmış yapı elemanları, daha az temel maliyeti, sismik etkilere karşı artırılmış performans ve ısı ve akustik yalıtım performansı gibi önemli üstünlükler elde edilmektedir. Ancak bununla birlikte, betonların mekanik ve fiziksel özelliklerinin içerdikleri agregaların özellikleriyle doğrudan alakalı olması sebebiyle hafif agregalı betonlar yeterli dayanım seviyesine ulaşırsalar dahi kimi zaman elastik özellikleri bakımından daha olumsuz durumda olabilmektedirler.

Beton, agrega, sertleşmiş çimento hamuru ve agrega – çimento arayüzü olmak üzere üç fazlı bir malzeme olarak tanımlanabilir. Bir beton karışımında agregalar toplam hacmin %60 ila %80'ini oluştururlar. Bu sebepten ötürü, agrega özellikleri betonun mekanik davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Hafif agregalı betonlarda en zayıf unsur sertleşmiş çimento hamuru ve agrega – çimento hamuru arayüzünden ziyade hafif agregalardır. Yapılan son çalışmalar, betonun dayanımını betondaki en zayıf unsurun belirlediğini göstermiştir. Bu çerçeveden bakıldığında, elastik ve mekanik davranışların yanında, hafif beton üretmek amacıyla kullanılan hafif agregalar betonun kırılma davranışını da önemli ölçüde değiştirmektedir.

Betonun elastik özelliklerini tahmin etmek için hesaba dayalı cebirsel tahmin modelleri, bilimsel beton araştırmaları dahilinde çoğu zaman kullanıma elverişli olmaktadır. Hesaplanan elastik modüllerinin ana dayanaklarını agregaların ve çimento matrisinin elastik özellikleri ile bunların hacimsel oranları oluşturmaktadır.

Yapılan bu çalışmada, yalın ve PVA lif içeren hafif agregalı betonların basınç dayanımları, elastik modül değerleri, Poisson oranları ve kırılma toklukları deneylerle incelenmiş ve geleneksel normal betonlardaki benzer parametrelerle kıyaslanmıştır. Bu amaçla, iki farklı genleştirilmiş kil agregası kullanılarak fiziksel ve mekanik özellikleri farklı iki ayrı hafif agregalı beton üretimi yapılmıştır. Bu betonların kuru birim ağırlıkları nihai olarak 1600 – 2000 kg/m³ arasında değişkenlik göstermiştir. Karışımlarda matris dayanımlarının etkisini gözlemlemek amacıyla tüm karışımlarda agrega hacmi yaklaşık %62 olarak sabit tutulmuştur.

Sonuç olarak, betonların basınç dayanımı değerleri, kuru birim ağırlıklarına ve karışım özelliklerine göre değişkenlik göstermiş ve 20 – 80 MPa arasında elde edilmiştir. Normal beton karışımlarına kıyasla, hafif agregalı betonların elastik ve süneklik özellikleri büyük farklılıklar göstermiştir. Aynı basınç dayanımı mertebesinde hafif

agregalı betonların elastik modüllerinde önemli düşüşler görülmüştür. Cebirsel hesaplamalar ve deneysel veriler ışığında betonların elastik modüllerinin tahmini için yeni tahmin modeli geliştirilmiştir. Bunun yanında, betonların kırılma enerjilerinin karışımlarda kullanılan agregâ tipine ve çimento matrisine bağılı olduğı anlaşılmıştır. Hafif agregalı betonların normal betonlara kıyasla daha gevrek yapıda olduğı görülmüştür. Tüm betonların Poisson oranları ise birbirlerine çok yakın değerde kalmıştır.

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF CONVENTIONAL AND STRUCTURAL SEMI-LIGHTWEIGHT CONCRETES REINFORCED WITH PVA FIBERS

SUMMARY

From the point of view of structural applications, lightweight concretes (LWC) have the advantages of being light and having improved thermal and sound insulation properties. Especially when it is designed with adequate strengths, which is comparable to conventional concretes (CC), its use for structural applications gains critical importance. The property of “lightness” of LWC’s can offer engineers flexibility on design. By reducing the dead load of a structure, advantages such as thinner sections, structural elements in smaller sizes, lower foundation costs, and improved seismic response of structures can be obtained. However, even the adequate strength levels can be reached, hence the overall mechanical and physical properties of concretes are closely related to aggregate properties, elastic properties and overall mechanical behavior of LWC’s, in which the lightweight aggregates are utilized, are greatly influenced.

Concrete can be defined as a three-phase material consisting of aggregate, hardened cement paste and the interfacial zone (ITZ) between the aggregates and the cement paste. It can be said that the aggregates occupy a 60% to 80% of the volume of a concrete mixture. By virtue of this fact, aggregate properties have significant effects on the mechanical behavior of concretes. Among LWC’s constituents, lightweight aggregates are the weakest component in the mixture rather than the hardened cement paste and ITZ. Recent researches on aggregate properties and their influences on high-strength lightweight concretes have shown that the weakest component of the concrete determines the strength of the concrete. In light of this fact, it should be noted that when lightweight aggregates are used with the aim of producing structural lightweight concretes, besides the overall elastic properties and strength, fracture behavior of the concrete is also greatly affected.

Most of times, using algebraic models for the prediction of the elastic properties of concrete is favorable within the limits of concrete researching. The elastic properties of the aggregates and the matrix, and respective volume fractions are the main bases of the calculated elastic modulus.

In this experimental work, properties such as compressive strength, elastic modulus (MOE), Poisson’s ratio and flexural and fracture behavior of the concretes consisting of a total of 18 particular designs were investigated. The compressive strength and elastic modulus tests were conducted at the age of 28 and 120 days. The 3 point bending test for investigating the flexural and fracture behavior of the concrete were conducted only at the age of 120 days. 28 and 120-day old age samples were cured in lime saturated water at 21 °C until the test ages.

In the design work of conventional concrete mixtures, natural sand (0-1 mm), limestone fines (0-5 mm) and crushed limestone (4-16 mm) were used as fine and coarse aggregates. In the design of lightweight concrete mixtures, on the other hand, some portions of the natural coarse aggregate, corresponding to 4-8 mm size distribution, have been replaced with expanded clay (EC) aggregates. For all mixtures, the maximum aggregate size was kept constant at 16 mm. Depending on the targeted unit weight of lightweight concretes, two different types of EC aggregate were used having different strengths, water absorption capacities and density values, but having approximately the same size distribution.

Lightweight concrete mixtures produced plain and with PVA fibers in the ratio of %0,5 were casted and the results were compared with the conventional concrete mixtures, again produced plain and with PVA fibers. For this purpose, 10 cylinder specimens of 100x200 mm and 5 beam specimens of 100x100x500 mm were moulded from each of the 18 designs. Dry unit weights of the lightweight concretes were targeted as approximately 1700 and 2000 kg/m³. At this point, HB17 notation was decided for the 1700 kg/m³ concrete and HB20 was decided for the 2000 kg/m³ concrete. NB23 notation was used for the CC mixtures of which dry unit weight was around 2300 kg/m³. For the concretes including PVA fibers, L letter was put at the end of the each notations, such as HB17L.

In order to express the effect of matrix strength on determined properties, on the other hand, concrete mixtures having different matrix strengths were designed but the total aggregate volume kept constant at approximately 62%. For this purpose, water to cementitious material ratio and the amount of cementitious materials were changed. In order to eliminate the effect of the fly ash concentration in the total amount of cementitious material, the ratio between the mass of cement and fly ash was also kept constant for all mixtures. Water to cementitious material ratios for conventional and lightweight concrete mixtures were selected as 0,34, 0,42, and 0,50. An ordinary Portland cement (CEM I-42,5R) with a density of 3,14 was used in the mixtures. For both normal and lightweight concrete mixtures, an F type fly ash with a density of 2,54 was also used as a supplementary material. For the desired fresh properties of the mixtures, a naphthalene-based high range water reducer (HRWR) was used for both types of concretes if needed. Based on the water absorption amounts determined after 30 min. of water exposure, EC aggregates were absorbed with precalculated amount of water before the concrete mixing process has started. By this procedure, especially for the lightweight concrete mixtures, the mix water was prevented from being absorbed by the EC aggregates.

Results showed that the compressive strength of LWC's varied between 20 MPa to 80 MPa, depending on the unit weight and mixture design properties. The compressive strength of the concretes increased as the unit weight of the concretes increased as a general trend. It should be noted here that, the coarse aggregate characteristics for HB17/L, HB20/L and NB23/L mixtures differed from each other significantly. Mechanical performance of HB20 concrete was higher than the HB17 concrete as HB20 mixture was casted with a different type of EC aggregate having different physical properties. It can be said that the second type EC aggregate, the one used in the HB20 design, had adequate performance compared to the limestone aggregates by means of strength as the compressive strength values of HB20 and NB23 concretes were found almost the same.

EC aggregates having a high water absorption capacity was thought to have provided a better internal curing with the related property of its in the concrete so that HB20 concretes showed improved strength capability. It was understood that with the passing of time, as a result of a better hydration and as the matrix strength of the concretes increased, the aggregate characteristics started playing an important role in determining the maximum concrete strength that can be reached.

PVA fiber reinforced concretes were showed lower compressive strength values when compared to the plain concretes. It can be indicated that the workability issues of the PVA reinforced concretes might have had the compressive strength values decreased. When the compressive strength results of NB23L concrete at the age of 28 and 120 days were taken into consideration, on the contrary of HB20 and HB20L concretes, as the times passes by 28 days to 120 days, the inclination of compressive strength development was found to have decreased. When the curing age was up to 120 days, it was clearly seen that the compressive strength of all kind of concretes was increased.

Results also showed that, at the same compressive strength range, LWC mixtures exhibited remarkable reduction in modulus of elasticity. It can be stated that as the coarse aggregates used in the mixtures were stiffer, in this case the limestone aggregates were stiffer than the expanded clay aggregates, elastic properties of the concretes were found to have improved. Within the limits of this study, the MOE values determined from LWC and CC mixtures were also compared to some of the common prediction models such as ACI318, ACI363, CEB-FIB and TS500. Taking the unit weight or the aggregate type used in the mixture design into consideration was decisive on predicting the MOE values of the concretes within the acceptable limits. In this experimental work, a new model for predicting the MOE of CC and LWC concrete mixtures, considering the unit weight and aggregate type, was suggested.

From the point of view of Poisson's ratios of concretes, negligible differences were observed between the values of LWC and CC mixtures. The Poisson's ratios determined varied between 0.19 and 0.22. The average Poisson's ratios determined for LWC and CC mixture were found same, i.e. 0.21.

Three point bending tests conducted to 120 days old samples provided valuable results on the flexural and fracture behaviors of the concretes. As a general result, it was observed that the flexural performances of the concretes were satisfactory as the overall mechanical and elastic properties of the aggregates were improved. Independently of the water to cementitious material ratios of the concretes, plain concrete samples had higher flexural strength values than the PVA reinforced concrete samples. Furthermore, the fracture energy of the concretes was found to have significantly affected by the aggregate type used and matrix mixture properties. It was observed that LWC mixtures showed more brittle behavior compared to CC mixtures. The use of PVA fibers on all kind of concretes was found to have had an improving effect on the fracture toughness mechanism of the concretes. The post-peak behavior of concrete samples under the flexural stress showed that the PVA fibers had a substantial effect on the fracture energy of its massive enhancement.

1. GİRİŞ

Genel bir ifadeyle, çimento, agrega, su ve gerekli olduğunda kimyasal ve mineral katkı maddelerinin birbirleriyle farklı oranlarda belli bir karışım hesabına dayalı olarak karıştırılmasıyla meydana gelen geleneksel normal beton, $2300 - 2500 \text{ kg/m}^3$ arası olan birim ağırlığı ve yaklaşık $8 - 100 \text{ MPa}$ arası değişen basınç mukavemeti değerleriyle inşaat sektöründe en önemli ve sıkça kullanılan yapı malzemelerinin başında gelmektedir. Günümüze kadar betonun yapısını ve davranışını ortaya koymak için yapılmış çalışmalar neticesinde, değişik fiziksel ve kimyasal özellikteki malzemelerin de kullanılmasıyla işlenebilirlik, mekanik ve dayanıklılık özellikleri bakımından çok daha ileri seviyede geleneksel betonlar üretilmiştir. Bu alandaki çalışmalar farklı konularda yenilenerek devam etmektedir. Beton alanındaki araştırmaların bir sonucu olarak farklı tipteki yapısal sorunlara, farklı tiplerde uygun ve kaliteli betonlar ile çözüm bulunabilmektedir. Özgül ağırlıkları normal betonlarda kullanılan agregalara göre düşük olan hafif agregaların kullanılmasıyla elde edilen hafif beton türleri de bu özverili çalışmaların getirilerindendir. Çok düşük birim ağırlıklarına sahip olacak şekilde üretilen hafif betonlar amaca yönelik yalıtım veya taşıyıcılık özelliklerine sahip olabilmektedirler. Bir yapı sisteminde, geleneksel betona kıyasla birim ağırlığının önemli ölçüde düşük olmasının getirdiği, binaların zati yükünün azalması, bununla birlikte binaya etkiyen deprem kuvvetlerinin azalması, kullanılan donatı miktarının azalması ve bunlara bağlı olarak yapı elemanlarının kesitlerinin ve yapı maliyetlerinin azalması gibi önemli üstünlükleri barındıran ve üretiminde kullanılan hafif agrega yoğunluğunun artış ve azalışına göre dayanımının arttığı veya azaldığı bilinen hafif betonlar, pomza agregası, genleştirilmiş kil agregası gibi farklı türlerde düşük yoğunluğa sahip agregalar üretilmekte, özellikleri ise üretildiği hafif agrega tipine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Elastik ve mekanik özellikleri itibarıyla geleneksel betonun güçlü bir alternatifi konumundaki taşıyıcı hafif betonlar, özellikle 1900'li yılların ortalarından itibaren başta Japonya ve Amerika olmak üzere bir çok ülkede yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Yapılan bu çalışmada, içerisinde genleşmiş kil türü hafif agregaya içeren ve farklı birim ağırlık ve dayanım sınıflarına sahip yalın ve PVA lif donatılı yapısal betonların dayanım özelliklerinin ve basınç ve eğilme yükleri etkisi altındaki elastik ve elastik olmayan davranışlarının incelenmesi ve aynı zamanda sonuçlarının benzer karışım özelliklerine sahip geleneksel betonlar ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip genleştirilmiş kil agregaları kullanılarak iki farklı birim ağırlık ve dayanım sınıflarına sahip yapısal hafif betonlar üretilmiştir. Söz konusu hafif agregalı betonların belirtilen özellikleri, benzer matris bileşimi ve agregaya granülometrisine sahip geleneksel beton karışımları ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmada bağlayıcı malzeme olarak Portland çimentosu ve F tipi uçucu kül kullanılmış olup uçucu kül etkisini bertaraf etmek amacıyla tüm karışımlarda çimento/uçucu kül oranı sabit tutulmuştur. Yine tüm karışımlar için 1 m³ karışımda toplam agregaya hacmi %62-63 aralığında sabit tutularak agregaya konsantrasyonunun deney sonuçlarına olan etkisi bertaraf edilmek ve sadece agregaya tipinin etkisi gözlenmek istenmiştir.

Bu kapsamda 3 farklı su/bağlayıcı oranına sahip, yarısı yalın ve yarısı PVA lif içeren olmak üzere üretilen toplam 18 farklı karışımdan alınan numuneler üzerinde taze beton, basınç, yarmada çekme ve eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numunelere ait elastik modülü, Poisson oranı ve eğilme yükleri altında kırılma enerjileri hesaplanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Betonun Bileşenleri

Betonun fiziksel, kimyasal, elastik ve mekanik özelliklerini belirleyen beton bileşenlerinin incelenmesi, uygun kalitede beton üretmek adına elzemdir. Bu başlık altında betonun bileşenleri genel hatlarıyla ele alınmıştır.

2.1.1 Çimento

Çimento, su ile reaksiyona girebilen (hidrolik) bağlayıcı bir malzeme olarak tanımlanır. Ana hammadde olan kalker taşı, kil, demir cevheri ve kumun öğütülüp 1400 – 1500 °C sıcaklıktaki döner fırınlarda pişirilmesiyle oluşan “klinker” malzemesine %4 – 5 oranında alçıtaşı ilave edilmesiyle elde edilen karışım daha sonra çok ince toz halinde öğütülür ve böylece Portland çimentosu elde edilir. Portland çimentosu tanelerinin boyutları 1 – 200 µm arasında değişkenlik göstermekte olup, özgül ağırlığı 3,10 – 3,15 gr/cm³ civarındadır [1].

Ana hatlarıyla ifade edilecek olursa, çimento taneleri su ile hidrasyon reaksiyonuna girer ve bu reaksiyon çimento jelini meydana getirir. Bu bağlayıcı jel, karışımdaki agrega yüzeylerini kaplayarak agregaları birbirine bağlamış olur. Böylece çimento bağlayıcılık görevini yerine getirmiş olur [2].

Klinkerin bileşiminin en az %90’ı karma oksit formundaki dört temel bileşenden oluşmaktadır.

Bu dört temel bileşen Çizelge 2.1’de verilmiştir [6].

Çizelge 2.1 : Klinker bileşenleri.

Bileşen	Açık Formül
C ₂ S	2CaO.SiO ₂
C ₃ S	3CaO.SiO ₂
C ₃ A	3CaO.Al ₂ O ₃
C ₄ AF	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃

Hidratasyon, karmaşık reaksiyonlar içerdiğinden bileşenlerin kimyasal ifadelerini kısaltmak ihtiyacı duyulmuş ve ifadeler şu şekilde kısaltılmıştır: $\text{CaO} = \text{C}$, $\text{SiO}_2 = \text{S}$, $\text{H}_2\text{O} = \text{H}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$ ve $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$.

Karma oksit formundaki bileşenlerden C_3S 'in bağlayıcılık özelliği ilk yaşlardan itibaren etkili olmaktadır. C_2S 'in reaksiyonu yavaş gerçekleştiğinden bu bileşenin bağlayıcılık özelliği betonun ileriki yaşlarında görülmektedir. C_3A ise su ile çok hızlı reaksiyon verdiğinden ve çimento hamurunun hızlıca katılaşmasına sebep olduğundan, klinker alçıtaşı ile öğütülür ve bu etki ortadan kaldırılır. C_4AF 'nin ise bağlayıcılık özelliği çok düşüktür [6].

2.1.2 Agregas

Agrega, doğal, yapay veya geri kazanılmış olarak bulunabilen ve beton üretiminde kullanılan, kum, çakıl, kırmataş gibi ince ve/veya iri taneli bir yapı malzemesidir. Beton üretiminde kullanılan agregaların fiziksel ve kimyasal özellikleri beton kalitesine doğrudan etki etmektedir. Beton karışımının hacimce yaklaşık %60 – 85 kadarını oluşturan agregaların özgül ağırlık, petrografik ve kimyasal yapı, granülometri ve maksimum tane boyutu, agregadaki organik veya inorganik madde türü ve miktarı, boşluk yapısı, tane ve yüzey şekli, dayanım ve su emme gibi önemli özelliklerinin hedeflenen betona uygun agrega seçiminde dikkate alınması gereken önemli unsurlar olduğu bilinmektedir [3,5].

Agrega ve çimento hamurunun en az boşluk içerecek şekilde karışmasında tane büyüklüğü dağılımı önemli bir faktördür. 4 mm'lik elekten geçen agregalar ince, geçemeyen agregalara kaba agrega olarak sınıflandırılır [4].

2.1.3 Karma suyu

Beton üretiminde kullanılan karma suyunun, çimento ile reaksiyona girerek hidratasyonu başlatma ve betonda işlenebilirliği sağlama görevleri vardır. Beton prizini ve dayanımını etkileyecek, donatı korozyonuna sebebiyet verecek organik veya inorganik yabancı maddeler içermeyen her türlü su, beton üretiminde karma suyu olarak kullanılabilir [3].

Su/bağlayıcı madde oranı beton karışım hesaplarında önemli bir parametredir. Betona konulacak fazladan su betondaki boşluk miktarını artıracak ve bu durum betonun mekanik ve durabilite özelliklerine olumsuz olarak yansıyacaktır [3]. Ancak taze

betonun donatılar içerisinde rahatça yerleşmesi için akıcılığının yeterli olması gerekir. Mümkün olan en az miktarda su kullanılarak üretilen betonlarda işlenebilirliği artırmak üzere katkı maddeleri kullanmak iyi bir çözümdür [7].

2.1.4 Katkı maddeleri

Betonların ve harçların taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini değiştirmek ve iyileştirmek amacıyla betonu karma işlemi sırasında eklenen organik veya inorganik maddelerdir [8]. Katkı maddeleri kimyasal katkıları ve mineral katkıları olmak üzere iki başlık altında toplanabilir.

2.1.4.1 Kimyasal katkıları

Kimyasal katkıları, betonun fiziksel ve kimyasal özelliklerini ihtiyaca uygun olarak optimize etmek amacıyla kullanılan maddelerdir. ASTM C 494 [11] standardına göre kimyasal katkı tipleri Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 : Kimyasal katkı tipleri.

Katkı Tipi	Açıklaması
A	Su azaltıcı akışkanlaştırıcılar
B	Priz geciktirici katkıları
C	Priz hızlandırıcı katkıları
D	Su azaltıcı ve priz geciktirici katkıları
E	Su azaltıcı ve priz hızlandırıcı katkıları
F	Su azaltıcı süperakışkanlaştırıcılar
G	Su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı priz geciktirici katkıları
S	Özel performanslı katkıları

Kimyasal katkı maddeleri uygun miktarda kullanıldığı takdirde betonun özelliklerinde gözlenecek iyileşmelerin önemlileri aşağıda sıralanmıştır [1, 8, 9].

- Düşük su/bağlayıcı oranına sahip betonlarda su muhtevasını değiştirmeden betonun işlenebilirliği artırmak
- Betonun terleme, ayrışma ve pompalanabilme özelliklerine olumlu yönde katkı yapmak
- Priz başlama süresini geciktirmek veya hızlandırmak
- Düşük su/bağlayıcı oranına bağlı olarak dayanımı ve dayanıklılığı artırarak betonun ve yapının servis ömrünü artırmak
- Geçirimsizliği artırarak donatı korozyonunu engellemek

- Hidratasyon reaksiyonları sırasında açığa çıkan adyabatik ısıyı düşürmek
- Betonun hava muhtevasını azaltmak veya betona hava sürüklemek
- Betonun donma – çözünme direncini artırmak.

2.1.4.2 Mineral katkılar

Puzolan olarak da isimlendirilebilen mineral katkılar, ASTM C 125 standardına göre silisli veya silisli alüminli ince toz halinde, kendi başına bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan, uygun sıcaklıkta ve nemli ortamlarda kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcı özellikli ürünler oluşturan malzemeler olarak da tanımlanabilmektedirler [12]. Bileşiminde SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO vb. mineralleri barındıran puzolanlar, beton karışımına eklenerek betonun reolojik, mekanik ve dayanıklılık özelliklerine önemli ölçüde katkı yapabilirler. Mineral katkı maddelerinin kullanım miktarı ve yöntemi, maddelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri gibi faktörler bu maddelerin betona olan katkısı üzerine etkisi vardır [7].

