

Hafif Beton Üretiminde Kullanılan Doğal ve Yapay Hafif Agregalar

Ahmet Özcan¹

Mehmet Burhan Karakoç²

Özet

Yapı alanında en çok kullanılan iki malzemeden bir olan beton üç ana bileşenden oluşmaktadır. Bu ana bileşenler çimento, agrega ve sudur. Yapının ölü yükünü azaltma, dolayısıyla taşıyıcı elemanların boyutlarının küçülmesi ve yapı maliyetini azaltma gibi avantajları sebebiyle hafif betona olan ilgi artmaktadır. Hafif beton üretiminde katkı kullanımı (köpükleştirici ajan, Al tozu ve Zn tozu vb.) veya hafif agrega kullanımı tercih edilmektedir. Hafif agregalar doğal ve yapay hafif agrega olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Pomza, perlit, diatomit, skorya, volkanik tüf gibi agregalar hafif betonlarda ince ve/veya iri agrega olarak kullanılmaktadır. Genleştirilmiş polistiren taneleri, kauçuk atıkları gibi endüstriyel atıklar veya uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve kil gibi malzemeler çeşitli işlemlere tabi tutularak agrega formu kazandırılıp hafif betonlarda yapay hafif agrega olarak kullanılabilir. En yaygın olarak kullanılanlardan biri olan ve ticari ürün olarak dünyanın birçok bölgesinde temini mümkün olan genleştirilmiş kil agregası da bir yapay hafif agregadır. Yenilikçi yöntemlerden biri olan ve şu an bilim insanlarının da ilgisini çeken geopolimer hafif agregalar, endüstriyel atıkların çeşitli alkali çözeltilerle birlikte karıştırılıp elde edilen hamura agrega formunun kazandırılması ile üretilmektedir. Üretilen bu yapay hafif agregalar soğuk bağlama, sinterleme veya otoklav kür uygulamalarına tabi tutularak sertleştirilmektedir. Sinterleme işleminde agregalar daha düşük yoğunlukta üretilse de, sinterleme için gerekli olan enerji maliyeti dikkate alındığında bu yöntem diğer yöntemlere göre ekonomik açıdan dezavantajlıdır. Genel olarak doğal veya yapay hafif agrega kullanılarak üretilen hafif betonların düşük birim hacim ağırlık, yüksek ısı ve ses yalıtımı özelliklerine sahip olması sebebiyle yapılarda kullanımı cazip hale gelmektedir.

- 1 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kütahya, 43100, Türkiye, ahmet.ozcan1@dpu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-6451-9413
- 2 Prof. Dr., İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, 44280, Türkiye, mehmet.karakoc@inonu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-6954-0051

1. Giriş

Beton, çimento, ince agregası ve iri agregadan oluşan bir yapı malzemesidir. Betonun bileşenleri arasında iri agregası, betona daha fazla hacimsel stabilite ve dayanıklılık kazandırır. Çimentodan daha ucuzdur ve bu nedenle betonda ekonomi sağlanmasına doğrudan yardımcı olur. Bu nedenle mümkün olduğunca fazla iyi agregası kullanılmalıdır. İyi bir agregası hem taze hem de sertleşmiş betonda istenen özellikleri sağlamalıdır [1]. Yüksek binaların, büyük ölçekli beton yapıların ve uzun açıklıklı beton yapıların hızla gelişmesiyle birlikte, daha iyi sağlam performans için artırılmış mukavemet, tokluk ve hafif beton gerekli hale gelmiştir. Bu nedenle inşaatı doğal volkanik malzemelerin (pomza ve kül gibi) kullanımı artmaktadır. Yapı malzemesi olarak kullanımları inşaat maliyetlerini düşürmeye yardımcı olabilir. Betonda hafif agreganın modern kullanımı, çeşitli yapı elemanlarının ağırlığını hafifleterek temellere iletilen yükü azaltmaya yardımcı olur. Hafif betondaki boşluk ve gözeneklerin varlığı iyi termal ve akustik yalıtım özellikleri ve yangına dayanıklılık sağlar. Bu nedenle, normal dayanımlı betona kıyasla hafif yapısal beton, daha iyi mukavemet-ağırlık oranı, daha güçlü çekme gerilme kapasitesi, daha düşük termal genleşme katsayısı ve ısı-ses yalıtımı gibi gelişmiş özelliklere sahiptir [2-4].

Yapı malzemelerinin yaygın kullanımı sonucunda kaynakların tüketimi önemli ölçüde artmaktadır. Avrupa Birliği'nde binalar, çıkarılan tüm malzemelerin yüzde 50'sini, sera gazı emisyonlarının yüzde 35'ini ve atık akışlarının yüzde 32'sini oluşturmaktadır. Binaların gelecekte daha fazla enerji tüketmesini beklemekle birlikte Uluslararası Enerji Ajansı, enerji tüketiminin 2050 yılına kadar iki katına çıkacağını öngörmektedir. İnşaatı kullanılan birincil malzeme olan betonun kentleşmeye olan talebin artması ile birlikte üretimi de artmıştır. Her yıl, beton üretimi için agregası çıkarılmaktadır. Bu yenilenemeyen doğal kaynaklar tükenme tehlikesiyle karşı karşıyadır [5].

Küresel yapı pazarındaki yıllık agregası ihtiyacı 2020 yılında 55 milyar tona ulaşmıştır. Tüketim oranları aynı kalırsa, bu miktar önümüzdeki on yılda iki katına çıkacaktır. Bu durum, yakın gelecekte yapı inşaatları için kaçınılmaz bir sorun olacak doğal agregası kıtlığına yol açmaktadır. Agregası, büyük ölçekli beton inşaatının arka planında acil bir sorun olmuştur. Düşük karbon ayak izine sahip yapı malzemelerinin tercih edilmesi, sürdürülebilir inşaat uygulamaları açısından en etkili stratejilerden biridir. Uygun malzeme seçimi sayesinde CO₂ salınımlarında yaklaşık %30 oranında azalma sağlanabilmektedir. Bu nedenle, doğal agregalara çevresel açıdan uygun alternatiflerin araştırılması ve değerlendirilmesi günümüzde acil bir gereklilik haline gelmiştir [6-7].

