



Ultra Hafif Betonda Güncel Gelişmeler

Current Developments in Ultra-Light Weight Concrete

İlker Bekir Topçu¹, İsmail Hocaoğlu², İlkey Kara³

^{1,3}Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26040 Eskişehir, TÜRKİYE
²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bolvadin Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 03300 Afyonkarahisar, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 20/04/2023

Kabul / Accepted: 06/06/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 30/06/2023

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2023

Öz

Günümüzün en önemli yapı malzemelerinden biri olan betonun farklı özel çeşitleri bulunmaktadır. Bunlardan biride hafif betonlardır (HB). HB'ler üzerinde yapılan çalışmalarla birim ağırlıkları azaltılmakta ve üretilen betonlara ultra hafif beton (UHB) denilmektedir. Birim ağırlıkları azaltılmaya çalışılırken basınç dayanımı, ses emme özelliği, ısı iletkenlikleri, yangına ve dona dayanıklılıkları gibi özellikleri iyileştirilmeye çalışılmaktadır. UHB'lerin üretiminde kullanılan agregalarda zamanla değişime uğramaktadır. Atık malzemelerin değerlendirilerek sürdürülebilir ve doğa dostu UHB çalışmaları devam etmektedir. Doğal kaynakların kullanılması yerine atıkların değerlendirilerek kullanılması UHB'lere karşı ilginin ve talebin artmasını sağlamaktadır. Böylece UHB'lerin ekonomik, çevreci ve sürdürülebilirliği dikkat çekmektedir. Kullanılan agregaların türlerine ve boyutlarına göre UHB'ler sadece binalarda ısı ve ses yalıtım malzemesi olarak kullanılmasının yanı sıra dayanım özellikleri artırılarak, yapının kendi yükünü azaltarak deprem kuvvetlerinin etkilerini de azaltması amaçlanmaktadır. Bu çalışmada mevcut literatür incelenerek UHB'lerle ilgili son gelişmeler incelenmiştir. UHB'ler arasında karşılaştırmalar yapılmakla birlikte avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Ultra hafif beton, HA, dayanım, sürdürülebilirlik, ısı iletkenlik”

Abstract

Concrete, one of today's most important building materials, has different special types. One of them is lightweight concrete (LWC). With the studies on LWC, the unit weights tried to be reduced, and ultra-light concretes (ULWC) were tested. While reducing unit weights, it is tried to improve properties such as compressive strength, sound absorption feature, thermal conductivity, and fire and frost resistance. Aggregates used in the production of ULWC change over time. Sustainable and nature-friendly ULWC works continue by evaluating waste materials. Using waste instead of natural resources increases the interest and demand for ULWC. Thus, its economic, environmental, and sustainability draw attention. According to the types and dimensions of the aggregates used, ULWCs are not only used as heat and sound insulation materials in buildings but also aim to reduce the effects of earthquake forces by increasing the strength properties of the building and reducing its load. This study investigates the latest developments in ULWC by examining the literature sources. Comparisons were made between ULWC, and their advantages and disadvantages were evaluated.

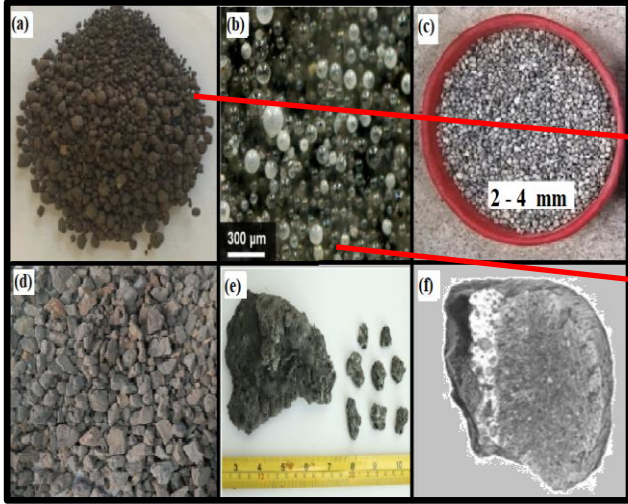
Key Words

“Ultra-light weight concrete, light weight aggregate, strength, sustainability, thermal conductivity”

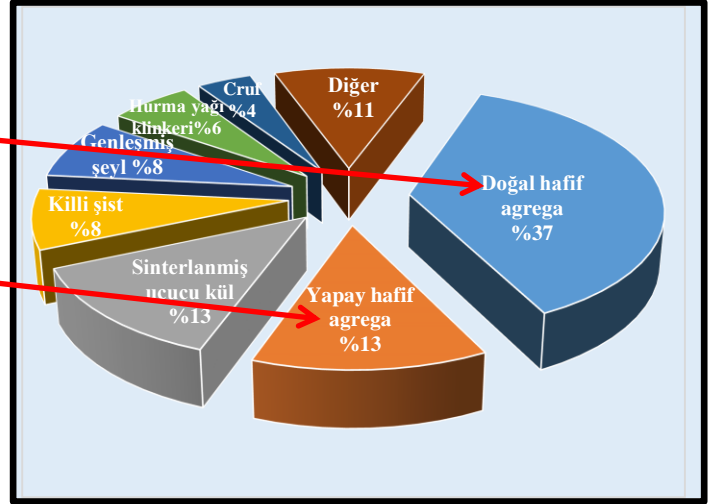
1. Giriş

Geçmişteki yapılar incelendiğinde hafif betonların (HB) 3000 yıl öncesine kadar kullanıldığı görülmektedir. Roma İmparatorluğu döneminde inşa edilen Cosa limanı ve mimari açıdan büyük öneme sahip Pantheon kubbesi gibi önemli yapılarda HB yapısı görülmektedir (Yu, vd., 2015). HB'lerin kullanım amacı yapının yükünü azaltarak yapıya etki edecek deprem kuvvetlerini ile olabilecek zararı azaltmaktır (Yasar vd., 2003). HB'lerin dayanımının, zaman ve bakım koşullarına bağlı olarak artması normal beton (NB) gibi olmaktadır. HB'lerde ısı iletkenliğinin düşük olması nedeniyle hidrasyon sırasında ortaya çıkan ısı beton sıcaklığını artmaktadır. Bunun sonucu olarak betonun iç kısımlarında priz alma ve sertleşme olayları daha çabuk oluşarak betonun erken dayanım kazanmasını sağlamaktadır (Topçu ve Işıkdag, 2008).

HB'ler üretim tekniklerine göre ayrı olarak sınıflandırılmasının yanında ayrıca kullanım alanları ve özelliklerine göre ayrılmaktadırlar (Topçu, 1988). Çok düşük birim ağırlığa sahip olan HB'ler yalıtım betonu olarak yapıda yer alırken, birim ağırlıklarının 2000 kg/m^3 'e yaklaşması ile taşıyıcı hafif betonarme ve ön gerilmeli beton olarak kullanıldığı belirtilmektedir (Topçu ve Uygunoğlu, 2021). Volkanik cürüfların HB agregası olarak kullanıldığı, betonun birim ağırlığını azaltmakta başarılı olduğu bilinmektedir (Topçu, 1989; 1996). Diğer bir çalışmada HA olarak bims kullanımı ile hafif polimer beton üretimi gerçekleştirilmiştir (Uygunoğlu vd., 2012). Bilim insanları HB üretiminde agrega olarak sinterlenmiş uçucu kül, killi şist, genleşmiş şeyl, hurma yağı klinkeri vb. malzemeleri de tercih etmişlerdir (Sifan vd., 2023) (Şekil 1). Bu agregalar düşük birim ağırlıkları ile yapısal ve yapısal olmayacak şekilde yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Zareef, 2010). Önceki araştırmalarda HB üretiminde en fazla doğal ve yapay HA'lar tercih edilmiştir (Sifan vd., 2023) (Şekil 2). Literatürdeki araştırmalarda UHB'lerin yoğunluklarının 800 kg/m^3 'den daha düşük olduğu, ultra ısı iletkenlik özelliği gösterdiği (ısı iletkenlik katsayılarının 0.14 W/(m.K) 'den daha düşük olduğu) gözlenmiştir (Spiesz ve Heidelberg, 2017). Ayrıca UHB'lerin basınç dayanımları da 10 MPa 'nın üzerine çıkabilmektedir (Spiesz ve Heidelberg, 2017).



