



XVIII. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ  
26 - 30 Ağustos 2013, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa

## SEZGİSEL ALGORİTMALARLA TOPLAM POTANSİYEL OPTİMİZASYONU (SA/TPO) YÖNTEMİ İLE YAPISAL ANALİZ

Y. Cengiz Toklu<sup>1</sup>

Bilecik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

### ABSTRACT

Structural engineers are accustomed to see and to make applications of optimization techniques in design problems. Effectively there are countless studies in the literature in this direction. On the contrary, the works on structural analysis through optimization techniques are very limited in number, especially if metaheuristic algorithms are exploited in optimization. In this study, this gap is emphasized, and by way of examples on trusses, the superiority of the advanced method on classical methods including the well-known Finite Element Method is shown.

### ÖZ

Yapı mühendisliğinde eniyileme yöntemleri genellikle tasarım konularında uygulanır. Literatürde bu yönde yapılmış pek çok çalışma bulmak kolaydır. Eniyileme yöntemlerinin yapı analizlerinde kullanılması ise, eniyilemede özellikle sezgisel algoritmalar kullanılıyorsa, çok alışılmış bir uygulama değildir. Bu çalışmada bu eksiklik vurgulanmakta ve kafes kirişler üzerinde yapılan uygulamalarla yöntemin sonlu elemanlar yöntemi de dahil bilinen metodlara üstünlüğü gösterilmektedir.

### GİRİŞ

Yapı analizinde kullanılan yöntemlerden bir kısmı minimum enerji ilkesine dayanan tekniklerdir. Söz konusu ilke kararlı denge durumundaki bir yapının toplam potansiyel enerjisinin minimum olduğunu ifade eder. Bu ilkeden yararlanarak genelde iki türlü analiz yöntemi geliştirilmiştir. Bunlardan ilki, ve de çok daha fazla kullanılanı, toplam enerjinin problemin seçilen değişkenlerine göre türevinin ya da varyasyonunun sıfır olması esasına dayanır. İkincisi ise elde edilen enerji denkleminin minimum olduğu noktanın ya da noktaların doğrudan bulunması esasına dayanır.

Bu yaklaşımlardan ikincisi literatürde, ilkenin açıklanması amacıyla, küçük sayıda değişkeni olan problemlerde uygulanmış ve sadece kuramsal değeri olan bir yöntem olarak görülmüştür. Ancak bilgisayar hız ve sızgalarının gittikçe artması, çok değişkenli fonksiyonların minimum ve maksimum noktalarının bulunmasını çok daha verimli bir şekilde sağlayan yeni eniyileme

---

<sup>1</sup> cengiz.toklu@gmail.com

yöntemlerinin geliştirilmesiyle bu ikinci tip uygulamanın da büyük ölçekteki sistemlerde de kullanılabileceği görülmüştür. Sezgisel Algoritmalarla Toplam Potansiyel Optimizasyonu (SA/TPO) yöntemi bu görüşlerle öne çıkmıştır. Yöntemde eldeki yapının şekil değiştirme parametrelerine bağlı olarak toplam enerji ifadesi yazılmakta, sonra da sezgisel algoritmalar yardımıyla toplam enerjiyi minimum yapan şekil değiştirme değerleri, yani yapının en küçük toplam enerjiye karşı gelen şekil değiştirmiş hali bulunmaktadır. Analiz, bu şekil değiştirmelere göre gerilmelerin, iç kuvvetlerin ve bağ kuvvetlerinin bulunmasıyla sona ermektedir. Bildirinin bundan sonraki kısımlarında yöntem açıklanmakta, örnek uygulamalar sunulmakta ve yöntemin verimliliği mevcut metotlarla karşılaştırılmaktadır.

### **SEZGİSEL ALGORİTMALAR VE YAPI STATİĞİNE UYGULAMALARI**

Sezgisel algoritmalar 20. yüzyılın ikinci yarısında ortaya çıkmış, kaynağını matematiksel, biyolojik, fiziksel, sosyolojik san'atsal, hatta siyasal uygulama ve olayların benzetimlerinden alan eniyileme yöntemleridir [1]. Belirgin örnekler verilmek istenirse, bu algoritmaların kuş, karınca ve arı kolonilerinin davranışlarından, çelik üretimindeki tavlama işleminden, canlılardaki kalıtımsal olaylardan, müzik parçalarındaki ahenkten, matematikteki rassal uygulamalardan, ülkelerin büyüyüp imparatorluk haline gelmelerindeki aşamalardan ve buna benzer pek çok ve değişik olgudan esinlenerek geliştirildiği belirtilebilir. Söz konusu algoritmaların çeşitliliği zaman içinde gittikçe artmakta, aynı zamanda ortak kullanımlarla hibrid denilen yeni algoritmalar da ortaya çıkmaktadır. Bu gelişmenin nedeni bilgisayar dünyasında yazılım ve donanım açılarından meydana gelen ilerlemeler olarak görülebilirse de esas neden bu algoritmaların çok çeşitli problemlerin çözümünde son derece başarılı olmalarıdır [2].

