

Araştırma Makalesi

Yapı Malzemesi Olarak Camın Geri Dönüşümü

Gizem ERTAŞ^{1,a,*}, Esmâ MIHLAYANLAR^{2,b}

¹ Mimarlık Bölümü, Mimarlık Fakültesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trakya Üniversitesi, Edirne, Türkiye, 22100

² Mimarlık Bölümü, Mimarlık Fakültesi, Trakya Üniversitesi, Edirne, Türkiye, 22100

^agizemerta13@gmail.com, ^bemihlayanlar@trakya.edu.tr

Geliş: 17.02.2025

Kabul: 10.07.2025

DOI: 10.55581/ejeas.1641367

Öz. Dünya nüfusunun artışı ve teknolojinin gelişmesine bağlı olarak tüketim alışkanlıkları farklılaşmıştır. Bu alışkanlıklar çevre üzerinde tahribatı ve atık miktarını artırmıştır. Doğal kaynakların sonsuz olmadığı ve bilinçsizce kullanıldıkları takdirde tükenebilecekleri bir gerçektir. Bu durum atıkların tekrar kullanılmasını ve geri dönüşümü önemli kılmaktadır. Çevrenin korunması ve enerji tasarrufu açısından da kaynak israfını önlemek gerekmektedir. İnşaat sektörü dünya üzerindeki atık oluşumundan büyük oranda sorumludur. Bir yapının üretimi; hammaddenin doğadan elde edilmesinden başlayarak yapılarda kullanılması ve kullanım ömrünü tamamlaması ile tekrar doğaya geri dönmesini kapsayan uzun bir süreçtir. Yapı malzemeleri üretiminde kaynak kullanımı ve sera gazı emisyonu değişebilmektedir. Bu noktada karbon ayak izinin azaltılması için geri dönüşümün rolü büyüktür. Cam, doğal hammadde ve uzun yaşam ömrüyle geri dönüştürülebilen bir malzemedir; ancak kullanım oranlarının fazlalığı nedeniyle geri dönüşüm süreci dikkat ve özen gerektirmektedir. Cam yapı malzemesi bina kabuğunda yatay, dikey ve eğik yüzeylerde ışık geçirgenliği özelliğiyle saydam yapı elemanlarının vazgeçilmez ögesidir. Yapı camları, gün ışığını iç mekâna alarak aydınlatma ihtiyacını karşılayan temel elemanlar olmanın yanı sıra, teknolojik gelişmelerle birlikte kullanım alanları genişlemiş; yapılara manzara sunma ve estetik açıdan şekil verme işlevleri de kazanmıştır. Günümüzde çok katlı binaların ve bu binaların cephelerinde kullanılan saydamlık oranlarının artması; cam malzemelerin üretim ve geri dönüşüm evreleriyle, doğa üzerinde oluşturduğu etkinin de incelenmesini gerekli kılmaktadır. Türkiye; inşaat sektöründe kullanılan yapı camı üretiminin büyük bir oranını kendi bünyesinde karşılayabilmektedir. Bu çalışmada, cam yapı malzemesinin genel özellikleri, geri dönüşüm yöntemleri ve bu süreçlerden elde edilen kazanımlar incelenmektedir. Camın hammadde ve kaynak kullanımı açısından sürdürülebilir yapı malzemesi özellikleri vurgulanmaktadır.

Anahtar kelimeler: Atık, Cam yapı malzemesi, Geri dönüşüm ve sürdürülebilir yapı malzemesi.

Recycling of Glass as a Building Material

Abstract: Global population growth and technological advancements have altered consumption habits, increasing environmental degradation and waste. Natural resources are finite and can be depleted if misused, making recycling and reuse essential. Preventing resource waste is also crucial for environmental protection and energy conservation. The construction industry significantly contributes to global waste generation. A building's lifecycle—from raw material extraction to use and eventual disposal—is a long and resource-intensive process. Greenhouse gas emissions and resource consumption vary across building material production, where recycling plays a key role in reducing the carbon footprint. Glass, with its natural raw materials and long lifespan, is a recyclable material. However, due to its widespread use, recycling requires careful management. As a building material, glass is essential for transparent architectural elements due to its light transmittance on horizontal, vertical, and inclined surfaces. Beyond enabling daylight access and reducing artificial lighting needs, advances in technology have expanded its role, enhanced aesthetics and providing views. The increasing use of glass in high-rise façades necessitates examining its production and recycling impacts. Turkey largely meets its architectural glass demand through domestic production. This study explores the general properties of glass as a building material,

*Sorumlu yazar

E-posta adresi: gizemerta13@gmail.com (G. Ertaş)

recycling methods, and associated benefits. It also emphasizes the sustainability of glass in terms of raw material and resource efficiency.

Keywords: Waste, Glass building material, Recycling and sustainable building material.

1. Giriş

Modern toplumların hızla artan nüfusu ve sanayileşme ile, insan faaliyetlerinin doğa üzerindeki etkileri giderek daha belirgin hale gelmiştir. Bu etkiler, çevreye farklı derecelerde zarar vermekte; özellikle atık üretimi, doğal kaynakların tükenmesi ve çevre kirliliği gibi sorunlar, küresel ölçekte ciddi tehditler oluşturmaktadır. Sektörel bazda incelendiğinde, inşaat sektörünün atık üretimi konusunda önemli bir paya sahip olduğu görülmektedir [1]. İnşaat sektörü, üretim, kullanım ve yıkım süreçlerinde yüksek miktarda atık üreten başlıca sektörlerden biri olarak öne çıkmaktadır. İnşaat faaliyetleri, yalnızca büyük miktarda malzeme tüketimi ile değil, aynı zamanda bu malzemelerin doğaya atılması veya işlenmesi ile de çevresel etkiler yaratmaktadır [2]. Dolayısıyla, inşaat sektöründeki geri dönüşüm uygulamalarının, öneminin vurgulanması kritik bir noktadır. Sektörel bazda atık üretim oranlarını gösteren Tablo 1, bu durumu somut bir biçimde

ifade etmektedir. Kentsel dönüşüm, yeni bina inşaatı ve eski yapıların yıkılması gibi faktörlere bağlı olarak, inşaat sektörünün diğer sektörlerle kıyasla daha yüksek atık oranına sahip olduğu açıkça görülmektedir. Ancak, inşaat sektörü aynı zamanda atıkların farklı işlevlerle yeniden kullanımına olanak tanıyabilme potansiyeli de taşımaktadır ve bu yönüyle geri dönüşüm potansiyeli en yüksek sektörlerden biridir. Dünya çapında her yıl inşaat malzemeleri ve ürünlerinin üretilebilmesi için üç milyar tondan fazla ham maddenin kullanıldığı, bu oranın küresel ekonominin yaklaşık %40-50'sine denk geldiği öngörülmektedir [3,4]. Özellikle Dünya Kaynakları Enstitüsü'nün bir raporuna göre, önümüzdeki 50 yıl içinde dünya nüfusunun ve ekonomik faaliyetlerin artmasıyla birlikte, enerji ve malzeme kullanımının %300 oranında bir artış göstermesi beklenmektedir [5]. Bu sebeplerle, inşaat sektöründe atık oluşumunun azaltılması, mevcut ürünlerin yeniden kullanımının teşvik edilmesi ve hammaddelerin korunması oldukça önemlidir [6].

Tablo 1. Dünya Genelindeki Atık Üretiminin Sektörlere Göre Dağılımı

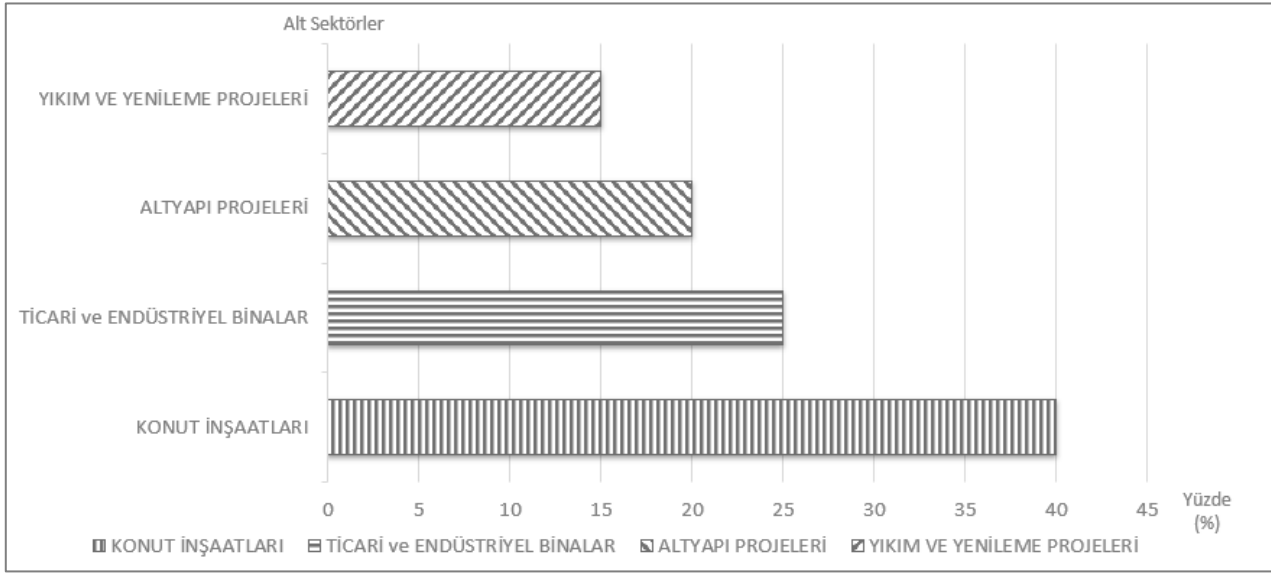
Sektörler	Toplam Atık Üretimindeki Payı	Atık Türü	Nedenleri	Öne Çıkan Özellik
İnşaat ve Yıkım Sektörü	%35-40 [7,8,9]	Beton, Tuğla, Cam, Metal, Ahşap	Kentsel dönüşüm, yeni bina inşaatı ve eski yapıların yıkılması.	Geri dönüşüm potansiyeli en yüksek sektörlerden biridir.
Tarım ve Gıda Sektörü	%25-30 [10]	Gıda atıkları, bitki artıkları, hayvansal atıklar.	Hasat kayıpları, işlenmesi, tüketimden kaynaklanan israf.	Gıda atıklarındaki metan gazı salınımına yol açar, kompost üretimi ile geri kazanılabilmektedir.
Sanayi ve Üretim Sektörü	%10-15 [7,9]	Kimyasal atıklar, plastik, metal hurdaları, toksik maddeler.	Üretimdeki verimsizlikler ve yan ürünler.	Bazı sanayi kuruluşları tehlikeli olarak sınıflandırılır ve özel bakım yöntemleri içerir.
Evsel Atıklar	%10-15 [9,10]	Organik atıklar, plastik, cam, kâğıt, metal.	Hane halkının tüketimi ve yanlış atık yönetimi.	Geri dönüşüm ve kompost yöntemleri ile önemli miktarda atık azaltılabilir.
Enerji Sektörü	%5-10 [9]	Kömür külü, petrol yan ürünleri, radyoaktif atıklar.	Fosil yakıtların kullanımı ve enerji üretimi artışı.	Nükleer atıklar uzun süreli depolama süreçlerini içerir.
Ticaret ve Perakende Sektörü	%5-7 [10]	Ambalaj atıkları, plastik, kâğıt, tekstil ürünleri.	Aşırı ambalajlama, modası geçmiş anlayışı.	Tek kullanımlık ürün kullanımı atık hacmini artırır.
Tekstil ve Moda Sektörü	%3-5 [10]	Kumaş artıkları, sentetik tekstiller, boya kimyasalları.	Hızlı moda anlayışı ve aşırı tüketim.	Yeniden kullanım ve geri dönüşümle sürdürülebilir çözümler üretilebilir.