Şekil 1. HB üretiminde kullanılan agregalar; a- doğal kil, b- yapay HA, c- sinterlenmiş UK, d- killi şist, e- hurma yağı klinkeri, f- cüruf (Sifan vd., 2023)



Şekil 2. Önceki araştırmalarda HB üretiminde kullanılan agrega oranları (Sifan vd., 2023)

Taşıyıcı özellikleri olmayan birim ağırlıkları daha az olan HB'ler ultra hafif beton (UHB) olarak adlandırılmaktadır (Subaşı vd., 2009). UHB'ler düşük yoğunluğu, iyi yangın direnci ve ısı yalıtımındaki gösterdiği avantajlar yapısal olan ve olmayan pek çok uygulamalarda kullandığı belirtilmektedir (Yu vd., 2013). Geleneksel HB'lerdeki agregaların yoğunlukları yaklaşık olarak $0.8-1.8 \text{ kg/m}^3$ arasında değiştiği bilinmektedir. Ancak betonda bu agregaların kullanılması (genleştirilmiş kil vb.) betonu yeterince hafifletmemektedir. Bu durum bilim insanlarını alternatif malzemelerin kullanılmasına yönlendirmiştir. Örnek olarak beton üretiminde yoğunlukları $0.3-0.8 \text{ kg/m}^3$ arasında değişen genleşmiş cam agregaların kullanılması HB üretimine yeni bir vizyon katmıştır (Spiesz ve Heidelberg, 2017). Ancak; HB üretimi için kullanılan düşük yoğunluklu alternatif malzemeler betonun mekanik dayanımlarını (eğilme, basınç vb.) ve dayanıklılık özelliklerini fark edilebilir miktarda azaltmaktadır. Bu nedenle UHB üretiminde ilk amaç çimento esaslı malzemenin mekanik dayanımını en yüksek değerlerde tutabilmektir. Ayrıca, porozitesi yüksek olan betonun ısı iletkenliğini (yalıtım özelliğini arttırmak amacıyla) azaltmaktır. Böylelikle sürdürülebilir, deprem açısından güvenli beton üretilmektedir. Günümüzde UHB'lerle ilgili çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. UHB'ler farklı amaçlar için kullanılabilir. Örnek olarak UHB'ler yapılarda dış duvarlarda ve iç bölme duvarlarda kullanılabilirler. Ayrıca UHB'ler dış cephe kaplaması olarak da kullanılabilir. UHB'lerin kullanıldığı bazı yapılara ait fotoğraf Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3a Berlin'de UHB ile üretilen Schlaich evinin, Şekil 3b ise yine UHB ile üretilen Eindhoven evinin bir görünümüdür. Schlaich evinde kullanılan UHB'nin basınç dayanımı 7.4 MPa , yoğunluğunun 760 kg/m^3 ve ısı iletkenliğinin 0.18 W/(m.K) olduğu belirlenmiştir. Eindhoven evinde kullanılan UHB'nin ise basınç dayanımı 10 MPa , yoğunluğunun 780 kg/m^3 ve ısı iletkenliğinin 0.13 W/(m.K) olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3. UHB ile üretilen yapı örnekleri (a- Berlin'deki bir yapı b-Hollanda'daki bir yapı) (theconstructor.org, 2023)

Bazı araştırmalar sonucu UHB'lere silis dumanı ve nano boyutlu silika katılması ile boşluk oranının düşürülebileceği, mekanik dayanımlarının ise artırılabilceği belirlenmiştir (Yu vd., 2015). Ayrıca günümüzdeki teknolojik araçlar (3 boyutlu yazılar vb.) kullanılarak UHB üretilmesini amaçlayan bazı çalışmalar bulunmaktadır (Avrupa Birliği Projesi, 2021). Bu çalışmada da literatürdeki UHB'lerin yoğunlukları, basınç dayanımları, ısıl özellikleri, rötre değerleri, E-modülleri, ses emme özellikleri ve dayanıklılıkları incelenmiştir.

2. Ultra Hafif Beton Çeşitleri

Beton karışımında hava, mevcut agregada, iri agregaların arasında ve çimento matrisinde bulunmaktadır. HB üretimi karışımdan ince agregaya çıkartılarak havanın iri agregalar arasında kalmasını sağlayarak, HA kullanarak ve çimento matrisinde boşluk oluşturarak gerçekleştirilmektedir (Baradan vd., 2015).

2.1 Ultra Hafif Hücresel/Köpük Beton

Karışıma çeşitli köpük ajanı katkıları eklenerek hava boşlukları oluşturmakta ve beton yoğunluğunun azaltıldığı diğer bir yöntem köpük beton üretimi olmaktadır. Yapılan çalışmalarda yoğunluğu 300 kg/m^3 'den daha az olan ultra hafif köpük betonların ısı yalıtımları için üstün özellikler gösterdiği belirtilmektedir (Shi vd., 2022). Ultra hafif köpük beton düşük ısıl iletkenliğine (0.10 W/(m.K)) sahip olması beklenmektedir. Nano gözenekli aerogeller kullanılarak 198 kg/m^3 yoğunluğa sahip, ısıl iletkenliği 0.049 W/(m.K) değerinde ultra hafif köpük betonun hazırlanabileceği belirlenmiştir (Li vd., 2019).

2.2 İnce Agregasız Ultra Hafif beton

İnce agregaya kullanılmadan çimento, su ve iri agregaya karıştırılarak elde edilen beton ince agregasız hafif beton olarak adlandırılmaktadır. İri agregaya boyutu genellikle $10\text{-}20 \text{ mm}$ olarak değişmektedir. Ayrıca, daha iri boyutlarda da kullanılabilir. Kullanılması gereken agreganın türü de önemli olmakla birlikte hafif betonun yoğunluğunu etkilemektedir. HA kullanarak üretilen ince agregasız hafif betonların yoğunluğu $800\text{-}1400 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir (Mohammed ve Hamad, 2014).

2.3 Hafif Agregalı Ultra Hafif Beton

Günümüzde HB'lerin iyi ısı yalıtımı, yangına karşı dayanıklı olmaları ve yoğunluklarının NB'lere göre az olması gibi avantajları dikkat çekmektedir. Ancak; UHB üretimi işlemleri NB üretimi aşamalarından farklıdır. UHB üretimlerinde işlenebilirlik, ayrışma, homojenlik, sıkıştırma vb. sorunlar oluşabilmektedir (Spiesz ve Heidelberg, 2017). Ayrıca UHB üretiminde kullanılan agregaların boşluklu yapısından dolayı, özellikle hidrasyonun ilk aşamalarında ısıyı hapsederek hidrasyon reaksiyonlarının olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır. Hidrasyon sıcaklığının aşırı düşmesi, çimento esaslı malzemelerde mikro boyutlu çatlakların oluşmasına neden olabilmektedir. HA'lı betonların birçok uygulama alanında görülmektedir. Bunlar uzun açıklı köprüler, yüksek binalar olmakla beraber yüzer ve açık deniz yapıları vb. yapılarıdır (Zhang vd., 2022). HA'lı betonlarda kullanılan agreganın birim ağırlığı, sertliği, boyutu önemli olmakla beraber uygulanan s/ç oranı da önem taşımaktadır. HA'lı HB'lerde su/çimento oranının artması ile çimento matrisinde ve agregaya çimento ara yüzeyinde boşluk miktarının artmasına neden olmakta, basınç dayanımında ise azalmalara neden olabilmektedir (Lo vd., 2007). Kırmı taş agregaya yerine HA kullanımı, betonun yoğunluğunun azalmasını sağlamaktadır. Bu amaçla uçucu külün agregaya olarak kullanıldığı çalışmalarda HB'nin homojen olduğu, işlenebilir olduğu görülmektedir (Yıldırım ve Özturan, 2013). Eurocode 2'ye göre HA'ların parçacık yoğunluğu 2000 kg/m^3 'ten az olmalıdır. HB'lerin E-modülü genellikle aynı dayanımdaki normal betona göre %20-%50 daha az değerinde olabilmektedir (Topçu ve Uygunoğlu, 2010; 2007).

2.4 Ferrocement Beton (FB)

Ferrocement bileşenleri kaba agregaya içermemeleri nedeniyle istenilen şekilde inşa edilebilmektedir (Naaman, 2000; MVarma ve Hajare, 2015). Yapılan çalışmalarda ferrocement beton (FB) üretimi ile HB üretilebileceği belirlenmiştir. FB'nin çeşitli uygulama alanlarında kullanıldığı bilinmektedir. Literatürdeki araştırmalarda Ferrocement HB ile kano ve çadır yapımı gerçekleştirilmiş, çalışmanın teknik uygulamasında da başarılı sonuç elde edilmiştir (Topçu, 1999; 2000). Eltaly vd. (2023) yedi FB kolon ve dört konvansiyonel beton kolon (NB) dökmüşler ve eksenel ve eksantrik yükün etkisi altında kolonların davranışlarını test etmişlerdir. FB ile üretilen kolonlarda kullanılan tellerin konvansiyonel betonlardaki etriyelere alternatif olduğu, böylelikle BA elemanın ağırlığının azaltılabileceği belirlenmiştir. Eltaly vd. (2023) ayrıca beton ağırlığını daha da azaltmak için yeni bir yöntem geliştirmişler, polipropilen fiberlerle (PP) üretilen blokları kolonların orta kısımlarına yerleştirmişlerdir (Şekil 4). PP fiberlerle üretilen blokların birim hacim ağırlıkları 650 kg/m^3 olduğunu belirlenmiştir.



Şekil 4. Polipropilen fiberler ve ferrocement ile üretilen betonların üretim aşamaları (Eltaly vd., 2023)

3. Ultra Hafif Betonların Özellikleri

Günümüzde UHB'lerin tasarımında geri dönüşümden elde edilen genişletilmiş cam parçaları ve mikro silika vb. özel agregalar kullanılarak geliştirilmiş üretilen yapı malzemeleri bulunmaktadır. Üretimde kullanılan bu özel agregalar normal betonda yer alan kumun ve çakılın yerini almaktadır. Karışımdaki yüksek hava içeriği ile birim ağırlık 800 kg/m^3 'ü bulmaktadır (Roberz vd., 2017).

3.1 Dayanım

UHB çalışmasında kuru yoğunluğu $300-600 \text{ kg/m}^3$ arasında değişen EPS (polistiren boncuk) ve gözenek oluşturucu olarak doymuş bentonit kullanılmış ve basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. İki farklı boyutta EPS boncuk kullanılmakla birlikte toplam hacmi %40, 30 ve 20 olan beton karışımları belirlenmiştir. Beton hacminde EPS hacminin azalması ile 300 ve 400 kg/m^3 betonlarda basınç dayanımının azaldığı ancak 500 ve 600 kg/m^3 kuru yoğunluğu olan betonlarda arttığı gözlenmiştir (Xie vd., 2019). Ünal vd. (2007) diatomit katkılı HB üretmişler, 28 günlük basınç dayanımlarının $3.5-6 \text{ MPa}$, yoğunluğunun ise $950-1200 \text{ kg/m}^3$ arasında olduğunu gözlemlemişlerdir. Wang ve Tsai, (2006) yoğunlukları $800-1500 \text{ kg/m}^3$ arasında değişen öğütülmüş silt katkılı HB üretmişlerdir. 28 günlük basınç dayanımlarının $18-42 \text{ MPa}$ arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir.

