

YALIN VE PVA LİFLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ YAPISAL YARI HAFİF BETONLARIN KIRILMA PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Murat Emre Dilli¹, Cengiz Şengül², Hakan Nuri Atahan³

Özet

Yapısal uygulamalar çerçevesinden bakıldığında, hafif agregalı betonların (HAB) hafif olma ve ısı ve ses yalıtımı sağlama gibi üstünlükleri mevcuttur. Özellikle geleneksel betonlarla kıyas yapılabilecek kadar yeterli dayanım performansı sağlaması durumunda bu betonların yapısal uygulamalarda ki potansiyeli kritik bir öneme sahip olmaktadır. Yapılardaki zati ağırlığın azaltılmasıyla daha ince kesitli ve boyutu azaltılmış yapı elemanları, daha az temel maliyeti, sismik etkilere karşı artırılmış performans gibi önemli üstünlükler elde edilmektedir. Yapılan bu çalışmada, kuru birim hacim ağırlıkları 1600 ile 2000 kg/m³ ve basınç dayanım aralığı 20MPa ile 70MPa aralığında değişen yalın ve PVA (polivinil alkol) lif ile güçlendirilmiş genişleşmiş kil agregalı betonların basınç, eğilme ve çekme dayanımı ve elastik özellikleri incelenmiştir. Deney sonuçları, hafif agregalı betonların yalın betonların kırılma davranışını gevrekleştirdiği, ancak hacimce %0,5 oranında PVA lif kullanımı ile kırılma enerjilerinin ortalama 8 kat arttığını göstermiştir. Çalışmada ayrıca, iri agregalı betonların elastiklik modülü tahmini için modeller önerilmiştir.

Investigation on The Fracture Performance of Semi-Lightweight Structural Concretes with and without PVA Fibers

From the point of view of structural applications, lightweight aggregate concretes (LWAC) have the advantages of being light and having improved thermal and sound insulation properties. Especially when it is designed with adequate strengths, its use for structural applications gains critical importance. 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 reached. In this study, compressive, flexural and tensile strength and elastic properties of LWAC's, produced with expanded clay aggregates, having dry unit weights between 1600 and 2000 kg/m³, and compressive strength range between 20 and 70 MPa were investigated. Results have shown that the use of lightweight aggregate makes the fracture behavior of plain LWAC's more brittle, however, the use of 0.5% PVA (polyvinyl alcohol) fibers has improved the fracture toughness approximately 8 times. In the presented study, prediction models for the estimation of elastic modulus of lightweight concretes containing expanded clay as coarse aggregate has also been proposed.

1. GİRİŞ

Dünyada modern yapı uygulamalarında, yapı elemanlarının tümü veya bir kısmı, 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 sınıflara ayrılmakta ve taşıyıcı özellikleriyle de uygulama alanı bulmaktadır. Hafif betonlarla alakalı olarak bazı standartlarda aşağıda özetlenmeye çalışılan tanımlamalar yapılmıştır:

- ACI 213R-87 Standardı'na göre [1] taşıyıcı hafif beton, hafif agregalarla üretilmiş, 28 günlük hava kurusu birim ağırlığı 1440 - 1850 kg/m³ arası ve basınç dayanımı en az 17,2 MPa olan yapısal betondur.
- ASTM C330 Standardı [2] tamamen hafif agregalarla üretilmiş hafif betonların birim ağırlığının 1760 kg/m³, kısmen hafif kısmen normal agregalı betonların birim ağırlığının 1840 kg/m³ü geçmemesini önermektedir. Standardın tanımladığı hafif betonlarda minimum basınç dayanımı 17 MPa'dır.

- TS EN 206-1 Standardı'na göre [3] hafif beton, etüv kurusu durumdaki birim ağırlığı 800 kg/m³ veya daha büyük olup,

1) muratemre353@hotmail.com, 2) cengizsengul.79@gmail.com, 3) atahanh@itu.edu.tr İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

(*) Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen Beton İstanbul 2017 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

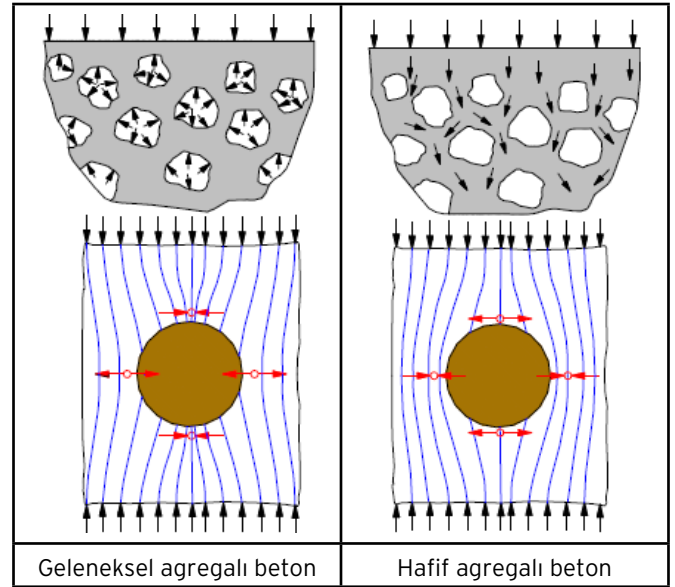
2000 kg/m³ü geçmeyişi kısmen veya tamamen hafif agregalarla üretilmiş betondur.

- CEB-FIB Standardı [4] ise taşıyıcı hafif betonun kuru birim hacim ağırlığının 1900 kg/m³ü geçmemesini önermektedir.

Hafif agregalı betonların geleneksel normal betonlara kıyasla fiziksel ve mekanik özellikler anlamında bazı üstünlükleri ve sakıncaları bulunmaktadır. Uygulamada bu üstünlükler ve sakıncalar muhakkak göz önüne alınmalıdır. Hafif agregalı betonun geleneksel betona kıyasla başlıca üstünlükleri yapıların zati yükünü önemli ölçüde azaltması, buna bağlı olarak yapıya etki eden deprem yüklerinde önemli ölçüde azalma meydana gelmesi, ısı iletiminin düşük olması, yangın dayanımının yüksek olması, ses yalıtımının iyi olması ve uygulama sırasında kalıp basınçlarını azaltması olarak sayılabilir. Diğer taraftan başlıca sakıncaları ise, üretim, taşıma ve yerleştirme aşamalarında daha dikkatli olunmasını gerektirmesi, üretimlerinin yüksek dozajda çimento gerektirmesi, aşınmaya karşı dayanıksız olması, neme karşı yalıtılmalarının gerekliliği, dayanımlarının geleneksel ve yüksek dayanımlı betonlara göre daha sınırlı kalması, daha gevrek bir kırılma davranışı sergilemesi ve elastiklik modüllerinin geleneksel agregalı betonlara göre daha düşük kalması [5] şeklinde özetlenebilir.