İnşaat sektöründeki atık üretimi, kullanılan malzemelere ve farklı yapı türlerine göre değişiklik göstermektedir. Literatür verileri doğrultusunda yazarlar tarafından oluşturulan Şekil 1, inşaat sektöründeki atık oluşumunun alt sektörler göre dağılımını ifade etmektedir [8]. Konut inşaatlarındaki beton malzeme kullanımı, büyük miktarda atık oluşturarak sektördeki toplam atık üretiminde önemli paya sahiptir. Betonun yüksek hacmi ve çevresel etkileri, bu alandaki atık yönetimini zorlaştıran ana faktörlerden biridir [2]. Diğer

yandan, endüstriyel binalarda cam ve metal gibi malzemeler daha fazla yer bulmakta, bu da bu tür binalarda atık üretimini artırmaktadır. Özellikle yüksek katlı binaların yaygınlaşmasıyla birlikte cam cephelerin kullanımının artması, cam atıklarının da önemli ölçüde çoğalmasına yol açmıştır [11]. Bu nedenle, cam malzemelerin geri dönüşümüne yönelik stratejilerin geliştirilmesi, atık yönetiminde sürdürülebilir bir yaklaşım için kritik bir gerekliliktir. Cam, geri dönüştürülebilir bir malzeme

olduğundan, uygun geri dönüşüm yöntemleriyle çevresel etkileri azaltılabilir ve enerji tasarrufu sağlanabilir [12]. Ancak, özellikle yüksek katlı binalarda cam kullanımının

artmasıyla birlikte cam malzemelerin geri dönüşümüne dair daha etkin çözümler geliştirilmelidir.

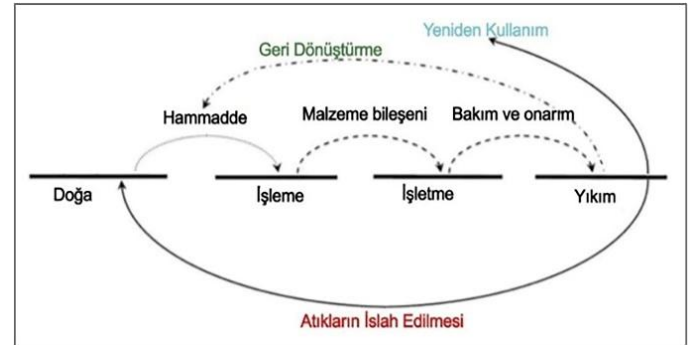


Şekil 1. İnşaat Sektöründeki Atık Oluşumun Alt Sektörlere Göre Dağılımı

Bu gerekliliğin karşılanabilmesi için, bina tasarım sürecinde yaşam döngüsünün her bir aşamasının bütüncül bir yaklaşımla dikkate alınması büyük önem taşımaktadır. Ne yazık ki, birçok mimar bina yaşam döngüsünün yalnızca kullanım aşamasına odaklanmakta ve sürdürülebilir bir mimari tasarım sürecinde dikkate alınması gereken diğer kritik aşamaları göz ardı etmektedir [13, 14, 15, 16]. Oysa bina üretimi, tasarım aşamasından başlayarak; ham maddelerin elde edilmesi, inşaat malzemelerine dönüştürülmesi ve kullanım ömrü sonunda geri dönüşüme kazandırılması gibi bir dizi adımı içerir. Tüm bu süreçler, bir yapının yaşam döngüsünü oluşturan önemli adımlardır ve bu aşamalar, çevre üzerinde ciddi tahribatlara yol açabilmektedir [17, 18]. Yenilenemeyen kaynakların tükenmesi, çevre kirliliği ve atıklar sonucu ortaya çıkan zararlı etkiler bu süreçlerin beraberinde getirdiği olumsuz sonuçlar arasındadır. Bu nedenle, binaların yeniden kullanımı ve geri dönüştürülmesi büyük önem taşımakta; bina tasarımında ise üretim ve geri dönüşüm aşamalarına odaklanan daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Geri dönüşüm, hem atıkların çevreye zarar vermeden yeniden kullanıma sunulmasını hem de doğal kaynakların korunmasını sağlar [2, 19, 20]. Ayrıca, geri dönüşüm işlemleri, yeni malzeme üretimine kıyasla daha az enerji gerektirir, daha düşük sera gazı emisyonlarına neden olur ve ekonomiye katkı sağlar [19].

Malzeme ve enerji kaynaklarından tasarruf sağlamada; Ruban [17], binaların kullanım ömrü sonrasındaki yaşam döngüsü serüveninde geri dönüşüm stratejisinin öncelikle malzemenin yeniden işlevlendirilmesi ile sağlanmasını, bunun mümkün olmadığı takdirde geri dönüştürülerek kullanılmasını, son çare olarak da doğaya zarar vermeden ıslah edilmesi gerektiğini belirtmektedir (Şekil 2). Atıkların depolama alanlarında birikmesi, malzemede bulunan enerjinin kullanılamaması, toprak, su ve havanın kirlenmesinde yarattığı potansiyel

sebebiyle ciddi çevre sorunları oluşturmaktadır [16, 19]. Bu sorunları önlemek için geri dönüşüm uygulamalarının yaygınlaştırılması gerekmektedir.



Şekil 2. Yapı Yaşam Döngüsü Serüveni

Bu doğrultuda ülkeler geri dönüşümü teşvik etmek için yasalar geliştirmiş ve yürürlüğe koymuşlardır. İnşaat sektöründe geri dönüşüm kavramı, ilk kez Amerika Birleşik Devletleri'nin 1976' da çıkardığı "Kaynak Koruma ve Kurtarma Yasası" (Resource Conservation and Recovery Act (RCRA)) ile gündeme gelmiş ve çeşitli düzenlemelerle pekiştirilmiştir. Bu yasa, inşaat sektöründe geçerli olan tehlikeli ve katı atıkların yönetimini düzenlemiştir [21]. 1991 yılında İsviçre, "Atık Yönetimi Yönetmeliği"ni çıkararak geri dönüşümü zorunlu hale getirmiştir [22]. Almanya, 1994 yılında yürürlüğe giren ve 2012'de güncellenen "Atık Yönetimi Yasası" ile benzer düzenlemeler yapmıştır [23]. Türkiye'de ise 2015 yılında yürürlüğe giren "Atık Yönetimi Yönetmeliği", geri dönüşümün önemini vurgulamış ve sektörde geri dönüşüm uygulamalarını zorunlu hale getirmiştir [24]. Tablo 2' de, farklı ülkelerde geri dönüşümün zorunlu hale getirildiği yasaların tarihsel dağılımı gösterilmektedir.