Uçucu kül, genişletilmiş cam, silika aerojel ve prefabrik plastik parçaların birlikte kullanıldığı çalışmada en düşük kuru yoğunluğun $713,5 \text{ kg/m}^3$ olduğu, eğilme ve basınç dayanımlarının yoğunluğun azalması ile birlikte düştüğü belirtilmektedir (Adhikary vd., 2020). Yoğunluğu 1500 kg/m^3 'den daha düşük olan ve basınç dayanımının artmasını sağlayacak UHB ve yüksek dayanımlı ultra HA araştırmaları devam etmektedir (Zhang vd., 2022). Karakurt vd. (2010) agreganın %50 oranında zeolit ile yer değiştirilmesi sonucu 535 kg/m^3 yoğunluğa ulaşılabileceği ancak basınç dayanımının $3,2 \text{ MPa}$ gibi düşük değerler aldığını gözlemlemişlerdir. UHB'lerde basınç dayanımlarının incelendiği çalışmada köpük ajanı olarak hidrojen peroksit, uçucu kül, PP elyaf, köpük dengeleyici kullanıldığı, görünür yoğunluğun $100-300 \text{ kg/m}^3$ arasında değiştiği gözlenmiştir. Görünür yoğunluk azalırken basınç dayanımı 0.55 s/ç oranına kadar yükseldiği daha sonra azaldığı belirlenmiştir (Huang vd., 2015). Önceki yapılan araştırmalarda HB üretimi için elde edilen bazı 28 günlük basınç dayanımı ve E-modülleri sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Önceki araştırmalarda 28-günlük HB'ler için elde edilen E-modülleri ve basınç dayanımları

Araştırmacı	Çimento tipi	HA oranı, %	E-modülü	Basınç dayanımı, MPa
Zhou vd. (2021)	CEM I 52.5 R	33	27.3-28	74.5-79.8
Zhang vd. (2004)	ASTM- Tip-1	38-44	24.0-28.9	60-81.6

Zhang vd. (2005)	CEM-1 42.5R	34-44	24.2-28.9	60.8-67.4
Liu vd. (2021)	CEM I 52.5 R	53	23.2-31.3	68.8-98.1
Ahmmad vd. (2016)	CEM I 42.5 N	40	31.3	61.7
Bogas vd. (2014)	CEM I 42.5 R	35	21.8	61.1
Zhou ve Brooks (2019)	ASTM- Tip 1-2	45	17.5	60.1
Bajare vd. (2013)	CEM I 42.5 N	34-41	-	62
Wang ve Wang (2013)	CEM I 42.5 R	57	-	60.4-74.8
Sohel vd. (2018)	-	34-100	15.0-20.1	62.0-63.0
Ye vd. (2020)	CEM I 42.5 N	40	-	60.8-81.3

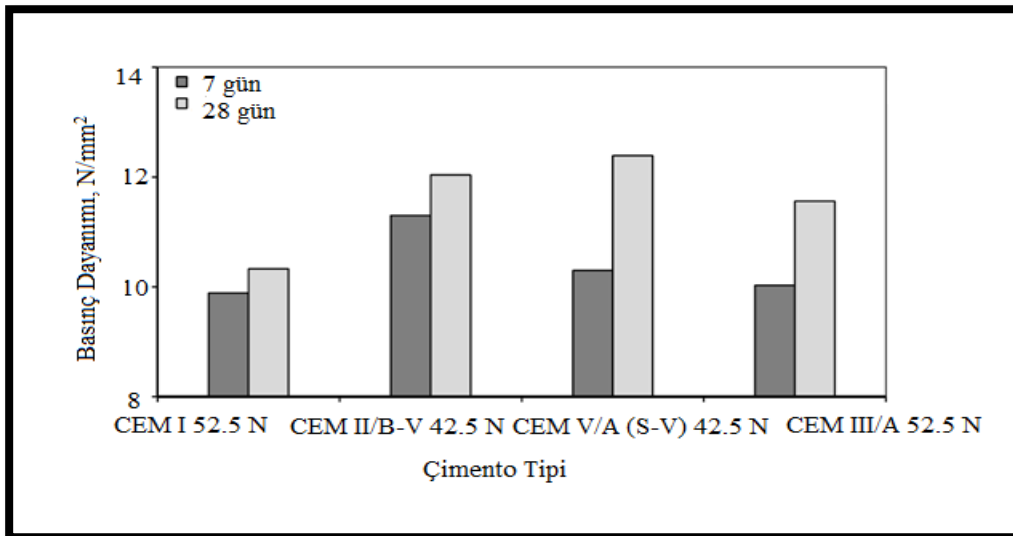
Tablo 2’de UHB uygulama sonuçları görülmektedir. Kullanılan çimento tipi ve agrega tipine göre yoğunluk, 28 günlük basınç dayanımları ve ısı iletkenlik değerlerindeki farklılıklar dikkat çekmektedir. Belirtilen değerler deney sonuçlarında ki aralıkları ifade etmektedir. Bu çalışmaların haricinde ultra hafif çimentolu kompozit ile ilgili araştırmalarda mevcuttur (Du, 2019).

Tablo 2. Ultra hafif beton çalışmaları ve elde edilen sonuçlar

Araştırmacı	Çimento tipi	Agrega Tipi	UHB Tipi	Yoğunluk (kg/m ³)	Basınç dayanımı, MPa	Isıl iletkenlik W/(m.K)
Yu vd. (2015)	CEM I 52.5 N, CEM II/B-V 42.5 N CEM III/A 52.5 N CEM V/A (S-V) 42.5N	Atık cam Nano silika Silika	UHB	650-700	10-12	0.12
Engin (2018)	CEM I 42.5 R	Perlit Genleştirilmiş cam, silika	UHB	150-468	0.13-0.87	0.039
Adhikary vd. (2020)	CEM I 42.5 R	aerojel, prefabrik plastik	UHB	862.4-713.5	3.72-12.2	0.302-0.356
Sikora vd. (2021)	CEM III/A 42.5 N	Nano silika ve Silis dumanı	UHAB HAB	450 850	~2.9-4.8 ~15-17.9	~0.12-0.17 ~0.22-0.34
Serelis ve Vaitkevicius (2022)	CEM I 42.5 R	Atık cam tozu	UHB	600	3-6	-
Bubeník vd. (2023)	CEM I 42.5 R	Cam köpük agrega	UHB	460-500	1.2-2.1	0.111-0.123

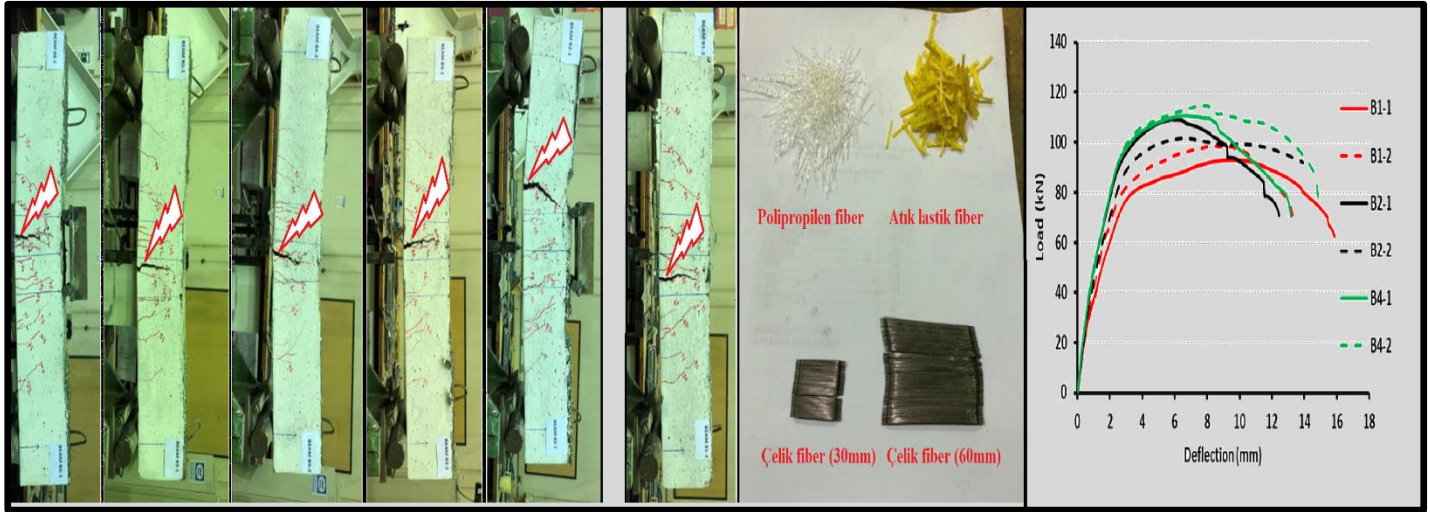
U:Ultra, H:Hafif, A:Agrega, B:beton

Yu vd. (2015) UHB’lerde çimento tipinin ve kür süresinin basınç dayanımına etkisini araştırmıştır. 7 gün kür edilen betonlarda CEM II/B-V 42.5N çimentosu kullanıldığında, 28 gün kür edilen betonda ise CEM V/A (S-V) 42.5 N çimentosu kullanıldığında en yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir (Yu, 2015) (Şekil 5). Şekil 5 incelendiğinde yaklaşık 12 MPa’lık bir basınç dayanımı elde edilmiştir.