Hafif agregalı betonların taşıyıcı yapı elemanı olarak da kullanılmalarının bir gereği olarak mekanik ve elastik özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklerin geleneksel agregalı betonlar ile kıyaslanarak aradaki farklılıkların incelenmesi ve uygun modellerin oluşturulabilmesi mühendislik uygulamaları bakımından önemlidir. Hafif agregalı betonların dayanım ve elastik özellikleri, geleneksel betonların özelliklerinin etkilendiği su/çimento oranı, bağlayıcı içeriği, beton yaşı gibi parametrelerin yanında, daha ziyade kullanılan hafif agregaların özelliklerinden etkilenmektedir. Hafif agregaların dayanım özellikleri iyileştikçe, üretilen betonların da dayanım ve elastik özellikleri iyileşecektir. Diğer bir değişle, agregaların çimento hamuru arayüzeyinin geleneksel betonlardaki davranışının aksine, hafif agregalı betonlarda zayıf olan ve mekanik davranışı belirleyen faz hafif agregalardır. Çatlak ilerlemesi, en zayıf faz olan hafif agregalar üzerinden olur. Bu durum, yük altında oluşan ve yayılan çatlakların daha düz bir yol izleyerek betonun enerji yutabilme kapasitesinin azalmasına, yani geleneksel betonlara kıyasla gevrekliğinin artmasına neden olur. Geleneksel agregalı, yani harç fazına göre daha rijit agregalar içeren betonlarda gerilme transferi agregalar üzerinden gerçekleşir. Normal yoğunluklu agregaların çekme dayanımları, agregaları saran harç fazına göre daha yüksek

olacağından betonun kırılması bu fazların ayrılması şeklinde meydana gelir ve yayılan çatlak en zayıf bölge olarak bilinen ara yüzeyden gerçekleşir. Diğer taraftan, hafif agregalı betonlarda olduğu gibi, agregalar kendisini saran harç matrise göre daha az rijit ise, betonda oluşan gerilme dağılımı daha farklı olur. Gerilmeler daha ziyade matris fazı içerisinde aktarılır ve agregaların üst ve alt kutup bölgelerinde çekme gerilmeleri meydana gelir. Bu tür betonlarda ara yüzey hafif agregalara göre daha güçlü olduğundan çatlak yayılması agregaların içerisinde olacaktır [6,7]. Bu farklılık Şekil 1'de gösterilmiştir [6].



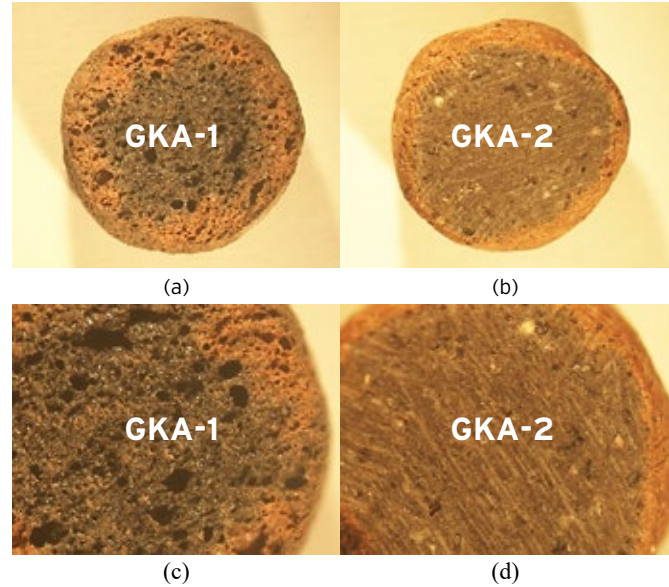
Şekil 1. Geleneksel (sol) ve hafif (sağ) agregalı betonlarda basınç yüklerinin transferi [6]

Sunulan bu çalışmada, iri agreganın bir kısmının farklı dayanım özelliklerine sahip genişletilmiş kil agregaları ile yer değiştirilmesi ile elde edilmiş ve kuru birim hacim ağırlıkları 1600 ile 2000 kg/m³ ve basınç dayanım aralığı 20MPa ile 70MPa aralığında değişen, yalın ve PVA lif ile güçlendirilmiş hafif agregalı yarı hafif yapısal betonların basınç, eğilme ve çekme dayanım özellikleri ile birlikte elastik özellikleri incelenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada 1700, 2000, 2300 kg/m³ olacak şekilde ikisi hafif agregalı ve biri de geleneksel agregalı olmak üzere üç farklı birim ağırlığa sahip beton karışımları tasarlanmıştır. Hedeflenen her bir birim ağırlık için 0,34, 0,42 ve 0,50 olmak üzere 3 farklı su/bağlayıcı oranı seçilmiş olup lif içermeyen yalın betonları temsilen 9 farklı karışım üretilmiştir. Lifli betonları temsilen ise, aynı karışımlara hacimce %0,5

oranında ($6,5\text{kg/m}^3$) PVA (polivinil alkol) lif eklenerek 9 adet karışım daha üretilmiş olup toplamda 18 farklı karışımla çalışma yürütülmüştür. Kullanılan PVA liflerin boyları 18 mm, çapları 200μ olup yaklaşık 1000 MPa çekme dayanımı ve 27 GPa elastiklik modülü değerlerine sahiptir [8]. Tüm karışımlarda $3,14\text{ g/cm}^3$ özgül ağırlığa sahip CEM I-42,5R Portland çimentosu ve mineral katkı olarak da $2,54\text{ g/cm}^3$ özgül ağırlığa sahip F tipi uçucu kül kullanılmıştır. Arzu edilen kıvamın korunabilmesi amacıyla naftalin bazlı süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır. Sadece geleneksel agregalar içeren ve yaklaşık 2300 kg/m^3 birim ağırlık değerlerinin hedeflendiği normal beton karışımında agregalar olarak doğal kum (0-1 mm), kırma kum (0-5 mm) ve kireç taşı agregası (4-16 mm) kullanılmıştır. 1700 ve 2000 kg/m^3 birim ağırlık değerlerinin hedeflendiği beton karışımlarında ise fiziksel ve mekanik özellikleri farklı iki tip genişletilmiş kil agregası (GKA-1 ve GKA-2) kullanılmıştır. Kullanılan bu agregalara ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Genleşmiş kil agregalarına ait optik mikroskop kesit görüntüleri. (Büyütme: a,b: x20 ; c,d: x40)

Bu karışımlarda normal beton karışımındaki 4-16 mm kireç taşı agregasının 4-8 mm tane aralığındaki kısmı genişletilmiş kil agregalarıyla yer değiştirilmiştir. GKA'lara beton karışımlarından önce 30 dk boyunca belirlenen miktarlarda su emdirilmiş, bu sayede karıştırma ve numune alma aşamalarında karışım suyunun emilimi en aza indirilmeye çalışılmıştır. GKA'ların özgül ağırlıkları, su emme oranları ve dayanımları farklı olup agregaların boyut dağılımları ise benzerdir. Kullanılan agregalara ait fiziksel özellikler ve tane boyutu dağılımları Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Agregaların fiziksel özellikleri

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

Tasarlanan geleneksel (GB) ve hafif agregalı (HAB) tüm karışımlarda toplam agregalar hacim konsantrasyonu 0,62 de sabit tutularak bağlayıcı hamur fazının su/toplam bağlayıcı özellikleri değiştirilmiştir. Ayrıca, uçucu kül konsantrasyonunun etkisini bertaraf etmek amacıyla tüm karışımlarda çimento/uçucu kül oranı kütlece yaklaşık 4,5 oranında sabit tutulmuştur. Yalın ve PVA lif ile güçlendirilmiş geleneksel ve hafif agregalı betonların karışım özellikleri Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir. İlgili tablolarda üretilen betonlara ait taze birim ağırlık ve çökme değerleri de verilmektedir.