Sezgisel algoritmaların çalışma esasları Şekil 1'de verilen akış diyagramında görülebilir. Görüldüğü üzere, algoritmalar, aranan bilgileri içeren bilinmeyenler vektörü, ya da daha genel bir ifadeyle, bilinmeyenler kümesine rassal atamalar yapılarak bir çözüm adayı dizisi eldesiyle başlar. Bu şekilde elde edilen, uygulanan algoritmaya göre sayıca bir ya da daha fazla olan kümelerin eniyilenmesi istenen fonksiyonun değerini kaç yaptığı, problemin kısıtlarını ne ölçüde sağladığı ya da sağlamadığı belirlenir. Bu belirlemelere göre, yine algoritmadan algoritmaya değişen yöntemlerle, yeni bilinmeyenler küme(ler)i oluşturulur. Bu döngü yeteri kadar tekrarlanarak eniyi değerini ya da "neredeyse eniyi" değerini bulunmasına çalışılır. Şekil 1'de görülen akış diyagramındaki kutuların içeriği algoritmalarla göre önemli değişiklikler ve zorluk dereceleri gösterir. "Bedava yemek yok" kuramı [3] uyarınca kullanılan algoritmaların hiçbiri diğerlerine göre genel olarak daha iyi değildir.

Söz konusu algoritmalar bilimin, mühendisliğin eniyileme olarak formüle edilen pek çok problemine başarıyla uygulanmıştır. Yapı mekaniğindeki uygulamalar iki yönlüdür: tasarım ve çözümleme uygulamaları. Bu iki ana dal uygulamaları arasında bir karşılaştırma yapıldığında, söz konusu araştırmaların daha çok tasarım yönünde olduğu, analiz yönünde yapılan çalışmaların ise yeni gelişmekte olduğu açıkça görülmektedir.

#### **Sezgisel algoritmaların yapı tasarımlarına uygulamaları**

Tarif gereği tasarım bir eniyileme eylemidir. Bu bakımdan yapı tasarımında klasik eniyileme yöntemleri çok uzun zamanlardır kullanılmaktadır [4, 5, 6]. Sezgisel algoritmaların gelişmesiyle birlikte bu alanda neredeyse sayısız uygulamalar yapılarak yapıların topolojisi, biçimi ve boyutları ile ilgili eniyilemeler üzerinde çalışılmıştır. Bu konudaki bir genel değerlendirme Kicinger vd. tarafından 2005'de yapılmıştır [7]. Yeni uygulama örnekleri ise

Kaveh ve Talatahari (2010), Bekdas ve Nigdeli (2011), Dede (2013), Zhou (2013), Ahraria ve Ataib (2013), Jahjough vd. (2013) çalışmalarında görülebilir [8 - 13].