Şekil 5. UHB’lerde çimento tipinin ve kür süresinin basınç dayanımına etkisi (Yu et al, 2015).

Alshannag vd. (2023) HA ile üretilen kirişlerin eğilme çatlaklarını karşılaştırmışlardır (Şekil 6). HB üretiminde bazı hibrit liflerin belirli oranlarda eklenmesi ile yüksek mekanik dayanım elde edilebileceği sonucuna ulaşmışlardır. İncelenen kirişler (PP lif katkılı, atık lastik lif katkılı ve çelik lif katkılı) deneysel olarak; ilk çatlama kadar doğrusal elastik aşama, çoklu büyümenin eşlik ettiği çatlama sonrası aşamada oluşan çatlaklar, çekme donatı aşamasının akması ve göçmenin meydana gelmesine kadarki plastik deformasyon aşamaları incelenmiştir. Şekil 4'te B1 ile belirtilen kontrol betonu, B2 30 mm (B1-1-%0.50, B1-2-%1) çelik lif katkılı betonu, B4 ise 60 mm (B4-1-%0.50, B4-2-%1) çelik lif katkılı betonu temsil etmektedir. HB'lerde çelik lif konulması ve miktarının artırılması ile mekanik dayanım artırılabilir sonucuna ulaşılmıştır (Alshannag vd., 2023). Çalışmada elde edilen bir diğer sonuç ise PP lif ve atık lastik fiber kullanılan betonlarda eğilme dayanımları fark edilebilir düzeyde arttırmasıdır (Alshannag vd., 2023).



Şekil 6. Farklı hibrit lif katkılı HB'lerde oluşan eğilme çatlakları (Alshannag vd., 2023)

Spiesz ve Heidelberg, (2017) 4 farklı bileşenli UHB'nin özelliklerini araştırmıştır. Bunun için dört farklı bileşenlere sahip beton üretmişlerdir. Üretmiş oldukları beton bileşenleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. UHB bileşenleri (Spiesz ve Heidelberg, 2017)

Malzeme	Karışım 1 (kg/m ³)	Karışım 2 (kg/m ³)	Karışım 3 (kg/m ³)	Karışım 4 (kg/m ³)
CEM III/ C32.5 N	350	-	-	-
CEM I 42,5 N	-	350	350	350
Kireç tozu	-	-	100	-
Uçucu kül	100	100	-	100
HA (0.25-8 mm)	232	232	232	232
Su	147	147	147	147
Süper akışkanlaştırıcı	2	2,2	1,9	3,3
Hava sürükleyici	7,7	7,7	1,8	1,0

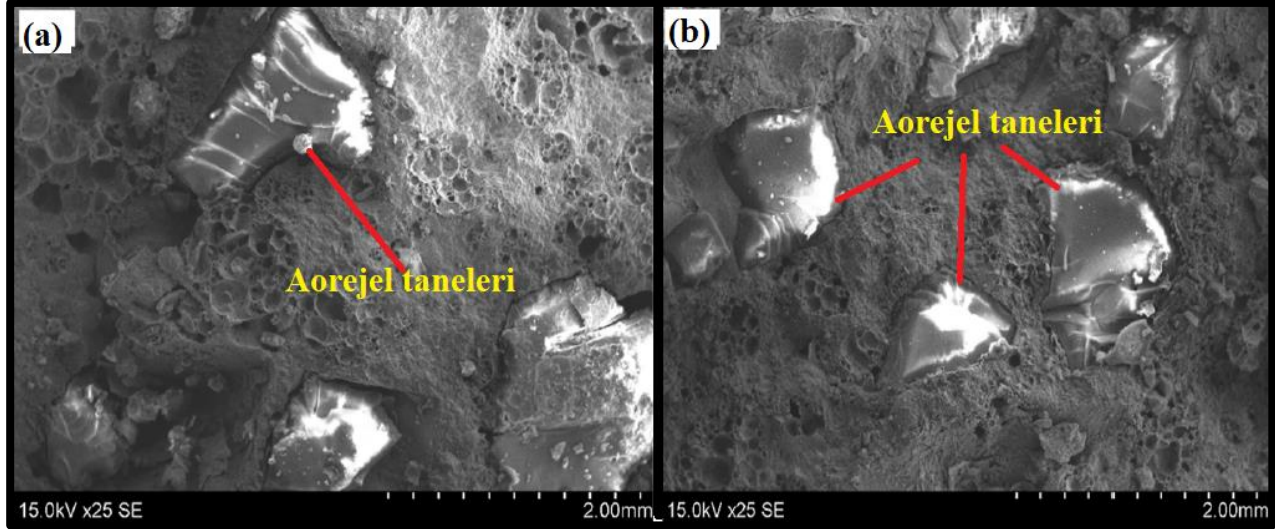
Spiesz ve Heidelberg, 2017 üretmiş oldukları UHB'lerin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 4'de gösterilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde hemen hemen tüm çökme sınıfına ait beton üretilmektedir. Farklı akıcılık sınıfına sahip beton üretilmektedir. Yoğunluğu yaklaşık 700 kg/m³lük UHB üretilmektedir. Ancak, yoğunluğun yüksek miktarda düşmesi basınç dayanımını olumsuz etkilemektedir. Yoğunluğun düşmesi ile ısı iletkenliğinin de düştüğü gözlenmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. UHB'lerin fiziksel ve mekanik özellikleri (Spiesz ve Heidelberg, 2017)

Özellik	Karışım 1	Karışım 2	Karışım 3	Karışım 4
Çökme (mm)	247 (S5)	205 (S4)	150 (S3)	23 (S1)
Akıcılık (mm)	500 (F4)	410 (F2)	370 (F2)	270 (F1)
Kuru yoğunluk (kg/m ³)	760	703	739	815
Isıl iletkenlik (W/m.K)	0,14	0,15	0,19	0,20
Basınç Dayanımı (MPa)				
1-gün	0,6	3,5	6,2	6,0
7-gün	10,3	8,0	9,3	10,4
28-gün	10,2	7,9	8,9	12

3.2 Akışkanlık

Uçucu kül (UK), silika aerojel, genişletilmiş cam ve prefabrik plastik parçaların kullanıldığı çalışmada üretilen UHB'lerin akışkanlıkları incelenmiştir. Betonda kullanılan agreganın boyutunun, şeklinin, harcın sıkıştırılmasında, boşluk oluşturmada ve akışkanlığını etkilediği literatür çalışmalarınca bilinmektedir. Sutard viskozimetresi ve yayılma tablası kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde aerojel kullanılan serilerde akışkanlığın aerojel miktarının artması ile azaldığı ancak prefabrik plastik parçaların ve aerogellerin birlikte kullanıldığı UHB'lerde, prefabrik plastik parçaların akışkanlığı arttırdığı belirtilmektedir. Şekil 7' de görüleceği üzere UHB'nin hidratasyon sürecinde aerogellerin mikro yapısını etkilemediği belirlenmiştir (Adhikary vd., 2020).

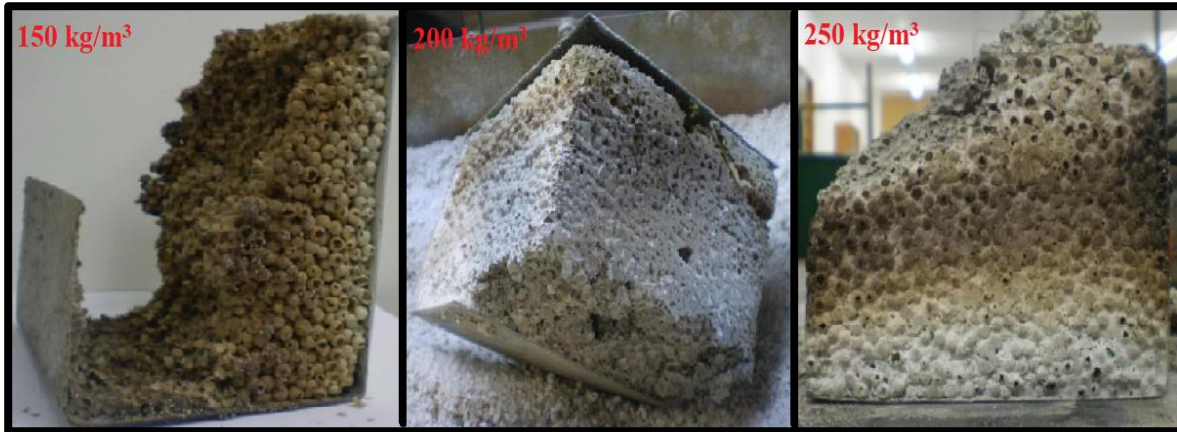


Şekil 7. UHB'deki aerojel tanelerinin mikroyapı görüntüsü (a- su kaybının %7,09 ve b- 7,80 olan beton) (Adhikary vd., 2020)

