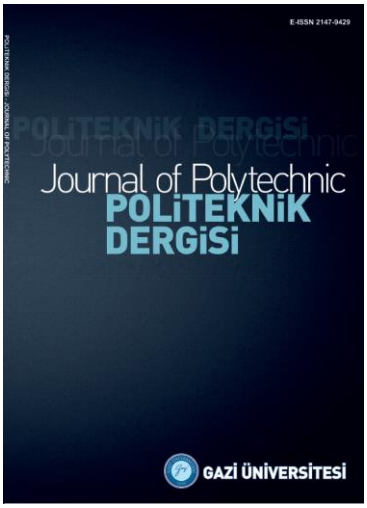


POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)
URL: http://dergipark.org.tr/politeknik

CLARIVATE ANALYTICS
EMERGING SOURCES CITATION INDEX
INDEXED

Kafes sistemlerin imalat kısıtları altında bilgisayar ile otomatik tasarımı

Computer-automated design of truss systems under manufacturing constraints

***Yazar(lar) (Author(s))**: Sedanur BALTA[1], Hakan ÖZBAŞARAN[2]*

ORCID[1]: 0000-0002-5909-9979

ORCID[2]: 0000-0003-1959-5297

ERKEN GÖRÜNÜM

To cite to this article: Balta S. ve Özbaşaran H., "Kafes sistemlerin imalat kısıtları altında bilgisayar ile otomatik tasarımı", ***Journal of Polytechnic***, *(*): *, (*).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Balta S. ve Özbaşaran H., "Kafes sistemlerin imalat kısıtları altında bilgisayar ile otomatik tasarımı", ***Politeknik Dergisi***, *(*): *, (*).

Erişim linki (To link to this article): http://dergipark.org.tr/politeknik/archive

DOI: 10.2339/politeknik.1243525

Kafes Sistemlerin İmalat Kısıtları Altında Bilgisayar ile Otomatik Tasarımı

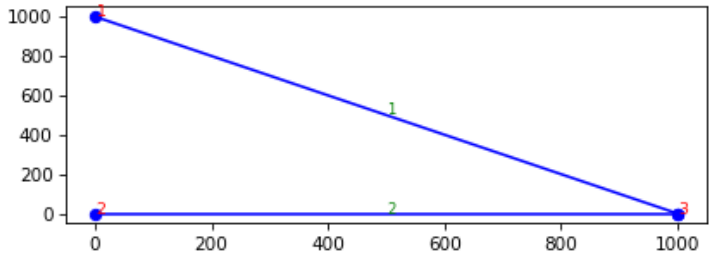
Computer-Automated Design of Truss Systems Under Manufacturing Constraints

Önemli noktalar (Highlights)

- *Kafes sistemlerin yapısal ve imalat kısıtları altında optimizasyonu / Optimization of truss systems under structural and manufacturing constraints*
- *Bilgisayar ile otomatik tasarımın hesaplama yükü / Computational load of computer-automated design*
- *Gerçek dünya problemlerinin çözümü / Solution of real-world problems*

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışma, kafes sistemlerin yapısal ve imalat kısıtları altında optimizasyonunun hesaplama yükünü ortaya koymaktadır. / This study presents the computational load of optimizing truss systems under structural and manufacturing constraints.



Şekil. 4 düğüm noktalı problem için bulunan en iyi tasarım **/ Figure.** Best design found for the 4-node problem

Amaç (Aim)

Kafes sistemlerin bilgisayar ile otomatik tasarımının hesaplama yükünün belirlenmesi. / To determine the computational load of the computer-automated design of truss systems.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Bir metasezgisel algoritma ve bir ceza yöntemi birleştirilerek kafes sistemlerin bilgisayar ile otomatik tasarımı gerçekleştirildi. / Computer-automated design of truss systems was performed by combining a metaheuristic algorithm and a penalty method.

Özgünlük (Originality)

Çok sayıda imalat kısıtının dikkate alındığı bir optimizasyon süreci tanıtıldı. / An optimization process is introduced that considers many manufacturing constraints.

Bulgular (Findings)

İzin verilen analiz sayısı oldukça yüksek olmasına rağmen, ardışık denemeler sonucu elde edilen çözümler arasındaki farklar kabul edilemez düzeydedir. / Although the allowed number of analyzes is considerably high, the differences between the solutions of successive attempts are unacceptable.

Sonuç (Conclusion)

Kafes sistemlerin yapısal ve imalat kısıtları altında bilgisayar ile otomatik tasarımı için günümüzdeki kişisel bilgisayarlar ile makul sürelerde yakın optimal çözümler elde edilemeyeceği sonucuna ulaşılmıştır. / It is concluded that the near-optimal solutions for the computer-automated design of truss systems under structural and manufacturing constraints cannot be obtained in reasonable times with today's personal computers.

Etik Standartların Beyanı (*Declaration of Ethical Standards*)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Kafes Sistemlerin İmalat Kısıtları Altında Bilgisayar ile Otomatik Tasarımı

Araştırma Makalesi / Research Article

Sedanur BALTA[1], Hakan ÖZBAŞARAN[1*]

[1]Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 27.01.2023 ; Kabul/Accepted : 29.08.2023 ; Erken Görünüm/Early View : 02.10.2023)

ÖZ

Bilgisayar ile otomatik tasarım, bir tasarımın bilgisayar tarafından ve insan müdahalesi olmadan gerçekleştirilmesidir. Eşzamanlı boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu konusunda yapılan çalışmalar, bilgisayar ile otomatik tasarımın, bilgisayar destekli tasarımın yerini almaya hazırlandığını göstermektedir. Eşzamanlı boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu konusunda sunulan çoğu çalışma, önerdiği optimizasyon yönteminin (veya yöntem iyileştirmesinin) performansını popüler test problemleri ile ölçmektedir. Bu test problemleri, kabul edilebilir sürelerde çözülebilmelerini mümkün kılmak amacıyla bir takım basitleştirmeler kullanılarak tasarlanmışlardır; ve bu sebeple gerçek dünya problemlerini temsil edememektedirler. Dahası, söz edilen problemlerin çoğunda sadece yapısal kısıtlar göz önünde bulundurulur ve imalat kısıtları ihmal edilir. Yapısal kısıtlar kullanılan malzeme (gerilme, şekil değiştirme vb.) ve taşıyıcı sistem davranışı (düğüm yer değiştirmesi, global burkulma vb.) ile ilgilidir. İmalat kısıtları ise sistemde kesişen elemanların bulunmaması ve bir düğüme çok sayıda elemanın bağlanmaması gibi sistemin imal edilmesini mümkün kılan kısıtlardır. Bu çalışmada düzlem kafes sistemlerin bilgisayar ile otomatik tasarımının gerçek hesaplama yükü tartışılmıştır. Burada "gerçek hesaplama yükü" ifadesi ile anlatılmak istenen, gerçek dünya problemlerinde olmayan basitleştirici kısıtların bulunmadığı ve yapısal kısıtların yanında imalat kısıtlarının da hesaba katıldığı tasarım problemlerine yakın-optimal çözümler aramak için harcanan işlem gücüdür. Kafes sistemlerin optimizasyonu için uygun olduğu daha önce yapılan çalışmalarla gösterilmiş parametresiz bir metasezgisel algoritma kullanılarak sayısal deneyler yapılmış ve sonuçlar tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Otomatik tasarım, kafes sistem, optimizasyon, metasezgisel, imalat kısıtları.

Computer-Automated Design of Truss Systems Under Manufacturing Constraints

ABSTRACT

Computer-Automated Design is the process of design by computer and without human intervention. Studies on simultaneous size, shape, and topology optimization show that computer-aided design is preparing to replace computer-aided design. Most studies presented on simultaneous size, shape, and topology optimization measure the performance of the proposed optimization method (or method improvement) with popular test problems. These test problems are designed using a number of simplifications to allow them to be solved in an acceptable time; and therefore they cannot represent real-world problems. Moreover, in most of the mentioned problems, only structural constraints are considered and manufacturing constraints are neglected. Structural constraints are related to the material used (stress, strain, etc.) and the behavior of the structural system (node displacement, global buckling, etc.). On the other hand, manufacturing constraints are the constraints that are related to manufacturing, such as the absence of intersecting elements in the system and not connecting many elements to a node. In this study, the real computational load of computer-automated design of planar truss systems is discussed. What is meant by the expression "real computational load" here is the computational effort spent searching for near-optimal solutions to design problems, where there are no simplifying constraints that are not found in real-world problems, and where manufacturing constraints are taken into account as well as structural constraints. Numerical experiments were performed using a parameterless metaheuristic algorithm, which has been proved by previous studies to be suitable for the optimization of truss systems, and the results are discussed.