Puzolanlar doğal ve yapay olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Bu sınıflandırma Çizelge 2.3'te verilmiştir [14].

Çizelge 2.3 : Puzolanların sınıflandırılması ve puzolan türleri.

Doğal Puzolanlar	Yapay Puzolanlar
Volkanik Küller	Uçucu Kül
Killi Şist	Pişirilmiş Kil
Diotame Toprağı	Yüksek Fırın Cürufu
Pomza Taşı	Silis Dumanı
Volkanik Tüfler	Demirli Olmayan Cüruf
Traslar	Pirinç Kabuğu Külü
Opalin Silika	

Puzolanik reaksiyon

Çimentonun iskeletini oluşturan C_2S ve C_3S karma oksitleri hidratasyon reaksiyonları dahilinde su ile birleştiğinde kalsiyum silikat hidrate (C-S-H) ve sönmüş kireç (C-H) ürünlerini açığa çıkarırlar.

Oluşan C-S-H, betona bağlayıcılık özelliğini vermekte ve betonun dayanımında en önemli rolü oynamaktadır.

Betona mineral katkı olarak eklenen uçucu kül ve silis dumanı gibi maddeler sönmüş kireç ile reaksiyona girerek C-S-H oluşturmurlar [14].



Doğal puzolanların betonlarda mineral katkı amacıyla kullanılabilmesi i\u00e7in katkının kimyasal bile\u015fimindeki SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ y\u00fczdelerinin toplamının en az %70 olması gerekmektedir [13]. Puzolanlar genellikle %60 – 85 arasında SiO₂ i\u00e7erdiklerinden ana puzolanik reaksiyon s\u00f6nm\u00fc\u015f kire\u00e7ten kalsiyum silikat hidrate olu\u015fumunu kapsamaktadır [14]. Puzolanik reaksiyonlar yava\u015f ilerler, dolayısıyla betonda dayanım etkisi 90 g\u00fcnden sonra g\u00f6zlemlenebilmektedir [8].

U\u00e7ucu k\u00fcl

Enerji \u00fcretimi ama\u00e7lı termik santrallerde pulverize k\u00f6m\u00fcr\u00fcn yakılmasıyla olu\u015fan baca gazından elektrostatik \u00e7\u00f6kelticilerle toplanan, yakılan k\u00f6m\u00fcr\u00fcn tipine g\u00f6re de\u011fi\u015fen farklı tiplerde k\u00fcl atıkları olu\u015fmaktadır. Yapısının b\u00fcy\u00fck bir b\u00f6l\u00fcm\u00fc amorf durumda olan ve tane \u00e7apları 1 – 200 \u00b5m arasında de\u011fi\u015fmekle beraber %75'ten fazlasının \u00e7apı 45 \u00b5m'dan k\u00fc\u00e7\u00fck olan u\u00e7ucu k\u00fcller b\u00fcnyesinde y\u00fcksek miktarlarda SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ oksitleri ve az miktarda da CaO, MgO ve SO₃ oksitleri bulundurur. Ortalama olarak 2,1 – 2,7 gr/cm³ arası yo\u011funlu\u011fa sahip olan u\u00e7ucu k\u00fcllerin en yaygın kullanım alanı beton end\u00fcstrisidir. U\u00e7ucu k\u00fcller, hidratasyon \u00fcr\u00fcnleriyle girdikleri puzolanik reaksiyonlarla betonun mekanik \u00f6zelliklerine olumlu katkı sa\u011fladığı gibi, betonun i\u015lenebilirlik, su ihtiya\u00e7ı ve terleme \u00f6zelliklerine de olumlu katkı yapmaktadır [7, 8, 15, 16].

U\u00e7ucu k\u00fcllerin sınıflarının belirlenmesinde ilgili k\u00fcl\u00fcn kimyasal \u00f6zellikleri g\u00f6z \u00f6n\u00fcne alınmaktadır. U\u00e7ucu k\u00fcller, i\u00e7ermi\u015f oldukları SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ oksitleri miktarlarına g\u00f6re F ve C sınıfı olarak ikiye ayrılırlar [13, 15].

ASTM C618 standardına g\u00f6re;

- SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ > %70 ise u\u00e7ucu k\u00fcl F sınıfına girmektedir. Bu tip u\u00e7ucu k\u00fcller antrasit veya bit\u00fcmli k\u00f6m\u00fcrlerin yakılmasıyla elde edilir. Ba\u011flayıcılık \u00f6zellikleri yoktur.
- SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ > %50 ise u\u00e7ucu k\u00fcl C sınıfına girmektedir. Bu tip u\u00e7ucu k\u00fcller linyit veya d\u00fc\u015f\u00fck bit\u00fcmli k\u00f6m\u00fcrlerin yakılmasıyla elde edilir. \u00c7ok az miktarda ba\u011flayıcılık \u00f6zellikleri vardır.

Uçucu küller beton karışımında üç ayrı yöntemle kullanılır [8]. Bunlar şu şekilde sıralanabilir;

- Çimento miktarının belli bir oranda azaltılması ve yerine uygun uçucu kül ikame edilmesi
- İnce agrega miktarının belli bir oranda azaltılması ve yerine uygun uçucu kül ikame edilmesi
- Hem ince agreganın hem de çimentonun belli bir oranda azaltılması ve yerine uygun uçucu kül ikame edilmesi.

2.1.5 Lifler

Hayvan, bitki ve mineral gibi doğal kaynaklardan elde edildiği gibi arzu edilen özellikleri taşıyacak şekilde yapay olarak da imal edilebilirler.

Lifler, yeterli basınç dayanımını sağlamasına rağmen çekme ve eğilme dayanımı düşük olan malzemelerin bu özelliklerini iyileştirme, malzemenin kırılgenliğinin giderilerek sünekliliğini pekiştirme gibi amaçlarla kompozit malzemelerin üretiminde kullanılırlar [17].

Doğal lifler;

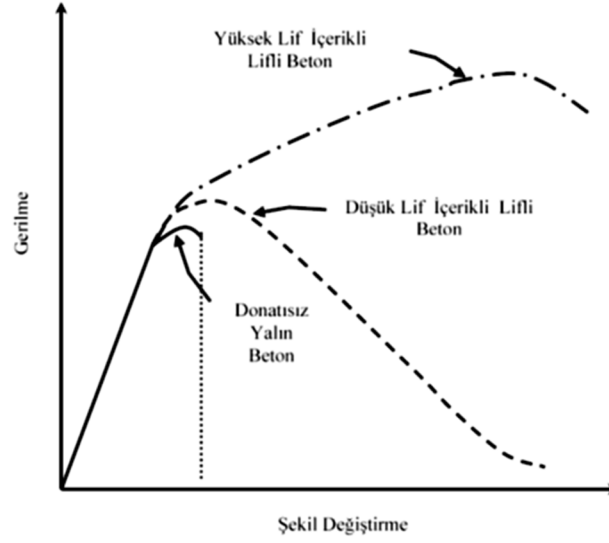
- Hayvansal lifler
- Bitkisel lifler
- Mineral lifler olarak,

Yapay lifler;

- Polimer lifler
- Metalik lifler
- Seramik lifler olarak sınıflandırılabilir [17].

Lifli betonlar, aynı karışım özelliklerin sahip olan lifsiz betonlarla kıyaslandığında daha yüksek enerji yutma kapasitesine sahiptirler.

Şekil 2.1’de lifli betonlarla lifsiz betonların gerilme – şekil değiştirme ilişkisi görülmektedir [20].



Şekil 2.1 : Lifli – lifsiz beton gerilme – şekil değiştirme grafiği.

Lifli betonlarda liflerin etkinliği kompoziti bir araya getiren malzemelerin elastisite modülüne bağlıdır. Liflerin elastisite modülünün betonun harç matrisinin elastisite modülünden yüksek olması sayesinde çekme kuvveti etkisi altında lifler betonda gereken performansı gösterirler [18].

Değişik türlerde birçok lif malzemesi bulunmaktadır. Bunlardan bazılarının mekanik özellikleri Çizelge 2.4’te verilmiştir [17, 18].

Çizelge 2.4 : Farklı tip liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri.

Lif Cinsi	Çekme Dayanımı [MPa]	Elastisite Modülü [$10^3 \times \text{MPa}$]	Maksimum Uzama [%]	Özgül Ağırlık [gr/cm^3]
Akrilik	207 – 414	2,1	25 – 45	1,1
Pamuk	414 – 690	4,8	3 – 10	1,5
Cam	1035 – 3795	69	1,5 – 3,5	2,5
Polyester	724 – 863	8,3	11 – 13	1,4
Naylon	759 – 828	4,1	16 – 20	1,1
Polipropilen	552 – 759	3,5	25	0,90
Polietilen	690	0,14 – 0,40	10	0,95
Mineral yünü	483 – 759	69 – 117	0,60	2,7
Çelik	276 – 2760	200	0,50 – 35	7,8
PVA	880 – 1600	25 – 40	6 – 10	1,3

Lifli betonların performansına etki eden diğer bir önemli husus ise kullanılan lifin narinliği, yani lifin boyunun çapına oranıdır (L/d).

Narinliğin artmasıyla lifin betonun performansına olan etkisi artmakla beraber aynı zamanda işlenebilirliği de düşürmektedir [21].

Teoride lif miktarının arttıkça beton performansının artacağını düşünmek yanlış değilse de lif yüzdesinin artışı beton içerisinde topaklanma ve işlenebilirlik sorunları doğurur. Bu topaklanmalardan ötürü beton içerisinde zayıf bölgeler oluşur ve böyle olası bir sorun betonun mekanik davranış performansına olumsuz olarak yansır.

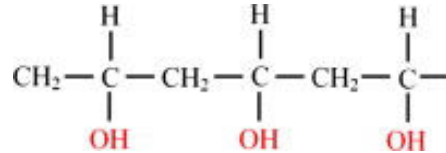
Lifli betonların lif yüzdesine göre sınıflandırılması şu şekilde yapılabilir [22].

- Düşük düzey lif miktarı: %0,1 – 1
- Orta düzey lif miktarı: %1 – 3
- Yüksek düzey lif miktarı: %3 – 12.

2.1.5.1 PVA lifler

Poli vinil alkoller, poli vinil asetatların sulu asit veya alkali ile işleme sokularak hidrolize edilmesiyle elde edilir. Hidroksil grubu içeren PVA'lar, moleküller ile hidrojen bağı oluşturarak PVA lifler ve çimento matrisi arasında bağı kuvvetlenmesini sağlayabilirler.

PVA'lar özgül ağırlığı 1200 – 1300 kg/m³ arasında değişen beyaz bir toz olup bu tozdan ticari olarak kullanılan PVA lifler üretilmektedir. Şekil 2.2'de PVA liflerin yapısı gösterilmiştir [42].



Şekil 2.2 : PVA liflerin yapısı.

PVA lifler beton veya çimentolu kompozit malzemeler içerisinde kullanıldığında birçok avantaja sahiptir. Yüksek çekme mukavemetine, görece yüksek elastik modüle, Portland çimentosu ile iyi bir kimyasal uyumluluğa sahip PVA lifler, yüksek derecede lif-matris aderansı gösterirler [42].

Betonlarda kullanıldığında PVA lifli betonların eğilmede çekme dayanımlarının yalın betonlara kıyasla oldukça yüksek olduğu ve enerji yutma kapasitelerinin artmasıyla betonun daha sünek davranış sergilediği görülmüştür. Ayrıca PVA lifli betonların donma çözünme çevrimlerinde de yüksek performans göstermektedir [17].

2.2 Betonun Mekanik Davranışı

Mühendislik hesaplarında ve tasarımlarda yer alan beton tanımının ve yapılan kabullerin pratikte de bir anlam ifade etmesi için öncelikle betonun mekanik özelliklerinin yapılan kabulleri ve ilgili beton standartlarını sağlaması ve performansının yeterli seviyede olması gerekmektedir. Bu başlık altında betonun mekanik davranışına kısaca değinilmiştir.

Betonun mekanik davranışı hakkında ilk bakışta fikir sahibi olabilmek için kullanılabilecek en önemli parametre, betonun basınç dayanımıdır. Betonun basınç dayanımı, hem betonun kalitesini hem de kullanım alanına uygunluğu hakkında fikir edinebilmek için önemlidir. Çimentonun hidratasyonunun uygun nem ve sıcaklık koşullarında gerçekleşmesi betonun dayanım gelişiminin hedeflenen şekilde olması açısından önemlidir. Beton içindeki bağıl nemin %80'in altına düştüğü durumda hidratasyonun durduğu bilinmektedir. Hidratasyon durduğunda dayanım ve dayanıklılık gelişimi de durur. Hidratasyonun, çimentonun inceliğine, karışım bileşenlerinin oranına ve katkı maddelerine bağlı olmakla beraber ilk 7 gün içerisinde %60 – 80 oranında tamamlandığı söylenebilir. Bu sebeple ilk günlerde uygun kür koşullarının sağlanması önem arz etmektedir [38].

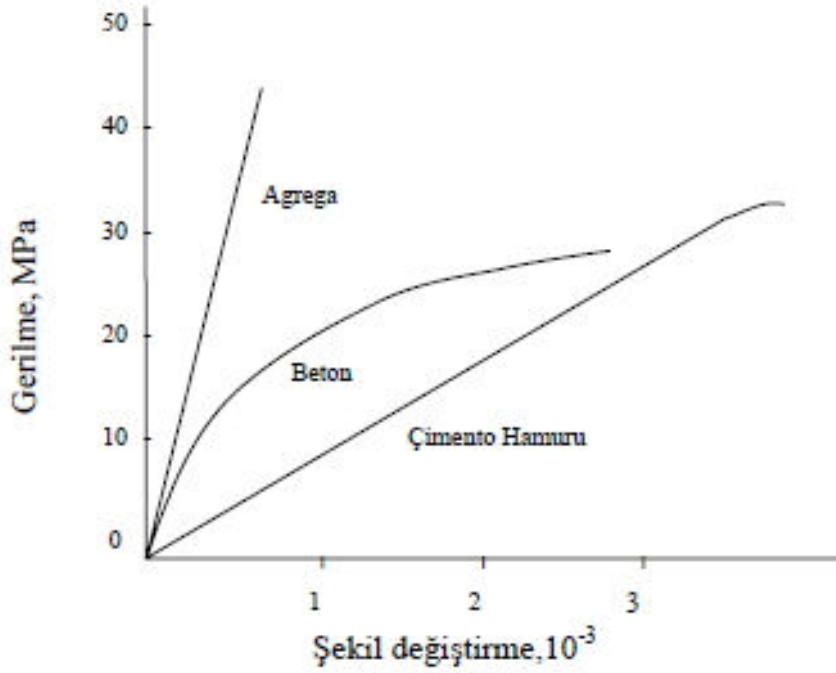
Genel bir ifadeyle betonun basınç dayanımını etkileyen üç parametre vardır [3];

- Agreganın dayanımı
- Çimento hamurunun dayanımı
- Agreg – çimento hamuru arayüzeyinin dayanımı.

Dolayısıyla normal beton, çimento hamuru , agreg ve agreg – çimento hamuru arayüzü olarak 3 fazlı bir malzeme olarak kabul edilebilir. Çimento hamuru, agreg ve agreg – çimento hamuru arayüzü dayanımı betonun dayanım sınıfına göre değişkenlik gösterir [3,6].

Şekil 2.3'de görüldüğü üzere sertleşmiş çimento hamuru, agreg ve agreg – çimento arayüzünün basınç altında gerilme – şekil değiştirme eğrileri arasında belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Agregalar, çimento hamuruna göre daha rijit bir yapıya sahiptir. Agregaların elastisite modülü ise çimento hamuruna göre daha yüksek değerler alır. Normal betonlarda beton göçmeleri diğer iki faza göre daha zayıf olan

agrega – çimento hamuru arayüzeyinde ilerleyen çatlaklardan meydana geldiğinden betonun gerilme – şekil değiştirme eğrisi lineer değildir [6].



Şekil 2.3 : Çimento hamuru, agrega ve betonun gerilme – şekil değiştirme eğrileri.

Çatlak oluşumunun başlaması betonun mekanik özelliğiyle ilintili olarak gerilmeye bağlıdır. Basınç gerilmesi altında basınç gerilmesine dik yönde oluşan kayma ve çekme etkileriyle pek çok çatlak yayılması ve betonun göçmesi olayı gerçekleşir. Betonda çatlak oluşumu sonucu göçme için enerji gereklidir. Bu enerji, kırılma enerjisi olarak tanımlanır. Numunenin göçmesine kadar birim hacim başına yapılan işe ise tokluk ismi verilir. Tokluk değeri aynı zamanda, gerilme – şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alana eşittir [23].

Lifli betonlarda ise bilhassa beton kırılmaya başladıktan ve plastik davranış göstermeye başladıktan sonra lifler göçme davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Yalın betonlara göre yükleme esnasında çatlaklar yükleme elemanının hacminde yayılmakta ve çatlak lokalleşmeleri çok daha az olmaktadır. Bu durum küçük çatlakların tek bir göçme çatlak oluşturmasını engelleyerek betonun yuttuğu enerjiyi artırmaktadır.

Lifler, betonun elastik ve mekanik özelliklerine kayda değer bir etki etmemesine rağmen betonun çekme davranışına ve süneklik ve tokluk mekanizmasına önemli katkılar yapmaktadır [24].

2.3 Hafif Betonlar

Dünyada modern yapı uygulamalarında, yapı elemanlarının tümü veya bir kısmı, daha hafif ve ekonomik yapılar oluşturmak amacıyla hafif betonlardan imal edilmektedir. Daha ziyade ısı yalıtımı ve ses yutma kapasiteleriyle ön plana çıkan hafif betonlar çeşitli birim ağırlık ve dayanım özellikleriyle göre sınıflara ayrılmakta ve taşıyıcılık özellikleri vesilesiyle de uygulama alanı bulmaktadır. Bu başlık altında hafif betonun tarihçesi, sınıflandırılması, hafif beton üretiminde kullanılan agregaların ve hafif betonun öne çıkan özellikleri incelenmiştir.

2.3.1 Hafif betonların tarihçesi

Hafif betonların ilk kullanımı, M.Ö. Romalılar dönemine kadar uzanmaktadır. O dönemlerde hafif agregalar kullanılarak imal edilmiş hafif betonlarla yapılan eserler günümüze kadar varlığını sürdürmüştür. Sümerliler ve Romalılar, hafif betonları M.Ö. 3. yüzyılda yapı inşaatlarında kullanmışlardır. Hafif betonla imal edilmiş ve günümüze kadar ulaşmış en eski yapılara örnek olarak, İstanbul'da bulunan Ayasofya, St. Sofia Katedrali, Panteon tapınağı ve Kolezyum verilebilir [3, 25].

Biraz daha yakın zamanlara bakacak olursak, özellikle geçtiğimiz son yüzyılda, Belçika, Hollanda, Almanya, ABD ve Japonya gibi sanayi ülkelerinde hafif beton kullanımında hızlı bir artış görülmüştür. Hafif betonlar bu tip ülkelerde köprü ayakları, köprü kirişleri, panel duvarlar ve kompozit eleman üretimlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [26]. Ayrıca hafif beton kullanılarak yapılmış binalar da mevcuttur. Bu yapılara örnek olarak, ABD'nin Kansas şehrindeki Wesport Lisesi ve Southwestern Bell Telephone Company binası, St. Louis şehrindeki 28 katlı Park Plaza Hotel binası, Chicago şehrindeki 180 metre yüksekliğe sahip Marina City ve 197 metre yüksekliğe sahip Lake Point Tower binaları ile Sydney'deki 183 metre yüksekliğe sahip Park Regis binaları gösterilebilir [25].

Ülkemizde ise yeterli hacimde hafif agrega kaynakları bulunmasına rağmen, gerek beton üretim tesislerinin üretim maliyeti ve zahmeti yüksek olan bu malzemeyi piyasaya sunmak konusunda çekince yaşaması, gerek hafif beton özelliklerinin normal betonlar kadar iyi bilinmemesi, gerekse bu konudaki önemli tecrübe eksikliği nedeniyle ülke genelinde hafif beton kullanımı malesef henüz yeteri kadar yaygınlaşmamıştır [26].

2.3.2 Hafif betonların tanımı

Hafif betonlarla alakalı olarak bazı standartlarda çeşitli tanımlamalar yapılmıştır. Bunlardan birkaçı aşağıda verilmiştir.

- ACI 213R-87 standardına göre [27] taşıyıcı hafif beton, hafif agregalarla üretilmiş, 28 günlük hava kurusu birim ağırlığı $1440 - 1850 \text{ kg/m}^3$ arası ve basınç dayanımı en az $17,2 \text{ MPa}$ olan yapısal betondur.
- ASTM C330 standardı [31] tamamen hafif agregalarla üretilmiş hafif betonların birim ağırlığının 1760 kg/m^3 , kısmen hafif kısmen normal agregalarla üretilen hafif betonların birim ağırlığının 1840 kg/m^3 'ü geçmemesini önermektedir. Standardın tanımladığı hafif betonlarda minimum basınç dayanımı 17 MPa 'dır.
- TS EN 206-1 standardına göre [28] hafif beton, etüv kurusu durumdaki birim ağırlığı 800 kg/m^3 veya daha büyük olup, 2000 kg/m^3 'ü geçmeyen kısmen veya tamamen hafif agregalarla üretilmiş betondur.
- CEB-FIB standardı [29] ise taşıyıcı hafif betonun kuru birim hacim ağırlığının 1900 kg/m^3 'ü geçmemesini önermektedir.

2.3.3 Hafif betonların sınıflandırılması

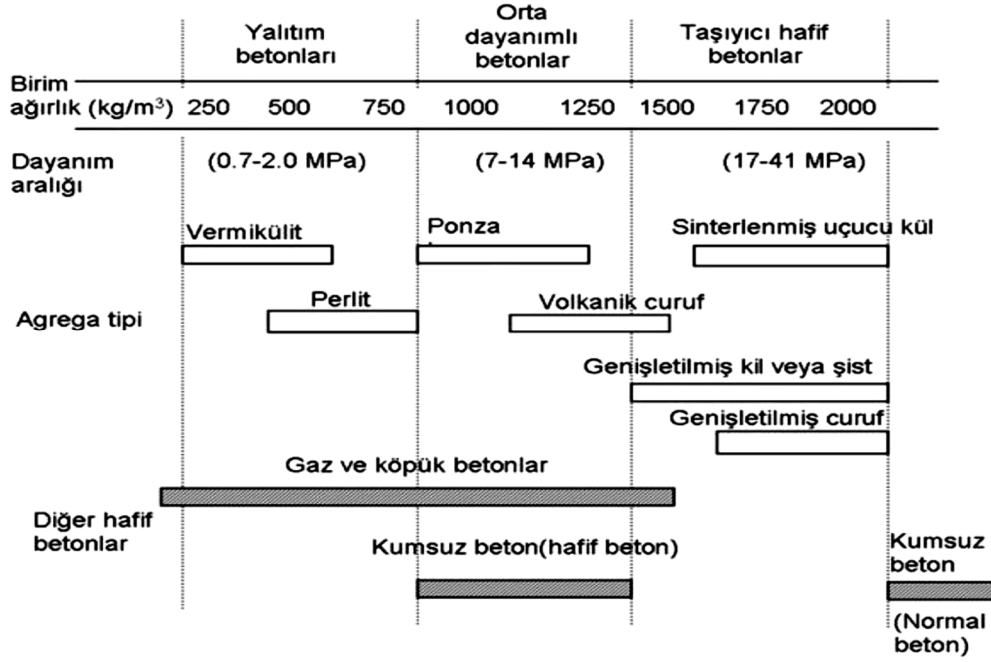
Hafif betonlar, birim ağırlık ve dayanım özelliklerinin genellikle üretimde kullanılan hafif agreganın cinsine göre değişkenlik göstermesi neticesinde farklılıklar gösterirler. Bu durum hafif betonların hem birim ağırlık hem de dayanım koşuluna göre sınıflandırılma sonucunu doğurmuştur. Yalıtım betonlarından taşıyıcı hafif betonlara kadar açılan yelpazede bütün hafif betonların özellikle birim ağırlık bakımından sınıflandırılmasında değişik kabuller vardır.

