

**YAPI ELEMANLARININ YENİDEN KULLANIMI VE ENVANTER KISITLI YAPISAL OPTİMİZASYON**Soner SEZER<sup>1</sup>, Hakan ÖZBAŞARAN<sup>2\*</sup>, Murat HİÇYILMAZ<sup>3</sup><sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. ABD., Eskişehir/Türkiye  
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-8116-3837><sup>2\*</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fak., İnşaat Müh. Bölümü, Eskişehir/Türkiye  
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-1959-5297><sup>3</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Afyonkarahisar/Türkiye  
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-4132-4285>

Anahtar Kelimeler	Öz
Yeniden kullanım Yapısal optimizasyon Stok Envanter Döngüsel ekonomi	<i>İnşaat sektörü çevresel etkiler ve atık oluşumu bakımından en büyük paydaşlardan birisidir. Karar verici kuruluşların çevresel etkileri azaltmak amacıyla baskılarını gündün güne arttırdığı bilinmektedir. Bu amaç doğrultusunda, bir döngüsel ekonomi stratejisi olan yeniden kullanımın yapısal sistemlere uygulanması değerli bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Bu literatür incelemesinde, son yıllarda yapı elemanlarının yeniden kullanımına olan ilginin artması ile gündeme gelen envanter kısıtlı yapısal optimizasyon (EKYO) alanındaki çalışmaların incelenmesi amaçlanmıştır. EKYO yönteminden yapısal elemanların yeniden kullanımı ile elde edilen kazanımı maksimize etmesi beklenmektedir. EKYO yönteminin daha geniş bir perspektifte tartışılabilmesi için öncelikle yapısal elemanlarının yeniden kullanımı, inşaat sektörünün çevresel etkileri ve döngüsel ekonomi modeli, yapı elemanlarının yeniden kullanımının önündeki engeller ve sunulan çözümler, literatürde sunulan uygulama incelemeleri ve vaka çalışmaları özetlenmiştir. Ardından bu incelemenin ana konusu olan envanter kısıtlı yapısal optimizasyona dair literatürdeki çalışmaların geniş incelemeleri sunulmuştur.</i>

**REUSE OF STRUCTURAL ELEMENTS AND INVENTORY CONSTRAINED STRUCTURAL OPTIMIZATION**

Keywords	Abstract
Reuse Structural optimization Stock Inventory Circular economy	<i>The construction industry is one of the biggest stakeholders in terms of environmental impacts and waste production. It is known that the pressure on the decision-making organizations to reduce environmental impacts is increasing day by day. For this purpose, the application of reuse, which is a circular economy strategy, to structural systems has emerged as a valuable solution. In this literature review, it is aimed to analyze the studies in the field of inventory constrained structural optimization (ICSO) which has come to the fore with the increasing interest in the reuse of structural elements in recent years. It is expected that the ICSO method will maximize the gain obtained by the reuse of structural elements. Primarily in order to discuss the ICSO method in a wider perspective, the reuse of structural elements, the environmental impacts of the construction sector and the circular economy model, the barriers and solutions to the reuse of structural elements, and the application reviews and case studies presented in the literature are summarized. Then extensive reviews of studies in the literature on inventory constrained structural optimization, which is the main subject of this review, are presented.</i>

Derleme Makale

Başvuru Tarihi

: 10.04.2023

Kabul Tarihi

: 07.12.2023

Review Article

Submission Date

: 10.04.2023

Accepted Date

: 07.12.2023

\* Sorumlu yazar: [ozbasaran@ogu.edu.tr](mailto:ozbasaran@ogu.edu.tr)<https://doi.org/10.31796/ogummf.1280445>Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Giriş

Yapı mühendisliğinin yeni bir çalışma alanı olarak görülen yapısal optimizasyon, yapısal tasarım süreçlerini karar verme problemlerine dönüştürerek ele almaktadır. Karar verme, var olan seçeneklerden en iyisinin arandığı bilişsel bir eylemdir. Karar verme problemine dönüştürülen tasarım süreçleri, önceden tanımlanmış kısıtlar dahilinde sonucun uygunluğunu belirten amaç fonksiyonunun minimize veya maksimize edilmesiyle yürütülür. Problemdeki kaynak kullanımlarını ve/veya çeşitli faaliyetlerin miktarlarını temsil eden tasarım değişkenleri, amaç fonksiyonunun en iyi değerini elde edecek şekilde değiştirilerek karar verme probleminin optimum çözümünün bulunması hedeflenmektedir. Bir yapısal tasarım süreci için tasarım değişkenleri genellikle kesit özelliklerini karakterize eden parametreleri, kısıtlar ise yer değiştirme, gerilme gibi limitleri ifade etmektedir. Amaç fonksiyonu ise yapı maliyetini minimize edecek şekilde seçilmektedir (Saka, Hasançebi ve Geem, 2016).

Geleneksel yapısal optimizasyon yöntemi ihtiyaç duyulan miktarda ve istenilen dayanım ve geometri özelliklerini karşılayacak çeşitlilikte yapısal elemana sahip olduğu varsayımı ile yürütülmektedir. Her ne kadar günümüz için bu varsayım geçerli olsa da doğal kaynakların tükenmesi gibi sebeplerle yeni yapı elemanı bulunamaması ya da çeşitli gerekçelerle yeni yapı elemanı üretilmesinin eskisi kadar cazip olmaması gibi senaryolar altında bu varsayımın geçersiz olabileceği düşünülmektedir. Yeni yapı elemanı üretiminin cazibesini yitirmesi karbon salınımı ve yerleşik enerji gibi çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik bakımından dezavantajlı hale gelmesi ile açıklanmaktadır. Bu noktada ömrünü tamamlamış yapılardan kazanılan yapı elemanlarının yeniden kullanılması fikri değerli bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. Yeniden kullanımın çevresel etkileri azaltırken atık yönetimi konusunda da ciddi katkılar sunması beklenmektedir.

Yapısal elemanların yeniden kullanımı her ne kadar yenilikçi bir fikir gibi görülsün de tarih boyunca bilinen ve uygulanan bir yöntemdir. Özellikle sanayi devriminden önceki dönemlerde kısıtlı lojistik imkânlar nedeniyle yapısal eleman ihtiyacının yerel kaynaklardan karşılandığı bilinmektedir. Bu durumun inşaat süreci için ciddi bir kısıt oluşturduğu düşünülmektedir. Yapısal bileşenlerin yeniden kullanımına dair örnekler tarihin çeşitli döneminde rastlanmaktadır. Örneğin: Antik Roma, Mısır ve Yunan uygarlıklarında yıkılan binaların taş ve tuğlalarının yeniden kullanıldığı bilinmektedir (Addis, 2006). İspanya'nın Kordoba şehrinde 8. Yüzyılda inşa edilen Kurtuba Camii sütunlarının bir kısmı yakın çevrede bulunan Roma ve Vizigot harabelerinden elde edilmiştir (Balbas, 1965; akt.: Brütting, Wolf ve Fivet, 2019a). Birinci dünya savaşından sonraki süreçte de

yapı elemanı tedarik sıkıntılarında dolayı yeniden kullanımın popüler bir yöntem olduğu bilinmektedir (Brütting ve diğ., 2019a).

Bu çalışmada, son yıllarda yapı elemanlarının yeniden kullanımına olan ilginin artması ile gündeme gelen envanter kısıtlı yapısal optimizasyon (EKYO) alanındaki çalışmaların incelenmesi amaçlanmıştır. EKYÖ, klasik yapısal optimizasyon yönteminde sıklıkla tercih edilen ağırlık ya da maliyet minimizasyonu ile değil daha çok çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik kavramlarıyla temellendirildiğinden Bölüm 2'de inşaat sektörünün çevresel etkileri ve döngüsel ekonomi; EKYÖ'nün önündeki muhtemel engellerin anlaşılabilmesi için Bölüm 3'te yapısal elemanların yeniden kullanımı ile ilgili problemler ve bu problemlere sunulan bazı çözümler; yeniden kullanımın sunduğu çıktıların anlaşılabilmesi için Bölüm 4'te literatürde bulunan bazı uygulama incelemeleri ve vaka çalışmaları incelenmiştir. Ardından bu çalışmanın ana amacı olan envanter kısıtlı yapısal optimizasyon alanındaki çalışmaların detaylı incelemeleri Bölüm 5'te sunulmuştur.

## 2. İnşaat Sektörünün Çevresel Etkileri ve Döngüsel Ekonomi

İnşaat sektörü; doğal kaynak tüketimi, sera gazı emisyonları, enerji sarfiyatı ve atık oluşumu konularında büyük paydaşlardan birisidir (Allwood ve Cullen, 2012; Eurostat, 2022). Öyle ki Avrupa Birliği içerisindeki en büyük atık oluşumu inşaat ve yıkım kaynaklıdır. Bu atığın miktarı hafriyat atıkları hariç yıllık 350 milyon tondan daha fazladır (European Commission, 2017). İnşaat sektörünün yerleşik etkilerinden önemli bir kısmının da taşıyıcı sistemlerden kaynaklandığı bilinmektedir. Hammadde çıkarılması, işleme, nakliye, montaj gibi safhalarda enerji tüketilmekte ve karbon salınımı yapılmaktadır. Yerleşik etkilerin azaltılması amacıyla döngüsel ekonomi modelinin inşaat sektörü için de uygulanması bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Döngüsel ekonominin iş modelleri 1970'li yıllardan beri bilinmektedir. İlgili model mevcut ekonomik sistemdeki kaynak kullanımının malzeme tüketimi açısından sürdürülebilir olmadığı fikrinden ortaya çıkmıştır (Stahel, 2013). Döngüsel ekonominin ana hedefi üretilen bir ürünün mümkün olduğunca tekrarlı çevrimler ile kullanımda tutulmasını sağlamaktır. Bu bağlamda onarım, yeniden kullanım ve geri dönüşüm olmak üzere üç temel strateji esas alınmaktadır. Döngüsel ekonomi modelinin ana başlıkları ve çevrim şeması Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Döngüsel ekonomi modeli (Ünlütürk ve diğ., 2020)

Konuya yapı mühendisliği açısından bakıldığında, yeniden kullanım ve geri dönüşüm seçeneklerinden hangisinin daha cazip olduğu halen tartışılan bir konudur. Geri dönüşümün en çok tercih edilen döngüsel ekonomi yöntemi olduğu bilinmektedir. Geri dönüşüm için yeniden işleme gerekliliğinden ortaya çıkan enerji sarfiyatının çevreye olumsuz etkileri olduğu eleştirisi hâkimdir. Bu bağlamda yeniden kullanım seçeneğinin, yapıların çevresel etkilerini düşürmek noktasında daha iyi bir çözüm sunabileceği ileri sürülmüştür (Allwood ve Cullen, 2012; Iacovidou ve Purnell, 2016). Çelik bileşenler için yeniden kullanım, geri dönüşümleri için salınan karbonu %60'dan fazla azaltabilmektedir (Gorgolewski, 2008). Yeung, Walbridge

Haas ve Saari (2017) tarafından yapılan çalışmada yeniden kullanım ve geri dönüşüm için karşılaştırmalı bir yaşam döngüsü ve maliyet analizi sunulmuştur. Yapılan vaka çalışmasına göre yeniden kullanım ile çevresel etki parametrelerinin büyük çoğunluğunun azaldığı ancak maliyetlerin arttığı ifade edilmiş, çevresel etkiler ile birlikte maliyetlerin de azaltılması için bir dizi önerilerde bulunulmuştur. Vares, Hradil, Sansom ve Ungureanu (2020) tarafından yapılan çalışmada çeşitli yeniden kullanım senaryoları için ekonomik ve çevresel değerlendirmeler yapılmıştır. Çelik yapılar için yapılan vaka çalışmasının neticesinde yeniden kullanılan elemanların geri dönüşüme göre daha düşük çevrim maliyeti olduğu, çevresel etkinin de azaldığı rapor edilmiştir. Literatürde yeniden kullanım ve geri dönüşümün karşılaştırıldığı çalışmalarda, yeniden kullanımın çevresel etkileri azalttığı konusunda bir mutabakat olsa da maliyet konusunda birbirinden farklı sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür. Bunun temel sebebinin vaka çalışmalarında değişkenlik gösterebilecek belirsiz parametreler olduğu düşünülmektedir. Örneğin yıkım maliyetleri, taşıma mesafeleri, kazanılan elemanların ekstra işlemlere ihtiyacı olup olmadığı gibi çok sayıda vakaya özgü belirsiz parametre bulunmaktadır. Bu bağlamda genel

geçer sonuçlar aramak yerine vaka bazında analiz yapma gereksinimi ortaya çıkmaktadır.

### 3. Yapı Elemanlarının Yeniden Kullanımının Önündeki Engeller ve Çözümler

Yapı elemanlarının yeniden kullanımı her ne kadar cazip bir alternatif olarak sunulsa da önünde bazı engeller bulunduğu çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur. Iacovidou ve Purnell (2016) tarafından yapılan çalışmada yeniden kullanımın çok büyük potansiyeller vaat ettiği ve bu potansiyelin sektör tarafından kabul edildiği ancak ekonomik, organizasyonel, politik ve teknik engeller bulunduğu belirtilmiştir. Ekonomik engeller seçici yıkımın getirdiği ek maliyetler, depolama ve nakliye giderlerinin artması, yeniden kullanılmak üzere kazanılan elemanlar için bir pazar bulunmaması gibi sebeplerle; organizasyonel engeller yeniden kullanılacak elemanlarla ilgili herhangi bir standart bulunmaması, yıkım operasyonlarının dar bir programla ve çok sayıda tarafla yapılması, bileşenlerin depolanması için altyapı eksikliği gibi sebeplerle; politik engeller yeniden kullanıma teşvik ve rehberlik edecek politikalar geliştirilmemesi gibi sebeplerle; teknik engeller mevcut yapıların söküm için tasarlanmamış olması, yeniden kullanılacak elemanların yapısal performanslarını belgeleyip garanti edecek prosedürlerin olmaması, seçici yıkım ve yeniden kullanım konusundaki teknik bilgi ve tecrübe eksikliği, kazanılacak elemanlardaki kalite konusundaki belirsizlik ve eleman boyutlarındaki çeşitlilik gibi sebeplerle açıklanmaktadır. Yeniden kullanımın kazandıracaklarının literatürde belgelenmesine karşın konu hakkında inşaat sektörü içerisinde bilgi ve bilinirlik noktalarında eksikler olduğunun altı çizilmiştir. Yeniden kullanım ile sağlanabilecek avantajları ortaya koyan çalışmaların artmasıyla sektör paydaşlarının adaptasyonunun kolaylaşabileceği ifade edilmiştir. Tingley, Cooper ve Cullen (2017) tarafından İngiltere için yapılan çalışmada yapısal çeliğin yeniden kullanımının önündeki engeller sektör temsilcileri ile görüşmeler yapılarak araştırılmıştır. En önemli engeller olarak maliyet, bulunabilirlik ve depolama, müşteri talebinin düşük olması, çeliğin izlenebilirliği ve tedarik zincirindeki boşluklar raporlanmıştır. Katılımcıların büyük çoğunluğunun yeniden kullanımın en büyük faydasının çevresel etkiler üzerinde olacağını düşündüğü bildirilmiştir. Ruan (2020) tarafından yapılan çalışmada yeniden kullanılan çelik elemanlar ile inşa edilen yapıların performansını değerlendirecek herhangi bir standart olmadığı ifade edilmiş, yeniden kullanılan elemanlardaki kusurların yapısal stabiliteye etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak; yeniden kullanılacak elemanların önceki hizmet ömründe, sökülürken, taşınırken, yeniden kaynaklanırken ve montaj sırasında hasar alabileceği; bu elemanların

sonraki hizmet ömürlerinde basınç etkisi altında olması durumunda geometrik kusurlarının ve bu kusurlardan oluşan ek gerilmelerin tespit edilmesinin kritik olduğu vurgulanmıştır. Vares ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada yönetmeliklerin yeniden kullanım yöntemini desteklemediği, mevcut bina stokunun sökülme için tasarlanmadığı, mevcut binalardan malzeme kazanılmasının karmaşık ve zorlu bir süreç olduğu vurgulanmıştır. Condotta ve Zatta (2021) tarafından yapılan çalışmada yeniden kullanımın Avrupa birliği tarafından kaynak yönetimi, çevresel etkiler ve atık yönetimi konularındaki faydaları sebebi ile teşvik edilen bir öncelikli alan olduğu ifade edilmiştir. Buna karşın geri kazanılan elemanların kullanımına ilişkin bazı yasal boşluklar olduğu, AB normlarındaki bütünlükten uzak yapı gereği çeşitli tutarsızlıkların ortaya çıktığı belirtilmiştir. İlgili yasal boşluk ve tutarsızlıkların mevcut problemleri derinleştirdiği ifade edilmiştir. Bir yapı elemanı yıkım yoluyla elde edildiğinde AB normlarına göre iki farklı statüde değerlendirilebildiği, geri kazanılan unsurun gelecekteki kullanımı aynı kalacaksa “önleme” kategorisine girdiği, daha sonra yeniden kullanılabilmesi yasal olarak yapı malzemesi standartlarına tabi olduğu belirtilirken; kullanım amacı değişirse “yeniden kullanıma hazırlama” kategorisinde değerlendirildiği ve atık olarak kabul edildiği; kontrol, temizleme ve geri kazanım süreçlerinden geçmesi gerektiği bildirilmiştir. Bu işlemlerin ardından yapı malzemeleri yönetmeliğine uygunluğu değerlendirilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Yapı malzemeleri yönetmeliğinin ise ürünün kendisi ile ilgili değil kullanım alanıyla ilgili standartları ortaya koyduğundan dolayı yeniden kullanımı kısıtladığı belirtilmiştir. Yasal çerçevedeki problemlerin yeniden kullanımı doğrudan engellemese de proje sürelerini uzattığı, süreç maliyetlerini arttırdığı, elemanların performans değerlendirmelerinde sorunlara yol açtığı ve son kullanıcıda olumsuz bir izlenim bıraktığı vurgulanmıştır.

