

Düzlemsel Çelik Çerçevelerin Performansa Dayalı Optimum Sismik Tasarımının Çok Sınıflı MC-TLBO Algoritmasıyla Karşılaştırmalı Analizi

Hikmet TUTAR

Ulaştırma ve Trafik hizmetleri Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Muş Alparslan Üniversitesi, MUŞ, Türkiye

✉: h.tutar@alparslan.edu.tr  [0000-0002-1440-7659](https://orcid.org/0000-0002-1440-7659)

Geliş (Received): 28.11.2024

Düzeltilme (Revision): 11.04.2025

Kabul (Accepted): 08.05.2025

ÖZ

Bu çalışmada, moment aktaran çelik çerçevelerin performansa dayalı optimum sismik tasarımı (PBOSD), Jaya (JA), Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) ve TLBO'nun çok sınıflı varyantı olan MC-TLBO algoritmaları ile entegre edilerek gerçekleştirilmiştir. TLBO, JA ve MC-TLBO algoritmalarıyla elde edilen sonuçlar, MATLAB ve OpenSees yazılımlarının etkileşimli bir şekilde kullanılmasıyla elde edilmiştir. Bu algoritmaların performansını değerlendirmek amacıyla literatürde yer alan iki düzlemsel çelik çerçeve örneği kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Geleneksel Tasarım (CD) yaklaşımı ile Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO), Genetik Algoritma (GA) ve Yüklü Sistem Arama (CSS) gibi diğer optimizasyon algoritmalarıyla karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalı analizler, özellikle minimum yapısal ağırlık ve analiz sayısı gibi temel performans kriterlerine odaklanmıştır. Elde edilen bulgular, MC-TLBO algoritmasının CD, ACO, GA ve CSS yöntemlerine kıyasla daha üstün tasarım sonuçları ürettiğini ve etkin bir optimizasyon yaklaşımı olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Statik itme analizi; Performansa dayalı tasarım, Çelik çerçeveler, Optimum sismik tasarım; TLBO algoritması, JA algoritması, MC-TLBO algoritması.

Comparative Analysis of Performance-Based Optimal Seismic Design of Planar Steel Frames Using the Multi-Class MC-TLBO Algorithm

ABSTRACT

In this study, the performance-based optimum seismic design (PBOSD) of moment resisting steel frames was implemented by integrating with Jaya (JA), Teaching-Learning Based Optimization (TLBO) and TLBO's multi-class variant MC-TLBO algorithms. The results obtained with TLBO, JA and MC-TLBO algorithms were obtained by using MATLAB and OpenSees software interactively. In order to evaluate the performance of these algorithms, two planar steel frame examples from the literature were used. The results obtained were compared with the Conventional Design (CD) approach and other optimization algorithms such as Ant Colony Optimization (ACO), Genetic Algorithm (GA) and Charged System Search (CSS). The comparative analyses conducted focused on basic performance criteria such as minimum structural weight and number of analyses. The findings revealed that the MC-TLBO algorithm produces superior design results compared to CD, ACO, GA and CSS methods and is an effective optimization approach.

Keywords: Static pushover analysis; Performance-based design; Steel frames; Optimum seismic design; TLBO algorithm, JA algorithm, MC-TLBO algorithm

Giriş

Performansa dayalı optimum sismik tasarım, bir yapının hedeflenen performans seviyesini karşılayacak şekilde en hafif çerçeve elemanlarından tasarlanmasını amaçlamaktadır. Performansa dayalı sismik tasarım felsefesi, özellikle Amerika Birleşik Devletleri'nde Northridge (1994) ve Japonya-Kobe (1995) depremleri sonrasında önem kazanmıştır. Bu depremler sonrasında mevcut yönetmeliklere göre tasarlanmış yapıların, beklenenden çok daha fazla hasar gördüğü anlaşılmış ve

bu durum yeni tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesine neden olmuştur. Bu gelişmeler, Performansa Dayalı Sismik Tasarım (PBSD) felsefesinin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Yapıların performansa göre tasarımında deprem düzeyleri ve depremden sonra yapıdan beklenen performans düzeyleri belirlenmiştir. Bir yapının performans seviyesi, belirli deprem düzeyleriyle ilişkilendirilmiştir. 50 yıllık bir süre zarfında gerçekleşme olasılığı %50 olan depremler hafif şiddetli (SE), %10 olasılıkla gerçekleşenler orta şiddetli (tasarım

depremi) (DE) ve %2 olasılıkla meydana gelenler ise çok şiddetli (ME) olarak sınıflandırılmaktadır. Genel olarak; hafif depremlerden sonra yapının “hemen kullanım” (IO), orta şiddetli bir depremlerden sonra “can güvenliği” (LS) ve çok şiddetli bir depremlerden sonra “göçmenin önlenmesi (CP) performans seviyesini sağlaması beklenmektedir [1].

PBSD alandaki öncü çalışmalar SEAOC VISION 2000 [2] ile başlamış ve ATC40 [3], FEMA 273 [4], FEMA 356 [5] ve FEMA 440 [6] gibi kılavuzlarla geliştirilmiştir. Bu çalışmalar, günümüzde ASCE [7] gibi yönetmeliklerde yer bulmuştur.

Çelik çerçevelerin performans dayalı deprem tasarımı (PBSD) konusunda yapılan çalışmalarda, Hasan ve ark. [8] Geleneksel Tasarım (CD) adı altında Statik İtme Analiz yöntemini önermiştir. Bu yöntemde, yapıya uygulanan yanal yükler ters üçgen biçimde artırılarak, göçme öncesi performans seviyesine karşılık gelen hedef yanal yer değiştirme değerine ulaşmaya kadar analiz devam ettirilmiştir [9]. Araştırmacılar, bu çalışmada kuvvete ve yer değiştirmeye dayalı doğrusal olmayan analiz yöntemlerini, dinamik analiz yöntemleri ile karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda yer değiştirme ve kuvvete dayalı analiz yöntemlerinin dinamik analize göre daha yakın sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur [10-13].

Son dönemde sezgisel ve meta-sezgisel optimizasyon yöntemleri de bu alanda yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında Genetik algoritma (GA) [14], Karınca Koloni Algoritması (ACO) [15], Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) [16], Çarpışan Cisimler Optimizasyonu (CBO) [17] Yükleilmiş Sistem Arama (CSS) [18] ve Ateş Böceği Algoritması (FA) [19] yer almaktadır.

Kaveh ve ark. [20], ACO algoritmasını kullanarak çelik çerçevelerin performans dayalı optimum sismik tasarımı için bir yöntem sunmuşlardır. Bu yöntemin etkinliğini göstermek adına, 3 katlı 4 açıklıklı ve 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçeveleri üzerinde GA ile karşılaştırmalı çalışmalar yapılmıştır. Gholizadeh ve ark. [21] ise GA, ACO ve Harmoni Arama (HS) yöntemleri ile PSO yöntemini karşılaştırmış ve PSO ile daha hafif çerçeve tasarımları elde edildiğini göstermiştir. Talatahari ve ark. [22], hibrid CSS yöntemini bu alana uyarlamış; Veladi [23] ise CBO ile elde edilen sonuçları, CSS, ACO, GA ve PSO ile karşılaştırmıştır. Kaveh ve Nasrollahi [24] CSS yöntemini üç farklı çelik çerçeve örneğinde test etmiş, Mohammadi ve Ghasemof [25] ise hızlı yakınsama eğrisine sahip bir CSS yöntemi önermiştir.

Gholizadeh ve Moghadas [21] ayrıca Quantum PSO (QPSO) ve geliştirilmiş IQPSO yöntemlerini çelik çerçeve tasarımında denemiştir. Mohammadi ve Sharghi [26] dış merkezli çaprazlı çelik çerçeveler için pratik bir yöntem sunarken, Gholizadeh [27] modifiye FA (MFA) algoritmasını ileri ardışık dalgali ve geri yayımlı ardışık sinir ağı modeli (WCFBP) ile kullanarak analiz süresini azaltmayı hedeflemiş ve MFA'nın FA'ya göre daha etkin sonuçlar verdiğini göstermiştir. Mansouri ve ark. [28]

merkezi çaprazlı çerçeveler için optimum sismik tasarımı gerçekleştirmiştir.

Son olarak, çok yeni bir meta-sezgisel yöntem olan Okul Tabanlı Optimizasyon (SBO), ilk kez çelik çerçevelerin performansa dayalı optimum sismik tasarımı için kullanılmış ve tüm test problemlerinde, TLBO ve diğer yöntemlere göre daha az hesaplama çabasıyla daha hafif tasarımlar sunduğu gözlemlenmiştir [29–31]. Bu çalışmada ise çelik çerçevelerin optimum sismik tasarımı MC-TLBO algoritması kullanılarak yatay yer değiştirme ve plastik sınırlayıcıları sağlayan bir algoritma önerilmiştir. Analizler sonucunda hem analiz sayısı hem de ağırlık bakımından en uygun tasarımlar elde edilmesi amaçlanmıştır.

MATERYAL ve YÖNTEM

Performansa Dayalı Sismik Tasarım

Çelik çerçevelerin algoritmalara dayalı optimum sismik tasarımı için MATLAB programlama dili ile OpenSees yapı analiz programı etkileşimli şekilde kullanılmıştır. Bu kapsamda, performansa dayalı sismik analiz için statik itme analizine (pushover analizi) dayalı deplasman katsayıları yöntemi tercih edilmiştir. Analiz süreci OpenSees programı aracılığıyla gerçekleştirilmiş, elde edilen analiz verileri MATLAB ortamına aktarılmıştır.

Yapı davranışının en gerçekçi şekilde belirlenmesini sağlayan yöntem zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz olsa da bu çalışmada daha pratik ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan Statik İtme Analizi tercih edilmiştir. FEMA-440 [6] kılavuzunda tanımlanan doğrusal olmayan Statik İtme Analizi yöntemi, yapı kapasite eğrisinin elde edilmesinde kullanılmıştır.

Malzemenin doğrusal-elastik olmayan davranış özelliklerinin modellenmesi için doğrusal olmayan malzeme tanımı esas alınmıştır. Plastikleşme bölgelerinin modellenmesinde, yoğunlaştırılmış plastisite ve sonlu uzunluktaki mafsallı bölge modelleri yerine, fiber kesit modeli tercih edilmiştir. Bu model, plastik mafsallı davranışını daha gerçekçi biçimde yansıttığının yanı sıra, bu çalışmada kullanılan karşılaştırmalı örneklerde de yaygın olarak kullanıldığından dolayı tercih edilmiştir.

Yapının performans değerlendirmesi, her kat hizasında hesaplanan göreceli kat ötelenme oranları ve plastikleşme bölgeleri esas alınarak, belirli tehlike seviyeleri altında gerçekleştirilmiştir.

Performansa Dayalı Sismik Tasarım (PBSD) kapsamında spektral ivme grafiğinin elde edilmesi için öncelikle düşey yük kombinasyonları altında yapının statik analizi yapılmış ve birinci doğal titreşim periyodu belirlenmiştir. Bu analizde kullanılan düşey yükleme durumu, (Q_G^{SC}) şeklinde tanımlanmış ve analiz sürecinin temel girdilerinden biri olmuştur:

$$Q_G^{SC} = \begin{cases} Q_D \\ Q_D + Q_L \\ 1.4Q_D \\ 1.2Q_D + 1.6Q_L \end{cases} \quad (1)$$

Burada, Q_D ve Q_L sırasıyla ölü ve hareketli yükü göstermektedir.