Birim ağırlıklarına göre hafif betonlar üç ana gruba ayrılabilir [30];

- Yalıtım betonları: birim ağırlıkları $300 - 800 \text{ kg/m}^3$ arasında,
- Orta mukavemetli hafif betonlar; birim ağırlıkları $800 - 1400 \text{ kg/m}^3$ arasında,
- Taşıyıcı hafif betonlar; birim ağırlıkları $1400 - 2000 \text{ kg/m}^3$ arasında.

Şekil 2.4'te [30] hafif betonların sınıflandırması, birim ağırlık ve kullanılan hafif agregalar türü göz önüne alınarak yapılmış ve sunulmuştur. Hedeflenen birim ağırlık

aralığı için kullanılabilecek hafif agrega türü şekilde gösterilmiştir. Buna göre genişletilmiş kil agregası ile taşıyıcı hafif beton üretimi mümkündür.



Şekil 2.4 : Hafif betonların sınıflandırılması.

Birim ağırlık ve basınç dayanımı özellikleri göz önüne alınarak da hafif betonları sınıflandırmak mümkün olup ilgili sınıflandırma Çizelge 2.5'te sunulmuştur [30]. S1 sınıfı hafif betonlar genellikle yalıtım amaçlı kullanılmaktadırlar. S2 ve S3 sınıfı betonlar orta dayanımlı betonlardır. S4, S5 ve S6 sınıfı betonlar ise birçok ülkede taşıyıcı hafif betonlar olarak kabul görmektedirler.

Çizelge 2.5 : Hafif beton sınıfları.

Hafif Beton Sınıfı	Birim Ağırlık [kg/m³]	Basınç Dayanımı [MPa]
S1	800	1 – 7
S2	800 – 1200	7 – 10
S3	1000 – 1400	10 – 14
S4	1300 – 1800	14 – 25
S5	1500 – 1800	25 – 40
S6	1800 – 2000	40 – 70

RILEM'in önerilerine göre hafif betonların etüv kuru ağırlıkları, basınç dayanımları ve ısı iletkenlikleri göz önüne alındığında yapılacak sınıflandırma, yapısal, yapısal ve yalıtım ve yalıtım betonları olarak Çizelge 2.6'da görülmektedir [6, 30].

Çizelge 2.6 : Hafif betonların işlevlerine göre sınıflandırılması.

Sınıf	I	II	III
Hafif Betonun Türü	Yapısal	Yapısal ve Yalıtım	Yalıtım
Etüv kurusu birim ağırlık [kg/m ³]	1600 – 2000	< 1600	< 1450
Basınç Dayanımı [MPa]	> 15	> 3,5	> 0,5
Isıl iletkenliği [W/mK]	-	< 0,75	< 0,30

TS EN 206 – 1 standardına göre [28] hafif betonlar için basınç dayanım sınıfları Çizelge 2.7’de verilmiştir.

Çizelge 2.7 : Hafif beton için basınç dayanımı sınıfları.

Basınç Dayanım Sınıfı	En Düşük Karakteristik Silindir Dayanımı [N/mm ²]	En Düşük Karakteristik Küp Dayanımı [N/mm ²]
LC8/9	8	9
LC12/13	12	13
LC16/18	16	18
LC20/22	20	22
LC25/28	25	28
LC30/33	30	33
LC35/38	35	38
LC40/44	40	44
LC45/50	45	50
LC50/55	50	55
LC55/60	55	60
LC60/66	60	66
LC70/77	70	77
LC80/88	80	88

2.3.4 Hafif beton yapımında kullanılan agregalar

Hafif beton üretimlerinde doğal ve yapay olmak üzere iki çeşit hafif agrega kullanılabilir. Bu agregaların ortak özelliği gözenekli yapıya sahip olmaları ve bu sebeple birim ağırlıklarının normal agregalara göre düşük olmasıdır.

Yapay agregalarda tanelerdeki gözenekli yapı ham maddelerin erime sıcaklığına kadar ulaşmasıyla oluşur. Yüksek sıcaklıkta gazların genleşmesiyle 5 – 300 µm çapında boşluklar oluşur ve soğumanın ardından boşluklar aynen kalır. Aynı zamanda ısı yalıtımı da sağlamış olurlar [33, 35].

Doğal ve yapay hafif agregalar tane şekli ve yüzey dokusu bakımından farklılıklar gösterebilir. Tane şekli olarak kübik, küresel, sivri veya düzensiz hallerde bulunabilirler. Agregaların bu özellikleri beton karşımında işlenebilirliğe doğrudan etki eder [34, 35].

Hafif agregaların su emme oranı, hafif agregaların içindeki boşlukların boyutuna, yapısına, dağılımına ve sürekliliğine bağlıdır. Hafif agregalar boşluklu yapılarından dolayı normal agregalara oranla %5 – 25 oranında daha fazla su emerler. Beton karşım hesabında ve üretiminde bu durumun dikkate alınması önemlidir. Agregada tarafından emilen su uzun süreli kür şartlarında hidrasyona ve agregada – çimento hamuru arayüzünün gelişiminde yararlıdır [35].

Doğal hafif agregalar genellikle volkanik kökenlidir. Bu kapsamda pomza taşı, diyamotit, vermikülit, tuf ve volkanik cürüflar doğal hafif agregalara örnek olarak verilebilir.

Yapay agregalar ise yüksek fırın cürufu, kil, uçucu kül gibi maddelerin ısıtma, gaz veya köpük oluşturma gibi yöntemlerle gözenekleştirilerek elde edilen agregalardır [26, 32].

2.3.4.1 Genleştirilmiş kil agregası

Isıtıldığında gaz kabarcıkları çıkararak boşluklu bir yapı oluşturma özelliğine sahip killere genleşen kil denir. Bu özelliğe sahip killerin 1000 – 1300 °C sıcaklıktaki döner fırınlarda pişirilmesiyle killerin kimyasal yapılarında bulunan gazların açığa çıkar. Bu pişirme işlemiyle killer gözenekli bir forma kavuşur ve bu yöntemle üretilen agregalara genleştirilmiş kil agregası ismi verilir. Bu gözenekli form ile birlikte killerin hacmi ilk hacimlerine göre 1,5 – 6 kat arası artmaktadır. Ayrıca ani sıcaklık etkisiyle sinterlenmiş sert bir dış kabuğa sahip olmaktadır [36].

Genleştirilmiş kil agregası üretimi için kullanılan en yaygın hammaddeler; erken sinterleşen kil, kumlu kil, killişist ve şifertondur. Bu hammaddeler mineralojik olarak illit, serizit ve montmorillonit gibi tabakalı silikatlardan meydana gelir. Pişirme

işleminde önce hammaddeler kuru veya sulu olmak üzere ön hazırlık işlemlerine tabi tutulurlar. Bu hazırlama sürecinin ardından 1300 °C’de pişirme işlemi gerçekleştirilir. Bu kısımda önemli olan, oluşan gazların kaçmasına izin vermeden 700 – 1150 °C arası sıcaklığa ani olarak yükselişin sağlanmasıdır. Döner fırından saatte 10 – 50 ton arası malzeme elde edilebilir [33].

Genleşme özelliği gösteren killerin ortak özelliklerinden bazıları şunlardır [33, 37];

- Yüksek plastisite özelliği göstermesi
- 2 µm’den küçük tane oranının en az %35 olması
- İllit, serizit, demirli klorit ve mika grubu silikatların mevcut olması
- Karnobat içeriğinin en fazla %5 olması (taneli karbonat patlamaya yol açar)
- Demir oksit içeriğinin %5 – 10 arası olması
- Organik karbon içeriğinin %0,5 – 2,5 arası olması
- Al₂O₃ içeriğinin %12 – 25 arası olması
- SiO₂ içeriğinin %50 – 78 arasında olması
- Bileşenlerin sinterleşme oranının birbirlerine yakın olması
- Sinterleşme sıcaklığının 1200 °C civarında olmasıdır.

Genleşmiş killerde genleşmeyi artırmak ve hızlandırmak için dizel yağı, bitüm, kömür, alçı, karbon, sülfat gibi malzemeler de katılabilir.

Genleştirilmiş kil, hafif yapı agregaları arasında dayanımı en yüksek olan agregalardan biridir ve yapısal hafif beton üretimine uygundur. Uygun hammadde ve teknoloji sayesinde istenilen tane boyutu ve özellikte, değişik miktarlarda malzeme üretimine imkân verebilmesi ve farklı tüketim alanlarının değişik taleplerini karşılayabilmesi genleştirilmiş killerin en önemli üstünlüğüdür.

Genleştirilmiş killer dünyada ticari üretim ve teknik isimlendirmelerine göre Liapor, Leca ve Keramzit tanımlamaları ile de anılmaktadırlar [33].

Türkiye’de çeşitli bölgelerde genleşme özelliğine sahip zengin kil yataklarının bulunmasına rağmen günümüz itibarıyla henüz genleştirilmiş kil agregası üretimi bulunmamaktadır [36].

2.3.5 Hafif betonun üstünlükleri ve sakıncaları

Hafif betonların geleneksel normal betonlarla kıyasla fiziksel ve mekanik özellikler anlamında bazı üstünlükleri ve sakıncaları bulunmaktadır. Uygulamada bu üstünlükler ve sakıncalar muhakkak suretle göz önüne alınmalıdır [25, 26].

Hafif betonun geleneksel betona kıyasla başlıca üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir;

- Yapıların zati yükünü önemli ölçüde azaltır, böylelikle kesit küçülmelerine bağlı olarak malzeme tasarrufu ve hacim artışı sağlanır, ekonomik olarak olumludur
- Yapıların zati ağırlığı azaldığından deprem yükleri önemli ölçüde azalacaktır
- Isı iletkenlik katsayıları düşüktür, örneğin 2 cm kalınlığındaki perlit bir sıvanın ısı yalıtımı 15 cm kalınlığındaki tuğla duvarınkiyle eşdeğerdir
- Yangına dayanıklılığı daha yüksektir
- Sesleri daha iyi yalıtır
- Betonun kalıba uyguladığı basınç daha düşüktür.

Hafif betonun geleneksel betona kıyasla başlıca sakıncaları ise şu şekilde sıralanabilir;

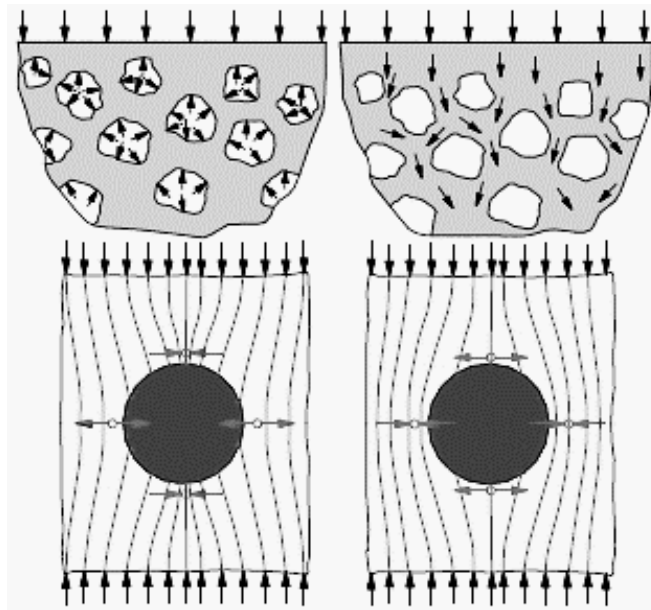
- Üretimi, taşınması ve yerleştirilmesi normal betonlara nazaran çok daha zahmetlidir
- Üretimleri yüksek dozajda çimento kullanımı gerektirir
- Yüksek dozajlı çimentolu durumda hidrasyon ısıları da normal betonlara nazaran yüksek olur
- Aşınmaya karşı dayanıksızdırlar
- Neme karşı yalıtılmaları gerekir
- Hafif agregaların dayanımının sertleşmiş çimento hamurunun dayanımına göre genellikle daha düşük olması nedeniyle betonun basınç dayanımı hafif agegaların dayanımıyla sınırlıdır
- Daha gevrek bir malzemedir.

2.3.6 Hafif betonun mekanik davranışı

Hafif betonların taşıyıcı eleman olarak da kullanılmalarının bir gereği olarak, mekanik özelliklerini belirlemek ve geleneksel beton ile kıyaslayarak farklılıkları incelemek, mühendislik yaklaşımında hata yapmamak adına önem arz etmektedir.

Hafif betonların dayanım özellikleri kullanılan agreganın tipi, su/bağlayıcı oranı, bağlayıcı içeriği ve beton yaşı gibi bazı parametrelere bağlıdır. Hafif agreganın dayanımı arttıkça betonun dayanımı da artar. Ayrıca çimento hamuru ile agreganın rijitliklerinin eşdeğer olması ve çimento hamuru – agreganın arayüzünün mümkün olduğunca iyi olması da dayanımı teorik maksimum dayanıma yaklaştırmaktadır [41].

Agreganın dayanımı ve elastisite modülü normal betonlarda çimento hamurunun dayanım ve elastisite modülü değerlerinden daha büyük olduğu için çatlaklar, zayıf olan çimento hamuru – agreganın arayüzünden ilerlemekte ve betonun dayanımında bu arayüzün mekanik özellikleri büyük rol oynamaktadır [3]. Agreganın çimento hamuru arayüzünün normal betonlardaki davranışının aksine, hafif betonlarda zayıf olan ve betonun mekanik davranışını belirleyen faz hafif agregadır. Çatlak ilerlemesi en zayıf faz olan hafif agregalar üzerinden olur; hafif betonlarda elastik özellikler ve göçme davranışı hafif agregaların fiziksel özelliklerine ve beton karşısındaki toplam hacmine bağlıdır. Şekil 2.5’te normal ve hafif betonun kırılma çizgileri gösterilmiştir [40].



Şekil 2.5 : Basınç kuvvetlerinin normal (sol) ve hafif betonlarda (sağ) aktarımı.

2.3.7 Genleştirilmiş kil agregasıyla yapılmış bazı çalışmalar

Bartolini (2010) yaptığı çalışmada, epoksi ile bir araya toplanmış genleştirilmiş kil agregalarının ses yalıtım performanslarını incelemiştir. Bartolini sesleri absorbe edici yeni bir malzeme üretmenin yanısıra, ürettiği malzemenin iyi mekanik özelliklere sahip olmasını ve ucuza mal edilebilir olmasını amaçlamıştır. Çalışmanın sonucunda, epoksi ile birleştirilen genleştirilmiş kil agregası bloklarının üst düzeyde ses yalıtım performansı gösterdiği ortaya çıkmıştır. Üretilen blokların, piyasada ticari olarak sunulan birçok ses yalıtım ürününden daha hafif olduğu gösterilmiştir. Malzemenin ayrıca çekme ve basınç dayanımları da iyi seviyededir [46].

Uglyanitsa (2014) yaptığı çalışmada, genleştirilmiş kil agregasıyla üretilmiş donatılı betonlarda korozyon varlığını ve oluşma şartlarını araştırmıştır. Çalışmanın sonucunda donatılı yapılarda minimum paspayı kalınlığının 25 mm olması, karışımlara sodyum nitrat veya sodyum tetraborat gibi korozyon inhibitörleri eklenmesi, uçucu kül kullanılması ve çimento dozajının ise minimum 220 kg/m³ olması önerilmiştir [47].

Bogas (2012) yaptığı çalışmada, genleştirilmiş kil agregasıyla kendiliğinden yerleşen beton tasarımı yapmış, 490 – 599 kg/m³ dozajlı ve D1.8 ve D2.0 sınıfı birim ağırlıklı hafif betonlarda 37,4 MPa – 60,8 MPa aralığında basınç dayanımı sonuçları elde etmiştir. Çalışmada, kendiliğinden yerleşen hafif betonların, vibrasyonla yerleştirilen hafif betonlara göre mekanik özellikler anlamında daha üstün performans gösterdiği ortaya koyulmuştur. Kendiliğinden yerleşen hafif betonların elastik modül değerlerinin vibrasyonla yerleştirilen betonlara göre daha yüksek çıktığı gösterilmiştir. Çalışmada ayrıca kendiliğinden yerleşen hafif beton karışımının kaba agregası hacminin segregasyon olmayacak şekilde 325 l/m³'e kadar çıkarılabileceği gösterilmiştir [48].

Yang (2014) ise yaptığı çalışmada, genleştirilmiş kil agregalı hafif betonların karışım hesapları üzerinde araştırmalar yapmıştır. Çalışmada, hedeflenen çökme değerini, basınç dayanımını, kuru birim ağırlığını ve hava muhtevasını yakalamak için ampirik formüller geliştirmiştir. Çalışmada ayrıca ilk deneme karışımlarında doğru karışım oranlarının oluşturulmasındaki zorluklara vurgu yapılmış, halihazırda mevcut olan benzer özellikli malzemelerle yapılmış karışım hesaplarından yola çıkılmasının önemine değinilmiştir. Çalışmadaki hesaplamalar, basınç dayanımı 18 – 50 MPa, kuru birim ağırlık 1200 – 2000 kg/m³, maksimum agregası boyutu 19 – 25 mm olacak şekilde optimize edilmiştir [49].

Lo (2008) tarafından yürütülen çalışmada ise, genleştirilmiş kil agregalarının su emme kapasitelerinin, agrega – çimento hamuru arayüzündeki boşluk boyutu dağılımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, su emme kapasiteleri %8,9, %9,4 ve %11 olan üç farklı genleştirilmiş kil agregası kullanılmış, 0,4, 0,44 ve 0,48 olmak üzere üç farklı su/bağlayıcı oranlı karışımlar hazırlanmıştır. Çalışmada, su/bağlayıcı oranının, agrega – çimento hamuru arayüzündeki boşluk yapısına önemli ölçüde etki etmediğine değinilmiş, asıl etkinin su emme kapasiteleriyle ortaya çıktığı savunulmuştur. Su emme kapasitesi en yüksek olan genleştirilmiş kil agregasıyla üretilmiş betonların agrega – çimento hamuru arayüzünde, su emme kapasitesi en düşük olan agregaya göre boşluk alanlarının %51 oranında daha fazla olduğu gösterilmiştir [50].

Costa (2012) yaptığı çalışmada, genleştirilmiş kil agregasıyla üretilmiş hafif betonların rötre özelliklerini incelemiştir. Costa bu çalışmasında, Eurocode 2 ve Model Code 2010 ile tavsiye edilen toplam rötre hesaplamalarının hafif betonlar için doğru sonuçlar vermediğini göstermiş, bu betonlar için yapılacak hesaplamalarda yalnızca betonun basınç dayanımının, kullanılan çimento tipinin, numunenin geometrisinin ve kütleme şartlarının baz alınmasının yeterli olmadığına değinmiştir. Çalışma kapsamında, genleştirilmiş kil agregalı hafif betonun rötre özelliklerine hafif agregalarının dozajının, agregaların nem miktarının ve agrega tipinin etki ettiği ve bu agregaların sağladığı içsel kürlenmenin rötre miktarını önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir [51].

Hassanpour (2012) ise yaptığı çalışmada, genleştirilmiş kil agregasıyla üretilen hafif betonların birçok avantajının bulunmasına rağmen, aynı basınç dayanımı değerlerinde normal betonlara göre daha gevrek olması ve daha düşük mekanik değerlere sahip olması sebebiyle inşaat sektöründe sıkça tercih edilmediğine değinmiş, bu türlü sakıncaların ise lif kullanımıyla bertaraf edilebildiğine dikkat çekmiştir. Çalışmada, değişik tipteki hafif agregalı betonların lif ilavesiyle değişen işlenebilirlik, birim ağırlık, basınç dayanımı, elastik modül, yarmada çekme dayanımı ve tokluk özellikleri incelenmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, özellikle çelik lif kullanımının işlenebilirliği azalttığı, yeterli miktarda akışkanlaştırıcı katkı, ince agrega ve uçucu kül kullanımıyla bu sorunun önüne geçilebileceği belirtilmiştir. Çelik lif ilavesinin hafif betonların basınç dayanımını artırdığı, ancak %2'den fazla kullanılmasının tam tersi etki edebileceği savunulmuştur. Düşük oranlı çelik lif ilavesinin dahi çekme dayanımına önemli ölçüde olumlu olarak etki ettiği gösterilmiştir. Lif kullanılmasının

elastik modül değerlerini dikkate değer oranda değiştirmediği vurgulanan çalışmada, dūřuk oranda lif kullanımının dahi betonun tokluk özelliklerine önemli ölçüde olumlu katkı yaptığı gösterilmiştir. Bununla birlikte, elik lif ile metalik olmayan lifin birlikte kombinasyon şeklinde kullanılmasının, tek çeşit lif kullanılmasına kıyasla mekanik özellikler üzerinde olumlu yönde daha etkili olduğu belirtilmiştir [52].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Kullanılan Malzemeler ve Karışım Serileri

Bu çalışmada 1700, 2000, 2300 kg/m³ olacak şekilde ikisi hafif biri normal olmak üzere üç farklı birim ağırlığın hedeflendiği beton karışımları tasarlanmıştır. Her bir birim ağırlık için 0,34, 0,42 ve 0,50 olmak üzere 3 farklı su/bağlayıcı oranı seçilmiş olup ilk seride 9 adet farklı karışım üretilmiştir. Aynı karışımlara %0,5 oranında Kuralon-II RFS400x18 PVA lif eklenmek suretiyle ise 2. seri 9 adet karışım daha üretilmiş olup toplamda 18 farklı karışımla çalışma yürütülmüştür.

Tüm karışımlarda 3,14 g/cm³ özgül ağırlığa sahip CEM I-42,5R Portland çimentosu kullanılmıştır. 2,54 g/cm³ özgül ağırlığa sahip F tipi uçucu kül ise mineral katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Ayrıca çalışmada naftalin bazlı süperakışkanlaştırıcı katkı işlenebilirliği artırmak amacıyla kullanılmıştır. 2300 kg/m³ birim ağırlığa sahip normal beton karışımında agrega olarak doğal kum (0-1 mm), kırma kum (0-5 mm) ve kireçtaşı agregası (4-16 mm) kullanılmıştır. Hedeflenen birim ağırlıkları sağlamak amacıyla 1700 ve 2000 kg/m³ birim ağırlığa sahip beton karışımlarında ise iki farklı genişletilmiş kil agregası (GKA-1 ve GKA-2) kullanılmış olup bu birim ağırlıklara sahip karışımlarda normal beton karışımındaki kaba kireçtaşı agregasının 4-8 mm tane aralığındaki kısmı genişletilmiş kil agregalarıyla yer değiştirilmiştir. Genleştirilmiş kil agregalarının özgül ağırlıkları, su emme oranları ve dayanımları farklı olup agregaların boyut dağılımları ise benzerdir.