Literatürde tanımlanan engellerin aşılması için önemli sayıda çalışma yapılmıştır. Yapılardan eleman kazanma sürecinin kolaylaştırılması amacıyla “söküme göre tasarım” kavramı ortaya atılmıştır. Bu tasarım yöntemine göre; yeni yapılacak yapıların ömürlerini tamamlandığında kolayca sökülerek, elemanlarının geri kazanılacak şekilde tasarlanması beklenmektedir. Tasarım aşamasında yapının gelecekte nasıl söküleceğine ilişkin projelendirme yapılması, yapısal elemanlar birbirine bağlanırken mümkün olduğunca kalıcı bağlantılardan kaçınılması sökülme sırasında minimum maliyet ve hasar hedeflerinin sağlanması amaçlanmaktadır. Ayrıca hangi yapının ne zaman söküleceği, söküldüğünde nasıl bir envanter elde edileceği, sökülme maliyetinin ve işlem süresinin tahmin edilebilirliği gibi önemli bilgiler elde edilerek yapı elemanlarının yeniden kullanımının sürdürülebilirliğine katkı sağlanması beklenmektedir.

Bu sayede yeniden kullanım için gereken seçici yıkım maliyetlerinin düşeceği ve kurtarılan malzemeler için yeni bir pazar yaratılacağı belirtilmiştir (Rios, Chong ve Grau, 2015). Buna ek olarak sökülme göre tasarım yönteminin yerleşik enerjiyi, hava kirliliğini ve emisyonları düşüreceği bildirilmiştir (Akinade ve diğ., 2017). Kanter (2018) tarafından yapılan incelemede çelik yapılar için sökülme göre tasarımdaki son durum ve tasarım sürecine olan etkileri ele alınmıştır. Sökülme göre tasarımın çevresel, sosyal ve finansal faydalara yol açabileceği ifade edilmiştir. Çalışmaya göre çelik yapıların sökülme göre tasarımına dair geniş bir literatür olsa da tasarım ekiplerinin uygulayacağı net prosedürlerin henüz geliştirilemediği bildirilmiştir. Sökülme göre tasarım yönteminde kullanılmak üzere tasarım ekiplerini destekleyecek çok fazla araç olmadığı, buna karşın BIM (yapı bilgi modellemesi) ile sökülme göre tasarıma ciddi bir destek sağlanabileceği ifade edilmiştir. Kanyılmaz, Birhane, Fishwick ve Castillo (2023) tarafından yapılan çalışmada yapısal çeliğin yeniden kullanımı konusundaki engeller; malzeme bulunabilirliği, yeterli tasarım standartlarının olmayışı, ön maliyetler ve inşaat öncesi yıkımın oluşturduğu karbon etkisi, yıkımdan elde edilecek malzemelerin yeniden kullanımının maksimize edilmesi konusundaki problemler, yeniden kullanımın tüm inşaat ekosisteminde etkin şekilde kullanımı ve koordinasyonunun sağlanamaması olarak başlıklandırılmıştır. Salama (2017) tarafından yapılan çalışmada betonarme yapılar için sökülme göre tasarım konusu incelenmiştir. Çalışmada betonarme binaların içinde döküm gibi geleneksel yöntemlerle inşa edilmesi sebebiyle sökülme göre tasarım ilkelerine çok uzak olduğu, bu sebeple yıkıma mecbur kaldığı ifade edilmiştir. Ön üretimli betonarme elemanların yaygınlaşması ile sökülme göre tasarımın kolaylaşacağı belirtilmiştir. Buradan hareketle demontaj kapasitesinin artırılması ve sökülme göre tasarım prensiplerinin uygulanabilmesi için ön üretimli betonarme eleman ve sistemlerin geliştirilmesi noktasında daha çok çalışmaya ihtiyaç duyulduğu sonucuna ulaşılmıştır. Walsh ve Shotton (2022) tarafından yapılan çalışmada İrlanda için yapısal malzeme kullanımında ahşapın yükselen bir trend olduğu vurgulanarak ilerleyen zamanlarda kereste tedariki anlamında ciddi bir baskı oluşacağı belirtilmiştir. Bu sorunun önüne geçilebilmesi amacıyla tipik bir müstakil konut üzerinde yapısal malzemelerin yeniden kullanımı araştırılmış, yeniden kullanım potansiyelini maksimize etmek amacıyla sökülme için tasarım işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sökülme için tasarımla birlikte yeniden kullanılabilir eleman oranının %41’den %74’e çıkarıldığı belirtilmiştir. Estrella ve diğ. (2023) tarafından yapılan çalışmada yapılardan yeniden kullanılmak üzere malzeme kazanımının zorlu bir süreç olduğu belirtilerek ilk tasarımın sökülebilir elemanlarla gerçekleştirilmesi ile bu sorunun önüne geçilebileceği belirtilmiştir. Bu amaç

doğrultusunda PixelSlab adı verilen bir modüler taşıyıcı ahşap sistem önerilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel testlerin ardından önerilen sistemin defalarca hasara uğramadan sökülüp yeniden kullanılabilir olduğu, diğer yapı elemanları ile uyumlu olduğu, söküm ve yeniden uygulama için ciddi bir işçilik gerekeceği, kompakt tasarımı sayesinde nakliye operasyonlarını kolaylaştırdığı belirtilmiştir.

Yapı elemanlarının yeniden kullanılmasının önündeki engellerin aşılması için güncel teknolojik imkanlardan faydalanılmasını amaçlayan çeşitli çalışmalar da bulunmaktadır. Ness, Swift, Ranasinghe, Xing ve Soebarto (2015) tarafından yapılan çalışmada yapı bilgi modellemesi (BIM) ile birleştirilmiş radyo frekans tanıma (RFID) teknolojisinin, yapısal çeliğin yeniden kullanımı için mevcut olan bazı belirsizliklerin giderilmesi amacıyla kullanımı araştırılmıştır. Önerilen metodoloji sayesinde yapı elemanlarının sahipliği, üretici bilgisi, üretim tarihi ve yeri, fiziksel özellikleri ve konumları gibi bilgilerin künyelenip kolayca dijitalize edilebileceği belirtilmiştir. Dijitalize edilen verilerin BIM entegrasyonu ile yeniden kullanımın önündeki büyük engellerden birisi olan sahadaki bilgi eksikliğini azaltarak yapısal çeliğin sökümü, geri kazanımı ve yeniden kullanımını kolaylaştırabileceği ifade edilmiştir. Akberieh, Jayasinghe, Waldmann ve Teferle (2020) tarafından yapılan çalışmada yaşam döngüsü sonlandırma kararında ve yapı sökümünün dijital olarak gerçekleştirilmesinde BIM uygulamaları incelenmiştir. BIM tabanlı yaklaşımın şehirleri ve binaları yeniden kullanılacak elemanlar ile dolu madenler olarak kabul ederek, yeniden kullanımı destekleyeceği ve sürdürülebilirlik açısından büyük potansiyeller vaat eden bir yöntem olduğu vurgulanmıştır. Yeung, Walbridge ve Haas (2015) tarafından yapılan çalışmada yapısal çeliğin yeniden kullanımında geometrik karakterizasyonun (yapı elemanlarının ve bağlantı geometrilerinin belirlenerek dökümanteye edilmesi) önemi araştırılmıştır. Geometrik karakterizasyonun bilinmeyen eleman boyutlarına erişilmesi, montaj geometrisinin belirlenebilmesi, güvenilirlik değerlendirilirken belirsizliğin ölçülmesi gibi nedenlerle önemli olduğunun altı çizilmiştir. Geometrinin algılanabilmesi için üç boyutlu görüntüleme teknolojilerinden faydalanılmıştır. Yapısal çeliğin yeniden kullanımı için maliyetler ve risklerin azaltılması ile geri dönüşümden daha cazip olabileceği belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca karar verme sürecine rehberlik edebilecek bir prosedür önerilmiştir. Önerilen karar verme prosedürü üç alt başlık barındırmaktadır. Bunlar sırasıyla ön analiz, detaylı analiz ve karar verme aşamalarıdır. Ön analizde deneyimli bir uzmanın mevcut yapının yeniden kullanılabilirlik potansiyelini kabaca değerlendirmesi beklenmektedir. Ayrıntılı analiz ise kendi içinde dört alt süreçte yürütülecektir. Bunlar geometrik ve mekanik özelliklerin belirlenmesi, yapısal analiz, yaşam

döngüsü analizi ve ekonomik analizdir. Üçüncü aşamada ise toplanan bilgiler ışığında nihai karar verilmektedir. Çalışmada önerilen üç boyutlu görüntüleme teknolojisi tabanlı yarı otomatik kesit tanıma sisteminin, oluşturulan prosedüre veri toplama aşamasında destek olabileceği ifade edilmiştir. Hradil ve diğ. (2014) tarafından yapılan çalışmada yapı elemanlarının yeniden kullanılmasının önündeki engellerin aşılması için çevrimiçi pazarlama, eleman etiketleme ve BIM teknolojilerinin etkili olabileceği belirtilmiştir. Fujita ve Masuda (2014) tarafından yapılan çalışmada yeniden kullanılacak yapısal çeliğin dayanım özelliklerinin belirlenmesi için bir dizi tahribatsız muayene süreci yürütülmüştür. Bu bağlamda ultrasonik sertlik ölçüm cihazı vasıtasıyla sertlik değerleri elde edilerek Vickers sertlik metodu ile çekme dayanımına dönüşümü sağlanmıştır. Kimyasal bileşen analizi için ise optik emisyon spektrometresi kullanılmıştır. Yapılan vaka çalışmasının neticesinde yeniden kullanılacak elemanların performansının doğrulanabilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

#### 4. Vaka Çalışmaları ve Uygulamalar

Bu kısımda literatürde bulunan bazı teorik vaka çalışmaları ve gerçek hayat uygulamalarından bahsedilmiştir. Gorgolewski, Straka, Edmonds ve Sergio-Dzoutzidis (2008) tarafından yapılan çalışmada yapısal elemanların yeniden kullanıldığı bazı uygulamalar incelenmiştir. İlk inceleme Güney Londra'da uygulanan BedZED (The Bedington Zero Energy Development) projesidir. Projede kullanılan yapısal çeliğin %95'i 50 km'lik çevrede bulunan geri kazanılmış elemanlardan elde edilmiştir. Proje için kullanılan yapısal çeliğin %80'lik kısmı ise Brighton Tren İstasyonu'nun tadilatı sonucu kazanılan elemanlardan oluşmaktadır. Başlangıçta geri kazanılmış elemanların tasarıma uyumluluğu noktasında endişeler olduğu ancak esnek tasarım sayesinde çok küçük değişikliklerle uyum sorunlarının aşıldığı ifade edilmiştir. Kazanılan elemanların kumlanıp boyandığı, ekstra bulon delikleri ve kaynak izleri dışında eski ömürlerine işaret eden herhangi bir emare kalmadığı bildirilmiştir. Çalışmada sunulan bir diğer örnek de Toronto Scarborough Üniversitesi içindeki öğrenci merkezidir. Binada kullanılan yapısal çeliğin 16 tonluk kısmı Royal Ontario Müzesinin yıkımı sonucu hurdaya ayrılan yapısal çelikten elde edilmiştir. Elde edilen çelik elemanlar bir imalathanede boyuna kesilerek istenen ölçülerde yeni elemanlar üretilmiştir. Elemanlar temizlenmiş, yeniden boyanmış ve yeni bulon delikleri açılarak sahaya gönderilmiştir. Projede yeniden kullanımın çevresel kaygılarla tercih edildiği ve maliyete etkisinin nötr bulunduğu ifade edilmiştir. Çalışmadaki son uygulama incelemesi ise Kanada'nın British Columbia eyaletindeki bir ilkokul binasıdır. Bir yangın neticesinde kullanılmaz hale gelen Roy Stibbs Okulunun hızlıca inşa edilip tekrar kullanıma

sunulması için ömrünü tamamlamış başka bir okul binasındaki çelik elemanların yeniden kullanıldığı belirtilmiştir. Yeni binanın yapısal sisteminin, eski binayla oldukça yakın tasarlanmasıyla elemanların minimum işleme kullanılması sağlanmıştır. İki bina arasındaki deprem yüklerinin farklılığından dolayı çapraz elemanların yeniden tasarımı gibi bazı değişiklikler yapılırsa da yeniden kullanım potansiyelinin artırılması için eski tasarıma sadık kalmaya çalışılmıştır. Bu sayede çoğu eleman temizlenip boyandıktan sonra doğrudan kullanılabilmiştir. Söküm ve nakliye sırasında bazı elemanlarda oluşan hasarların tamir edildiği belirtilmiştir. Tahmini yeniden kullanım oranının %75 olduğu bildirilmiştir. Çalışmada ayrıca yeniden kullanımın daha efektif hale getirilmesi için bir dizi öneride bulunulmuştur. Tasarım süreçlerinde yeniden kullanım kararının erken aşamalarda verilmesiyle entegrasyonun kolaylaştığı, yeniden kullanılacak elemanların çoğu zaman kullanıma hazır olmadıkları ve kazanılan elemanların oldukça farklı kesitler barındırabileceği için esnek tasarımlar yapması gerektiği, yeniden kullanım potansiyelinin üst düzeye çıkarılabilmesi için mevcut envanterin detaylı kayıtlarının tutulması ve geri kazanılmış yapısal elemanların ulaşılabilirliğinin artırılması gerektiği, eski yapı elemanlarının mekanik özelliklerinin değerlendirilebilmesi için prosedürler geliştirilmesi gerektiği rapor edilmiştir. Hradil ve diğ. (2014) tarafından yapılan çalışmada yapı elemanlarının yeniden kullanımının çevresel etkilerinin araştırılması için üç adet vaka çalışması sunulmuştur. Bu çalışmalar sırasıyla Finlandiya'da bulunan ön üretimli elemanlardan oluşan bir betonarme hangar, Romanya'da bulunan bir endüstriyel yapının çelik kirişleri ve küçük bir mahallede yeniden kullanım politikasının uygulanması üzerinedir. Her vaka çalışması için çevresel etkilerde ciddi miktarda azalma gözlenmiştir. Pongiglione ve Calderini (2014) tarafından yapılan vaka çalışmasında İtalya Cenova'da kullanılmayan bir endüstriyel yapının taşıyıcı sistem elemanlarının, yeni inşa edilecek tren istasyonunda değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kullanılan malzeme miktarının ne kadar azaldığı ile ilgilenmektedir. Sonuç olarak yapısal çeliğin yeniden kullanımının %30'a varan oranda malzeme ve CO2 salınımı tasarrufuna imkân verdiği bildirilmiştir. Vares, Hradil, Pulakka, Ungureanu ve Sansom (2018) tarafından sunulan teorik vaka çalışmasında literatürde optimize edilmiş bir sanayi yapısı kullanılmıştır. Çevresel etkilerin ve maliyetlerin analiz edilmesi amacıyla yapının yeni elemanlarla ve yeniden kullanılan elemanlarla tasarlandığı iki süreç yürütülmüştür. Yeniden kullanımın çevresel faydaların yanı sıra yatırım maliyetini de %10 oranında düşürdüğü sonucuna ulaşılmıştır. Sandin, Carlsson, Chúláin ve Sandberg (2021) tarafından yapılan çalışmada yeniden kullanım ve söküm için tasarım

konularını örnekleyen bir proje uygulaması ele alınmıştır. Halihazırda ön üretimli şekilde ahşaptan imal edilen Villa Anneberg projesindeki yeniden kullanım potansiyeli araştırılmış ve yeniden kullanım oranının artırılabilmesi için çeşitli geliştirmeler yapılmıştır. Öncelikle mevcut proje için söküm prosedürleri üretilmiş, çatı kaplamalarından temele kadar sökümün nasıl gerçekleştirileceği detaylı olarak açıklanmıştır. Ardından mevcut tasarımın sökümü uygunluğu bağlamında güçlü ve zayıf yönleri irdelenmiş ve gelişime açık olan konular tartışılmıştır. Geliştirilebileceği belirtilen konulardan üç tanesi seçilerek iyileştirmeler önerilmiştir. Bunlar: duvar-döşeme birleşim modifikasyonu, duvar-duvar birleşim modifikasyonu ve döşeme-döşeme birleşim modifikasyonudur. Geliştirmelerin ana motivasyonu atık oluşumunu engellemek ve söküm sürecini kolaylaştırmaktır. Duvar-döşeme ve duvar-duvar birleşimlerinde bağlantı civatalarına ulaşmak için alçı plakanın kaldırılması gerektiği ve buhar bariyerlerine zarar verildiği, bu durumun hem atık ürettiği hem söküm sürecini zorlaştırdığı hem de sökülen malzemenin yeniden kullanım için tamirat gereksinimi ortaya çıkardığı ifade edilmiştir. Döşeme-döşeme birleşimlerinde ise yapıştırıcı kullanımı sebebiyle söküm işleminin zorlaştığı ve söküm sırasında geri kazanılan malzemelerde ciddi tahribatlara neden olduğu belirtilmiştir. Tasarım civatalara kolayca ulaşılacak şekilde revize edilmiştir. Civataların üstünde alçı ya da yalıtım elemanı yerine süpürgelik ya da kolayca açılacak kapaklar tercih edilmiştir. Tabliye-tabliye birleşiminde yapıştırıcı kullanımdan vazgeçilerek yapıştırıcının eksikliğini tolere edebilmek için ilave kirişler ve civatalar eklenmiştir. Yeniden kullanılabilir ahşap oranı mevcut tasarım üzerinde herhangi bir değişiklik yapmadan %82,7 iken tasarımda bahsi geçen değişiklikler yapıldığında ise %86,4 olarak bulunmuştur. Çalışma ahşap yapıların sökümü göre tasarımı rehber niteliğindedir. Buna göre ahşap yapıların söküm için tasarımı yapıdırma, çivileme gibi söküm sürecini zorlaştıran bağlantılardan mümkün olduğunca kaçınılması gerekmektedir. Bağlantılarda civata tercih edilse dahi civataların kolayca ulaşılabilir bölgelerde konumlandırılması oldukça önemlidir. Kolay ulaşılabilirlik hem söküm sürecini hızlandırmakta hem de söküm sırasında kazanılacak elemanlarda hasar oluşumunu minimize etmektedir. Mekanik ve elektrik tesisatının sökümü uygun tasarlanması gerekmektedir. İlk kurulum, söküm ve ikinci kurulum aşamalarının detaylı olarak projelendirilmesiyle oluşabilecek sorunların öngörülebileceği ve tasarım aşamasındayken önüne geçilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

## 5. Envanter Kısıtlı Yapısal Optimizasyon (EKYO)

Yapısal optimizasyon; belirli kısıtlar altında, tasarım değişkenlerinin doğrudan ya da dolaylı olarak etki ettiği amaç fonksiyonu ya da fonksiyonlarının değerlendirilmesi ile oluşturulan uygunluk kriterine göre, mümkün olan en iyi yapısal sistemi arayan bir yapı mühendisliği alanıdır. Burada kısıtlar genellikle yönetmelik, şartname ya da mühendislik biliminin gerekliliklerini, tasarım değişkenleri probleme özgü olarak eleman boyutları ya da kesit özellikleri gibi optimize edilecek sistemi karakterize eden parametreleri; amaç fonksiyonu ise yapı ağırlığı, maliyet gibi çözümün performansını değerlendirmek için kullanılacak kriter ya da kriterleri ifade etmektedir. Yapısal optimizasyon ile deneme yanılma esaslı geleneksel tasarım yöntemlerine kıyasla daha az malzeme kullanımı gerektiren, daha ekonomik ve çevre dostu yapısal tasarımlara çok daha kısa sürede ulaşıldığı kabul görmüş bir gerçektir.