Agregalar, özellikle beton üretimi başta olmak üzere inşaat sektöründe en yaygın kullanılan malzemeler arasında yer almaktadır. Betona yönelik sürekli artan talep, beton hacminin yaklaşık %60-70'ini oluşturan agregalara da olan talebi artırmaktadır [8]. Agregalar, inşaat alanında yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Ayrıca, agrega beton üretiminde kullanılması gereken malzemelerden biridir. Kullanılan agregaların çoğu doğal kaynaklardan elde edilir. Beton endüstrisi, büyük miktarda doğal kaynak kullandığı için küresel çevre sorunlarını etkilemektedir. Yapay hafif agrega gibi hafif malzemelerin geliştirilmesi, doğal kaynak kullanımının azaltılmasına yardımcı olacaktır. İnşaat alanında, betonda kullanılan hafif agrega, oldukça çevre dostu bir malzeme türüdür. Hafif agrega, geleneksel agregadan önemli ölçüde farklıdır. Bu farklılıklar, tasarımcılara ağırlık azaltımı, geçirgenliğin azalması ve daha uzun kullanım ömrü gibi çeşitli avantajlar da sağlar [9].

Hafif agregalar genellikle silisli çakıl veya kil, pomza taşı veya volkanik küllerden üretilir. Sıradan agregalar, doğal olarak aşınan çakılların parçalanıp istenen boyuta elenmesiyle elde edilir. Doğal agregaların kullanımı, bu malzemelerin bu genişleyen altyapıda tam olarak kullanılması nedeniyle ciddi bir sorun haline gelmiştir. Doğal agrega ile hafif agrega karşılaştırıldığında, hafif agreganın yoğunluğu daha azdır. Hafif agreganın daha düşük yoğunluğa sahip olması nedeniyle daha fazla yalıtım sağlar ve hafif beton üretiminde kullanılabilir. Hafif agrega ayrıca taş ocağı atıkları, palmiye kabuğu, kağıt tortusu, pet şişeler, kanalizasyon tortusu, çelik çürüğü, taban külü ve uçucu kül gibi endüstriyel kaynaklar kullanılarak da oluşturulabilir [10].

Hafif agregalar, yaygın inşaat agregalarına kıyasla daha düşük yoğunluğa sahiptir. 2000 kg/m³'ün altında yoğunluğa sahip hafif agregalar, özellikle betonun ağırlığını azaltmak, dayanıklılığını artırmak ve termal ve akustik özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. Şimdiye kadar, hafif beton üretiminde birçok farklı hafif malzeme başarıyla kullanılmıştır. Bunlar arasında pomza, çürük veya diatomit gibi doğal malzemeler, genleşme için ısı işlemi gerektiren genleştirilmiş perlit, vermikülit, genleştirilmiş şist ve arduvaz veya şişirilmiş kil gibi doğal malzemelere dayalı yapay agregalar ve genleştirilmiş yüksek fırın çürüğü, sinterlenmiş uçucu kül veya sinterlenmiş arduvaz gibi endüstriyel yan ürünler yer almaktadır. Ancak, bu malzemelerin mekanik mukavemeti ve yoğunluğu türlere, kaynaklara ve üretim yöntemlerine göre değişir. Hafif agreganın işlevsel özellikleri kabuk kalınlığına, gözenek hacmine, gözenek dağılımlarına, boyutuna ve şekline bağlıdır. Agregalar şekilleri yuvarlak, kübik, köşeli veya düzensiz olabilir. İnce gözeneklerden ve açıkta iri gözenekli düzensiz yüzeylere kadar farklı dokulara sahip olabilir. Agregalar yüzey dokusu ve şekli, beton karışımının işlenebilirliğini, su ve çimento gereksinimlerini önemli ölçüde etkileyebilir [11].

2. Doğal Hafif Agregalar

Hafif beton üretiminde kullanılan doğal hafif agregalar pomza, skorya gibi volkanik kökenli malzemeler veya diatomit gibi fosil esaslı malzemelerdir. Bu doğal hafif agregalardan bazılarının fiziksel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Doğal hafif agregalardan bazılarının fiziksel özellikleri

Hafif agrega	Ertiv kurusu yoğunluk (kg/m ³)	Özgül ağırlık	24 saatlik su emme (%)	Kaynak
Pomza	790	1.26-1.51	18.1-28.8	[12-13]
Skorya	850	1.15-1.71	11.9-35.6	[12, 14-15]
Diatomit	420-600	1.85-2.45	61.0-112.0	[16-17]

2.1. Pomza

Orijinal pomza adı Latince pumex (köpük) kelimesinden gelmektedir. Pomza, riyolitik magmanın ani soğuması ve basıncın hızla düşmesi sonucu oluşan, yüksek oranda gözenekli yapıya sahip, hafif ve süngerimsi görümlü doğal bir volkanik cam türüdür. Gözenekliliği %80’in üzerinde olup, oldukça düşük yoğunluk ve geniş bir iç yüzey alanı sağlamaktadır. Pomzanın rengi sıklıkla gri veya beyazdır veya beyazdan altına, kahverengiden siyaha kadar değişir. Kimyasal olarak, amorf SiO₂ (≥%55), Al₂O₃ (en fazla %22) ve alkali oksitler açısından zengindir ve bu da onu puzolanik reaksiyonlar için uygun hale getirir. Pomza, düşük yoğunluk, iyi ısı yalıtımı, iyi yangın direnci ve yanmazlık, kabul edilebilir basınç dayanımı, makul elastikiyet ve düşük geçirgenliğe sahip gözenekli yapı gibi onu hafif agregası olarak nitelendiren birçok potansiyel özelliğe sahiptir [18-19].