Tablo 2. Ülkelerin İnşaat Atıklarının Geri Kazanımını Zorunlu Kılan Yasa ve Yönetmelikleri

Ülke	Yasa Adı	Çıkarıldığı Yıl	Referanslar
ABD	* Kaynak Koruma ve Kurtarma Yasası (Resource Conservation and Recovery Act (RCRA))	1976	[25]
	* Kaliforniya Yeşil Bina Standartları Kodu (California Green Building Standards Code (CALGreen))	2011	[26]
İsviçre	*Atık Yönetimi Yönetmeliği (Technische Verordnung über Abfälle (TVA))	1991	[27]
Almanya	*Atık Yönetimi Yasası (Kreislaufwirtschaftsgesetz)	1994, Revize 2012	[28]
Japonya	*İnşaat Atıkları Geri Dönüşüm Kanunu (Construction Waste Recycling Law)	2000	[28]
Avrupa Birliği	*Atık Çerçeve Direktifi (2008/98/EC)	2008	[28]
	*Ambalaj ve Ambalaj Atıkları Direktifi (94/62/EC)	1994	[29]
İngiltere	*Saha Atık Yönetim Planları (Site Waste Management Plans (SWMP))	2008	[28]
	*Atık ve Kaynaklar Stratejisi (Waste and Resources Strategy)	2018	
Rusya	*Katı Atık Yönetimi Yasası	2014	[30]
Çin	*Çevre Koruma Yasası (Environmental Protection Law)	2015	[31,32]
Türkiye	*Atık Yönetimi Yönetmeliği	2015	[33]
	*Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) Yönetmeliği	2022	[34]
Avusturya	*Ulusal Atık Politikası (National Waste Policy)	2018	[28]
Güney Kore	*Atık Yönetimi Yasası (Waste Management Act)	1986, Revize 2018	[28]

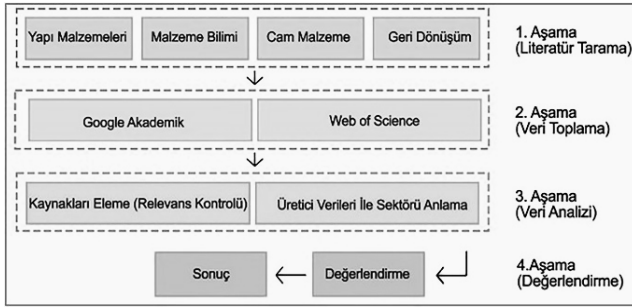
Dünyada inşaat sektörüne yönelik geri dönüşüm yasaları, her ülkenin çevre politikalarına ve atık yönetimi sistemlerine göre farklılık göstermektedir. Avrupa Birliği, inşaat atıklarının geri dönüşümünde önde gelen bölgesel düzenlemelere sahip olup, bu atıkların en az %70'inin geri dönüştürülmesini hedeflemektedir. Almanya, İsviçre ve Japonya gibi ülkeler, bu alanda geri dönüşümü teşvik eden güçlü yasalar yürürlüğe koymuşlardır [35]. Son yıllarda ise Çin, Avusturya ve Türkiye gibi ülkeler, çevre tahribatının farkına vararak geri dönüşüm uygulamalarını etkin hale getirecek yasalar çıkarmışlardır. Türkiye'de, "Atık Yönetimi Yönetmeliği" ile inşaat ve yıkım atıklarının yönetimi konusunda önemli adımlar atılmıştır [36]. Her ne kadar bütün bu yasalar ortak bir amaç doğrultusunda çıkarılmış olsa da her ülkenin çevresel koşulları ve inşaat sektöründeki uygulamaları farklılık gösterdiğinden, her bir ülke kendine özgü yasal düzenlemelere ihtiyaç duymaktadır. Geri dönüşümle ilgili yasal düzenlemeler, çevre dostu ve sürdürülebilir bir inşaat sektörü bilincinin oluşturulmasında hayati bir rol üstlenmektedir. Bu yasal düzenlemeler, inşaat sektöründe geri dönüşüm uygulamalarının artırılması için önemli bir temel oluşturmaktadır. Ancak, geri dönüşümün yalnızca yasalarla sınırlı kalmayıp, tüm sektörlerde çevre bilincinin artırılması ve sürdürülebilir yaşam tarzlarının benimsenmesi adına sürekli olarak teşvik edilmesi gerekmektedir.

2. Araştırma Problemi ve Metodoloji

Yapı sektörünün çevresel etki ve atık üretme konusundaki katkıları gün geçtikçe artmaktadır. Günümüzde metropol şehirlerde yüksek binaların yaygınlaşması ve bu binalarda genellikle cephe malzemesi olarak camın tercih edilmesi, önümüzdeki 50 yıl içerisinde bu binaların yaşam döngüsünü tamamlamasıyla birlikte ciddi bir cam atığı sorunuyla karşı karşıya kalınacağına işaret etmektedir. Bu durum, yapıların yalnızca inşa ve kullanım aşamalarında değil, aynı zamanda yıkım sürecinde de çevresel etkilerinin en aza indirilmesini gerekli kılmaktadır. Özellikle yıkım sürecinde ortaya çıkacak cam atıklarının, çevresel sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla yeniden kullanım ve geri dönüşüm stratejileri doğrultusunda değerlendirilmesi büyük bir zorunluluk haline gelmiştir.

Bu araştırma, cam malzemenin geri dönüşümüne odaklanarak, bu malzemenin geri dönüşüm ürünü olarak tekrar nasıl kullanılabilceğini incelemeyi amaçlamaktadır. Araştırmanın temel hedefi, cam malzemenin yaşam döngüsünü tamamlamasının ardından yeniden işlevlendirilerek kullanılabilceği alanları belirlemek ve sektörel uygulamaları geri dönüşüm konusunda teşvik etmektir. Bu kapsamda, ulusal ve uluslararası literatür incelemesi gerçekleştirilerek geri dönüşüm süreçlerinin mevcut durumu, cam malzemenin geri dönüşüm aşamaları ve yeniden işlevlendirilmiş malzeme olarak kullanım alanları incelenmiştir. Literatürde önerilen uygulamalar ile üretim sürecinde bu önerilerin ne ölçüde

hayata geçirilebildiği sektör verileriyle kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Çalışmada izlenen akış Şekil 3'te gösterilmektedir. Araştırma, cam malzemenin sürdürülebilir bir şekilde geri dönüştürülmesi ve yapı sektöründe daha yaygın kullanımına dikkat çekmeyi hedeflemektedir.



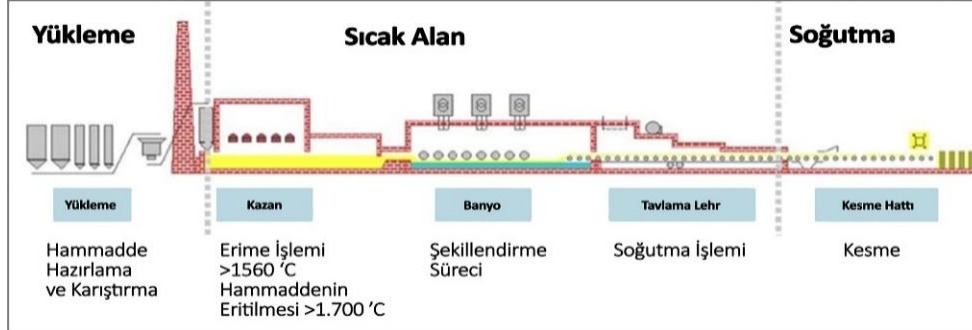
Şekil 3. Yöntem Akış Diyagramı

3. Cam Malzeme, Geri Dönüşümü ve Kullanım Örnekleri

Malzemeler, genellikle metaller, seramikler, plastikler ve organik malzemeler olmak üzere dört ana grupta sınıflandırılmaktadır. Her bir malzeme grubunun diğerlerine kıyasla belirli avantajları ve dezavantajları bulunmakla birlikte, cam; seramik malzeme grubu içerisinde sınıflandırılmaktadır. Seramik malzemeler yüksek ısıl kararlılık, dayanım ve biçimlendirme avantajlarına sahiptir. Ancak, düşük tokluk ve birleştirme zorlukları gibi dezavantajlar bu malzeme grubunun sınırlayıcı yanlarıdır [37].

Camlar, atomsal diziliş açısından düzensiz yapıya sahip oldukları için amorf malzemelerdir. Belirli bir sıcaklığın altında rijit katı gibi davranırlar. Bu halde, aşırı soğutulmuş, sıvı olarak düşünülebilirler. Aynı zamanda cam gevrek ve kırılğan malzemedir. Basma dayanımları çekme dayanımının 10 katıdır. Kimyasal tarafsızlık (inert) özellikleri bulunmaktadır. Bu malzemeler; yalnızca teknik özellikleriyle değil, aynı zamanda estetik ve fonksiyonel katkılarıyla da dikkat çekmektedir. Yapı sektöründe cam malzeme, ışık geçirgenliği, şeffaflık ve estetik tasarım potansiyeli, iç ve dış mekanlarda hem aydınlatma hem de görsel bütünlük sağlaması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca, camın işlevsel özellikleri arasında enerji verimliliğini artıran yalıtım kapasitesi ile yapının enerji performansına olan olumlu etkisi de bulunmaktadır [38, 39]. Bu özellikler, camın estetik tasarım ile mühendislik gereksinimlerini bir araya getiren bir yapı malzemesi olarak önemini artırmaktadır.

Cam; Silika Kum (SiO_2), Sodyum Karbonat (Na_2CO_3) ve Sodyum Oksit (Na_2O) olmak üzere bu üç ana hammaddenin işlenmesi sonucu elde edilmektedir. Donmuş eriyik (sıvı) bir malzeme olarak kabul edilir ve kristalleşmeden katılaşmaktadır. Bu hammaddelerin belirli oranlarda birleştirilmesi ve yüksek sıcaklıklarda eritilmesi sonucu elde edilen cam, istenen forma getirildikten sonra kontrollü bir şekilde soğutularak kullanım formuna ulaşmaktadır [38]. Kaner [40]'in çalışmasından düzenlenen hammaddeden cam üretim süreci aşamaları Şekil 4'te gösterilmektedir.