Yapısal optimizasyon sağladığı imkanlarla sınırlı dünya kaynaklarının daha efektif kullanılması noktasında ciddi katkılar sunsa da bazı kabuller ile yürütülmektedir. Bunlardan bir tanesi de istenilen geometride, çeşitlilikte ve dayanım özelliklerinde ihtiyaç duyulan sayıda yapısal eleman bulunabileceği varsayımdır. Bu varsayım günümüz için büyük ölçüde kabul edilebilir olsa da bazı gelecek senaryolarının gerçekleşmesi durumunda geçersiz olabileceği tartışılmaktadır. Bu senaryolardan kötümser olanı doğal kaynakların tükenmesi ve yeni yapısal eleman üretilmemesi iken literatürde daha çok kabul gören senaryo ise yeni yapı elemanı üretmenin çeşitli sebeplerle cazibesini yitmesidir. Bahsi geçen sebepler Bölüm 2’de açıklanan çevresel ve ekonomik kaygılar ile temellendirilmektedir.

Çoğu sektör gibi inşaat sektörü de çevresel etkilerin azaltılması noktasında ciddi bir yükümlülük ve baskı altındadır. Avrupa Birliği’nin döngüsel ekonomi politikaları için sunduğu eylem planında Avrupa’daki en büyük atık kaynağının inşaat ve yıkım sektörünün faaliyetleri sonucunda ortaya çıktığı, atıkların büyük oranda geri dönüştürülebilir veya yeniden kullanılabilir potansiyelde olduğu vurgulanmış, döngüsel ekonomi modelinin inşaat sektöründe yaygınlaştırılmasına yönelik politikalar geliştirilmesi bir hedef olarak sunulmuştur (European Commission, 2015). Buradan da anlaşılabilirliği gibi gelecekte çevresel etkilerin azaltılması ve atık yönetimi için inşaat sektörü üzerindeki baskıların daha da artacağı açıktır. Bunun doğal sonucu olarak geri dönüşüm ve yeniden kullanıma olan talebin artacağı tahmin edilmektedir. Bölüm 2’de detaylarıyla bahsedildiği gibi, geri dönüşümün daha çok tercih edilen bir yöntem olduğu bilirse de çevresel etkilerin azaltılması konusunda yeniden kullanım ile daha başarılı sonuçlara ulaşıldığı literatürdeki çeşitli çalışmalarda

sunulmuştur. Yapı elemanlarının yeniden kullanımı, yapı mühendisleri açısından çeşitli belirsizlikler içeren ciddi bir optimizasyon problemini gündeme getirmektedir. Bu problemin çözümü için envanter kısıtlı yapısal optimizasyon yöntemi değerli bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır.

Envanter kısıtlı yapısal optimizasyon, geri kazanılmış yapısal elemanların oluşturduğu eleman havuzları kullanılarak gerçekleştirilen özel bir yapısal optimizasyon yöntemidir. Havuzda bulunan yapı elemanlarının geometrik özellikleri, mekanik özellikleri ve stok miktarları bilinmektedir. Bu özellikler kullanılarak, mevcut olan elemanlar ile belirlenmiş amaç fonksiyonu doğrultusunda en iyi yapısal tasarım aranmaktadır. Diğer bir deyişle yapı elemanlarının yeniden kullanımındaki faydanın maksimize edilmesi amaçlanmaktadır. Yapısal elemanların yeniden kullanımı söz konusu olduğu için geleneksel yapısal optimizasyondan farklı olarak amaç fonksiyonları da çevresel etkileri kapsayacak şekilde değişiklikler gösterebilmektedir zira minimum ağırlığı ya da minimum maliyeti amaçlamak yeniden kullanılan elemanlarla oluşturulan sistemlerin performansını değerlendirirken yanlıtıcı olabilmektedir.

### 5.1 Araştırma Metodolojisi

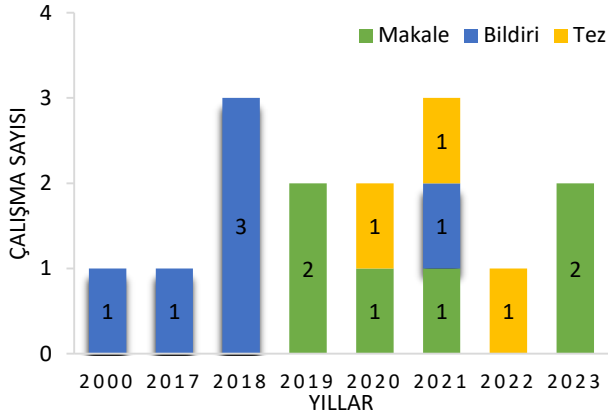
Literatürdeki envanter kısıtlı yapısal optimizasyon çalışmalarına ulaşmak için ScienceDirect, Web of Science, Springer Link, Taylor & Francis, Google Scholar, Researchgate ve Academia veri tabanlarından Tablo 1’de sunulan anahtar kelimeler ile taramalar yapılmıştır. Taramalar sonucunda ulaşılan çalışmalardan algoritmik bir yapısal optimizasyon metodolojisi ya da uygulaması içerenler filtrelenmiştir.

Tablo 1. Anahtar kelimeler

Structural, reused elements	Inventory constrained structural optimization	Design for deconstruction, optimization
Reuse, load bearing, optimization	Stock constrained structural optimization	Optimization for deconstruction
Reused, optimization, structural	Circular design, structural, optimization	Reused elements, structural, optimum
Reuse building elements	Circular economy, construction, optimization	Structure, reclaimed elements, optimum
Reused steel structure, optimum	Frame, reused, optimum	Truss, reused, optimum

Yalnızca yapısal elemanların yeniden yapısal eleman olarak kullanıldığı çalışmalar esas alınmıştır. Bu bağlamda eski yapı elemanlarının taşıyıcı sistem oluşturma haricinde farklı amaçlar için kullanıldığı ya da yapıların dışındaki kaynaklardan elde edilen malzemelerin yapı elemanı olarak değerlendirildiği

çalışmalar ve kazanılan elemanların cephe sistemleri ve iç tasarım öğeleri gibi mimari elemanlarda kullanılması amacıyla yapılan çalışmalar bu incelemenin kapsamının dışındadır. Taramalar neticesinde belirtilen nitelikleri taşıyan 15 adet çalışmaya ulaşılmıştır. Ulaşılan çalışmaların yıllara ve türlere göre dağılımları Şekil 2'de gösterilmiştir.



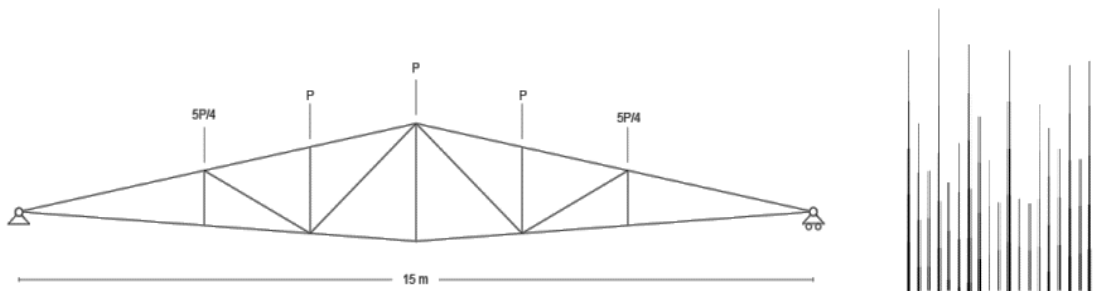
Şekil 2. Çalışmaların yıllara ve türlere göre dağılımları

## 5.2 Literatürdeki EKYO Çalışmalarının Kapsamlı İncelemeleri

Envanter kısıtlı yapısal optimizasyon (EKYO) alanında yazarların ulaşabildiği ilk çalışma Fujitani ve Fujii (2000) tarafından sunulmuştur. Düzlem çerçeve sistemin yeniden kullanılan elemanlarla optimize edildiği çalışma, bu alanda öncü olması bakımından önemliken modern EKYO çalışmalarından bazı farklılıklar içermektedir. Stok listesindeki elemanların boylarına ilişkin herhangi bir veri sunulmamış, elemanların istenilen boyda olduğu varsayılmıştır. Optimizasyon Genetik Algoritma (GA) ile gerçekleştirilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak geleneksel yapısal optimizasyonda olduğu gibi ağırlık minimizasyonu, kısıtlar olarak ise elemanların gerilme ve birim şekil değiştirme limitleri seçilmiştir. Optimizasyon süreci basit bir atama problemi olarak ele alınmıştır. Yapısal elemanın gerilme ve birim şekil değiştirme talebi ile stok elemanlarının kapasiteleri

karşılaştırılarak ilgili atamalar gerçekleştirilmiştir. İki katlı, iki açıklıklı ve altı yapısal elemanlı çerçeve sistem için altı ve dokuz stok elemanı ile iki farklı problem optimize edilmiştir. Sonuç olarak genetik algoritmanın envanter kısıtlı optimizasyon için kullanılabilir olduğu ifade edilmiştir. Literatür taramaları sırasında bahsedilen öncü çalışmadan sonra EKYO alanında uzun yıllar boyunca yapılan herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Avrupa Komisyonu'nun hedefleri, artan çevresel kaygılar, yerleşik enerji ve atık yönetimi gibi kavramların önem kazanmasıyla EKYO'nun tekrar gündeme geldiği düşünülmektedir.

Envanter kısıtlı yapısal optimizasyon probleminin temel sorunlarından birisi stoktaki elemanların ilgili yapısal elemana nasıl atanacağı problemidir. Bukauskas, Shepherd, Walker, Sharma ve Bregulla (2017) tarafından yapılan çalışmada atama probleminin çözümü için bir yöntem sunulmuştur. Atama problemi form uydurma problemi olarak modellenmiştir. Literatürde oldukça popüler bir form uydurma problemi olan kutulama problemi benzetim için tercih edilmiştir. Kutulama probleminin çözümü için geliştirilmiş özel sezgisel yöntemler incelenerek eleman atama probleminin kutulama problemi ile benzerlikleri ortaya konulmuştur. Buradan hareketle kutulama probleminde başarılı sonuçlar veren Ön Sıralamalı First-Fit yöntemi, atama problemi için çözücü olarak seçilmiştir. İlgili yöntemle dairesel elemanlarla oluşturulmuş ahşap bir çatı kafesine atama uygulaması yapılmıştır. Atama yapılan kafes ve literatürden oluşturulan farklı uzunluk ve değişken çaptaki yapay ağaç stoku Şekil 3'te sunulmuştur. Ön Sıralamalı First-Fit yöntemi için, atanacak elemanlar ve stok elemanları dört farklı şekilde sıralanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sıralama kriteri olarak yapısal elemanlar için rastgele ya da eksenel kuvvet, stok elemanı için ise rastgele ya da çap kriteri uygulanmıştır. Başarım, kesimden kaynaklı atık esas alınarak değerlendirilmiş olup karşılaştırma için çalışma süresi ve iterasyon sayıları da sunulmuştur. Elde edilen dört farklı durumdan en başarılı bulunana yapısal eleman için eksenel yük, stok elemanı için çap sıralaması içeren Ön Sıralamalı First-Fit yöntemi olmuştur.



Şekil 3. Atama yapılan kafes sistem ve stok elemanları (Bukauskas ve diğ., 2017)



Yazarların ulaşabildiği literatür çerçevesinde amaç fonksiyonunda çevresel etkileri barındıran ilk çalışma Brütting, Senatore ve Fivet (2018a) tarafından yapılmıştır. Çalışmanın bu yönüyle ciddi bir özgün değere sahip olduğu düşünülmektedir. Çalışmada yapı elemanlarının yeniden kullanımıyla bir elemandan birden fazla hizmet ömrü elde edilmesi ve bu sayede çevresel etkilerin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda kafes sistemlerin stoktaki elemanlarla optimum tasarımına dair yapısal optimizasyon formülasyonları sunulmuştur. Ağırlığın, kesim kaynaklı atıklarının ve yerleşik enerjinin

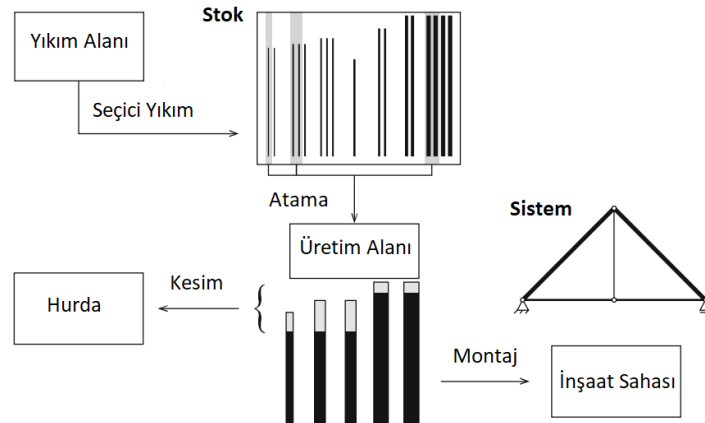
minimizasyonu amaç fonksiyonları olarak belirlenmiştir. Envanter kısıtlı yapısal optimizasyon bir atama problemi olarak kurgulanmıştır. Atama probleminin nasıl çözüldüğü Şekil 4'te özetlenmiştir. Atamalar; satırları yapısal elemanları, sütunları stok elemanlarını ifade eden bir matris ile sağlanmaktadır. Matriste ikilik (binary) sayı sistemi kullanılmıştır. Gerçekleşen atamalar 1 ile gösterilmektedir. Stok listesindeki  $j$  eleman indislerini,  $a$  eleman geometrilerini,  $l$  eleman boylarını,  $n$  ise hangi elemandan kaç adet bulunduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Brütting ve diğ. (2018a) tarafından sunulan atama çözümü

Çalışmada kesit, topoloji ve geometri optimizasyonu yapılmıştır. Kısıt olarak elemanların aksenal kuvvetleri, Euler burkulması, düğüm yer değiştirmeleri ve atama kuralları esas alınmıştır. Yapısal eleman uzunluğundan daha kısa stok elemanlarının ilgili elemana atanması engellenmiştir. Uyum optimizasyonu için amaç fonksiyonu, yük altında deformasyonların minimizasyonu olarak formüle edilmiştir. Yeniden kullanım ile ilgili olan amaç fonksiyonlarında ağırlık minimizasyonu hedeflenmiştir. Bu sayede kesit alanları minimize edilerek eleman kapasitelerinin daha iyi kullanılması amaçlanmaktadır. Ortaya çıkan ağırlık çevresel etkilerin hesaplanması için de etkin

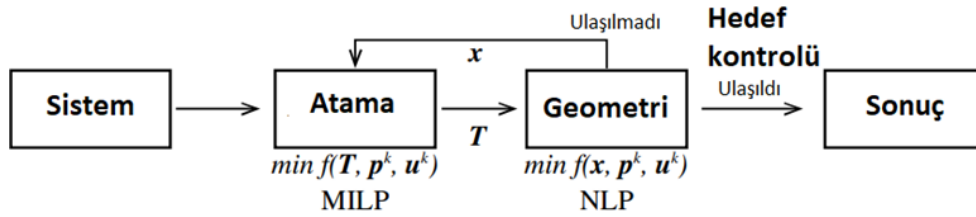
parametredir. Atık oluşumunun önüne geçilmesi ve daha uygun bir yerleşim yapılması amacıyla kesimden kaynaklı atıkların minimizasyonu da bir amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir. Yeniden kullanımın çevreye olan etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla yaşam döngüsü analizi yapılmıştır. Çalışmada sunulan yaşam döngüsü analizinin genel şeması Şekil 5'te gösterildiği gibidir. Şemada gösterilen her süreç için çevresel etkiler ayrı ayrı hesaplanarak kilogram başına harcanan enerji ve sera gazı emisyonları elde edilmiştir.