### **Sezgisel algoritmaların yapı analizlerinde uygulamaları**

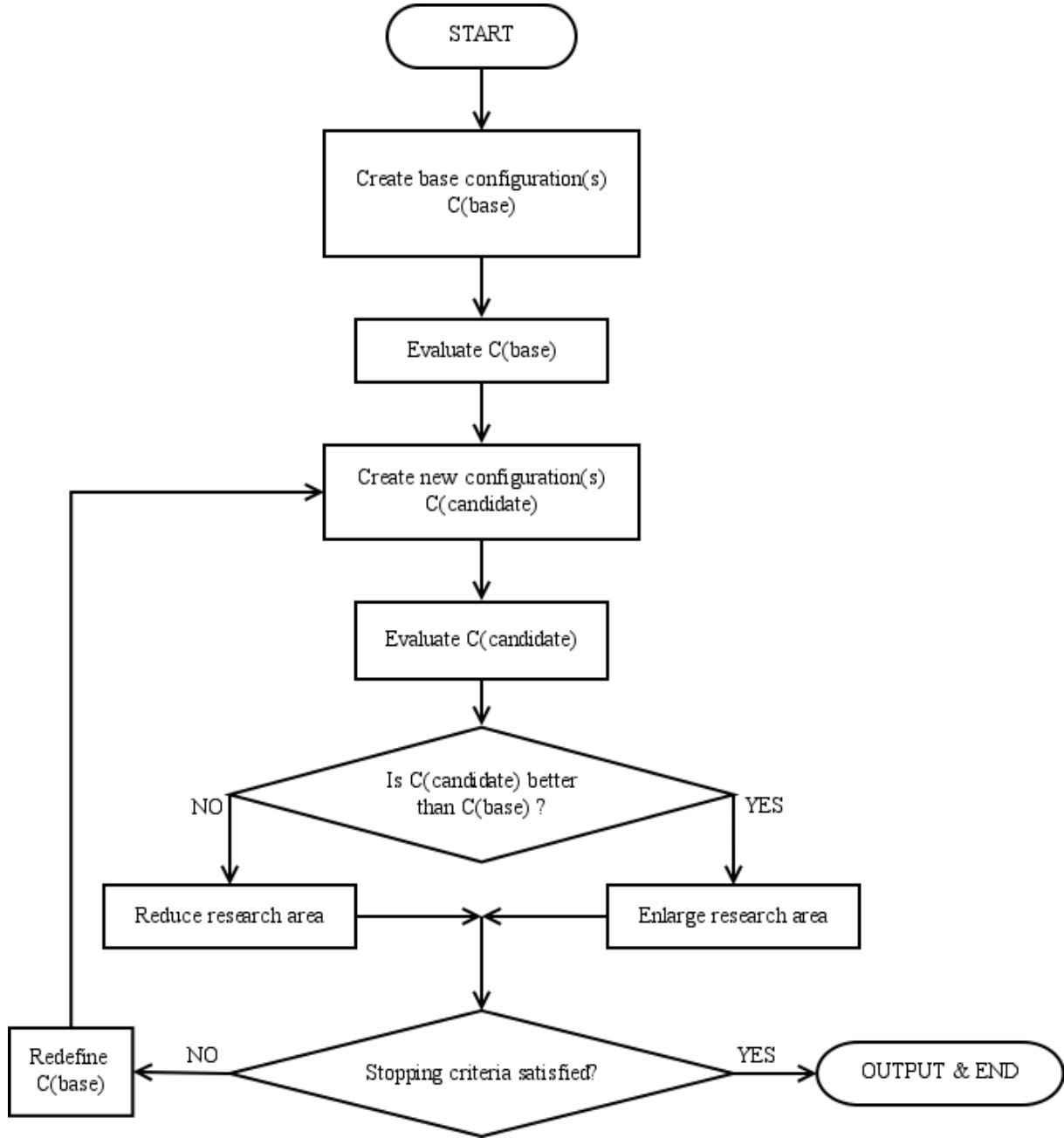
Yapı analizi problemleri genellikle bir kök bulma problemi olarak formüle edilir. Bu formülasyon sonucunda doğrusal problemlerde sonuç bir matris denkleminin çözümüne varır. Doğrusal olmayan problemlerde ise Newton-Raphson gibi tekniklerle her adımda doğrusallaşma sonucunda elde edilen yine matris denklemlerinin çözülmesine dayanan metotlar kullanılır [14]. Bu yöntemlerin en çok kullanılanı Sonlu Elemanlar Yöntemidir (SEY). Enerji ya da virtüel enerji prensipleri kullanılarak yapılan çözümlerde ise bilinmeyen parametrelerin bulunmasına dayalı Ritz metodu, Galerkin metodu gibi yöntemler uygulanır [15].

Esasında analiz problemlerini de tam bir eniyileme problemi olarak formüle etmek olasıdır. Bunun için minimum potansiyel enerji prensibinin, olduğu gibi, uygulanması yeter: “Kinematik olarak olabilir tüm şekil değiştirmeleri arasından sistemin potansiyel enerjisini enküçüklemekte olan kararlı denge durumuna karşılık gelir”. Bu durumda yapılacak olan eldeki sistemin potansiyel enerjisini enküçükleyecek olan şekil değiştirmeyi bulmaktır. Bu arayışın sezgisel algoritmalarla yapılması Sezgisel Algoritmalarla Toplam Potansiyel Optimizasyonu (SA/TPO) yöntemini (TPO/MA Total Potential Optimization using Metaheuristic Algorithms) ortaya çıkarmıştır [16 - 18]. Bu yöntemde yapının şekil değiştirmiş halini temsil edecek veriler, örneğin bir kafes kirişte düğüm noktalarının koordinatları, aranan vektörü oluşturur. Daha sonra, sezgisel algoritmaların yardımıyla, sistemin toplam potansiyel enerjisini enküçükleyecek şekilde bu vektörün bileşenleri, yani yapının belirleyici şekil değiştirmeleri bulunur. Yapının şekil değiştirmiş hali bulunduktan kesit zorları, mesnet tepkimeleri gibi başka bilinmeyenler kolaylıkla bulunabilir.