Statik analiz sonucunda elde edilen birinci doğal titreşim periyoduna (T) bağlı olarak her bir performans seviyesinde tasarım spektrumu için spektral ivme (S_a) şu aşağıdaki gibi hesaplanır [7].

$$S_a^i = \begin{cases} S_{XS}/B_S (0.4 + 3 T/T_0^i) & \text{if } 0 < T \leq 0.2T_0^i \\ S_{XS}/B_S & \text{if } 0.2T_0^i < T \leq T_0^i \\ S_{X1}/(B_1 T) & \text{if } T > T_0^i \end{cases} \quad (2)$$

$$S_{XS} = F_a S_S^i \text{ ve } S_{X1} = F_v S_1^i \quad i=IO, LS, CP \quad (3a)$$

$$T_0^i = (S_{X1} B_S)/(S_{XS} B_1) \quad i=IO, LS, CP \quad (3b)$$

Burada, S_S^i ve S_1^i sırasıyla i 'ci performans seviyesi için kısa ve 1.0 sn'lik spektral ivme (S_a) katsayılarıdır. F_a , F_v sırasıyla S_S^i ve S_1^i katsayılarına bağlı olarak kısa ve 1.0 sn periyot (yerel zeminlere göre belirlenen) katsayılarıdır. Deprem Tehlike seviyesi, zemin sınıfı, lokal koordinatlara bağlı olarak ABD Jeoloji Araştırmaları Kurumu internet sitesinden alınır. T_0^i , tasarım spektrumunun sabit hızlanma ve sabit hız bölgelerinin aşağıdaki gibi kesiştiği periyottur: bu çalışmada S_S^i ve S_1^i değerleri [1] den alınmıştır.

Bu çalışmada kullanılan analiz yöntemi statik itme analizi; elastik sınırın ötesindeki yapı kapasitesini tahmin etmek için kullanılan doğrusal olmayan analiz yöntemidir. Bu yöntemde; sabit düşey yükler ile beraber yatay yüklerin yapıya adım adım artırılarak uygulanması prensibine dayanmaktadır. Her adımda değişen rijitlik değerleri hesaba katılarak kuvvet ve deplasman ilişkisi belirlenmektedir. Statik itme analizinde kullanılan hesaplama yöntemlerine esas alınacak eleman davranışları şu şekildedir [2]; Kuvvet kontrollü davranış ve deformasyon kontrollü davranıştır. Kuvvet kontrollü davranışta eleman dayanımları izin verilen dayanım değerlerinden küçük olmalıdır. Deformasyon kontrollü davranışta ise eleman deformasyonları izin verilen deformasyon değerlerini aşmamalıdır. Bu çalışmada çelik sünek bir malzeme olduğundan dolayı hesaplamalar deformasyon kontrollü davranış esas alınarak yapılmıştır. Statik itme analizinde; hedef yer değiştirme değerinin 1.5 katına ulaşıncaya kadar sabit düşey yükler altında yanal yükler monoton olarak artırılır. Her performans seviyesi için hedef deplasman; tasarım depreminde olması muhtemel en büyük deplasman olup deplasman katsayıları yöntemiyle aşağıdaki denklemle hesaplanır: Yer değiştirmeye dayalı yöntemde kapasite eğrisinin elde edilmesi ve yapı performansının değerlendirilmesi için hesaplanan hedef deplasman değeri (δ_t) şu şekildedir [3].

$$\delta_t^i = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad i = IO, LS, CP \quad (4)$$

Burada, C_0 , yapının tepe yer değiştirmesini spektral yer değiştirme ile ilişkilendiren katsayıyı, C_1 : Doğrusal davranış ile doğrusal olmayan davranış arasında bağlantıyı sağlayan katsayıyı, C_2 : Histeristik şeklin yapı üzerindeki davranışını gösteren katsayıyı, S_a^i : i -ninci performans seviyesi için yapının efektif birinci doğal periyoduna (T_e) karşılık gelen spektral ivme (S_a) değeridir.

Hedef deplasman hesabı için gerekli olan efektif birinci temel periyodu şu şekilde hesaplanır:

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (5)$$

Burada, T_i : Yapının elastik temel periyodu, K_i : Yapının elastik rijitliği, K_e : Yapının elastik efektif rijitliğini gösterir.

Hedef deplasman değerinin hesabında kullanılan katsayılarla ilişkin detaylı bilgiler FEMA-440 [3]'dan alınmaktadır.

Statik itme eğrisinin elde edilmesi için kullanılan sabit düşey yükleme (Q_G^{PBD}) aşağıdaki şekildedir:

$$Q_G^{PBD} = 1.1(Q_D + Q_L) \quad (6)$$

Bu denklemde azaltılmamış hareketli yükün %25'i göz önüne alınmaktadır [2].

Doğrusal olmayan statik itme analizinde sismik kuvvetlerin yatay dağılımı şu denklemle ifade edilir [2].

$$C_{vx} = \left(\frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^{ns} w_i h_i^k} \right) \quad (7)$$

Bu denklemde: ns binadaki kat sayısını göstermektedir. H_s toplam yapı yüksekliğini, H_m m 'nci katın temelden yüksekliğini, G_s yapının toplam sismik ağırlığını, G_m m 'nci her kat için sismik ağırlığını, k yapının periyoduna bağlı bir katsayı (bu çalışmada $k=2$ olarak alınmıştır) ve C_{vx} yatay yüklemelerin dağıtım katsayısını göstermektedir.

Yapılara etki eden yanal yük modelleri 1. moda bağımlı olarak; Dikdörtgen, Ters üçgen ve Parabolik şeklindedir. Yük modelleri, bir tasarım depremindeki atalet kuvvetlerinin dağılımını temsil etmek için kullanılır. Atalet kuvvetlerinin dağılımının depremin şiddeti (elastik olmayan şekil değiştirmelerin büyüklüğü) ve depremin süresiyle değişeceği açıktır. Sabit yük modeli yapı davranışı, yapı yüksek mod etkilerinin tesirinde kalmıyorsa ve lokal bir akma mekanizması meydana geliyorsa kullanılabilir. Aksi taktirde uzun periyotlu yapılarda ($T > 2.5$ sn) sabit yük modeli statik itme analizinde yanlış sonuçlara sebep olmaktadır [4].

Statik itme analizinde deplasman kontrollü ve kuvvet kontrollü analiz olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Deplasman kontrollü yöntemde, yapının en üst kat ağırlık merkezinin yanal deplasman değeri, δ_t hedef deplasman değerinin 1.5 katına ulaşıncaya kadar iteratif artan yanal yük (C_{vx}) uygulanmaktadır. Kuvvet kontrollü yöntemde ise yapı belli bir yanal yük değerine ulaşıncaya kadar yanal yük iteratif şekilde artırılır. İteratif şekilde artırılan yanal yüklemenin her bir adımının sonunda yapının tepe noktası deplasmanı ile taban kesme kuvveti değerleri kullanılarak statik itme eğrisi (kapasite eğrisi) çizilir. Statik itme analizi sonucunda, kapasite eğrisi, yanal yer değiştirme, görelî ötelenme (katlar arası) oranı ve elemanlarda meydana gelen plastikleşme oranları elde edilir.

Her performans seviyesi için hesaplanan hedef yer değiştirme değerlerinin kapasite eğrisiyle kesiştiği noktalara performans noktaları adı verilir. Bu noktaların yer değiştirme değerleri yönetmelikte verilen her bir performans seviyesine ait yer değiştirme sınır değerleri ile karşılaştırılarak yapının deprem tehlike seviyelerine

karşılık gelen performans seviyeleri belirlenmektedir. Bu şekilde öngörülen deprem etkisi altındaki performans hedefinin gerçekleşip gerçekleşmediği kontrol edilir. Her performans seviyesi için elde edilen hedef deplasman değerlerinin kapasite eğrisinde tepe deplasmanını kestiği noktalara performans noktaları denir. Eğer bu noktalar izin verilen performans değerlerini aşmıyorsa yapı performansı güvenle sağlanmaktadır.

Performans seviyeleri için izin verilen katlar arası ötelenme oranı yüzde olarak performans seviyelerine bağlı olarak; IO performans seviyesi: $d_{all}^{IO} < 0.7$, LS performans seviyesi: $0.07 < d_{all}^{LS} < 2.5$, CP performans seviyesi: $2.5 < d_{all}^{CP} < 5$ verilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan moment aktaran çelik çerçevelerin performansa dayalı optimum sismik tasarım algoritması aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

Adım 1. Yapı geometrisi, malzeme modelinin ve zemin sınıfının tanımlanması.

Adım 2. Eleman en kesitlerinin atanması.

Adım 3. (1) denklemi ile verilen yükleme durumları (Q_G^{SC}) için doğrusal statik analizin OpenSees [5] yapı analiz programınca icra edilmesiyle, 1. temel periyodun (T) elde edilmesi.

Adım 4. Deprem tehlike seviyesine karşı gelen performans seviyesinin atanması.

Adım 5. Zemin sınıfına ve lokal koordinatlara bağlı olarak deprem tehlike haritalarından her performans seviyesi için S_5^i ve S_1^i değerlerinin tespit edilmesi ($i=IO, LS, CP$)

Adım 6. S_5^i ve S_1^i değerlerine bağlı olarak F_a ve F_v değerlerinin belirlenmesi.

Adım 7. (2) denklemi ile köşe periyodun (T_0^i) ve spektral ivmenin (S_a^i) hesaplanması.

Adım 8. Hedef deplasman değerinin hesaplanması için C_0, C_1, C_2 ve C_3 katsayı değerlerinin FEMA 356'dan [6] alınması.

Adım 9. (4) ve (3) denklemleri ile sırasıyla efektif temel periyodun (T_e) ve hedef deplasman değerlerinin (δ_t^i) hesaplanması.

Adım 10. Statik itme analizi için (5) denklemiyle sabit düşey yüklemenin verilmesi ve parabolik değişen yatay yükleme modelinin (C_{vx}) (6) denklemiyle hesaplanması.

Adım 11. Şekil 2'de verilen malzeme bakımından Doğrusal olmama etkilerini içeren bi-doğrusal malzeme modelinin tanımlanması, geometri bakımından Doğrusal olmama etkilerini içeren II. mertebe etkilerinin tanımlanması.

Adım 12. Tepe kontrol noktasının ulaşabileceği en büyük yanal deplasman değeri olarak göçme öncesi performans seviyesi için hesaplanan hedef deplasmanın (δ_t^{CP}) 1,5 katı olarak tanımlanması.

Adım 13. Tepe kontrol noktasının alabileceği en büyük deplasman değerine ulaşıncaya kadar monoton değişen deplasman artım adım sayısının (st) tanımlanarak (bu çalışmada $st=1000$ alınmıştır) OpenSees'de statik itme analizinin icra edilmesi.

Adım 14. 12. adımda açıklanan her deplasman artımında yapılan statik itme analizi sonunda hesaplanan taban kesme kuvvetleri ile statik itme eğrisi elde edilir.

Adım 15. Kapasite eğrisi idealleştirilerek her performans seviyesine karşı gelen hedef deplasman değeri yapı kapasite eğrisi üzerinde tespit edilerek performans noktaları belirlenir.

Adım 16. Performans noktalarının (7) denklemiyle verilen sınır değerlerini sağlıyorsa yapı performansı hedeflenen performans seviyelerini sağlıyorsa Adım 17'ye git, hedeflenen performans seviyelerini sağlamıyorsa Adım 2'ye git.

Adım 17. (8) ve (9) denklemleriyle yapılan plastik dönme kontrollerinin sağlanıyorsa performans dayalı sismik tasarımı bitir, aksi halde Adım 2'ye git.