Şekil 5. Yeniden kullanım için sunulan yaşam döngüsü değerlendirme şeması) (Brütting ve diğ., 2018a)

Optimizasyon problemi atama ve geometri optimizasyonu olarak iki parçaya ele alınmıştır. Atama optimizasyonu için MILP (Mixed Integer Linear Programming), geometri optimizasyonu için ise NLP (Non-Linear Programming) kullanılmıştır. Önerilen optimizasyon prosedürü Şekil 6'da sunulmuştur. Önerilen yöntemin etkinliğini göstermek için üç farklı kafes sistem optimize edilmiş ve sonuçlar klasik yapısal optimizasyon yöntemiyle ağırlığı minimize edilmiş sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar neticesinde EKYO ile elde edilen yapıların toplam ağırlığı klasik yapısal optimizasyonla elde edilenlerden

daha fazla bulunmuştur. Bunun sebebi stoktaki görece küçük enkesitli eleman sayısının sınırlı olması ile açıklanmıştır. İlgili tasarımların ağırlıkları daha fazla olsa da yerleşik enerjilerinin daha düşük olduğu vurgulanmıştır. Vaka çalışmalarından %71'e varan enerji tasarrufu elde edildiği ifade edilmiştir. Bu değer önemli oranda azaltılmış bir çevresel etkiyi ifade ettiği vurgulanmıştır. Yeniden kullanımda en büyük yerleşik enerji tüketiminin seçici yıkım prosedürü için gerekli olduğu ifade edilmiştir.



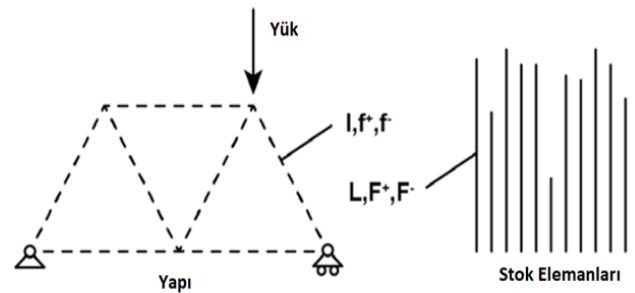
Şekil 6. Brütting ve diğ. (2018a) tarafından önerilen EKYO prosedürü

Bukauskas, Shepherd, Walker, Sharma ve Bregulla (2018) tarafından yapılan çalışmada klasik yapısal optimizasyon metodolojisinde tasarım değişkenlerinin genellikle geometriyi, topolojiyi ya da eleman boyutlarını ifade edecek şekilde seçildiği, envanter kısıtlı yapısal optimizasyonda ise bunlara ek olarak stok elemanların gereken yere atanması probleminin ortaya çıktığı ifade edilmiştir. Atama, tanımlanan envanter kümesi içerisinde istenen nitelikleri sağlayan yapının oluşturulabilmesi için gerekli olan talimatlar olarak tanımlanmıştır. Atamanın doğruluğunun; maliyet, malzeme tüketimi, yaşam döngüsü etkisi gibi parametreleri doğrudan etkilediği belirtilmiştir. Düşük performanslı atama kararlarının; stok elemanlarında çok sayıda kesim yapılarak atık üretilmesi, eleman kesitlerinin gereğinden büyük seçilerek kapasite israfı, gereğinden küçük kesitler seçilerek ilave malzeme ihtiyacı doğması gibi istenmeyen etkilere sebep olabileceği vurgulanmıştır.

Yapılan çalışmada bir kafes sistem özelinde envanter kısıtlı yapısal optimizasyon metodolojisi sunulmuştur. Elemanların enine kesilmesine ve birbirine mafsallı bağlantılarla eklenmesine izin verilmiştir. Bunun dışında elemanları boyuna kesilmesi ve kaynakla eklenmesi gibi senaryolar engellenmiştir. Bu bağlamda bir tamsayı programlama prosedürü kurgulanarak optimizasyon çerçevesi oluşturulmuştur. Önerilen sistemde, geometrisi önceden belirlenmiş kafes sistem çözümlerinde elemanlar için uzunluklar, aksel çekme ve basınç kuvvetlerine ilişkin talepler hesaplanmıştır. Aynı parametreler için stok elemanlarının kapasiteleri de elde edilerek hangi stok elemanın hangi yapısal elemana atanabileceğine dair metrikler oluşturulmuştur. Bu sayede problem karar verme

problemi olarak yeniden kurgulanmıştır. Önerilen atama yönteminin şematik gösterimi Şekil 7'de sunulmuştur. Burada l ve L yapısal eleman ve stok elemanı için boyları, f+ ve F+ çekme kuvveti talebi ve kapasitesini, f- ve F- basınç kuvveti talebi ve kapasitesini ifade etmektedir.

Ayrıca geleneksel yapısal optimizasyon metodolojisinde sıklıkla tercih edilen ağırlık minimizasyonuna dayalı amaç fonksiyonunun envanter kısıtlı optimizasyon için doğru bir yaklaşım olmadığı vurgulanmıştır. Bu durum yapı ağırlığının envanterdeki



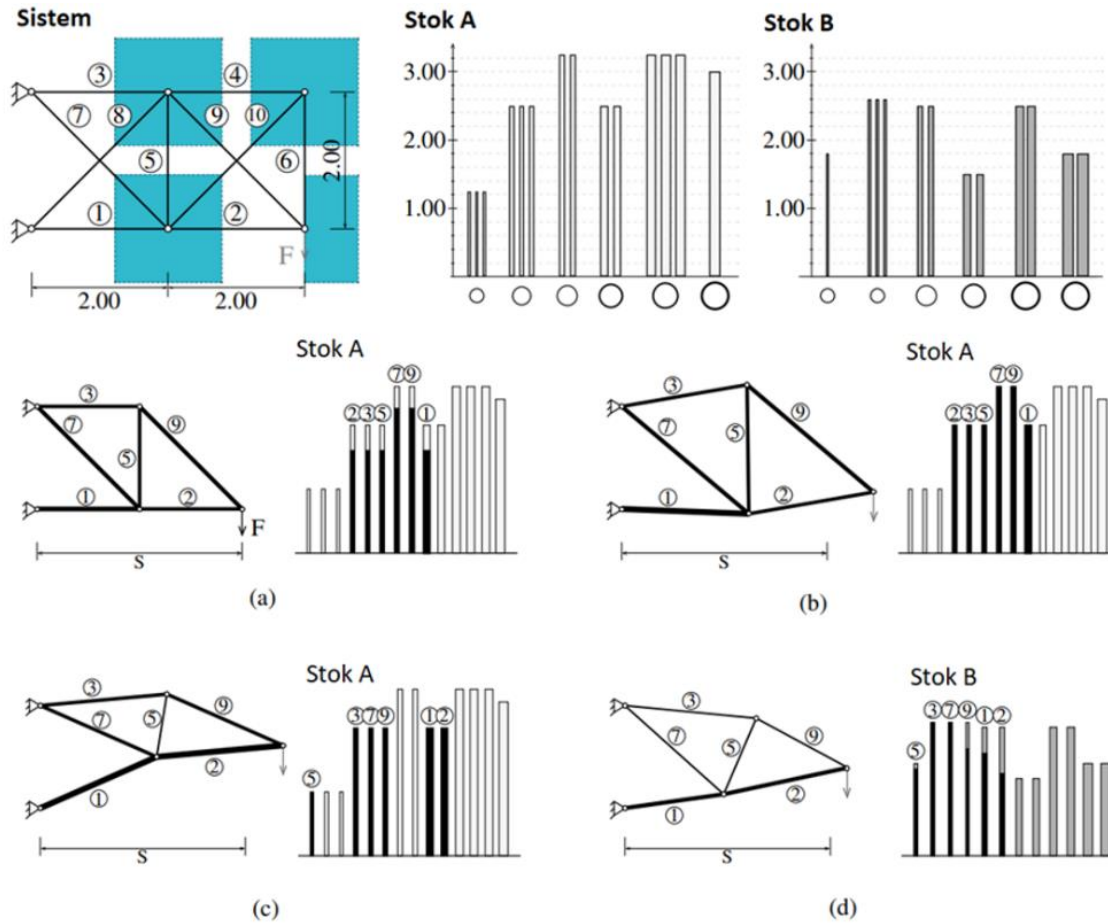
Şekil 7. Bukauskas ve diğ. (2018) tarafından önerilen atama prosedürü

elemanlara uygulanan kesim gibi işlemleri yansıtmamasıyla açıklanmıştır. Buradan hareketle amaç fonksiyonu olarak kesim oranının minimizasyonu önerilmiştir. Kesim oranı kullanılmayan atık kütlelerin kullanılan kütleyle bölünmesi ile elde edilmiştir. Kafes yapılar için kesim oranının nasıl belirlenebileceği ile ilgili analitik bir süreç sunularak yaklaşık bir yöntem de önerilmiştir. Atama optimizasyonları için

Polynomial-Time Heuristic algoritmalarının kullanılabilirliği ifade edilmiştir.

Brütting, Desruelle, Senator ve Fivet (2018b) ve Brütting Desruelle, Senator ve Fivet (2019b) tarafından yapılan çalışmalarda bir gerçek hayat problemi ile birlikte kafes sistemler için EKYO uygulaması sunulmuştur. Çalışmalar metodolojideki birtakım farklılıklar haricinde Brütting ve diğ. (2018a) tarafından yapılan çalışmanın devamı niteliğindedir. Önceki çalışmaya ilave olarak, eleman ataması yapılırken talep edilenden daha kısa kesitlerin de atanabileceği bir bellek oluşturulmuştur. Bu belleğin arama alanı genişlettiği ifade edilmiştir. Daha kısa

elemanların atanması durumu, geometri optimizasyonu sırasında düğümler hareket ettirilken işlevsellik kazanmaktadır. Bu sayede yinelemeli bir atama prosedürü oluşturulmuştur. Nihai sonuçlar değerlendirilirken eleman boyu kısıtı tekrar uygulanarak başarısız atamaların önüne geçilmiştir. Optimizasyon prosedürü ve kısıtlar Brütting ve diğ. (2018a) tarafından yapılan çalışmada sunulduğu gibidir. Atama optimizasyonu MILP (Mixed-Integer Linear Programming) ile gerçekleştirilmiştir.



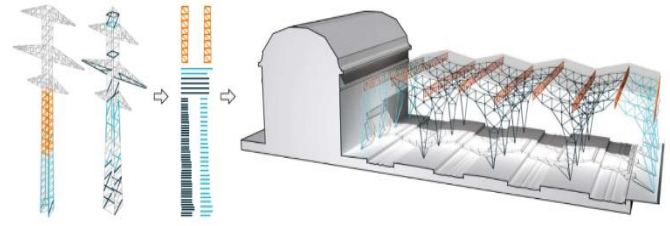
Şekil 8. Brütting ve diğ. (2018b) tarafından çözülen teorik envanter kısıtlı yapısal optimizasyon problemi: a) Atama ve topoloji optimizasyonu, b) Kısa elemanların engellendiği optimizasyon, c) Stok A için kapsamlı optimizasyon, d) Stok B için kapsamlı optimizasyon

Optimizasyonun amacı yapısal kütleyi azaltarak maksimum kapasite kullanımını sağlamaktır. Kısıt olarak eleman iç kuvvetleri, düğüm yer değiştirmeleri ve yerel burkulma değerleri kullanılmıştır. Atamalar ve topoloji optimize edildikten sonra geometri optimizasyonuna geçilmektedir. Bu aşamada hareket serbestliği olan düğümlerin yeri değiştirilerek atanan elemanlar ile varsayılan topolojideki çubuklar arasındaki uzunluk uyumsuzlukları giderilmektedir.

Yapılan geometri optimizasyonu ile stok elemanlarının minimum işlemle yeniden kullanımı amaçlanmaktadır. Geometri optimizasyonu doğrusal olmayan programlama (NLP) ile yürütülmüştür. Çalışmada iki adet vaka analizi sunulmuştur. Bunlardan birisi 10 elemanlı konsol kafestir. İlgili örnek ve ulaşılan sonuçlar Şekil 8'de gösterilmiştir. Kafesin toplam açıklığı ve mesnetlerin konumları sabittir. Düğüm noktalarının hareket edebileceği alanlar mavi

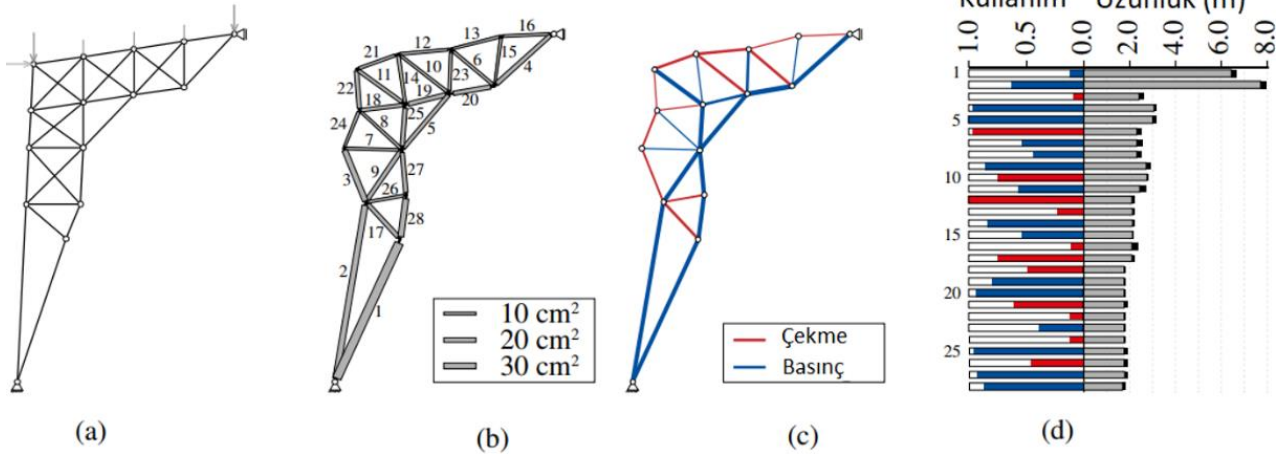
dikdörtgen bölgeler ile ifade edilmiştir. Atama sonucunda stok elemanlarının kullanılan kısmı koyu renk ile gösterilmiştir. İki farklı stok durumu ve dört farklı senaryo için optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Bu senaryolar sadece atama ve topoloji optimizasyonu (Şekil 8a), talep edilenden kısa elemanların atanmadığı optimizasyon (Şekil 8b) ve her bir stok için tam kapsamlı optimizasyondur (Şekil 8c ve d). Sadece atama ve topoloji optimizasyonu olan senaryoda beklediği gibi en büyük kesim kaynaklı atık miktarı oluşmuştur. Geometri optimizasyonunu da içeren senaryolarda sıfır kesim atığı elde edilmiştir. İki stok durumunun farklılıkları da sonuçlara doğrudan yansımıştır. Görece küçük enkesitli stok elemanı miktarının çok olduğu durum için toplam ağırlık daha az bulunmuştur. Aynı sistem yeni elemanlarla da tasarlanarak çevresel etkiler kıyaslanmıştır. Yeniden kullanım ile elde edilen sistemler yeni elemanlar ile oluşturulan sistemlerden daha ağır ve daha düşük ortalama kapasite kullanımına sahip olsalar da çevresel etkiler bakımından daha başarılı bulunmuştur.

İkinci vaka çalışmasında bir gerçek hayat problemi ele alınmıştır. Bu bağlamda enerji nakil hattı direklerinden elde edilen stok elemanları ile bir tren istasyonu çatısı tasarlanmış ve optimize edilmiştir. İlgili problem Şekil 9'da gösterilmiştir. Yapısal tasarım için İsviçre standartları kullanılmıştır. Aynı yapı klasik optimizasyon yöntemiyle de optimize edilerek karşılaştırma için çevresel etkileri elde edilmiştir.



Şekil 9. Brütting ve diğ. (2018b) tarafından sunulan gerçek hayat problemi

Optimizasyon çatı sisteminin tamamı için değil bir kısmı için yürütülmüştür. Optimizasyon süreci ve elde edilen sonuçlar Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekil 10a optimizasyondan önceki durumu, Şekil 10b optimizasyon neticesindeki son durumu, Şekil 10c elemanların hangi aksenal yüke çalıştıklarını ve Şekil 10d ise kapasite kullanımlarını ve uzunlukları göstermektedir. Uzunluklar için verilen şemada gri kısım kullanılan boyu, siyah kısım kesim kaybını ifade etmektedir. İlgili gerçek hayat probleminin çözümü neticesinde, yeniden kullanım ile elde edilen yapının, yeni elemanlar ile yapılan yapıya göre %50 daha ağır olduğu, dolayısıyla elemanların daha düşük talep/kapasite oranlarına sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Buna karşın yerleşik enerji ve karbon salınımı incelendiğinde sırasıyla %63 ve %56 daha düşük değerlere ulaşıldığı belirtilmiştir.