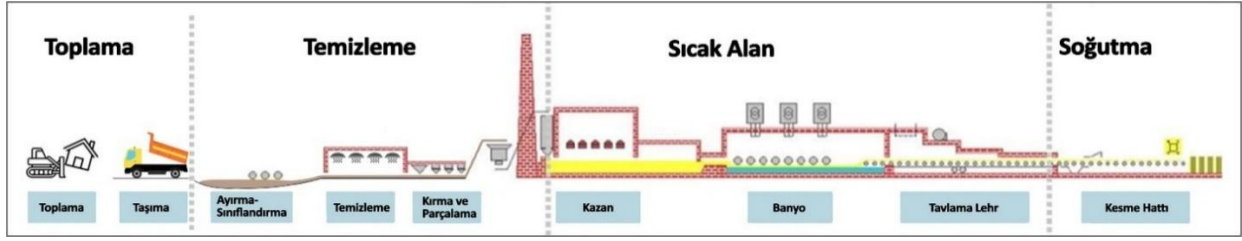


Şekil 4. Hammadde ile Cam Üretim Süreci

Bu üretim süreci, camın enerji yoğun bir malzeme olmasına yol açarken, çevresel ve ekonomik açıdan bazı zorluklar da doğurabilir. Cam üretimi sırasında enerji tüketimi oldukça yüksektir ve bunun büyük bir kısmı hammaddelerin 1400–1600°C arasında eritildiği fırınlarda ısıl enerjinin sağlanmasından kaynaklanmaktadır. Modern cam eritme fırınları, ton başına yaklaşık 4–8 GJ enerji tüketirken, bu enerji miktarı cam türüne ve üretim teknolojilerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir [19]. Camın doğada uzun süre bozulmadan kalması çevresel sorunlara yol açabilmekte; ancak tamamen geri dönüştürülebilir bir malzeme olması, sürdürülebilirlik açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Geri dönüştürülmüş cam kullanımı, cam üretim sürecinde çevresel etkileri azaltma potansiyeline sahip bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu süreç, normal cam üretim tekniğine benzer şekilde işlese de geri dönüştürülmüş camın içeriğindeki

toz, macun, boya, conta ve polimer katmanlarının ayrıştırılması için ek temizlik ve ayrıştırma işlemleri gerektirir. Bu aşama, geri dönüştürülmüş cam kullanımının, normal cam üretim sürecinden ayıran önemli bir farktır. Kaner [40]'in çalışmasından düzenlenen geri dönüştürülmüş cam kullanımı ile cam üretim süreci Şekil 5'te gösterilmektedir. Geri dönüştürülmüş cam kullanımıyla eritme işleminde enerji tüketimi düşürülürken, sıfırdan cam üretimi için gereken yüksek sıcaklıklar enerji tüketimini artırmaktadır [12, 19, 41].

Camın geri dönüşümü çevresel ve ekonomik faydalar sağlamak için iki ana yöntemle gerçekleştirilir. Bu yöntemler; açık devre geri dönüşüm [42, 43] ve kapalı devre geri dönüşümdür. Bu geri dönüşüm yöntemleri; malzemelerin aynı ürün için mi yoksa başka bir ürün için mi tekrar kullanılacağını tanımlamaktadır [20].



Şekil 5. Geri Dönüştürülmüş Cam Kullanımı ile Cam Üretim Süreci

Açık devre geri dönüşümü; atık camın yapı malzemesi üretiminde kullanıldığını ifade ederken, cam malzemelerin daha düşük sıcaklıklarda işlenerek cam esaslı farklı ürünlerin oluşturulmasında kullanılan bir soğuk geri dönüşüm yöntemidir [44]. Bu yöntem, camın özelliklerinin kaybolmadan yeniden kullanılmasını sağlamakta, aynı zamanda doğal kaynakların daha verimli şekilde kullanılmasına ve atıkların azaltılmasına katkıda bulunarak çevresel açıdan önemli faydalar sunmaktadır. Açık devre geri dönüşüm yöntemi ile elde edilen ürünler, yapı sektöründe çeşitli uygulama alanlarına sahiptir. Cam atıklarının yapı malzemesi olarak yeniden kullanımının araştırıldığı Mohajerani ve ark. çalışmasında [45] cam atıklarının agrega olarak kullanılma potansiyeline sahip olduğu, ancak atık cam içeren betonlarda meydana gelen Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR) genleşmesinin, beton içinde mineral ve kimyasal katkıları kullanılarak veya cam tozunun ince öğütülmesiyle azaltılabileceği belirtilmiştir.

Alkali-aktif kuruf bazlı SIFCON (Slurry Infiltrated Fibrous Concrete) üretiminde atık camın kullanım potansiyelini inceleyen Gök & Şengül'ün araştırmasında ise, ticari sodyum silikat yerine ince öğütülmüş atık cam kullanılarak sürdürülebilir ve ekonomik bir alkali aktivasyon süreci geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, atık cam katkısının yüksek basınç ve eğilme dayanımı sağladığını göstermekte; böylece hem malzemenin mekanik performansının artırılacağı hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sunulacağı ortaya konulmaktadır. Ayrıca, atık cam kullanımının doğal kaynak tüketimini azaltarak ekonomik avantaj sağladığı da vurgulanmaktadır [46]. Kırılmış atık cam (CWG), asfalt karışımlarında agrega yerine kullanılabilecek uygun bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Çeşitli atık malzemeleri içeren betonların etkili bir şekilde bir araya getirilebileceğini göstermektedir. Alkali aktivasyon yöntemi ile atık cam ve atık çelik lifleri birleştirilerek, normal betonlara kıyasla üstün mekanik özelliklere sahip ve çevresel sürdürülebilirliği teşvik eden bir kompozit oluşturulmuştur. Çalışma sonuçları, esas olarak yan ürünler ve atık malzemelerden oluşan, ancak yine de karşılaştırılabilir mekanik özellikler sunan betonların üretilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, atık veya yan ürünlere dayalı yüksek performanslı beton üretimi açısından önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir [46]. Gök ve Şengül diğer çalışmasında [47]; atık camın alkali ile aktive edilmiş

harçlarda alternatif bir silikat kaynağı olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur. İnce boyutlarda öğütülmüş cam atıklarının, kullanım yerleri dikkate alınarak mekanik özelliklerinde düşüş görülmesine rağmen çimento içeriklerinde %30'a kadar oranlarda kullanılması durumunda mekanik özelliklerde bir miktar düşüş yaşansa da saha betonları gibi (mekanik dayanımın ön planda olmadığı) uygulamalarda kullanılabileceği önerilmektedir. Bu anlamda çevresel etkileri azaltmak ve atık malzemenin yeniden kullanımı açısından cam atık malzemesinin çimento sanayiine kazandırılması önemli bir fırsat olarak görülmektedir [48, 49].

Harçlara cam elyafı eklendiğinde mekanik özelliklerin olumsuz etkilendiği tespit edilmiştir; ancak, karışıma belirli miktarda atık cam tozu (Waste Glass Powder/WGP) (yaklaşık %7,5) eklendiğinde cam elyafının olumsuz etkileri azaltılabileceği [50], cam tozunun betonun dayanıklılığını artırma potansiyeli olduğu da belirlenmiştir [51].

Atık camın belirli sıcaklıklarda ısıtılarak genleştirilmesi ile elde edilen diğer iki önemli ürün ise genleştirilmiş cam agrega [52] ve köpük cam [53] olarak öne çıkmaktadır. Genleştirilmiş cam agregalar; düşük yoğunluk (300–800 kg/m³), yüksek gözeneklilik (%60–80), düşük ısı iletkenliği (~0,08–0,10 W/mK) ve yüksek kimyasal direnç gibi özellikleri sayesinde özellikle hafif yapı sistemlerinde avantaj sağlamaktadır. Mekanik olarak geleneksel agregalara göre daha düşük basınç dayanımı sunmalarına rağmen, hafif yapılar için yeterli taşıma kapasitesi sağlayabilmektedirler. Ayrıca, hafif betonlarda bu tür agregaların kullanımı, yapının toplam ağırlığını azaltmakta; temel yüklerini hafifleterek deprem gibi dinamik etkiler altında yapısal performansı artırmakta ve ısı yalıtımı sağlayarak enerji verimliliğini geliştirmektedir. Bununla birlikte, yüksek gözeneklilik oranı nedeniyle artan su emme kapasitesi, dış ortam dayanıklılığı açısından dikkat edilmesi gereken bir husus oluşturmaktadır [52, 54]. Hafif ve gözenekli yapısıyla bu ürünler, yalıtım malzemesi [55, 56], hafif beton agregası [57] ile filtre ve alt yapı malzemesi [58] olarak inşaat ve yapı sektöründe geniş bir kullanım alanı sunmaktadır [59, 60, 61]. Genel olarak, geri dönüştürülmüş camdan üretilen bu tür malzemeler, sürdürülebilir yapı malzemesi üretimi açısından hem çevresel hem de performans yönünden önemli fırsatlar sunmaktadır. Tablo 3, açık devre geri dönüşüm yöntemi ile üretilebilecek geri dönüştürülmüş cam ürünleri ve bunların kullanım alanlarını özetlemektedir.

Tablo 3. Açık Devre Geri Dönüşümü ile Oluşturulmuş Cam Malzeme Örnekleri ve Kullanım Alanları