Optimum Tasarım Modelleme Süreci

Amaç fonksiyonu şu şekilde ifade edilir:

$$\min W(I) = \sum_{k=1}^{ng} \rho_k A_k \sum_{j=1}^{nm} L_j \quad (8)$$

$$I = \{I_1, I_2, \dots, I_{ng}\}, \quad I_p = \{i_1, i_2, \dots, i_{pro}\}.$$

Burada $W(I)$ tüm çerçeve ağırlığı, ng çerçevenin eleman grup sayısını, ρ_k k -nıncı eleman grubunun özgül ağırlığını ve A_k k -nıncı en kesit alanı, nm k -nıncı gruptaki eleman sayısı, L_j j -inci eleman uzunluğu, $I = \{I_1, I_2, \dots, I_{ng}\}$ optimum tasarımda elde edilen bir tasarım ve I_k k -nıncı eleman grubuna ait en kesit alanını gösterir. Her bir eleman grubu hazır çelik profil listelerinden alınan AISC-W tipi bir profili temsil etmektedir.

Ceza amaç fonksiyonu, $\varphi(I)$ ile ifade edilmektedir.

$$\varphi(I) = W(I)(1 + g^i(I)^w) \quad i=IO, LS, CP \quad (9)$$

Burada w ceza katsayı olup bu çalışmada 2 alınmıştır [20]. $g^i(I)$ ise i 'ninci performans seviyesine ait sınırlayıcı ihlal ifadesi olup aşağıdaki olduğu gibi ifade edilmektedir.

$$g^i(I) = \sum_{j=1}^{nm} g(I)_{\sigma,j} + g(I)_{d,l}^i \quad i=IO, LS, CP \quad (10)$$

$$j=1,2,\dots,nm \quad l=1,2,\dots,ns$$

Burada, ns çerçevedeki kat sayısını gösterir [29]. $g(I)_{\sigma,j}$ ve $g(I)_{d,l}^i$ dayanım ve göreceli ötelenme (katlar arası) oranı sınırlayıcıları için ihlal değerleri olup aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$g(I)_{\sigma,j} = \begin{cases} 0 & \text{eğer } g(I)_{\sigma,j} \leq 0 \\ g(I)_{\sigma,j} & \text{eğer } g(I)_{\sigma,j} > 0 \end{cases} \quad (11a)$$

$$g(I)_{d,l}^i = \begin{cases} 0 & \text{eğer } g(I)_{d,l}^i \leq 0 \\ g(I)_{d,l}^i & \text{eğer } g(I)_{d,l}^i > 0 \end{cases} \quad (11b)$$

Dayanım sınırlayıcıları denklemleri şu şekildedir.

$$\frac{P_u}{\varphi_c P_n} < 0.2 \text{ ise } g_{\sigma,j}(I) = \left[\frac{P_u}{2\varphi_c P_n} + \left(\frac{M_{u1}}{\varphi_b M_{n1}} + \frac{M_{uy}}{\varphi_b M_{ny}} \right) \right] - 1 \leq 0 \quad j=1,2,\dots,nm \quad (12a)$$

$$\frac{P_u}{\varphi_c P_n} \geq 0.2 \text{ ise } g_{\sigma,j}(I) = \left[\frac{P_u}{2\varphi_c P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{u1}}{\varphi_b M_{n1}} + \frac{M_{uy}}{\varphi_b M_{ny}} \right) \right] - 1 \leq 0 \quad j=1,2,\dots,nm \quad (12b)$$

Burada, M_{ux} ve M_{uy} sırasıyla x ve y eksenindeki eğilme momentini, M_{nx} ve M_{ny} x ve y ekseninde hesap edilen eğilme dayanımını, P_u eksenel basınç yükünü, P_n hesaplanan basınç dayanımını gösterir. φ_c eksenel

basınca maruz elemanlar için dayanım katsayısı olup 0.85 alınır ve ϕ_b eğilmeye maruz elemanlar için dayanım katsayısı olup 0.90 alınır.

Katlar arası göreceli ötelenme (katlar arası) oranı sınırlayıcı fonksiyonu;

$$g(I)_{d,l}^i = \frac{d_l^i}{d_{all}^i} - 1 \leq 0 \quad i=IO,LS,CP ; l=1,2,...,n_s \quad (13)$$

Burada, d_l^i i-inci performans seviyesinde l-ninci kattaki IO, LS ve CP seviyesinde, d_{all}^i i-inci performans seviyesi için izin verilen maksimum katlar arası ötelenme oranı olup tüm performans seviyeleri için sırasıyla %0.7 %2.5, ve %5.0 olarak verilmiştir [7].

JA Kullanılarak Çelik Çerçevelerin Performansa-Dayalı Optimum Sismik Tasarımı

Jaya algoritması (JA) Rao tarafından icat edildi. JA algoritmasının uygulanışı çok pratik ve basittir. Bu Algoritma bir çok sınırlayıcı sız ve sınırlayıcı optimizasyon problemlerinde kullanıldı [8]. İlk icat edildikten sonra hemen uygulamanın basit olması nedeni ile birçok çalışmada kullanıldı [9, 10].

JA kelime olarak Zafer anlamına gelmektedir. Bu Algoritma arama işlemi süresince en kötü çözümden uzaklaşarak en iyi çözüme yaklaşma prensibine dayanmaktadır. JA algoritmasının diğer bir özelliği ise algoritmaya özel parametreler kullanmaz. Her algoritmada olduğu gibi popülasyon sayısı (ps) ve maksimum iterasyon sayısı (it_{max}) kullanılmaktadır.

$$I_{ng}^{ps} = I_{min} + rand(ng) * (I_{max} - I_{min}) \quad (14)$$

JA algoritmasının diğer önemli bir özelliği de tasarım değişkenlerini modifiye edecek tek bir denklemi vardır. Bu özelliği sayesinde uygulanması basittir. k-nıncı çerçeve değişkeni için I_k^i i-inci çerçeve aşağıdaki şekilde değiştirilir.

$$I_k^{i,yeni} = I_k^i + r_{1,k}(I_k^{en iyi} - [I_k^i]) - r_{2,k}(I_k^{en kötü} - [I_k^i]) \quad (15)$$

Burada, $I_k^{i,yeni}$ yeni çerçeve değişkeni, $r_{1,k}$ ve $r_{2,k}$ [6] k-nıncı çerçeve değişkeni için rastgele üretilen rastgele sayılar, $I_k^{en iyi}$ ve $I_k^{en kötü}$ bir iterasyonda üretilen en iyi ve en kötü k-nıncı değişkenini ifade etmektedir. Bu denklemde, $r_{1,k}(I_k^{en iyi} - [I_k^i])$ ifadesi en iyi çerçeveye yaklaşma eğilimini gösterirken, $r_{2,k}(I_k^{en kötü} - [I_k^i])$ ifadesi ise en kötü çerçeveden iraksama eğilimini göstermektedir. $r_{1,k}$ ve $r_{2,k}$ rastgele sayılar çerçeve uzayında daha etkili arama olayını sağlamaktadır. $[I_k^i]$ mutlak değer, arama yeteneğini geliştirme yeteneği sağlar [8]. Tüm çerçeve değişkenleri değiştirildikten sonra yeni çerçeve değişkenleri eski çerçeve değişkenleri ile karşılaştırılır. Eğer yeni çerçeve değişkeninin cezalandırılmış amaç fonksiyon değeri önce çerçeve değişkeninin cezalandırılmış amaç fonksiyon değerinden küçük ise yeni çerçeve değişkeninin yerini alır. JA ile tüm çerçeve değişkenleri değiştirildikten sonra bir adet iterasyon için döngü tamamlanmış olmaktadır. Maksimum döngü sayısı aşıldığında arama işlemi sonlandırılır. Özet olarak, JA aşağıdaki Adımlardan

oluşur: (i) Algoritmayı başlatmak, (ii) mevcut çerçeveleri değiştirmek ve yeni çerçeveleri elde etmek (iii) mevcut çerçeveleri yenileriyle değiştirmek (iv) arama işlemini sonlandırır.

JA kullanılarak moment dirençli çelik çerçevelerin performansa dayalı optimum sismik tasarım formülasyonu aşağıda adım adım açıklanmıştır.

Adım 1: Ja algoritmanın başlatılması

Sensivite analizi yapılarak popülasyon sayısı (ps), maksimum döngü sayısı (it_{max}) belirlenir. Çerçevenin grup sayısı (ng) [29] da verilmiştir. Ayırık değişkenli çelik çerçeve listesinden rastgele olarak ps satır ve ng sütundan oluşan bir matris ile kesitler seçilir. JA için seçilen kesitler matris formunda aşağıda verilmiştir;

$$Pop = \begin{bmatrix} I_1^1 & I_2^1 & \dots & \dots & I_{ng}^1 \\ I_1^2 & I_2^2 & \dots & \dots & I_{ng}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_1^{ps-1} & I_2^{ps-1} & \dots & \dots & I_{ng}^{ps-1} \\ I_1^{ps} & I_2^{ps} & \dots & \dots & I_{ng}^{ps} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Bu matristeki her satır rasgele oluşturulmuş bir çelik tasarımını belirtir, I_k^i , i-inci çelik çerçevenin k-nıncı gruptaki elemanıdır. I^i -inci çelik çerçeve vektörüdür. (I^i), çerçevenin hesaplanan amaç ceza fonksiyonudur. Bu değerler denklem (1)-(15) kullanılarak hesaplanmaktadır. it_{max} , optimizasyon işleminde kullanılan maksimum döngü sayısıdır. Bu döngü sayısı $it=0$ olarak ayarlanır. Her adımda artırılarak maksimum döngü sayısına kadar artırılır.

Adım 2: Döngü sayısını artır, $it=it+1$.

Adım 3: En iyi ve en kötü çerçevenin belirlenmesi

Popülasyondaki en iyi $\phi(I^{min})$ ve en kötü $\phi(I^{max})$ çerçeveler belirlenir. Başlangıç çerçeve sayacı $id=0$, ($id=1,2, \dots, np$).

Adım 4: Çerçeve sayısını artır, $id=id+1$

Adım 5: Yeni çerçevelerin oluşturulması

Dördüncü çerçevenin tüm çerçeve değişkenlerini Denklem (20) tarafından id-inci çerçeveyi değiştirerek yeni çerçeveyi oluştur. Eğer $W(I^{i,yeni}) < W(I^i)$ veya önceki çerçeve uygunsuzsa Denklem (1)-(15) yardımı ile yeni çerçeveyi cezalandırılmış amaç fonksiyonunu $\phi(I^{i,yeni})$ hesapla, aksi taktirde Adım 4'e git. Eğer $\phi(I^{i,yeni}) < \phi(I^i)$, id-inci çerçeve değişkeninin yerine yeni çerçeveyi yaz, aksi taktirde id-inci çerçeveyi değiştirme.

Adım 6: Eğer $id > np$, Adım 7'ye git, aksi taktirde Adım 4'e git.

Adım 7: JA nın sonlandırılması

Eğer $it > it_{max}$, çerçeve optimum çerçeve olarak kısıtlama ihlali olmadan minimum amaç fonksiyon değeri ile atayın ve optimizasyon işlemini sonlandırın, aksi takdirde Adım 2'ye gidin.

TLBO Kullanılarak Çelik Çerçevelerin Performansa-Dayalı Optimum Sismik tasarımı

Optimizasyon; sınırlayıcılar altında en iyi sonucu bulmaya yönelik yapılan çalışmadır. Son geliştirilen

sezgisel optimizasyon yöntemlerinden biriside Öğretme-öğrenme esaslı optimizasyon yöntemi (TLBO) algoritmasıdır[11]. TLBO'nun, sınırlayıcı ve sınırlayıcısız optimizasyon problemlerinde etkin olduğu belirlenmiştir. TLBO farklı mühendislik çerçevelerinin optimizasyonuna uygulanmıştır [12-14].

TLBO öğretmen-öğrenci etkileşimlerinden ilham alınarak karmaşık problemlerin optimizasyonunu gerçekleştirmek için geliştirilen bir optimizasyon yöntemidir.