Kullanılan PVA lifin özellikleri Çizelge 3.1’de, agregaların fizikler özellikleri Çizelge 3.2’de, tane boyut dağılımları ise Çizelge 3.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : PVA lif özellikleri.

PVA Lif Kodu:	Çap [μ]	Uzunluk [mm]	Çekme Mukavemeti [MPa]	Kopmada Uzama [%]	Young Modülü [GPa]
KURALON II RFS 400X18	200	18	975	9,0	27

Çizelge 3.2 : Agregaların fiziksel özellikleri.

Agrega Tipi:		Doğal Kum [0-1mm]	Kırma Kum [0-5mm]	İri Agrega [4-16mm]	GKA-1 [4-8mm]	GKA-2 [4-8mm]
YKSD Özgül Ağırlık, kg/m ³ :		2680	2740	2710	720	1750
Su Emme Oranı,	24 sa.:	1,1	0,8	0,5	26,0	23,2
%	30 dk.:	-	-	-	20,0	1,6

Çizelge 3.3 : Agregaların tane boyut dağılımları.

Agrega Tipi:	Doğal Kum [0-1mm]	Kırma Kum [0-5mm]	İri Agrega [4-16mm]	GKA-1 [4-8mm]	GKA-2 [4-8mm]
Elek Çapı, mm:	Geçen, %	Geçen, %	Geçen, %	Geçen, %	Geçen, %
16	100	100	100	100	100
8	100	100	64	81	99
4	100	92	10	3	4
2	100	51	5	0	0
1	100	24	4	0	0
0,5	99	15	3	0	0
0,25	58	8	1	0	0

Genleştirilmiş kil agregalarının ilk 30 dk su emme oranları büyük bir farklılık gösterdiğinden ilk 30 dk absorbe edecekleri su hesaplanarak karışımlardan önce verilmiştir. Böylece genleştirilmiş kil agregalarının beton üretimi esnasında karıştırma müddetince karma suyunu absorbe etmesinin mümkün mertebe önüne geçilmeye çalışılmıştır.

3.2 Üretimin Aşamaları

- Tüm karışımlar 50 dm³ kapasiteli düşey ekseninde karıştırma yapan mikserde üretilmiştir.
- Kullanılan malzemelerden en önce genleştirilmiş kil agregaları miksere konulmuş ve ilk 30 dk emecekleri su miktarı hesaplanarak eklenmiştir.
- Agregaların suyu iyice emmesini sağlamak için agregalar kabaca karıştırılmış ve karışım bu haliyle 30 dk bekletilmiştir.
- 30 dk sonunda genleştirilmiş kil agregalarının eklenen suyu iyice emdiği gözlenmiştir.
- Çimento, uçucu kül ve agregalar miksere eklenerek kısa bir müddet kuru olarak karıştırılmıştır.
- Karma suyu karışıma azar azar eklenmiş ve karışıma devam edilmiştir.

- Süperakışkanlaştırıcı katkı kalan karma suyuna eklenerek karışıma azar azar ilave edilmiştir.
- İşlenebilirlik, karışımın kürek ile karıştırılıp göz ile muayene edilmesiyle ve/veya önden çökme deneyinin yapılmasıyla kontrol edilmiş ve gerekli görülen hallerde karışıma doğrudan bir miktar daha katkı ilavesi yapılmıştır.
- Lifli karışımlarda lifler bu aşamada karışıma eklenmiş ve iyice dağılana kadar karışıma devam edilmiştir.
- Karışımların taze beton birim ağırlıkları ve nihai çökme miktarları belirlenerek, kalıplara gerek şişlenerek gerekse vibrasyon tablası yardımıyla yerleştirilmiştir.
- 24 saat sonra numuneler kalıplardan çıkarılmış, kodlamaları üzerlerine yazılmış ve kür havuzuna bırakılmıştır.

3.3 Numune Boyutları ve Kodlama

Çalışma kapsamında kullanılan numunelerin boyutlandırma ve kodlama işlemleri aşağıdaki gibi yapılmıştır.

- Her bir karışımdan toplam 10 adet 10x20 cm silindir numune ve 5 adet 10x10x50 cm kiriş numune alınmıştır.
- Üretilen 1700 ve 2000 kg/m³ kuru birim ağırlıklı betonlar hafif beton olarak, 2300 kg/m³ birim ağırlıklı betona normal beton olarak isimlendirilmiştir. Hafif betonlara HB, normal betona ise NB kodu verilmiştir.
- Numunelere birim ağırlıklarına göre sınıflandırma yapmak amacıyla hafif beton numunelerine HB17 ve HB20 kodları, normal beton numunelerine NB23 kodu verilmiştir. Lif içeren hafif beton numuneleri HB17L ve HB20L olarak, normal beton numuneleri ise NB23L olarak kodlanmıştır.

3.4 Karışımların Özellikleri

Üretilen 3 farklı birim ağırlıktaki karışım serisinin agregalarının tane boyut dağılımları ve 18 farklı karışımın gerçek bileşimleri Çizelge 3.4, Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 : Karışımların granülometrisi.

Karışım Kodu	HB17/L	HB20/L	NB23/L
Elek Çapı, mm	Geçen, %	Geçen, %	Geçen, %
16	100	100	100
8	83	92	81
4	46	46	50
2	36	36	39
1	31	31	33
0,5	29	29	30
0,25	17	17	17

Çizelge 3.5 : Lifsiz karışımların özellikleri.

Karışım Kodu:	HB17			HB20			NB23		
Su/Bağlayıcı:	0,34	0,42	0,50	0,34	0,42	0,50	0,34	0,42	0,50
Çimento, kg/m ³ :	451	403	362	457	413	366	458	413	374
Uçucu kül, kg/m ³ :	100	89	80	101	92	81	102	92	83
Su, kg/m ³ :	188	207	221	190	212	224	190	212	228
Katkı, kg/m ³ :	6,0	0,8	-	3,8	0,7	-	6,5	2,4	-
Kum (0-1mm), kg/m ³ :	419	416	414	425	426	419	426	427	427
K, kum (0-5mm), kg/m ³ :	330	327	326	334	335	329	335	335	336
K,agrega (4-16mm), kg/m ³ :	131	129	129	132	133	130	895	896	897
GKA-1 (4-8mm), kg/m ³ :	180	178	178	-	-	-	-	-	-
GKA-2 (4-8mm), kg/m ³ :	-	-	-	462	464	456	-	-	-
Hava, %:	2,7	3,3	3,8	1,6	0,9	2,7	1,2	0,8	0,7
Çimento/Uçucu kül:	4,51	4,53	4,53	4,52	4,49	4,52	4,49	4,49	4,51
Agrega hacmi, %:	0,627	0,627	0,628	0,623	0,620	0,625	0,622	0,619	0,619

Çizelge 3.6 : Lifli karışımların özellikleri.

Karışım Kodu:	HB17L			HB20L			NB23L		
Su/Bağlayıcı:	0,34	0,42	0,50	0,34	0,42	0,50	0,34	0,42	0,50
Çimento, kg/m ³ :	451	408	369	455	412	372	450	410	373
Uçucu kül, kg/m ³ :	100	91	82	101	92	83	100	91	83
Su, kg/m ³ :	187	209	225	189	212	227	187	211	228
Katkı, kg/m ³ :	8,7	3,1	0,5	6,4	2,0	-	12,6	5,2	1,1
Kum (0-1mm), kg/m ³ :	419	421	422	423	425	425	419	424	426
K, kum (0-5mm), kg/m ³ :	330	331	332	333	335	334	329	333	335
K,agrega (4-16mm), kg/m ³ :	130	131	131	132	132	132	879	889	894
GKA-1 (4-8mm), kg/m ³ :	180	180	180	-	-	-	-	-	-
GKA-2 (4-8mm), kg/m ³ :	-	-	-	461	463	462	-	-	-
Hava, %:	2,8	2,1	2,0	1,8	1,1	1,3	2,9	1,5	1,0
Çimento/Uçucu kül:	4,51	4,48	4,50	4,50	4,48	4,48	4,50	4,50	4,49
Agrega hacmi, %:	0,627	0,623	0,623	0,624	0,620	0,621	0,627	0,621	0,620

Çizelge 3.5 ve 3.6’te belirtildiği üzere üretilen karışımlarda matris dayanımının etkisini gözlemlemek amacıyla tüm karışımlarda agrega hacminin %62-63 aralığında sabit tutulmasına özen gösterilmiştir.

Uçucu kül konsantrasyonunun etkisini bertaraf etmek amacıyla tüm karışımlarda çimento/uçucu kül oranı kütlege yaklaşık 4,5 oranında sabit tutulmuştur.

Karışımların hava muhtevası ise gerçek birim hacim ağırlıklarından hesap edilerek bulunmuştur.

3.5 Betonlara Uygulanan Deneyler

3.5.1 Taze beton deneyleri ve sonuçları

Üretim esnasında karışımlara çökme ve taze birim ağırlık belirleme deneyleri uygulanmıştır.

3.5.1.1 Çökme deneyi

Çökme deneyi için slump hunisi 3 seferde, her birinde 25 defa şişlenerek doldurulmuştur. Huni çekildikten sonra çöken betondan farklı noktalardan 3 adet okuma alınmış ve bu okumaların aritmetik ortalaması çökme deneyi sonucu olarak kaydedilmiştir.

3.5.1.2 Taze birim ağırlık belirleme

Taze birim ağırlık deneyi için ise karışım 10 lt hacmindeki önceden darası alınmış kaba şişlenerek ve gerektiğinde vibrasyon tablası yardımıyla sıkıştırılarak yüzey sıyrılacak şekilde tam olarak doldurulmuştur. Beton dolu kap hassas teraziyle tartılmış, bulunan değerden kabın darası düşülmüş ve elde edilen sonuç kabın hacmine bölünerek taze beton birim ağırlığı bulunmuştur.

3.5.1.3 Sonuçlar

Yapılan taze beton deneyleri ile elde edilen sonuçlar Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8’te sunulmuştur.

Çizelge 3.7 : Lifsiz karışımların taze beton deneyleri sonuçları.

Karışım Kodu:	HB17			HB20			NB23		
Su/Bağlayıcı:	0,34	0,42	0,50	0,34	0,42	0,50	0,34	0,42	0,50
Taze birim ağı., kg/m ³ :	1799	1749	1710	2101	2075	2005	2407	2375	2345
Çökme, cm:	15	15	15	18	18	17	17	17	16

Çizelge 3.8 : Lifli karışımların taze beton deneyleri sonuçları.

Karışım Kodu:	HB17L			HB20L			NB23L		
Su/Bağlayıcı:	0,34	0,42	0,50	0,34	0,42	0,50	0,34	0,42	0,50
Taze birim ağı., kg/m ³ :	1798	1772	1742	2095	2071	2033	2364	2358	2338
Çökme, cm:	17	14	14	18	14	15	15	15	15

3.5.2 Sertleşmiş beton deneyleri ve sonuçları

Betonların elastik ve mekanik özelliklerini incelemek üzere alınmış 10 adet 100x200 mm silindir ve 5 adet 100x100x500 mm kırış numuneler üzerinde deneyler uygulanmıştır. Tüm numunelere deney gününe kadar 21 °C'lik kirece doymun su kürü uygulanmıştır. Deney günü numuneler sudan çıkarılmış, dış yüzeyi silinerek tamamen kurutulmuş ve deneyler numunelere bu şekilde uygulanmıştır.

3.5.2.1 Kuru birim ağırlık belirleme

Bu doğrultuda her bir karışımdan alınan silindir numuneler 28 günlükken sabit ağırlığa gelinceye kadar –yaklaşık 96 saat– 60 °C'lik etüvde kurutulmuştur. Kurutulmuş numuneler elektronik tartıda tartılarak ağırlıkları belirlenmiştir. Daha sonra aynı numuneler su içindeyken tartılmış ve böylece hacimleri bulunmuştur. Ardından numunelerin kuru ağırlıklarının hacimlerine bölünmesiyle kuru birim ağırlıkları tespit edilmiştir.

3.5.2.2 Basınç dayanımı ve elastik modül belirleme

28 ve 120 günlük silindir numuneler üzerine basınç dayanımı ve elastik modül belirleme deneyleri uygulanmıştır. Basınç dayanımlarını belirlemek üzere silindir numunelere 300 ton kapasiteli pres cihazında dayanım sınıflarına göre değişkenlik göstermek suretiyle 2-4 kN/s arasında olacak şekilde seçilen yükleme hızıyla yük uygulanmış ve numunelerin basınç dayanımları belirlenmiştir.

Elastik modül deneyi için ise numunelere düşey deformasyon okuması yapılabilmesi için uygun bir çerçeve düzeneği yerleştirilmiştir. Maksimum basınç dayanımının 1/3'üne kadar yük uygulanmış ve düşey yönde deformasyon okumaları yapılarak gerilme – şekil değiştirme grafiği çizilmiştir. Elde edilen grafiğin doğrusal kısmının eğiminden ise elastik modül değerleri saptanmıştır.

3.5.2.3 Poisson oranı belirleme

28 günlük numuneler üzerinde Poisson oranı belirleme deneyi yapılmıştır. Numuneler üzerinde yatay yönde deformasyon okuması yapılabilmesi için uygun bir düzenek yerleştirilmiş, düzeneğe ise LVDT cihazı bağlanmıştır. Deney, 100 kN maksimum yük kapasiteli Instron 5500 R kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney cihazında gerçekleştirilmiş, numunelerin basınç dayanımının 1/3'ü yüküne kadarki yatay

yöndeki deformasyon okumaları alınmış ve bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Elastik modül belirleme deneyinden elde edilen gerilme – şekil değiştirme grafiğindeki deformasyon değerleri de hesapta kullanılarak numunelerin Poisson oranları belirlenmiştir.

3.5.2.4 Yarmada çekme dayanımı belirleme

120 günlük numuneler üzerinde yarmada çekme dayanımı tespiti için deney yapılmıştır. Deney, kiriş numunelerin uç kısımlarının kesilmesiyle elde edilen 100x100x100 mm küplere uygulanmıştır. Numunelerin alt ve üst kısmına çita konulmuş ve 0,5 kN/s yükleme hızıyla yük uygulanmıştır. Yarmada çekme dayanımı (3.1) formül yardımıyla bulunmuştur.

$$F_{çekme} = \frac{2*P}{\pi*D*L} \quad (3.1)$$

Bu denklemde;

$F_{çekme}$; yarmada çekme dayanımını,

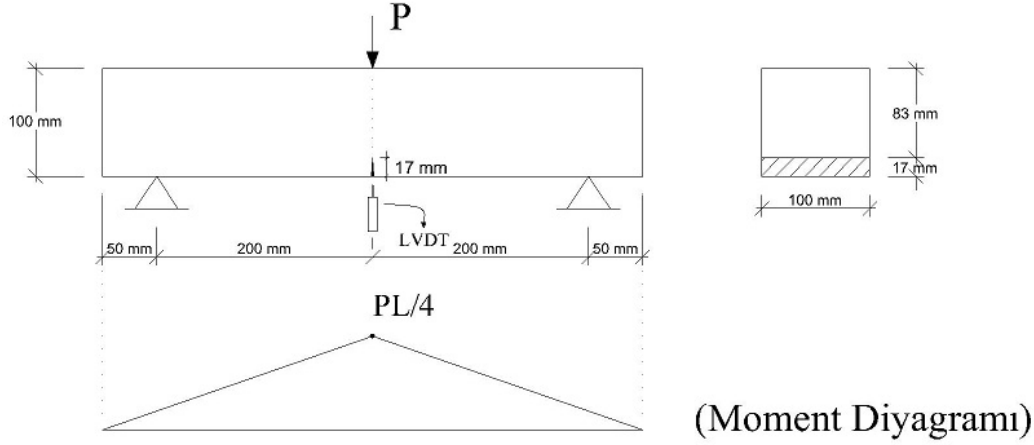
P ; kırılmaya neden olan yükü,

D ; numunenin kırılma enkesitinin yüksekliğini,

L ; numunenin boyunu temsil etmektedir.

3.5.2.5 Eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi belirleme

120 günlük kiriş numunelere üç noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Bu deney yardımıyla numunelerin eğilme dayanımları ve kırılma enerjileri tespit edilmiştir. Bu deney için 100 kN maksimum yük kapasiteli Instron 5500 R kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney cihazı kullanılmıştır. Kiriş numunelerine, numunelerin tam orta noktasından elmas uçlu testere ile numune yüksekliğinin 1/6'sına denk gelen şekilde 17 mm'lik çatlaklar açılmıştır. Böylece yüke maruz kalan enkesit 83*100 mm² olmuştur. Numuneler deney cihazına Şekil 3.1'de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Numunelere başlangıçta 0,01 mm/dk yükleme hızıyla yük uygulanmıştır. Yükleme hızı, sistem tarafından anlık olarak çizilen yük – sehim grafiği inişe geçtikten sonra kademeli olarak 1 mm/dk hızına kadar artırılmıştır. Düşey yöndeki deformasyon (sehim) ve çatlak ağzı açılma deplasman okumaları, deney düzeneyine bağlanan 2 adet LVDT cihazıyla bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Kaydedilen data daha sonra işlenmiş ve nihai yük – sehim grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 3.1 : Üç noktalı eğilme deneyi düzeneği.

Numunelerin eğilme dayanımı, denklem (3.2) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\sigma_e = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{\frac{P \cdot L}{4} \cdot \frac{d}{2}}{\frac{b \cdot d^3}{12}} = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2} \quad (3.2)$$

Bu denklemde;

σ_e ; eğilme dayanımını,

M ; maksimum momenti,

c ; tarafsız eksen ile kiriş yüksekliğinin en uç noktası arasındaki uzaklığı,

I ; atalet momentini temsil etmektedir.

Şekil 3.1’de gösterilmiş deney düzeneği üzerinden hareketle ifade edecek olursak;

$\frac{P \cdot L}{4}$; maksimum moment,

c ; numune yüksekliğinin yarısı,

$\frac{b \cdot d^3}{12}$; ise dikdörtgen kesitler için atalet momenti olarak alınmıştır.

İfadeleri denklemde yerine koymak üzere;

P ; kırılma esnasındaki maksimum yükü,

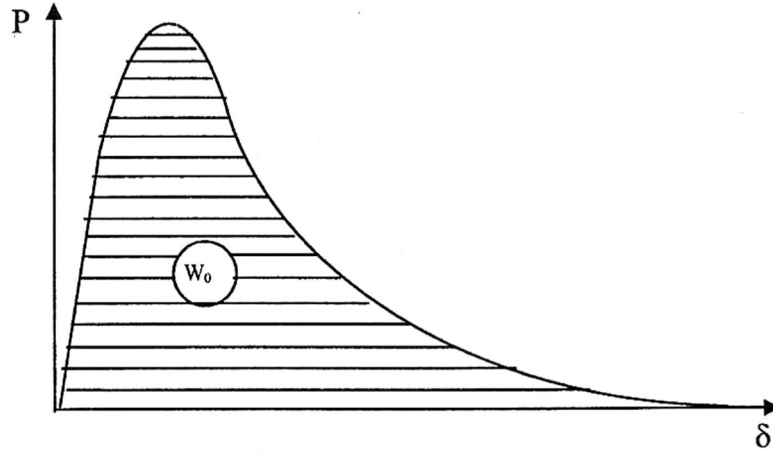
L ; mesnetler arası uzaklığı,

d ; numune yüksekliğini,

b ; numune genişliğini temsil etmektedir.

Kırılma enerjisinin hesaplanması için, numunelerin yük – sehim eğrisinin altında kalan alanın hesaplanması gerekmektedir. Bu alan, RILEM-50 FMC’nin önerilerine uygun olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.2’de yük – sehim eğrisi altında kalan alan sembolik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Yük – sehim eğrisi altında kalan alan.

Numunelerin kırılma enerjisi, RILEM-50 FMC’nin önerisi doğrultusunda denklem (3.3) ile hesaplanmıştır.

$$G_F = \frac{w_0 + m \cdot g \cdot d_0}{A_{eka}} \quad (3.3)$$

Bu denklemde;

G_F ; kırılma enerjisini,

w_0 ; yük – sehim eğrisi altında kalan alanı,

m ; kirişin mesnetler arasında kalan kısmının ağırlığını,

g ; yerçekimi ivmesini,

d_0 ; kirişin göçme esnasındaki sehimini,

A_{eka} ; yükün uygulandığı etkin kesit alanını temsil etmektedir.

3.5.2.6 Sonuçlar

Sertleşmiş beton deneylerinden elde edilen sonuçlar, Çizelge 3.9, Çizelge 3.10, Çizelge 3.11 ve Çizelge 3.12’de sunulmuştur.

Çizelge 3.9 : Lifsiz betonların 28 günlük deney sonuçları.

Karışım Kodu:	HB17			HB20			NB23		
Su/Bağlayıcı:	0,34	0,42	0,50	0,34	0,42	0,50	0,34	0,42	0,50
Kuru br ağı., kg/m ³ :	1750	1661	1638	2044	1975	1945	2352	2310	2273
Basınç D., MPa:	29,7	22,7	22,0	61,0	50,4	44,9	55,1	48,2	43,3
Elastik M., GPa:	19,09	16,68	14,01	28,35	25,35	22,58	35,43	34,35	29,65
Poisson Oranı:	0,20	0,19	0,18	0,22	0,22	0,22	0,21	0,20	0,20

Çizelge 3.10 : Lifsiz betonların 120 günlük deney sonuçları.

Karışım Kodu:	HB17			HB20			NB23		
Su/Bağlayıcı:	0,34	0,42	0,50	0,34	0,42	0,50	0,34	0,42	0,50
Basınç D., MPa:	30,9	27,2	23,7	67,5	56,9	52,0	74,4	62,5	60,6
Elastik M., GPa:	22,09	21,08	17,17	27,94	26,29	26,71	39,70	39,06	35,94
Y.Çekme D., MPa:	3,32	2,63	2,49	4,48	4,29	3,88	6,49	5,74	5,56
Eğilme D., MPa:	4,23	3,52	3,17	4,83	4,76	4,32	6,52	5,66	5,54
Kırılma E.,Nm/m ² :	59	49	55	59	73	75	157	143	156

Çizelge 3.11 : Lifli betonların 28 günlük deney sonuçları.