Abbu ve diğ. [20] betona hem ince agregası hem de iri agregası yerine %20, 40, 60, 80 ve 100 oranlarında pomza ikame etmişlerdir. İnce agregası yerine pomza ikame edilen serilerde yoğunluklar 2 t/m³’ün üzerinde iken, iri agregası yerine %60 ve üzerinde pomza ikame edilen serilerde yoğunluklar 2 t/m³’ün altına inmiştir. Pomza ikamesi ile birlikte numunelerin basınç dayanımlarında %40’a kadar azalma meydana gelmiştir. Suseno ve diğ. [12] pomzayı iri agregası olarak kullanmışlar ve hafif beton üretmişlerdir. Üretilen bu betonların basınç dayanımları 18 ile 30 MPa arasında, yoğunlukları ise 1705 ile 1725 kg/m³ arasındadır. Shafiq ve diğ. [13] pomza agregası kullanarak ürettikleri hafif betonun birim hacim ağırlığının 1674 kg/m³, basınç dayanımının ise 10.5 MPa olduğunu belirtmişlerdir.

2.2. Skorya

Patlayıcı volkanik patlamaların bir ürünü olan skorya, dünyada yüzyıllardır yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Farklı araştırmacılar, beton üretiminde yapı malzemesi olarak skorya kullanımını incelemiştir. İri agrega olarak kullanılan skoryanın yeterli dayanıma sahip olması sayesinde, yapılardaki ölü yükü azaltma avantajı sağlayan hafif beton üretiminde oldukça faydalı olduğu belirlenmiştir [21]. Skorya hem teknik hem de çevresel avantajlar sunmaktadır. Birçok bölgede yerel olarak bol miktarda bulunan hafif, gözenekli bir volkanik malzeme olan skorya Şekil 1'de gösterilmiştir. Betonda kullanımı durumunda, mukavemetten ödün vermeden genel yapısal ölü yükü azaltabilir ve yalıtım özellikleri daha iyi olduğu için termal performansa katkıda bulunur. Bu özellikler, skoryaları hafif ve sürdürülebilir beton uygulamaları için ideal bir aday haline getirir [22].



Şekil 1. Skorya

Wan ve diğ. [14] iri agrega olarak %25, 50, 75 ve 100 oranlarında skorya içeren hafif beton üretmişlerdir. Karışımlarda skorya miktarı arttıkça numunelerin basınç dayanımları azalmıştır. Rajaonarison ve diğ. [23] iri agrega olarak skorya kullanarak ürettikleri hafif beton serilerinin yoğunluklarının 1200 ile 1730 kg/m³ arasında olduğunu belirtmişlerdir. Bu betonların termal iletkenlik değerleri ise 0.206 ile 0.402 W/(m.K) arasındadır. Hossain [15] iri agrega olarak skorya kullandığı iki farklı dozajda hafif beton üretmiştir. Bu betonların basınç dayanımı 25 ve 28 MPa, yoğunlukları ise 1845 ve 1875 kg/m³tür.

2.3. Diatomit

Diatomlar tek hücreli alglerden oluşmaktadır. Yeryüzünde en yaygın bulunan bitki gruplarından da biridir. Morfolojik açıdan birbirinden farklı yirmi beş binden fazla diatom türü mevcuttur. Diatomlar öldüğünde, minik kabukları batmakta ve yüzyıllar boyunca kalın tabakalar oluşturmaktadır.

Nihayetinde bu tortular fosilleşir ve diatomlu toprak olarak adlandırılan yumuşak, tebeşirli bir kayaya sıkışır. Hücresel yapısı ve yüksek gözenekliliği sayesinde hafif ve ısı iletkenliği düşüktür. Ancak reaktivitesi düşüktür ve yumuşak bir malzemedir [16]. Diatomit, birçok ülkede yaygın olarak mevcut olup, geniş rezervlere sahiptir ve %90'ın üzerinde konsantrasyonlara sahip yüksek düzeyde doğal amorf silika içerir [24].

Posi ve diğ. [17] diatomit agregası kullanarak hafif beton üretmişlerdir. Üretilen hafif betonların basınç dayanımları 6.4 ile 11.9 MPa, birim hacim ağırlıkları 1170 ile 1300 kg/m³ ve termal iletkenlik değerleri ise 0.166 ile 0.192 W/(m.K) arasındadır.

3. Yapay Hafif Agregalar

Beton, küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %10'una neden olmakta ve bu çevresel yük, agregata temini ile taşımacılık süreçleri sonucunda daha da artmaktadır. Doğal agregaların giderek azalması, inşaat sektöründe önemli ve acil bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çok boyutlu çevresel problemin çözümü, sürdürülebilir yaklaşımların benimsenmesini zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda, atık malzemelerin agregata ikamesi olarak geri dönüştürülmesi hem uygulanabilir hem de çevresel açıdan umut verici bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Geleneksel olarak yüksek kaliteli magmatik veya metamorfik kayalardan elde edilen granit ve bazalt, üstün fiziksel ve mekanik özellikleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilir. Özellikle bazalt, yüksek basınç dayanımı, uzun ömürlü yapısı ve kimyasal ile atmosferik etkilere karşı yüksek direnci sayesinde beton agregası olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Çok sayıda araştırma çalışması, agregata yerine atık malzemelerin kullanılmasının mümkün olup olmadığını araştırmış ve ayrıca birçok ülke geri dönüştürülmüş agregata kullanma yolculuğuna çıkmıştır [25].

Atık ürünlerin yeniden kullanımı, 21. yüzyılın temel sorunu haline gelmiştir. Atık kontrolü için en yeni sistemlerin geliştirilmesi, modern çağın en önemli araştırma alanlarından biridir. Bunun nedeni, gelişmekte olan insanlar tarafından yeterince kullanılan sıradan kaynakların tükenmesini önlemek için malzemelerin değiştirilmesi gerekliliğidir. Deprem gibi doğal afetlerin dünyanın dört bir yanındaki etkileri nedeniyle, yapının öz ağırlığını azalttığı için günümüzde hafif yapı tasarımına olan ihtiyaç artmaktadır. Hafif beton ayrıca inşaatın toplam maliyetini de düşürür [10].