Geri Dönüştürülmüş Cam Yapı Malzemeleri	Referanslar
<u>Yeni Cam Paneller:</u> İzolasyon camları, çift camlar ve lamine camlar üretilmektedir. Özellikle enerji verimli camların (Low-E camlar vb) üretiminde kullanılır.	[62]
<u>Cam Yünü:</u> Atık camların, eritilerek lif haline getirilmesiyle üretilir. - Isı ve ses yalıtımında. - Bina kabuğunda yapı elemanlarında veya tesisat yalıtımında kullanılır.	[63]
<u>Cam Tuğlalar:</u> Şeffaf veya yarı saydam yapıda bir yapı malzemesidir, Dekoratif dolgu malzemesi, olarak kullanılır.	[62]
<u>Beton ve Asfalt Dolgusu:</u> Kırıntı, agrega yerine beton veya asfalt karışımlarına eklenir. - Kırıntı camın betonun basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve elastiklik modülünü iyileştirdiği savunulmaktadır. - Yolların sürdürülebilir bir seçeneği olarak tercih edilir.	[54]
<u>Şeffaf Beton:</u> Işık geçiren bu betonlarda geri dönüştürülmüş cam kullanımı, sürdürülebilir bir seçenektir. Aydınlatma ve dekoratif yapı elemanlarında kullanılır.	[64]
<u>Kırma Cam Çakıl:</u> Peyzaj projelerinde veya drenaj malzemesi olarak kullanılır.	[65]
<u>Cam Mozaik Fayans:</u> Estetik görünüm sağlarken sürdürülebilir bir alternatif oluşturur. Dekoratif yüzey kaplamaları, mekân iç tasarımları ve dış cephe uygulamalarında kullanılır.	[62]
<u>Cam Agregası:</u> Beton içine agrega olarak kullanılır. Cam agregalar kullanım alanlarına göre ince agrega (kum yerine), cam tozu (çimento yerine) ve kaba agrega (çimento hamurunda agrega yerine) olarak kullanılır.	[66, 67, 68]
<u>Genleştirilmiş Cam Agregası:</u> Genleştirilmiş cam, geri dönüştürülmüş camın belirli bir sıcaklıkta ısıtılmasıyla üretilir. Bu işlem sırasında camın iç yapısında gaz kabarcıkları oluşur, bu da malzemenin hafif ve gözenekli olmasını sağlar. Yüksek ısı yalıtımı sağlar, yangına ve suya dayanıklıdır. - Hafif beton üretiminde, - Çatı zemin ve duvarlarda ısı ve ses yalıtımı amacıyla, - Yol, peyzaj düzenlemeleri ve temel dolgularında hafif dolgu malzemesi olarak kullanılır.	[52]
<u>Hafif Agregası:</u> Geleneksel agregalara göre daha düşük yoğunlukta olan; beton, harç veya dolgu malzemelerinde ağırlığı azaltmak, ısı yalıtımını artırmak için kullanılan cam bazlı hafif agregalar genellikle geri dönüştürülmüş atık camlardan üretilir. Köpük Cam (Foamed Waste Glass), Kırılmış Cam Agregası (Crushed Glass Aggregate), Cam Kırığı Agregası (Glass Cullet Aggregate) hafif agrega olarak kullanılan cam malzemelerdir.	[52, 54, 66, 67]
<u>Köpük Cam:</u> Yapay olarak üretilmiş (geri dönüştürülmüş camdan yapılan) özel bir hafif agrega türüdür. Eritilmiş cama eklenen gazlaştırıcı maddelerin (örneğin karbon, kireç gibi) ısı ile tepkimeye girip gaz kabarcıkları oluşturması yoluyla köpürmesiyle elde edilir, Hafif ve gözenekli bir yapıdadır, ısı yalıtım özelliği çok iyidir - Yüksek basınç dayanıklı (beton agregası kadar ultra güçlü değil), su geçirmez ve yanmaz bir malzeme olarak; ısı, ses ve yangın yalıtımında, - Hafif dolgu, yol ve drenaj malzemesi olarak; altyapı projelerinde kullanılır.	[53, 54]
<u>Güçlendirme Malzemesi Üretimi:</u> Daha hafif ve yüksek dayanımlı malzemelere olan ihtiyacın artmasıyla geliştirilmiştir. Bu doğrultuda; Lifli Polimer Kompozitler ve Cam Elyaf Takviyeli Eğilme Dayanımı Yüksek Elemanlar üretilmiştir. Bu ürünler, özellikle hafif ve dayanıklı yapı elemanlarının üretiminde tercih edilmektedir. Hafif yapıları, kimyasal maddelere ve çevresel etkilere karşı yüksek direnç sağlamaları ve tasarımda esneklik sunmaları sayesinde; Yapı güçlendirme uygulamalarında, yüksek eğilme dayanımları, mevcut yapı elemanlarının taşıma kapasitelerini artırarak deprem, rüzgâr gibi dinamik yüklere karşı dayanıklılığın artırılmasında kullanılır.	[69, 70]
<u>Cam Lifi ve Lif Donatılı Beton İmalatı:</u> Cam lifi (Glass fiber) ve özellikle elektriksel yalıtım özellikleri geliştirilmiş (E-glass) fiberler, betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirmek amacıyla beton karışımına eklenmektedir. Düşük maliyet, kimyasal direnç ve yüksek çekme dayanımı gibi avantajlarıyla özellikle prefabrik elemanlar, zemin kaplamaları ve ince kesitli yapı bileşenlerinde kullanılır.	[70]
<u>Geopolimer Üretimi:</u> Geopolimer, çimento gibi kalsiyum esaslı malzemeler kullanmadan, alüminyum ve silikon içeren doğal ya da atık malzemelerin, alkali aktivatörlerle kimyasal reaksiyona sokularak katı bir yapı malzemesi haline getirilmesidir. Klasik betona çevreci ve çok dayanıklı bir alternatif sunmaktadır.	[71,72]

Kapalı devre geri dönüşümü ise geri kazanılmış atığın yeni cam üretmek için hammadde yerine kullanılmasını ifade eden, cam parçalarının yüksek sıcaklıklarda eritilerek tekrardan şekillendirilmesini kapsayan bir sıcak geri dönüşüm yöntemidir [44, 73]. Normal bir cam panelin kullanımına

imkân tanıyan her ortam için kullanımı mümkündür. Tablo 4, kapalı devre ile üretilmiş camların örnek binalarda farklı boyut ve fiziksel özellikler ile kullanılabildiğini göstermektedir. Tablo 5 örnek binalardaki geri dönüştürülmüş cam kullanımı ile elde edilen faydaları ortaya koymaktadır.

Tablo 4. Kapalı Devre Geri Dönüşüm ile Elde Edilmiş Camların Dünyada Kullanımları

	Genel Özellikler		
	Toledo Sanat Müzesi'nin ek binası hem müzenin cam koleksiyonunu sergileme alanı hem de bir cam yapım tesisi işlevindedir. Şeffaf duvar katmanları arasından görüş hatlarına sahip avlularla delinmiş tek katlı bir hacim olarak tamamen geri dönüştürülmüş cam kullanılarak tasarlanmıştır.		
The Glass Pavilion [74]	Coğrafi Konum	İşlev	Cam Kullanımı
	Toledo, Ohio, ABD	Müze	Eğrili Cam Form Oluşturma
	Genel Özellikler		
	Siemens'in Sürdürülebilir Şehirler Girişimi olarak Londra'da tasarlanmıştır. Sergi alanları, konferans tesisleri ve bir teknoloji ve inovasyon merkezi barındıran 6.300 metrekaresel bina geri dönüştürülmüş cam cephesiyle enerji tasarrufu sağlayan bir yaklaşım sunmaktadır. Çevre dostu malzeme kullanımı sertifikası almıştır.		
The Crystal [75]	Coğrafi Konum	İşlev	Cam Kullanımı
	Londra, İngiltere	Karma	Keskin Form Yaratma
	Genel Özellikler		
	Amsterdam'ın merkezinde yer alan The Edge, 15 katlı atriyumuyla şehre açılan bir ofis binasıdır. Dünyanın en sürdürülebilir ofis binalarından biri olan yapı, geri dönüştürülmüş cam panellerle kaplanmıştır. Enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirliğe öncüdür.		
The Edge [76]	Coğrafi Konum	İşlev	Cam Kullanımı
	Amsterdam, Hollanda	Ofis	Yüksek Kat Uygulaması
	Genel Özellikler		
	Cephe sistemlerinde enerji verimliliği sağlayan cam uygulamaları yapılmıştır. Kullanılan geri dönüştürülmüş malzeme oranının yüksekliği ile LEED Gold Sertifikası almıştır. Çalışma alanlarının temel tasarım kriteri olan esneklik ve gün ışığının en verimli biçimde sağlamak için geri dönüştürülmüş cam kullanılmıştır.		
Garanti BBVA Bankası Teknoloji Kampüsü [77]	Coğrafi Konum	İşlev	Cam Kullanımı
	İstanbul, Türkiye	Ofis	Esnek Cephe Kaplaması

	Genel Özellikler		
	Büyük Cam Pagodanın Vahşi Doğa Tapınağı; atığı azaltmak, geri dönüşümü teşvik etmek için tasarlanmıştır. Yerel Budist keşişlerin ve topluluğun ortak çabasıyla 1,5 milyondan fazla cam şişenin çimento ile birleştirilmesiyle inşa edilmiştir.		
	Coğrafi Konum	İşlev	Cam Kullanımı
Wat Pa Maha Chedi Kaew [78]	Khun Han, Tayland	Tapınak	Yeniden İşlevlendirme Uygulaması

Tablo 5. İncelenen Binaların Geri Dönüştürülmüş Cam Kullanımlarının Değerlendirilmesi

Bina Adı	İşlev	Kullanılan Cam Türü	Enerji Performansına Etkisi	Estetik ve Mimari Katkı
The Glass Pavilion [74]	Müze	Geri dönüştürülmüş cam paneller	Çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunarak enerji tasarrufu sağlar	Minimalist yapıda yüksek ışık geçirgenliği sağlar
The Crystal [75]	Karma	Isı kontrollü geri dönüştürülmüş cam	Doğal aydınlatma ile enerji tasarrufu sağlar	Keskin silüetinde cam kullanımı ile davet kârlılığı artırır
The Edge [76]	Ofis	Çift katmanlı geri dönüştürülmüş cam	Doğal aydınlatma ile enerji tasarrufu sağlar	Modern şeffaf görünüm sağlar
Garanti BBVA Teknoloji Kampüsü [77]	Ofis	Çift katmanlı geri dönüştürülmüş cam	Enerji verimliliğine katkı sağlar	Cam cephe uygulaması ile çalışma mekanlarındaki aydınlık düzeyinin artırılmasına katkı sağlar
Wat Pa Maha Chedi Kaew [78]	Tapınak	Atık cam şişe	Yaz aylarında soğutma ihtiyacında azalma sağlar	Doğal ışığın dolaylı yoldan iç mekâna alınmasını sağlamanın yanı sıra içi hava dolu şişeler ile yapının akustik performansına katkı sağlar

Kapalı devre geri dönüşümünün avantajı, aynı kalitede ya da daha dayanıklı düz cam panellerin üretimini sağlamasıdır. Ayrıca kapalı devre geri dönüşümün sağladığı avantajlar arasında; enerji tasarrufu, hammadde kullanımının azalması ve eritme fırınlarının ömrünün uzaması bulunmaktadır. Örneğin, eritme partisine %10 cam kırığı eklenmesi enerji tüketimini %2,5–3 oranında azaltabilirken, eritme sırasında karbon salınımında ton başına 300 kg daha az emisyonu yol açarak her 1 ton cam kırığı ile 1,2 ton hammadde tasarrufu sağlanabilmektedir [2, 19, 79]. Bununla birlikte, yüksek kaliteli cam ürünlerinin üretiminde geri dönüştürülmüş camın kullanımı, doğal kaynakların korunmasına ve enerji tüketiminin azalmasına olanak tanır. Geri dönüştürülmüş cam, düşük karbonlu yapıların inşasında kullanılabilecek dayanıklı bir malzeme olarak ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda, yapı sektörü için sürdürülebilir malzeme seçim stratejilerinin uygulanması, enerji tasarrufu ve karbon salınımının azaltılmasına önemli katkılar sağlamaktadır [19, 20, 80, 81].