### **ÖRNEK ÇÖZÜMLER**

Özellikle kafes kiriş tipi yapılarda yapılan uygulamalarda, ileri sürülen SA/TPO yönteminin son derece verimli olduğu ve kullanılan diğer tüm yöntemlere göre üstünlükleri olduğu görülmüştür. Gerçekten de, bu yaklaşımla, her durumda sistemin doğrusal olmayan davranışı, hem doğrusal malzemeler hem de büyük deformasyonlar açısından, kolaylıkla irdelenebilmekte ve kesin çözüm elde edilmektedir. Bunun yanında yöntem kullanılarak yerel ve genel burkulma sonrası sistemin bulunması muhtemel olan şekil değiştirmiş durumları da elde edilebilmektedir. Bu duruma örnek olarak literatürde sıklıkla kullanılan 2 ve 25 çubuk (Şekil 2 ve Şekil 3) elemanından oluşan sistemlerin muhtemel şekil değiştirme durumları gösterilebilir. Şekil 2b’de SA/TPO yöntemi ile analizi yapılmış sistemin, eğer çubuklar doğrusal elastik ise, potansiyel enerji değerlerinin değişime ait yüzey grafiği verilmiştir. Şekil 2’den, tanımlanan sistemin, incelenen yükler altında, (2’) ve (2’’) konumları için iki adet minimum değer var olduğu açıkça görülmektedir. Sistemin elastik-plastik olması durumunda potansiyel enerji grafiği Şekil 2c’de görülen durumu almaktadır. Bu şekilde tek bir minimum nokta varmış gibi görünse de daha ayrıntılı bir analiz, orijine yakın bir başka çözüm daha olduğunu göstermektedir (Şekil 2d).

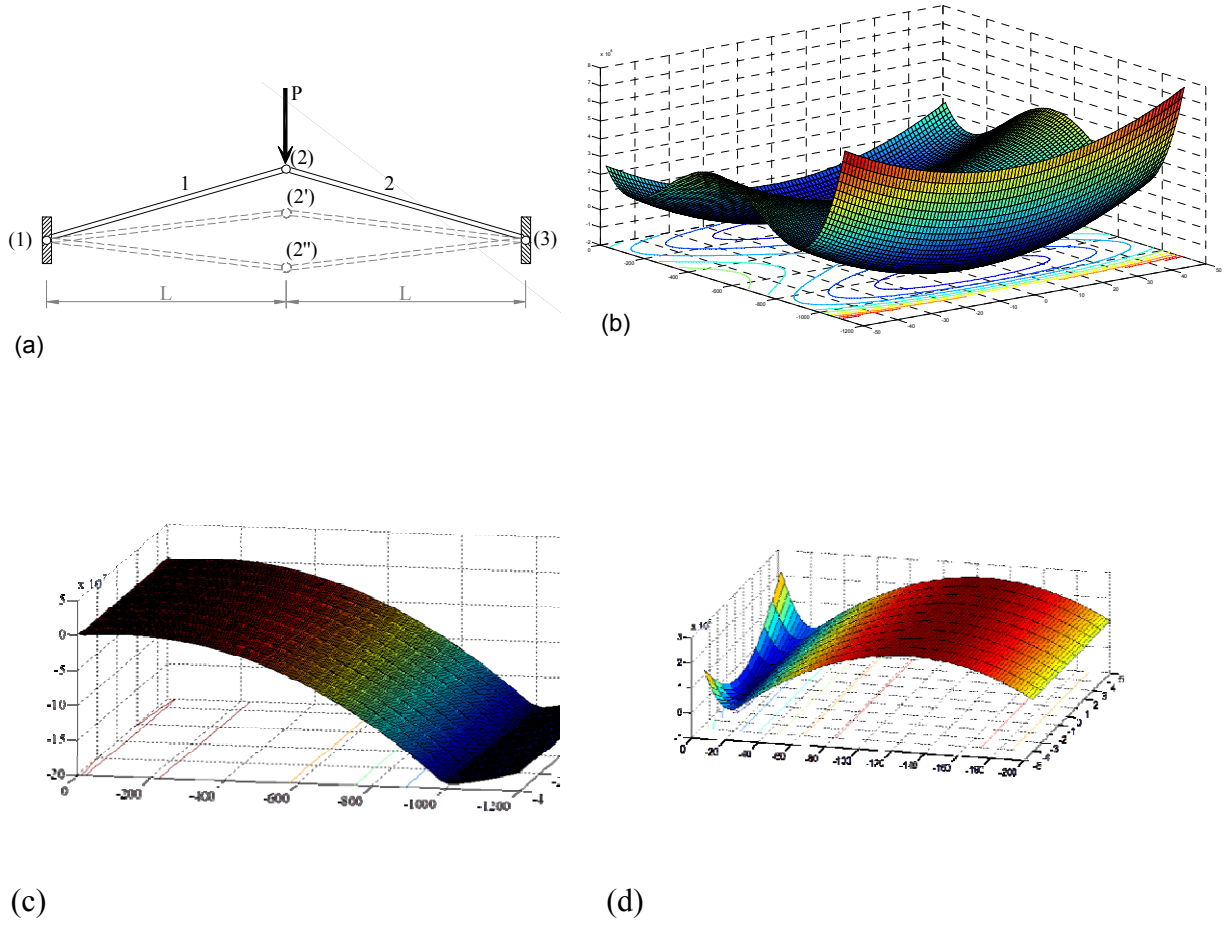
25 çubuklu kafes kiriş doğrusal elastik çubuklar için çözülmüş, verilen yük için bulunan çözümler Şekil 3’de gösterilmiştir. Buradan anlaşılacağı gibi, bu kiriş için aynı yük altında 4 farklı çözüm mümkündür.