Karışım Kodu:	HB17L			HB20L			NB23L		
Su/Bağlayıcı:	0,34	0,42	0,50	0,34	0,42	0,50	0,34	0,42	0,50
Kuru br ağı., kg/m ³ :	1710	1663	1605	1986	1951	1919	2363	2317	2298
Basınç D., MPa:	25,7	21,8	21,3	56,4	46,3	36,3	68,0	50,5	43,5
Elastik M., GPa:	14,44	15,56	15,51	23,51	23,07	21,43	33,66	30,06	29,90
Poisson Oranı:	0,20	0,20	0,21	0,20	0,20	0,18	0,20	0,18	0,18

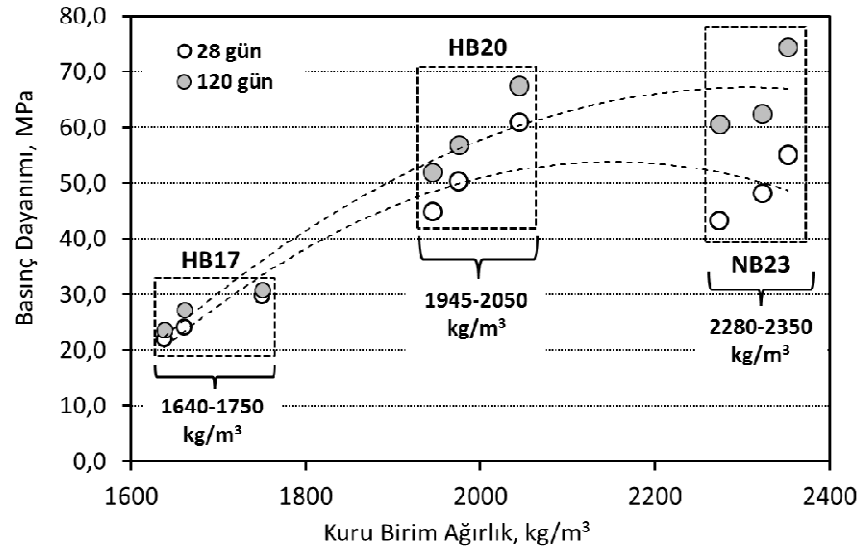
Çizelge 3.12 : Lifli betonların 120 günlük deney sonuçları.

Karışım Kodu:	HB17L			HB20L			NB23L		
Su/Bağlayıcı:	0,34	0,42	0,50	0,34	0,42	0,50	0,34	0,42	0,50
Basınç D., MPa:	29,2	26,5	24,6	64,2	54,6	46,6	81,6	65,8	54,7
Elastik M., GPa:	18,10	16,55	16,03	26,28	28,75	23,59	36,95	34,81	34,03
Y.Çekme D., MPa:	3,27	2,85	2,60	4,62	4,28	4,16	6,44	5,75	4,93
Eğilme D., MPa:	3,60	3,39	3,20	4,47	4,28	4,11	6,30	5,41	5,06
Kırılma E.,Nm/m ² :	424	532	615	500	672	660	551	597	847

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Basınç Dayanımı – Kuru Birim Ağırlık İlişkisi

HB17, HB20 ve NB23 betonlarının 28 ve 120 günlük basınç dayanımlarıyla kuru birim ağırlıkları arasındaki ilişki Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Lifsiz beton basınç dayanımı – kuru birim ağırlık ilişkisi.

Su/bağlayıcı oranlarına bağlı olarak, HB17 betonu için 24 ila 31 MPa arasında, HB20 betonu için 52 ila 68 MPa arasında ve NB23 betonu için 61 ila 75 MPa arasında basınç dayanımı sonuçları elde edilmiştir.

HB17, HB20 ve NB23 karışımlarında kullanılan agregaların özelliklerinin tamamen farklı olmasıyla birlikte tüm betonlar için geçerli olmak üzere, betonun kuru birim ağırlığı arttıkça basınç dayanımının arttığı gözlenmiştir. Özellikle HB17 ve HB20 betonlarının 28 ve 120 günlük basınç dayanımı sonuçları arasındaki fark dikkate değerdir. Bu sonuç, iki farklı genleştirilmiş kil agregasının dayanım performanslarının farklılığıyla açıklanabilir.

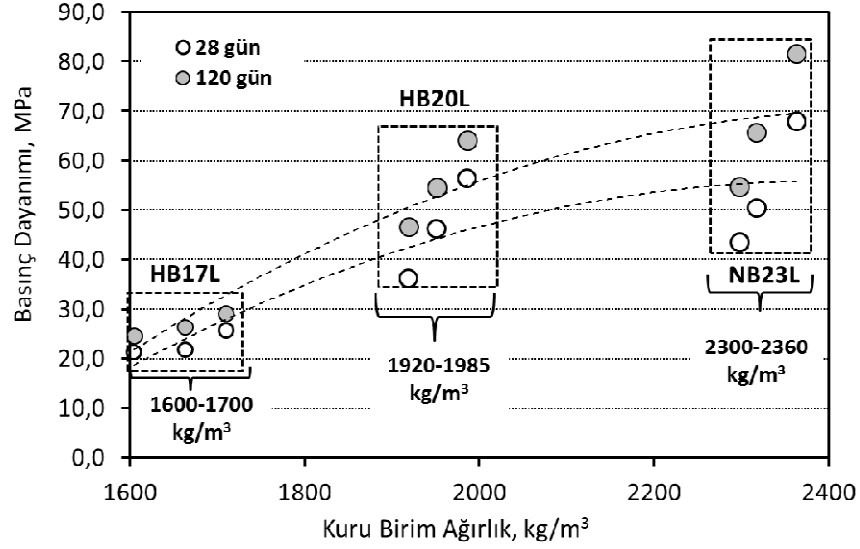
Aynı su/bağlayıcı oranı için, HB17, HB20 ve NB23 karışımları arasındaki tek farklılık agregaların farklılığıdır. Bununla birlikte HB20 ve NB23 betonlarının basınç dayanımları açısından birbirine yakın performanslar gösterdiği görülmektedir. 28 günlük basınç dayanımları dikkate alındığında, genleştirilmiş kil agregalı HB20 betonunun, kireçtaşı agregalı NB23 betonuna göre 0,34 su/bağlayıcı oranlı karışımda %10,7, 0,42 su/bağlayıcı oranlı karışımda %4,6 ve 0,50 su/bağlayıcı oranlı karışımda ise %3,6 olmak üzere daha yüksek dayanım sonuçları verdiği tespit edilmiştir. Bu sonuçla, 2. tip genleştirilmiş kil agregasının (GKA-2), dayanım özellikleri bakımından yeterli düzeyde olduğu söylenebilir.

28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, HB20 ve NB23 betonları arasında en yüksek fark, 0,34 su/bağlayıcı oranlı karışımda, en düşük fark ise 0,50 su/bağlayıcı oranlı karışımda görülmüştür. Çizelge 3.1’de görüleceği üzere, GKA-2 agregasının yüksek su emme kapasitesi vardır. Agregalarının bu özelliğinin, HB20 betonunun iç yapısında daha iyi bir kür ortamı oluşturmuş olması ve bu sayede iyileşen çimento hamuru – agrega arayüzü ile belirtilen farkların oluşmuş olması muhtemeldir.

Bununla birlikte 120 günlük dayanım sonuçları incelendiğinde, NB23 betonunun HB20 betonuna göre daha yüksek sonuçlar verdiği görülmektedir. NB23 betonu, HB20 betonuna göre 0,34 su/bağlayıcı karışımda %10,2, 0,42 su/bağlayıcı karışımda %9,8 ve 0,50 su/bağlayıcı karışımda %16,5 olmak üzere daha yüksek basınç dayanım değerleri vermiştir. Bu durum, zaman geçtikçe hidrasyonun etkisiyle çimento matrisinin güçlenmesi sonucu betonun dayanımında agrega özelliklerinin ön plana çıkmasıyla açıklanabilir. Fiziksel özellikler itibarıyla kireçtaşı agregasına nazaran daha zayıf olan GKA-2 agregalarını içeren HB20 betonunun dayanım gelişiminin NB23 betonuna göre sınırlı kaldığı söylenebilir.

Fiziksel özellikleri bakımından GKA-2 ve kireçtaşı agregalarından daha zayıf olan GKA-1 agregasını içeren HB17 betonları ise gerek 28 günlük, gerekse 120 günlük basınç dayanımı sonuçları göz önüne alındığında daha düşük sonuçlar vermiştir. Betonda basınç dayanımının gelişiminde agregaların kalitesi böylece ön plana çıkmaktadır.

HB17L, HB20L ve NB23L betonlarının 28 ve 120 günlük basınç dayanımlarıyla kuru birim ağırlıkları arasındaki ilişki Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Lifli beton basınç dayanımı – kuru birim ağırlık ilişkisi.

Su/bağlayıcı oranlarına bağlı olarak, HB17L betonu için 21 ila 29 MPa arasında, HB20L betonu için 36 ila 64 MPa arasında ve NB23L betonu için 44 ila 82 MPa arasında basınç dayanımı sonuçları elde edilmiştir. Lifsiz karışımlara benzer olarak, lifli karışımlarda da betonun kuru birim ağırlığı arttıkça basınç dayanımının da arttığı görülmüştür.

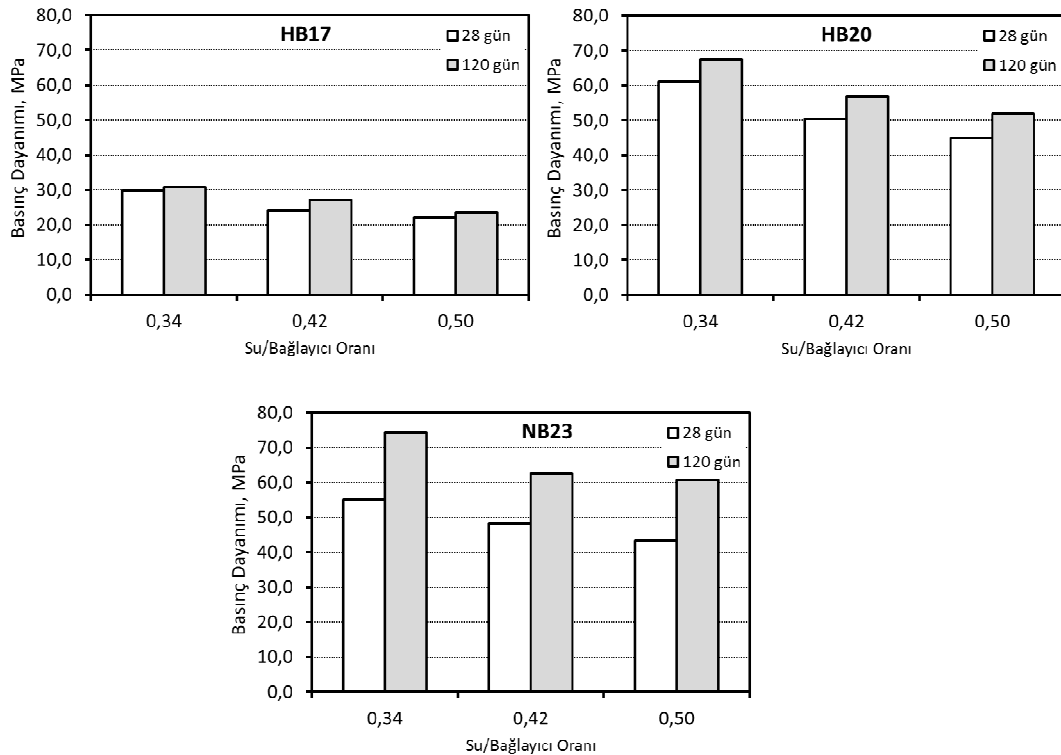
HB17L betonunun 28 ve 120 günlük basınç dayanımları, HB17 betonunun 28 ve 120 günlük basınç dayanımları ile kıyaslandığında ortalama %10 daha düşük çıkmıştır. Bu sonuç, bu karışıma eklenen lif ile karışımın işlenebilirlik özelliğinin düşük olmasının etkisiyle kalıplara yerleştirmedeki zorluklar göz önüne alındığında betonda bulunan olası yerleştirme boşluklarının betonun boşluk yapısına olumsuz yönde etkideği ve dayanımı düşürdüğü şeklinde yorumlanabilir.

HB20L karışımlarında, 28 günden 120 güne geçişte basınç dayanımları, HB20 betonuna göre daha yüksek yüzdelere artış göstermiştir. 0,34 su/bağlayıcı oranlı HB20 betonunda 28 günlük betondaki basınç dayanımı değerine göre 120 günlük betondaki basınç dayanımı artışı %10,7 olurken, HB20L betonunda %11,6, 0,42 su/bağlayıcı oranlı HB20 betonunda basınç dayanımı artışı %12,8 iken, HB20L betonunda %14,6 ve 0,50 su/bağlayıcı oranlı HB20 betonunda basınç dayanımı artışı %15,8 iken, HB20L betonunda %19,8 olmuştur. Bu noktada, genişletilmiş kil agregasının yüksek derecede su emmesine ve hidrasyon sırasında buna bağlı olarak iç yapıda daha iyi kür şartları oluşturmasıyla güçlenen çimento matrisinin yanısıra, bu

durumun çimento matrisi ile PVA lif arasındaki aderansı artırdığı ve PVA lifin gerilmeleri daha iyi dağıtarak çatlak ilerlemelerini kontrol altında tutmak suretiyle basınç dayanımının artmasına olumlu yönde katkı verdiği söylenebilir. NB23L betonunun 28 ve 120 günlük basınç dayanım sonuçları dikkate alındığında, HB20 ve HB20L betonlarının aksine, 28 günden 120 güne geçişte su/bağlayıcı oranı arttıkça dayanım artış eğiminin azaldığı görülmüştür. Örneğin, 0,50 su/bağlayıcı oranına sahip NB23 betonunun 28 günlük basınç dayanımı 43,3 MPa iken 120 günlük basınç dayanımı 60,6 MPa olmuştur. NB23L betonunda ise 28 günlük basınç dayanımı 43,5 MPa ile lifsiz karışımla aynı seviyede iken 120 günlük dayanımı 54,7 MPa olmuştur. Bu sonuçla, eklenen PVA lifin betonun su/bağlayıcı oranı arttıkça artan boşluk yapısına, oluşturduğu ilave süreksizliklerle olumsuz olarak etkidiği ve dayanım artışını sınırladığı görülmektedir.

4.2 Basınç Dayanımı – Kür Süresi İlişkisi

Şekil 4.3'te, su/bağlayıcı oranı ile kür süresinin basınç dayanımları üzerindeki etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : Kür şartlarının numuneler üzerindeki etkisi.

Şekil 4.3 incelendiğinde, tüm karışımlarda kür süresinin 28 günden 120 güne çıkmasıyla basınç dayanımlarında önemli artışlar gözükmektedir. HB17 betonu fiziksel özellik itibarıyla en zayıf agregaya, HB20 betonu orta derece agregaya, NB23 ise en güçlü agrega sahip karışımlardır.

28 gün ile 120 gün arasındaki basınç dayanım farklarının, agregaların fiziksel özelliklerine, iç yapıdaki kür şartlarına ve karışımlara eklenen mineral katkı malzemesine bağlı olduğu düşünülebilir.

4.3 Elastik Özelliklerin İncelenmesi ve Tahmin Modelleri

Betonların elastik modüllerinin tahmin ve tespit edilmesi, yapısal analiz ve dizayn anlamında büyük önem taşımaktadır. Betonların elastik davranışlarının, içerdikleri agregalarının yapısıyla ilişkili olduğu bilinmektedir.

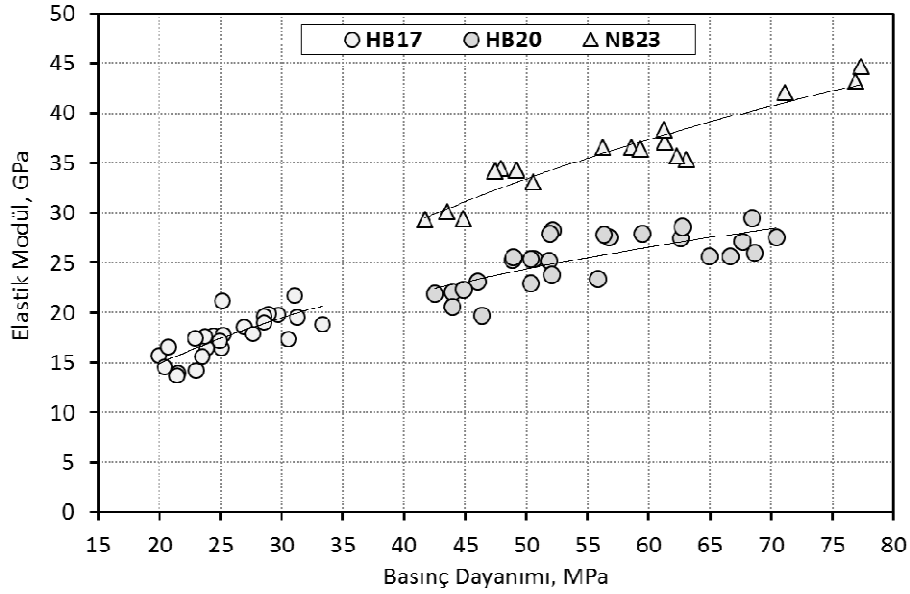
Çizelge 4.1 : Betonların elastik modülleri için tahmin modelleri.

Model Standardı	Tahmin Modeli [MPa]
ACI 318 (2008)	$E_c = 0.043 \cdot w_c^{1,5} \sqrt{f'_c}$
ACI 363 (1992)	$E_c = \left(3320 \sqrt{f'_c} + 6900 \right) \cdot \left(\frac{w_c}{2320} \right)^{1,5}$
TS 500 (2000)	$E_c = 3250 \sqrt{f'_c} + 14000$
CEB-FIB (1990)	$E_c = 21,500 \cdot \alpha \cdot [f'_c/10]^{1/3} *$

(* α =bazalt ve yüksek yoğunluklu kireçtaşı agregaları için 1,2, normal kireçtaşı agregası için 0,9 ve kumtaşı agregası için 0,7 alınması önerilmiştir.)

Çizelge 4.1’de, bazı modeller verilmiştir [29, 43, 44, 45]. Bu çalışma kapsamında hafif ve normal betonların elastik modülleri, bu modellerden elde edilen elastik modül verileriyle kıyaslanacak ve eldeki verilere göre yeni bir model önerilmiştir.

Hafif betonlar ile normal betonun basınç dayanımı – elastik modül ilişkisi Şekil 4.4’te verilmiştir. Genel bir sonuç olarak, betonların basınç dayanımı arttıkça elastik modülleri de artmaktadır. Özellikle HB20 ve NB23 betonları incelendiğinde, 40 ila 70 MPa basınç dayanımı aralığındaki betonlardan NB23 karışımının elastik modül değerlerinin önemli ölçüde yüksek çıktığı görülmektedir. HB20 karışımında kullanılan genleştirilmiş kil agregasına göre NB23 karışımında kullanılan kireçtaşı agregasının daha rijit olması neticesinde, elastik modül arasındaki farklılığın doğduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 4.4 : Normal betonların basınç dayanımı – elastik modül ilişkisi.

Elastik modül tahmin modellerinde yalnızca basınç dayanımını kapsayan formüller geliştirmek doğru bir yaklaşım olmamaktadır. Daha gerçekçi bir model tahmini için agrega tipine göre bazı faktörlerin kullanılması ve sertleşmiş betonun birim ağırlığının da tahmin modeline eklenmesi gerekmektedir.

Şekil 4.5'te çeşitli tahmin modelleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu tahmin modellerinden ACI 318, ACI 363 ve CEB-FIB modelleri, betonun birim ağırlığını ve kullanılan agrega tipine bağlı bir faktörü modelin formülüne eklemiştir.

Şekil 4.5'ten görüldüğü üzere tahmin modelleri, bu çalışmadaki deney sonuçlarıyla kabul edilebilir ölçüde uyum göstermektedir.

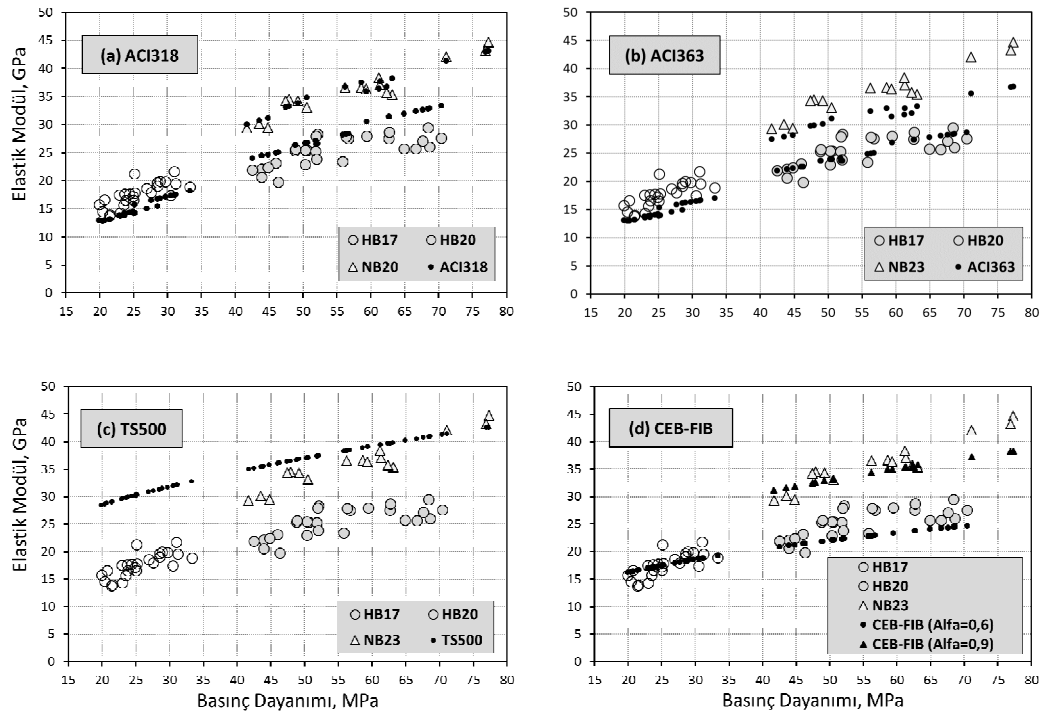
Modellerin tahminleri incelenecek olursa, ACI 318 modeli ile $\alpha=0,9$ için CEB-FIB modeli, NB23 betonunun elastik modül değerlerini iyi düzeyde tahmin ettiği görülmektedir. CEB-FIB modelinin, 70 – 80 MPa gibi yüksek basınç dayanımı seviyelerinde elastik modül değerlerini deney sonuçlarından daha düşük olarak tahmin ettiği görülmektedir. Diğer taraftan ACI 363 modelinin, 40 – 80 MPa aralığındaki normal betonun elastik modül değerlerini korunumlu bir yaklaşımla daha düşük olarak tahmin ettiği görülmektedir.

Yalnızca basınç dayanımı değerleriyle tahmin yapan TS 500 modeli, normal betonun elastik modül değerlerini yüksek tahmin etmiştir. Geleneksel betonlara göre oluşturulmuş, betonun birim ağırlığını model formülde kullanmayan TS 500 tahmin

modelinin, hafif agregalı betonların elastik modül tahmininde kullanılmasının doğru bir yaklaşım olmadığı aşikardır.

HB17 betonuyla alakalı deney sonuçlarına bakıldığında, ACI 318 ve ACI 363 modelleri, elastik modül değerlerini daha düşük olarak tahmin etmiştir. Bu beton için, $\alpha=0,6$ için CEB-FIB modelinin ise elastik modül değerlerini iyi oranda tahmin ettiği görülmektedir.

HB20 betonuyla alakalı verilere bakıldığında ise, modeller içerisinde ACI 363 modelinin diğerlerine göre daha iyi bir yaklaşımda bulunduğu söylenebilir. HB20 betonunun elastik modül değerlerini ACI 318 modeli daha yüksek olarak, $\alpha=0,6$ için CEB-FIB modeli ise daha düşük olarak tahmin etmiştir.