Yapay agregata, doğal kaynak açlığını ve tahribatını hafifletmek için uygulanabilir bir yol olarak ortaya çıkmıştır. Sürdürülebilirlik kavramından ilham alan çeşitli katı atıkların yapay agregalara dönüştürülmesi teşvik edilmiştir. Hafif agregata, düşük yoğunluk, ısı yalıtımı ve maliyetler nedeniyle

agrega ailesinin önemli bir üyesidir. Hafif agrega miktarları, dünyadaki agregalara oranlara çok daha azdır. Bu arada, işletme ve taşıma süreci olumsuz yönde enerji tüketimi ve çevre kirliliği yaratır. Bu nedenle, doğada hazır bulunan hafif agrega yerine daha yeşil üretim yöntemleri keşfedilmektedir. Geri dönüştürülmüş katı atık alanında, iyi niteliklere sahip inşaat atıkları kaba agregalara dönüştürülmekte ve atık toz veya kül de yapay agregalar için bir seçenek olmaktadır. Bu toz veya kül atıkları hafif agrega üretiminde hammadde olarak kullanılabilir. Bu durum, bol miktarda işlenmemiş ince atık sorununa çözüm getirebilir. Sonuç olarak, sırasıyla yeniden kullanım, soğuk bağlama ve sinterleme yoluyla bir dizi geri dönüşüm ve yapay hazırlama yöntemi ortaya çıkmıştır [6].

Hammaddelerin karıştırılması, peletleme ve sertleştirme olmak üzere yapay agrega üretimi üç aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak, istenilen kıvam elde edilene kadar bileşenler peletleme diskinde karıştırılır. İnce parçacıkların agrega tanelerine dönüşmesiyle peletleme süreci başlar. Bazı araştırmalar bağlayıcı olarak metakaolin ve bentonit gibi puzolanik malzemeleri kullanmıştır. Alkali aktivatörler de geopolimer agrega üretmek için bağlayıcı olarak kullanılabilir. Disk açısı, diskin dönüş hızı ve nem içeriğine bağlı olarak, istenilen boyutlarda üretilen agrega taneleri diskten toplanır. Toplanan taze haldeki agrega taneleri sertleşmek ve dayanım kazanmak için sinterleme, soğuk bağlama veya otoklavlama işlemlerine tabi tutulur. Düşük enerji tüketimi ve betona uygulandığında iyi basınç dayanımı sağlaması nedeniyle soğuk bağlama yaygın olarak kullanılmaktadır. Beton karışımlarında kullanılan yapay hafif agrega inşaat sektörüne fayda sağlayabilir [9].

Sinterleme, yapay agrega üretmek için yüksek enerji tüketen bir işlemdir. Peletleme diskinden toplanan agregalar 24 saat kurutulduktan (oda sıcaklığında veya 105 °C etüvde) sonra yaklaşık 1200 °C sıcaklıkta sinterlenir. Sinterleme işlemi yüksek enerji tüketimi gerektirir ve bu da çevre sorunlarına yol açacak çok sayıda kirlenici üretir [9].

Soğuk bağlama, ince parçacıkları basınçlı veya basınçsız aglomerasyon yoluyla daha büyük parçacıklara dönüştürme işlemidir. Soğuk bağlamada çimento veya alkali çözelti bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Peletleme işleminden sonra toplanan agregalar 24 saat oda sıcaklığında kurutulur. Agregalar daha sonra test gününe kadar kapalı torbalarda muhafaza edilir. Soğuk bağlama işlemi düşük enerji tüketimi sebebiyle ekonomik ve çevreseldir. Atık su arıtma çamuru, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü ve uçucu kül, soğuk bağlamalı hafif agrega üretiminde kullanılan yaygın malzemelerdir [9].

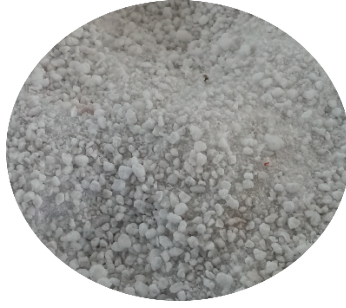
Otoklavlama, aglomerasyon aşamasında kireç veya alçıtaşı gibi kimyasalların eklenmesini içeren bir işlemdir. Otoklavlama için peletler, mukavemet kazanmak için otoklavlanmış basınç ve sıcaklık yardımıyla sertleştirilir [9]. Yapay hafif agregalardan bazılarının fiziksel özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Yapay hafif agregalardan bazılarının fiziksel özellikleri

Hafif agregası	Etüv kurusu yoğunluk (kg/m ³)	Özgül ağırlık	24 saatlik su emme (%)	Kaynak
Genleştirilmiş perlit	80	0.36	71.0-136.0	[26]
Genleştirilmiş kil agregası	450-1070	-	12.3-24.5	[27-29]
Sinterlenmiş uçucu kül agregası	1420	1.41-1.53	15.0-18.1	[30-32]
Atık lastik parçacıkları	510	1.1	1.5	[33]
Hafif geopolimer agregası	1100	-	4.7	[34]

3.1. Genleştirilmiş Perlit

Perlit, doğal olarak oluşan silisli volkanik bir kaya olup 1800’lü yıllardan bu yana inşaat, bahçecilik ve endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Kimyasal olarak inert ve hafif yapısı sayesinde filtreleme, yalıtım, drenaj ve zemin iyileştirme gibi çok çeşitli uygulamalara sahiptir. 700-1200 °C’de ısıtılarak oluşturulan genleştirilmiş perlit, hacmini 15-20 kat artırarak düşük yoğunluklu, ısı ve ses yalıtımı yüksek, yanmaz bir yapı malzemesine dönüşür. Bu genleştirilmiş form, çimento esaslı kompozitlerde agregası ya da dolgu malzemesi olarak kullanılarak birim hacim ağırlığını düşürür ve malzemenin yalıtım özelliklerini artırır. Ancak hücreli yapısından dolayı mekanik dayanımı bir miktar azaltabilir. Perlit üretiminin büyük kısmı Türkiye, Yunanistan, ABD, Japonya, Macaristan ve İtalya tarafından gerçekleştirilmektedir [35-37]. Şekil 2’de genleştirilmiş perlit agregası tanecikleri gösterilmektedir.