3.3 Dayanıklılık

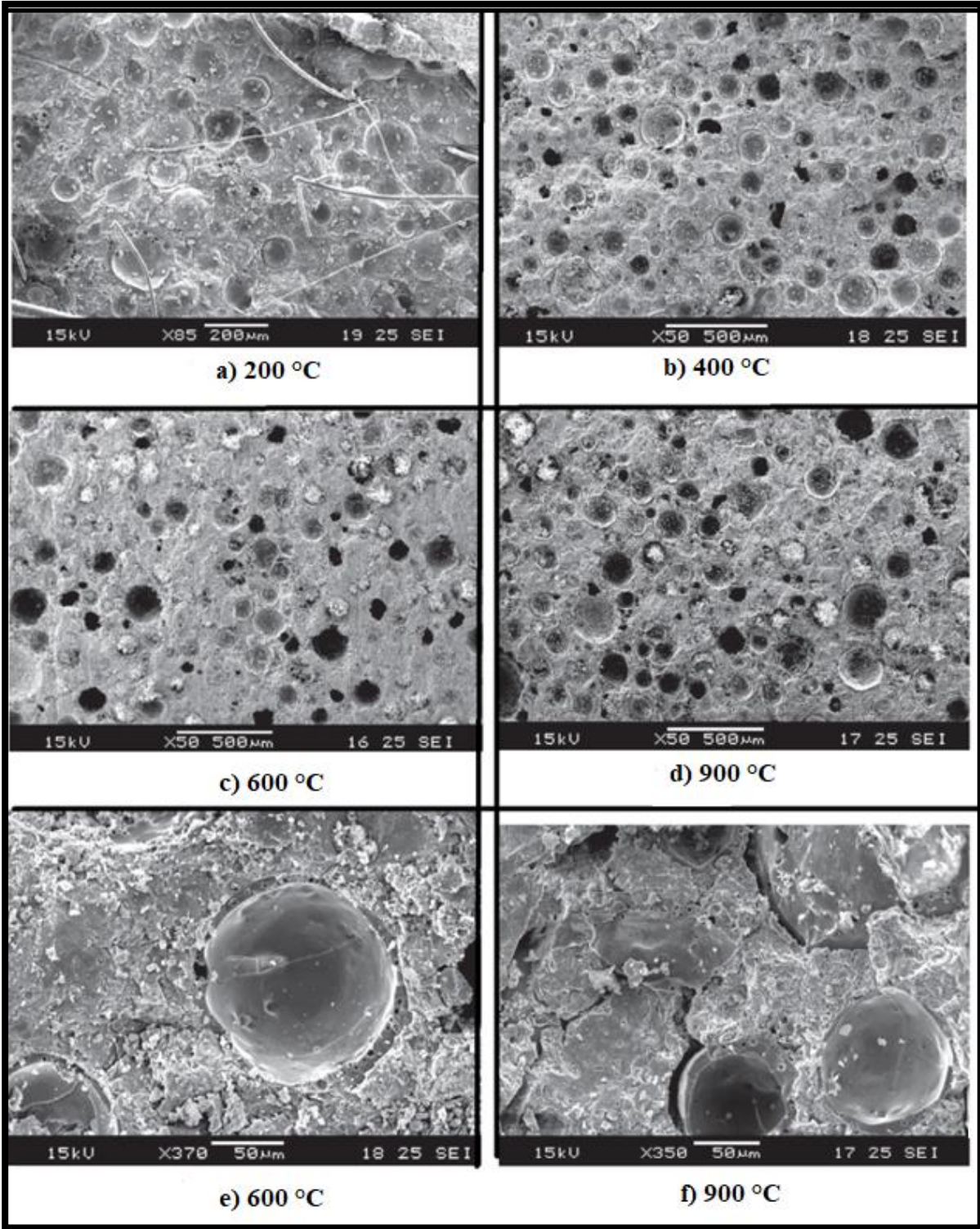
3.3.1 Yangına Dayanıklılık

Önceki araştırmalarda UHB'nin yangına karşı dayanıklılıkları ile ilgili çeşitli çalışmaların yapıldığı görülmüştür. Polistiren boncukların kullanıldığı farklı yoğunluklarda üretilen UHB'lerde, UHB'nin yoğunluğuna bağlı olarak yangına karşı olan direnci incelendiğinde yoğunluğun artması ile yangına karşı olan direncinin de arttığı belirlenmiştir. Şekil 8'de 250 kg/m³ yoğunlukta UHB'nin yangın etkisi sonrası diğerlerine göre daha yüksek dayanıklılık sağladığı görülmektedir. Isıl iletkenliğin yoğunlukla olan ilişkisi ise yoğunluk azaldıkça ısıl iletkenliğin azalması şeklinde açıklanabilmektedir (Vilches vd., 2012).



Şekil 8. UHB'nin Yangın Etkisi Sonrası Görünümü (Vilches vd., 2012)

Şekil 9'da farklı sıcaklıkların etkisinde kalan UHB numunelerinin mikro yapı incelemeleri görülmektedir. Yapılan çalışmada PP lif, SD, senosfer içeren büzülme önleyici katkı ve süper akışkanlaştırıcı kullanılan beton numuneler üzerinde 900 °C'ye kadar sıcaklığa karşı gösterdikleri etkiler incelenmiştir. Çalışmada kullanılan PP liflerin 400 °C'de (b) kayb olduğu görülmektedir. Böylece UHB'ler yüksek sıcaklıklarda patlamaya karşı dirençli olabilmektedir. Sıcaklığın artması ile çimento matrisinde büzülme oluşmaktadır. Araştırmacılar yapılan çalışmada kullanılan lifin cinsinin, miktarının önemli olduğuna dikkat çekmektedirler. Ayrıca kullanılan çelik liflerin yüksek sıcaklıklarda donatı olmaması halinde yangına karşı yeterince etkili olamayacağı da belirtilmiştir (Huang vd., 2018).



Şekil 9. Farklı sıcaklıklar etkisindeki UHB mikro yapı görüntüleri (Huang vd., 2018)

3.3.2 Donma-Çözülme Dayanıklılığı

Genleştirilmiş perlit agregası kullanılarak üretilen UHB çalışmasında hava sürükleyici beton katkısı da kullanılmıştır. Çalışmada donma-çözülme deneylerinde kütle kaybı %1-3,5 oranında değiştiği belirtilmekte ve kullanılan hava sürükleyici kimyasal katkının artması ile birim hacim ağırlığının azaldığı belirtilmektedir (Engin, 2018).

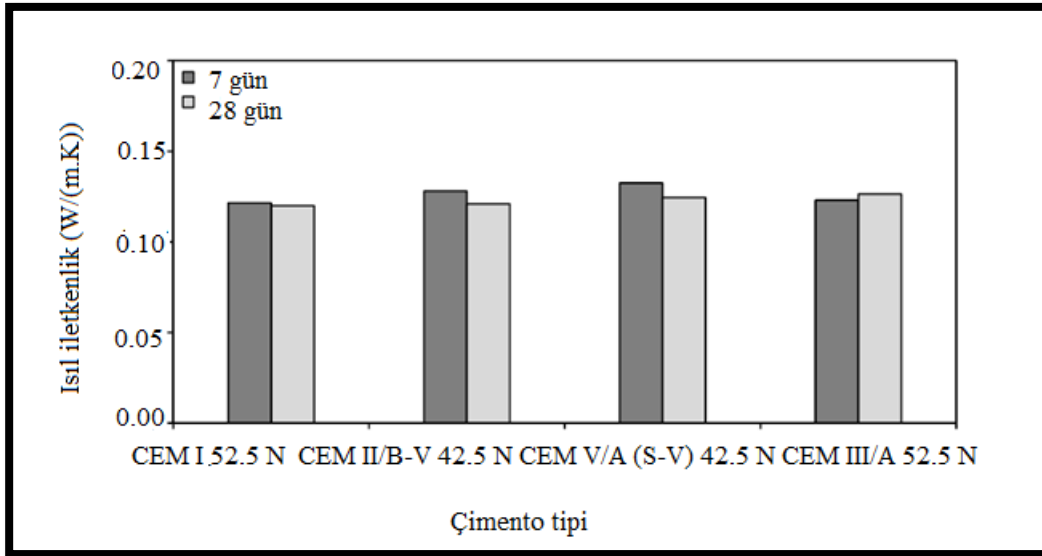
3.3.3 Sülfat Etkisi ve Klor Difüzyonu Dayanıklılığı

Islam vd. (2023) HB üretmek için %100 oranında atık kauçuk kullanmışlardır. Betonlara (28, 56, 90 ve 180. günlerde) su emme, büzülme, sülfat etkisi ve klorür difüzyonu deneylerini uygulamışlardır. Beton içerisindeki atık kauçuk miktarının artması ile sülfat

etkisine dayanıklılığının azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca kauçuk parçacık boyutlarının artması ile klor iyonlarının difüzyonun arttığı da belirlenmiştir (Islam vd., 2023).