Ahmad ve arkadaşları [80], Pakistan'ın Peşaver kentinde geri

dönüştürülmüş camın yalıtım malzemesi olarak kullanımını incelemiş ve camın saman balyası ve koyun yününe kıyasla üstün performans gösterdiği belirlenmiştir.

Thormark [41]'ın çalışması ise geri dönüştürülmüş malzemelerin pasif evlerde yaşam döngüsü enerjisini %40'tan %17'ye düşürebileceğini göstermiştir. Bu bağlamda, geri dönüştürülmüş camın sunduğu çevresel ve ekonomik avantajlar, yapı sektöründe kullanımını teşvik etmek ve sürdürülebilir inşaat uygulamalarını yaygınlaştırmak adına güçlü bir dayanak sunmaktadır.

Saint-Gobain, dünya lideri bir cam üreticisi olarak geri dönüşüme öncülük ederken, Türkiye'nin önde gelen üreticilerinden Şişecam, enerji tüketimini %25 oranında azaltmıştır. Şirket, 2030 yılına kadar dış cam kırığı kullanım oranını %35'e çıkararak geri dönüşüm altyapılarını güçlendirmeyi hedeflemektedir [79]. Bu tür çalışmalar, sektörde enerji tüketiminin azaltılması ve geri dönüşüm altyapılarının geliştirilmesi açısından umut verici olsa da mevcut uygulamalar, özellikle inşaat sektörü gibi yüksek

hacimli atık üreten alanlarda hala istenilen seviyeye ulaşmamıştır. Bu durumun temel nedenlerinden biri, cam atıklarının geri dönüşüm sürecinde karşılaşılan yapısal zorluklardır. Atık camın heterojen yapıda olması, ayrıştırma işlemlerinde ek iş gücü ve ileri teknoloji gereksinimini artırmakta; bu da süreç maliyetlerini yükseltmektedir. Ayrıca, tüketicilerin atık cam malzemeleri, toplama noktalarına kendi imkânlarıyla ulaştırmak zorunda kalmaları, katılım oranlarının düşmesine ve geri dönüşüm tesislerinin etkinliğinin sınırlı kalmasına yol açmaktadır. Dolayısıyla, mevcut altyapı eksiklikleri ve lojistik sorunlar, cam atıklarının etkin bir şekilde toplanmasını ve yeniden kullanılmasını kısıtlayan başlıca faktörler arasında yer almaktadır [19, 66]. Hammadde olarak atık camın kullanılması; yeniden cam üretmekten daha az enerji ve kaynak kullanımı ile daha ekonomiktir.

Çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda, bu tür teknik ve lojistik engellerin aşılması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda hem ulusal hem de uluslararası düzeyde daha kapsamlı politika düzenlemelerinin yapılması, altyapı yatırımlarının artırılması ve geri dönüşüm bilincinin toplum genelinde yaygınlaştırılması, cam atıklarının geri kazanımında daha yüksek başarı oranlarının elde edilmesine katkı sağlayacaktır [19, 41, 81].

4. Sonuç

Bu çalışma, inşaat sektöründe cam malzemenin geri dönüşüm süreçlerinin önemini ve bu süreçlerin çevresel, ekonomik sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini incelemektedir. Cam, uzun yaşam ömrü ile geri dönüştürülebilen bir malzeme olmasına rağmen, kullanım miktarlarının artması ve yüksek katlı binalarda cam cephelerin yaygınlaşması, geri dönüşüm sürecinin verimli bir şekilde yönetilmesini zorunlu kılmaktadır.

Camın estetik, işlevsel ve enerji verimliliği açısından sunduğu avantajlar, yapı sektöründe kritik bir konuma sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, üretim süreçlerindeki yüksek enerji tüketimi ve çevresel etkiler, bu avantajların sürdürülebilir bir perspektifte ele alınmasını gerektirmektedir. Bu noktada geri dönüştürülmüş cam hem enerji tüketimini azaltıp üretim süreçlerini daha çevre dostu hale getirmekte, hem de kaynakların daha verimli kullanılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, geri dönüştürülmüş cam kullanımı, üretim maliyetlerini düşürülebilmektedir. Ancak cam atıklarının organize bir şekilde toplanması, ayrıştırılması, işlenmesi ve geri dönüştürülmesi için uygun düzenlemelerin olmaması cam geri dönüşümünde yaşanan başlıca zorluklardandır ve bu eksiklikler cam geri dönüşüm oranlarını sınırlamaktadır. Sürdürülebilir bir gelecek için cam geri dönüşümüne yönelik düzenlemelerin artırılması ve yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Uluslararası düzeyde, geri dönüşüm uygulamalarını teşvik etmek için geliştirilen yasalar ve düzenlemeler, sektördeki çevresel sorumluluğun artmasına yardımcı olmuştur. ABD, İsviçre, Almanya, Japonya gibi ülkelerin öncülüğünde, inşaat sektöründe geri dönüşüm uygulamaları yasal zorunluluk haline gelmiş, bununla birlikte Avrupa Birliği, inşaat atıklarının geri dönüşüm oranını %70'in üzerine çıkarmayı hedeflemiştir. Türkiye'nin de 2015 yılında yürürlüğe giren Atık Yönetimi Yönetmeliği ile bu alanda önemli adımlar attığı

görülmektedir. Ancak, her ülkenin çevresel koşulları ve inşaat sektörü uygulamaları doğrultusunda, geri dönüşüm yasaları farklılık göstermektedir. Bu durum, her ülkenin kendine özgü yasal düzenlemelere ihtiyaç duyduğunu ve ulusal stratejilerin çevre dostu inşaat sektörü oluşturulmasında kritik rol oynadığını göstermektedir. Geri dönüşümün yalnızca yasal düzenlemelerle sınırlı kalmaması, tüm sektörlerde çevre bilincinin artırılması ve sürdürülebilir yaşam tarzlarının benimsenmesi gerektiği açıktır. Cam malzemenin geri dönüşümü, doğada bozulmayan özellikleri ve sürdürülebilirliği destekleyen potansiyeli oldukça önemlidir. Atık camın farklı amaçlarla tekrar kullanımı ve alternatif malzemeye dönüştürülmesi döngüsel ekonomi açısından da büyük katkı sağlamaktadır.

Geri dönüştürülmüş cam kullanımı hem çevresel sürdürülebilirliği artırmak hem de enerji tasarrufu sağlamak açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Cam üretiminde enerji tüketimini azaltarak çevresel etkileri minimize eden bu malzeme, aynı zamanda doğal aydınlatma olanaklarını destekleyerek enerji verimliliğini teşvik etmektedir. Yapı sektöründe estetik ve fonksiyonel değerleri koruma yeteneğiyle öne çıkan geri dönüştürülmüş cam, farklı türlerdeki uygulamalarıyla yapıların enerji performansını etkin bir şekilde yönetme imkânı sunmaktadır. Bu doğrultuda, geri dönüşüm süreçlerinin verimli hale getirilmesi ve yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Toplumda çevre dostu alışkanlıkların kazandırılması ve cam geri dönüşümüne yönelik farkındalığın artırılması için eğitim ve bilinçlendirme çalışmaları kritik bir ihtiyaçtır. Çalışma kapsamında incelenen binalarda da geri dönüştürülmüş camın yapı sektöründeki geri dönüştürülmüş malzeme olarak sağladığı çevresel sürdürülebilirlik, enerji tasarrufu ve estetik katkılar görülmektedir. Atık camın bazı malzemelerle birleştirme zorlukları bulunmasına rağmen bu problemleri azaltacak ve performans artırıcı özelliklere de sahip olduğu pek çok çalışma tarafından belirlenmiştir.

Sonuç olarak, camın geri dönüşümünün artırılması, yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ekonomik ve sosyal sürdürülebilirliğin sağlanması açısından da önemli bir potansiyel taşımaktadır. İnşaat sektöründe geri dönüşüm uygulamaları yaygınlaştırılmalı ve bu süreç, tüm paydaşlar arasında iş birliği ve bilinçli bir çaba ile desteklenmelidir. Cam üretiminde geri dönüşümün etkin bir şekilde uygulanması, sektördeki enerji tüketimini azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda daha sürdürülebilir ve çevre dostu bir inşaat sektörü için önemli bir adım olacaktır. Cam malzemenin geri dönüşümüne dair daha fazla araştırma ve çalışma yapılması, inşaat sektörünün sürdürülebilirliğini artırmada önemli katkılar sağlayacaktır.

NOT: Bu çalışma "Trakya Üniversiteler Birliği (TÜB) 8. Lisansüstü Öğrenci Kongresi/TUBLOK'da özet bildiri olarak sunulmuştur.