Tablo 2. Agregaların tane boyutu dağılımları.

Agrega Tipi:	Doğal Kum [0-1 mm]	Kırma Kum [0-5 mm]	İri Agregalar [4-16 mm]	GKA-1 [4-8 mm]	GKA-2 [4-8 mm]
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

Tablo 3. Yalın betonlara ait karışım özellikleri.

Karışım Kodu:	HAB-1			HAB-2			GB		
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
Taze birim ağırlık, kg/m ³ :	1799	1749	1710	2101	2075	2005	2407	2375	2345
Çökme, cm.:	15	15	15	18	18	17	17	17	16
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

Tablo 4. PVA lifli betonlara ait karışım özellikleri.

Karışım Kodu:	HAB-1			HAB-2			GB		
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
PVA Lif, kg/m ³ :	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
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
Taze birim ağırlık, kg/m ³ :	1798	1772	1742	2095	2071	2033	2364	2358	2338
Çökme, cm.:	17	14	14	18	14	15	15	15	15
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

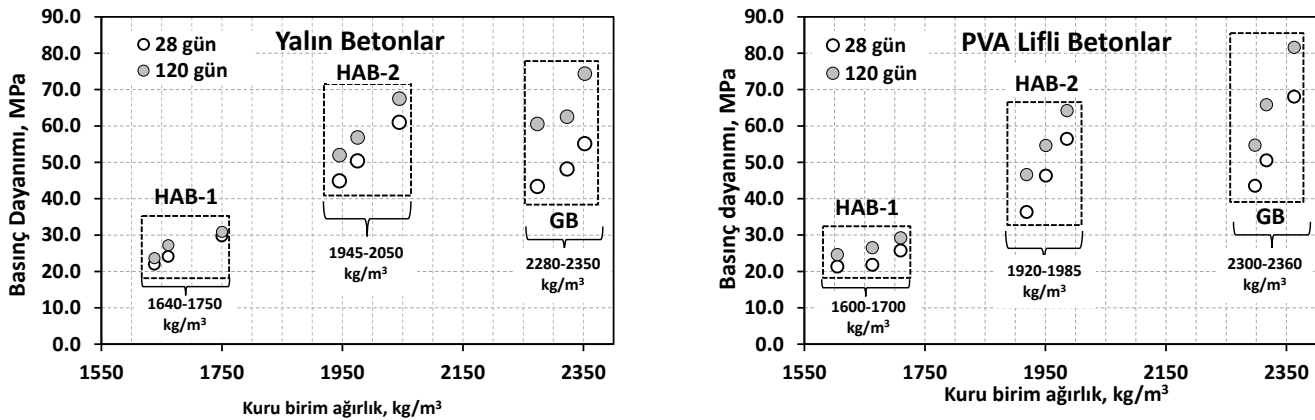
Üretilen betonlar üzerinde 28. ve 120. günlerde basınç testleri ve elastiklik modülü ölçümleri, 120. günde yarmada çekme ve eğilme deneyleri uygulanmıştır. Basınç deneyleri ve elastiklik modülü ölçümleri 100 mm çapında ve 200 mm yüksekliğindeki silindirik numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen gerilme-deformasyon grafiklerinde $50\mu\epsilon$ deformasyon değeri ile deney günündeki basınç dayanımının %40'ı arasında kalan kısmın eğimi elastiklik modülü olarak belirlenmiştir. Yarmada çekme deneyleri ise eğilme deneylerinden kalan 100x100 mm kesitli parçalar üzerinde gerçekleştirilmiştir. 100x100x500 mm boyutlu prizmatik kiriş numuneler üzerinde üç noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Eğilme deneylerinde 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 yükseklığının 1/6'sına denk gelecek şekilde çentikler açılmıştır.

Numuneler üzerindeki düşey deplasman değerleri (sehim) ve çatlak ağız açılma deplasman okumaları, deney düzeneğine bağlanan 1 adet LVDT ve 1 adet çatlak ağız açılma deplasmanı ölçüm cihazıyla bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Kaydedilen veriler işlenerek nihai yük (N)-sehim (mm) ve yük (N)-çatlak ağız açılma deplasmanı (mm) grafikleri elde edilmiştir. Kırılma enerjilerinin tespitinde 4 mm sehim değerine kadar elde edilen yük (N) - sehim (mm) eğrileri altında kalan alan hesaplanmıştır. Bu hesaplama, RILEM-50 FMC Teknik Komitesinin önerilerine uygun olarak yapılmıştır.

3. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMİ

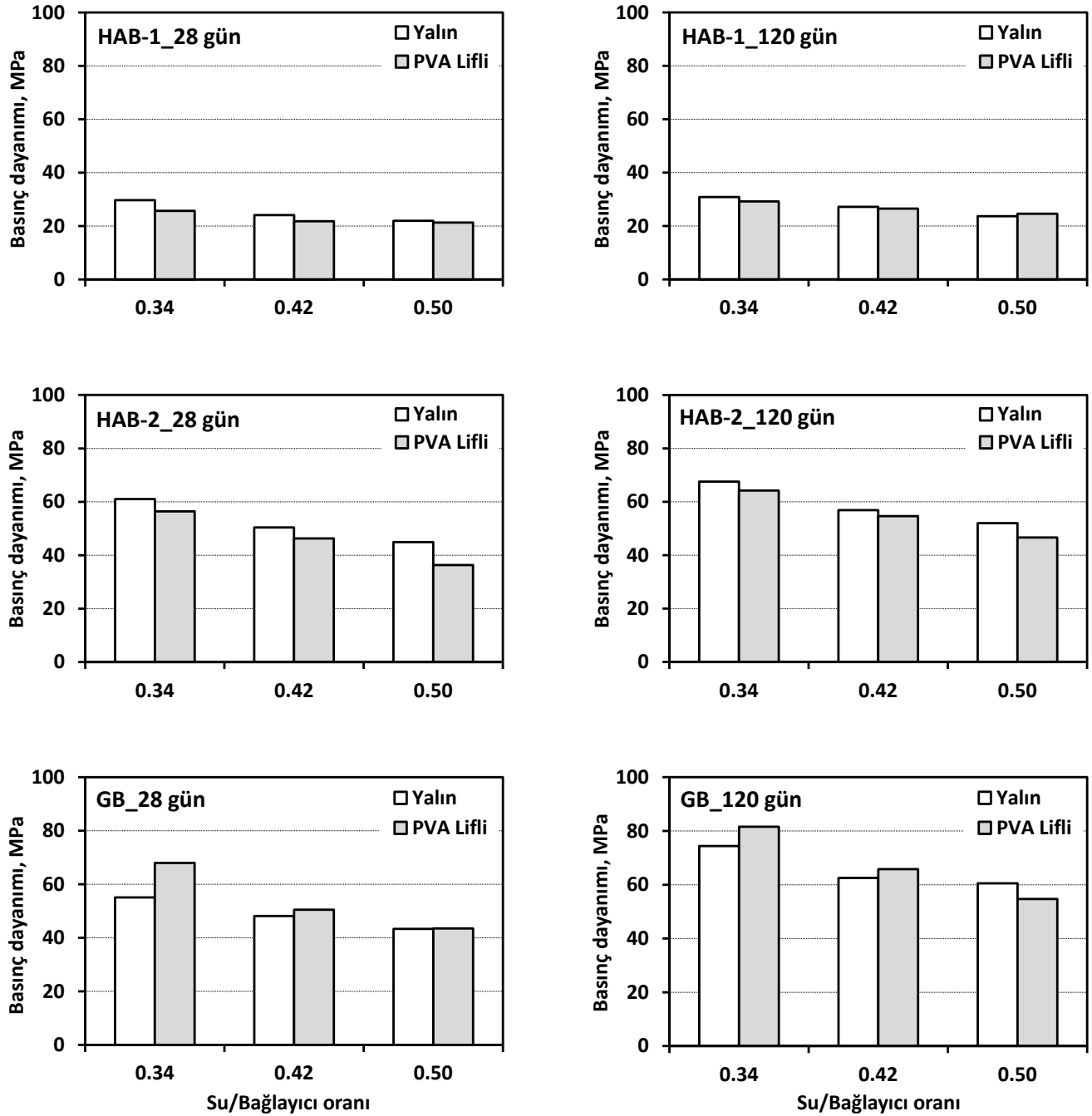
3.1. Basınç Deneyi Sonuçları

28 ve 120 günlük betonlara ait kuru birim ağırlık-basınç dayanım ilişkilerini gösteren grafikler Şekil 3'te verilmiştir. Betonların kuru birim ağırlık değerleri numunelerin 100°C etüvde sabit ağırlığa kadar kurutulması ile elde edilmiştir.



Şekil 3. Yalın (sol) ve PVA li file takviye edilmiş (sağ) betonlara ait basınç dayanımı - kuru birim hacim ağırlık ilişkileri.

Su/bağlayıcı oranlarına bağlı olarak, lif içermeyen HAB-1 betonları için 24 ila 31 MPa arasında, HAB-2 betonları için 52 ila 68 MPa arasında ve GB betonları için 40 ila 75 MPa arasında basınç dayanımı sonuçları elde edilmiştir. PVA lif içeren betonlar için ise HAB-1 betonları için 21 ila 29 MPa arasında, HAB-2 betonları için 36 ila 64 MPa arasında ve GB betonları için 44 ila 82 MPa arasında basınç dayanımı sonuçları elde edilmiştir. Beklenen şekilde, lifli ve yalın betonlarda kuru birim ağırlık değerlerinin yükselmesi ile basınç dayanım değerlerinin arttığı gözlenmektedir. Ancak, Şekil 3'te yalın betonlar için verilen ilişkide dikkat çekici bir nokta, tüm su/bağlayıcı oranları için HAB-2 beton serilerine ait 28 gün basınç dayanım değerlerinin GB serilerine göre daha yüksek sonuçlar vermesi, ancak bu eğilimin 120. günde ters dönmesi, yani GB karışımlarının daha yüksek dayanım değerlerine ulaşmasıdır. 28. günde lif içermeyen HAB-2 betonlarının daha yüksek dayanımlar vermesi, yüksek su emme oranı ve dayanım özelliklerine sahip genişletilmiş kil agregalarının (GKA-2) sağladığı içsel kürlenme etkisi ile gerek ara yüzey ve gerekse matris dayanımlarını daha etkin şekilde artırabilmesinden kaynaklandığı düşünülebilir. 28. günden 120. güne geçiş sürecinde ise HAB-2 ve GB karışımlarındaki dayanım artışları çok daha yüksek olmakta ve GB karışımları belirgin şekilde daha yüksek dayanım değerlerine ulaşmaktadır. Bu durum ise matris dayanımının güçlenmesi ile birlikte, agreganın dayanımlarının önemli bir rol oynamaya başlamasından kaynaklanmaktadır.

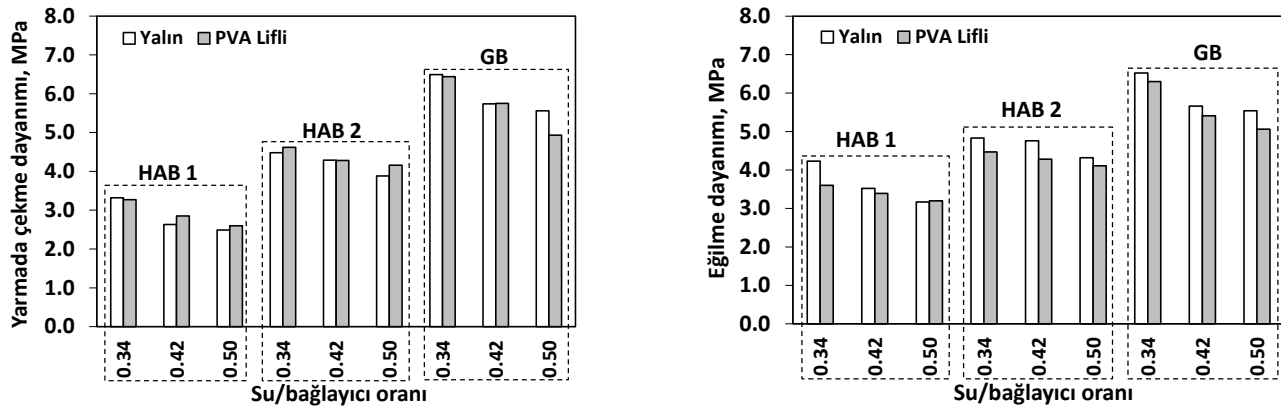


Şekil 4. Yalın ve PVA lif ile güçlendirilmiş betonlara ait 28 (sol) ve 120 günlük (sağ) basınç dayanımı ile su/bağlayıcı oranları arasındaki ilişki.

Şekil 4'te yalın ve PVA lif ile güçlendirilmiş betonlara ait 28 ve 120 günlük basınç dayanımlarının su/bağlayıcı oranı ile değişimleri verilmiştir. Su/bağlayıcı oranının artması ile birlikte dayanımlar azalma eğiliminde olmakta, ancak bu eğilimin zayıf mekanik ve fiziksel özelliklere sahip GKA-1 agregalarının kullanıldığı HAB-1 karışımlarında daha zayıf olduğu gözlenmektedir.

3.2. Yarmada Çekme ve Eğilme Deneyi Sonuçları

120 gün kürleme sonucu elde edilen yarmada çekme ve eğilme dayanımı değerleri ile su/bağlayıcı oranları arasındaki ilişkiler Şekil 5'te verilmektedir. Bu ilişkiler incelendiğinde, lifli ve yalın betonlarda kuru birim ağırlık değerlerinin yükselmesi ile yarmada çekme ve eğilme dayanım değerlerinin arttığı gözlenmektedir. Benzer ilişki, her bir beton grubu için, azalan su/çimento oranı için de söylenebilir. Bununla birlikte lif eklenmesinin yarmada çekme ve eğilme dayanımlarını belirgin bir şekilde etkilemediği görülmektedir. Su/çimento oranlarının azalması ile birlikte eğilme ve yarmada çekme dayanımları artmaktadır. Üretilen tüm beton serilerinin agrega hacim konsantrasyonları sabit tutularak bağlayıcı hamur fazının su/bağlayıcı oranları, diğer bir deyişle bağlayıcı hamur fazının dayanım özellikleri değiştirilmiştir. Özellikle HAB-2 ve GB karışımlarına ait çekme ve eğilme dayanım değerleri karşılaştırıldığında, matris fazın su/bağlayıcı oranının beton dayanımları üzerindeki etkisinin GB karışımları için daha belirgin olduğu da görülebilir. Bu durum, basınç dayanımlarında da gözlemlendiği gibi, belli bir matris dayanımının üzerine çıkıldığında kullanılan agrega dayanımının ulaşılacak nihai dayanım değerlerinde belirleyici ve önemli bir faktör olduğunun göstergesidir.