Herhangi bir sınıf, öğretmen ve öğrencilerden oluşan topluluk olarak düşünülebilir. Bir sınıftaki ortalama başarı durumunun öğretmenin bilgi ve tecrübesiyle bağlantılı olduğu söylenebilir. Bununla birlikte öğretmen ne kadar bilgili ve tecrübeli olursa olsun sınıftaki öğrencilerin de öğretmen tarafından kendilerine aktarılan bilgileri özümseyebilecek kapasitede olmaları gereklidir. Sonuç olarak, öğretmenin kalitesi ve öğrencilerin kapasitesi arasında sürekli bir etkileşim bulunmaktadır.

Öğretmen bilgisini öğrencileriyle paylaşarak dersi en iyi şekilde öğretmeye çalışmaktadır. Dolayısıyla sınıfın başarı durumu direkt olarak öğretmenin bilgi ve becerisine bağlıdır. Her öğretmen sınıfının başarısını arttırmayı amaçlamakla birlikte bu durum öğretmen tarafından öğrencilere aktarılan bilginin kalitesinin yanında sınıftaki öğrencilerin kalitesine de bağlıdır [13]. Bu durumda öğretmen kalitesi ve öğrenci başarısı arasında sürekli bir etkileşim olduğunu göstermektedir ve bu şekilde öğretmenin (aynı zamanda sınıfın) başarısının sürekli olarak artırılması sağlanır.

TLBO'nun ayırt edici özelliği, diğer sezgisel optimizasyon yöntemleri kendilerine özgü parametreler kullanırken, TLBO bu tip parametrelere ihtiyaç duymadan sadece popülasyon sayısı (ps) ve maksimum iterasyon sayısı (it_{max}) gibi genel kontrol parametrelerini kullanmasıdır.

Adım 1: TLBO algoritmasının başlangıcı

Popülasyon sayısı (ps), maksimum iterasyon sayısı (it_{max}) ve gruplara bölünen çerçevenin grup sayısı (ng) belirlenir. Ayrık değişkenli çelik çerçeve listesinden rast gele olarak ps satır ve ng sütundan oluşan bir matris ile kesitler seçilir. TLBO için seçilen kesitler matris formunda denklem 16 da verilmiştir.

Adım 2: Döngü sayısını artırır, $it=it+1$.

Adım 3: Öğretme aşaması

Cezalandırılmış çelik çerçevenin en küçük amaç fonksiyonu (I^{min}), değerini elde etmek için kullanılan kesitleri öğretmen olarak ata $I^{öğretmen} = I^{min}$. Öğretmen, sınıf ortalamasını ileriye götürmeyi hedeflemektedir, bu amaçla, TLBO'da I^i çerçeve yeniden üretilir ve yeni çerçeve, $I^{i,yeni}$ şu şekilde elde edilir:

$$I^{i,yeni} = I^i + rand(I^{öğretmen} - T_f I^{ortalama})$$

Burada $rand$ 0 ve 1 aralığında random sayıları, T_f öğretim faktörü olup 0 veya 1 olarak rastgele seçilir. $I^{ortalama}$ çerçeve popülasyonundaki aynı grup olarak isimlendirilen kesitlerin ortalama değeridir. Hesaplaması aşağıda verilmiştir:

$$I^{ortalama} = \left[m \left(\text{pop} \left(\sum_{i=1}^{ps} I_1^i \right) \right), m \left(\text{pop} \left(\sum_{i=1}^{ps} I_2^i \right) \right), \dots \right. \\ \left. \dots, m \left(\text{pop} \left(\sum_{i=1}^{ps} I_{ng}^i \right) \right) \right]$$

Burada $m(\text{pop}(.))$ i'den np'ye kadar çerçeve değişkenlerinin ortalaması, $\varphi(I^{i,yeni})$ denklem (1) – (15) kullanılarak hesaplanan yeni çerçevenin cezalandırılmış amaç fonksiyonudur. eğer $\varphi(I^{i,yeni}) < \varphi(I^i)$ ise yeni çerçevenin cezalandırılmış amaç fonksiyonu $\varphi(I^{i,yeni})$ popülasyona dahil edilerek önceki atılır. Aynı zamanda $I^i = I^{i,yeni}$ olacak şekilde yeni kesitler eski kesitlerin yerini alır.

Adım 4: Öğrenme aşaması

Öğrenme aşamasında döngü sayacı $lp=0$ olarak ayarlanır.

Adım 5: $lp=lp+1$.

Adım 6: i-inci ve j-inci çerçeve arasındaki öğrenme süreci aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.

$$I^{i,yeni} = I^i + rand(I^i - I^j) \text{ if } \varphi(I^i) < \varphi(I^j) \\ I^{i,yeni} = I^j + rand(I^j - I^i) \text{ if } \varphi(I^j) < \varphi(I^i)$$

Burada, I^i ve I^j , sırasıyla popülasyonda rasgele seçilen çelik çerçevelerdir. $\varphi(I^{i,yeni})$ değerini hesaplayıp; $\varphi(I^{i,yeni})$, $\varphi(I^i)$ 'den küçükse, yeni çerçeve öncekiyle değiştirilir.

Adım 7: Eğer $lp > ps-1$, ise Adım 8'e git, değil ise Adım 5'e git.

Adım 8: Eğer $it > it_{max}$, ise Adım 9'a git, değil ise Adım 2'ye git.

Adım 9: TLBO'yu sonlandırma kriteri

Arama işlemini sonlandırın ve minimum ağırlık çerçevenin kısıtlama ihlali olmadan, $\varphi(I^{opt}) = \varphi(I^{min})$ olarak optimum çerçeveye atayın.

MC-TLBO Kullanılarak Çelik Çerçevelerin Performansa-Dayalı Optimum Sismik Tasarımı

Frekans kısıtlamalarıyla kafes çerçevelerinin optimizasyonu için çok sınıflı öğretme-öğrenme tabanlı bir yöntem ilk kez Farshchin ve arkadaşları tarafından önerilmiştir. Bu önerilen çok sınıflı yaklaşım, optimizasyon sürecinin başında keşif yeteneğini artırarak daha verimli bir arama yapılmasını sağlar. MC-TLBO, eğitim süreci konseptini tek bir sınıf yerine birden fazla paralel sınıf içeren bir okula benzettir. MC-TLBO algoritması, iki aşamalı bir prosedürle çalışır: İlk aşamada, paralel sınıflar arama alanını keşfeder; ikinci aşamada ise, ilk aşamanın en iyi çözümleri, değiştirilmiş bir TLBO algoritması için başlangıç popülasyonu oluşturacak bir süper sınıf içinde birleştirilir [15].

Bu çalışmada önerilen MC-TLBO, standart TLBO'nun iki önemli yönüyle farklılık gösterir. İlk fark, MC-TLBO'da öğrenme aşamasındaki çerçeve sayısı ile ilgilidir. Standart TLBO algoritmasında her yinelemede

popülasyon iki kez değiştirilir. İlk değişiklik, öğretmenin (yani en iyi çerçevenin) öğretim aşamasında güncellenmesiyle yapılır. İkinci değişiklik ise, rastgele seçilen iki çerçevenin birleştirilmesiyle öğrenme aşamasında gerçekleşir. Ancak, bu sınırlı değişim yaklaşımının optimizasyon sürecinde yakınsamayı yavaşlattığı gözlemlenmiştir. Bu sorunu çözmek ve arama sürecini hızlandırmak amacıyla, MC-TLBO algoritmasında, öğretim aşamasında sadece öğretmen çerçevesi değiştirilir, diğer tüm çerçeveler ise öğrenme aşamasında güncellenir.

İkinci fark ise, başlangıç popülasyonunun oluşturulma biçimidir. Standart TLBO'da, başlangıç popülasyonu doğrudan algoritmanın popülasyon büyüklüğü kadar çerçeve ile belirlenirken, MC-TLBO'da başlangıç çerçeveleri daha farklı bir şekilde oluşturulur. MC-TLBO, başlangıç popülasyonunun büyüklüğünün on katı kadar farklı çerçeve üretir ve bu çerçeveler arasından en uygun olanları seçerek ilk popülasyonu oluşturur. Bu sayede, arama süreci standart TLBO'ya göre daha iyi bir başlangıç ile başlatılabilir.

MC-TLBO kullanılarak çelik çerçevelerin performansa dayalı optimum sismik tasarımı aşağıdaki adımlara sahiptir:

Adım 1: MC-TLBO algoritmasını başlatın:

Nüfus boyutunu (ps), maksimum yineleme sayısını, it_{max} ayarlayın. Çelik çerçevelerin nüfus boyutunun on katı ($30 \times ps$) olarak rastgele oluşturun. Diğerlerinden daha az cezalandırılmış amaç fonksiyonuna sahip çerçeveleri seçin.

Adım 2: Standart TLBO algoritmasındaki 1 ve 8 adımları arasındaki süreçler takip edilerek 9. adıma geçilmektedir.

Adım 9: MC-TLBO'yu sonlandırma kriteri: Arama işlemini sonlandırın ve minimum ağırlık çerçevesini kısıtlama ihlali olmadan, $\varphi(I^{opt}) = \varphi(I^{min})$ olarak optimum çerçeveye atayın.

TARTIŞMA

Sayısal Örnekler

Bu çalışmada MC-TLBO algoritmasının etkinliğini görmek için iki örnek moment aktaran düzlemsel çelik çerçeve seçilmiştir. Bu çerçeveler aynı zamanda TLBO ve JA algoritmaları kullanılarak bir çalışma yapılmış bu çalışmanın sonuçları MC-TLBO ile kıyaslanmıştır. Yapının Doğrusal olmayan davranışını temsil etmek için yayılı akmanın malzeme boyunca meydana geldiği varsayılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan moment aktaran çelik çerçeveler daha önce statik itme analizini gerçekleştirmek için [16, 17] tarafından çalışılmıştır. Algoritma yöntemlerinin etkinliğini göstermek için ACO [17], GA [17] ve CSS [18] tarafından optimum sismik çerçeve tasarımları yapılmıştır. Statik İtme analizleri OpenSees platformu [5] tarafından yapılırken, ana program Matlab'da kodlanmıştır. Performansa dayalı optimum sismik çerçeve tasarımları Matlab ve OpenSees programlarının etkileşimli çalışmasıyla icra edilmiştir.

Önerilen üç algoritma, her çerçeve örneği için farklı başlangıç popülasyonları kullanılarak otuz kez çalıştırılmıştır. Bu çerçeveler arasında optimum ağırlık, optimum ağırlığı elde etmek için gereken yapısal analiz sayısı tablolarda sunulmuştur.

Optimum çerçeve plastik mafsalları dağılımı, her üç performans seviyeleri için gösterilmektedir. Kiriş ve kolon elemanları için akma dönmeleri aşağıdaki denklemlerle FEMA-356'ya [4] göre hesaplanır:

$$\text{Kolonlar için } \theta_y = \frac{ZF_{ye}l_b}{6EI_b} \quad (17a)$$

$$\text{Kirişler için } \theta_y = \frac{ZF_{yl}l_c}{6EI_c} \left(1 - \frac{P}{P_{ye}}\right) \quad (17b)$$

Burada, F_{ye} beklenen akma dayanımı, Z plastik kesit modülü, l_b ve l_c kiriş ve kolon uzunlukları, I_b ve I_c kiriş ve kolon atalet momentleri, E : elastisite modülü, P : hedef deplasmanda eleman eksenel kuvveti, P_{ye} : beklenen eksenel kuvvet ($Z=A_g \cdot F_{ye}$)

Kiriş ve kolon elemanları için hesaplanan plastik dönmelerinin (θ) her performans seviyesinde aşağıda verilen sınır değerleri aşmaması gerekir FEMA 273, 1997 /Tablo 5-6'da verilmiştir [19]. IO performans seviyesi: $0.8\theta_y < \theta < \theta_y$, LS performans seviyesi: $\theta_y < \theta < 6\theta_y$ ve CP performans seviyesi: $6\theta_y < \theta < 8\theta_y$.