Yazar Katkısı

Veri iyileştirme -Esmâ Mıhlâyanlar (EM), Gizem Ertaş (GE); Biçimsel analiz – EM, GE; Araştırma - GE; Deneysel performans - EM; Veri toplama - GE; Veri işleme – EM, GE; Literatür taraması - GE; Yazan – GE, EM; İnceleme ve düzenleme -EM.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, bu makalenin araştırılması, yazarlığı ve yayınlaması ile ilgili olarak herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemiştir.

Kaynaklar

- [1] European Commission. (2018). *Construction and demolition waste (CDW)*. Retrieved April 19, 2025. from, https://ec.europa.eu/environment/waste/construction_demolition.htm
- [2] Blengini G.A., Busto M., Fontoni M. & Fino D., (2012). Eco-efficient waste glass recycling: Integrated waste management and green product development through LCA, *Waste Management*, 32(5): 1000-1008, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.018>.
- [3] Calkins, M., (2008). Materials for sustainable sites: a complete guide to the evaluation, selection, and use of sustainable construction materials. Chapter 1: Materials for Sustainable Sites Defined, *John Wiley & Sons*. Retrieved from, https://media.wiley.com/product_data/excerpt/50/04701345/0470134550.pdf
- [4] Saghafi M.D. & Teshnizi Z.S.H., (2011). Recycling value of building materials in building assessment systems, *Energy and Buildings*, Volume 43(11): 3181-3188, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.016>
- [5] Hammond, A., & World Resources Institute. (1995). Environmental indicators: a systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development (Vol. 36). Washington, DC: World Resources Institute. Retrieved from, http://pdf.wri.org/environmentalindicators_bw.pdf
- [6] Aydın İpekçi C., Coşkun N. & Tıkansak Karadayı T., (2017). İnşaat sektöründe geri kazanılmış malzeme kullanımının sürdürülebilirlik açısından önemi, *Türk Bilim Araştırma Vakfı Dergisi*, 10 (2) 43-50. Erişim adresi, <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/309730>
- [7] Saltan M., Kaçaroğlu G., Karadağ Ö. & Coşkun, S., İnşaat sektörü atık yönetimi, çevresel açıdan sektörel atık yönetimi ve uygulamaları 11, Editörler: Prof. Dr. İsmail Tosun, Prof. Dr. Kâmil Ekinci. S:145-166. Nobel Bilimsel Eserler, Ankara, Yayın no: 1759. ISBN: 978-625-398-826-5. 2023. Erişim adresi, <https://www.researchgate.net/publication/376046934>
- [8] Akbaş A. & Çalışkan Ö., (2023). İnşaat sektöründe sürdürülebilirlik ve atık yönetimi, 2 nd International Conference on Recent Academic Studies October 19-20, 2023; Konya, Türkiye. Erişim adresi, <https://www.researchgate.net/publication/375000913>
- [9] United States Environmental Protection Agency (EPA). (2021). *national overview: facts and figures on materials, wastes and recycling*. Retrieved, April 19, 2025 from, https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials?utm_source=chatgpt.com
- [10] Eurostat. (2023). Waste statistics- statistics explained. *european commission*. Retrieved from, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics
- [11] Zhao, L., & Liu, X. (2021). Life cycle assessment of recycled glass in construction: Energy and environmental

impacts. *Construction and Building Materials*, 286: 122-129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122732>

- [12] Çokaygil Z., Atık yönetimi planlamasında yaşam döngüsü analizi, (2005), Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- [13] Ashby M.F., (2012). Materials and the environment: eco-informed material choice, Second edition, Chapter 3: The Material Life Cycle, *Elsevier*,
- [14] Brown M.A. & Hwang H., (1986). Energy and buildings: special issue on measuring energy savings: the scorekeeping approach. Margaret F. (Ed.), February/May 1986, Volume 9, Nos. 1 & 2. *Resources, Conservation and Recycling* 1989;2(3):235-239. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2012.12.015>
- [15] Berge, B., (2001). Ecology of Building Materials (1st ed.). *Routledge*. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780080504988>
- [16] Maccarini Vefago L.H. & Avellaneda J., (2013). Recycling concepts and the index of recyclability for building materials, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 72: 127-135, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.015>
- [17] Ruban C., (2021). Yaşam döngüsü ile düşünme rehberi-1, *yaşam döngüsü analizi*, Erişim tarihi, 20 Nisan 2025. Adresi, <https://www.medium.com/türkiye/yaşam-döngüsü-ile-düşünme-rehberi-2-a43e93adda4d>
- [18] Mohanty, C. R. C., (2011). Reduce, reuse and recycle (the 3Rs) and resource efficiency as the basis for sustainable waste management. *Proceedings of the synergizing resource efficiency with informal sector towards sustainable waste management, New York, NY, USA, 9*. Retrieved April 19, 2025. from, https://uncrd.un.org/sites/uncrd.un.org/files/20110509_02_mohanty_csd19-learning-centre.pdf
- [19] Bristogianni T. & Oikonomopoulou F., (2022). Glass up-casting: a review on the current challenges in glass recycling and a novel approach for recycling “as-is” glass waste into volumetric glass components. *Glass Structures & Engineering*. 8. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40940-022-00206-9>
- [20] Pereira da Costa F., Rodrigues da Silva Morais C. & Rodrigues A.M., 2020, Sustainable glass-ceramic foams manufactured from waste glass bottles and bentonite, *Ceram. Int.*, 46 (11): 17957-17961, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.107>
- [21] Environmental Protection Agency. (t.y.). Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) overview. Retrieved from, <https://www.epa.gov/rcra/resource-conservation-and-recovery-act-rcra-overview>
- [22] Federal Authorities of the Swiss Confederation. (2015). Ordinance on the Avoidance and the Disposal of Waste. Retrieved from, <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2015/891/en>
- [23] National Renewable Energy Laboratory. (1994). Closed loop economy and waste management act. Retrieved from, <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/7978.pdf>
- [24] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, (2015). *Atık yönetimi yönetmeliği*. Resmî Gazete, 2 Nisan 2015, Sayı: 29314. Erişim tarihi, 19 Nisan 2025. Adresi, <https://webdosya.csb.gov.tr/db/lab/duyurular/atiktan-numune-alma-mevzuati-20211215093213.pdf>
- [25] U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2025).

Resource Conservation and Recovery Act (RCRA). Retrieved from, <https://www.epa.gov/history/epa-history-resource-conservation-and-recovery-act> US EPA

[26] California Building Standards Commission. (2011). California Green Building Standards Code (CALGreen). Retrieved April 19, 2025. from, <https://www.dgs.ca.gov/BSC/About/History-of-the-California-Green-Building-Standards-Code-CALGreen>

[27] Federal Office for the Environment (FOEN). (1991). Technische Verordnung über Abfälle (TVA). Retrieved April 19, 2025. from, <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/13767.pdf>

[28] Ma, M., Tam, V. W. Y., Le, K. N., Butera, A., Li, W., & Wang, X. (2023). Comparative analysis on international construction and demolition waste management policies and laws for policy makers in China. *Journal of Civil Engineering and Management*, 29(2), 107-130. DOI: <https://doi.org/10.3846/jcem.2023.16581>

[29] Iacoboaia, C., Aldea, M., & Petrescu, F. (2019). Construction and demolition waste- a challenge for the European Union. *Theoretical and Empirical Researches in Urban Management*, 14(1), 30-52. Retrieved from, <https://www.researchgate.net/publication/331328615>

[30] Aleksey Anisimo & Dmitriy Motorin, (2023). A new legal concept for understanding the essence of production and consumption waste: A View from Russia, *Revista Direito GV, São Paulo*, v. 19, e2330. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-6172202330>

[31] Akhtar, A., & Sarmah, A. K. (2018). Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, 186, 262-281. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>

[32] Lu, W., & Yuan, H. (2010). Exploring critical success factors for waste management in construction projects of China. *Resources, Conservation & Recycling*, 55(2), 201-208. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.09.010>

[33] Mısır, A. ve Arıkan, O.A., (2022), Avrupa ve Türkiye’de sıfır atık yönetimi ve döngüsel ekonomi, *Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik*, 1(1), 69-78. Erişim adresi, <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2300683>.

[34] Yaş, H., (2018). Türkiye’de çevresel etki değerlendirmesi ve stratejik çevresel değerlendirme uygulamasının genel bir değerlendirmesi, *Kent Akademisi*, 11(1), 29-43. Erişim adresi, <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/449634>

[35] Haypak, (t.y.). *Geri dönüşümde en iyi ülkeler*, Haypak Blogu. Erişim tarihi, Aralık 2024. Adresi, <https://www.haypak.com.tr/blogs/haypak/geri-donumde-en-iyi-ulkeler>

[36] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, (2022). Döngüsel ekonomi: genel değerlendirme raporu, *Europe Aid/140562/IH/SER/TR*. Erişim tarihi, 19 Nisan 2025

[37] Öner G., (2022). Doğal atıkların kompozit malzeme olarak kullanım olanakları, Mühendislikte *Güncel Araştırmalar Kitabı*, Gece Kitaplığı, Sertifika No: 47083, s.

132-144.

[38] Aran A., (2008). *Malzeme bilgisi 2007-2008 bahar ders notları*, İTÜ Makine Mühendisliği Bölümü, Erişim tarihi, 20 Nisan 2025. Adresi, <https://www2.isikun.edu.tr/personel/ahmet.aran/mal201.pdf>

[39] Filser F. ve Gauckler L.J., (2007). Ceramic Materials, Chapter 5: Glass, Material Science II, ETH-Zürich, Malzemeler Bölümü, s.1-80.