Şekil 2. Genleştirilmiş perlit

Whwah ve diğ. [26] ince agrega olarak genleştirilmiş perlit kullanılan farklı karışım içeriklerine sahip hafif betonlar üretmişlerdir. Bu hafif betonların basınç dayanımları 7 ile 40 MPa arasındadır. 1450 kg/m^3 'e kadar düşen yoğunluğa sahip olan bu serilerin termal iletkenlikleri 0.43 ile 1.14 W/(m.K) arasındadır. Ibrahim ve diğ. [38] beton karışımlarına ince agrega yerine %10, 15 ve 20 oranlarında genleştirilmiş perlit ikame ederek mineral katkılı beton üretmişlerdir. Numunelerin birim hacim ağırlığı 1729 ile 2008 kg/m^3 , basınç dayanımı 24 ile 42 MPa, termal iletkenlik değerleri ise 0.392 ile 0.577 W/(m.K) arasındadır.

3.2. Genleştirilmiş Kil Agregası

Genleştirilmiş kil agregası, dünya genelinde yirmiden fazla ülkede farklı ticari isimler altında üretilmektedir. Üretim yöntemleri ülkeler arasında büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. Örneğin; İngiltere, İran, Portekiz, Finlandiya, Almanya, İtalya, Danimarka ve İsviçre'de bu malzeme "LECA" adıyla; İsveç, Çin, Polonya ve Rusya'da "Keramzit" olarak; İspanya'da "Liapour" ve Güney Afrika'da ise "Argex" ticari ismiyle pazarlanmaktadır. Genleştirilmiş kil agregası, kireç içeriği çok düşük özel plastik killerden üretilir. Üretim sürecinde kil, öncelikle kurutulur, ardından 1100-1300 °C'ye kadar döner fırınlarda yakılır. Isıtma sırasında peletlerin içine gaz salınır ve soğutma sırasında bu hava pelet içerisinde hapsolür, organik bileşikler ise yanarak peletlerin genişlemesine (veya şişmesine) neden olur ve gözenekli, hafif ve yüksek ezilme direncine sahip seramik peletler üretilir (Şekil 3). Genleştirilmiş kil agregası peletleri hacimce 5-6 kata kadar genişleyebilir. Genleştirilmiş kil agregası, fırının dairesel hareketi nedeniyle neredeyse yuvarlak bir şekle sahiptir. Genleştirilmiş kil agregası parçacıklarının içinde, çoğunlukla birbirine bağlı olan farklı boyutlarda delikler bulunur. Sinterleme sürecinde sıcaklığın yükseltilmesi, toplam gözenekliliğin artmasına ve birbirine bağlı sürekli gözeneklerin oluşmasına neden olabilir [39].



Şekil 3. Genleştirilmiş kil agregası

Bogas ve diğ. [27] genleştirilmiş kil agregası kullanarak yoğunluğu 1797 kg/m^3 ve basınç dayanımı 39.8 MPa olan kendiliğinden yerleşen hafif beton üretmişlerdir. Sivaskumar ve Kameshwari [28] beton karışımlarında farklı oranlarda kullandıkları genleştirilmiş kil agregası ile betonların ağırlığını yaklaşık %15 oranında azaltırken, basınç dayanımlarında ise %45'e varan dayanım düşüşleri olduğunu belirtmişlerdir. Rumsys ve diğ. [29] kum yerine farklı oranlarda genleştirilmiş kil agregası kullanarak basınç dayanımı 43.8 ile 109.4 MPa arasında, yoğunluğu ise 1588 ile 2302 kg/m^3 arasında değişen betonlar üretmişlerdir.

3.3. Genleştirilmiş Polistiren Taneleri

Son yıllarda, inşaat sektöründe genleştirilmiş polistiren uygulamalarına olan ilgi hızla artmaktadır. Genleştirilmiş polistiren, hafif ancak sert bir köpük yapısı, iyi ısı yalıtımı ve yüksek darbe dayanımı sayesinde çeşitli uygulamalarda kullanılan köklü bir yalıtım malzemesidir. Bunun yanı sıra, düşük ağırlıkta yüksek yük taşıma kapasitesi, mutlak su ve buhar bariyeri, kontrollü ortamlar için hava geçirmezlik, uzun ömür, düşük bakım, hızlı ve ekonomik yapı özelliklerine sahiptir. Genleştirilmiş polistirendeki köpük, yaklaşık %98 hava içeren küçük küresel şekilli parçacıklardan oluşan hafif bir hücresel plastiktir. Kapalı hücre yapısı sayesinde mükemmel yalıtım ve darbe emici özelliklere sahiptir [40]. Genleştirilmiş polistiren taneli beton ile ilgili çalışmayı ilk olarak Cook [41] yapmıştır [42].

Cui ve diğ. [43] genleştirilmiş polistiren taneleri kullanarak 793 kg/m^3 yoğunluğa sahip ve basınç dayanımını 2.86 MPa olan hafif beton üretmişlerdir. Xu ve diğ. [44] kum yerine hacimce %40 oranında genleştirilmiş polistiren taneleri kullanarak ürettikleri hafif betonların yoğunluklarının 1200 ile 1530 kg/m^3 arasında olduğunu bildirmişlerdir. Bu numunelerin termal iletkenlikleri 0.40 ile 0.48 W/(m.K) arasındadır. Jian [45] yaptığı çalışmada genleştirilmiş polistiren taneleri kullanarak ürettiği hafif betonun basınç

dayanımının yaklaşık 5.3 MPa, eğilme dayanımının ise 2.05 MPa olduğunu bildirmiştir.

3.4. Sinterlenmiş Uçucu Kül Agregası

Onlarca yıldır, çeşitli kaynaklardan üretilen uçucu külün kullanımı insan medeniyeti için büyük bir zorluk olmuştur. Sinterlenmiş uçucu kül agregası olarak bilinen uçucu külden üretilen agregalar, doğal agregaların kıtlığı, uçucu kül bertarafı için yeterli alanın bulunmaması ve doğal kaynakların korunması gibi sorunları çözenin bir yoludur. Fabrika yapımı sinterlenmiş uçucu kül agregası, hafif uygulaması ve uçucu külü tüketerek ve iri doğal agrega kıtlığını azaltarak yeşil inşaat malzemesi geliştirmeye katkısı nedeniyle birçok ülkede oldukça popülerdir [46].