Bu çalışmada kullanılan malzeme özellikleri: çekme modülü katsayısı elastik modülün %3'üne eşit, gerilme-kuvvet yer değiştirme eğrisi bi-doğrusaldır. Eleman gruplarına atanan kesitler Amerikan Çelik Konstrüksiyon Enstitüsü'ndeki (AISC) [20] mevcut 267 geniş başlıklı kiriş (W kesitleri) listesinden seçilmiştir.

3 Katlı 4 Açıklıklı Moment Çerçevesi

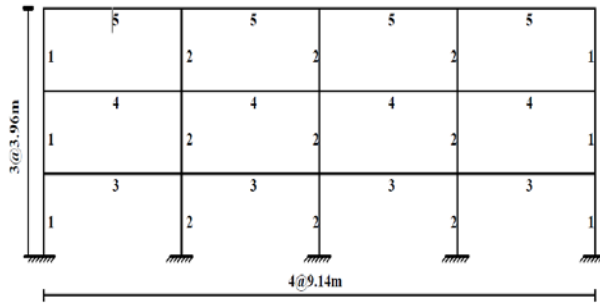
Üç algoritma kullanılarak optimum sismik çerçeve için 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesi 5 gruptan oluşmaktadır. 27 elemanlı yapının eleman gruplandırılması Şekil 1'de gösterilmiştir. Elastisite modülü $E = 29.000$ ksi (200 GPa) olarak alınmıştır. 2,2 kip/ft (32 kN/m) sabit yerçekimi yükü birinci ve ikinci katlara, 1,97 kip/ft (28,7 kN/m) yerçekimi yükü ise çatı kirişlerine uygulanmıştır. Sismik ağırlıklar birinci ve ikinci katların her biri için 1054 kips (4688 kN) ve çatı katı için 1140 kips (5071 kN) olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmada sunulan algoritmalar sadece iki parametre kullanmaktadır. Bu parametreler popülasyon sayısı (ps) ve maksimum iterasyon sayısı (it_{max}) dir. TLBO algoritması için kullanılan en uygun popülasyon sayısı değeri ($ps=30$), kısıtlama ihlali yüzdesi (CV) ve standart sapma (SD) ve yapısal analizlerin sayısı Tablo 1'de gösterilmiştir. Her ne kadar TLBO $ps = 10$ değeri için en hızlı yakınsama oranına sahip olsa da, optimum sonuçlar açısından ps 'nin en uygun değeri 30 olarak elde edilmiştir [21].

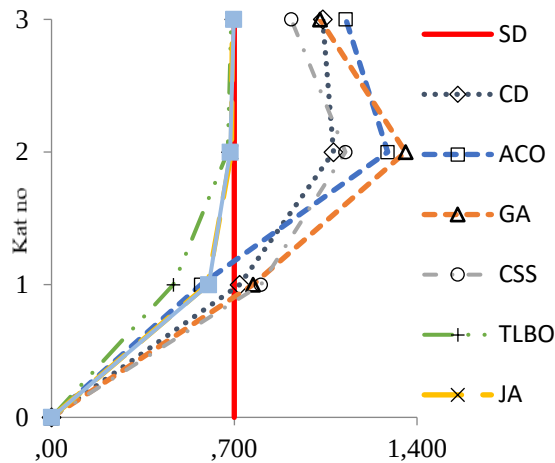
Sonuç olarak JA ve TLBO algoritmaları ile göz önüne alındıklarında diğer algoritmalarla kıyasla genellikle çok daha etkili çalıştığı görülmektedir. ACO, 3900, GA, 6800, CSS ve TLBO 4500 analiz sonucunda sonlandırmış iken JA ve MC-TLBO 3600 analiz sonucunda başarıya ulaşmıştır.

Tablo 1. 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesi için optimum çerçeve sonuçları

Eleman grubu	CD	ACO	GA	CSS	JAYA	TLBO	MC-TLBO
1-C1	W14X257	W33X118	W12X45	W24X62	W24X76	W24X68	W24X76
2-C2	W14X311	W40X183	W40X235	W21X48	W40X149	W40X199	W40X149
3-B1	W33X118	W24X131	W18X86	W21X48	W40X167	W40X149	W40X167
4-B2	W30X116	W8X28	W14X90	W21X44	W44X230	W44X230	W44X230
5-B3	W24X68	W30X116	W36X135	W21X44	W24X84	W27X84	W24X84
En iyi ağırlık (KN)	412,90	283,40	303,90	250,60	376,50	375,48	361,62
Ortalama ağırlık (KN)	-	294,30	321,50	-	393,94	387,04	400,04
En kötü ağırlık (KN)	-	303,20	339,70	-	414,54	405,63	441,83
Standart sapma (KN)	-	7,57	14,33	-	17,95	11,43	36,38
Ortalama analiz sayısı	-	3.900	6.800	4.500	4.500	3.600	3.600
Sınırlayıcı ihlal oranı (%)	105,68	144,99	151,00	106,67	4.500	3.600	3.600



Şekil 1. 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesi



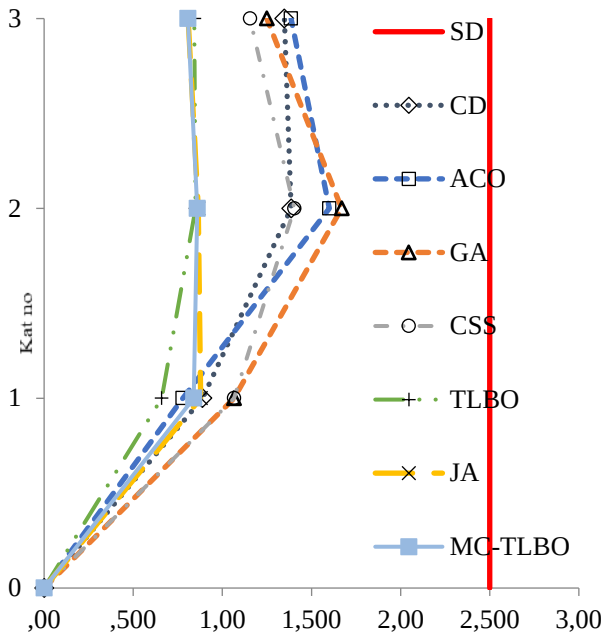
Şekil 2. 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesi IO performans seviyesinde görel ötelenme (katlar arası) oranı

Şekil 2-3-4'te görüldüğü gibi IO performans seviyesinde katlar arası ötelenme oranı sınır değere yaklaşmış iken LS ve CP performans seviyesinde sınır değerin oldukça gerisinde kalmaktadır. Bu sonuç gösteriyor ki hedef performans seviyesi IO seçildiğinde çok daha ağır

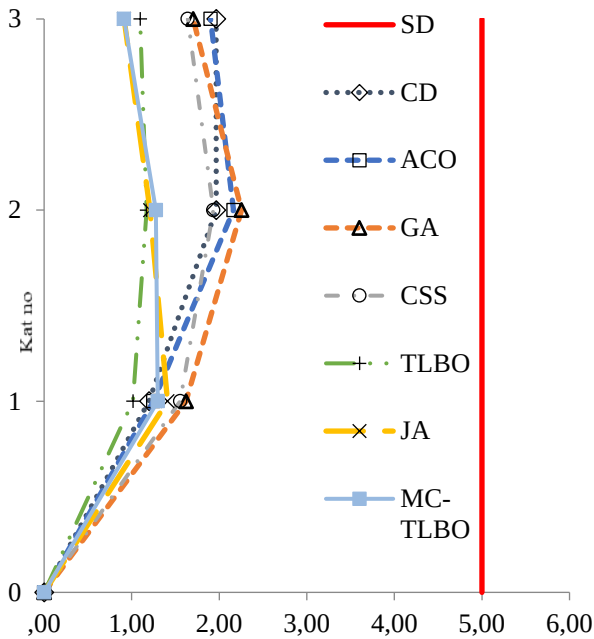
çerçeveler elde edilmektedir. Eğer hedef performans seviyesi LS veya CP seçilirse çok daha hafif çerçeveler söz konusu olabilmektedir. Bu nedenle AISC'de belirlenen yapıların kullanım amacına göre çerçeve hayati önem taşımaktadır.

CD 'de sınırlayıcı ihlal oranı (%) 105.68, ACO, 144.99, GA'da 151.00 ve CSS 'de ise 106,67 olarak belirlenmiştir. Bu dört önceki çalışmada IO seviyesinde deplasman sınırlayıcılarını aştığı görülmüştür. Bu nedenle bu algoritmaların sonuçları denklem 13'e göre ceza kat sayısı uygulanmıştır. Sınırlayıcı ihlal oranları JA ve TLBO ile karşılaştırılan MC-TLBO algoritmalarında 0.00'dır.

Diğer bir sınırlayıcı değer ise plastik dönme sınırlayıcılarıdır. Plastik dönme değerleri (Plastik mafsallaşma) ise SE deprem düzeyinde IO seviyesinde herhangi bir plastikleşme meydana gelmemiştir. DE deprem düzeyinde LS performans seviyesinde ve ME deprem düzeyinde CP performans seviyesinde kaldığı ve herhangi bir mekanizma durumunun oluşmadığı görülmektedir. Mekanizma durumu OpenSees programı tarafından kontrol edilmekte olup mekanizma durumuna geçen çerçeveleri başarısız Statik İtme analizi olarak tanımlamakta ve en yüksek ceza kat sayısı ile çarparak uzaklaştırmaktadır.



Şekil 3. 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesi LS performans seviyesinde görece ötelenme (katlar arası) oranı

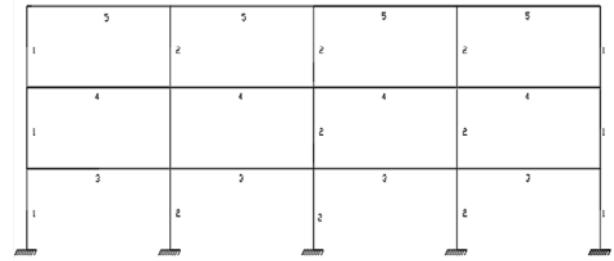


Şekil 4. 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesi CP performans seviyesinde görece ötelenme (katlar arası) oranı

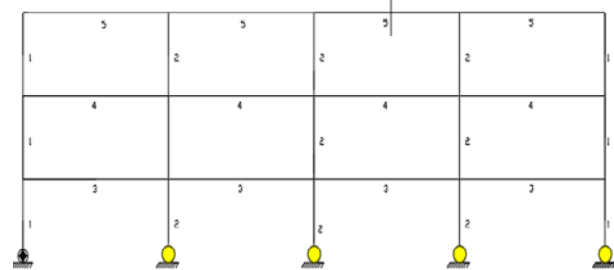
Şekil. 8’de çalışılan TLBO, JA ve MC-TLBO ve literatür çalışmasında sunulan diğer algoritma çerçeve ağırlık değerleri için yakınsama eğrileri gösterilmiştir. Bu yakınsama eğrilerine bakıldığında hemen hemen aynı başlangıç değerlerine sahip olan algoritmalar ilk adımdan itibaren MC-TLBO değeri hızlıca düşmekte daha sonra ise diğer algoritmalar gibi aşama aşama aşağı inmektedir.

Bu çalışmanın amaçlarından biri olan başlangıçta hızlı düşüş ve sonrasında standart algoritma olan TLBO ya yakın ve paralel bir eğimde seyredilmesi beklenmektedir. Bu çalışmanın grafiği MC-TLBO’nun en az diğer algoritmalar kadar etkili çalıştığını göstermiştir.