Keywords: Automatic design, truss system, optimization, metaheuristic, manufacturing constraints.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yapı mühendisliğinde optimizasyonun amacı belirli kısıtları sağlayan tasarımlar içerisindeki en iyi (optimum) tasarıma ulaşabilmektir. Yapı mühendisliği problemleri tek bir olurlu çözümü olacak şekilde kısıtlandırılmamıştır; bu sebeple optimale yakın çözümlere ulaşabilmek için çok sayıda tasarım adayının değerlendirilmesine ihtiyaç vardır. Tatmin edici çözümlere ulaşabilmek için çoğunlukla binlerce tasarımın üretilip analiz edilmesi gerekmektedir. Tasarımcının bir yazılımın modelleme arayüzünü kullanarak taşıyıcı sistem adayları oluşturması ve bu adayların yazılım ile değerlendirilip kısıtları ne kadar ihlâl ettiğinin belirlenmesi şeklinde ilerleyen bir bilgisayar destekli tasarım süreci ile optimale yakın bir tasarımın keşfedilmesi imkânsıza çok yakındır. Bu sebeple bilgisayar destekli tasarımın yerini bilgisayar ile otomatik tasarıma bırakacağı öngörülmektedir.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ozbasaran@ogu.edu.tr

ERKEN GÖRÜNÜM

Bilgisayar ile otomatik tasarım, bir tasarımın bilgisayar tarafından insan müdahalesi olmadan gerçekleştirilmesidir.

Kafes sistemlerin yapısal kısıtlar altında optimizasyonu gerilme, yer değiştirme, burkulma, frekans, kinematik stabilite, global stabilite ve yerel stabilite gibi kısıtlar göz önünde bulundurularak gerçekleştirilebilir. Literatürde kafes sistemlerin yapısal kısıtlar altında boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu konusunda çok sayıda çalışma bulunmaktadır; Bu yazıda bu konunun ne kadar ilgi gördüğünden bahsedilmeyecektir. Diğer taraftan, imalat (yapım) kısıtları ile kafes sistem optimizasyonu konusunda ulaşılabilen çalışma sayısı dikkat çekici derecede azdır. Araştırmacıların kafes sistemlerin optimizasyonu hakkında yaptıkları çalışmalarda imalat kısıtı olarak çoğunlukla örtüşen [1], [2] ve kesişen [3] elemanlar dikkate alınmıştır. Yakın zamanda yapılmış bazı çalışmalarda ise örtüşen ve kesişen elemanların yanında düğüme bağlı eleman sayısı [4], yapı elemanı uzunluğu, düğüm sayısı ve elemanlar arası açı sınırları da [5] imalat kısıtı olarak göz önünde bulundurulmuştur.

Bu çalışmada kafes sistemlerin bilgisayar ile otomatik tasarımının hesaplama yükü araştırılmıştır. Burada "bilgisayar ile otomatik tasarım" ifadesinden anlaşılması gereken "kafes sistemlerin hiçbir basitleştirici kural kullanmadan, yapısal ve imalat kısıtları altında eşzamanlı boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu"dur. Konu ile ilgili çalışmalarda tanıtılan popüler ve basitleştirilmiş test problemlerini kullanmak yerine gerçek işlem yükünü tespit edebilmek için yazarlar tarafından üretilen problemler üzerinde çalışılmıştır. Çubuk gerilmeleri ve düğüm yer değiştirmeleri yapısal kısıtları ve kesit çeşidi sayısı, örtüşen elemanlar, kesişen elemanlar, bir düğüme bağlı eleman sayısı, yapı elemanı uzunluğu, düğüm sayısı ve elemanlar arasındaki açı imalat kısıtları dikkate alınarak problemler çözülmüş ve sonuçlar tartışılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Kafes sistemlerin yapısal kısıtlar altında optimizasyonu gerilme, yer değiştirme, burkulma, frekans, kinematik stabilite, global stabilite ve lokal stabilite gibi kısıtlar göz önünde bulundurularak gerçekleştirilebilir. Literatürde kafes sistemlerin yapısal kısıtlar altında boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu konusunda çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda kafes sistemlerin

ÖRÜNÜM

Çizelge 1. Son yıllardaki çalışmalarda dikkate alınan kısıtlar (Constraints considered in the recent studies)

	Gerilme	Yer Değiştirme	Burkulma	Frekans	Kinematik Stabilite	Global/Lokal Stabilite
[6] Savsani vd. (2016)	■	■	■	■	■	
[7] Mortazavi ve Toğan (2016)	■	■				
[8] Maheri vd. (2016)	■	■				
[9] Ahrari ve Deb (2016)	■	■	■			
[10] Madah ve Amir (2017)	■	■	■			
[11] Zhou vd. (2017)	■	■				
[12] Kaveh ve Zolghadr (2017)				■		
[13] Ohsaki ve Hayashi (2017)	■					
[14] Assimi vd. (2017)	■	■			■	
[15] Chen vd. (2017)	■	■				
[16] Mortazavi vd. (2017)	■	■	■			
[17] Savsani vd. (2017)	■	■	■	■	■	
[18] Mortazavi ve Toğan (2017)	■	■		■		■
[19] Kaveh ve Zolghadr (2018)				■		
[20] Panagant ve Bureerat (2018)	■	■	■			
[21] Tejani vd. (2018)	■	■			■	
[22] Degertekin vd. (2018)	■	■	■			
[23] Yancang ve Zhen (2019)	■	■				
[24] Madah ve Amir (2019)			■			
[25] Degertekin vd. (2019)	■	■	■			■
[26] Tejani vd. (2019)	■	■	■	■	■	
[27] Techasen vd. (2019)	■					
[28] Assimi vd. (2019)	■	■			■	
[29] Kaveh ve Mahjoubi (2019)				■		
[30] Weldeyesus vd. (2019)					■	■
[31] Weldeyesus vd. (2020)					■	■
[32] Mortazavi (2020)a	■	■		■		
[33] Mortazavi (2020)b				■		
[34] Kumar vd. (2020)	■	■	■	■	■	
[35] Reintjes ve Lorenz (2020)	■					
[36] Kaveh ve Seddighian (2020)						■
[37] El Bouzouiki vd. (2021)	■	■				
[38] Lemonge vd. (2021)	■	■		■		■

Çizelge 2. Çalışmalarda dikkate alınan imalat kısıtları (Manufacturing constraints considered in the studies)

	Örtüşen elemanlar	Kesişen elemanlar	Elemanlarının tek bir düz çizgi oluşturması	Aşıkların belirli bir aralıkta olması	Birim hücre yapılardan oluşturulabilir topolojiler	Sabit çatı eğim açısı	Eleman uzunluğu	Düğüm sayısı	Elemanlar arası açı sınırı
[39] Kawamura vd. (2002)	■				■				
[40] Hamza vd. (2003)			■	■					
[41] Ohsaki ve Katoh (2005)		■							
[42] Dominguez vd. (2006)					■				
[43] Wang ve Ohmori (2010)		■							■
[44] Frans ve Arfiadi (2014)						■			
[45] Mela (2014)	■	■							
[46] Hooshmand ve Campbell(2016)							■		
[1] Kanno (2018)a	■							■	
[2] Kanno (2018)b	■								
[3] Cui vd. (2018)	■	■							
[47] Xiao vd. (2018)					■				
[4] Shahabsafa vd. (2020)	■	■							
[5] Fairclough ve Gilbert (2020)		■					■	■	■

optimizasyonu farklı optimizasyon yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Son yıllarda yapılan ve yapısal kısıtlar altında kafes sistem optimizasyonu hakkında bulunan çalışmalar Çizelge 1'de verilmiştir. Diğer taraftan, kafes sistemlerin optimizasyonunda imalat kısıtlarını dikkate alan çalışma sayısı oldukça azdır. Çizelge 2'de hangi çalışmanın hangi imalat kısıtlarını dikkate aldığı sunulmuştur. Çizelge 2'de görüldüğü üzere, imalat kısıtlarının tümünün dikkate alındığı bir çalışmaya ulaşılamamıştır. Ancak imal edilebilir bir kafes sistem üretilebilmesi için Çizelge 2'de tanıtılan tüm imalat kısıtlarının dikkate alınması gerekir.