Şekil 4.5 : Bazı tahmin modellerinin karşılaştırılması.

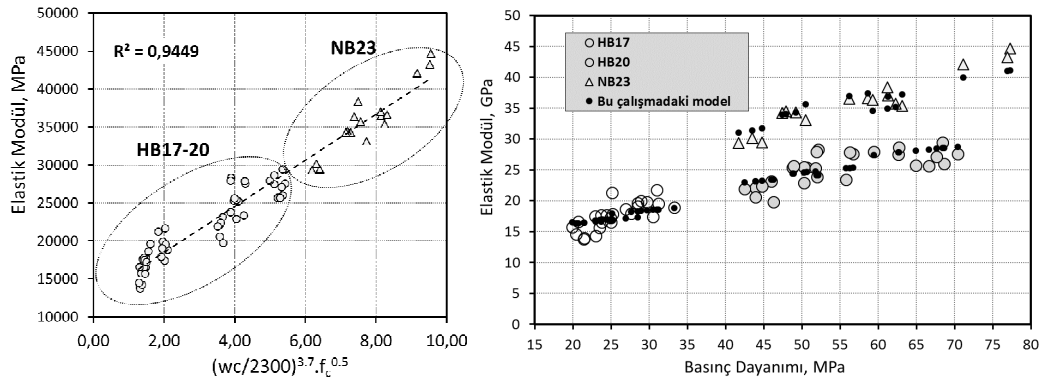
Hafif ve normal agregalı betonlar için, betonun birim ağırlığını ve agrega tipini de kapsayacak şekilde yeni bir model tahmini için çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışmalar doğrultusunda, betonun birim ağırlığının, betonun elastik modülüne etkisi olması doğrultusunda tahmin modeline bu faktör $(w_c/2300)^m$ olarak yansıtılmıştır. w_c , betonun kg/m^3 cinsinden birim ağırlığı ve m , üstel fonksiyon olmak üzere, denklem (4.1)'deki tahmin formülü türetilmiştir.

$$EM = A * (f'_c)^n * \left(\frac{w_c}{2300}\right)^m + B \quad (4.1)$$

Bu tahmin modeli, en yüksek korelasyonu verecek şekilde analiz edilmiş ve en yüksek korelasyon $m = 3,70$ ve $n = 0,5$ değerlerinde elde edilmiştir. Böylelikle, hafif ve normal agregalı betonların elastik modül değerleri için tahmin modeli denklem (4.2)'de gösterildiği gibi oluşturulmuştur.

$$EM = 3000 * (f'_c)^{0,5} * \left(\frac{w_c}{2300}\right)^{3,7} + 12500 \quad (4.2)$$



Şekil 4.6 : Oluşturulan modelin sonuçları ve karşılaştırılması.

Başka bir tahmin modeli ise, CEB-FIB modelinin bazı parametrelerinin değiştirilip düzenlenmesiyle elde edilmiştir.

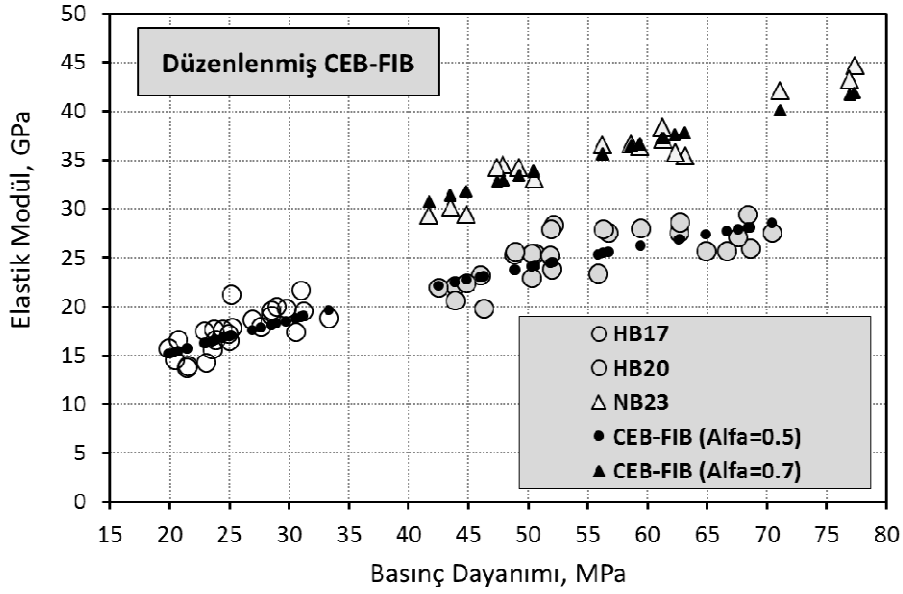
Modeldeki α agrega faktörü, normalde 0,9 olarak alınması tavsiye edilen kireçtaşı agregası için 0,7 olarak, normalde 0,7 olarak alınması önerilen genişletilmiş kil agregası için 0,5 olarak seçilmiş, orjinal formüldeki küpkök faktörü karekök olarak değiştirilmiştir.

Bu haliyle düzenlenmiş olan CEB-FIB modelinden elde edilen değerlere bakıldığında deney sonuçlarıyla çok daha uyumlu tahmin verileri elde edildiği görülmüştür.

Düzenlenen tahmin modeli denklem (4.3)'te görüldüğü gibidir.

$$E_c = 21,500. \alpha. [f'_c/10]^{1/2} \quad (4.3)$$

Şekil 4.7'de bu düzenlenmiş CEB-FIB modeli ile deney sonuçlarından elde edilen elastik modül değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.7 : Düzenlenmiş CEB-FIB modeli.

Poisson oranı sonuçları incelendiğinde ise hafif agregalı betonlar ile normal agregalı betonlar arasında belirgin bir fark görülmemiştir. Tüm karışımların Poisson oranları 0,19 ila 0,22 arasında kalmıştır. Hafif agregalı betonlar ile normal betonun ortalama Poisson oranı değeri ise 0,21 olarak birbiriyle aynı bulunmuştur.

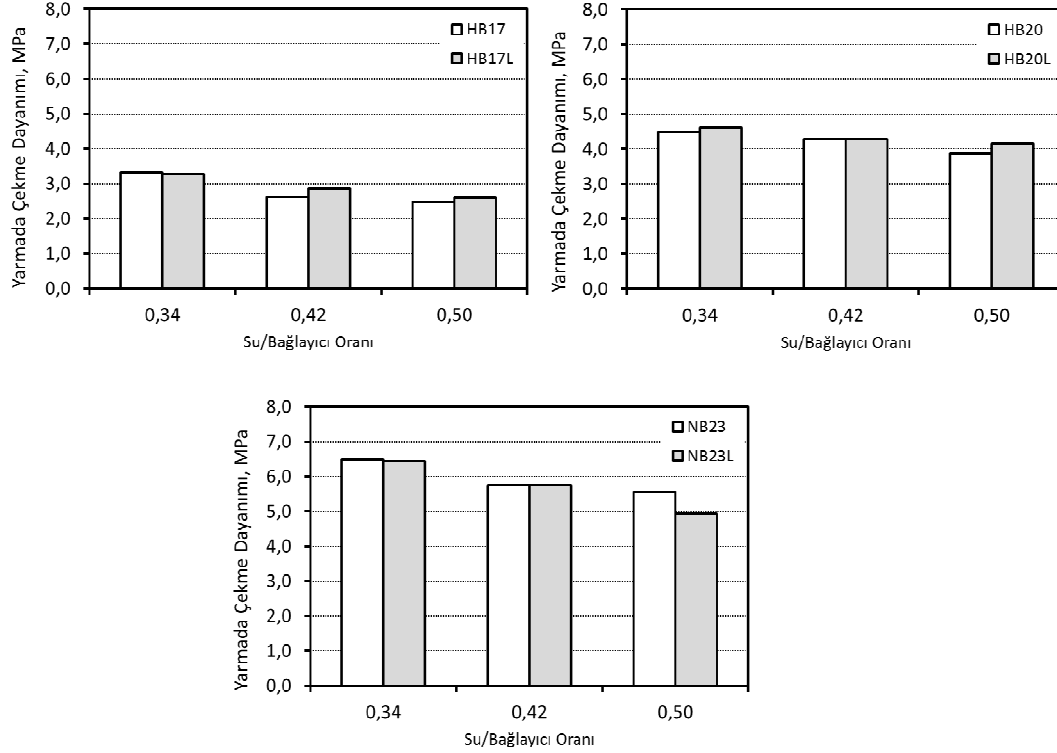
4.4 Eğilme Dayanımı ve Kırılma Özelliklerinin İncelenmesi

Lifsiz ve lifli karışımlardan alınan kiriş numuneler üzerinde yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi deneyleri uygulanmıştır. Bu deneyler ile liflerin beton özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yarmada çekme dayanımı deneyi, kiriş numunelerin uç kısımlarının kesilmesiyle elde edilen 100x100x100 mm'lik küpler ile gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.8'de karışımların yarmada çekme dayanımları verilmiştir. HB17 ve HB17L betonlarının yarmada çekme dayanım sonuçlarına bakacak olursak, aynı su/bağlayıcı oranına sahip lifli ve lifsiz karışımlarda sonuçların birbirine yakın olduğu görülmektedir. 0,34 su/bağlayıcı oranlı lifsiz karışımın yarmada çekme dayanımı lifli karışımla hemen hemen aynı olduğu saptanmıştır. 0,42 ve 0,50 su/bağlayıcı oranlı karışımlarda ise lifli karışımın dayanımı lifsiz karışımdan sırasıyla %8,4 ve %4,4 oranında daha yüksek çıkmıştır.

HB20 ve HB20L betonlarının deney sonuçları incelendiğinde ise elde edilen sonuç benzerdir. 0,42 su/bağlayıcı oranına sahip lifli ve lifsiz karışımın yarmada çekme

dayanımları birbirine eşit olup, 0,34 ve 0,50 su/bağlayıcı oranlı karışımlarda lifli karışımın dayanım sonuçları sırasıyla %3,1 ve %7,2 oranında daha yüksek çıkmıştır. HB17 ve HB17L betonlarıyla kıyaslandığında ise HB20 ve HB20L betonlarının yarmada çekme dayanım sonuçlarının ortalama %35 ila %60 oranında daha yüksek çıktığı saptanmıştır.



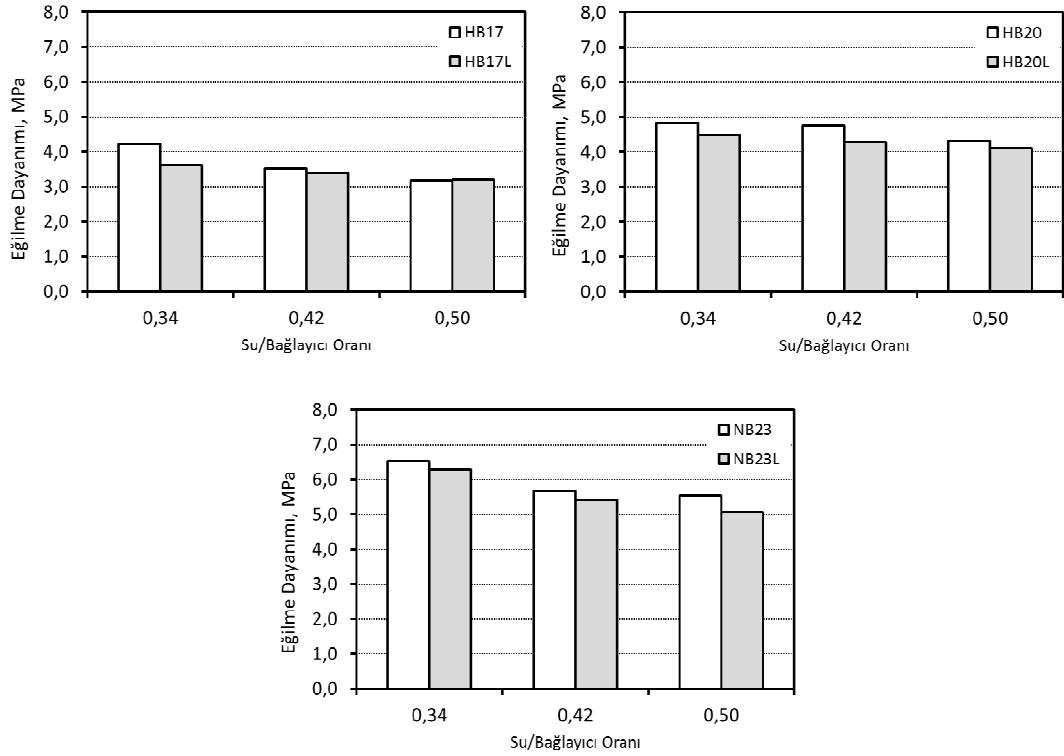
Şekil 4.8 : Betonların yarmada çekme dayanımları.

NB23 ve NB23L betonunun dayanım sonuçları incelendiğinde ise 0,34 ve 0,42 su/bağlayıcı oranına sahip lifli ve lifsiz karışımların birbiriyle aynı mertebede sonuçlar verdiği görülmektedir. 0,50 su/bağlayıcı oranlı karışıma bakıldığında ise lifsiz karışımın çekme dayanımının lifli karışımdan %12,8 oranında daha yüksek olduğu görülmektedir. Lif içeren karışımdaki liflerin betonun iç yapısında yarattığı süreksizliklere bağlı olarak bu performans kaybının yaşanmış olduğu yorumu yapılabilir.

HB17 – HB17L ve HB20 – HB20L betonlarıyla kıyaslandığında ise HB23 ve HB23L betonlarının yarmada çekme dayanım sonuçlarının HB17 karışım serisine göre ortalama % 90 – 120 oranında ve HB20 karışım serisine göre ortalama % 20 – 45 oranında daha yüksek çıktığı saptanmıştır. Bu sonuçlarla agregaların fiziksel

özelliklerinin etkisi bir kez daha izlenmiştir. Yarmada çekme dayanımlarının, beton yoğunluğu arttıkça ve su/bağlayıcı oranı azaldıkça arttığı izlenmiştir.

Betonların eğilme dayanımları ve kırılma enerjileri ise 100x100x500 mm’lik kirişlere uygulanan üç noktalı eğilme deneyi ile belirlenmiştir. Şekil 4.9’da betonların eğilme dayanımları verilmiştir.



Şekil 4.9 : Hafif ve normal betonların eğilme dayanımları.

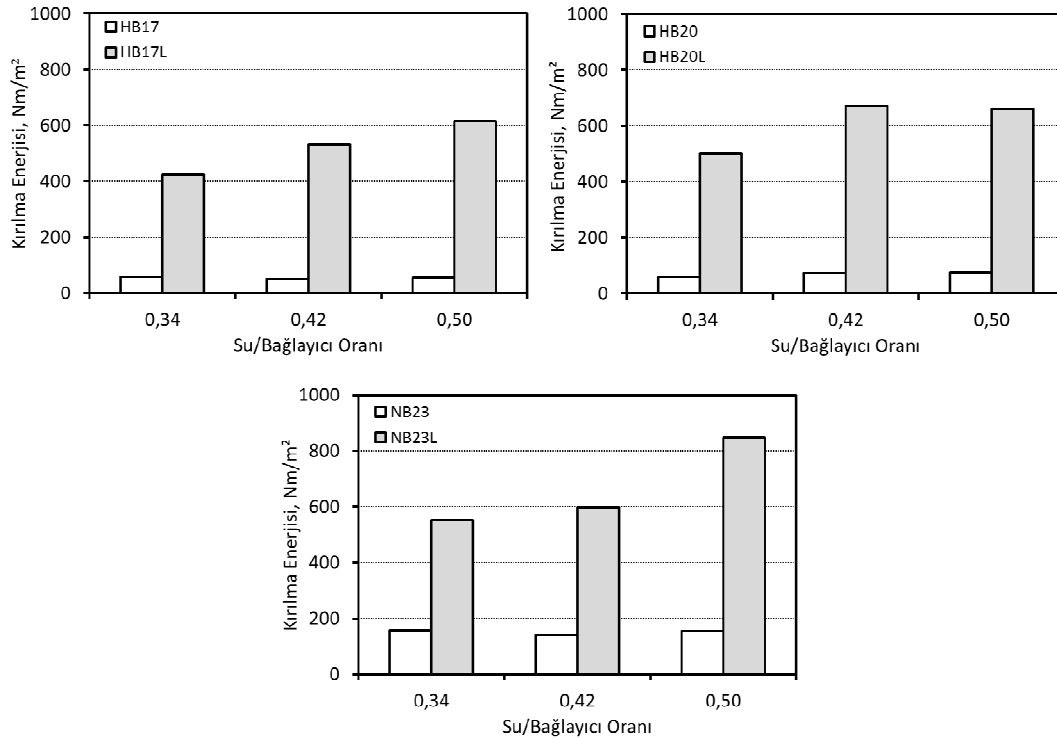
HB17 ve HB17L betonlarının eğilme dayanımlarına bakıldığında, 0,34 ve 0,42 su/bağlayıcı oranlı lifsiz karışımların eğilme dayanımlarının, lifli karışımlara göre sırasıyla %17,5 ve %3,8 oranında daha yüksek çıktığı saptanmıştır. 0,50 su/bağlayıcı oranlı karışımda ise lifli karışımın eğilme dayanımıyla lifsiz karışımın eğilme dayanımının hemen hemen eşit olduğu görülmüştür.

HB20 ve HB20L betonlarının eğilme dayanımları incelendiğinde, tüm su/bağlayıcı oranlı karışımlar için lifsiz karışımların lifli karışımlardan daha yüksek dayanım değerleri sağladığı bulunmuştur. 0,34, 0,42 ve 0,50 su/bağlayıcı oranlı lifsiz karışımların eğilme dayanımları, lifli karışımlara göre sırasıyla %8,1, %11,2 ve %5,1 daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir. HB20 ve HB20L betonlarının, HB17 ve HB17L betonlarından ortalama %14 ila %36 arasında daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu saptanmıştır.

NB23 ve NB23L betonları göz önüne alındığında ise en yüksek eğilme dayanımı bu betonlarda elde edilmiştir. HB20 ve HB20L betonlarına benzer olarak, NB23 ve NB23L betonlarında da tüm su/bağlayıcı oranlarında lifsiz karışımlar lifli karışımlara göre daha yüksek eğilme dayanımı değerlerine sahiptir. Lifsiz karışımlar lifli karışımlara göre 0,34 su/bağlayıcı oranına sahip karışımda %3,5 oranında, 0,42 su/bağlayıcı oranına sahip karışımda %4,6 oranında ve 0,50 su/bağlayıcı oranına sahip karışımda %9,5 oranında daha yüksek eğilme dayanımı sonucu sağlamıştır. NB23 ve NB23L betonları, HB17 ve HB17L betonlarına göre ortalama %54 ila %75 oranında, HB20 ve HB20L betonlarına göre ortalama %19 ila %41 oranında daha yüksek eğilme dayanımı değerlerine sahip olmuştur.

Genel olarak bu sonuçlarla, agreganın mekanik ve elastik özellikleri iyileştikçe eğilme dayanımında artışların olduğu tespit edilmiştir. Genel anlamda tüm karışımlarda su/bağlayıcı oranından bağımsız olarak lifsiz betonların lifli betonlara göre daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Karışımlara eklenen lifin oluşturduğu işlenebilirlik sorunlarına bağlı boşluklu iç yapının ve süreksizliklerin etkisi bu şekilde gözlenmiştir.

Betonların kırılma enerji değerleri ise Şekil 4.10'da verilmiştir.

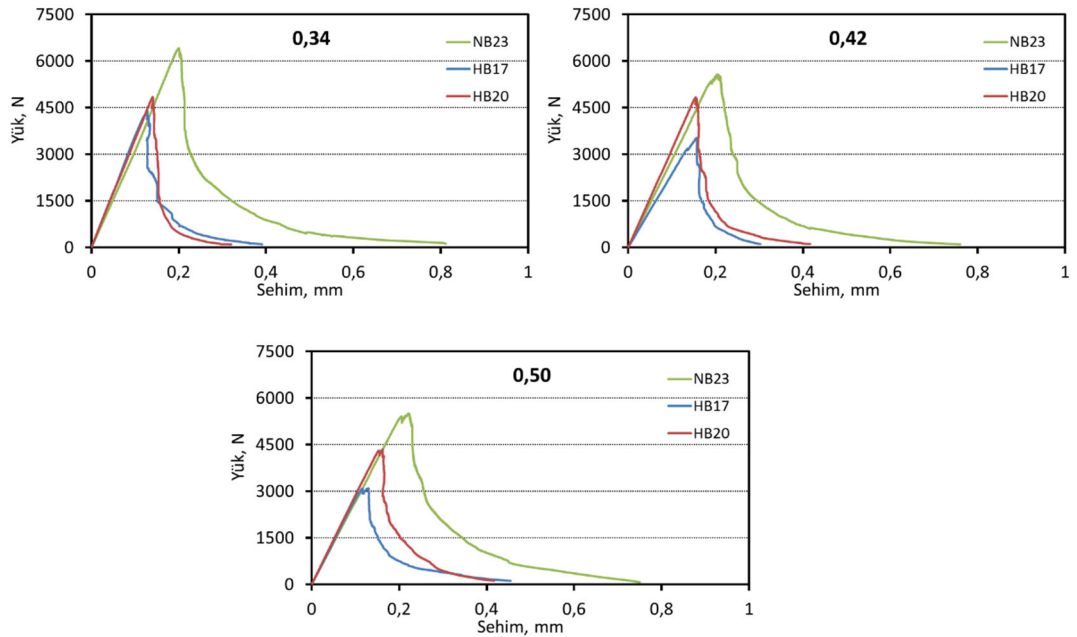


Şekil 4.10 : Hafif ve normal betonların kırılma enerjileri.

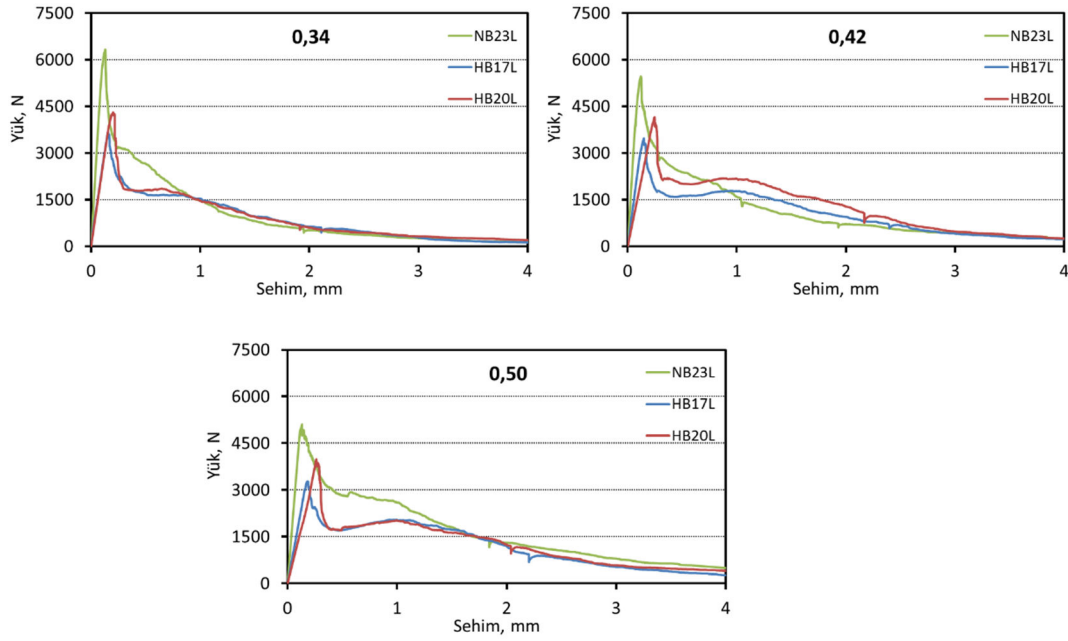
Kırılma enerjilerine bakıldığında, betonlarda lif kullanımının betonun tokluk mekanizmasına önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. Yük altındaki betonun tepe yükü sonrası davranışında liflerin etkin rol oynaması sonucu kırılma enerjilerinde büyük artışların meydana geldiği anlaşılmaktadır. Yalın betonların kırılma enerjileri incelendiğinde, agrega dayanımının artışının, betonu göçmeye götürmek için gerekli olan enerji miktarını artırdığı görülmektedir. HB20 betonunun HB17 betonuna göre ortalama 0,5 kat, NB23 betonunun ise HB20 betonuna göre ortalama 1,5 kat daha fazla kırılma enerjisine sahip olduğu anlaşılmıştır.