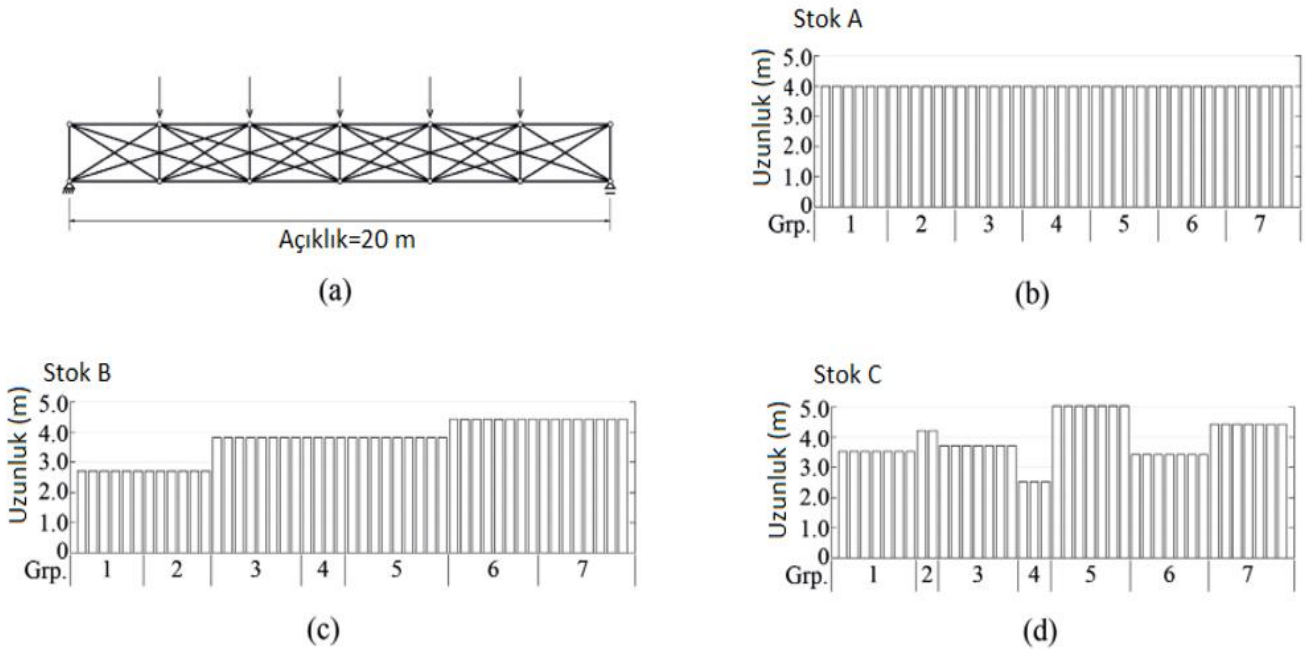
Şekil 10. Brütting ve diğ. (2018b) tarafından sunulan gerçek hayat probleminin sonuçları: a) EKYO öncesi durum, b) EKYO ile elde edilen sistem, c) Elemanların aksenal yük durumları, d) Kapasite kullanımları ve eleman uzunlukları

Brütting, Senatore ve Fivet (2019c) tarafından yapılan çalışmada 3 boyutlu kafes yapılar için yeniden kullanılan elemanlar ile optimum tasarım yapılmıştır. Çalışmanın iki temel amacı vardır. Bunlardan ilki EKYO ile kafes sistem tasarlamakken ikincisi ise stok elemanları ile modül oluşturularak bu modülleri farklı

yapılarda kullanılabilir hale getirmektir. Buradaki hedefin kullanıma hazır optimal bir eleman stoku sağlamak olduğu belirtilmiştir. Optimizasyon süreci belirli kısımlara ayrılmıştır. Bunlar: atama ve topoloji optimizasyonu, stok optimizasyonu, yapısal optimizasyon ve geometri optimizasyonudur. Atama ve

topoloji optimizasyonu Brütting ve diğ. (2018a) tarafından yapılan çalışmada sunulduğu gibidir. Amaç fonksiyonu çevresel etkinin minimizasyonudur. Stok optimizasyonu ideal stok konfigürasyonunun (modül parçaları) yakalanması için kurgulanmıştır. Çok amaçlı bir optimizasyon süreci işletilmiştir. İlk amaç fonksiyonu stok elemanlarının sayısını minimize ederek maksimum eleman kullanımı sağlar. İkinci ve üçüncü amaç fonksiyonları ise kesim atıklarını ve toplam ağırlığı minimize etmek için çalışır. Üç amaç fonksiyonu çeşitli ağırlıklar ile tek amaç fonksiyonunda toplanmıştır. Yapısal optimizasyon Brütting ve diğ. (2018a) tarafından yapılan çalışmada tanıtıldığı gibi, ilk iki optimizasyon sürecinin içerisinde ele alınmıştır. Kısıt olarak gerilme, yer değiştirme, kuvvet dengesi, geometrik uyumluluk ve burkulma tanımlanmıştır. Problem MILP ile çözüldüğü için doğrusal olmayan denklemler doğrusallaştırılarak yansıtılmıştır. Atama ve topoloji optimizasyonu sırasında daha küçük kesitler ile maksimum rijitlik aranmış olur. Stok optimizasyonu sırasında minimum kesme atığı amaçlandığı için stok elemanları varsayılan boyda kullanılarak geometri optimizasyonu da dolaylı olarak gerçekleştirilir. Optimizasyon hedefi olarak belirlenen çevresel etkiler yaşam döngüsü değerlendirmesi ile

hesaplanmış yerleşik enerji ve karbon salınımlarıdır. Çevresel etkilerin değerlendirilmesi Brütting ve diğ. (2018a) tarafından sunulan yöntem ile yapılmıştır. Çalışmada iki farklı vaka optimizasyonu sunulmuştur. Birincisi düzlem kafes sistem için üç farklı stok durumunu içeren çalışmadır. Stoklar; eşit uzunluklu stok elemanları, muhtemel bir kafesin sökümünden ortaya çıkabilecek stok elemanları ve uzunlukları rastgele belirlenen stok elemanlarından elde edilen üç farklı listeden oluşmaktadır. Problem ve stok durumları Şekil 11'de gösterildiği gibidir. Stok elemanları için kapasitelerin %90'ı kullanılarak bir güvenlik faktörü de eklenmiştir. EKYO ile elde edilen sonuçlar, tamamen yeni elemanlardan oluşan ağırlık ve geometrisi optimize edilmiş sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Her senaryo için envanter kısıtlı optimizasyonun bulunduğu toplam yapı ağırlıkları daha fazla, eleman kapasite kullanımları daha düşük olsa da çevresel etkileri çok daha az bulunmuştur. Stok senaryolarından en iyi sonucu veren eşit uzunluklu elemanlara sahip konfigürasyondur. Geometri optimizasyonunun yapıldığı senaryoda, kesim atıkları minimize edildiği için ağırlıklar daha da artarken çevresel etkiler azalmıştır.



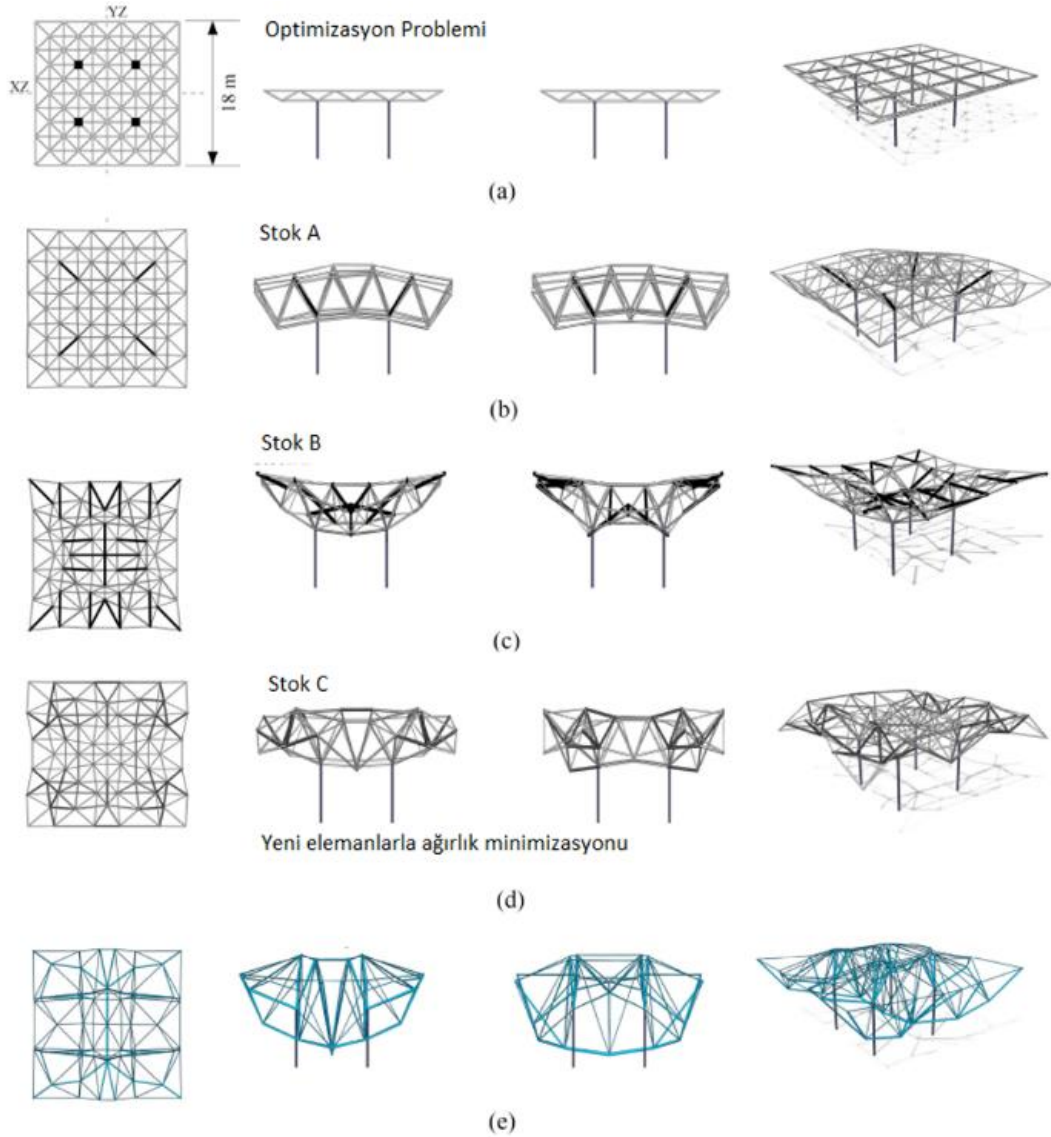
Şekil 11. Brütting ve diğ. (2019c) tarafından optimize edilen düzlem kafes problemi: a) Optimize edilecek sistem, b) Eşit uzunluklu stok, c) Bir kafesin sökümünden elde edilen stok, d) Rastgele uzunluğa sahip elemanlardan oluşturulan stok

Üç boyutlu kafes için yapılan vaka çalışmasında hesaplama maliyetini azaltmak amacıyla sistemin simetrik olduğu ve topolojinin değişmediği kabul edilmiştir. Düğüm yer değiştirmeleri ve geometrik uyumluluk kısıtları ihmal edilmiştir. İlk vaka çalışmasındaki stokların eleman sayıları artırılarak

kullanılmıştır. Problem Şekil 12'de gösterildiği gibidir. Burada Şekil 12a problemin sunumunu, Şekil 12b, c ve d sırasıyla stok A, B ve C ile elde edilen optimum sonuçları ve Şekil 12e ise yeni elemanlar ile ağırlık minimizasyonu sonucunda elde edilen optimal sonucu göstermektedir. Üç boyutlu kafes için elde edilen

sonuçlar da düzlem kafes ile benzerdir. Yeni elemanlar ile tasarlanan kafese göre ağırlığı fazla, kapasite kullanımı düşük ancak çevresel etkileri oldukça az bulunmuştur. Sonuç olarak, önerilen yöntemin büyük ölçekli problemlerde de başarı ile çalıştığı, bu sırada hesaplama maliyetlerini düşürmek için bazı

basitleştirmelere ihtiyaç duyulabileceği belirtilmiştir. Envanter kısıtlı optimizasyonun çıktılarının stokun durumuna bağlı olarak büyük değişiklikler gösterdiği bildirilmiştir. Yöntemin etkinliğinin daha gerçekçi olarak gösterilebilmesi için hayali stoklar yerine gerçek bir stok durumu ile çalışılabileceği ifade edilmiştir.



Şekil 12. Brütting ve diğ. (2019c) tarafından sunulan üç boyutlu kafes problemi ve optimum çözümler: a) Optimize edilecek sistem, b) Stok A için optimizasyon, c) Stok B için optimizasyon, d) Stok C için optimizasyon, e) Yeni elemanlarla ağırlık minimizasyonuna dayalı optimizasyon

Brütting, Senatore, Schevenels ve Fivet (2020) tarafından yapılan çalışmada çerçeve sistemler için EKYO prosedürü önerilmiştir. Çalışma iki farklı senaryo ile ilerlemektedir. Bunlardan birisi her bir yapı elemanı için stoktaki bir elemanın kullanılması diğeri ise stoktaki bir eleman kesilerek birden fazla yapı elemanı oluşturulmasıdır. Yöntemin etkinliğini gösterebilmek için iki adet vaka çalışması yapılmıştır. Vaka çalışmaları için kullanılan stok bilgileri eski binaların imalat

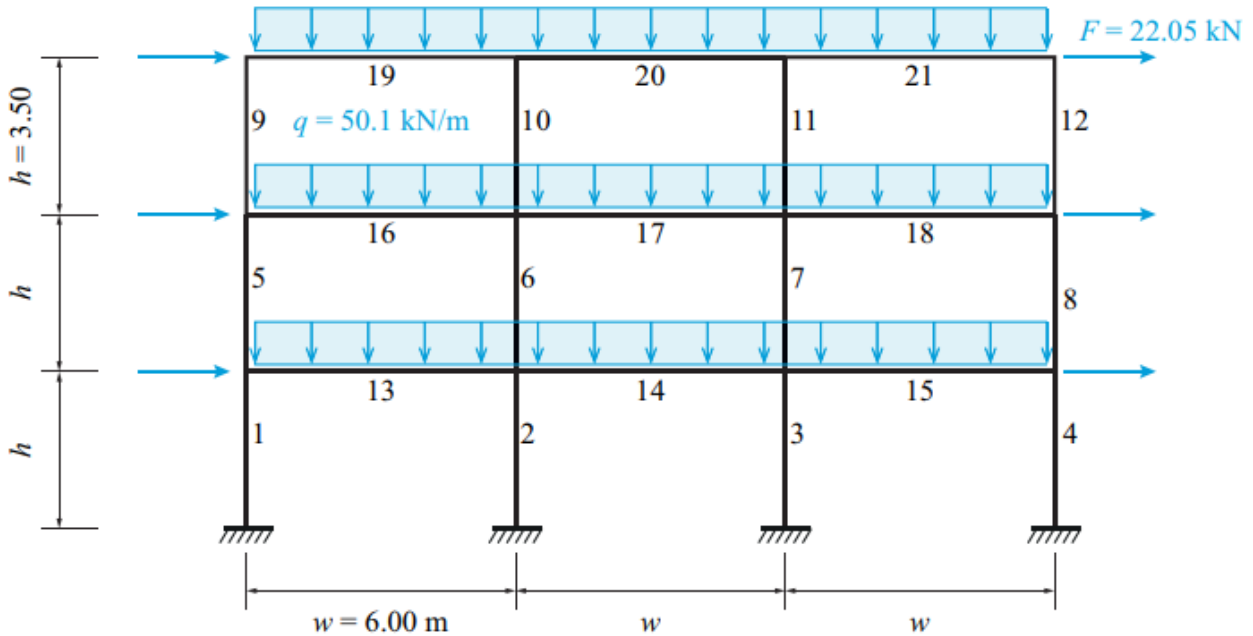
çizimlerinden elde edilmiş gerçek stok listeleridir. Optimizasyon bir atama problemi olarak kurgulanmıştır. Stok elemanları malzeme özellikleri (yoğunluk, elastisite modülü, akma dayanımı), kesit boyutları (alan, atalet momenti), uzunluk ve stok konumu (taşıma mesafesi için) ile karakterize edilmektedir. Atamalar Brütting ve diğ. (2018a) tarafından yapılan çalışmada sunulan yöntemle, ikilik formatta bir matris aracılığıyla yapılmaktadır. Amaç

fonksiyonu tüm atamalar ve her bir atama durumunda oluşacak maliyetlerin toplamını içermektedir. Tüm yapısal kısıtlar ve sera gazı emisyonları amaç fonksiyonunun içerisinde hesaplanmaktadır. Atama yapılmadan önce her bir stok elemanının hangi etkiler altında kullanılabilir bölgede olduğunu belirten bir künyeleme işlemi yapılmıştır. Atamaya dair geometrik kısıtlar ayrıca tanımlanmış, bu sayede her bir elemana bir stok elemanı atanmış, kısa bir stok elemanının uzun bir yapısal elemana atanmasının önüne geçilmiştir. Bir stok elemanı kesilerek birden fazla yapısal eleman oluşturulması için ayrı bir optimizasyon prosedürü önerilmiştir. Buna göre, stok elemanlarının atama matrisi birtakım değişikliklere uğratarak elemanın daha önce kısmen ya da tamamen kullanılıp kullanılmadığını niteleyen indikatörler eklenmiştir. Çalışmada öncekilerden farklı olarak amaç fonksiyonu doğrudan sera gazı emisyonunun minimizasyonu olarak kurgulanmıştır. Yeniden kullanım ve yeni elemanlar ile imalat için uygulanması gereken her sürecin kilogram bazında sera gazı emisyonları, yönetmelik ve bazı teknik raporlardan alınarak toplam maliyet matematiksel olarak modellenmiştir. Atama kararı verildikten sonra, atanan elemanın hacmi ve özgül ağırlığı vasıtasıyla ağırlığı hesaplanarak ağırlığın bir fonksiyonu olan sera gazı emisyonunun bir kısmı oluşturulmaktadır. Buna taşıma sırasındaki emisyonlar

da eklenerek amaç fonksiyonu elde edilmektedir. Yeni elemanlar ile inşaatın maliyetini ifade eden sera gazı salınımları ise doğrudan ağırlığın bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Optimizasyon için Gurobi 8.1 yazılımı aracılığıyla MILP (Mixed-Integer Linear Programming) yöntemi kullanılmıştır. Lineer bir yöntem olduğundan dolayı optimizasyon probleminin içerisindeki doğrusal olmayan denklemler Taylor serisi açılımları aracılığıyla doğrusallaştırılmıştır. Kullanılan optimizasyon yönteminin, metasezgisel algoritmalara göre avantajlı tarafının global optimuma ne kadar yaklaşıldığını ifade eden bir indikatörü olduğundan bahsedilmiştir.

İlk vaka çalışmasında geri dönüştürülmüş ve yeniden kullanılmış elemanlar ile bir düzlem çerçeve optimizasyonu sunulmuştur. Problem Şekil 13'te gösterildiği gibidir. Üçü geri dönüşüm üçü yeniden kullanım olmak üzere altı farklı kombinasyon incelenmiştir.