Kumar ve diğ. [30] 28.64 ile 54.45 MPa arasında basınç dayanımına sahip sinterlenmiş uçucu kül agregası içeren mineral katkılı kendiliğinden yerleşen hafif betonlar üretmişlerdir. Rawat ve Pasla [31] sinterlenmiş uçucu kül agregası kullanarak uçucu kül ve yüksek fırın cürufu esaslı hafif geopolimer beton üretmişlerdir. Ürettikleri betonlar 1800 kg/m^3 'ün altında yoğunluğa, 17 MPa'nın üstünde basınç dayanımına sahiptir. Dhemla ve diğ. [32] sinterlenmiş uçucu kül agregalı betonların basınç dayanımlarının 25 ile 45 MPa arasında olduğunu, birim hacim ağırlıklarının ise 2 t/m^3 'ün altında olduğunu bildirmişlerdir.

3.5. Atık Lastik Parçacıkları

2023 yılında Dünya çapında yıllık lastik üretimi yaklaşık 1.4 milyar lastiktir ve bu her yıl tahmini 17 milyon ton kullanılmış lastiğe karşılık gelmektedir. En çok atık lastiği üretenler Çin, Avrupa Birliği, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya ve Hindistan'dır. Her yıl küresel olarak tahmini 1 milyar lastik hizmet ömrünü tüketmekte ve bu miktarın 2030 yılına kadar 1.2 milyara ulaşması öngörülmüyor. Ancak bu hizmet ömrünü tamamlayan lastiklerin yarısından fazlası işlenmeden dünyanın dört bir yanındaki çöplüklere atılmakta veya stok alanlarında depolanmaktadır. Çöp ve depolama alanlarının dolması ve diğer çevresel sorunlar nedeniyle, atık lastik kauçuğunun çöpe atılması ve stoklanması her zaman en iyi seçenek değildir [47]. Bu atık lastikler Şekil 4'teki gibi çeşitli tane boyutlarında parçalanarak betonda agrega olarak kullanımı mümkün olup, bu atıkların geri dönüşümlerine katkıda bulunulabilir.



Şekil 4. Atık lastik parçacıkları

İslam ve diğ. [33] iri agregalar olarak iki farklı boyut aralıklarında lastik parçacıkları kullanarak hafif beton üretmişlerdir. Bu betonların basınç dayanımları 6 ile 7MPa, yoğunlukları 1584 ile 1674 kg/m³, termal iletkenlik değerleri ise 0.49 ve 0.61 W/(m.K) arasındadır. Kantasiri ve diğ. [48] farklı miktarlarda atık lastik kırıntıları kullanarak ürettikleri hafif betonun birim hacim ağırlığını 1500 kg/m³'e kadar düşürebildiklerini bildirmişlerdir. Bu serinin basınç dayanımı ise 7.5 MPa'dır.

3.6. Hafif Geopolimer Agregası

İnşaat atıklarının yeniden değerlendirilmesinde kullanılan stratejilerden biri, cüruf (öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu) ve alkali (sodyum veya potasyum esaslı) bir çözeltinin birleştirilmesiyle üretilen hafif geopolimer agregası kullanımını içerir. Yeni agregası kaynaklarına olan ihtiyacın artması, hafif geopolimer agregası üretiminin artmasına neden olmuştur. Bu bağlamda, son araştırmalar, özellikle betonda geleneksel iri agregaların kısmi bir ikamesi olma potansiyeli olmak üzere, hafif geopolimer agregasının geri dönüşümü ve yeniden kullanımı konusunda ümit verici sonuçlar bildirmiştir. DeneySEL araştırmalar, hafif geopolimer agregasının, elde edilen betonun mekanik performansından ödün vermeden %20'ye kadar ikame seviyelerinde etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir [25]. Şekil 5'te hafif geopolimer agregası taneleri gösterilmektedir.



Şekil 5. Hafif geopolimer agregası

Tawfik ve diğ. [49] yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve perlit toz karışımına alkali çözelti ilave ederek hafif geopolimer agregası üretmişlerdir. Bu hafif geopolimer agregaları kullanılarak hafif beton numuneleri üretmişlerdir. Bu numunenin birim hacim ağırlığı 1.87 t/m^3 ve basınç dayanımı 20.2 MPa 'dır. Razak ve diğ. [34] hafif geopolimer agregası içeren hafif beton üretmişlerdir. Bu betonun basınç dayanımı 41.89 MPa , yoğunluğu ise 1760.1 kg/m^3 'tür.

4. Sonuç

Hafif beton üretiminde pomza, skorya, perlit, vermikülit gibi doğal hafif agregalar ve atık malzemelerin geri dönüşümlerinin sağlanmasını amaçlayan lastik atıkları, hafif geopolimer agregası, sinterlenmiş uçucu kül agregası gibi yapay hafif agregalar kullanılmaktadır. Hafif agregaların düşük yoğunlukları ve düşük dayanımları sebebiyle hafif betonların basınç dayanımları normal ağırlıklı betonların basınç dayanımlarına göre daha düşük olmaktadır. Hafif agregalar betonun birim hacim ağırlığını azaltarak yapıdaki betondan kaynaklanan ölü yük miktarını azaltmaktadır. Bununla birlikte taşıyıcı elemanların boyutlarının azalması ve deprem esnasında yapıya etki eden deprem kuvvetini azaltmak gibi avantajlar sunmaktadır. Hafif betonların normal ağırlıklı betonlara göre daha düşük termal iletkenlik katsayılarına sahip olması sebebiyle yapıya ilave bir ısı yalıtımı katkısı sağlanmaktadır. Genel olarak 1800 kg/m^3 birim hacim ağırlığındaki hafif betonların basınç dayanımları normal ağırlıklı betonların basınç dayanımlarına yakinken, birim hacim ağırlığında 1000 kg/m^3 'ün altına düşüldüğünde hafif betonların basınç dayanımları 10 MPa 'ı geçememektedir. Bu birim hacim ağırlığındaki hafif betonların basınç dayanımlarının artırılması ve taşıyıcı hafif beton sınıfına girebilmesi için çeşitli yöntemler araştırılmaktadır. Özellikle yapay hafif agregası üretiminde agreganın basınç dayanımının çeşitli katkı veya kür işlemleri ile artırılması amaçlanırken, agregası tane yoğunluğu da azaltılmaya çalışılmaktadır.