3. YÖNTEM (METHOD)

Bulunduğumuz dönem teknolojik gelişmelerin ve endüstriyel devrimlerin çağıdır. Bu gelişmelere bağlı olarak, yapısal tasarım pratiği de insanların çok az dâhil olduğu ya da hiç dâhil olmadığı ve tüm aşamaların bilgisayar tarafından otomatik bir şekilde gerçekleştirildiği "Bilgisayar ile Otomatik Tasarım" (BOT) olarak adlandırılan bir sürece evrilmektedir. BOT uygulamalarında tasarım süreci bilgisayar tarafından tamamlandığından milyonlarca farklı tasarım adayının değerlendirilebilmesi mümkündür. Aşağıdaki dört alt başlıkta (3.1, 3.2, 3.3 ve 3.4) kullanılan BOT yönteminin bileşenleri özetlenmiştir.

3.1. Geliştirme Platformu (Development Platform)

Geliştirme platformu olarak nesne yönelimli, yorumlamalı, birimsel (modüler) ve etkileşimli yüksek seviyeli bir dil olan Python tercih edilmiştir. Bu tercihin sebebi Python için çok sayıda kütüphanenin bulunması ve hemen her ihtiyaç için hazırlanmış fonksiyonlara ulaşılabilmesidir. Bu çalışma kapsamında hazırlanan Python betikleri, Random, Math, NumPy, Matplotlib ve OpenSeesPy kütüphanelerinden faydalanmaktadır. Random kütüphanesi rastgele sayılar üretmek için ve Math kütüphanesi ise bazı sabitler ve matematik işlevleri için fonksiyonlar içerir. NumPy kapsamlı bir sayısal çözümleme kütüphanesidir. Matplotlib kütüphanesinde çizim için gerekli fonksiyonlar bulunur. Son olarak OpenSeesPy ise OpenSees sonlu elemanlar analizi yazılımının Python kütüphanesi haline getirilmiş biçimidir.

3.2. Optimizasyon Algoritması (Optimization Algorithm)

Bu çalışmada optimizasyon için Jaya algoritması kullanılmıştır. Bu popülasyon tabanlı metasezgisel algoritma, bir aday çözümün iyileşmesi için popülasyondaki en iyi çözüme doğru ilerlemesi ve en kötü çözümden uzaklaşması gerektiği fikrine dayanmaktadır. Jaya algoritması, algoritmaya özgü herhangi bir kontrol parametresi içermez; yalnızca ortak kontrol parametrelerini ayarlamak yeterlidir. Burada "ortak kontrol parametreleri" ifadesinden kastedilen, hemen her popülasyon tabanlı metasezgisel algoritma için belirlenmesi gereken popülasyon büyüklüğü ve durma kriteri parametreleridir. Jaya algoritmasının tek satırlık hareket operatörü aşağıdaki gibidir.

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + r_{1,j,i}\left(X_{j,best,i} - \left|X_{j,k,i}\right|\right) - r_{2,j,i}\left(X_{j,worst,i} - \left|X_{j,k,i}\right|\right) \quad (1)$$

Denklem 1'de $X_{j,k,i}$; i'nci iterasyondaki k'ıncı tasarım için j'inci tasarım değişkenini temsil eder. $X'_{j,k,i}$ yeni adayın tasarım değişkenini, $r_{1,j,i}$ ve $r_{2,j,i}$ i'nci iterasyondaki j'inci tasarım değişkeni için [0,1] aralığında rastgele üretilen reel sayıları, $X_{j,best,i}$ ve $X_{j,worst,i}$ i'nci iterasyondaki en iyi ve en kötü tasarımların

ERKEN GÖRÜNÜM

j'inci tasarım değişkenlerini göstermektedir. Denklemdeki $r_{1,j,i}\left(X_{j,best,i} - \left|X_{j,k,i}\right|\right)$ ifadesi mevcut tasarımın en iyi tasarıma yaklaşmasını, $-r_{2,j,i}\left(X_{j,worst,i} - \left|X_{j,k,i}\right|\right)$ ifadesi ise mevcut tasarımın en kötü tasarımdan uzaklaşmasını sağlamaktadır. $r_{1,j,i}$ ve $r_{2,j,i}$ rastgele sayıları tasarım uzayının daha etkili araştırılmasını sağlarken, $\left|X_{j,k,i}\right|$ mutlak değeri arama kabiliyetinin güçlendirilmesini sağlamaktadır [48].

3.3. Tasarım Vektörü (Design Vector)

Tasarım vektörleri, bir optimizasyon problemine ait çözümleri temsil etmek için kullanılır. Örnek olarak, en fazla 4 düğüm noktasına ve en fazla 2 çeşit kesit kullanılmasına izin verilen, ve düğüm noktalarının düşey doğrultuda hareket etmesine izin verilmeyen bir düzlem kafes sistem tasarımı problemi için Şekil 1'deki gibi bir tasarım vektörü biçimi kullanılabilir. Şekil 1'de verilen tasarım vektörü örneği 3 kısımdan oluşmaktadır. İlk kısım kesit gruplarına kaç numaralı kesitin atandığını göstermektedir; elbette bu kısımdaki değerler tam sayılara yuvarlanarak kullanılmalıdır (kullanılan optimizasyon algoritmasının doğası gereği ondalıklı sayılarla karşılaşılabileceği unutulmamalıdır). Şekil 1'de verilen örnek çözüme göre ilk kesit grubu için 52, ikinci kesit grubu için 59 numaralı kesitler kullanılacaktır. İkinci kısım hem çözümün topolojisini hem de hangi elemanın hangi gruba ait olduğu bilgisini saklar. Tam sayıya yuvarlandığında 0 veya daha küçük olan değerler ilgili çubuk elemanın çözümde bulunmadığı anlamına gelir. Sıfırdan büyük tam sayılar ise elemanın çözümde var olduğunu ve hangi gruba ait olduğunu gösterir. Şekil 1'de verilen çözümde 1, 2, 4, ve 6 numaralı çubuklar yoktur. 3 numaralı çubuk 1 numaralı gruba aittir (yani 52 numaralı kesitten yapılmıştır) ve 5 numaralı çubuk ise 2 numaralı gruba aittir (yani 59 numaralı kesitten yapılmıştır). Üçüncü kısım ise düğüm noktalarının yatay eksendeki göreli konumlarını (temel yapıda verilen konumlarına göre) tutar. Şekil 1'deki çözümde 1 ve 3 düğümleri temel yapıda verilen konumlarında, ancak 2 ve 4 düğümleri temel yapıda verilen konumlarına göre yatay eksende sırası 124.8 ve -337.6 birim mesafesindedirler.

3.4. Amaç Fonksiyonu (Objective Function)

Amaç fonksiyonları bir çözümün ne kadar iyi (veya kötü) olduğunu belirlemek için kullanılırlar. Bu çalışmada aşağıdaki amaç fonksiyonu seçilmiştir.

$$w_p = w \times (1 + \sum P)^2 \tag{2}$$

Denklem 2'de verilen w_p cezalı ağırlığı (amaç değerini), w tasarımın ağırlığını ve $\sum P$ ise tanımlanan kısıtların sağlanmaması durumunda eklenecek toplam cezayı temsil etmektedir. Toplam ceza çeşitli yöntemlerle hesaplanabilir; bu çalışmada toplam ceza, bölüm 4.2'de tanıtılan tüm kısıtlar için Denklem 3'te verildiği gibi hesaplanarak elde edilen değerlerin toplanması ile bulunmuştur. Bir çözümde hiç ceza olmaması durumunda amaç değerinin (w_p) tasarımın ağırlığına (w) eşit olacağı açıktır.

$$P_i = \frac{\sum \text{kısıt ihlali oranı}}{\sum \text{öğe sayısı}} \tag{3}$$

Örnek olarak en fazla 2 MPa çubuk gerilmesine izin verilen bir tasarım probleminde 3 çubuktan oluşan bir tasarım adayının elemanları üzerindeki gerilmeler 2.19, 1.56 ve 3.27 ise gerilme cezası aşağıdaki gibi hesaplanır.