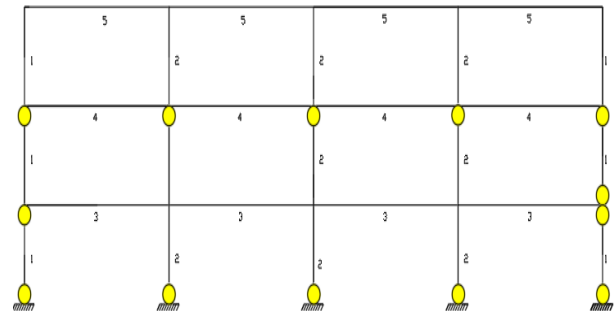
Her ne kadar TLBO ps için 10 değeri için en hızlı yakınsama oranına sahip olsa da, ps’nin en uygun değeri 30 olarak elde edilmiştir[30]. Eleman sayısı ve grup sayısı arasındaki ilişkiden yola çıkılarak kesit seçme işlemi MATLAB tarafından algoritma vasıtasıyla yapıldığından çok uzun süreç almamaktadır. Yapının eleman sayısı ve kat sayısı büyüdükçe programın analiz süresi artmaktadır. Bu nedenle gruplamanın iyi seçilmesi analizde başarısızlık oranını azaltmaktadır. Diğer bir yararı yapının kolon-kolon ve kolon-kiriş geometrik sınırlayıcıları sayısını azaltmakta olduğu için uygun kesitler ile yapılması doğru bir karar olacaktır.



Şekil 5. 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesi IO performans seviyesinde plastikleşen kolon ve kirişler



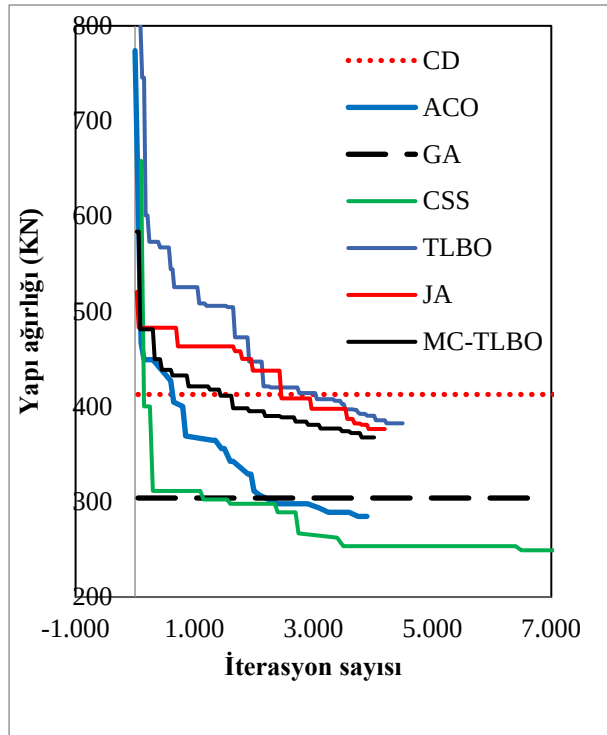
Şekil 6. 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesi LS performans seviyesinde plastikleşen kolon ve kirişler



Şekil 7. 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesi CP performans seviyesinde plastikleşen kolon ve kirişler

Şekil 5'te verilen 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesinin IO, LS ve CP performans seviyelerindeki Plastik dönme (Plastik mafsallaşma) biçimleri verilmiştir. Bu şekillere bakıldığında bazı kritik noktalarda bulunan elamanların bölgelerinin Şekil 5'te SE deprem düzeyinde IO performans seviyesinde kaldığını görmekteyiz. Şekil 6'da DE deprem düzeyinde LS performans seviyesinde ve Şekil 7'de ME deprem düzeyinde LS performans seviyesinde kaldığı ve herhangi bir mekanizma durumunun oluşmadığı görülmektedir.

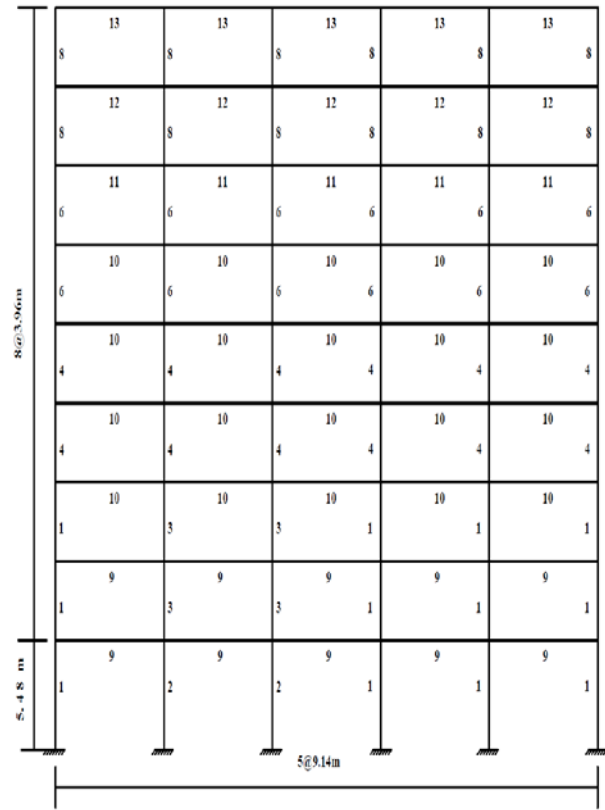
Şekil 8'de Yakınsama eğrilerine bakıldığında dikkate değer diğer bir durum ise MC-TLBO diğer algoritmalarla kıyasla daha hızlı sonuçlara erişilebildiğini göstermektedir. Ancak ACO 7.57 KN, GA 14.33, TLBO 17.95, JA 11.43 ve MC-TLBO 36.38 standart sapma göstermiştir. Bu durum bir algoritmanın farklı başlangıç popülasyonu için çok değişik çerçeve sonuçları üretebileceğini göstermiştir. Bir başka deyişle, algoritmanın kaderinin başlangıç popülasyonuna bağlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle çalışma uzayının genişliği ve nihai çerçeveye yakın kesit ataması yapan mühendisin deneyimi ortaya bir daha konulmuş olur.



Şekil 8. 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesi yakınsama eğrileri

9 Katlı 5 Açıklıklı Moment Çerçevesi

5 açıklıklı-9 katlı çelik çerçeve çelik çerçeve, Şekil 9'da gösterildiği gibi ele alınmıştır. Boyutlar, uygulanan yükleme sistemi ve eleman grupları da bu şekilde verilmiştir. Elastisite modülü 200 GPa (29.000 ksi) olarak alınmıştır.



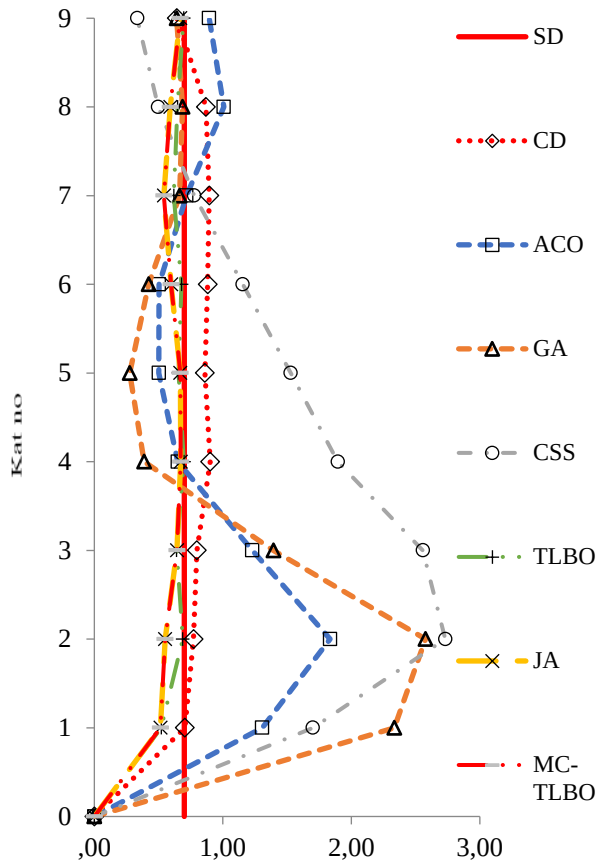
Şekil 9. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesine ait IO performans seviyesinde katlar arası görece ötelenme oranı

Yapının elemanları Şekil 9'da gösterildiği gibi 13 gruba ayrılmıştır. Birden sekizinci kata kadar olan kirişlere 32 kN/m (2,2 kip/ft) sabit yerçekimi yükü uygulanırken, 28,7 kN/m (1,97 kip/ft) yerçekimi yükü ise çatı kirişlerine uygulanmıştır. Sismik ağırlıklar, birinci kat için 1111 kips (4942 kN), ikinci ile sekizinci katların her biri için 1092 kips (4857 kN) ve çatı katı için 1176 kips (5231 kN) olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmada sunulan algoritmalar yine sadece iki parametre kullanmaktadır. Bu parametreler popülasyon sayısı (ps) ve maksimum iterasyon sayısı (it_{max}) dir. TLBO algoritması için kullanılan en uygun popülasyon sayısı değeri ($ps=30$) CV ve SD, Tablo 2'de sırasıyla yapısal analizlerin sayısı, kısıtlama ihlali yüzdesi ve standart sapma anlamına gelmektedir.

Tablo 2'de analiz sayıları ACO [33] için 7.000, GA [33] için 11500, CSS[9] için 10.000, JA ve TLBO ile karşılaştırılan MC-TLBO algoritması analiz sayısı için 7.000 seçilmiştir. MC-TLBO önceki örnekte olduğu gibi analiz sayısı bakımından diğerlerine oranla daha hızlı sonuca erişilmektedir. Ağırlık bakımından CSS'den daha ağırdır. Diğer algoritmalar ACO, GA, CSS, JA ve TLBO algoritmalarına göre daha hafiftir. Literatürde verilen CD hariç ACO, GA ve CSS bu üç algoritmanın sınır değerleri aşarak bu ağırlığa ulaştıklarını göz önünde bulundurmakta yarar vardır.

Sonuç olarak JA ve TLBO algoritmaları ile göz önüne alındıklarında diğer algoritmalarla kıyasla genellikle çok daha etkili çalıştığı görülmektedir.