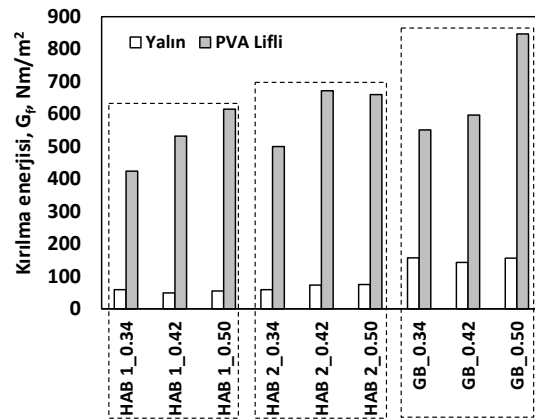
Şekil 5. Yalın ve PVA lif ile takviye edilmiş betonlara ait su/bağlayıcı oranı ile yarmada çekme dayanımı (sol) ve eğilme dayanımı (sağ) ilişkileri (120 gün).

3.3. Kırılma enerjileri

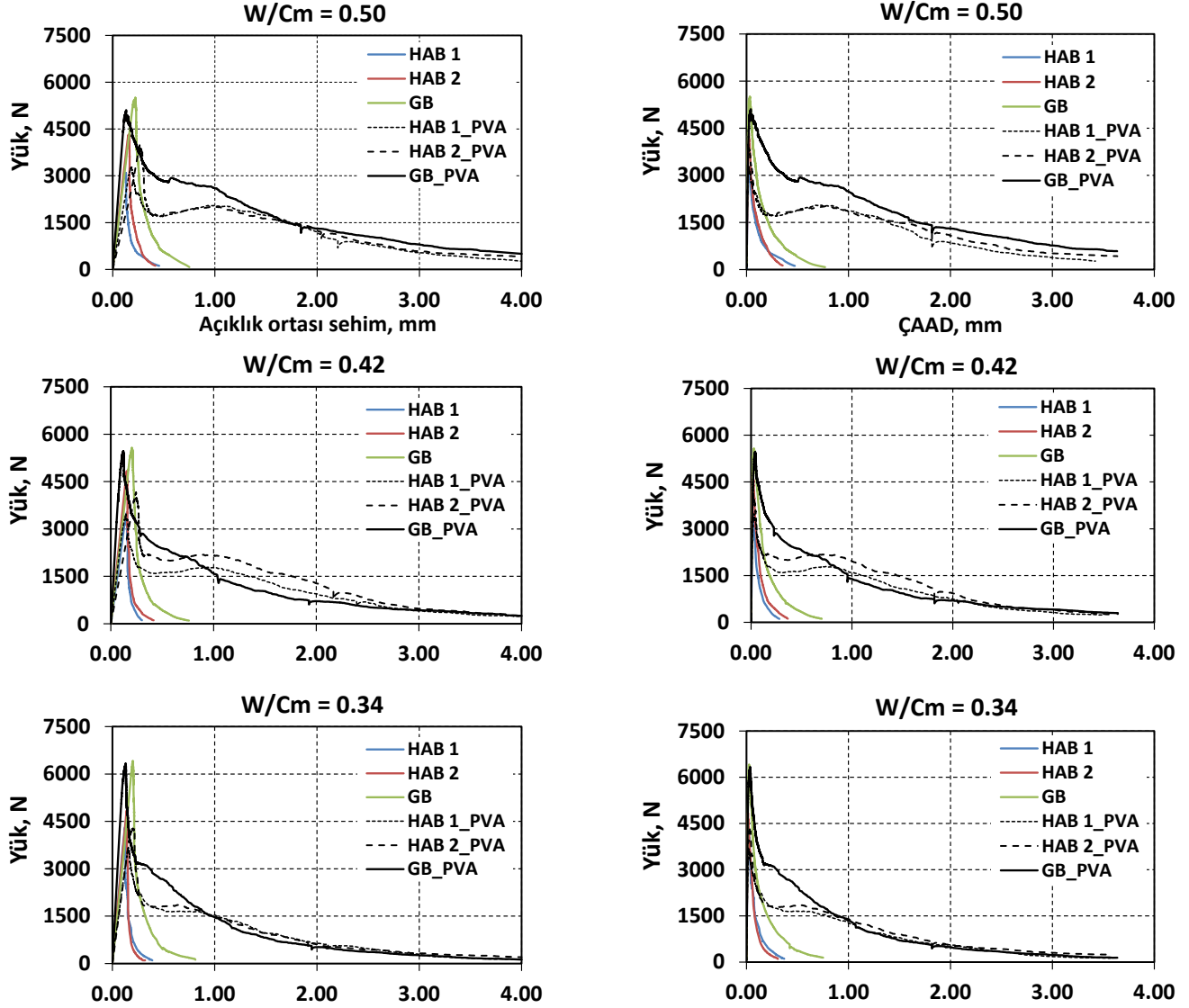
Yalın ve PVA lif ile güçlendirilmiş tüm beton serilerine ait eğilme deney numunelerinden 120 gün kürleme sonunda elde edilen kırılma enerjisi değerleri, su/bağlayıcı oranı etkisinin de görülebileceği şekilde Şekil 6'da verilmektedir. Şekil 7'de tüm betonlara ait yük - açıklık ortası sehim ve yük - çatlak açığı açılma deplasmanı (ÇAAD) ilişkileri, Şekil 8'de ise sadece yalın betonlara ait yük - açıklık ortası sehim ilişkileri görülmektedir. Şekil 6'da verilen grafik incelendiğinde iki önemli nokta göze çarpmaktadır. Bunlardan birincisi, lif kullanımı ile birlikte kırılma enerjilerindeki önemli artıştır. Bu artış HAB-1 serileri için ortalama %870, HAB-2 serileri için ortalama %780 ve GB serileri için ortalama %340 mertemelerinde olmuştur. Yalın beton karışımlarına göre kırılma enerjilerindeki artış oranları, betonların kuru birim hacim ağırlık değerlerinin artması ile azalmaktadır.