Sonuç olarak yeniden kullanım ile elde edilen elemanlarla oluşturulan yapı, geri dönüştürülmüş elemanlar ile yapılan yapıdan daha ağır olsa da daha düşük sera gazı emisyonuna yol açtığı bildirilmiştir. Daha uygun bir stok kullanılarak işletilecek optimizasyon prosedürü ile hem ağırlığın hem de sera gazı emisyonunun çok daha düşük olabileceği vurgulanmıştır.



Şekil 13. Brütting ve diğ. (2020) tarafından optimize edilen düzlem çerçeve

İkinci vaka çalışması bir ofis binasının EKYO ile tasarımıdır. İlgili üç boyutlu sistem Şekil 14'te gösterilmiştir. Yüklerin belirlenmesi için İsviçre yük ve çelik yapılar yönetmelikleri kullanıldığı; sabit yük, kar yükü ve azaltılmış rüzgâr yükünün kombinasyonu olarak atandığı belirtilmiştir. Tasarım iki parçada

optimize edilmiştir. Öncelikle "ikincil kirişler" eldeki stok ile optimize edilmiş, daha sonra yapının geri kalanı için mevcut stok ile optimizasyon yapılmıştır.

Optimizasyon sonucuna göre ilk örnekteki benzer şekilde yeniden kullanım ile bina ağırlığı artmış ancak

sera gazı emisyonları azalmıştır. Çalışmanın sonucu olarak, sera gazı emisyonları bakımından değerlendirildiğinde optimal sonuçların stok elemanlarının kesilerek yeni elemanlar üretilmesine müsaade edilen durumda elde edildiği bildirilmiştir. Doğrudan atamaya göre %4 ila %9 arasında daha düşük emisyon değerlerine imkân verse de hesaplama maliyeti daha yüksek bulunmuştur. Yeniden kullanımın daha yüksek kütle ve daha düşük kapasite kullanımlarına neden olsa da sera gazı emisyonlarını %35'e kadar azaltabildiği ifade edilmiştir.



Şekil 14. Brütting ve diğ. (2020) tarafından optimize edilen üç boyutlu çerçeve sistem

Bukauskas (2020) tarafından yapılan çalışmada EKYO için bir yöntem geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda öncelikle tasarımcıların kolaylıkla kullanabileceği bir analitik yöntem oluşturularak tasarım uzayı hakkında öngörü sağlanabilmesi hedeflenmiştir. Yapısal optimizasyonda esas alınan amaç fonksiyonu genellikle ağırlık veya ağırlığın fonksiyonları iken EKYO için bunun yeterli olmadığı ifade edilerek enerji maliyetleri, kesim kayıpları gibi kriterleri de içeren yeni bir amaç işlevi önerilmiştir. Nihai hedef olarak önerilen yöntemle, yeniden kullanılan ahşap ve çelik elemanlar ile iki ayrı kafes sistemin optimizasyonu yapılmıştır. Klasik yapısal optimizasyon yönteminin küçük değişiklikler ile EKYO için uygulanabilir olup olmadığı tartışılmış ve kesim atıkları ile çevresel etkileri içeremediği için EKYO'nun yeni yaklaşımlara gereksinim duyulduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada daha önce Bukauskas ve diğ. (2018) tarafından sunulan kesim atığı oranına dayalı amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Atama probleminin çözümü için Bukauskas ve diğ. (2017) tarafından sunulan yöntem temel alınarak bazı kısıtlamalar eklenmiştir. Atama yöntemi yaşam döngüsü etkilerini en aza indirmek amacıyla çalışacak şekilde geliştirilip; eleman gerilmeleri, burkulmalar ve düğüm yer değiştirme kısıtlarını da esas alacak şekilde genişletilmiştir. Atama için daha önce kutulama probleminde başarı sağladığı literatürde ifade edilen Greedy Assigment Heuristic Algoritması tercih edilmiştir. Önerilen yöntem Brütting ve diğ. (2018a)

tarafından çözülen üç farklı kafes problemine uygulanarak iki yöntem arasında karşılaştırma yapılmıştır. Howe formundaki kafes sistem için iki yöntem karşılaştırıldığında bu çalışmada önerilen atama yöntemi ile bulunan sonuçların Brütting ve diğ. (2018a) tarafından bulunan sonuçlardan daha ağır olduğu buna karşın kesim atığı miktarının daha az olduğu ve %3 oranında daha düşük yerleşik enerji içerdiği bildirilmiştir. Warren formu kafes sistem için sonuçlar aynı bulunmuştur. Pratt formu için ise hem ağırlık daha az hem de çevresel etki daha düşük bulunmuştur. Daha iyi sonuçlar bulunmasının nedeni olarak algoritmanın daha geniş bir perspektifte kesimler yaparak bir stok elemanından birden fazla yapı elemanı üretilmesine izin vermesi gösterilmiştir. Sonuç olarak, yapısal tasarımda yaşam döngüsü etkilerinin azaltılmasına dair baskıların tasarımcıları EKYO'ya yönlendirebileceği, EKYO yönteminin geleneksel optimizasyon teknikleri ile başarılı şekilde çözümünün mümkün olmaması nedeni ile yeni yöntemlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğu bildirilmiştir. Ayrıca karşılaştırmalar neticesinde sunulan yöntemin daha başarılı bulunduğu vurgulanmıştır.

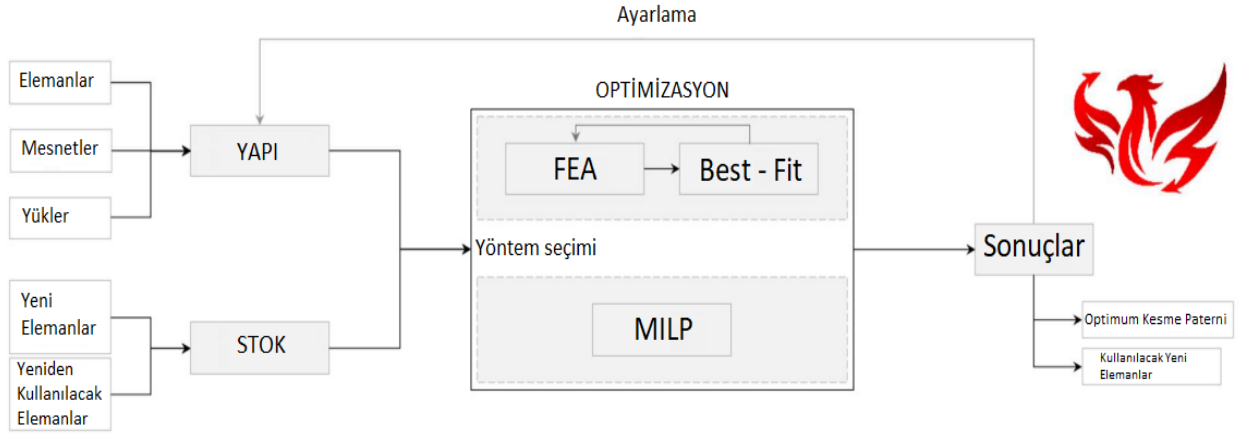
Warmuth, Brütting ve Fivet (2021) tarafından yapılan çalışmada envanter kısıtlı yapısal optimizasyon için "Phoenix3D" adında bir hesaplama aracı geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen aracın kullanıcı dostu bir arayüze sahip olduğu ve sonuçları görselleştirebildiği bildirilmiştir. İlgili hesaplama aracına ait akış şeması Şekil 15'te sunulmuştur. Araç Mixed-Integer Linear Programming (MILP) ve Best-Fit Heuristic (BFH) olmak üzere iki farklı optimizasyon metodunu içermektedir. Her iki yöntem için de en az çevresel etkiye sahip yapının tasarlanması amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir.

İki yöntemin kıyaslanması ve önerilen hesaplama aracının kabiliyetlerinin gösterilebilmesi amacıyla vaka çalışmaları yapılmıştır. Geliştirilen araçta yeni elemanlar ile yeniden kullanılan elemanların birlikte kullanılabilmesi bir senaryo da bulunmaktadır. Yeni elemanlar için istenilen uzunlukta ve sınırsız sayıda üretim yapılabileceği varsayılmıştır. Bir stok elemanı kesilerek yeni elemanlar türetilmesine müsaade edilmiştir. MILP ile optimizasyon daha önce Brütting ve diğ. (2019b) ve Brütting ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmalarda sunulduğu şekilde gerçekleştirilmiştir. BFH ile işletilen optimizasyonun ise topoloji ile ilgilenmediği vurgulanmıştır. Ayrıca BFH için sadece eleman kapasiteleri esas alındığı bildirilmiştir yani MILP'deki gibi deformasyon sınırları hesaba katılmamıştır. Amaç fonksiyonu olarak değerlendirilen çevresel etkiler daha önce Brütting ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada belirtildiği şekilde hesaplanmıştır. Vaka çalışması olarak üç farklı çatı sistemi üzerinde optimizasyon yapılmıştır. Bunlar statikçe belirli ve belirsiz iki boyutlu düzlem kafes ve



üç boyutlu uzay kafestir. Vaka çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre MILP ile elde edilen çözümlerin büyük çoğunluğunun daha düşük çevresel etkilere sahip olduğu bildirilmiştir. BFH ile elde edilen sonuçlar

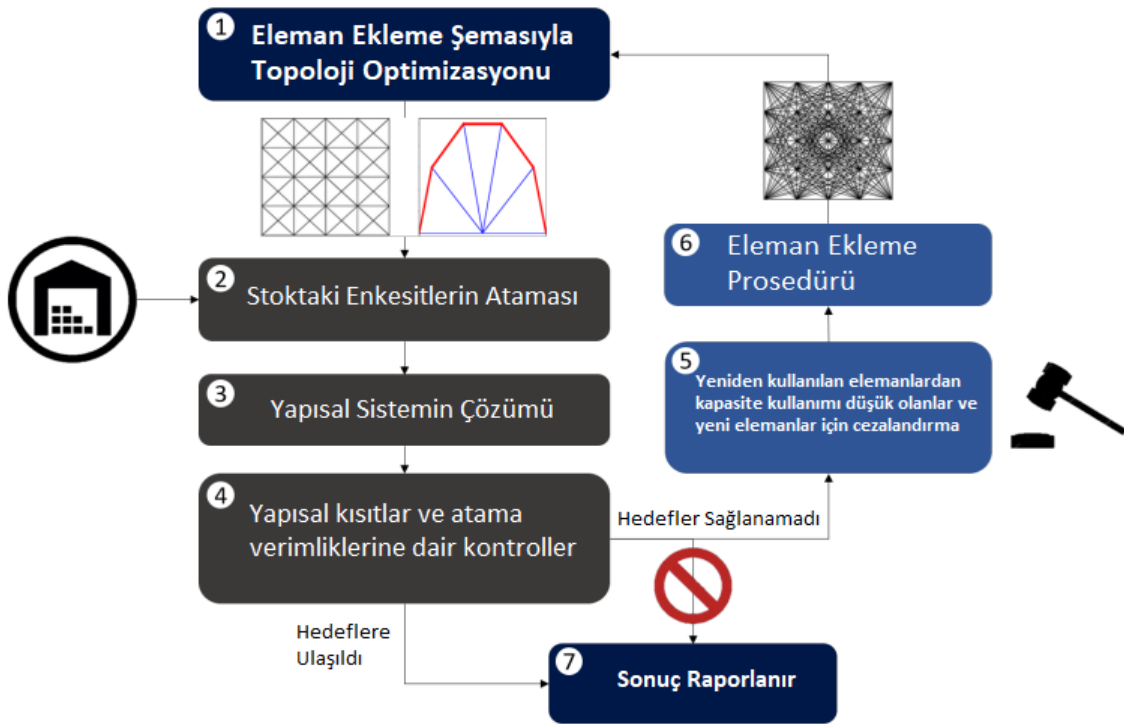
bir miktar daha yüksek çevresel etkiye sahip olsa da algoritmanın hesaplama maliyeti oldukça düşük bulunmuştur.



Şekil 15. Warmuth ve diğ. (2021) tarafından geliştirilen hesaplama aracının akış şeması

Van Gelderen (2021) tarafından yapılan çalışmada çelik kafesler için taşıyıcı elemanların yeniden kullanılmasını temel alan topoloji optimizasyonu yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntem eleman ekleme şemasına dayanmaktadır. Yapı hacminin en aza indirilerek yeniden kullanılan eleman miktarının maksimize edilmesi amaç olarak belirlenmiştir. Önerilen yöntemde topoloji optimize edildikten sonra yeniden kullanılacak elemanların maksimum verimle üyelere atanması hedeflenmektedir. Yeniden kullanılan elemanların kapasite kullanımları ile atama yapılan üyenin kapasite talepleri dikkate alınarak ilgili

atamalar gerçekleştirilmiştir. Stokta bulunmayan elemanların yerine yeni elemanlar atanmaktadır. Sonraki adımda yeniden kullanılan elemanlardan verimsiz olanlar ve yeni elemanlar cezalandırılır. Bu sayede yeni eleman kullanımı minimize edilirken yeniden kullanılan elemanların da verimli bir şekilde atanması hedeflenir. Cezalar her iterasyonda yenilenecek algoritmanın daha başarılı sonuçlar bulması beklenir. Son adımda herhangi bir yapısal kısıt ihlali olup olmadığı kontrol edilerek sonuç raporlanır. Önerilen optimizasyon prosedürü Şekil 16'da sunulmuştur.



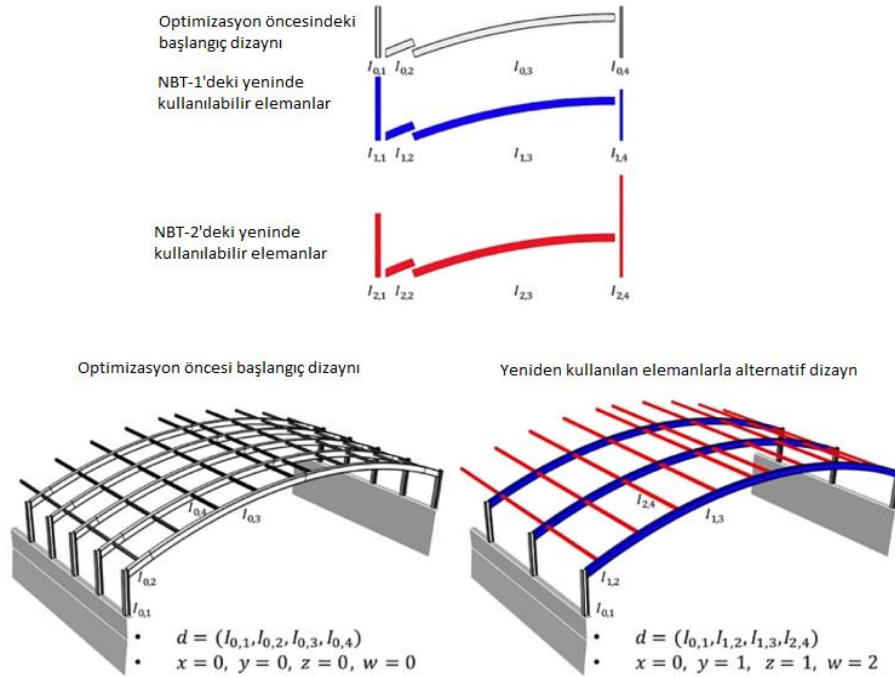
Şekil 16. Van Gelderen (2021) tarafından sunulan optimizasyon prosedürü

Atama yöntemi Brütting ve diğ. (2019b) tarafından sunulan yöntemin geliştirilmiş halidir. Temel farklılık eleman verimine ve yeni eleman kullanılmasına dayanan cezalandırma yöntemidir. Bu bağlamda enkesit cezası ve yeni eleman kullanma cezası olarak iki adet ceza tanımlanmıştır. Cezalar için çeşitli eşik değerler belirlenmiştir. Bu eşik parametrelerinin uygunluğuna göre bulunan çözümün verimliliği büyük oranda değişmektedir. Maksimum verimi hedefleyecek parametreler girilerek sürece başlanması, çözüm bulunamadığı takdirde parametrelerin kademeli olarak azaltılması tavsiye edilmiştir. Önerilen cezaya dayalı atama yöntemi ile Brütting ve diğ. (2019b) tarafından yapılan çalışmada verilen atama yöntemi karşılaştırılarak cezaya dayalı yöntemin toplam yapısal eleman hacmini azalttığı ve yeniden kullanım oranını arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Yirmi iki metre açıklıklı bir kafes sistem beş farklı tasarım ve yedi farklı kısıt durumu için optimize edilerek kafesin tamamen yeni elemanlar ile tasarlanması durumu ile karşılaştırılmıştır. Çeşitli parametre ayarlamaları ile %76-97 aralığında yeniden kullanım oranlarına ulaşılmıştır. Kesitlerin ortalama kapasite kullanımları ise 0.73-0.81 aralığındadır. Tamamen yeni elemanlar ile yapılan kafes ile karşılaştırıldığında, yeniden kullanılan elemanlar ile yapılan sistemin toplam taşıyıcı sistem hacminin daha yüksek olduğu, eleman sayısının daha fazla olduğu ve elemanlar için kapasite kullanımlarının daha düşük olduğu ifade edilmiştir.

Sunulan yöntemin etkinliğini göstermek için bir de gerçek hayat vaka çalışması yapılmıştır. Gerçek bir binadan geri kazanılmış çelik elemanlar ile Ahoy stadyumunun çatısı optimize edilmiştir. Farklı parametre ayarlamaları ile %87 ila %100 arasında yeniden kullanım oranları elde edilmiştir. Vaka çalışmasının sonucunda mevcut yapıya kıyasla büyük bir hacim azalışı sağlansa da bunun gerçekçi olmadığı vurgulanmıştır. Rüzgâr yükleri, malzeme faktörleri, burkulma, düğüm kararsızlığı ve öz ağırlığın ihmal edildiği; yalnızca eleman gerilmelerinin esas alındığı ifade edilmiştir. Çalışmada ayrıca yeniden kullanım ile tasarım yönteminin çıktılarının büyük oranda stok durumuna bağlı olduğu vurgulanmıştır. Yeniden kullanılacak binaların eleman dokümantasyonunun yapılması, yeniden kullanımın daha erişilebilir hale getirilmesi, mevcut binalardan daha kolay veri toplanabilmesinin ilgili yöntemin uygulanabilirliğini arttıracığı ifade edilmiştir.