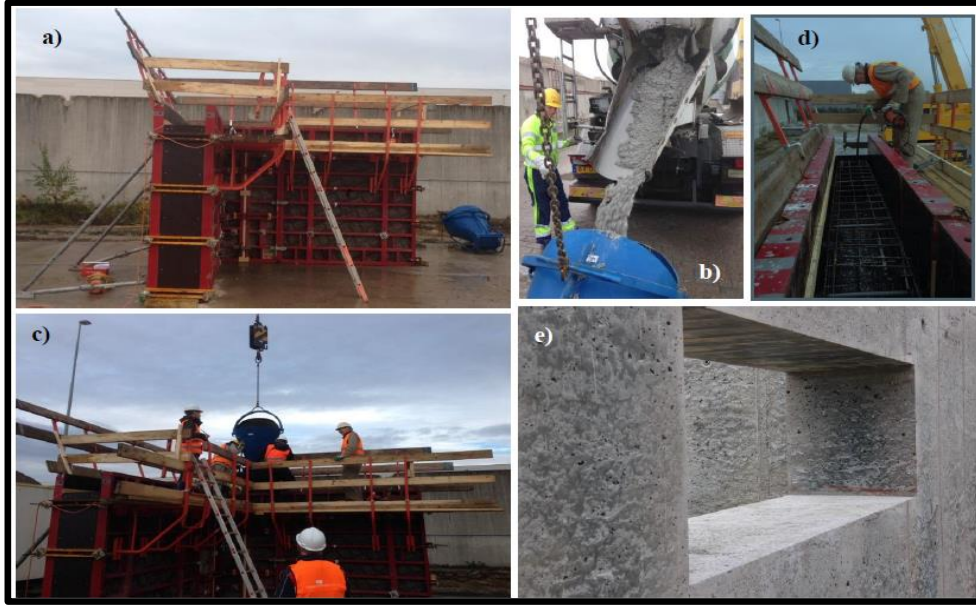
3.4 Isıl İletkenlik Özelliği

Yeni geliştirilmeye çalışılan UHB'ler, monolitik binalarda yalıtım katmanı gerektirmemekte, bu betonlar aynı zamanda hafifliğin dayanımdan daha önemli olduğu yapılarda sıklıkla kullanılmaktadır. İnşaat ve geri dönüşümü kolaylaştıracak, ayrıca mimarlara ve inşaat mühendislerine yeni fırsatlar sağlayacak ve uygulanacak şekilde geliştirilmektedir (Spiesz ve Hunger, 2017). Önceki araştırmalarda HA olarak geliştirilmiş cam ve farklı iki uzunlukta PP lifler kullanılarak mekanik özellikleri geliştirilmeye çalışılan ve lifsiz 750 kg/m^3 'lük kuru yoğunluğa sahip UHB üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonunda özel bir cihazla ısı iletkenlik ($\text{W}/(\text{m.K})$) ölçülerek belirlenmiştir. Yu vd. (2015) çimento tipinin ve kür süresinin ısı iletkenliğe etkisini araştırmışlardır. Isıl iletkenliklerinin $0,13-0,14 \text{ W}/(\text{m.K})$ arasında olduğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 10). Yapılan başka bir araştırmada lif katkılı UHB üretilmiştir (Yu vd., 2016). Isıl iletkenlik sonuçlarının yaklaşık $0,165 \text{ W}/(\text{m.K})$ olduğu ve kullanılan liflerin miktarlar-boylarına göre değişimler gözlenmiştir (Yu vd., 2016). Wang ve Tsai, (2006) 800 ve 1500 kg/m^3 yoğunluğa sahip betonların termal iletkenliklerinin yaklaşık olarak $0,5 - 0,7 \text{ W}/(\text{m.K})$ arasında olduğunu gözlemlemişlerdir. Karakurt vd. (2010) zeolit katkılı HB'lerin ısı iletkenliğinin yaklaşık olarak $0,19 \text{ W}/(\text{m.K})$ olduğunu gözlemlemişlerdir. Yapılan araştırmalarda UHB senosfer kullanılarak boşluklu yapının oluşması, yoğunluğun azalması ve etkin boşluk oluşturma ile ısı iletkenliğinin azalabileceği belirlenmiştir (Wu vd., 2015). Cuenca-Moyano vd. (2023) zeytin biyokütlesi taban külünü betonda kullanarak HB üretmişler, böylelikle ısı iletkenlik değerinin %43 oranında azaltılabildiği ve yalıtım malzemesi olarak kullanılabilceği sonucuna ulaşmışlardır. Önceki araştırmalarda çimento esaslı malzemelerde dozajın $250'$ den $400'$ e artması ile ısı iletkenliğinin de $0,22'$ den $0,30 \text{ W}/(\text{m.K})'$ a kadar artabileceği belirlenmiştir (Yu vd., 2015).



Şekil 10. UHB'lerde ısı iletkenliklerinin çimento tipine göre değişimi (Yu vd. 2015)

Önceki çalışmalarda UHB'lerde ısı özellikleri ile kullanılan HA'ların boyutları arasındaki kullanılan HA'ların boyutları incelendiğinde ısı iletkenliğinin azaldığı belirlenmiştir (Yu vd., 2013). Şekil 11'de (a- kalıpların hazırlanması, b, c, d- beton dökümü, e- kalıplar çıkartıldıktan sonraki görünümü) UHB'nin sahadaki denemesi görülmektedir. Betonun birim ağırlığının $650-700 \text{ kg/m}^3$ 'e kadar düşürülüp dayanımın $10-12 \text{ MPa}$ arasında olması sağlanmıştır. Yapılan çalışmada normal betona göre üretilmiş olan beton arasında yaklaşık 4 kat yoğunluk farkının olduğu görülmüştür. Bunun deprem esnasında binaya gelecek olan deprem kuvvetlerini oldukça aşağıya çekeceği tartışılmaz bir gerçektir. Çalışmada gerçekleştirilen UHB'nin ısı iletkenliğinin yaklaşık $0,12 \text{ W}/(\text{m.K})$ değerinde olduğu görülmüştür (Yu, vd., 2015).



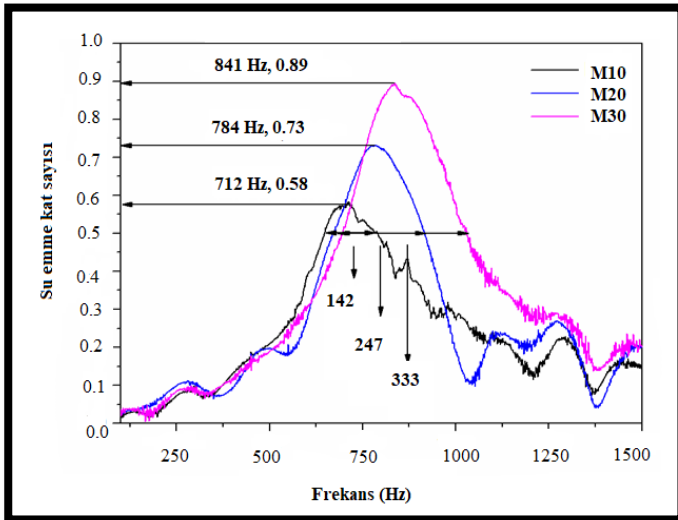
Şekil 11. UHB saha denemesi duvar yapımı (Spiesz ve Hunger, 2017)

3.5 Ses Emme Özelliği

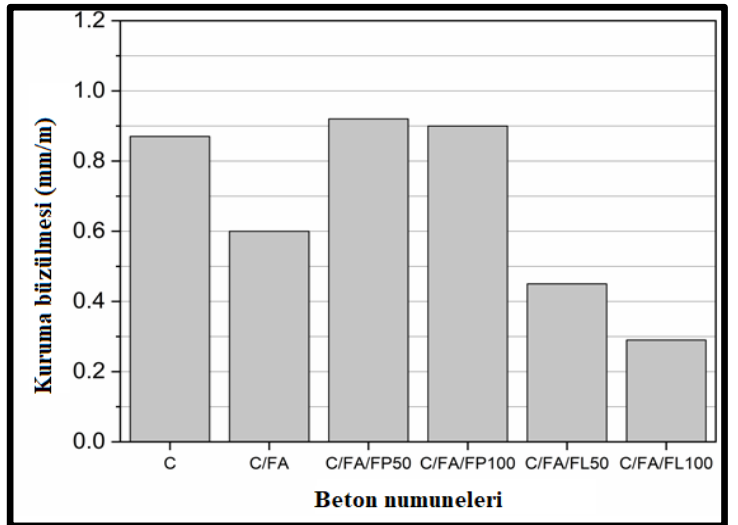
UHB'ler ses emme özelliklerini iyileştirmek amacıyla da kullanılabilirler. Chen vd. (2020), gözenekli ve lifli yapısı, esnek olması ve ses yutucu özelliklerine sahip Miscanthus liflerini (ML), UHB'ye yeni özellikler kazandırmak amacıyla kullanılmışlardır. Yapılan çalışmada kullanılan ML'ler 0-2 mm ve 2-4 mm olmak üzere iki farklı boyutlarda kullanılmıştır. Araştırma sonucunda Miscanthus liflerinin 2-4 mm boyutlarının karışımında artırılması akustik ses emme özelliğinin daha fazla artmasını sağladığı belirlenmiştir. Şekil 12'de ML'nin miktarının artması ile 0.5 kat sayısında ses emme bandının 333 Hz genişliğine ulaşabildiği görülmüştür (Chen vd., 2020).

3.6 Kuruma Rötresi

Graf-Kaufmann yöntemi kullanılarak UHB'nin 28 günlük kuruma rötre değerleri belirlenmiştir. Kullanılan HA'nın özelliği ve iri agreganın olmamasına bağlı olarak rötre değerlerinin değiştiği belirtilmektedir. Şekil 13'de UK, perlit ve genişletilmiş cam kullanılarak üretilen ultra hafif köpük betonun 28 günlük kuruma rötre sonuçları karşılaştırmaktadır. Genişletilmiş cam (Liaver) ve UK kullanılmı kuruma rötresini (KB) önemli derecede azalttığı belirlenmiştir (Abd Elrahman, vd., 2019).



Şekil 12. UHB'nin Akustik Ses Emme Grafı (Chen vd., 2020)



Şekil 13. KB' nin kuruma büzülmesi (Abd Elrahman vd., 2019)

3.7 Sürdürülebilirlik

UHB ve HB'lerle kapsamlı çalışmalar devam etmektedir. Günümüzde yapı malzemesi olarak yeni malzemeler beklenirken atıkların kullanılabilirliği ve sürdürülebilir çözümler göstermesi UHB'lere karşı ilgiyi arttırmakla beraber lider bir inşaat malzemesi haline gelmesi beklenmektedir (Junaid vd., 2022). UHB karışımına, geliştirilmiş, geri dönüştürülmüş özel işlevsel agregalar eklemek hem betonu daha ekolojik bir hale getirecek hem de doğayı, atıkların geri dönüştürülmesi açısından koruyacaktır. Örneğin; cam, mikro silika veya tahıl eklemeye bu agregaların boyutları kum ve çakılların yerini alabilecek şekildedir. Karışımların sonucu ise normal betona yakın basınç sonuçları vermektedir. Endüstriyel atıklar gibi organik tarımsal atıklarında HA olarak kullanılacakları görülmüştür. Ayçiçeği sapının HA olarak kullanıldığı ve tarım alanlarında bulunan binalarda (ahır, tahıl ambarı, vb.) kullanılması amaçlanan çalışmada birim ağırlıkları ve basınç dayanımları incelendiğinde çimento miktarına bağlı olarak %20-40 oranında kullanılmasının uygun olduğu belirtilmiştir. Ayrıca düşük ısı iletkenliği nedeniyle yalıtım malzemesi olarak değerlendirilmesinin de uygun olabileceği belirtilmiştir (Şişman ve Alkaya, 2019).