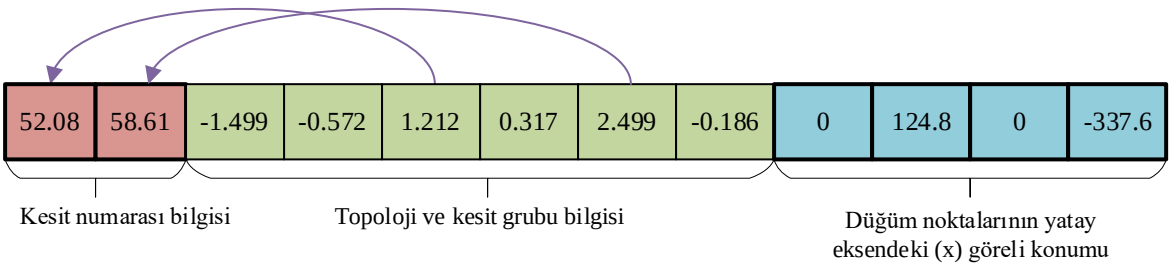
$$P_\sigma = \frac{\frac{2.19-2}{2} + 0 + \frac{3.27-2}{2}}{3} = 0.31 \tag{4}$$

Cezalı tasarımların sonuç olarak döndürülmesini engellemek için bu çalışmada en iyi aday, "cezası en az olan adayların içerisinden amaç değeri en küçük olanı" şeklinde tanımlanmıştır. Benzer şekilde en kötü aday da "cezası en çok olan adayların içerisinden amaç değeri en büyük olanı" olarak kabul edilmiştir.

4. SAYISAL ÖRNEKLER (NUMERICAL EXAMPLES)

4.1. Temel Yapı (Ground Structure)

Kafes sistemlerin topoloji optimizasyonunda optimal yapılar elde etme imkanı sağlayan yöntemler arasındaki en iyi yöntem, uygulamadaki basitliği ve kullanılabilirliği nedeniyle temel yapı (baz yapı veya zemin yapısı da denir) yöntemidir. Bu yönteme göre tüm mümkün düğümleri ve düğümler arasındaki bağlantıları (çubuk elemanlar) içeren başlangıç yapısına temel yapı denir [49]. Temel yapının bazı elemanları çıkartılarak, düğüm noktalarının yerleri değiştirilerek ve eleman kesitleri ile oynanarak optimum yapıya ulaşılabileceği



Şekil 1. Bir düzlem kafes tasarım problemi için tasarım vektörü (Design vector for a planar truss design problem)

ERKEN GÖRÜNÜM

düşünülür. Optimizasyon sırasında, belirli bir sınırdan – ki bu sınır 0'a yakın seçilir – daha küçük alanlara sahip elemanlar elenerek yapıdan silinir, böylece sistemin topolojisi değişir ve kalan elemanlar aday tasarımı oluşturur [50]. Elbette bu eleme, problem kısıtları göz önünde bulundurularak gerçekleştirilir [51]. Aynı zamanda, elemanları silmek kararsız mekanizmalar (kinematik stabilitesi olmayan adaylar) üretebileceğinden, kabul edilebilir yapısal topolojilerin elde edilmesi için ilave geometrik kısıtlar karşılanmalıdır [7].

4.2. **Kısıtlar** (Constraints)

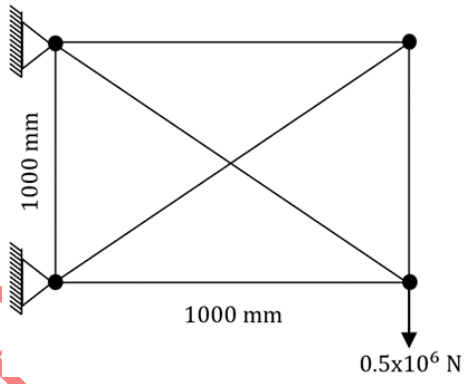
Bu çalışmada, yapısal kısıtlar olarak çubuk gerilmeleri ve düğüm yer değiştirmeleri, imalat kısıtları olarak ise Çizelge 3'te verilen kesit çeşidi, örtüşen çubuklar, kesişen çubuklar, düğüm sayısı, çubuklar arasındaki açı, bir düğüme bağlı çubuk sayısı, çubuk uzunluğu ve iki düğüm arasındaki mesafe kısıtları dikkate alınmıştır. Kafes sistemlerin optimizasyonu ayrık tasarım değişkenleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3. Bu çalışmada dikkate alınan imalat kısıtları (Manufacturing constraints considered in this study)

Kısıt	Açıklama
Mimari biçim	Mimari biçimin değişmesi (çoğunlukla) istenmez.
Kesit çeşidi sayısı	Montaj sırasında imalat hatalarını en aza indirmek ve maliyeti düşürmek amacıyla kullanılan farklı kesit çeşidinin belirli bir sayının altında olması istenir.
Örtüşen çubuklar	Örtüşen (üst üste binen) çubuklar, birbirinin içinden geçen çubuklar kullanılarak imal edilebilirler; ancak gereksizdir. Böylesi bir imalat yerine daha büyük kesitli bir çubuk kullanmak rasyonel olacaktır.
Kesişen çubuklar	Kesişen çubuklar imalat açısından son derece zorlayıcıdırlar ve bu sebeple tercih edilmezler.
Düğüm sayısı	Daha kolay imal edilebilir çözümlere ulaşılabilmesi amacıyla düğüm sayısı az tutulmaya çalışılır.
Çubuklar arasındaki açı	Çubuk elemanlar düğüm noktalarına bağlanırken imalat sırasında bağlantı noktalarının ve elemanların çakışmaması için elemanlar arasındaki açının belirli bir değerden küçük olmaması gerekir.
Bir düğüme bağlı çubuk sayısı	Geometrik kısıtlar sebebiyle, bir düğüm noktasına belli sayıda elemandan daha fazlası bağlanamaz. Bu sebeple, bir düğüme mümkün olduğunca az eleman bağlanması istenir.
Çubuk uzunluğu	Basınç kuvveti altındaki narin elemanlar burkulmaya meyillidirler. Ek olarak, çubukların kusurları boyları uzadıkça artar. Bu yüzden çubuk boyu belirli bir değer ile sınırlandırılmalıdır.
İki düğüm arasındaki mesafe	Çubuk elemanların düğüm noktalarına bağlanabilmeleri için bir çalışma alanına ihtiyaç vardır. Düğümler arasındaki mesafe az ise rahat çalışılamaz.

4.3. **Test Problemleri** (Benchmark Problems)

Literatürde kafes sistemlerin optimizasyonu için tanıtılan basit test problemleri bulunmaktadır. Ancak daha önce de söz edildiği gibi bu basit problemler gerçek dünya problemlerinin özelliklerini yansıtmakta yetersiz kalmaktadırlar. Bu sebeple çalışmaya özel olarak üretilen 3 farklı test problemi üzerinde çalışılmıştır. Tüm problemlerde en fazla 2 farklı kesit kullanılmasına izin verilmiş ve bu kesitlerin Çizelge 4'te verilen eşit kollu korniyerlerden seçilmesi sağlanmıştır. Kullanılan malzemenin birim hacim ağırlığı $\rho = 7.7\text{x}10^{-5}\ \text{N/mm}^3$ ve elastisite modülü $E = 200000\ \text{N/mm}^2$ olarak alınmıştır.