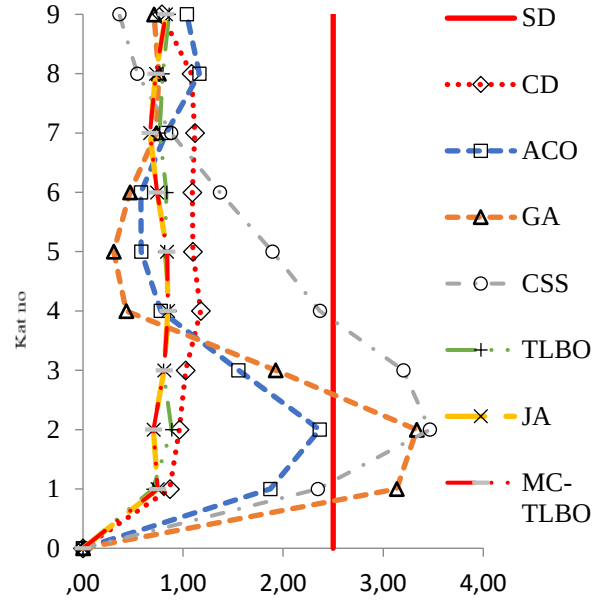


Şekil 10. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesine ait IO performans seviyesinde katlar arası görelî ötelenme oranı

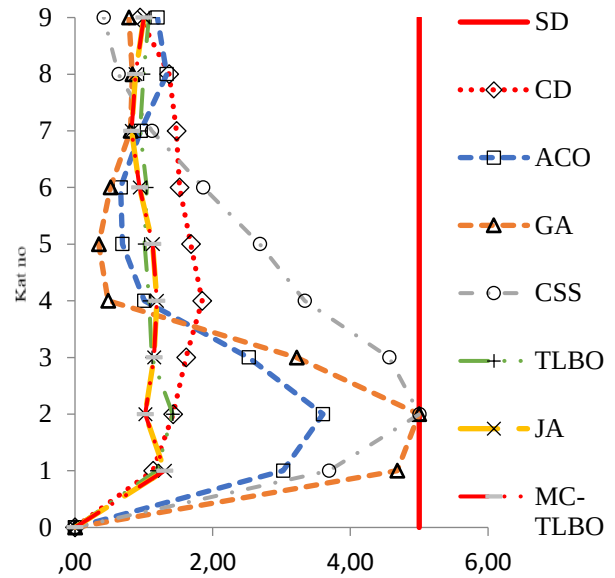
Şekil 10. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesinin IO, Şekil 11. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesinin LS ve Şekil 12. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesinin CO performans seviyelerindeki katlar arası ötelenme oranları verilmiştir. IO performans seviyesinde ACO, GA ve CSS kullanarak elde edilen yatay yer değiştirmeler verilen %0,7'lik değeri aştığı görülmektedir. LS performans seviyesinde GA ve CSS kullanılarak elde edilen yatay yer değiştirmeler verilen %2,5'lik değeri aştığı görülmektedir. CP performans seviyesinde ise herhangi bir sınır değer koşulu aşılmamıştır. %2,5'lik sınır değer koşulu sağlanmıştır.

Şekil 13'te verilen 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesinin IO, Şekil 14'te verilen 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesinin LS, Şekil 15'te verilen 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesinin CP performans seviyelerindeki Plastik dönme (Plastik mafsallaşma) formlarıdır. Bazı kritik noktalarda bulunan elamanların Şekil 13'te SE deprem düzeyinde IO performans seviyesini geçerek LS performans seviyeye ulaştıklarını

ancak Mekanizma durumunun oluşmadığını görmekteyiz. Şekil 14'te DE deprem düzeyinde LS performans seviyesinde ve Şekil 15'te ME deprem düzeyinde CP performans seviyesinde kaldığı ve herhangi bir mekanizma durumunun oluşmadığı görülmektedir.



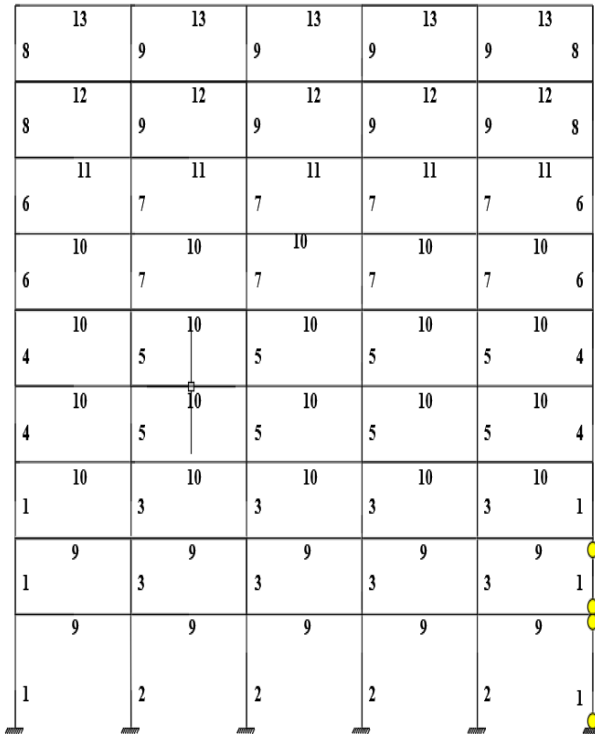
Şekil 11. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesine ait LS performans seviyesinde katlar arası görelî ötelenme oranı



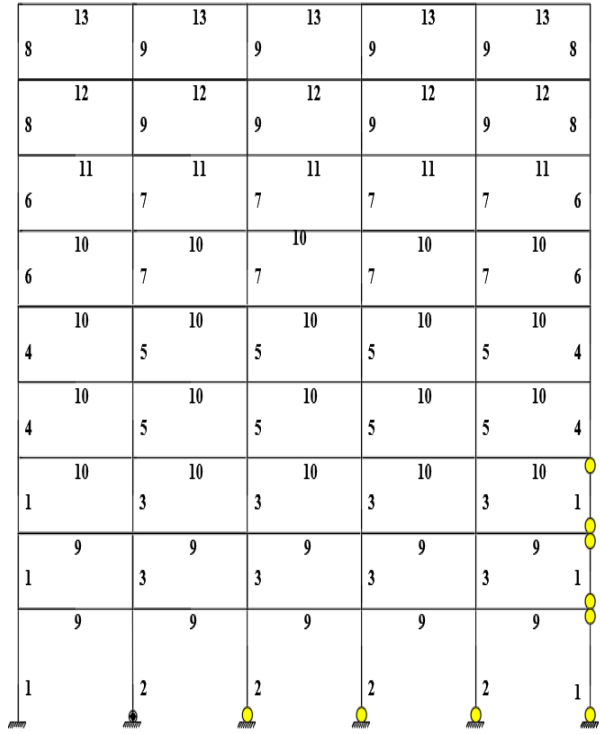
Şekil 12. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesine ait CP performans seviyesinde katlar arası görelî ötelenme oranı

Tablo 2. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesi için optimum çerçeve sonuçları

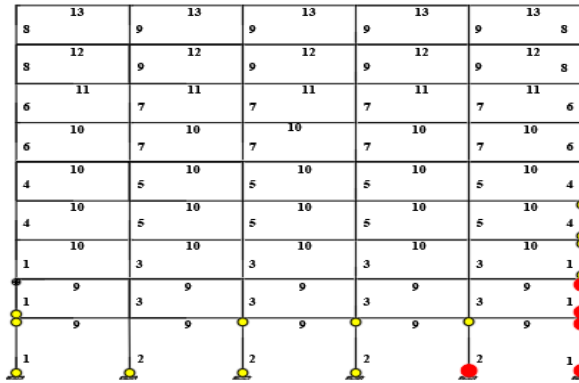
Eleman grubu	CD	ACO	GA	CSS	JAYA	TLBO	MC-TLBO
1-C1	W14X370	W30X235	W27X217	W21X83	W12X96	W12X45	W16X45
2-C2	W14X500	W27X235	W14X233	W40X167	W33X318	W27X194	W40X149
3-C3	W14X455	W36X280	W27X307	W36X135	W36X330	W40X149	W36X135
4-C4	W14X283	W36X280	W27X307	W33X130	W33X141	W21X44	W12X45
5-C5	W14X370	W24X279	W44X290	W40X149	W36X150	W40X278	W40X215
6-C6	W14X257	W30X116	W27X114	W24X62	W24X94	W36X160	W27X84
7-C7	W14X283	W36X170	W24X162	W40X167	W30X116	W30X90	W30X99
8-C8	W14X233	W10X77	W18X176	W40X167	W14X109	W21X44	W24X55
9-B1	W36X160	W14X82	W10X88	W18X40	W36X135	W40X149	W40X149
10-B2	W36X135	W30X235	W36X260	W21X83	W33X141	W33X141	W36X135
11-B3	W30X99	W21X68	W24X62	W30X99	W40X211	W30X99	W33X118
12-B4	W27X84	W27X114	W40X149	W30X116	W27X94	W27X84	W30X90
13-B5	W24X68	W16X36	W6X25	W33X130	W18X106	W21X55	W21X48
En iyi ağırlık (kN)	1.859,30	1.552,60	1.651,10	926,30	1.371,56	1.185,66	1.087,15
Ortalama ağırlık (kN)	-	1.633,90	1.757,10	-	1.442,00	1.225,11	1.206,37
En kötü ağırlık (kN)	-	1.707,60	1.900,00	-	1.516,35	1.274,57	1.321,52
Standart sapma (kN)	-	46,80	81,31	-	72,47	45,30	117,23
Ortalama analiz sayısı	-	7.000	11.500	10.000	7.000	7.000	7.000
Sınırlayıcı ihlal oranı (%)	0	160.00	369.00	662.00+5.00	0.00	0.00	0.00



Şekil 13. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesi IO performans seviyesinde plastikleşen kolon ve kirişler



Şekil 14. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesi LS performans seviyesinde plastikleşen kolon ve kirişler

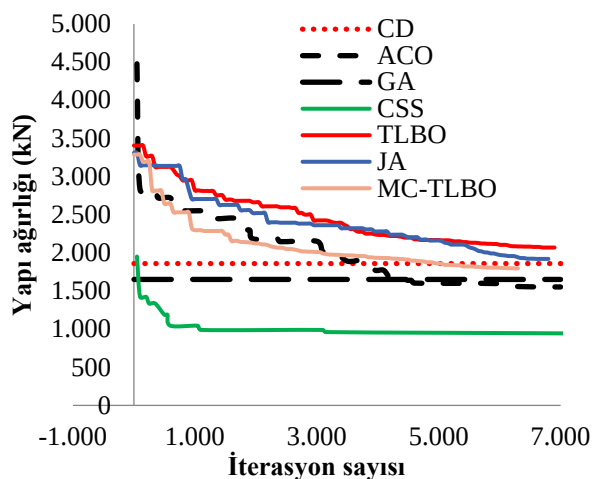


Şekil 15. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesi CP performans seviyesinde plastikleşen kolon ve kirişler

Plastik dönme değerleri (plastik mafsallaşma) incelendiğinde; SE deprem düzeyinde IO performansı seviyesinde sınırlı plastikleşmelerin olduğu, DE deprem düzeyinde LS seviyesinde kaldığı, ME deprem düzeyinde ise CP performans seviyesini aşmadığı ve herhangi bir mekanizma oluşumunun gözlenmediği anlaşılmaktadır.

Şekil 13'te 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesinin IO, LS ve CP performans seviyelerinde katlar arası ötelenme oranları verilmiştir. JA, TLBO, MC-TLBO ve CD ile elde edilen ötelenme oranları IO, LS ve CP performans seviyelerinde sınırlayıcıları sağlamaktadır.

Bu çalışmada optimum çerçevenin katlar arası ötelenme oranı IO performans seviyesinde kalmaktadır. Diğerleri ise katlar arası ötelenme oranı sınır değerin gerisinde kalmaktadır. JA, TLBO, MC-TLBO ve CD algoritmaları ile elde edilen çerçevelerin katlar arası ötelenme oranı SE deprem düzeyinde IO performans seviyesinde DE ve ME deprem düzeylerinde ise LS performans seviyesinde kalmaktadır.



Şekil 16. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesi yakınsama eğrisi

Tablo 2’de verilen analizler sonucunda ve şekil 16’da verilen yakınsama değerlerine göre CD 1.859,30 kN, ACO 1.552,60 kN, GA 1.651,10 kN, CSS 926,30 kN,

TLBO 1.371,56 kN, JA 1.185,66 kN ve MC-TLBO 1.087,15 kN değerleri elde edilmiştir.