4. Sonuçlar

Literatürdeki farklı yöntemlerle (HA kullanılarak, iri agreganın çıkartılması ile köpük ajanları kullanımı vb.) elde edilen UHB çalışmalarının olduğu, yapıyı etkileyebilecek avantaj ve dezavantajlarının bulunduğu gözlenmiştir. Çalışmadan çıkarılacak genel sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- UHB'ler birim ağırlıkları nedeniyle yapı yükü azaltılabilmektedir. Bu durumun deprem yüklerinin etkilerini azaltabileceği değerlendirilmiştir.
- UHB üretimi sırasında kullanılan atık HA'lar (uçucu kül, senosfer, geliştirilmiş cam vb.) enerjiden tasarruf sağlayabilmekte, sürdürülebilir ve çevreye karşı duyarlı olmaktadır.
- Kullanılan HA'ların E-modüllerinin düşük olması, UHB'lerin de E-modüllerinin düşük olmasına ve dayanımın düşmesine neden olmaktadır.
- Güncel araştırmalar incelendiğinde UHB'lerin bünyesini oluşturulan boşlukların oldukça yüksek olması nedeniyle basınç dayanımları düşüktür ancak dayanımı arttırmak amacı ile UHB çalışmalarının da yapıldığı görülmektedir.
- UHB'lerde çelik lif ilave edilmesi ve miktarının artırılması ile mekanik dayanımın artırılacağı gözlenmiştir.
- Yapılan çalışmalar incelendiğinde düşük yoğunluk ve düşük ısı iletkenlikleri nedeniyle UHB'lerin ısı yalıtım malzemesi olarak kullanımının uygun olduğu değerlendirilmiştir.
- Kullanılan malzemelerin ısı iletkenlik değerlerine göre UHB'lerin ısı iletkenlik değerlerinde değişkenlik gösterebileceği belirlenmiştir.
- UHB'ler de sünme ve rötreinin normal betonlara göre daha fazla olabileceği değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada mevcut literatür incelenerek ultra hafif betonlarla ilgili son gelişmeler araştırılmaya çalışılmıştır. Yapı yüklerinin azaltılması ile deprem yüklerinin olumsuz etkilerinin azaltılabileceği değerlendirilmiştir. Yapıya gelen deprem yüklerinin azaltılması ile de can ve mal güvenliği sağlanabilmektedir. Önceki araştırmalarda yoğunluğun 2000 kg/m³'e kadar düşürülebildiği hafif betonların üretilebileceği gözlenmiştir. Ultra hafif betonlarda ise beton yoğunluğunun 700 kg/m³'e kadar düşürülebileceği belirlenmiştir. Ancak, yoğunluğun yüksek oranda düşürülmesi betonun mekanik dayanımını yüksek oranda azaltmaktadır. Bu nedenle teknolojik (nano-teknoloji kullanılarak üretilen malzemeler, 3 boyutlu yazıcılar vb.) olanakların kullanılması ile UHB'lerin fiziksel, mekanik, mikroyapı ve durabilite özelliklerinin geliştirilmesi önerilmektedir. Ülkemizin hemen hemen tüm topraklarının deprem bölgesinde olduğu düşünüldüğünde, UHB'lerle ilgili daha fazla araştırmanın yapılması ülkemizin ekonomisi açısından büyük önem taşımaktadır.

Kaynaklar

Abd Elrahman, M., El Madawy, M.E., Chung, S.Y., Sikora, P., Stephan, D. (2019). Preparation and characterization of ultra-lightweight foamed concrete incorporating lightweight aggregates. *Applied Sciences*, 9(7), 1447. doi:10.3390/app9071447

Adhikary, S. K., Rudžionis, Ž., Vaičiukynienė, D. (2020). Development of flowable ultra-lightweight concrete using expanded glass aggregate, silica aerogel, and prefabricated plastic bubbles. *Journal of Building Engineering*, 31, 101399. doi:10.1016/j.job.2020.101399

Ahmmad, R., Jumaat, M.Z., Alengaram, U.J., Bahri, S., Rehman, M.A., Hashim, H.B. (2016). Performance evaluation of palm oil clinker as coarse aggregate in high strength lightweight concrete. *J. Cleaner Prod.*, 112, 566-574. doi:10.1016/j.jclepro.2015.08.043

Alexandre Bogas, J., Gomes, M. G., Real, S. (2014). Bonding of steel reinforcement in structural expanded clay lightweight aggregate concrete: The influence of failure mechanism and concrete composition. *Construction and Building Materials* 65, 350-359. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.122

- Alshannag, M., Alshmalani, M., Alsaif, A., Higazey, M. (2023). Flexural performance of high-strength lightweight concrete beams made with hybrid fibers. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01861. doi:10.1016/j.cscm.2023.e01861
- Bajare, D., Kazjonovs, J., Korjakins, A. (2013). Lightweight concrete with aggregates made by using industrial waste. *J. Sustain. Archit. Civil Eng.*, 4 (5), 67-73. doi:10.5755/j01.sace.4.5.4188
- Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Felekoğlu, K.T, Aydın, S., Yardımcı, M.Y., Topal, A., Öztürk, A.U., (2015). "Beton", Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları, No: 334, s 825.
- Boshra, A.E., Yoursy, B.S., A.T., El-boridy, A.T. Fayed, S. (2023). Ferrocement composite columns incorporating hollow core filled with lightweight concrete. *Engineering Structures*, 280, 115672. doi:10.1016/j.engstruct.2023.115672
- Bubeník, J., Zach, J., Křížová, K., Novák, V., Sedlmajer, M., Žižková, N. (2023). Behavior and properties of ultra-lightweight concrete with foamed glass aggregate and cellulose fibres under high temperature loading. *Journal of Building Engineering*, 72, 106677.
- BS EN 1992-1-1, Eurocode 2. (2004). Design of concrete structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings, British Standards Institution, UK, London.
- Chen, Y.X., Wu, F., Yu, Q., Brouwers, H.J.H. (2020). Bio-based ultra-lightweight concrete applying miscanthus fibers: Acoustic absorption and thermal insulation. *Cement and Concrete Composites*, 114, 103829. doi:10.1016/j.cemconcomp.2020.103829
- Cuenca-Moyanoa, G.M., Cabreraa, M., López-Alonso, M., Martínez-Echevarría, M. J., Agrela, F., Rosales, J. (2023). Design of lightweight concrete with olive biomass bottom ash for use in buildings. *Journal of Building Engineering*, 69, 106289. doi:10.1016/j.jobe.2023.106289
- Du, H. (2019). Properties of ultra-lightweight cement composites with nano-silica. *Construction and Building Materials*, 199, 696-704. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.225>.
- Eltaly, B. A., Shaheen, Y. B., EL-boridy, A. T., Fayed, S. (2023). Ferrocement composite columns incorporating hollow core filled with lightweight concrete. *Engineering Structures* 280, 115672. doi:10.1016/j.engstruct.2023.115672
- Engin, C. (2018). Farklı tane boyutlu geliştirilmiş perlit agregası ile üretilen ultra hafif betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi. YL Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi FBE, Van.
- Huang, Z., Padmaja, K., Li, S., Liew, J.R. (2018). Mechanical properties and microstructure of ultra-lightweight cement composites with fly ash cenospheres after exposure to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 164, 760-774. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.009
- <https://theconstructor.org/concrete/ultra-lightweight-concrete-materials-properties-applications/566658>, 03.06.2023.
- Huang, Z., Zhang, T., Wen, Z. (2015). Proportioning and characterization of Portland cement-based ultra-lightweight foam concretes. *Construction and Building Materials*, 79, 390-396. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.01.051
- Islam, M.M.U., Li, J., Roychand, R., Saberian, M (2023). Investigation of durability properties for structural lightweight concrete with discarded vehicle tire rubbers: A study for the complete replacement of conventional coarse aggregates. *Construction and Building Materials* 369, 130634. doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.130634
- Junaid, M. F., ur Rehman, Z., Kuruc, M., Medved', I., Bačinskis, D., Čurpek, J., Čekon, M., Ijaz, N., Ansari, W.S. (2022). Lightweight concrete from a perspective of sustainable reuse of waste byproducts. *Construction and Building Materials*, 319, 126061. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.126061
- Karakurt, C., Kurama H., Topcu, I.B. (2010). Utilization of natural zeolite in aerated concrete production. *Cement and Concrete Composites*, 32(1):1-8.
- Liu, H., Elchalakani, M., Karrech, A., Yehia, S., Yang, B. (2021). High strength flowable lightweight concrete incorporating low C₃A cement, silica fume, stalite and macro-polyfelin polymer fibres. *Construction and Building Materials* 281, 122410. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122410
- Li, P., Wu, H., Liu, Y., Yang, J., Fang, Z., & Lin, B. (2019). Preparation and optimization of ultra-light and thermal insulative aerogel foam concrete. *Construction and Building Materials*, 205, 529-542.