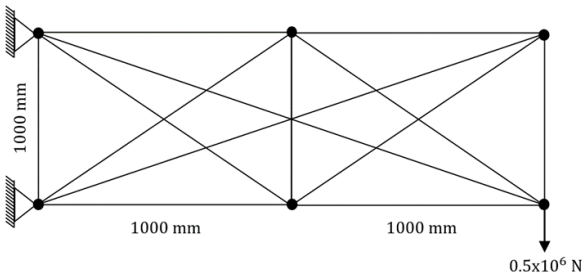
Şekil 2. 4 düğüm noktalı kafes sistemin temel yapısı (Ground structure of the 4-node truss)

Şekil 2'de ilk örneğin temel yapısı (muhtemel tüm düğümlerin ve elemanların bulunduğu konfigürasyon) görülmektedir. Bu basit örnek en elverişli durumlardaki hesaplama maliyetini ortaya koyabilmek için çözülmüştür. Bu örnekte düğüm noktalarının hareketine izin verilmemiştir. İzin verilen çubuk gerilmeleri en fazla $\pm 199.75\ \text{N/mm}^2$ ve düğüm yer değiştirmeleri en fazla ± 20 mm olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Bu kısıtlar problemin yapısal kısıtlarını oluşturmaktadırlar. Diğer taraftan, sistemde örtüşen ve kesişen elemanların bulunmasına izin verilmemiştir. Düğüm sayısı mümkün olduğunca az tutulmaya çalışılmıştır; aynı amaç değerine sahip iki çözümden daha az düğüme sahip olanının "daha iyi" çözüm olduğu kabul edilmiştir. Aynı düğüme bağlanan çubuklar arasındaki kabul edilebilir en küçük açı 15° olarak belirlenmiş, bir düğüme en fazla 4 çubuk bağlanmasına izin verilmiş, çubuk boylarının 1500 mm'yi geçmesi yasaklanmış ve iki düğüm arasındaki mesafenin 200 mm'den az olmaması istenmiştir. Bu kısıtlar da problemin imalat kısıtlarını oluşturmaktadırlar. İkinci (Şekil 3) ve üçüncü (Şekil 4) örneklerin yapısal ve imalat kısıtları birinci örnek ile aynıdır. Fakat bu örneklerde düğüm noktalarının hareket etmesine (şekil optimizasyonuna) izin verilmediği ve verildiği iki farklı durum incelenmiştir.

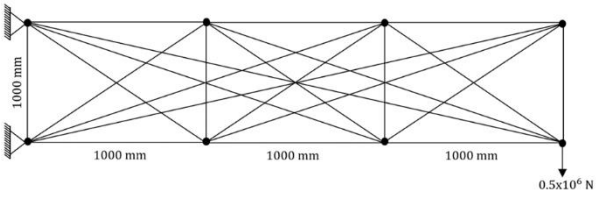
ERCIYES

Çizelge 4. Kesit listesi (Section list)

No	Kesit	Alan (mm^2)	No	Kesit	Alan (mm^2)	No	Kesit	Alan (mm^2)
1	L20x20x3	112	37	L80x80x7	1080	73	L150x150x20	5630
2	L25x25x3	142	38	L80x80x8	1230	74	L160x160x14	4320
3	L25x25x4	185	39	L80x80x10	1510	75	L160x160x15	4610
4	L30x30x3	174	40	L90x90x6	1050	76	L160x160x16	4900
5	L30x30x4	227	41	L90x90x7	1220	77	L160x160x17	5180
6	L35x35x4	267	42	L90x90x8	1390	78	L180x180x13	4550
7	L40x40x4	308	43	L90x90x9	1550	79	L180x180x14	4880
8	L40x40x5	379	44	L90x90x10	1710	80	L180x180x15	5210
9	L45x45x4	349	45	L90x90x11	1870	81	L180x180x16	5540
10	L45x45x4.5	390	46	L100x100x6	1180	82	L180x180x17	5870
11	L45x45x5	430	47	L100x100x7	1370	83	L180x180x18	6190
12	L50x50x4	389	48	L100x100x8	1550	84	L180x180x19	6510
13	L50x50x5	480	49	L100x100x10	1920	85	L180x180x20	6830
14	L50x50x6	569	50	L100x100x12	2270	86	L200x200x15	5810
15	L50x50x7	656	51	L110x110x8	1710	87	L200x200x16	6180
16	L55x55x5	532	52	L110x110x10	2120	88	L200x200x17	6550
17	L55x55x6	631	53	L110x110x12	2510	89	L200x200x18	6910
18	L60x60x4	471	54	L120x120x8	1870	90	L200x200x19	7270
19	L60x60x5	582	55	L120x120x10	2320	91	L200x200x20	7630
20	L60x60x6	691	56	L120x120x11	2540	92	L200x200x21	7990
21	L60x60x8	903	57	L120x120x12	2750	93	L200x200x22	8350
22	L65x65x6	753	58	L120x120x13	2970	94	L200x200x23	8710
23	L65x65x7	870	59	L120x120x15	3390	95	L200x200x24	9060
24	L65x65x8	985	60	L120x120x16	3600	96	L200x200x25	9410
25	L70x70x6	813	61	L130x130x10	2520	97	L200x200x26	9760
26	L70x70x7	940	62	L130x130x12	3000	98	L250x250x20	9630
27	L70x70x8	1070	63	L130x130x13	3230	99	L250x250x21	10100
28	L70x70x9	1190	64	L130x130x14	3470	100	L250x250x22	10600
29	L75x75x4	593	65	L130x130x16	3930	101	L250x250x23	11000
30	L75x75x5	734	66	L150x150x10	2930	102	L250x250x24	11500
31	L75x75x6	873	67	L150x150x12	3480	103	L250x250x25	11900
32	L75x75x7	1010	68	L150x150x13	3760	104	L250x250x26	12400
33	L75x75x8	1140	69	L150x150x14	4030	105	L250x250x27	12800
34	L75x75x10	1410	70	L150x150x15	4300	106	L250x250x28	13300
35	L80x80x5	786	71	L150x150x16	4570	107	L250x250x35	16300
36	L80x80x6	935	72	L150x150x18	5100			



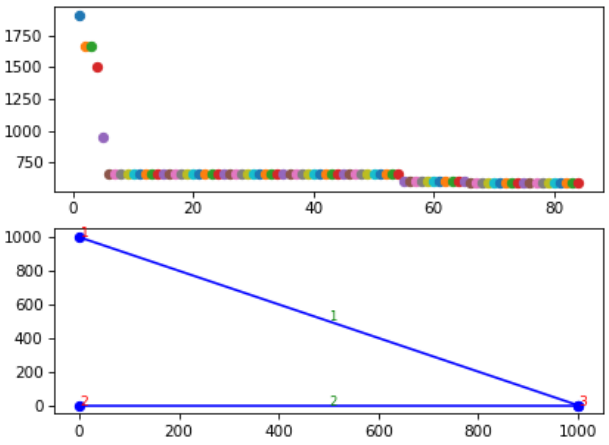
Şekil 3. 6 düğüm noktalı kafes sistemin temel yapısı (Ground structure of the 6-node truss)



Şekil 4. 8 düğüm noktalı kafes sistemin temel yapısı (Ground structure of the 8-node truss)

5. **BULGULAR** (FINDINGS)

4 düğüm noktalı (ve düğüm noktaları sabit) örnek için popülasyon büyüklüğü 25 ve izin verilen iterasyon sayısı 750 olarak seçilmiştir. Söz edilen örnek için tüm kısıtları sağlayan en hafif tasarımın ağırlığı 585.35 N olarak bulunmuştur.



Şekil 5. 4 düğüm noktalı problem için bulunan en iyi çözüm (Best solution found for the 4-node problem)

Şekil 5'te en iyi çözümün bulunduğu denemeye ait iterasyon – amaç değeri grafiği ve bulunan sonuç tasarımın topolojisi verilmiştir. Çizelge 5'te ise peş peşe yapılan 20 optimizasyon denemesinin sonuçları sunulmuştur. Çizelge 5 incelendiğinde, yapısal ve imalat kısıtlarının tam olarak sağlandığı ve ağırlığın 669.29 N olduğu noktada bir lokal minimum olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Çizelge 5'ten anlaşılacağı üzere çoğu optimizasyon denemesinde ağırlık 585.35 N olarak hesaplanmıştır. Her ne kadar bir mühendislik sezisi olarak 585.35 N'luk çözümün global optimum olduğu düşünülse de kesin bir şey söylemek doğru olmayacaktır.