Kaynaklar

- [1] Karthika, R. B., Vidyapriya, V., Sri, K. V. N., Beaula, K. M. G., Harini, R., & Sriram, M. (2021). Experimental study on lightweight concrete using pumice aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 43(2), 1606-1613. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.762>
- [2] Alshannag, M. J., Charif, A., Alqarni, A. S., & S. Nasser, (2022). Flexural performance and ductility of RC beams made using natural LWA. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00942. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00942>
- [3] Mohammed, W. J., Tariq, N., & Hussein, Z. M. (2023). Mechanical properties of sustainable fiber-reinforced lightweight aggregate concrete. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 27(06), 811-822. <https://doi.org/10.31272/jcasd.27.6.11>
- [4] Zhou, J., Dong, Y., Qiu, T., Lv, J., Guo, P., & Liu, X. (2025). The microstructure and modification of the interfacial transition zone in lightweight aggregate concrete: A review. *Buildings*, 15(15), 2784. <https://doi.org/10.3390/buildings15152784>
- [5] Alqahtani, F. K., Sherif, M. A., & Ghanem, A. M. (2023). Green lightweight concrete utilizing sustainable processed recycled plastic aggregates: Technical, economic and environmental assessment. *Construction and Building Materials*, 393, 132027. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132027>
- [6] Shang, X., Chang, J., Yang, J., Ke, X., & Duan, Z. (2022). Life cycle sustainable assessment of natural vs artificial lightweight aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 367, 133064. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133064>
- [7] Gravina, R. J., Xie, T., Bennett, B., & Visintin, P. (2021). HDPE and PET as aggregate replacement in concrete: Life-cycle assessment, material development and a case study. *Journal of Building Engineering*, 44, 103329. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103329>
- [8] Hao, D. L. C., Razak, R. A., Kheimi, M., Yahya, Z., Abdullah, M. M. A. B., Nergis, D. D. B., Fansuri, H., Ediaty, R., Mohamed, R., & Abdullah, A. (2022). Artificial lightweight aggregates made from pozzolanic material: A review on the method, physical and mechanical properties, thermal and microstructure. *Materials*, 15(11), 3929. <https://doi.org/10.3390/ma15113929>
- [9] Hao, D. L. C., Razak, R. A., Yahya, Z., Abdullah, M. M. A. B., & Abdullah, A. (2024). Properties of artificial lightweight aggregates from various pozzolan materials – A review. *Archives of Metallurgy and Materials*, 69(4), 1407-1412. <https://doi.org/10.24425/amm.2024.151407>

- [10] Vali, K. S., & Bala M. S. (2017). Overview of artificial lightweight aggregates-A review. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 8(6), 360-369.
- [11] Fořt, J., Afolayan, A., Medveď, I., Scheinherrová, L., & Černý, R. (2024). A review of the role of lightweight aggregates in the development of mechanical strength of concrete. *Journal of Building Engineering*, 89, 109312. <https://doi.org/10.1016/j.jobc.2024.109312>
- [12] Suseno, H., Wijaya, M. N., & Firdausy, A. I. (2021). Correlation between destructive and non-destructive characteristics of pumice and scoria lightweight concretes. *Engineering Journal*, 25(8), 114-126. <https://doi.org/10.4186/cj.2021.25.8.113>
- [13] Shafiq, M. S., Khan, F. A., Badrashi, Y. I., Khan, F. A., Fahim, M., Abbas, A., & Adil, W. (2021). Evaluation of mechanical properties of lightweight concrete with pumice aggregate. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 15(2), 30-38. <https://doi.org/10.12913/22998624/135198>
- [14] Wan, D. S. L. Y., Aslani, F., & G. Ma, (2018). Lightweight self-compacting concrete incorporating perlite, scoria, and polystyrene aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8), 04018178. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002350](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002350)
- [15] Hossain, K. M. A. (2004). Properties of volcanic scoria based lightweight concrete. *Magazine of Concrete Research*, 56(2), 111-120. <https://doi.org/10.1680/macrc.2004.56.2.111>
- [16] Posi, P., Lertnimoolchai, S., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2013). Pressed lightweight concrete containing calcined diatomite aggregate. *Construction and Building Materials*, 47, 896-901. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.094>
- [17] Posi, P., Lertnimoolcha, S., Sata, V., Phoo-ngernkham, T., & Chindaprasirt, P. (2014). Investigation of properties of lightweight concrete with calcined diatomite aggregate. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(5), 1429-1435. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0637-5>
- [18] Rashad, A. M. (2019). A short manual on natural pumice as a lightweight aggregate. *Journal of Building Engineering*, 25, 100802. <https://doi.org/10.1016/j.jobc.2019.100802>
- [19] Moolchandani, K. (2025). Advancements in pumice-based concrete: A comprehensive review. *Next Materials*, 8, 100646. <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.100646>
- [20] Abbu, M., Al-Attar, A. A., Alrahman, S. A., & Al-Gburi, M. (2023). The mechanical properties of lightweight (volcanic pumice) concrete containing fibers with exposure to high temperatures. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 32, 20220249. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0249>