Göze çarpan diğer önemli nokta ise GKA içeren yalın HAB-1 ve HAB-2 betonlarının kırılma enerjileri ile yalın GB karışımlarının kırılma enerjileri arasındaki farklılıktır. Lif içermeyen HAB-1 serisine ait ortalama kırılma enerjisi değeri 54 Nm/mm², HAB-2 serisine ait ortalama kırılma enerjisi değeri 69 Nm/mm² ve GB serisine ait ortalama kırılma enerjisi değeri

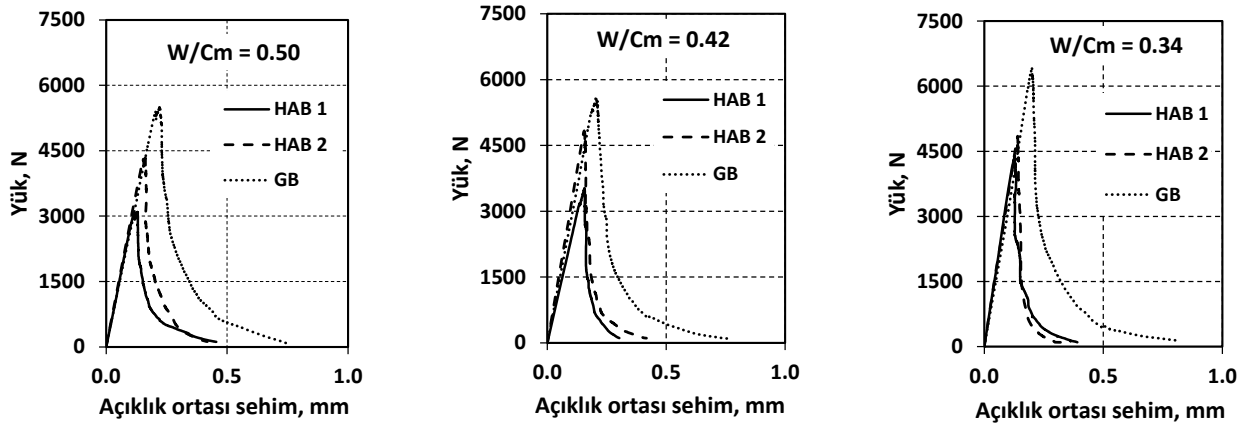
ri ise 152 Nm/mm² olarak bulunmuştur. HAB serileri ile GB serileri arasındaki bu farklılık, GKA kullanımının betonların kırılma davranışını gevreklettiğinin de bir ifadesidir. Yalın betonlara ait yük - açıklık ortası sehim ilişkilerinin verildiği Şekil 8'de, sözkonusu durum net olarak görülebilmektedir. Bu sonuçla ilgili gerekçeler giriş paragrafında tartışılmıştır.



Şekil 6. Yalın ve PVA lif ile takviye edilmiş betonlara ait kırılma enerjisi değerleri. (120 gün).



Şekil 7. Tüm betonlara ait Yük (N) - Açıklık ortası sehim (mm) ve Yük (N) - Çatlak ağız açılma deplasmanı (ÇAAD) eğrileri.



Şekil 8. Yalın betonlara ait yük (N) - açıklık ortası sehim (mm) ilişkileri.

3.4. Yalın betonlara ait elastik özellikler

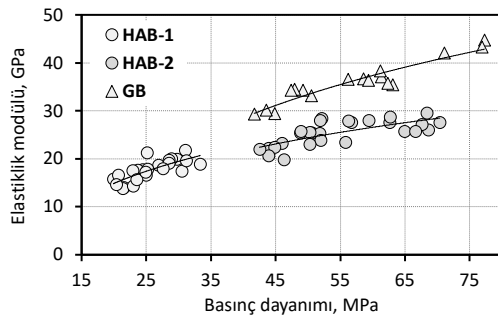
Betonların elastiklik modülü tahmini yapısal tasarım bakımından önemlidir. Betonda kullanılan iri agregre konsantrasyonu ve agregre cinsi (yüzey özellikleri, yoğunluğu) sertleşmiş betonun elastik özelliklerini önemli derecede etkileyen kritik parametrelerdir. Literatürde, betonun dayanımı ile elastiklik modülü arasındaki ilişkileri veren çok sayıda modele rastlamak mümkündür. Bu modellerin bazıları dayanımın yanında betonun birim hacim ağırlığı ve agregre tipi gibi bazı diğer parametreleri de içermektedir. Tablo 5'te bazı tahmin modelleri verilmiştir. Bu bölümde, sunulan bu çalışma kapsamında elde edilen veriler doğrultusunda geleneksel (GB) ve agregre olarak genleştirilmiş kil agregre içeren yalın (lifsiz) betonların (HAB) elastiklik modülleri ile Tablo 5'te verilen tahmin modelleri karşılaştırılacak ve genleştirilmiş kil agregresi içeren betonların elastiklik modülü tahmini için bazı değişiklikler önerilecektir.

Model İsmi	Tahmin modeli (MPa)
ACI 318 [9]	$E_c = 0.043 \cdot w_c^{1.5} \cdot \sqrt{f'_c}$
ACI 363 [10]	$E_c = (3320\sqrt{f'_c} + 6900) \cdot \left(\frac{w_c}{2320}\right)^{1.5}$
CEB-FIB [4]	$E_c = 21500 \cdot \alpha \cdot [f'_c/10]^{1/3}$ (a)
TS 500 [11]	$E_c = 3250\sqrt{f'_c} + 14000$

^a α (A/f_a)=Bazalt ve yoğun kireç taşı agregraları için 1,2; kuvarsit agregraları için 1,0; kireç taşı agregraları için 0,9 ve kum taşı agregraları için 0,7.

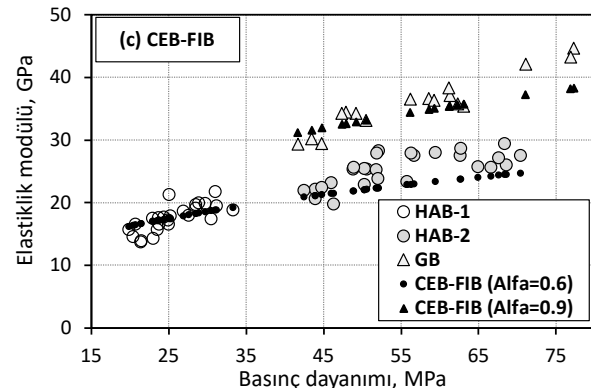
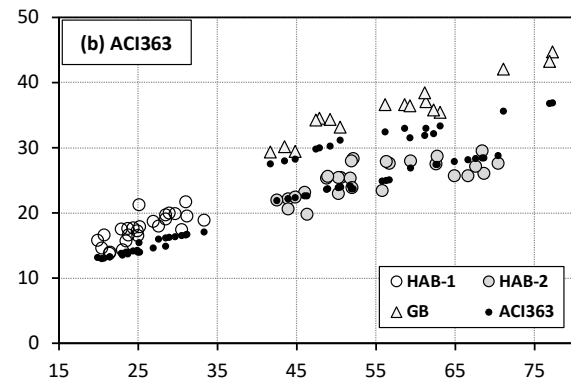
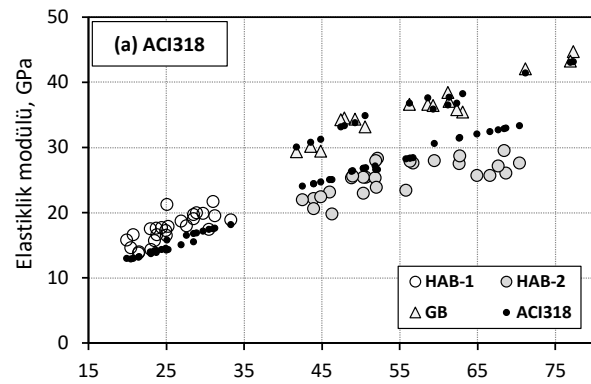
Tablo 5. Betonların elastik modülü tahmini için kullanılan bazı tahmin modelleri.