Çizelge 5. 4 düğüm noktalı problemin optimizasyon sonuçları (Optimization results of the 4-node problem)

No.	Ağırlık (N)	Yapısal Ceza	İmalat Cezası
1	585.35	0	0
2	955.15	0	0
3	585.35	0	0
4	585.35	0	0
5	686.54	0	0
6	669.29	0	0
7	669.29	0	0
8	585.35	0	0
9	669.29	0	0
10	669.29	0	0
11	699.04	0	0
12	585.35	0	0
13	585.35	0	0
14	585.35	0	0
15	585.35	0	0
16	669.29	0	0
17	585.35	0	0
18	585.35	0	0
19	955.15	0	0
20	669.29	0	0

Çizelge 6. 6 düğüm noktalı ve düğüm noktaları sabit problemin optimizasyon sonuçları (Optimization results of the 6-node problem with fixed node coordinates)

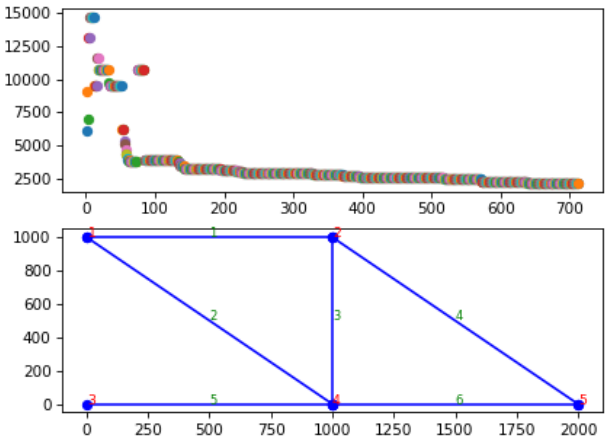
No.	Ağırlık (N)	Yapısal Ceza	İmalat Cezası
1	1954.19	0	0.0545
2	2681.82	0	0
3	2820.43	0	0
4	2995.95	0	0.0545
5	2997.08	0	0
6	2314.95	0	0.0417
7	2121.19	0	0
8	2680.28	0	0
9	3608.09	0	0
10	3299.77	0	0
11	2669.50	0	0
12	2811.19	0	0
13	2109.36	0	0
14	2497.48	0	0
15	2282.92	0	0
16	2669.50	0	0
17	4528.20	0	0.1111
18	3025.07	0	0
19	3071.48	0	0
20	3083.19	0	0

6 düğüm noktalı örnekler için popülasyon büyüklüğü 25 ve izin verilen iterasyon sayısı düğüm noktalarının sabit olduğu durum için 1000, hareketli olduğu durum için ise 1500 olarak seçilmiştir. Ardışık 20 optimizasyon denemesinin sonuçları düğüm noktalarının sabit olduğu örnek için Çizelge 6'da, düğüm noktalarının hareketli olduğu örnek için ise Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 7. 6 düğüm noktalı ve düğüm noktaları hareketli problemin optimizasyon sonuçları (Optimization results of the 6-node problem with variable node coordinates)

No.	Ağırlık (N)	Yapısal Ceza	İmalat Cezası
1	3656.25	0	0.1030
2	5941.82	0	0
3	1947.23	0	0.1030
4	2338.35	0	0
5	2227.67	0	0
6	12789.89	0	0.2378
7	2323.72	0	0
8	2097.35	0	0
9	2708.94	0	0
10	2244.42	0	0
11	2235.55	0	0
12	2598.77	0	0
13	2664.07	0	0.1030
14	3612.53	0	0
15	2253.28	0	0
16	2656.25	0	0.0476
17	2288.50	0	0
18	2212.55	0	0
19	2781.45	0	0
20	1896.18	0	0

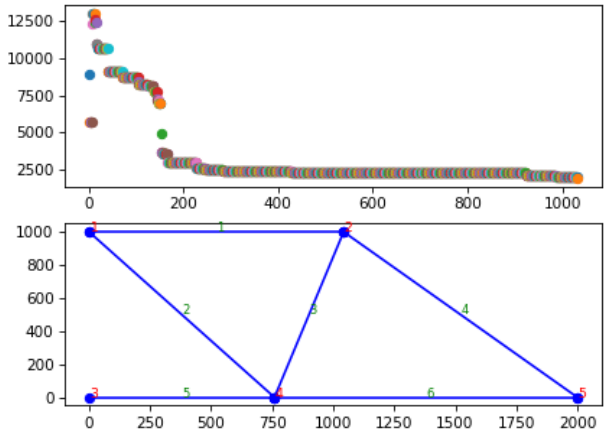
6 düğüm noktalı örnek için düğüm noktaları sabit durumda tüm kısıtları sağlayan en hafif tasarım 13. optimizasyon denemesinde bulunmuştur ve ağırlığı 2109.36 N'dur (Şekil 6). Tüm optimizasyon denemelerinde yapısal cezası olmayan tasarımlar elde edilebilirken denemelerin dördünde imalat cezası olmayan bir tasarım adayı elde edilememiştir.



Şekil 6. 6 düğüm noktalı ve düğüm noktaları sabit problem için bulunan en iyi çözüm (Best solution found for the 6-node problem with fixed node coordinates)

EBKN GÖRÜNÜM

Düğüm noktaları hareketli durumda ise tüm kısıtları sağlayan en hafif tasarımın ağırlığı 1896.18 N olarak bulunmuştur (Şekil 7). Yine tüm optimizasyon denemelerinde yapısal cezası olmayan tasarımlar elde edilebilirken denemelerin beşinde imalat cezası olmayan bir tasarım adayı elde edilememiştir.



Şekil 7. 6 düğüm noktalı ve düğüm noktaları hareketli problem için bulunan en iyi çözüm (Best solution found for the 6-node problem with variable node coordinates)

8 düğüm noktalı örnekler için popülasyon büyüklüğü 25 ve izin verilen iterasyon sayısı düğüm noktalarının sabit olduğu durum için 3000, hareketli olduğu durum için ise 4000 olarak seçilmiştir. Ardışık 20 optimizasyon denemesinin sonuçları düğüm noktalarının sabit olduğu örnek için Çizelge 8'de, düğüm noktalarının hareketli olduğu örnek için Çizelge 9'de verilmiştir.

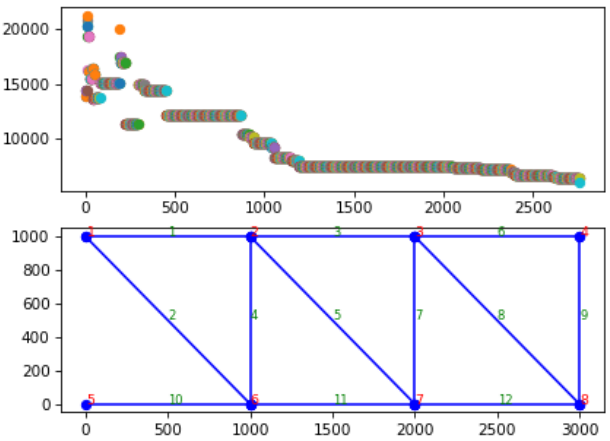
Çizelge 8. 8 düğüm noktalı ve düğüm noktaları sabit problemin optimizasyon sonuçları (Optimization results of the 8-node problem with fixed node coordinates)

No.	Ağırlık (N)	Yapısal Ceza	İmalat Cezası
1	7118.24	0	0.1002
2	8465.14	0	0.2250
3	9953.21	0	0.0660
4	5972.22	0	0
5	12966.40	0	0.3312
6	6554.39	0	0.2868
7	11645.05	0	0
8	6502.70	0	0
9	8050.30	0	0.2836
10	8141.33	0	0.1026
11	7436.81	0	0
12	9940.89	0	0
13	14624.32	0	0.0313
14	6837.41	0	0.0721
15	12246.98	0	0.2051
16	4993.04	0	0.1297
17	6411.40	0	0.0690
18	6046.81	0	0
19	8802,95	0	0.1757
20	9832.23	0	0.1403

8 düğüm noktalı örnek için düğüm noktaları sabit durumda tüm kısıtları sağlayan en hafif tasarımın ağırlığı 5972.22 N olarak bulunmuştur (Şekil 8). Tüm optimizasyon denemelerinde yapısal cezası olmayan tasarımlar elde edilebilirken denemelerin on dördünde imalat cezası olmayan bir tasarım adayı elde edilememiştir. Düğüm noktaları hareketli durumda ise tüm kısıtları sağlayan en hafif tasarımın ağırlığı 5699.04 N olarak bulunmuştur (Şekil 9). Tüm optimizasyon denemelerinde yapısal cezası olmayan tasarımlar elde edilebilirken denemelerin on ikisinde imalat cezası olmayan bir tasarım adayı elde edilememiştir.