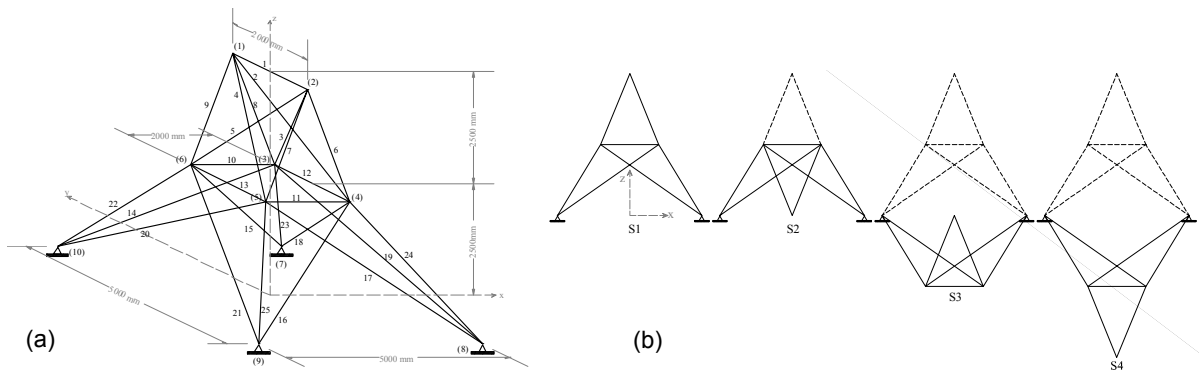
Şekil 1. Sezgisel algoritmaların akış diyagramı [19]

Şekil 2 ve Şekil 3’de örnekleri verilen, birden fazla çözüm içeren problemlerin sonlu elemanlar yöntemini de içeren klasik yöntemlerle olağan uygulamalarla çözülemeyeceği açıktır. Yapılan kıyaslamalarda, mesela 25 çubuklu makas için doğrusal olmayan SEY yöntemi uygulandığında, SA/TPO ile bulunan 4 çözümden sadece bir tanesinin elde edilebildiği, bu çözümün ise bazı yükler altında en iyi çözüm olmadığı görülmüştür.

Yukarıda verilen problemler, SEY’i de kapsayan klasik yöntemlerle ancak özel yazılımlar hazırlanarak ve her biri birer bilimsel yayın olabilecek çalışmalar sonunda çözülebilmektedir. Oysaki bu çalışmada esasları verilen ve daha da genişletilmesi düşünülen SA/TPO yöntemiyle bu problemler olağan bir lineer-küçük deformasyon problemi gibi, gözü kapalı, kara-kutu (black-box) operasyonlarıyla kolayca çözülebilmektedir.