Kim ve Kim (2021) tarafından yapılan çalışmada gürültü bariyeri tünelleri için CO2 emisyonu ve maliyet minimizasyonuna dayalı yeniden kullanım esaslı bir optimizasyon prosedürü önerilmiştir. Önerilen yöntemde gürültü bariyerlerinin BIM (Building Information Modeling) modelinden yeniden kullanılabilir çelik kirişler ile ilgili bilgiler elde edilip stok elemanlarının özelliklerini içeren stok listeleri oluşturulmaktadır. Yani mevcut gürültü bariyeri tünellerinin elemanları ile yeni gürültü bariyeri tünellerinin oluşturulması ve optimizasyonu hedeflenmektedir. İlgili işlem Şekil 17'de gösterilmiştir.



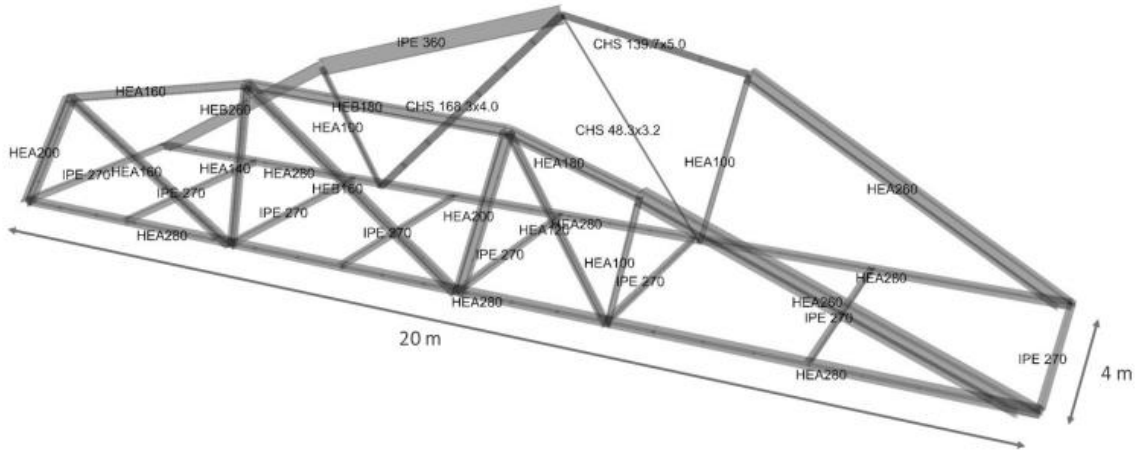
Şekil 17. Kim ve Kim (2021) tarafından optimize edilen gürültü bariyeri tünelleri

Optimizasyon çok amaçlı bir genetik algoritma ile yapılmıştır. İlk amaç fonksiyonu CO2 emisyonlarını minimize ederken ikinci amaç fonksiyonu maliyet minimizasyonu yapmaktadır. CO2 emisyonları için Korea Environmental Industry & Technology Institute (KEITI) tarafından sağlanan veriler, maliyetler için ise gürültü bariyeri tüneli inşa eden bir firmanın verileri kullanılmıştır. Çalışmanın çevresel etkiler ile birlikte maliyetleri de esas alması bakımından önemli bir özgün değer içerdiği vurgulanmıştır.

Önerilen yöntemin etkinliğini göstermek için bir dizi vaka çalışması yapılmıştır. Çalışmada üç farklı stok durumu tanımlanmıştır. Bunlardan birisi yeni üretilen elemanları içerir. Diğer ikisi ise önceki gürültü bariyeri tünellerinden elde edilen elemanların BIM modellerinden oluşturulmuştur. İki adet vaka senaryosu bulunmaktadır. İlk senaryoda kazanılan elemanların ömrünün oluşturulacak sistemin ömründen uzun olduğu kabul edilmiştir. İkinci senaryoda ise yeniden kullanılan elemanların ömrünün oluşturulan sistemin beklenen ömründen düşük olduğu varsayılmış ve zaman içerisinde elemanlara bakım-değişim yapılması gereksinimi modellenmiştir. Tanıtılan yöntemle yapılan vaka çalışmalarında duruma bağlı olarak CO<sub>2</sub> emisyonlarını %1 ila %92 düşerken maliyetlerde de %25'e kadar azalma gözlenmiştir. Çevresel etkiler azaltılırken maliyetin de azalması çalışmanın önemli çıktılarında birisidir.

Van Lookeren Campagne (2022) tarafından yapılan çalışmada tasarım sürecinin stok elemanları ile tersine çevrilererek mevcut olan elemanlar doğrultusunda, yeni

elemanlara ihtiyaç duyulmaksızın ve aşırı boyutlandırma olmaksızın optimum makaslı köprü tasarımı yapılmasının amaçlandığı belirtilmiştir. Giriş verisi olarak köprünün uzunluğu, genişliği ve yeniden kullanılabilir çelik elemanların stok miktarının tanıtılması gerekmektedir. Önerilen stok kısıtlı büyüme yönteminin Eurocode'a uygun gerekli hesaplamaları, tasarım kısıtlarını ve optimizasyon adımlarını içerdiği belirtilmiştir. Optimizasyon için algoritmik bir tasarım ortamı olan Grasshopper tercih edildiği ve Python kodları ile yönetildiği, hesaplamalar için sonlu elemanlar çözücüsü olan Karamba yazılımının da koda entegre edildiği belirtilmiştir. Çalışmada başarımları değerlendirmek için dört farklı Warren kafes modeli kıyaslanmıştır. Bunlar; standart bir kafes sistem, kesitleri optimize edilmiş kafes sistem, yeniden kullanılan elemanların yalnızca talep edilen forma uygun olarak yerleştirildiği kafes sistem ve çalışmada önerilen stok kısıtlı büyüme yönteminin tatbik edildiği, elemanların kesim gibi işlemlerden geçirilmeden talep edilen elemandan daha büyük şekilde atanabildiği kafes sistemdir. Yapılan teorik uygulama sonucunda; önerilen yöntemin yeni çelik elemanlar gerekmeksizin, minimum atıkla ve eleman kapasite kullanımını maksimize eden çözümler sunduğu raporlanmıştır. Yeni elemanlar ile yapılmış sistemle kıyaslandığında önerilen yöntemin %16 daha fazla kütleyle sahip çözüm ürettiği ancak %63 daha az gömülü karbon salınımı elde ettiği belirtilmiştir. Çalışmada sunulan örnek bir köprü tasarımı Şekil 18'de gösterilmiştir.



Şekil 18. Van Lookeren Campagne (2022) tarafından EKYO uygulanan örnek bir köprü tasarımı

Sohani, Nourzad ve Saghatforoush (2023) tarafından yapılan çalışmada çok katmanlı bir EKYO prosedürü önerilmiştir. Yeniden kullanımı maksimize etmek için yapısal elemanlarla birlikte kaplama ve bölme elemanlarının da optimizasyonu hedeflenmiştir. Önerilen yaklaşımda ilk katmanda sırasıyla kiriş ve kolonlar üzerinde EKYO yaklaşımı uygulanmaktadır. Ardından ikinci katmanda dış duvar tipi, kaplama elemanlar ve çatı için yeniden kullanım odaklı

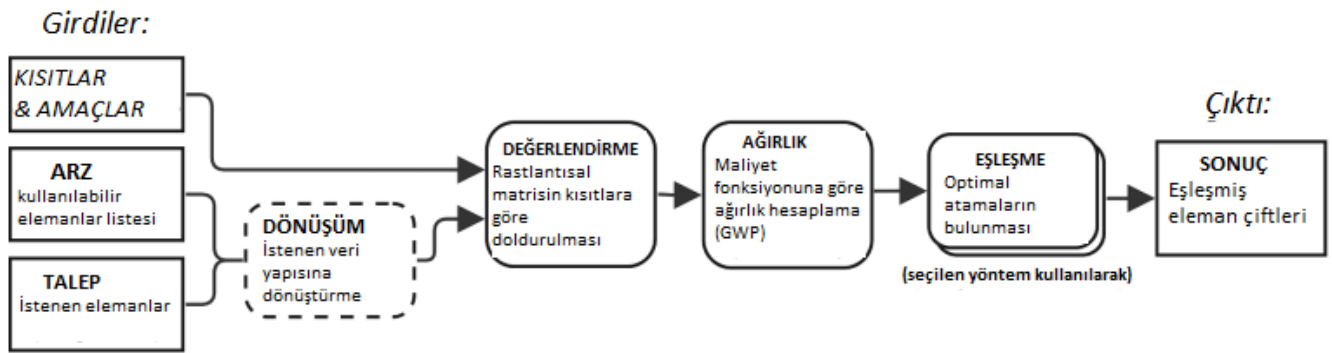
optimizasyon uygulanmıştır. Optimizasyon için MATLAB programı üzerinden Genetik Algoritma kullanıldığı belirtilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak geri kazanılmış elemanların tahsis oranı kullanılmıştır. Tasarım değişkenleri ise ihtiyaç duyulan bileşenler olarak belirlenmiştir. Taşıyıcı sistemin cephe kaplamaları ile uyumlu olarak atanabilmesi için bir dizi kısıt tanımlandığı belirtilmiştir. Oluşturulan optimizasyon sürecinde en uygun tasarımın stoktaki

elemanları en çok kullanan tasarım olarak belirlendiği bildirilmiştir. Çalışmada bir adet hipotetik yapı oluşturularak ilgili yapının elemanları kullanılarak inşa edilebilecek üç farklı plan üzerinde EKYO uygulaması yapılmıştır. Çalışma, yapısal olmayan elemanların da dahil edilmesi ile EKYO konseptini genişletmesi bakımından öncü olarak değerlendirilebilir olsa da amaç fonksiyonu olarak sadece yeniden kullanım oranını esas alındığı ve çevresel etki değerlendirme, karbon salınımı gibi kabul görmüş amaç işlevleri ile genişletilebileceği belirtilmiştir. Ayrıca çalışmadaki hâkim bakış açısının mimari odaklı olduğu, yapısal sistemin verimliliğinin artırılması amacıyla yapı mühendisliği açısından sunulan çerçevenin gelişime açık olduğu bildirilmiştir.

Tomczac, Haakonsen ve Łuczowski (2023) tarafından yapılan çalışmada EKYO prosedürlerinin öne çıkan zorluklarından birisi olan stok elemanı ile atanacak elemanın eşleştirilmesi probleminin çözümü için çeşitli algoritmalar önerilmiştir. Kullanıcı tanımlı kısıtlar ve optimizasyon kriterlerini göz önünde bulunduran, istenen elemanlar için stok elemanlarını en uygun şekilde atamayı amaçlayan bir araç oluşturulduğu belirtilmiştir. Önerilen aracın stok elemanları ile tasarım yapmadığı, yapılmış bir tasarım ve sabit bir topoloji üzerine optimum atamaları gerçekleştirmek üzere çalıştığı ifade edilmiştir. Aracın giriş verilerinin; talep edilen tasarım, stok listesi, kısıtlama listesi ve amaç işlevinden oluştuğu bildirilmiştir. Optimizasyon süreci için ağgözlü algoritma, maksimum iki parçalı grafik yöntemi (Maximum Bipartite Graph Method -

MaxBM) ve karma tamsayı programlama (Mixed Integer Programming - MIP) olmak üzere üç farklı metodolojinin Python ortamında kullanıldığı belirtilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak küresel ısınma potansiyeli (GWP) değerlendirilerek minimizasyon işlemi yürütülmüştür. Kısıt olarak ise elemanların alanı, uzunluğu ve atalet momenti seçilmiş olup tasarımda talep edilenden küçük olamayacağı belirtilmiştir. Problem ağgözlü algoritma için stok elemanlarının parçalara ayrılarak birden fazla elemana atanabileceği şekilde, diğer algoritmalar için ise her elemanın bir elemana atanacağı şekilde kurgulanmıştır. Önerilen algoritmaların başarımını değerlendirmek amacıyla basit bir varsayımsal stok ve talep listesi üzerinde ve gerçek hayat koşullarına yakın bir ahşap çatı makası üzerinde atamalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlerin ardından en başarılı sonuçların MIP ile bulunduğu ancak hesaplama maliyetinin yüksek olduğu, tatbik edilmesi en kolay yöntemin ise ağgözlü algoritma olduğu raporlanmıştır. Diğer EKYO araştırmalarında bulunduğu gibi; algoritmaların verdiği optimal çözümlerdeki kesitlerin olması gerektiğinden büyük elemanlardan oluştuğu ve bunun daha az verimli bir çözüm sunduğu ancak çevresel etkiler bakımından önemli ölçüde daha düşük sonuçlar elde edildiği vurgulanmıştır. Sunulan yöntemin akış şeması Şekil 19'da gösterilmiştir.

İncelenen çalışmaların amacı, tatbik edilen yapı türü, optimizasyon metodolojisi, seçilen amaç fonksiyonu ve kullanılan kısıtlar Tablo 2'de özetlenmiştir.



Şekil 19. Tomczac ve diğ. (2021) tarafından sunulan atama yönteminin akış şeması

Tablo 2. İncelenen EKYO çalışmaları

Yazar-Yıl	Amaç	Yapı Türü	Optimizasyon	Amaç Fonksiyonu	Kısıtlar
<i>Fujitani ve Fuji (2000)</i>	Çerçeve sistemler için EKYO prosedürü sunmak	İki katlı iki açıklıklı düzlem çerçeve	Genetik Algoritma	Ağırlık minimizasyonu	Gerilme Birim şekil değiştirme
<i>Bukauskas ve diğ. (2017)</i>	EKYO için atama problemi çözümü sunmak	Düzlem kafesler	Ön Sıralamalı First-Fit Algoritması	Kesim kaybı minimizasyonu	Eleman kapasiteleri Atamaya dair kısıtlar
<i>Brütting ve diğ. (2018a)</i>	Kafes sistemlerde EKYO için optimizasyon yöntemi sunmak	Howe Kafes Warren Kafes Pratt Kafes 41 aday elemanlı 2 açıklıklı köprü kafesi	MILP (Mixed Integer Linear Programming) NLP (Non-Linear Programming)	Ağırlık minimizasyonu Yerleşik enerji minimizasyonu Kesim atığı minimizasyonu	Eleman kapasiteleri Burkulma Düğüm yer değiştirmeleri Atamaya dair kısıtlar
<i>Bukauskas ve diğ. (2018)</i>	EKYO için teorik zorlukları ele almak. Kesim atığına dayalı yeni bir amaç fonksiyonu sunmak.	Düzlem kafesler	Polynomial-Time Heuristics	Kesim oranı minimizasyonu	Eleman kapasiteleri Atamaya dair kısıtlar
<i>Brütting ve diğ. (2018b)</i>	EKYO yöntemiyle kafes yapılar için gerçek hayat problemleri ile birlikte optimizasyon sunmak	10 elemanlı konsol kafes Tren İstasyonu Çatısı	MILP NLP	Ağırlık minimizasyonu Yerleşik enerji minimizasyonu Kesim atığı minimizasyonu	Eleman kapasiteleri Burkulma Düğüm yer değiştirmeleri Atamaya dair kısıtlar
<i>Brütting ve diğ. (2019b)</i>	Kafes yapıların EKYO yöntemi için tasarım prosedürü sunmak.	10 elemanlı konsol kafes Tren İstasyonu Çatısı	MILP NLP	Ağırlık minimizasyonu Yerleşik enerji minimizasyonu Kesim atığı minimizasyonu	Eleman kapasiteleri Burkulma Düğüm yer değiştirmeleri Atamaya dair kısıtlar
<i>Brütting ve diğ. (2019c)</i>	Kafes tipi yapılar için yeniden kullanılmak üzere optimum kit eleman grupları tasarlamak	41 aday elemanlı 20 metre açıklıklı düzlem kafes 200 elemanlı 3B Kafes	MILP	Çevresel etki minimizasyonu Ağırlık Minimizasyonu Eleman Sayısı Minimizasyonu	Gerilme Yer değiştirme Burkulma Kuvvet dengesi Geometrik uyumluluk
<i>Brütting ve diğ. (2020)</i>	Çerçeve sistemler için EKYO yöntemi ile tasarım prosedürü geliştirmek	3 kat 3 açıklıklı çerçeve 2 Katlı ofis binası (Gerçek hayat problemi)	MILP	Sera gazı emisyonlarının minimizasyonu	Yer değiştirme Gerilme Birim şekil değiştirme Düğüm yer değiştirmeleri Uç kuvvetler-dış yük dengesi
<i>Bukauskas (2020)</i>	Tasarım uzayını karakterize etmek için analitik yöntem geliştirmek Kafes sistemlerin EKYO ile optimizasyonu	Howe Kafes Warren Kafes Pratt Kafes	Greedy Heuristic Method	Kesim oranı minimizasyonu Ağırlık minimizasyonu Yerleşik enerji minimizasyonu	Eleman gerilmeleri Burkulmalar Düğüm yer değiştirmeleri Atama kısıtları
<i>Warmuth ve diğ. (2021)</i>	EKYO için bir hesaplama aracı geliştirmek	İzostatik kafes Hiperstatik kafes 250 elemanlı uzay çatı	MILP Best-Fit Heuristic	Çevresel etki minimizasyonu	Gerilme Burkulma
<i>Van Gelderen (2021)</i>	EKYO için cezaya dayalı atama sistemi ile kafes topoloji optimizasyonu	22m açıklıklı düzlem kafes Ahoy Stadyumu çatı sistemi	Lineer Programlama	Yapısal eleman hacmi minimizasyonu	Eleman gerilmeleri <b>Ekstra cezalar:</b> Verim cezası Yeni eleman kullanma cezası
<i>Kim ve Kim (2021)</i>	Gürültü bariyeri tünellerinin giriş sistemleri için EKYO yönteminin uygulanması	Gürültü bariyeri tüneli	Genetik Algoritma	CO <sub>2</sub> emisyonu minimizasyonu Maliyet minimizasyonu	Atama kısıtları
<i>Van Lookeren Campagne (2022)</i>	Makaslı köprü tasarımı için EKYO prosedürü önerilmesi	Makaslı köprü	Grasshopper	Gömülü karbon salınımı minimizasyonu	Geometrik kısıtlar Tasarım yönetmeliği kısıtları
<i>Sohani ve diğ. (2023)</i>	Yapısal olmayan elemanların da EKYO prosedürüne entegrasyonu	Tek katlı hipotetik bina	Genetik Algoritma	Yeniden kullanım oranı maksimizasyonu	Yapısal elemanlar ile yapısal olmayan elemanların uyumuna ilişkin kısıtlar
<i>Tomczak ve diğ. (2023)</i>	EKYO için atama problemi çözümü sunmak	Basit bir atama problemi ve gerçek hayatı yakınsayan bir ahşap çatı makası	Açgözlü algoritma MaxBM MIP	Küresel ısınma potansiyeli minimizasyonu	Uzunluk Alan Atalet Momenti