Lifli betonlar incelendiğinde ise lifsiz betonlara göre kırılma enerjilerinin çok yüksek olduğu dikkati çekmektedir. HB20L betonunun HB17L betonuna göre ortalama %7 ila %26 oranında, NB23L betonunun ise HB20L betonuna göre ortalama %10 ila %28 oranında daha fazla kırılma enerjisine sahip olduğu anlaşılmıştır. Yalnızca 0,42 su/bağlayıcı oranlı karışımda HB20L betonunun kırılma enerjisi, NB23L betonuna göre %11,2 oranında daha yüksek çıkmıştır. HB17L betonunun HB17 betonuna göre ortalama 6-10 kat, HB20L betonunun HB20 betonuna göre ortalama 8 kat, NB23L betonunun ise NB23 betonuna göre ortalama 2,5-4,5 kat daha fazla kırılma enerjisine sahip olduğu görülmektedir.

Betonların su/bağlayıcı oranlarına göre yük – sehim grafikleri Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.11 : Yalın betonların yük – sehim grafikleri.



Şekil 4.12 : Lifli betonların yük – sehim grafiği.

Şekil 4.11 ve 4.12'deki grafikler incelendiğinde, normal betonun yük – sehim eğrisi altında kalan alanın hafif betonlara kıyasla daha büyük olduğu aşikardır. Hafif betonlarda yüklerin normal betonlarda olduğu gibi agreganın çevresini dolaşmak yerine en zayıf faz olan agrega fazından ilerlemesinden ötürü, yalnız hafif beton numunelerinin geleneksel normal beton numunelerine kıyasla daha gevrek bir davranış gösterdiği görülmüştür.

Lifli betonlarda ise numunelerde üç noktalı eğilme deneyi esnasında çatlakların çentik etrafında yayıldığı gözlemlenmiştir. Numunelerin, maksimum yük seviyesine ulaşıldıktan sonra ihtiva ettiği liflerin çatlak lokalleşmelerini engelleyerek çatlakların elemana yayılmasında önemli rol oynaması sayesinde yüksek sehim kabiliyetine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Buradan hareketle liflerin, hafif ve normal betonların davranışını sünekleştirdiği ve enerji yutma kapasitelerini çok fazla artırdığı, yani tokluklarına olumlu yönde katkı yaptığı söylenebilir.

5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tüm bu çalışmadan ve deneylerden elde edilen genel çıkarımlar şu şekilde özetlenebilir;

- Betonların kuru birim ağırlığı arttıkça basınç dayanımının arttığı gözlenmiştir.
- İki farklı genleştirilmiş kil agregasının dayanım performanslarının farklı olması sebebiyle HB20 betonunun dayanım performansı HB17 betonuna göre daha yüksek çıkmıştır.
- HB20 ve NB23 betonlarının basınç dayanımları birbirine yakın çıkmıştır. Bu sonuçla, 2. tip genleştirilmiş kil agregasının (GKA-2), dayanım özellikleri bakımından yeterli düzeyde olduğu söylenebilir.
- Genleştirilmiş kil agregalarının yüksek su emme kapasiteleri sayesinde betonunun iç yapısında daha iyi bir kür ortamı oluşturmuş olmasıyla çimento hamuru – agrega arayüzünün iyileştiği, bu sayede özellikle GKA-2 tipi agrega içeren HB20 karışımının dayanım performansının yükseldiği söylenebilir.
- İleri yaşlarda hidrasyonun etkisiyle çimento matrisinin güçlenmesi sonucu betonun dayanımında agrega özelliklerinin ön plana çıktığı görülmüştür.
- Lifli betonların basınç dayanımlarında lifsiz betonlara göre düşüklük tespit edilmiştir. Bu durum, karışıma eklenen lif ile karışımın işlenebilirlik özelliğinin düşük olmasının etkisiyle kalıplara yerleştirmedeki zorluklar göz önüne alındığında betonda bulunan olası yerleştirme boşluklarının betonun boşluk yapısına olumsuz yönde etkideği ve dayanımı düşürdüğü şeklinde yorumlanmıştır.
- HB20L karışımlarında, 28 günden 120 güne geçişte basınç dayanımları, HB20 betonuna göre daha yüksek yüzdelere artış göstermiştir. Bu noktada, genleştirilmiş kil agregasının yüksek derecede su emmesine ve hidrasyon sırasında buna bağlı olarak iç yapıda daha iyi kür şartları oluşturmasıyla

güçlenen çimento matrisinin yanısıra, bu durumun çimento matrisi ile PVA lif arasındaki aderansı artırdığı ve PVA lifin gerilmeleri daha iyi dağıtarak çatlak ilerlemelerini kontrol altında tutmak suretiyle basınç dayanımının artmasına olumlu yönde katkı verdiği söylenebilir.

- NB23L betonunun 28 ve 120 günlük basınç dayanım sonuçları dikkate alındığında, HB20 ve HB20L betonlarının aksine, 28 günden 120 güne geçişte su/bağlayıcı oranı arttıkça dayanım artış eğiminin azaldığı görülmüştür.
- Tüm karışımlarda kür süresinin 28 günden 120 güne çıkmasıyla basınç dayanımlarında önemli artışlar tespit edilmiştir. Bu basınç dayanım farklarının, agregaların fiziksel özelliklerine, iç yapıdaki kür şartlarına ve karışımlara eklenen mineral katkı malzemesine bağlı olduğu düşünülmüştür.
- Tüm beton tiplerinde basınç dayanımı arttıkça elastisite modülü değeri de artmaktadır. Aynı zamanda elastisite modülü değerinde basınç dayanımının yanında iri agrega dayanımının da etkin rol oynadığı görülmüştür. Agreganın rijitliğinin artması ile birlikte, benzer dayanım değerlerinde, elastiklik modüllerinin de arttığı gözlenmiştir.
- Elastik modül tahmin modellerinde yalnızca basınç dayanımını kapsayan formüller geliştirmek doğru bir yaklaşım olmamaktadır. Daha gerçekçi bir model tahmini için agrega tipine göre bazı faktörlerin kullanılması ve sertleşmiş betonun birim ağırlığının da tahmin modeline eklenmesi gerekmektedir.
- Geleneksel betonlara göre oluşturulmuş, betonun birim ağırlığını model formülde kullanmayan TS 500 tahmin modelinin, hafif agregalı betonların elastik modül tahmininde kullanılmasının doğru olmadığı görülmüştür.
- Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar doğrultusunda, hafif ve normal agregalı betonlar için betonun birim ağırlığı ve agrega tipini de kapsayacak şekilde yeni bir tahmin modeli önerilmiştir.
- Hafif agregalı betonlar ile normal betonun ortalama Poisson oranı değerlerinin birbirlerinden farklılık göstermediği görülmüş ve 0,21 olarak bulunmuştur.

- Yarmada çekme dayanımlarının, beton yoğunluğu arttıkça ve su/bağlayıcı oranı azaldıkça arttığı izlenmiştir.
- Eğilme dayanımlarının, beton yoğunluğu arttıkça ve su/bağlayıcı oranı azaldıkça arttığı görülmüştür. Agreganın mekanik ve elastik özellikleri iyileştikçe eğilme dayanımında artışların olduğu tespit edilmiştir.
- Genel anlamda tüm karışımlarda su/bağlayıcı oranından bağımsız olarak lifsiz betonların lifli betonlara göre daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu görülmüştür.
- Yalın hafif beton numunelerinin geleneksel normal beton numunelerine kıyasla daha gevrek bir davranış gösterdiği gözlenmiştir.
- Betonlarda lif kullanımının betonun tokluk mekanizmasına önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür. Yük altındaki betonun tepe yükü sonrası davranışında, liflerin etkin rol oynaması sonucu kırılma enerjilerinde büyük artışların meydana geldiği anlaşılmıştır.

Çalışma süresince elde edilen sonuçlara ve gözlemlere dayanılarak gelecekte yapılacak benzer çalışmalar için yapılan öneriler şu şekildedir;

- Bu çalışmada tek tip PVA lif %0,5 oranında kullanılmıştır. Değişik tiplerde ve oranlarda PVA lif kullanılmasıyla parametrelerin ne şekilde değiştiği araştırılabilir.
- Bu çalışmada hava sürükleyici katkı kullanılmamıştır. Aksine hafif beton üretimlerinde hava sürükleyici katkı kullanılması sık rastlanılan bir durumdur. Hava sürükleyici katkının kullanılması ile kullanılmaması arasında ne gibi farkların olduğu, bu katkının genleştirilmiş kil agregasıyla üretilen hafif betonların hangi parametrelerini ne şekilde değiştirdiği araştırılabilir.
- Bu çalışmadaki hafif beton üretimleri, geleneksel beton üretiminde kullanılan kireçtaşı agregaların 4-8 mm aralığının genleştirilmiş kil agregasıyla değiştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Farklı tane boyut dağılımlarına sahip genleştirilmiş kil agregaları temin edilerek karışımlardaki tüm agregaların genleştirilmiş kil agregasının olacağı ve

birim ağırlıklarının daha da düşürülmüş yüksek dayanımlı yapısal betonların üretilebileceği bir çalışma yürütülebilir.

- Genleştirilmiş kil agregasıyla üretilmiş yapısal hafif betonların durabilite özelliklerinin inceleneceği bir çalışmanın planlanmasıyla ve elde edilecek olası olumlu sonuçlarla bu betonun ülkemizde kullanımının yaygınlaşmasının önü açılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Sönmezoğlu, C.**, (2005). Hafif betonun mekanik özellikleri üzerine kür şartlarının etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [2] **Konuk, H.**, (2003). Hafif agregalı betonların mekanik özellikleri ve ısı yalıtımı, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Orcay, E. A.**, (2010). Hafif betonların mekanik özellikleri ve ısı iletkenlik katsayıları, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **Gürbüz, G.**, (1998). Amasya bölgesi agrega rezervlerinin hazır beton agregası olarak kullanım imkanlarının araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [5] **Tüfekçi, M. M.**, (2011). Geri kazanılmış agregaların beton üretiminde yeniden kullanılabilirliğinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] **Azizi, S.**, (2007). Perlit katkılı hafif betonların mekanik özellikleri ve ısı yalıtımı, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] **Kesler, Y. E.**, (2009). Kalsit katkılı betonların erken yaş mekanik özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] **Kaya, A. O.**, (2010). Farklı türde mineral katkı kullanımının kendiliğinden yerleşen betonun taze faz ve mekanik özelliklerine etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [9] **Ünsal, C.**, (2012). Katkılı taze betonların reolojik özellikleri ve taze beton deneylerine sıcaklığın etkisinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [10] **Neville, A. M.**, (2011). Properties of concrete, *Pearson Education Limited*, 5th Edition, Chapter 5, p. 245-267.
- [11] **ASTM International**, (2013). Standard specification for chemical admixtures for concrete, ASTM C494/C494M – 13.
- [12] **ASTM International**, (2014). Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates, ASTM C125 – 13b.
- [13] **ASTM International**, (2013). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, ASTM C618 – 12a.
- [14] **Göktepe, M.**, (2008). C₃A oranı farklı çimentolarla üretilmiş betonlarda sülfat etkisi ve klorür geçirimsizliği, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [15] **Ulaş, A.**, (2009). Uçucu küllü harçlarda yeni nesil akışkanlaştırıcıların etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [16] **Kamal, N. A.**, (2012). Kireç ve uçucu kül ile stabilize edilmiş killerin yol üstyapı malzemesi olarak kullanılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [17] **Boğazkesen, K. K.**, (2011). PVA lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [18] **Kalyoncu, H.**, (2007). Çelik, karbon ve polivinil alkol (PVA) mikroliflerin tekil ve karma olarak kullanımının çimento harçların mekanik özelliklerine etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [19] **Karadeniz, A. C.**, (2012). PVA tekstillerin çimento esaslı kompozitlerde kullanılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [20] **Bentur, A., Mindness, S.**, (1990). Fiber reinforced cementitious composites, *Elsevier Applied Science*, Chapter 1, p.1 – 16.
- [21] **Sarı, M.**, (2013). Farklı tipteki liflerin betonun mekanik davranışına etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [22] **Zollo, R. F.**, (1997). Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development, *Cement and Concrete Composites*, Vol.19, p.107 – 122.
- [23] **Koç, V., Birinci, F.**, (2012). Lifli betonda boyut etkisi tokluk ve kırılma enerjisi, *SDU International Journal of Technologic Sciences*, Vol.4, No.3, pp.24 – 40.
- [24] **Arslan, A., Ulucan, Z. Ç.**, (1997). Çelik liflerin erken yaştaki betonarme kirişlerin göçmesine etkisi. İMO Teknik Dergi, Yazı 110, s.1507 – 1515.
- [25] **Arslan, M. E.**, (2007). Eğilmede taşıyıcı hafif beton – donatı aderansının geleneksel beton – donatı aderansı ile karşılaştırmalı olarak incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [26] **Kaldı, C.**, (2011). Taşıyıcı hafif beton tasarımı ve çok katlı binalarda kullanımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [27] **American Concrete Institute**, (1999). Guide for structural lightweight aggregate concrete, ACI 213R-87.
- [28] **Türk Standardları Enstitüsü**, (2002). Beton- Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk. TS EN 206-1.
- [29] **Comité Euro-International du Béton**, (1990). CEB-FIP Model Code,; Bulletin d'Information, *Thomas Telford Services*, London.
- [30] **Taşdemir, C.**, (2003). Hafif betonların ısı yalıtım ve taşıyıcılık özellikleri, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 427, s.57 – 61.

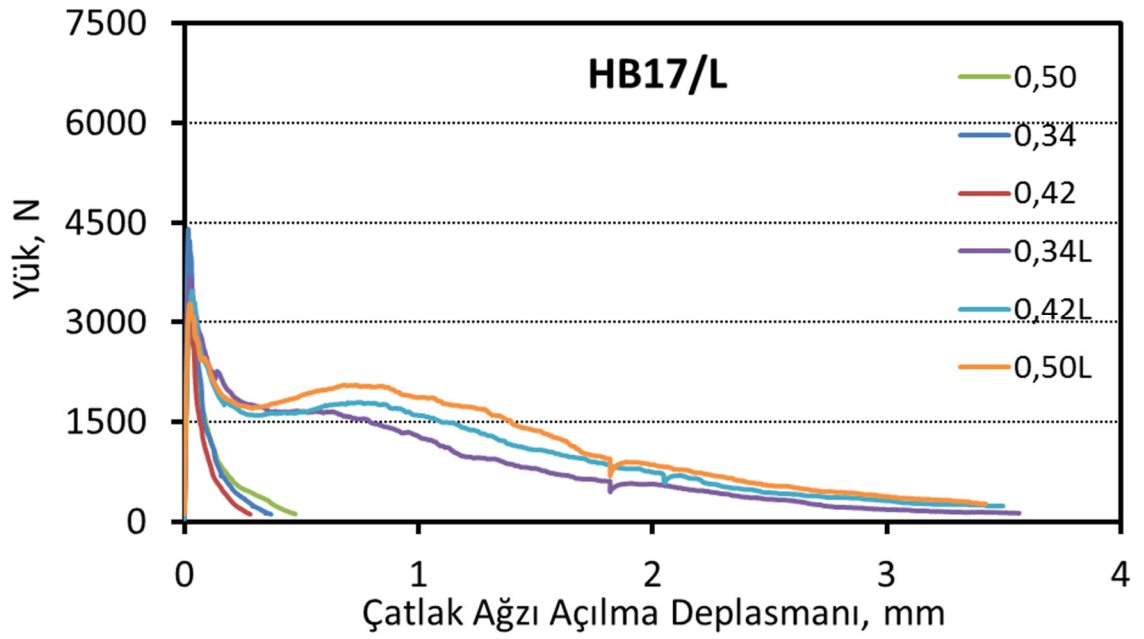
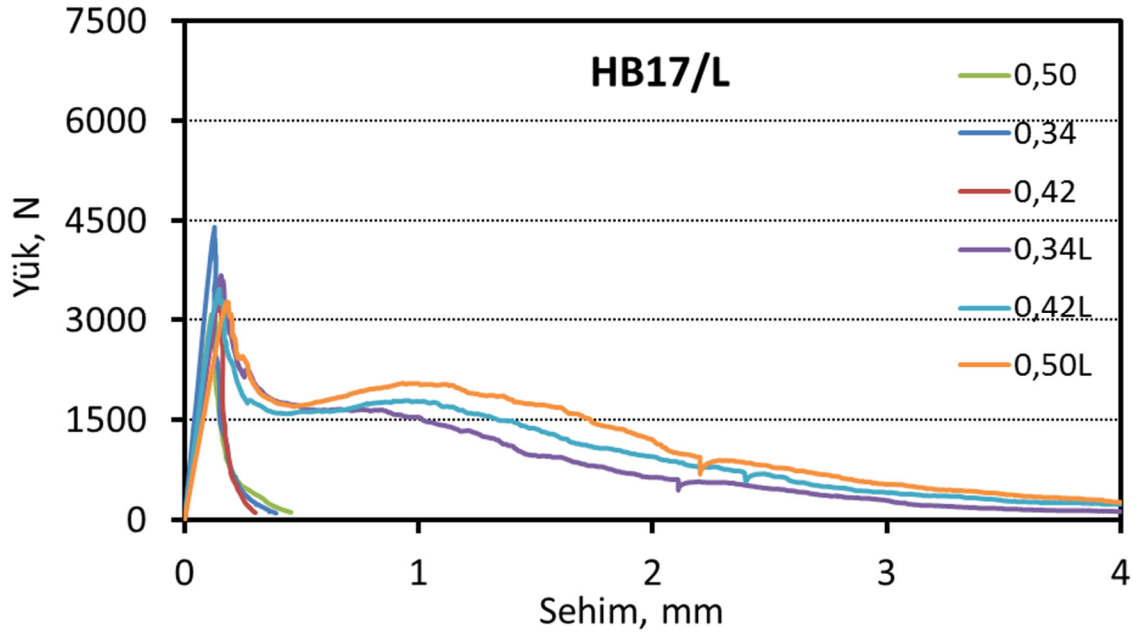
- [31] **ASTM International**, (2014). Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete, ASTM C330/C330M – 13.
- [32] **Hüsem, M.**, (1995). Doğu karadeniz bölgesi doğal hafif agregalarından biriyle yapılan hafif betonun geleneksel bir betonla karşılaştırmalı olarak incelenmesi, *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [33] **Gündüz, L., Şapcı, N., Bekar, M., Yorgun, S.**, (2006). Genleşmiş kilin hafif agrega olarak kullanılabilirliği, *Kil Bilimi Ve Teknolojisi Dergisi*, Kibited 1(2), s.115 – 121.
- [34] **Subaşı, S.**, (2009). Genleştirilmiş kil agregası ile taşıyıcı hafif beton üretimi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 24, No 3, s.559 – 567.
- [35] **Kabay, N.**, (2009). Hafif agregalı betonun boşluk yapısının mekanik ve fiziksel özelliklere etkisi, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [36] **Devecioğlu, A. G., Biçer, Y.**, (2012). Genleştirilmiş kil agregalı betonların ısı özelliklerinin incelenmesi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, Cilt 3, Sayı 2, s.75 – 81.
- [37] **Gökçe, M.**, (2007). Genleşmiş kil agregalarının hafif betonda kullanılabilirliğinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [38] **Türken, H.**, (2010). Katkısız ve katkılı betonlarda farklı kür malzemelerinin beton basınç dayanımına etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [39] **Cui, H.Z., Lo, T. Y., Memon, S.A., Xing, F. and Shi, X.**, (2012). Experimental investigation and development of analytical model for pre-peak stress–strain curve of structural lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. Vol.36, pp. 845-859.
- [40] **Bogas, J.A. and Gomes, A.**, (2013). Compressive behavior and failure modes of structural lightweight aggregate concrete – characterization and strength prediction. *Materials & Design*. Vol.46, pp.832-841.
- [41] **Cui, H. Z.**, (2007). Mechanical properties of lightweight aggregate concrete, *Doctoral Thesis*, City University of Hong Kong, China.
- [42] **Noushini, A., Samali, B., Vessalas, K.**, (2013). Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 49, pp. 374-383.
- [43] **American Concrete Institute**, (2008). Building code requirements for structural concrete and commentary, ACI 318-08.
- [44] **American Concrete Institute**, (1992). State-of-the-Art report on high-strength concrete, ACI 363R-92.
- [45] **Türk Standardları Enstitüsü**, (2000). Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları. TS 500.

- [46] **Bartolini, R., Filippozzi, S., Princi, E., Schenone, C., Vicini, S.,** (2010). Acoustic and mechanical properties of expanded clay granulates consolidated by epoxy resin. *Applied Clay Science*. Vol. 48, pp. 460 – 465.
- [47] **Uglyanitsa, A. V., Gilyazidinova, N. V., Zhikharev, A. A., Kargin, A. A.,** (2014). Study of reinforcement corrosion in expanded clay concrete. *HBRC Journal*. In Press.
- [48] **Bogas, J.A. and Gomes, A., Pereira, M. F. C.,** (2012). Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate. *Construction and Building Materials*. Vol. 35, pp. 1013 – 1022.
- [49] **Yang, K. H., Kim, G. H., Choi, Y. H.,** (2014). An initial trial mixture proportioning procedure for structural lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 55, pp. 431 – 439.
- [50] **Lo, T. Y., Cui, H. Z., Tang, W. C., Leung, W. M.,** (2008). The effect of aggregate absorption on pore area at interfacial zone of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 22, pp. 623 – 628.
- [51] **Costa, H., Julio, E., Lourenço, J.,** (2012). New approach for shrinkage prediction of high-strength lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 35, pp. 84 – 91.
- [52] **Hassanpour, M., Shafigh, P., Bin Mahmud, H.,** (2012). Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement – A review. *Construction and Building Materials*. Vol. 37, pp. 452 – 461.