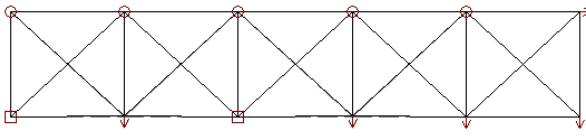


Şekil 2. (a) 2-çubuklu sistemin yükleme sonrası muhtemel şekil değiştirme durumları, (b) Elastik malzeme için toplam potansiyel enerji diyagramı, (c) ve (d) Elastik-plastik malzeme için potansiyel enerji diyagramları



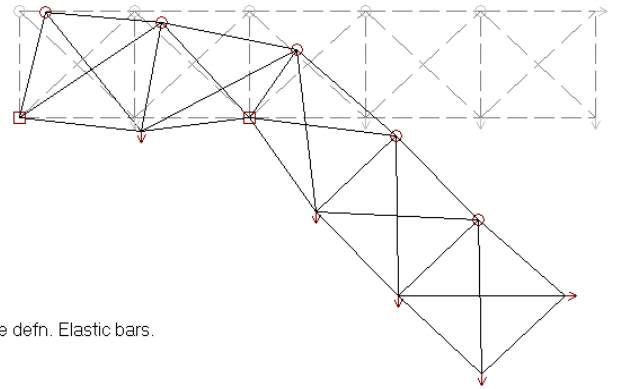
Şekil 3. (a) 25 çubuklu sistem, (b) Sistemin burkulma sonrası muhtemel şekil değiştirme durumları

Çok bilinen ve uygulanan SEY yöntemini de içeren klasik yöntemlerle çözülemeyen ancak SA/TPO yöntemiyle kolayca, yine gözü kapalı uygulamalarla çözülebilen problemlere bir diğer örnek de Şekil 4’de verilmektedir. Bu örnek 12 düğüm noktalı, doğrusal elastik 26 çubuklu bir kafes kirişle başlayan bir dizi problemdir. Şekil 4a’da 2 mafsalla desteklenmiş bu yapı ve küçük yükler altında bu yapının şekil değiştirmiş hali görülmektedir. Kirişin çok büyük yükler altında büyük şekil değişimlerine uğramış hali Şekil 4b’de gösterilmektedir. Kirişin sol mesnedi kaldırılarak eksik bağlı duruma getirilmesi halinde, büyük yükler altındaki şekil değiştirmeleri Şekil 4c’de görülmektedir. Sonraki şekillerde ise, eldeki eksik bağlı kafes kirişten giderek daha fazla eleman eksiltilmekte, böyle üretilen oynak sistemler yine de kolaylıkla çözülebilmektedir. Söz konusu kirişin gösterilen çözümlerinden sadece küçük deformasyonlar düzeyinde olan birincisi klasik yöntemlerle elde edilebilir durumdadır. Şekil 4b’de gösterilen büyük yükler altındaki büyük yer değiştirmeler hali ise özel



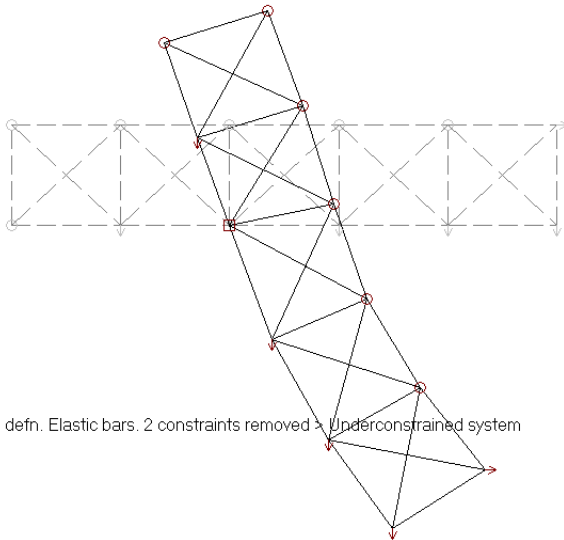
5 Relatively small defn. Elastic.

a) Küçük deformasyonlar



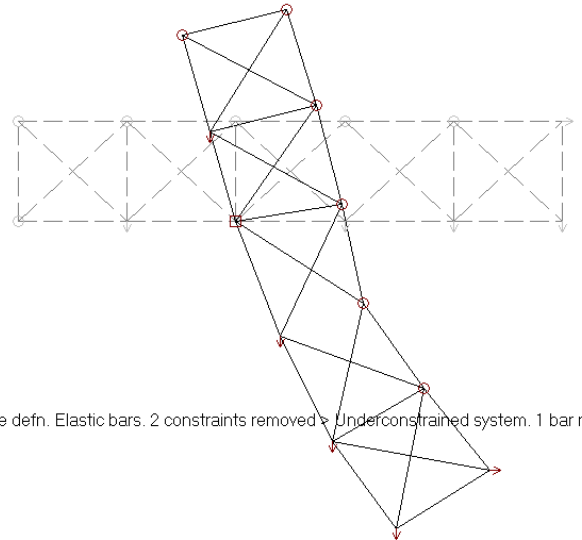
5 Large defn. Elastic bars.