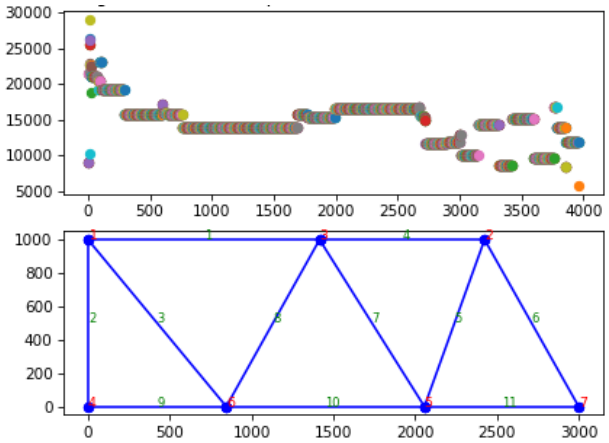
Çizelge 9. 8 düğüm noktalı ve düğüm noktaları hareketli problemin optimizasyon sonuçları (Optimization results of the 8-node problem with variable node coordinates)

No.	Ağırlık (N)	Yapısal Ceza	İmalat Cezası
1	15411.71	0	0.0986
2	18173.51	0	0.0468
3	17623.90	0	0.0573
4	7048.98	0	0
5	13086.00	0	0.0313
6	5914.58	0	0
7	16498.33	0	0.0747
8	6227.81	0	0
9	6520.38	0	0
10	17101.77	0	0.1455
11	13300.32	0	0.0313
12	13885.29	0	0
13	16976.76	0	0.1800
14	17268.74	0	0.0403
15	13921.59	0	0.0221
16	7111.23	0	0.0313
17	16016.51	0	0.1667
18	5699.04	0	0
19	6784.48	0	0
20	12849.49	0	0



Şekil 8. 8 düğüm noktalı ve düğüm noktaları sabit problem için bulunan en iyi çözüm (Best solution found for the 8-node problem with fixed node coordinates)

EKLENDİ



Şekil 9. 8 düğüm noktalı ve düğüm noktaları hareketli problem için bulunan en iyi çözüm (Best solution found for the 8-node problem with variable node coordinates)

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Düzlem kafes sistemlerin bilgisayar ile otomatik tasarımının gerçek hesaplama yükü ile ilgili ön testlerin yapıldığı bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- İlk örnek için yapılan 20 ardışık optimizasyon denemesinin 10'unda algoritma 585.35 N ağırlığındaki tasarımı keşfetmiştir (Şekil 5). Bu tasarımın global minimum olduğu düşünülmektedir.
- 6 düğüm noktalı ve 8 düğüm noktalı problemlerin düğüm noktalarının hareketine izin vermeden yürütülen optimizasyon süreçlerinin sonucunda (boyut ve topoloji optimizasyonu) minimum yapı ağırlıkları sırasıyla 2109.36 N ve 5972.22 N olarak bulunmuştur. Aynı örnekler için düğüm noktalarının hareketine izin verilmesi durumunda (boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu) bulunan minimum yapı ağırlıkları ise sırasıyla 1896.18 N ve 5699.04 N olarak bulunmuştur. Beklendiği üzere düğüm noktalarının hareketine izin verilmesi görece daha iyi çözümlere ulaşılabilmesini sağlamıştır.
- Bir optimizasyon prosedürünün başarı ölçütlerinden biri de yapılan ardışık denemelerde bulunan sonuçların birbirine ne kadar yakın olduğudur. 6 düğüm noktalı örneğin (Şekil 3) düğüm noktaları sabit durum için 25000 analize izin verilmesine rağmen bulunan çözümlerin ağırlıkları 2109.36 N ile 4528.20 N arasında değişmektedir. Benzer şekilde aynı örneğin düğüm noktaları hareketli durumu için 37500 analize izin verilmiştir ve 1896.18 N ile 12789.89 N arasında değişen ağırlıklara sahip çözümler elde edilmiştir. Aynı zamanda düğüm noktaları sabit örnekte 4, düğüm noktaları hareketli örnekte 5 çözümde imalat kısıtları sağlanamamıştır. İncelenen örneğin basitliği göz önüne alındığında elde edilen çözümler arasındaki fark kabul edilemez seviyededir.
- 8 düğüm noktalı ve düğüm noktaları sabit örnek için bulunabilen en iyi tasarımda (Şekil 8) 6 ve 9 numaralı elemanların, düğüm noktaları hareketli örnek için bulunabilen en iyi tasarımda da (Şekil 9) 2 numaralı elemanın gereksiz olduğu açıktır. Sonuç olarak, 8 düğüm noktalı örneklerde optimal topolojiye ulaşılamamıştır.
- 8 düğüm noktalı problemi çözmek için yapılan denemelerin düğüm noktaları sabit durum için ancak %30'unda ve düğüm noktaları hareketli durum için ise ancak %40'ında imalat cezası olmayan tasarımlara ulaşılabilmiştir. Bu oranlar problemin temel yapısının düğüm ve eleman sayıları göz önünde bulundurulduğunda son derece küçüktür.

Gerçek dünya problemlerine ait kafes sistemlerin yapısal ve imalat kısıtları altında bilgisayar ile otomatik tasarımı için sadece bir metasezgisel algoritma ile bir ceza yöntemini birleştirerek oluşturulacak süreçler ile ev ve işyeri bilgisayarlarında (şimdilik) makul sürelerde optimale yakın çözümler elde edilemeyeceği fikri oluşmuştur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Hakan ÖZBAŞARAN danışmanlığında Sedanur BALTA tarafından hazırlanan "Kafes Sistemlerin Yapım Kısıtları ile Optimal Tasarımı" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir. Ayrıca bu çalışma ile ilgili ilk düşünceler, 2021 yılında düzenlenen "7. Uluslararası Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Kongresi"nde aynı yazarlar tarafından dinleyiciler ile paylaşılmıştır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Sedanur BALTA: Sayısal deneyleri programlamış, sonuçları analiz etmiş ve metni yazmıştır. wrote the manuscript.

Hakan ÖZBAŞARAN: Sayısal deneyleri tasarlamış ve metni revize etmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Kanno, Y., "Mixed-integer second-order cone programming for truss topology optimization with self-weight load and limitation on number of nodes", ***IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management***, 2017-Decem:1009–1012, (2018).

[2] Kanno, Y., "Robust truss topology optimization via semidefinite programming with complementarity constraints: a difference-of-convex programming