- Lo, T.Y., Tang, W.C., Cui, H.Z. (2007). The effects of aggregate properties on lightweight concrete. *Building and Environment*, 42(8), 3025-3029. doi:10.1016/j.buildenv.2005.06.031
- Mohammed, J.H., Hamad, A.J. (2014). Materials, properties and application review of Lightweight concrete. *Technical Review of the Faculty of Engineering University of Zulia*, 37(2), 10-15.
- MVarma, B., Hajare, M.B. (2015). Ferrocement: Composite material and its applications. *Int. J. Pure Appl. Res. Eng. Technol.*, 3, 296-307.
- Naaman, A. E. (2000). *Ferrocement and Laminated Cementitious Composites*; Techno Press 3000: An Arbor. USA.
- Roberz, F., Loonen, R.C.G.M., Hoes, P., Hensen, J.L.M. (2017). Ultra-lightweight concrete: Energy and comfort performance evaluation in relation to buildings with low and high thermal mass. *Energy and Buildings*, 138, 432-442. doi:10.1016/j.enbuild.2016.12.049
- Serelis, E., Vaitkevicius, V. (2022). Utilization of glass shards from municipal solid waste in aluminium-based ultra-lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 350, 128396.
- Shi, J., Liu, Y., Xu, H., Peng, Y., Yuan, Q., Gao, J. (2022). The roles of cenosphere in ultra-lightweight foamed geopolymer concrete (UFGC). *Ceramics International*, 48(9), 12884-12896. doi:10.1016/j.ceramint.2022.01.161
- Sifan, M., Nagaratnam, B., Thamboo, J., Poologanathan, K., Corradi, M. (2023) Development and prospectives of lightweight high strength concrete using lightweight aggregates, *Construction and Building Materials* 362, 129628. doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.129628
- Sikora, P., Rucinska, T., Stephan, D., Chung, S. Y., & Abd Elrahman, M. (2020). Evaluating the effects of nanosilica on the material properties of lightweight and ultra-lightweight concrete using image-based approaches. *Construction and Building Materials*, 264, 120241.
- Şişman, C.B., Alkaya, S. (2019). "Usability of Sunflower Stems As Lightweight Aggregate in Concrete Production". *Fresenius Environ. Bull*, 28, 9983-9990.
- Sohel, K.M.A. Al-Jabri, K. Zhang, M.H., Liew, J.R.Y. (2018). Flexural fatigue behavior of ultra-lightweight cement composite and high strength lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 173, 90-100. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.276
- Spiesz, P. R., Hunger, M. (2017). Structural ultra-lightweight concrete—from laboratory research to field trials. In *Eleventh High Performance concrete (11th HPC)*, Tromsø 6-8 March 2017 (pp. 1-10).
- Spiesz, P.R., Hunger, M. (2017). Structural ultra-lightweight concrete – from laboratory research to field trials. In H. Justnes, & H. Braarud (Eds.), *Proceedings of the 11th High Performance Concrete conference, HPC Tromso 2017*, 1-10).
- Subaşı, S., Beycioğlu, A., Emiroğlu, M. (2009). Genleştirilmiş kil agregalı hafif betonlarda bulanık mantık yöntemiyle yarmada çekme dayanımı tahmin modeli geliştirilmesi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(3), 157-166. Erişim:<https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/320477>
- Topçu, İ.B., Hafif Beton Özelliklerinin Kompozit Malzeme Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Mart 1988, İstanbul, 126s.
- Topçu, İ.B., Hafif Betonla Ferrocement Çadır Yapımı. İnşaat Müh. Gelişmeler. IV. Uluslararası Kongresi, 1-3 Kasım 2000, Doğu Akdeniz Üniv., Gazimagusa, KKTC, ss. 987-996
- Topçu, İ.B., Hafif Betonla Ferrocement Kano Yapımı. X. Müh. Sempozyumu, İnşaat Mühendisliği'99, 2-3 Haziran 1999, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, ss. 351-359.
- Topçu, İ.B., Işıkdag, B. (2008). Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete. *Journal of Materials Processing Technology*, 204(1-3), 34-38. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.10.052

- Topçu, İ.B., Uygunoğlu T., Yapı Malzemesi. Nobel Akademik Yayıncılık, Mart 2021, 424 s. ISBN: 978-625-406-964-2, E-ISBN: 978-625-406-965-9.
- Topçu, İ.B., Uygunoğlu, T. (2007). Properties of autoclaved lightweight aggregate concrete. *Building and Environment*, 42(12), 4108-4116. doi:10.1016/j.buildenv.2006.11.024
- Topçu, İ.B., Uygunoğlu, T. (2010). Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC). *Construction and Building Materials*, 24(7), 1286-1295. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.12.007
- Topçu, İ.B., Volkanik Cürüfların Hafif Beton Agregası Olarak Kullanılma Olanaklarının İncelenmesi. İMO X. Teknik Kongresi, Cilt 1, ss. 437-451, Ekim 1989, Ankara.
- Topçu, İ.B., Volkanik Cürüflarla Üretilen Yarı Hafif Betonların Özellikleri. IX. Mühendislik Sempozyumu, 01 -04.04.1996, Süleyman Demirel Üniversitesi, Müh.-Mim. Fak., Isparta, ss. 95-97.
- Ultra-Lightweight Concrete for 3D printing technologies, <https://cordis.europa.eu/project/id/841592>, doi:10.3030/841592, 2021.
- Ünal A, Uygunoğlu T, Yıldız A. (2007). Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation. *Building and Environment*, 42(2), 584-590.
- Uygunoğlu, T., Gencel, O., Brostow, W., Topçu, İ.B., Production of Lightweight Polymer Concrete with Pumice. ASPIC 2012, 7th Asian Symposium on polymers in concrete, İstanbul-Turkey, 3-5 October 2012, pp. 669-677.
- Vilches, J., Ramezani, M., Neitzert, T. (2012). Experimental investigation of the fire resistance of ultra-lightweight foam concrete. *International Journal of Advanced Engineering Applications*, 1(4), 15-22.
- Wang, H.T., Wang, L.C. (2013). Experimental study on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 38, 1146-1151. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.09.016
- Wang, H.Y., Tsai, K.C. (2006). Engineering properties of lightweight aggregate concrete made from dredged silt. *Cement and Concrete Composites*, 28(5), 481-485.
- Wu, Y., Wang, J. Y., Monteiro, P. J., Zhang, M. H. (2015). Development of ultra-lightweight cement composites with low thermal conductivity and high specific strength for energy efficient buildings. *Construction and Building Materials*, 87, 100-112. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.04.004
- Xie, Y., Li, J., Lu, Z., Jiang, J., Niu, Y. (2019). Preparation and properties of ultra-lightweight EPS concrete based on pre-saturated bentonite. *Construction and Building Materials*, 195, 505-514. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.091
- Yasar, E., Atis, C. D., Kilic, A., Gulsen, H. (2003). Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash. *Materials Letters*, 57(15), 2267-2270. doi:10.1016/S0167577X(03)00146-0
- Ye, Y., Liu, J., Zhang, Z., Wang, Z., Peng, Q. (2020). Experimental study of high-strength steel fiber lightweight aggregate concrete on mechanical properties and toughness index. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2020, 1-10. doi:10.1155/2020/5915034
- Yıldırım, H., Özturan, T. (2013). Mechanical properties of lightweight concrete made with cold bonded fly ash pellets. Erişim:http://dspace.epoka.edu.al/bitstream/handle/1/1242/471-1303-1_PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Yu, Q. L., Spiesz, P., Brouwers, H. J. H. (2013). Development of cement-based lightweight composites–Part 1: mix design methodology and hardened properties. *Cement and concrete composites*, 44, 17-29. doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.03.030
- Yu, Q. L., Spiesz, P., Brouwers, H. J. H. (2015). Ultra-lightweight concrete: Conceptual design and performance evaluation. *Cement and Concrete Composites*, 61, 18-28. doi:10.1016/j.cemconcomp.2015.04.012
- Yu, Q.L., Spiesz, P., Brouwers, H.J.H. (2015). Ultra-lightweight concrete: conceptual design and performance evaluation, *Cement & Concrete Composites*, 61, 18-28. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.012>
- Yu, R., Van Onna, D. V., Spiesz, P., Yu, Q. L., Brouwers, H. J. H. (2016). Development of ultra-lightweight fibre reinforced concrete applying expanded waste glass. *Journal of Cleaner Production*, 112, 690-701. doi:10.1016/j.jclepro.2015.07.082

- Zareef, M. A. M. E. (2010). Conceptual and structural design of buildings made of lightweight and infra-lightweight concrete. Ph.D., Thesis, Planen Bauen Umwelt der Technischen Universität, Berlin. doi:10.14279/depositonce-2415
- Zhang, M. H., Li, L., Paramasivam, P. (2005). Shrinkage of high-strength lightweight aggregate concrete exposed to dry environment. *Materials Journal*, 102 (2), 86-92.
- Zhang, M., Li, L., Paramasivam, P. (2004). Flexural toughness and impact resistance of steel-fibre-reinforced lightweight concrete. *Magazine of Concrete Research*, 56 (5), 251-262. doi:10.1680/macr.2004.56.5.251
- Zhang, Y., Sun, Q., Xin, H., Liu, Y., Correia, J. A., Berto, F. (2022). Probabilistic flexural fatigue strength of ultra-lightweight cement concrete and high strength lightweight aggregate concrete. *International Journal of Fatigue*, 158, 106743. doi:10.1016/j.ijfatigue.2022.106743
- Zhou, H., Brooks, A. L. (2019). Thermal and mechanical properties of structural lightweight concrete containing lightweight aggregates and fly-ash cenospheres. *Construction and Building Materials*, 512–526. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.074
- Zhou, Y., Gong, G., Huang, Y., Chen, C., Huang, D., Chen, Z., Guo, M. (2021). Feasibility of incorporating recycled fine aggregate in high performance green lightweight engineered cementitious composites. *Journal of Cleaner Production*, 280(2), 124445. doi:10.1016/j.jclepro.2020.124445