b) Büyük deformasyonlar



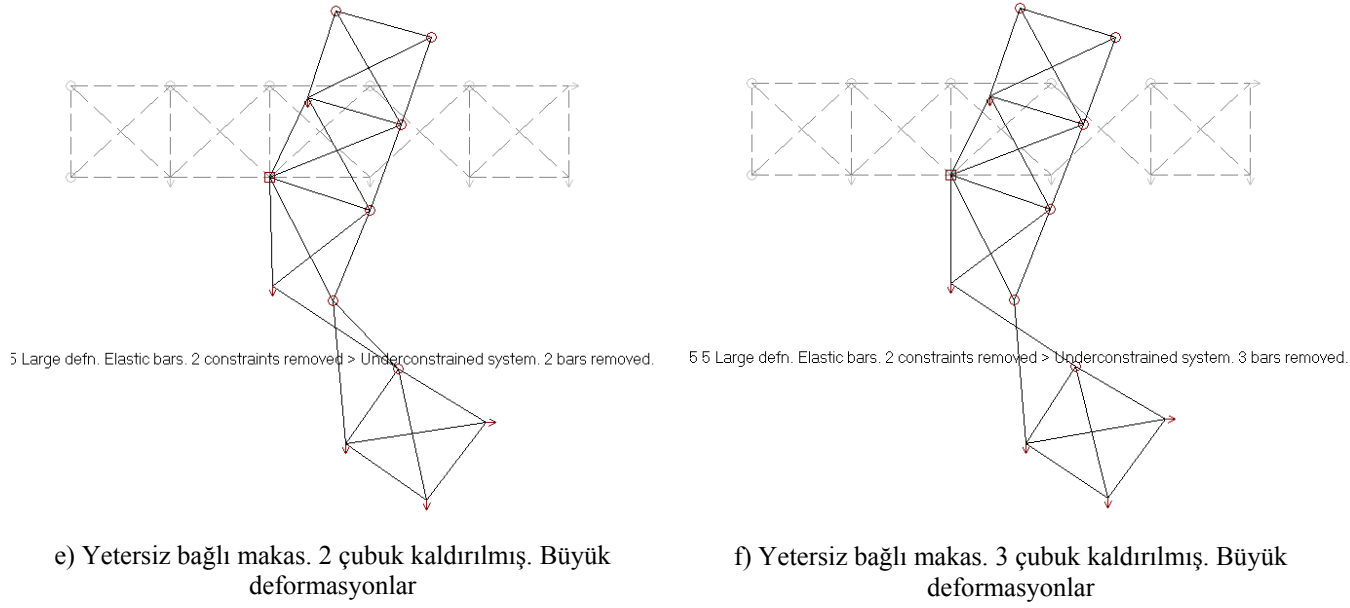
5 Large defn. Elastic bars. 2 constraints removed > Underconstrained system

c) Yetersiz bağlı makas. Büyük deformasyonlar



5 Large defn. Elastic bars. 2 constraints removed > Underconstrained system. 1 bar remove

d) Yetersiz bağlı makas. 1 çubuk kaldırılmış. Büyük deformasyonlar



Şekil 4. 26 çubuklu kafes kirişin SA/TPO analiz sonuçları

uygulamalarla çözülebilir bir problemidir. Şekil 4c, d, e ve f’de gösterilen yetersiz mesnetli ve birkaç çubuğu kaldırılarak oynak hale getirilmiş problemlerin ise klasik yöntemlerle çözülmesi mümkün değildir. SA/TPO’nun gücünü belirtmek için burada söz konusu

sistemlerdeki malzemelerin bilinen her türlü nonlinear malzeme de olabileceğini, bunlardan hiç biri için özel önlem alınmasının gerekli olmadığını ifade etmek yerinde olacaktır.

Sezgisel algoritmalar temel yapılarının farklı olması nedeniyle kullanıldıkları problemlerde zaman-performans ilişkisi açısından birbirlerine karşı problem bazında üstünlük sağlayabilirler. Yukarıda verilen sonuçlar Kalıtsal Algoritma, Karınca Kolonisi, Tavlama benzetimi, Armoni Araması gibi çeşitli sezgisel algoritmalar kullanılarak elde edilmiş olup yöntemin tüm algoritmalar için yeterli etkinlikte olduğu gözlenmiştir. Yöntemin yarplığı (robustness) ve hassasiyeti de da incelenmiş ve bu konuda da çok başarılı olduğu görülmüştür.