ERKEN GÖRÜNÜM

approach", ***Computational Optimization and Applications***, 71(2):403–433, (2018).
[3] Cui, H., An, H., and Huang, H., "Truss topology optimization considering local buckling constraints and restrictions on intersection and overlap of bar members", ***Structural and Multidisciplinary Optimization***, 58(2):575–594, (2018).
[4] Shahabsafa, M., Fakhimi, R., Lei, W., He, S., Martins, J.R.R.A., Terlaky, T., and Zuluaga, L.F., "Truss topology design and sizing optimization with guaranteed kinematic stability", ***Structural and Multidisciplinary Optimization***, (2020).
[5] Fairclough, H. and Gilbert, M., "Layout optimization of simplified trusses using mixed integer linear programming with runtime generation of constraints", ***Structural and Multidisciplinary Optimization***, 61(5):1977–1999, (2020).
[6] Savsani, V.J., Tejani, G.G., and Patel, V.K., "Truss topology optimization with static and dynamic constraints using modified subpopulation teaching–learning-based optimization", ***Engineering Optimization***, 48(11):1990–2006, (2016).
[7] Mortazavi, A. and Toğan, V., "Simultaneous size, shape, and topology optimization of truss structures using integrated particle swarm optimizer", ***Structural and Multidisciplinary Optimization***, 54(4):715–736, (2016).
[8] Maheri, M.R., Askarian, M., and Shojaee, S., "Size and topology optimization of trusses using hybrid genetic-particle swarm algorithms", ***Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering***, 40(3):179–193, (2016).
[9] Ahrari, A. and Deb, K., "An improved fully stressed design evolution strategy for layout optimization of truss structures", ***Computers and Structures***, 164:127–144, (2016).
[10] Madah, H. and Amir, O., "Truss optimization with buckling considerations using geometrically nonlinear beam modeling", ***Computers and Structures***, 192:233–247, (2017).
[11] Zhou, P., Du, J., and Lü, Z., "Interval analysis based robust truss optimization with continuous and discrete variables using mix-coded genetic algorithm", ***Structural and Multidisciplinary Optimization***, 56(2):353–370, (2017).
[12] Kaveh, A. and Zolghadr, A., "Cyclical parthenogenesis algorithm for layout optimization of truss structures with frequency constraints", ***Engineering Optimization***, 49(8):1317–1334, (2017).
[13] Ohsaki, M. and Hayashi, K., "Force density method for simultaneous optimization of geometry and topology of trusses", ***Structural and Multidisciplinary Optimization***, 56(5):1157–1168, (2017).
[14] Assimi, H., Jamali, A., and Nariman-zadeh, N., "Sizing and topology optimization of truss structures using genetic programming", ***Swarm and Evolutionary Computation***, 37:90–103, (2017).
[15] Chen, S. yan, Shui, X. fang, and Huang, H., "Improved genetic algorithm with two-level approximation using shape sensitivities for truss layout optimization", ***Structural and Multidisciplinary Optimization***, 55(4):1365–1382, (2017).
[16] Mortazavi, A., Toğan, V., and Nuhoğlu, A., "Weight minimization of truss structures with sizing and layout variables using integrated particle swarm optimizer", ***Journal of Civil Engineering and Management***, 23(8):985–1001, (2017).
[17] Savsani, V.J., Tejani, G.G., Patel, V.K., and Savsani, P., "Modified meta-heuristics using random mutation for truss topology optimization with static and dynamic constraints", ***Journal of Computational Design and Engineering***, 4(2):106–130, (2017).
[18] Mortazavi, A. and Toğan, V., "Sizing and layout design of truss structures under dynamic and static constraints with an integrated particle swarm optimization algorithm", ***Applied Soft Computing Journal***, 51:239–252, (2017).
[19] Kaveh, A. and Zolghadr, A., "Meta-heuristic methods for optimization of truss structures with vibration frequency constraints", ***Acta Mechanica***, 229(10):3971–3992, (2018).
[20] Panagant, N. and Bureerat, S., "Truss topology, shape and sizing optimization by fully stressed design based on hybrid grey wolf optimization and adaptive differential evolution", ***Engineering Optimization***, 50(10):1645–1661, (2018).
[21] Tejani, G.G., Savsani, V.J., Patel, V.K., and Savsani, P. V., "Size, shape, and topology optimization of planar and space trusses using mutation-based improved metaheuristics", ***Journal of Computational Design and Engineering***, 5(2):198–214, (2018).
[22] Degertekin, S.O., Lamberti, L., and Ugur, I.B., "Sizing, layout and topology design optimization of truss structures using the Jaya algorithm", ***Applied Soft Computing Journal***, 70:903–928, (2018).
[23] Yancang, L. and Zhen, Y., "Application of Improved Bat Algorithm in Truss Optimization", ***KSCE Journal of Civil Engineering***, 23(6):2636–2643, (2019).
[24] Madah, H. and Amir, O., "Concurrent structural optimization of buckling-resistant trusses and their initial imperfections", ***International Journal of Solids and Structures***, 162(xxxx):244–258, (2019).
[25] Degertekin, S.O., Lamberti, L., and Ugur, I.B., "Discrete sizing/layout/topology optimization of truss structures with an advanced Jaya algorithm", ***Applied Soft Computing Journal***, 79:363–390, (2019).
[26] Tejani, G.G., Savsani, V.J., Bureerat, S., Patel, V.K., and Savsani, P., "Topology optimization of truss subjected to static and dynamic constraints by integrating simulated annealing into passing vehicle search algorithms", ***Engineering with Computers***, 35(2):499–517, (2019).
[27] Techasen, T., Wansasueb, K., Panagant, N., Pholdee, N., and Bureerat, S., "Simultaneous topology, shape, and size optimization of trusses, taking account of uncertainties using multi-objective evolutionary algorithms", ***Engineering with Computers***, 35(2):721–740, (2019).
[28] Assimi, H., Jamali, A., and Nariman-zadeh, N., "Multi-objective sizing and topology optimization of truss structures using genetic programming based on a new adaptive mutant operator", ***Neural Computing and Applications***, 31(10):5729–5749, (2019).
[29] Kaveh, A. and Mahjoubi, S., "Hypotrochoid spiral optimization approach for sizing and layout optimization of truss structures with multiple frequency constraints", ***Engineering with Computers***, 35(4):1443–1462, (2019).
[30] Weldeyesus, A.G., Gondzio, J., He, L., Gilbert, M., Shepherd, P., and Tyas, A., "Adaptive solution of truss layout optimization problems with global stability constraints", ***Structural and Multidisciplinary Optimization***, 60(5):2093–2111, (2019).
[31] Weldeyesus, A.G., Gondzio, J., He, L., Gilbert, M., Shepherd, P., and Tyas, A., "Truss geometry and topology optimization with global stability constraints",

PREPRINT

Structural and Multidisciplinary Optimization, 62(4):1721–1737, (2020).
[32] Mortazavi, A., "A new fuzzy strategy for size and topology optimization of truss structures", ***Applied Soft Computing Journal***, 93:106412, (2020).
[33] Mortazavi, A., "Size and layout optimization of truss structures with dynamic constraints using the interactive fuzzy search algorithm", ***Engineering Optimization***, 0(0):1–23, (2020).
[34] Kumar, S., Tejani, G.G., Pholdee, N., and Bureerat, S., "Improved metaheuristics through migration-based search and an acceptance probability for truss optimization", ***Asian Journal of Civil Engineering***, 21(7):1217–1237, (2020).
[35] Reintjes, C. and Lorenz, U., "Bridging mixed integer linear programming for truss topology optimization and additive manufacturing", Springer US, ISBN 0123456789, 2020.
[36] Kaveh, A. and Seddighian, M.R., "Simultaneously multi-material layout, and connectivity optimization of truss structures via an Enriched Firefly Algorithm", ***Structures***, 27(June):2217–2231, (2020).
[37] Bouzouiki, M. El, Sedaghati, R., and Stiharu, I., "A non-uniform cellular automata framework for topology and sizing optimization of truss structures subjected to stress and displacement constraints", ***Computers and Structures***, 242:106394, (2021).
[38] Lemonge, A.C.C., Carvalho, J.P.G., Hallak, P.H., and Vargas, D.E.C., "Multi-objective truss structural optimization considering natural frequencies of vibration and global stability", ***Expert Systems with Applications***, 165:113777, (2021).
[39] Kawamura, H., Ohmori, H., and Kito, N., "Truss topology optimization by a modified genetic algorithm", ***Structural and Multidisciplinary Optimization***, 23(6):467–472, (2002).
[40] Hamza, K., Mahmoud, H., and Saitou, K., "Design optimization of N-shaped roof trusses using reactive taboo search", ***Applied Soft Computing Journal***, 3(3):221–235, (2003).
[41] Ohsaki, M. and Katoh, N., "Topology optimization of trusses with stress and local constraints on nodal stability and member intersection", ***Structural and Multidisciplinary Optimization***, 29(3):190–197, (2005).
[42] Dominguez, A., Stiharu, I., and Sedaghati, R., "Practical design optimization of truss structures using the genetic algorithms", ***Research in Engineering Design***, 17(2):73–84, (2006).
[43] Wang, H. and Ohmori, H., "Truss optimization using genetic algorithm, considering construction process", ***International Journal of Space Structures***, 25(4):205–215, (2010).
[44] Frans, R. and Arfiadi, Y., "Sizing, shape, and topology optimizations of roof trusses using hybrid genetic algorithms", ***Procedia Engineering***, 95(Scescm):185–195, (2014).
[45] Mela, K., "Resolving issues with member buckling in truss topology optimization using a mixed variable approach", ***Structural and Multidisciplinary Optimization***, 50(6):1037–1049, (2014).
[46] Hooshmand, A. and Campbell, M.I., "Truss layout design and optimization using a generative synthesis approach", ***Computers and Structures***, 163:1–28, (2016).
[47] Xiao, Z., Yang, Y., Xiao, R., Bai, Y., Song, C., and Wang, D., "Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via selective laser melting", ***Materials and Design***, 143:27–37, (2018).
[48] Venkata Rao, R., "Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems", ***International Journal of Industrial Engineering Computations***, 7(1):19–34, (2016).
[49] Topping, B.H. V, "Shape Optimization of Skeletal Structures: A Review", ***Journal of Structural Engineering***, 109(8):1933-1951, (1983).
[50] Gao, G., Liu, Z.Y., Li, Y. Bin, and Qiao, Y.F., "A new method to generate the ground structure in truss topology optimization", ***Engineering Optimization***, 49(2):235–251, (2017).
[51] Deb, K. and Gulati, S., "Design of truss-structures for minimum weight using genetic algorithms", ***Finite Elements in Analysis and Design***, 37(5):447-465, (2001).

BASIN GÖRÜNÜMÜ