## 6. Tartışma ve Sonuçlar

Bu literatür incelemesinde son yıllarda yapısal optimizasyon disiplininin bir alt kolu olarak ortaya çıkan envanter kısıtlı yapısal optimizasyon (EKYO) çalışmalarının incelenmesi amaçlanmıştır. Envanter kısıtlı yapısal optimizasyon konusunun bağlamı gereği; öncelikle yapısal elemanlarının yeniden kullanımı, inşaat sektörünün çevresel etkileri ve döngüsel ekonomi, yapısal elemanların yeniden kullanımının

önündeki engeller ve çözümler, literatürde sunulan uygulama incelemeleri ve vaka çalışmaları özetlenmiştir. Ardından envanter kısıtlı yapısal optimizasyona dair literatürde bulunan çalışmaların geniş incelemeleri aktarılmıştır. Bu çalışma neticesinde ulaşılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- İnşaat ve yıkım sektörü atık oluşumu, yerleşik enerji kullanımı, sera gazı emisyonu gibi çevresel etkiler bakımından en büyük paydaşlardan

birisidir. Karar verici pozisyonundaki kurumlar ve bilim dünyası tarafından ilgili olumsuz etkilerin azaltılması hususunda azımsanamayacak sayıda eylem planı, yöntem ve uygulama sunulmuştur. Yapı elemanlarının yeniden kullanımı konusu da gündemde olan döngüsel ekonomi stratejilerinden birisidir. Artan çevresel kaygılar ile birlikte yapı elemanlarının yeniden kullanımına ilişkin baskıların da artacağı ve uygulamaların yaygınlaşacağı anlaşılmaktadır.

- Taramalar neticesinde elde edilen çalışmaların yıllara göre dağılımları incelendiğinde, ulaşılan ilk çalışmanın ardından takip eden on yedi sene boyunca herhangi bir çalışmaya rastlanmadığı görülmektedir. 2017 yılından sonra EKYO alanına olan ilginin arttığı, önce konferans bildirileri takip eden yıllarda ise tezler ve makaleler sunulduğu anlaşılmaktadır. Bu durumun artan çevresel kaygılar ve sektör üzerindeki baskılar ile AB eylem planlarındaki kararlardan kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Yapı elemanlarının yeniden kullanımının, geri dönüşüm gibi stratejilere göre daha düşük çevresel etkilere sebep olduğu konusunda görüş birliği olduğu anlaşılmıştır. Buna karşın yapı elemanlarının yeniden kullanımına dair; Bölüm 3'te sunulan maliyet, bulunabilirlik, yasal boşluklar gibi engeller bulunduğu bilinmektedir. İlgili engellerin aşılması için yapılmış çeşitli çalışmalar olsa da yapı elemanlarının yeniden kullanımının yaygınlaşması için daha fazla çalışmaya ve yasal düzenlemelere ihtiyaç olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- EKYO yöntemlerinin teorik problemlerden gerçek hayat problemlerine kadar çeşitli yapısal sistemlere uygulandığı görülmüştür. Optimizasyon sonuçları irdelendiğinde, EKYO'nun stok elemanlarının yüksek verimlilikle yeniden kullanımı ve çevresel etkilerin en aza indirilmesi gibi hedefleri gerçekleştirerek yapısal elemanların yeniden kullanımı ile beklenen faydayı maksimize ettiği, buradan hareketle de kullanılabilir ve pratik bir yaklaşım olduğu anlaşılmaktadır.
- Yapısal optimizasyon metodolojisinde yaygın şekilde amaç fonksiyonu olarak tercih edilen ağırlık veya maliyet minimizasyonunun, EKYO süreçlerinin performansını tam olarak değerlendiremediği anlaşılmaktadır. EKYO için yerleşik enerjiye, sera gazı emisyonlarına ve kesim kayıplarına dayalı çeşitli amaç fonksiyonları önerildiği gözlemlenmiştir. Literatürdeki az sayıda çalışmadan görüldüğü kadarıyla, üzerinde mutabakata varılan herhangi bir amaç işlevinin bulunmadığı anlaşılmaktadır.

- EKYO için tercih edilen optimizasyon yöntemlerinin yapısal optimizasyon literatürünün oldukça gerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Öyle ki kutulama problemlerine özgü First-Fit, Best-Fit gibi çeşitli sezgisel yöntemler ve doğrusal ya da doğrusal olmayan programlama gibi görece eski tekniklerin tercih edildiği, metasezgisel algoritmalar ise yalnızca görece eski bir yöntem olan genetik algoritmanın kullanıldığı görülmüştür. Yapısal optimizasyon literatüründe başarısını ispatlamış modern optimizasyon yöntemlerinin EKYO için uygulanması ile başarımın artabileceği düşünülmektedir.
- Taramalar neticesinde ulaşılan çalışmaların önemli bir kısmının birkaç araştırma grubu tarafından yapıldığı görülmüştür. Bu konuda daha çok araştırmacının çalışma yapmasıyla EKYO'nun mühendislik pratiğine dönüşüm sürecinin hızlanacağı düşünülmektedir.

### Teşekkür

Bu makalenin birinci yazarı YÖK 100/2000 Doktora Projesi kapsamında, Yapay Zekâ tematik alanında doktora bursuyla desteklenmektedir.

### Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Yazar1, Literatür araştırması, makalenin yazımı, düzeltmelerin yapılması ve yayına hazırlık konularında; Yazar2 ve Yazar3, Araştırma sürecinin takibi, yönlendirilmesi, kontrolü ve sonuçların değerlendirilmesi, inceleme ve düzeltme konularında katkı sağlamışlardır.

### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### Kaynaklar

- Academia. Erişim adresi: [www.academia.edu](http://www.academia.edu). Erişim tarihi: 02.12.2023
- Addis, B. (2006). *Building with reclaimed components and materials: A design handbook for reuse and recycling*. London, UK: Routledge.
- Akbarieh, A., Jayasinghe, L. B., Waldmann, D. & Teferle, F. N. (2020). BIM-based end-of-lifecycle decision making and digital deconstruction: Literature review. *Sustainability*, 12(7), 2670. doi: <https://doi.org/10.3390/su12072670>
- Akinade, O.O., Oyedele, L.O., Ajayi, S.O., Bilal, M., Alaka, H.A., Owolabi, H.A., Bello, S.A., Jaiyeoba, B.E. & Kadiri, K.O. (2017). Design for Deconstruction (Dfd): Critical success factors for diverting end-of-

- life waste from landfills. *Waste Management*, 60, 3-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.017>
- Allwood, J.M. & Cullen, J.M. (2012). *Sustainable materials: with both eyes open*. Cambridge, UK: UIT Cambridge.
- Balbas, L. T. (1965). *La mezquita de Córdoba y las ruinas de Madinat Al-Zahra*. Madrid, Spain: Editorial Plus-Ultra.
- Brütting J., Senatore G., Fivet, C. (2018a). *Advanced Computing Strategies for Engineering: Optimization formulations for the design of low embodied energy structures made from reused elements.*, Eds: Smith, I., Domer, B., Cham, Switzerland: Springer.
- Brütting, J., De Wolf, C. & Fivet, C. (2019a). The reuse of load-bearing components. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 225, 012025. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012025>
- Brütting, J., Desruelle, J., Senatore, G. & Fivet, C. (2019b). Design of truss structures through reuse. *Structures*, 18, 128-137. doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.11.006>
- Brütting, J., Desruelle, J., Senatore, G., & Fivet, C. (2018b, July). *Optimum truss design with reused stock elements*. In Proceedings of IASS Annual Symposia, 1-8, Boston, USA.
- Brütting, J., Senatore, G. & Fivet, C. (2019c). Form follows availability-Designing structures through reuse. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 60(4), 257-265. doi: <https://doi.org/10.20898/j.iass.2019.202.033>
- Brütting, J., Senatore, G., Schevenels, M. & Fivet, C., (2020). Optimum design of frame structures from a stock of reclaimed elements. *Frontiers in Built Environment*, 6(57). doi: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00057>
- Bukauskas, A. (2020). *Inventory-constrained structural design* (PhD Thesis). University of Bath, Bath, UK.
- Bukauskas, A., Shepherd, P., Walker, P., Sharma, B., & Bregulla, J. (2017, September). *Form-Fitting strategies for diversity-tolerant design*. In Proceedings of IASS annual symposia, 1-10, Hamburg, Germany.
- Bukauskas, A., Shepherd, P., Walker, P., Sharma, B., & Bregulla, J. (2018, July). *Inventory-constrained structural design: new objectives and optimization techniques*. In Proceedings of IASS annual symposia, 1-8, Boston, USA.
- Condotta, M. & Zatta, E. (2021). Reuse of building elements in the architectural practice and the European regulatory context: Inconsistencies and possible improvements. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128413. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128413>
- Estrella Arcos, E. X., Muresan, A. M., Redealli, D., Brütting, J., Warmuth, J., & Fivet, C. (2023, June). *A Reuse-Ready Timber Slab-and-Column System for Modular Building Structures*. In World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023). Timber for a livable future (pp. 3588-3593), Oslo, Norway. <https://doi.org/10.52202/069179-0467>
- European Commission (2015). *Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy*. Brussels, Belgium: Eur-Lex.
- European Commission (2017). *Efficient use of mixed wastes – improving management of construction and demolition waste final report*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Eurostat (2022). Waste statistics online database. Erişim adresi: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics#Total\\_waste](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste), Erişim tarihi: 30.01.2022
- Fujita, M. & Masuda, T. (2014). Application of various NDT methods for the evaluation of building steel structures for reuse. *Materials*, 7(10), 7130-7144. doi: <https://doi.org/10.3390/ma7107130>
- Fujitani, Y., & Fujii, D. (2000, May). *Optimum structural design of steel plane frame under the limited stocks of members*. In Proceedings of the RILEM/CIB/ISO international symposium, integrated life-cycle design of materials and structures, 198-202, Helsinki, Finland.
- Google Scholar. Erişim adresi: <https://scholar.google.com>. Erişim tarihi: 02.12.2023
- Gorgolewski, M. (2008). Designing with reused building components: some challenges. *Build. Res. Inf.*, 36, 175-188. doi: <https://doi.org/10.1080/09613210701559499>
- Gorgolewski, M., Straka, V., Edmonds, J. & Sergio-Dzoutzidis, C. (2008). Designing buildings using reclaimed steel components. *Journal of Green Building*, 3(3), 97-107. doi: <https://doi.org/10.3992/jgb.3.3.97>
- Hradil, P., Talja, A., Wahlström, M., Huuhka, S., Lahdensivu, J. & Pikkuvirta, J. (2014). *Re-use of*

- structural elements environmentally efficient recovery of building components*. Espoo, Finland: VTT Technology 200.
- Iacovidou, E. & Purnell, P. (2016). Mining the physical infrastructure: opportunities, barriers and interventions in promoting structural component reuse. *Sci Total Environ*, 557–558, 791–807. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.098>
- Kanters, J. (2018). Design for deconstruction in the design process: State of the art. *Buildings*, 8(11), 150. doi: <https://doi.org/10.3390/buildings8110150>
- Kanyilmaz, A., Birhane, M., Fishwick, R., & del Castillo, C. (2023). Reuse of Steel in the Construction Industry: Challenges and Opportunities. *International Journal of Steel Structures*, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s13296-023-00778-4>
- Kim, S. & Kim, S.-A. (2021). Design optimization of noise barrier tunnels through component reuse: Minimization of costs and CO2 emissions using multi-objective genetic algorithm, *J. Clean. Prod.*, 298, 126697. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126697>
- Ness, D. & Swift, J., Ranasinghe, D. C., Xing, K., Soebarto, V. (2015). Smart steel: new paradigms for the reuse of steel enabled by digital tracking and modelling. *Journal of Cleaner Production*, 98, 292-303. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.055>
- Pongiglione, M. & Calderini, C. (2014). Material savings through structural steel reuse: A case study in Genoa. *Resources, Conservation and Recycling*, 86, 87-92. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.02.011>
- Researchgate. Erişim adresi: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net). Erişim tarihi: 02.12.2023
- Rios, F.C., Chong, W.K. & Grau, D. (2015). Design for disassembly and deconstruction—challenges and opportunities. *Procedia Eng.*, 118, 1296–1304. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.485>
- Ruan, C. (2020). *Imperfections on the stability of reused steel structures* (BS Thesis), Häme University of Applied Sciences, Hämeenlinna, Finland.
- Saka, M. P., Hasançebi, O. & Geem, Z. W. (2016). Metaheuristics in structural optimization and discussions on harmony search algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 28, 88–97. doi: <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2016.01.005>
- Salama, W. (2017). Design of concrete buildings for disassembly: An explorative review. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 617-635. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2017.03.005>
- Sandin Y., Carlsson A., Chúláin U.C. & Sandberg K. (2021). *Design for deconstruction and reuse: case study Villa Anneberg*. Borås, Sweden: RISE.
- ScienceDirect. Erişim adresi: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com). Erişim tarihi: 02.12.2023
- Sohani, H., Hosseini Nourzad, S. H., & Saghatforoush, E. (2023). The optimized form of building made from the reused elements. *Architectural Engineering and Design Management*, 1-23. <https://doi.org/10.1080/17452007.2023.2285344>
- Springer Link. Erişim adresi: [link.springer.com](http://link.springer.com). Erişim tarihi: 02.12.2023
- Stahel, W.R. (2013). Policy for material efficiency-sustainable taxation as a departure from the throwaway society. *Phil Trans R Soc A*, 371, 20110567. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/275/1/012022>
- Taylor Francis. Erişim adresi: [www.tandfonline.com](http://www.tandfonline.com). Erişim tarihi: 02.12.2023
- Tingley, D. D., Cooper, S. & Cullen, J. (2017). Understanding and overcoming the barriers to structural steel reuse, a UK perspective. *Journal of Cleaner Production*, 148, 642-652. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.006>
- Tomczak, A., Haakonsen, S. M., & Łuczowski, M. (2023). Matching algorithms to assist in designing with reclaimed building elements. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 3(3), 035005. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/acf341>
- Ünlütürk, Ş., Öztürk, P. H., Kardeş, S., Birdal, M., Saral, B., Aşıroğlu, B., Ergün, G. ve Yokuş, P. P. (2020). *İşletmeler için döngüsel ekonomi rehberi*. İstanbul: Hedefler İçin İş Dünyası Platformu – Dcube Döngüsel Ekonomi Kooperatifi.
- Van Gelderen, T. (2021). *Truss topology optimization with reused steel elements: An optimization tool for designing steel trusses with a set of reclaimed elements* (MSc Thesis), Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
- Van Lookeren Campagne, F. (2022). *Efficiently including reclaimed steel elements in a truss bridge design by performing a stock-constrained shape and topology optimization*, (MSc Thesis), Delft University of



Technology, Delf, Netherlands.  
<http://resolver.tudelft.nl/uuid:85cbf0eb-0a2f-4be8-aecc-84616a5f8643>

Vares, S., Hradil, P., Pulakka, S., Ungureanu, V., & Sansom, M. (2018, October). *Environmental-and life cycle cost impact of reused steel structures: A case study*. In Proceedings of the 6th International Symposium on Life Cycle Civil Engineering IALCCE, 28-31, Ghent, Belgium.

Vares, S., Hradil, P., Sansom, M. & Ungureanu, V. (2020). Economic potential and environmental impacts of reused steel structures, *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(4), 750-761. doi: <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1662064>

Walsh, S. J., & Shotton, E. (2022). *Design for deconstruction and reuse: An Irish suburban semi-detached dwelling*. Technical Report, School of Architecture, Planning & Environmental Policy, University College Dublin, April 1, 2022. <http://hdl.handle.net/10197/13111>

Warmuth, J., Brütting, J., & Fivet, C. (2021, August). *Computational tool for stock-constrained design of structures*. In Proceedings of the IASS Annual Symposium 2020/21 and the 7th International Conference on Spatial Structures, 1-9, Guilford, UK.

Web of Science. Erişim adresi: [www.webofscience.com](http://www.webofscience.com).  
Erişim tarihi: 02.12.2023

Yeung, J., Walbridge, S. & Haas, C. (2015). The role of geometric characterization in supporting structural steel reuse decisions. *Resources, conservation and recycling*, 104, 120-130. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.017>

Yeung, J., Walbridge, S., Haas, C. & Saari, R. (2007). Understanding the total life cycle cost implications of reusing structural steel. *Environment Systems and Decisions*, 37(1), 101-120. doi: <https://doi.org/10.1007/s10669-016-9621-6>