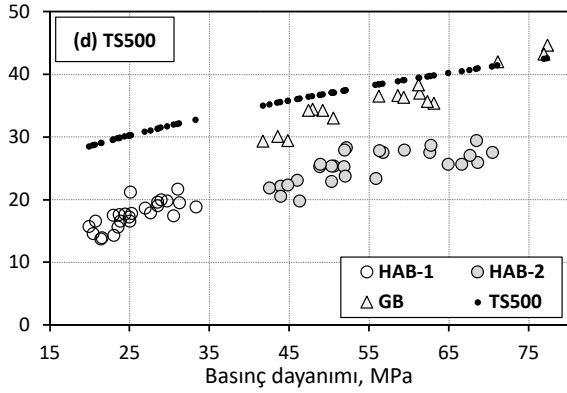
Şekil 9'da GB ve HAB'ların silindirik basınç dayanımı ile elastiklik modülü arasındaki ilişkiler verilmiştir. Genel olarak, betonların basınç dayanımları arttıkça, elastiklik modüllerinin de arttığı görülmektedir. Aynı grafikte, betonda kullanılan agregre tipinin de elastiklik modülü üzerindeki önemli etkisi gözlemlenebilir. Yaklaşık 40MPa ve 70MPa basınç dayanımı aralığında karşılaştırıldığında, geleneksel betonların elastiklik modüllerinin HAB-2 betonlara göre belirgin şekilde daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 9. GB ve HAB'ların silindirik basınç dayanımı ile elastiklik modülü arasındaki ilişkiler.

Bunun durum, hacimsel olarak aynı agregre konsantrasyonuna sahip bu betonlar arasındaki agregre cinsi farklılığından kaynaklanmaktadır. GB'lerde kullanılan doğal kalker agregraları HAB-2'lerde kullanılan GKA-2 agregralarına göre çok daha rijit yapıdadır. Dolayısıyla, betonların elastiklik modüllerinin tahmininde sadece basınç dayanımını göz önüne alınan tahmin modellerinin kullanılması, gerçekçi tahminlerin yapılabilmesi bakımından tatmin edici değildir. Daha gerçekçi tahminlerin yapılabilmesi için, agregre tipinin ve bundan etkilenebilecek olan beton birim hacim ağırlığının da modellere dâhil edilmesi önemli olacaktır. Şekil 10, Tablo 5'te verilen tahmin modelleri ile bu çalışmada elde edilen değerlerin karşılaştırmasını göstermektedir.





Şekil 10. Bazı tahmin modelleri (Tablo 5) ile bu çalışmada elde edilen değerlerin karşılaştırması.

Tablo 5'te verilen modellerden ACI 318, ACI 363 ve CEB-FIB tahmin modelleri beton dayanımının yanında, birim hacim ağırlıkları da dikkate almaktadır. Bunun yanında, TS-500 tahmin modelinde sadece basınç dayanımı bir değişken olarak modelde yer almaktadır. Şekil 10'da görüldüğü gibi, ACI 318, ACI 363 ve CEB-FIB tahmin modelleri geleneksel ve hafif betonların elastiklik modüllerini kabul edilebilir limitler içerisinde tahmin edebilmektedir. İlgili grafiklere daha yakından bakıldığında, ACI 318 ve CEB-FIB ($\alpha=0,9$ olması durumunda) tahmin modellerinin geleneksel betonlar için elde edilen değerler ile uyum içerisinde olduğu, ancak CEB-FIB modelinin 70-80 MPa dayanım aralığında bu betonların modüllerini bir miktar aşağıdan tahmin ettiği görülmektedir. Diğer taraftan, ACI 363 modeli dikkate alındığında, 40-80 MPa dayanım aralığında geleneksel betonların elastiklik modüllerini bir miktar aşağıdan tahmin ettiği görülebilir. Diğer bir değişle, ACI 363 modelinin, ACI 318 ve CEB-FIB ($\alpha=0,9$) modellerine göre daha konservatif olduğu düşünülebilir. Beton birim hacim ağırlığının dikkate alınmadığı TS-500 tahmin modeli için ise durum daha belirgindir. Şekil 10'da incelendiğinde bu modelin geleneksel betonların elastiklik modüllerini özellikle 40-65 MPa aralığında bir miktar yüksek tahmin ettiği görülebilir.

Hafif agregalı betonlar dikkate alındığında ise, ACI 318 ve ACI 363 modellerinin HAB-1 betonlarının modüllerini bir miktar aşağıdan tahmin etmiştir. Ancak, CEB-FIB bağıntısı, $\alpha=0,6$ olarak dikkate alındığında HAB-1 için elde edilen veriler ile uyum içerisinde değildir. HAB-2 verileri dikkate alındığında en iyi uyum ACI 363 modeli ile sağlanmaktadır. Bu betonların elastiklik modülleri ACI 318 modeli ile bir miktar yukarıdan ve $\alpha=0,6$ olması durumunda CEB-FIB modeli ile bir miktar aşağıdan tahmin edilmiştir. TS-500 bağıntısının hafif betonların elastiklik modüllerinin tahmininde kullanılmasının uygun olmadığı Şekil 10'da açıkça görülmektedir. Bunun nedeni ise, bu bağıntının betonların birim hacim ağırlık değerlerini bir değişken olarak barındırmamasından kaynaklıdır.

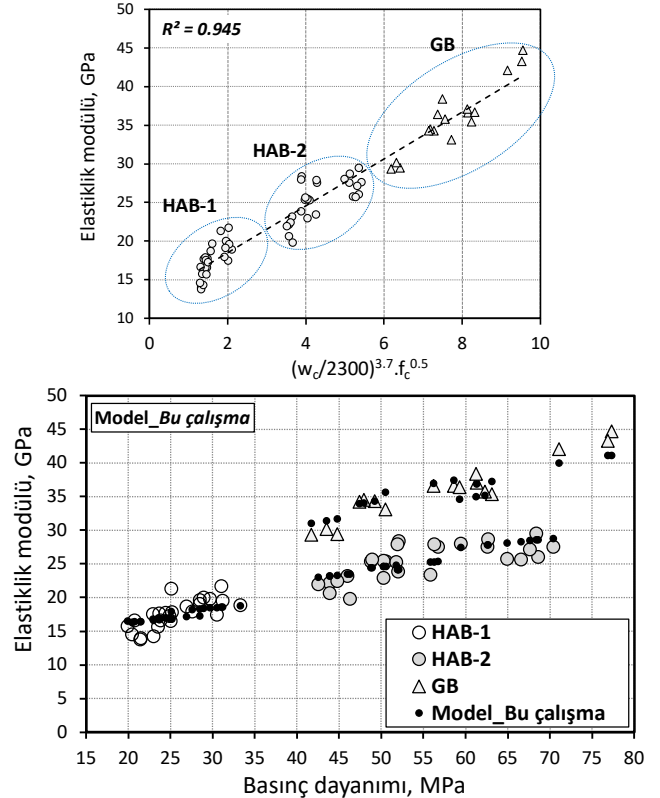
Bu çalışma kapsamında elde edilen veriler kullanılarak, geleneksel ve hafif agregalı betonların elastiklik modülleri

nin tahmini için basınç dayanımı ve birim hacim ağırlık değişkenlerini içeren yeni bir bağıntı türetilmesine de çalışılmıştır. Bu bağıntıya birim ağırlık etkisi $(w_c/2300)^m$ olarak dahil edilmiştir. Burada w_c , betonun birim hacim ağırlığını (kg/m^3) ve m ise bir üstel faktörü ifade etmektedir. Tasarım özelliklerine bağlı olarak geleneksel betonların birim ağırlıkları 2300 ile 2400 kg/m^3 arasında değerler vermekte olup $(w_c/2300)$ değişkeni betonların birim ağırlıklarını normalize edebilmek amacıyla bağıntıya konmuştur. Beton birim ağırlığı yükseldikçe bu katsayı artacak veya düşükçe azalacaktır. Sonuç olarak aşağıdaki formda bir bağıntı önerilmiştir (Denklem 1):

$$E \text{ (MPa)} = A \cdot (f'_c)^n \cdot (w_c/2300)^m + B \quad (\text{Denklem 1})$$