[40] Kaner F., (t.y.), Cam fırını ve refrakterleri, *İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi*, Erişim tarihi, 22 Nisan 2025. Adresi, <https://slideplayer.biz.tr/slide/3122602/>

[41] Thormark C., (2006). The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building, *Building and Environment*, 41(8): 1019-1026, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.026>

[42] Siddique R., (2011). Utilization of silica fume in concrete: review of hardened properties, *Resour. Conserv. Recycl.*, 55 (11): 923-932, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.012>

[43] Toutanji H., Delatte N., Aggoun S., (2004). Effect of supplementary cementitious materials on the compressive strength and durability of short-term cured concrete, *Cement Concr. Res.*, 34 (2): 311-319, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.08.017>

[44] Jiang M., Chen X. & Rajabipour F., (2014). Comparative life cycle assessment of conventional, glass powder, and alkali-activated slag concrete and mortar, *J. Infrastruct. Syst.*, 20 (4), DOI: [10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000211](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000211)

[45] Mohajerani A., Vajna J., Cheung T.H.H., Kurmus H., Arulrajah A. & Horpibulsuk S., (2017). Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: a review, *Construction and Building Materials* (Vol. 156, Pp. 443-467), Elsevier Ltd, Erişim adresi, [10.1016/j.conbuildmat.2017.09.005](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.005)

[46] Gök S.G. & Şengül Ö., (2024). Enhancing mechanical properties of alkali-activated slag SIFCON for sustainable construction using recycled glass and tire-derived waste steel fibers, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Volume 18, article number 89, DOI: <https://doi.org/10.1186/s40069-024-00724-6>

[47] Gök S.G. & Sengul Ö., (2021). The use of waste glass as an activator in alkali-activated slag mortars, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering Sustainability* 174(3): 120-130. DOI: <https://doi.org/10.1680/jensu.19.00070>

[48] Manan A., Zhang P., Alattiyh W., Alzara M., Ahmad J. & Yosri A.M., (2024). Physical properties of recycled concrete powder and waste tyre fibre reinforced concrete, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Engineering Sustainability* 178:3, 171-184. Retrieved from, <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/full/10.1680/jensu.24.00079>

[49] Kavas T., Çelik M.Y. & Evcin A., (2004). Cam atıklarının çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, *5 Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, s.114-119. 13-14 Mayıs 2004, İzmir, Türkiye.

[50] Cihan M.T. & Akyüncü V., (2025). Statistical analysis of mechanical properties of waste glass powder substituted glass fiber mortars by ANOVA, *ÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci.*, 14 (2), 580-587.

DOI: <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1558323>

[51] Schwarz N., Cam H. & Neithalath N., (2008). Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash, *Cement & Concrete Composites* 30, 486-496 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.02.001>

[52] Adhikary S.K., Ashish D.K. & Rudžionis Z., (2021). Expanded glass as light-weight aggregate in concrete – A review, *Journal of Cleaner Production* Volume 313, 127848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127848>

[53] Owoeye S.S., Matthew G.O., Oviemhanda F.O. & Tunmilayo S.O., (2020). Preparation and characterization of foam glass from waste container glasses and water glass for application in thermal insulations, *Ceramics International*, 46 (8), Part B, p. 11770-11775, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.01.211>.

[54] Mohajerani A., Vajna J., Cheung T.H.H., Kurmus H., Arulrajah A. & Horpibulsuk S., (2017). Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review, *Construction and Building Materials*, 156, s. 443-467, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.005>.

[55] Bahadori A., (2014)., Thermal insulation handbook for the oil, gas, and petrochemical industries, chapter three- material selection for thermal insulation, p.239-301. *Gulf Professional Publishin.* DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800010-6.00003-4>

[56] Özer, N., & Acun Özgünler, S. (2019). Yapılarda yaygın kullanılan ısı yalıtım malzemelerinin performans özelliklerinin duvar kesitleri üzerinde değerlendirilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 25-48. Erişim adresi, <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/777815>

[57] Guo P., Meng W., Du J., Stevenson L., Han B. & Bao Y., (2023). Lightweight ultra-high-performance concrete (UHPC) with expanded glass aggregate: Development, characterization, and life-cycle assessment, *Construction and Building Materials*, Volume 371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130441>

[58] Kurpi M., Grzyl B., Pszczola M. & Kristowski A., (2019). The Application of granulated expanded glass aggregate with cement grout as an alternative solution for sub-grade and frost-protection sub-base layer in road construction, *Materials*, 12(21), 3528. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12213528>.

[59] Altuncı, Y. T., Öcal, C., Saplıoğlu, K., İnce, H. H., vd. (2021). Genleştirilmiş cam agrega ve genleştirilmiş perlit agrega ikameli şap betonlarının bazı fiziksel özelliklerinin araştırılması. *Teknik Bilimler Dergisi*, 11(2), 8-13. DOI: <https://doi.org/10.35354/tbed.918849>.

[60] Altuncı Y. T., Öcal C., Saplıoğlu K., İnce H.H. & Cevikbas M., (2021). Genleştirilmiş cam agregalı ve genleştirilmiş perlit agregalı şap harçlarının performans özelliklerinin belirlenmesi, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 11-20, DOI: <https://doi.org/10.31202/ecjse.753475>.

[61] Aktürk, B., Dayi, M., & Aruntaş, H. Y. (2021). Genleştirilmiş cam küre agrega katkılı harçların bazı özelliklerinin incelenmesi. *Düzce University Journal of Science and Technology*, 9(1), 443-452. DOI: <https://doi.org/10.29130/dubited.729582>

[62] Tazeoğlu F., 21. yy.'da seramik ve cam malzemelerin mimaride yüzey oluşturma ve kaplamada kullanımı, (2016), Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü, Seramik Anasanat Dalı, Eskişehir.

[63] Kántor, P., Béri, J., Képes, B. & Székely, E., (2024). Glass wool recycling by water-based solvolysis. *ChemEngineering*, 8, 93. DOI: <https://doi.org/10.3390/chemengineering8050093>

[64] Topçu, İ. B., & Kural, R. (2023). Saydam betonun özellikleri üzerine bir çalışma, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(3), 784-794. DOI: <https://doi.org/10.17780/ksujes.1207991>.

[65] Çetinkale Demirkan G., (2023), Atık cam malzemenin peyzaj tasarımlarında kullanılabilirliği, *Online Journal of Art and Design*, 11(5) 382-389. DOI: <https://adjournal.net/articles/115/11524.pdf>

[66] Real Baek C., Kim H.D. & Jang Y.C., (2025). Exploring glass recycling: Trends, technologies, and future trajectories, *Environmental Engineering Research*, 30(3) 240241. DOI: <https://doi.org/10.4491/eer.2024.241>

[67] Harrison E., Berenjian A. & Seifan M., (2020). Recycling of waste glass as aggregate in cement-based materials, *Environmental Science and Ecotechnology*, 4, 100064, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ese.2020.100064>.

[68] Makowski, C., Finkl, C. W., & Rusenko, K. (2011). Using recycled glass cullet for coastal protection: a review of geotechnical, biological, & Abiotic Analyses. *Journal of Coastal Research*, 1362-1366. Retrieved from, <http://www.jstor.org/stable/26482398>

[69] Tao Y., Hadigheh S.A. & Wei Y., (2023). Recycling of glass fibre reinforced polymer (GFRP) composite wastes in concrete: A critical review and cost benefit analysis, *Structures*, 53, p.1540-1556, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.018>.

[70] Scaffaro R., Di Bartolo A. & Dintcheva N.T., (2021). Matrix and filler recycling of carbon and glass fiber reinforced polymer composites: a review, *Polymers*, 13, 3817. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13213817>.

[71] Şenol A.F., (2023). Endüstriyel atık tozları ile üretilen geopolimer harç ve betonların özellikleri, *2nd International Conference on Innovative Academic Studies*, Konya, Turkey. Erişim adresi, <https://www.researchgate.net/publication/368336323>

[72] Gök S.G. & Şengül Ö., (2023). Geopolimer üretiminde atık cam kullanımı, *Beton 2023 Kongresi Bildirileri*, 8,10 Kasım 2023, s: 588-597. Erişim tarihi, 20 Nisan 2025. Adresi, <https://www.thbbakademi.org/wp-content/uploads/2023/10/Geopolimer-Uretiminde-Atik-Cam-Kullanimi.pdf>

[73] Yuan X., Wang J., Song Q. & Xu Z., (2024). Integrated assessment of economic benefits and environmental impact in waste glass closed-loop recycling for promoting glass circularity, *Journal of Cleaner Production*, 444: 141155, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141155>

[74] Glass Pavilion at the Toledo Museum of Art / SANAA, Erişim tarihi, Aralık 2024. Adresi,

<https://www.archdaily.com/54199/glass-pavilion-at-the-toledo-museum-of-art-sanaa-pritzker-prize-2010>

[75] The Crystal, Erişim tarihi, Aralık 2024. Adresi, https://www.archdaily.com/275111/the-crystal-wilkinson-eyre-architects?ad_source=search&ad_medium=projects_tab

[76] The Edge, Erişim tarihi, Aralık 2024. Adresi, <https://www.archdaily.com/785967/the-edge-plp-architecture>

[77] Garanti BBVA Teknoloji Kampüsü, Erişim tarihi, Aralık 2024. Adresi, <https://www.arkitektuel.com/garanti-bbva-teknoloji-kampusu/>

[78] Wat Pa Maha Chedi Kaew, Erişim tarihi, Aralık 2024. Adresi, <https://itsbetterinthailand.com/activities/wat-pa-maha-chedi-kaew-wat-lan-khuad-a-temple-made-out-of-glass-bottles-sisaket>

[79] Şişecam, (2023), Sürdürülebilirlik raporu, Erişim tarihi, Aralık 2024. Adresi, <https://www.sisecam.com.tr/sites/catalogs/tr/Documents/sustainability/sisecamsurdurulebilirlik2023.pdf>

[80] Ahmad, F., Khan, F., & Khan, A., (2021). Potential use of recycled materials on rooftops to improve thermal comfort in sustainable building construction projects. *Frontiers in Built Environment*, 7(1): 101-112. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1014473>

[81] Müller, J., & Rieger, T. (2018). Recycled materials in the construction sector: Environmental and economic benefits. *Sustainable Materials and Technologies*, 16: 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.07.001>