- [21] Warati, G. K., Darwish, M. M., Feyessa, F. F., & Ghebrab, T. (2019). Suitability of scoria as fine aggregate and its effect on the properties of concrete. *Sustainability*, 11(17), 4647. <https://doi.org/10.3390/su11174647>
- [22] Shitu, A., & Shitu, E. (2025). Volcanic scoria as a sustainable alternative to sand in structural lightweight concrete. *Scientific Reports*, 15, 34431. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-17494-0>
- [23] Rajaonarison, E. F., Gacoin, A., Randrianja, R., Ranaivoniarivo, V. G., & Razafindrabe, B. H. N. (2017). Effect of scoria on various specific aspects of lightweight concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11, 541-555. <https://doi.org/10.1007/s40069-017-0204-9>
- [24] Jian, H., Zhu, E., Cai, W., Bai, Z., Yao, T., & Li, J. (2025). Effects of diatomite on fracture and damping behavior of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 483, 141767. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141767>
- [25] Kumar, T. U., & Kumar, M. V. (2025). Influence of geopolymer aggregate on the durability, mechanical characteristics and chemical properties of concrete. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 10, 148. <https://doi.org/10.1007/s41024-025-00654-0>
- [26] Whwah, M. S., Al-Hussainy, H. A., Dulaimi, A., Bernardo, L. F. A., & Ribeiro, T. P. (2025). Investigation of the effects of water-to-cement ratios on concrete with varying fine expanded perlite aggregate content. *Journal of Composites Science*, 9, 390. <https://doi.org/10.3390/jcs9080390>
- [27] Bogas, J. A., Gomes, A., & Pereira, M. F. C. (2012). Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate. *Construction and Building Materials*, 35, 1013-1022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.111>
- [28] Sivakumar, S., & Kameshwari, B. (2015). Influence of fly ash, bottom ash, and light expanded clay aggregate on concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 849274. <https://dx.doi.org/10.1155/2015/849274>
- [29] Rumsys, D., Spudulis, E., Bacinskas, D., & Kaklauskas, G. (2018). Compressive strength and durability properties of structural lightweight concrete with fine expanded glass and/or clay aggregates. *Materials*, 11(12), 2434. <https://doi.org/10.3390/ma11122434>
- [30] Kumar, P., Pasla, D., & Thiagarajan, J. S. (2025). Synergetic effect of coarse sintered fly ash aggregates and supplementary cementitious materials in self-compacting concrete: From durability and corrosion perspective. *Journal of Building Engineering*, 108, 112969. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112969>
- [31] Rawat, R., & Pasla, D. (2024). Evaluating the corrosion resistance and LCA of lightweight geopolymer concrete integrating sintered fly ash ag-

- gregate as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 449, 138370. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138370>
- [32] Dhemla, P., Somani, P., Satankar, R. K., & Swami, B. L. (2023). Mechanical and microstructure properties of plain and blended cement structural lightweight aggregate concrete using sintered fly ash aggregates. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1149, 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1149/1/012008>
- [33] Islam, M. M. U., Li, J., Roychand, R., & Saberian, M. (2023). Microstructure, thermal conductivity and carbonation resistance properties of sustainable structural lightweight concrete incorporating 100% coarser rubber particles. *Construction and Building Materials*, 408, 133658. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133658>
- [34] Razak, R. A., Bakri, A. M. M. A., Kamarudin, H., Ismail, K. N., Hardjito, D., & Zarina, Y. (2018). Performances of artificial lightweight geopolymer aggregate (ALGA) in OPC concrete. *Key Engineering Materials*, 673, 29-35. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.673.29>
- [35] Rashad, A. M. (2016). A synopsis about perlite as building material - A best practice guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*, 121, 338-353. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.001>
- [36] Maxim, L. D., Niebo, R., & McConnell, E. E. (2014). Perlite toxicology and epidemiology - a review. *Inhalation Toxicology*, 26(5), 259-270. <https://doi.org/10.3109/08958378.2014.881940>
- [37] Mercan, E., & Yilmazer, S. (2022). Study of physical and mechanical properties of aerogel-modified expanded perlite aggregate and clay (AEP/C) board. *Construction and Building Materials*, 361, 129602. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129602>
- [38] Ibrahim, M., Ahmad, A., Barry, M. S., Alhems, L. M., & Suhoothi, A. C. M. (2020). Durability of structural lightweight concrete containing expanded perlite aggregate. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14, 50. <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00425-w>
- [39] Rashad, A. M. (2018). Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview. *Construction and Building Materials*, 170, 757-775. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.009>
- [40] Sulong, N. H. R., Mustapa, S. A. S., & Rashid, M. K. A. (2019). Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(2), 47529. <https://doi.org/10.1002/app.47529>
- [41] Cook, D.J. (1972). *Expanded polystyrene beads as lightweight aggregate for concrete*. School of Civil Engineering, University of New South Wales.
- [42] Prasittisopin, L., Termkhajornkit, P., & Kim, Y. H. (2022). Review of concrete with expanded polystyrene (EPS): Performance and environ-

- mental aspects. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132919. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132919>
- [43] Cui, C., Huang, Q., Li, D., Quan, C., & Li, H. (2016). Stress-strain relationship in axial compression for EPS concrete. *Construction and Building Materials*, 105, 377-383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.159>
- [44] Xu, Y., Jiang, L., Liu, J., Zhang, Y., Xu, J., & He, G. (2016). Experimental study and modeling on effective thermal conductivity of EPS lightweight concrete. *Journal of Thermal Science and Technology*, 11(2), JTST0023. <https://doi.org/10.1299/jtst.2016jtst0023>
- [45] Jian, C. (2014). The influence of redispersible powder on mechanical properties of eps light-aggregate concrete. *Applied Mechanics and Materials*, 651-653, 173-176. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.651-653.173>
- [46] Patra, R. K. & Mukharjee, B. B. (2025). Factorial experimental design for developing sustainable concrete incorporating metakaolin and sintered fly ash aggregates. *Asian Journal of Civil Engineering*, 26, 4859-4873. <https://doi.org/10.1007/s42107-025-01461-1>
- [47] Helmy, S. H., Tahwia, A. M., Mahdy, M. G., Elrahman, M. A., Abed, M. A., & Youssf, O. (2023). The use of recycled tire rubber, crushed glass, and crushed clay brick in lightweight concrete production: A review. *Sustainability*, 15(13), 10060. <https://doi.org/10.3390/su151310060>
- [48] Kantasiri, T., Kasemsiri, P., Pongsa, U., Posi, P., & Chindapasirt, P. (2024). Optimization of concrete containing waste crumb rubber mix design for thermal insulating applications using Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 434, 136636. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136636>
- [49] Tawfik, T. A., Kamal, A. H., & Faried, A. S. (2024). Assessment of the properties of concrete containing artificial green geopolymer aggregates by cold bonding pelletization process. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 27329-27344. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32987-7>