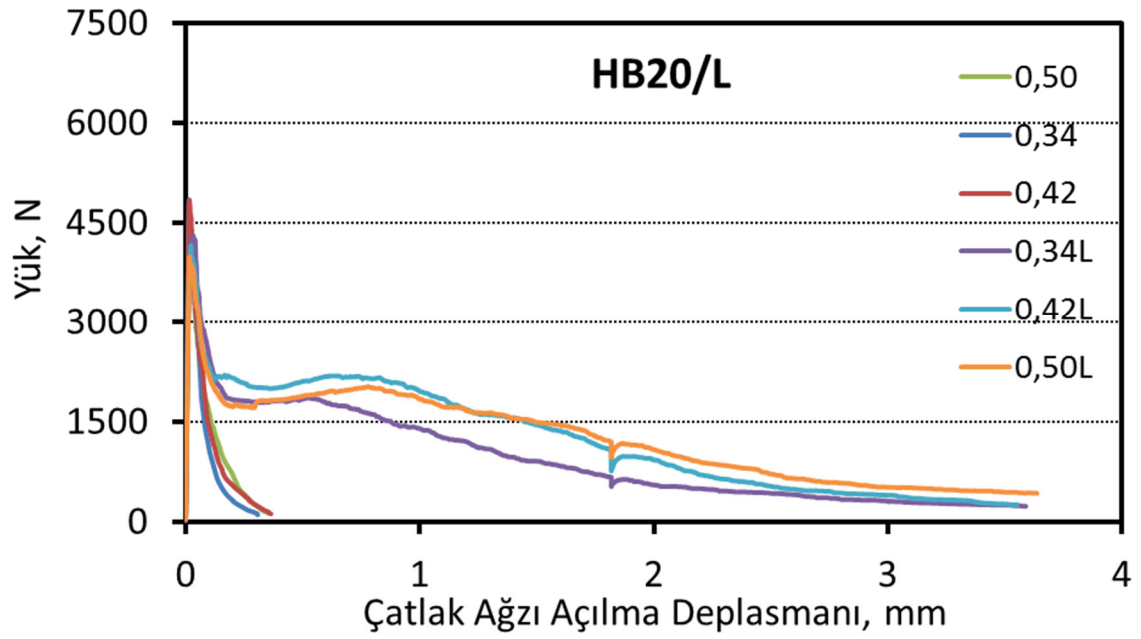
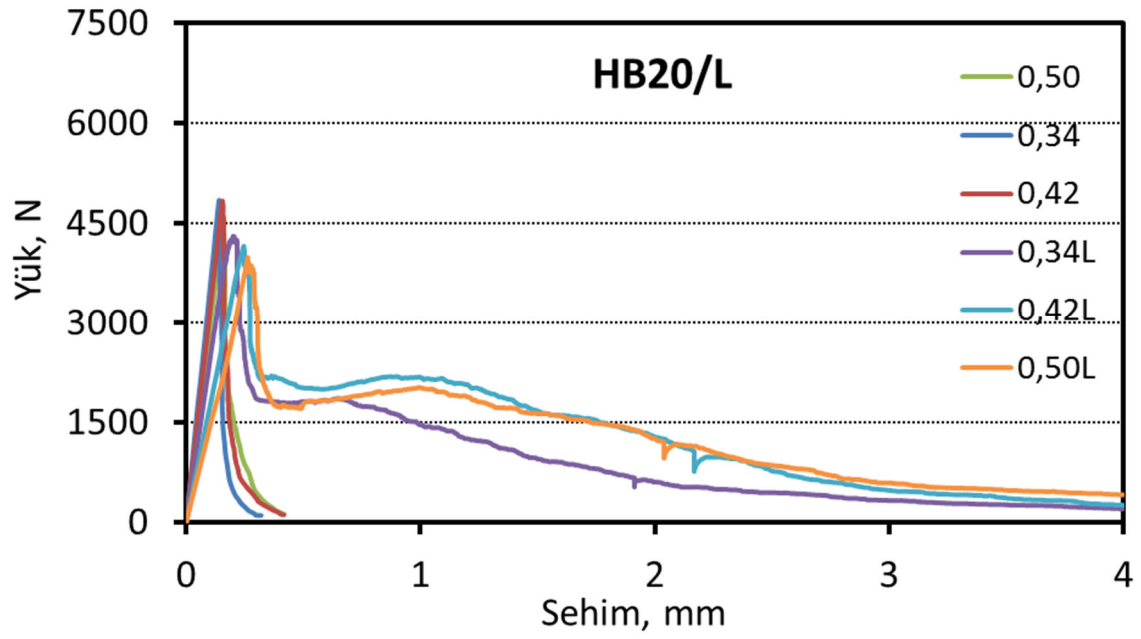
EKLER

EK A: Yk – sehim ve yk – aad grafikleri.

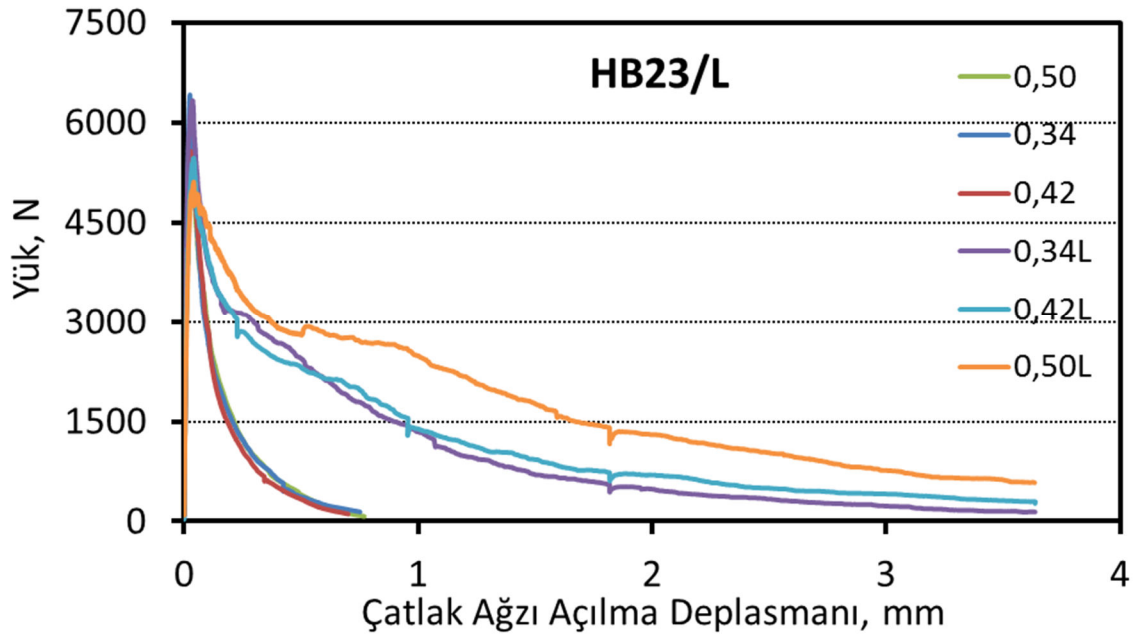
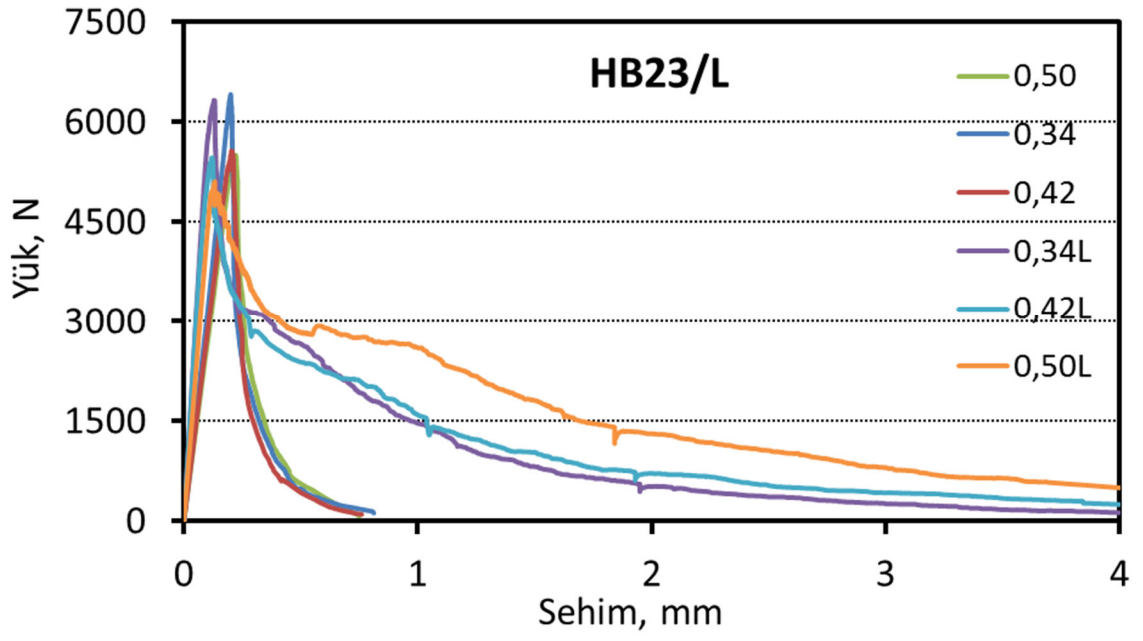
EK A



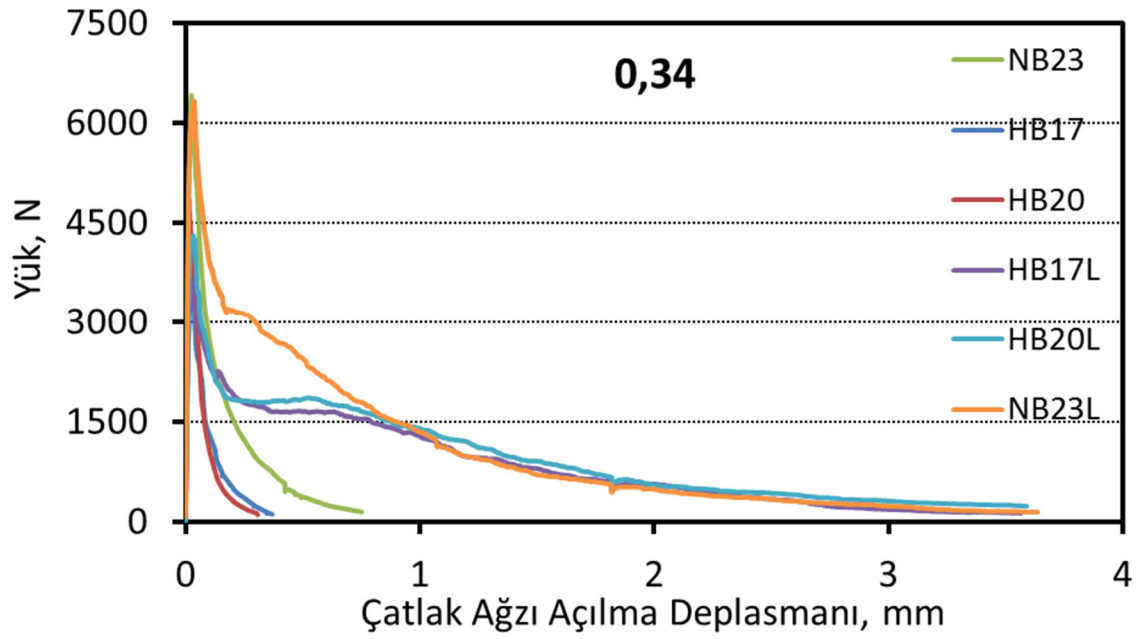
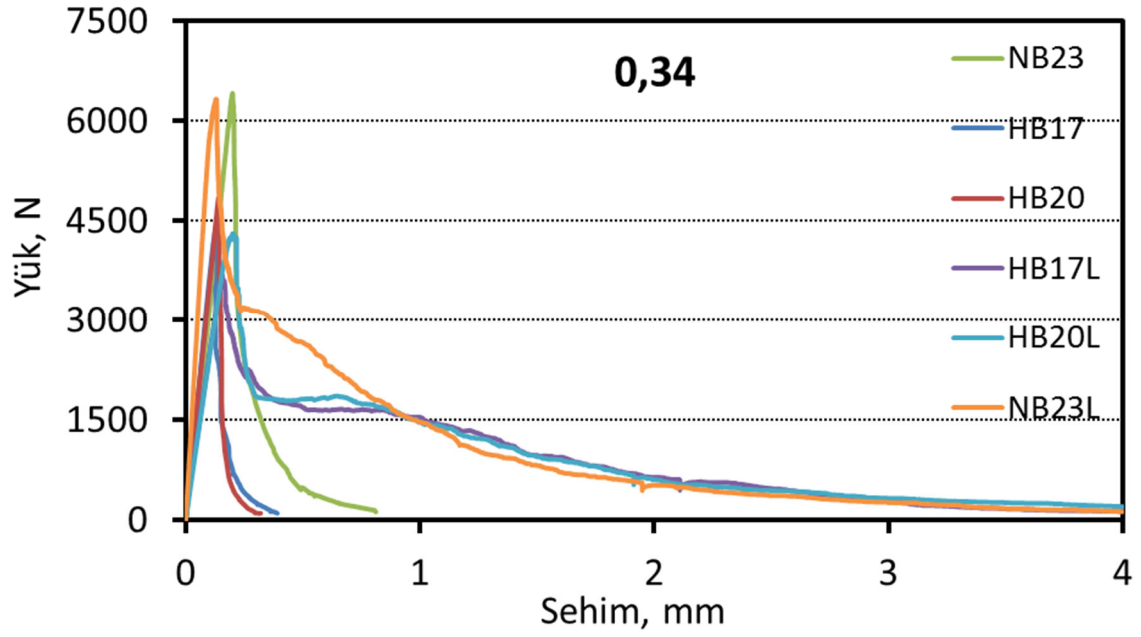
Şekil A.1 : GKA-1 agregalı hafif betonun su/bağlayıcı oranlarına göre yük – sehim ve yük – çaad grafikleri.



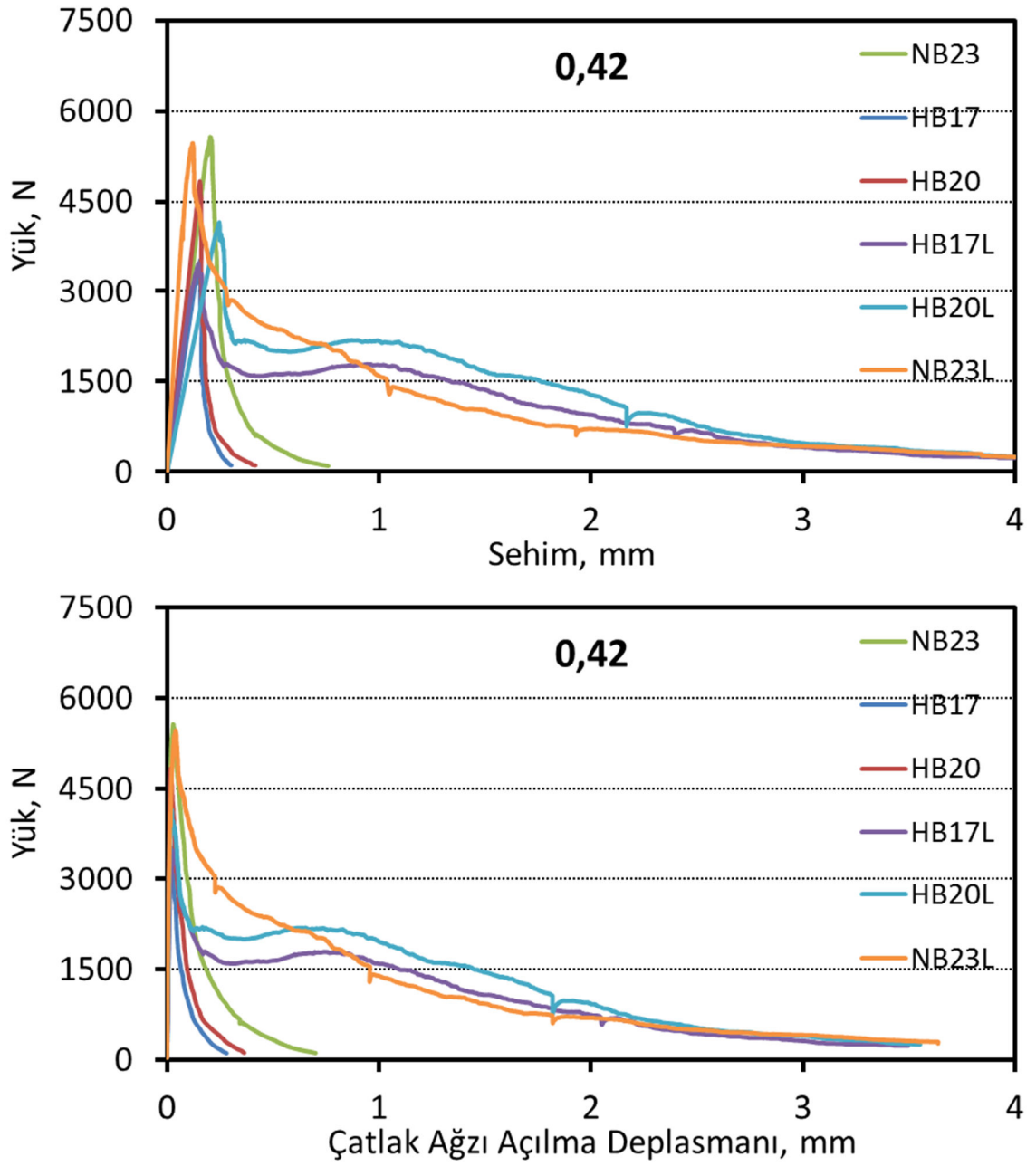
Şekil A.2 : GKA-2 agregalı hafif betonun su/bağlayıcı oranlarına göre yük – sehim ve yük – çaad grafikleri.



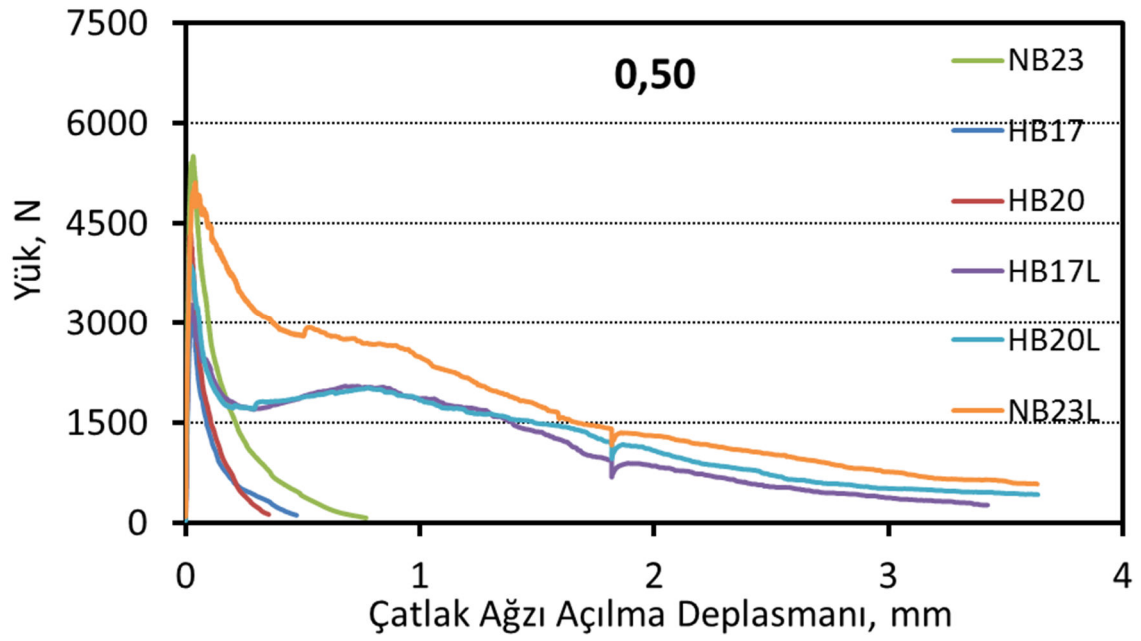
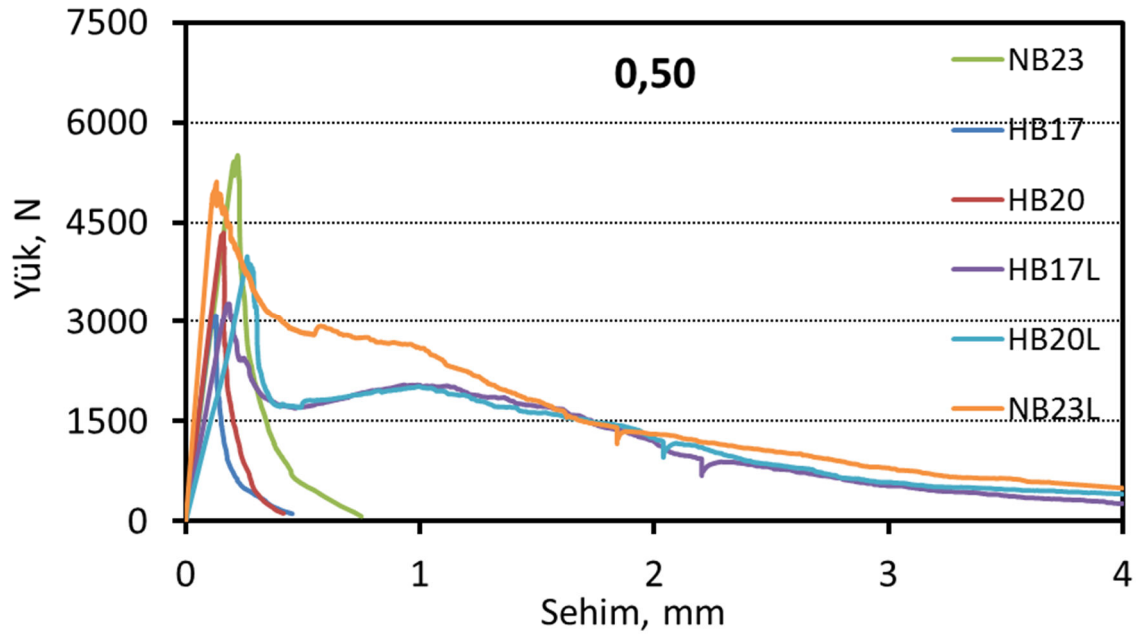
Şekil A.3 : Kireçtaşı agregalı hafif betonun su/bağlayıcı oranlarına göre yük – sehim ve yük – çaad grafikleri.



Şekil A.4 : 0,34 su/bağlayıcı oranına sahip betonların birim ağırlıklarına göre yük – sehim ve yük – çaad grafikleri.



Şekil A.5 : 0,42 su/bağlayıcı oranına sahip betonların birim ağırlıklarına göre yük – sehim ve yük – çaad grafikleri.



Şekil A.6 : 0,50 su/bağlayıcı oranına sahip betonların birim ağırlıklarına göre yük – sehim ve yük – çaad grafikleri.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Murat Emre DİLLİ
Doğum Yeri ve Tarihi: Samsun / 22.04.1988
Adres: Ümraniye / İstanbul
E-Posta: muratemre353@hotmail.com
Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi – 2011