Burada E , MPa cinsinden elastiklik modülünü ve f'_c , beton silindirik basınç dayanımını (MPa) ifade etmektedir. Bu bağıntıdaki " m " değeri ilgili bağıntıda " m "e farklı değerler verildiğinde en yüksek korelasyon katsayısını veren değer olarak belirlenmiştir. Pek çok tahmin modelinde basınç dayanımı $(1/2)$ üssü ile modellere dâhil edilmektedir. Bu bakımdan Denklem 1'deki " n " değeri 0,5 olarak dikkate alınmıştır. Bu açıklamalar doğrultusunda yapılan hesaplamalar neticesinde $m=3,7$ olarak belirlenmiş ve denklemin korelasyon katsayısı, $r^2=0,945$ olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuç tahmin modeli Denklem 2'de verilmiştir. Deney sonuçları ile önerilen bağıntı (Denklem 2) arasındaki karşılaştırma Şekil 11'de verilmektedir.

$$E \text{ (MPa)} = 3000 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot (w_c/2300)^{3,7} + 12500 \quad (\text{Denklem 2})$$

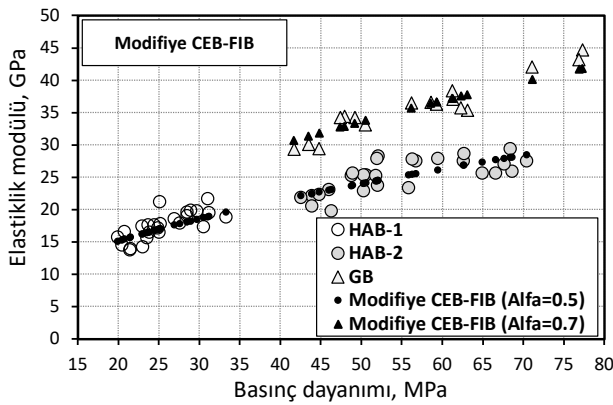


Şekil 11. Deney sonuçları ile önerilen bağıntı (Denklem 2) arasındaki karşılaştırma.

CEB-FIB modeli hafif agregalı betonları içermemekte ve bu tür agregalar için bir alfa katsayısı önermemektedir. Tablo 5'ten de görülebileceği gibi bu bağıntının kullanılması agrega tipi hakkında bilgi gerektirmektedir. Bu çalışmada elde edilen veriler ışığında söz konusu tahmin modeli için de bir Modifiye-CEB-FIB modeli önerilmiştir. Yazarlar, önerilen bu modifiye edilmiş modelin de uygulamada çalışan mühendisler için bir fayda sağlayacağını düşünmektedir. CEB-FIB modeli Denklem 3'teki gibi revize edilmiştir.

$$E \text{ (MPa)} = 21500 \cdot \alpha \cdot \sqrt{(f'_c)/10} \quad (\text{Denklem 3})$$

Bu bağıntıda kalker agregası için $\alpha=0,7$ ve genişmiş kil agregası için $\alpha=0,5$ alınması durumu için deney verileri ve model arasındaki karşılaştırma Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12. Deney sonuçları ile modifiye CEB-FIB model (Denklem 3) arasındaki karşılaştırmalar.

4. GENEL SONUÇLAR

Yürütülen deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki genel sonuçlara ulaşılmıştır.

- i. Lifli ve yalın betonlarda kuru birim ağırlık değerlerinin yükselmesi ile basınç dayanım değerlerinin arttığı ve su/bağlayıcı oranının artması ile birlikte dayanımların azalma eğiliminde olduğu görülmüştür.
- ii. 28 gün kürlenme sonunda, HAB-2 karışımlarında GB karışımlarına göre içsel kürlenme etkisinin dayanımları belirleyici bir etki oluşturduğu, ancak ilerleyen zamanlarda artan matris dayanımı ile birlikte agrega dayanımının beton dayanımını belirleyen etken olarak öne çıktığı gözlenmiştir.
- iii. Lifli ve yalın betonlarda kuru birim ağırlık değerlerinin yükselmesi ile yarmada çekme ve eğilme dayanım değerlerinin arttığı, su/çimento oranlarının azalması ile bu dayanım değerlerinin azaldığı görülmüştür.
- iv. Genişmiş kil agregası kullanımı yalın betonların kırılma davranışını gevrekleştirmiştir.

v. Lif kullanımı ile birlikte kırılma enerjileri önemli derecede artmıştır. Yalın beton karışımlarına kıyasla lifli betonların kırılma enerjilerindeki artış oranları, betonların kuru birim hacim ağırlık değerlerinin artması ile azalmıştır.

vi. Doğal agrağa içeren geleneksel betonların ve genişmiş kil agregası içeren yarı hafif yapısal betonların elastiklik modüllerinin tahmini için bazı modeller önerilmiştir. Söz konusu bağıntılar lif içeriği olmayan yalın betonlara ait veriler kullanılarak elde edilmiştir.

Kaynaklar

1. American Concrete Institute, 1999. Guide for structural lightweight aggregate concrete, ACI 213R-87.
2. ASTM International, 2014. Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete, ASTM C330/C330M - 13.
3. Türk Standardları Enstitüsü, 2002. Beton- Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk. TS EN 206-1.
4. Comité Euro-International du Béton, 1990. CEB-FIP Model Code; Bulletin d'Information, Thomas Telford Services, London.
5. Dilli, M.E., Atahan, H.N., Şengül, C. "A Comparison of Strength and Elastic Properties between Conventional and Lightweight Structural Concretes Designed with Expanded Clay Aggregates", Construction and Building Materials, Vol. 101, pp. 260-267, 2015.
6. Bogas, J.A., Gomes, A. "Compressive Behavior and Failure Modes of Structural Lightweight Aggregate Concrete - Characterization and Strength Prediction", Materials & Design, Vol. 46, 832-841, 2013.
7. Taşdemir, M.A., Taşdemir, C., Akyuz, Jefferson, S., A.D., Lydon, F.D., Barr, B.I.G., "Evaluation of Strains at Peak Stresses in Concrete: A Three-phase Composite Model Approach", Cement and Concrete Composites, Vol.20, 301-318, 1998.
8. KURARAY, Inc., Fibers and Industrial Materials Division, <http://kuralon-frc.kuraray.com/product-application/formortar/recs>.
9. ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary (ACI 318R-08). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI; 2008.
10. ACI Committee 363. State of the Art Report on High-Strength Concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI; 1992.
11. TS 500. Requirements for design and construction of reinforced concrete structures. Ankara: Turkish Standards Institute; 2000.