Şekil 16'da 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesi yakınsama eğrisine bakıldığında dikkate değer diğer bir durum ise MC-TLBO diğer algoritmalara kıyasla daha hızlı sonuçlara erişilebildiğini göstermektedir. Ancak ACO 46,80 kN, GA 81,31 kN, JA 72,47 kN, TLBO 45,30 kN ve MC-TLBO 117,23 kN standart sapma göstermiştir. Diğer bir yandan standart sapma değerlerinin birinci örnekte ve ikinci örnekte farklı olduklarını görmekteyiz. Ancak birinci örnek ile ikinci örnek arasında yapı ağırlıklarının dikkate alınarak bir yüzde şeklinde ifade edilmesi gerekmektedir. Üç katlı yapı için ACO 2,67, GA 4,72, JA 4,77, TLBO 3,04 ve MC-TLBO 10,06'dır. 9 katlı yapı için ACO 3.01, GA 4.92, JA 5.28, TLBO 3.82 ve MC-TLBO 10.78'dir. Bu sonuç her algoritma kendi içinde çalışma süreçlerine göre farklı standart sapmalar ürettiğini göstermiştir. Ancak örnekler değiştiğinde standart sapmanın en iyi ağırlığa bölümünün yapının yüksekliğinden ve eleman sayısından bağımsız olarak gerçekleştiği belirlenmiştir. Algoritmalar arasındaki standart sapmanın farklı olması ise global araması iyi olan bir algoritmanın büyük olması demektir. Global araması kötü olan bir algoritma ise sürekli birbirine yakın değerler üreterek standart sapmasını azaltmaktadır. Keşif-Global (exploration) ve sömürü-Lokal (exploitation), arama yoluyla algoritmalarda problem çözmenin iki temel unsurudur. Bu iki kısımdan oluşan algoritma kısımları arasında ne kadar iyi denge kurulursa başarıya ulaşma şansı o kadar artmaktadır [43].

SONUÇLAR

Bu çalışmada, çelik çerçevelerin performansa dayalı optimum sismik tasarımı için MC-TLBO, JA ve TLBO algoritmaları kullanılmış ve iki farklı yapı örneği üzerinde uygulanmıştır. Dört açıklıklı, üç katlı çelik çerçeve örneğinde analiz sayısı sınırlandırılmadan bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiş; beş açıklıklı, dokuz katlı çelik çerçevede ise analiz sayısı sınırlandırılmıştır. Her iki yapı örneği karşılaştırıldığında, analiz sayısı artırılrsa dahi sonuçların anlamlı ölçüde değişmediği gözlemlenmiştir. Bu durum, algoritmaların çözüm uzayında belirli bir noktadan sonra yakınsama sağladığını göstermektedir.

Gelecek çalışılmalarda, algoritmaların lokal ve global arama aşamaları arasında hibrit yaklaşımların uygulanmasıyla analiz sürelerinin daha da kısaltılması mümkündür. Popülasyon büyüklüğü üzerinde yapılan değişiklikler, analiz süresi ve elde edilen optimum çerçeveler üzerinde anlamlı bir etki yaratmamış ve literatürdeki sınırlar aşılmamıştır.

Başlangıç popülasyonlarının seçimi, elde edilen analiz sonuçlarını doğrudan etkilemiştir. Bu bağlamda, MC-TLBO algoritmasının diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha az analiz sayısı ile daha verimli sonuçlar elde ettiği belirlenmiştir. Bu çalışmada ilk defa MC-TLBO algoritması, performansa dayalı optimum sismik tasarım amacıyla önerilmiş ve geçerliliği iki farklı

çelik çerçeve örneği ile test edilmiştir. MC-TLBO algoritması ile elde edilen sonuçlar; CD, ACO, GA, CSS, JA ve TLBO gibi yöntemlerle kıyaslandığında, optimum ağırlık ve yapı analiz sayısı açısından üstün performans sergilemiştir.

JA algoritması, tek aşamalı yapısı ve hızlı çözümler üretmesi nedeniyle tercih edilmiştir. TLBO ise çift aşamalı yapısıyla lokal ve global aramayı dengeli şekilde gerçekleştirmesi sebebiyle seçilmiştir. MC-JA kombinasyonu da test edilmiş ancak mevcut yöntemlere kıyasla belirgin bir avantaj sağlamadığı için önerilmemiştir. Öte yandan, TLBO algoritmasının ilk aşamasına çoklu sınıfla başlanması, optimum sonuçları olumlu yönde etkileyerek analiz sayısını azaltmış ve yöntemin daha paralel ve hızlı çalışmasını sağlamıştır. Her yapının farklı deprem tehlike seviyelerine karşı farklı performans kriterlerine göre değerlendirilmesi için MATLAB ortamında özel bir algoritma geliştirilmiştir. Statik itme analizleri ise OpenSees açık kaynaklı yapısal analiz programı ile gerçekleştirilmiştir. OpenSees'in arayüzsüz yapısı analiz sürelerini kısaltmakla birlikte, mühendislik uygulamaları açısından ileri düzey kullanıcı bilgisi gerektirdiği için yaygın mühendislik pratiğinde sınırlı kullanılmaktadır.

KAYNAKÇA

[1] Khoshnoud, H.R. and K. Marsono, Assessment of FEMA356 nonlinear static procedure and modal pushover analysis for seismic evaluation of buildings. *Structural engineering and mechanics: An international journal*, 2012. 41(2): p. 243-262.

[2] Committee, S.V., Performance-based seismic engineering. *Structural Engineers Association of California*, Sacramento, California, 1995.

[3] ATC, S., Evaluation and retrofit of concrete buildings, Rep. ATC-40, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.

[4] Council, B.S.S. and A.T. Council, NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. Vol. 1. 1997: Federal Emergency Management Agency.

[5] FEMA 356, F.E., Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. *Federal Emergency Management Agency: Washington, DC, USA*, 2000.

[6] Fema, A., 440, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. FEMA-440, Redwood City, 2005. 7(9): p. 11.

[7] ASCE, Minimum design loads for buildings and other structures. 2010, ASCE Reston, VA.

[8] Hasan, R., L. Xu, and D. Grierson, Push-over analysis for performance-based seismic design. *Computers & structures*, 2002. 80(31): p. 2483-2493.

[9] Saafan, S.A., Nonlinear behavior of structural plane frames. *Journal of the Structural Division*, 1963. 89(4): p. 557-579.

[10] Soleimani Amiri, F., G. Ghodrati Amiri, and H. Razeghi, Estimation of seismic demands of steel frames subjected to near-fault earthquakes having forward directivity and comparing with pushover analysis results.

The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2013. 22(13): p. 975-988.

[11] Chopra, A.K. and R.K. Goel, A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 2002. 31(3): p. 561-582.

[12] Krawinkler, H. Pushover analysis: why, how, when, and when not to use it. in *Proceedings of the 65th Annual Convention of the Structural Engineers Association of California*. 1996.

[13] Mirjalili, M. and F. Rofooei, The modified dynamic-based pushover analysis of steel moment resisting frames. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2017. 26(12): p. e1378.

[14] Holland, J.H., Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. 1992: MIT press.

[15] Dorigo, M., V. Maniezzo, and A. Colomi, Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part b (cybernetics)*, 1996. 26(1): p. 29-41.

[16] Eberhart, R. and J. Kennedy. A new optimizer using particle swarm theory. in *MHS'95. Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science*. 1995. Ieee.

[17] Kaveh, A. and V.R. Mahdavi, Colliding bodies optimization: a novel meta-heuristic method. *Computers & Structures*, 2014. 139: p. 18-27.

[18] Kaveh, A. and S. Talatahari, Anovel heuristic optimization method: charged system search. *Acta mechanica*, 2010. 213(3): p. 267-289.

[19] Yang, X.-S. Firefly algorithms for multimodal optimization. in *International symposium on stochastic algorithms*. 2009. Springer.

[20] Kaveh, A., et al., Performance-based seismic design of steel frames using ant colony optimization. *Journal of Constructional Steel Research*, 2010. 66(4): p. 566-574.

[21] Gholizadeh, S. and R.K. Moghadas, Performance-based optimum design of steel frames by an improved quantum particle swarm optimization. *Advances in Structural Engineering*, 2014. 17(2): p. 143-156.

[22] Talatahari, S., et al., Optimum Performance-Based Seismic Design Using a Hybrid Optimization Algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014. 2014(1): p. 693128.

[23] Veladi, H., Performance-Based Seismic Design of Steel Frames Utilizing Colliding Bodies Algorithm. *The Scientific World Journal*, 2014. 2014(1): p. 240952.

[24] Kaveh, A. and A. Nasrollahi, Performance-based seismic design of steel frames utilizing charged system search optimization. *Applied Soft Computing*, 2014. 22: p. 213-221.

[25] Ghasemof, A., et al. Multi-objective optimal design of steel MRF buildings based on life-cycle cost using a swift algorithm. in *Structures*. 2021. Elsevier.

[26] Mohammadi, R.K. and A.H. Sharghi, On the optimum performance-based design of eccentrically braced frames. *Steel Compos. Struct*, 2014. 16(4): p. 357-374.

- [27] Gholizadeh, S., Performance-based optimum seismic design of steel structures by a modified firefly algorithm and a new neural network. *Advances in Engineering Software*, 2015. 81: p. 50-65.
- [28] Mansouri, I., et al., Performance based design optimum of CBFs using bee colony algorithm. *Steel and Composite Structures*, 2018. 27(5): p. 613-622.
- [29] Degertekin, S.O. and H. Tutar. Performance-based optimum seismic design of planar steel frames using the jaya algorithm. in *4th Eurasian conference on civil and environmental engineering*. Istanbul (Turkey). 2019.
- [30] Degertekin, S.O., H. Tutar, and L. Lamberti, School-based optimization for performance-based optimum seismic design of steel frames. *Engineering with Computers*, 2021. 37(4): p. 3283-3297.
- [31] Degertekin, S.O. and H. Tutar, Optimized seismic design of planar and spatial steel frames using the hybrid learning based jaya algorithm. *Advances in Engineering Software*, 2022. 171: p. 103172.
- [32] Rodríguez, C.A., et al., Comparative analysis and evaluation of seismic response in structures: Perspectives from non-linear dynamic analysis to pushover analysis. *Applied Sciences*, 2024. 14(6): p. 2504.
- [33] Tschemmernegg, F., On the nonlinear behaviour of joints in steel frames. *Connections in steel structures: Behaviour, strength and design*, 1988: p. 158-165.
- [34] McKenna, F., et al., *OpenSees*. University of California, Berkeley: nd, 2010.
- [35] Rao, R., Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2016. 7(1): p. 19-34.
- [36] Degertekin, S.O., L. Lamberti, and I.B. Ugur, Sizing, layout and topology design optimization of truss structures using the Jaya algorithm. *Applied soft computing*, 2018. 70: p. 903-928.
- [37] Rao, R.V., V.J. Savsani, and D.P. Vakharia, Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-aided design*, 2011. 43(3): p. 303-315.
- [38] Dede, T. and Y. Ayvaz, Structural optimization with teaching-learning-based optimization algorithm. *Structural engineering and mechanics: An international journal*, 2013. 47(4): p. 495-511.
- [39] Degertekin, S. and M. Hayalioglu, Sizing truss structures using teaching-learning-based optimization. *Computers & Structures*, 2013. 119: p. 177-188.
- [40] Shallan, O., H.M. Maaly, and O. Hamdy, A developed design optimization model for semi-rigid steel frames using teaching-learning-based optimization and genetic algorithms. *Structural engineering and mechanics: An international journal*, 2018. 66(2): p. 173-183.
- [41] Farshchin, M., C. Camp, and M. Maniat, Multi-class teaching-learning-based optimization for truss design with frequency constraints. *Engineering Structures*, 2016. 106: p. 355-369.
- [42] Committee, A., Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-16). 2016, American Institute of Steel Construction Chicago.
- [43] Črepinšek, M., S.-H. Liu, and M. Mernik, Exploration and exploitation in evolutionary algorithms: A survey. *ACM computing surveys (CSUR)*, 2013. 45(3): p. 1-33.
- [44] Matlab, S., "Matlab," MathWorks. Natick, MA, 2012.