### SONUÇLAR

Çok temel olmasına rağmen, minimum potansiyel enerji prensibi yapı analizinde bu güne kadar yeterli etkinlikte kullanılmamıştır. Söz konusu prensip ancak dolaylı olarak başka kuramlar ve yaklaşık yöntemler aracılığıyla kullanıma alınmıştır.

Bu çalışmada temelleri açıklanan ve uygulama örnekleri verilen SA/TPO yöntemi ise yapı analizinde minimum enerji prensibi doğrudan kullanılmaktadır. Örnekler bu yöntemin SEY dahil tüm klasik metotlara aşağıdaki konularda üstün olduğunu göstermektedir:

- Çok çözümlü problemler,
- Malzeme ve/veya yer değiştirmeler açısından doğrusal olmayan problemler,
- Eksik bağlı sistemler,
- Oynak sistemler,
- Tek yönlü mesnetler

- Çekme-tümleşik yapılar (tensegrities), v.d..

Yöntemin bu kadar başarılı olmasının iki nedeni olduğu düşünülmektedir. Bunlardan birincisi son derece sağlam temellere oturmasıdır. Bu sayededir ki doğrusal malzemeler ile doğrusal olmayan malzemeler arasındaki zorluk farkı yok olmaktadır. Oysaki klasik yöntemlerde bu malzemeler son derece büyük zorluk farkı olan denklem takımlarına yol açarlar. Doğrusal ve küçük deformasyonlar için çözümü son derece kolay matris denklemleri elde edilirken, doğrusal olmayan malzemeler ya da büyük şekil değiştirmeler için denklem takımlarını yazmak bile çoğu zaman olanaksızdır. SA/TPO yönteminde ise mesela bir çubuğun enerjisinin doğrusal ya da doğrusal olmayan durumlarda yazılmasının ne kadar az farkı olduğu açıktır.

SA/TPO'nun başarısındaki ikinci neden ise enküçüklemede son derece verimli olan sezgisel algoritmaların kullanılmış olmasıdır. Bu algoritmalar özellikle kısıtlamalar olduğu durumlarda klasik yöntemlere göre çok önemli üstünlükler gösterirler. Buna örnek olarak bir mesnedin tek yönlü çalışması verilebilir. Klasik yöntemlerde bir mesnedin sadece +y yönünde çalıştığı, -y yönünde ise etkisiz olduğu gibi bir veri varsa, bunun işleme alınması hiçbir zaman tek adımda gerçekleştirilemez. Halbuki sezgisel algoritmalarda bu ve bundan çok daha karmaşık kısıtlamalar son derece kolay bir şekilde, hiçbir zorlukla karşılaşılmadan, dikkate alınabilir.

Çok çözüm olan durumlarda da klasik yöntemlere göre SA/TPO yönteminin üstünlüğü çok belirgin nedenlere dayanır. Klasik yöntemlerde, özellikle çatallaşma (bifurcation) sonrası karşılaşılan ikinci ya da başka çözümlerin eldesi için kolay bir yöntem yoktur. Sezgisel algoritmaların kullanımında ise global minimumların yanı sıra yerel minimumların bulunması için pek çok ve kolay yöntem SA/TPO araştırmaları sırasında geliştirilmiş bulunmaktadır.

Bundan sonraki çalışmalarda SA/TPO yöntemi daha genel yapı tiplerine uygulanarak genel bir yapı analizi sistematığı geliştirilecektir.

### KAYNAKLAR

- [1] Talbi, E-G. Metaheuristics: From Design to Implementation. Wiley. 2009
- [2] Vasant, P. Meta-Heuristics Optimization Algorithms in Engineering, Business, Economics, and Finance. IGI-Global. 2012.
- [3] Ho, Y.C., Pepyne, D.L. Simple Explanation of the No-Free-Lunch Theorem and Its Implications. Journal of Optimization Theory and Applications 115, 549-570. 2012
- [4] Prager, W. Introduction to Structural Optimization. Springer – Verlag. 1974
- [5] Haftka, R. T.; Gürdal, Z. Elements of Structural Optimization, 3rd edn.. Kluwer. 1992
- [6] Frangopol, D, M.; F. Y. Cheng, editors Advances in Structural Optimization. Proceedings, ASCE. 1997
- [7] Kicinger, R., Arciszewski, T., DeJong, K. Evolutionary computation and structural design: A survey of the state-of-the-art. Computers and Structures, 83, 1943-1978. 2005
- [8] Kaveh A, Talatahari S. An improved ant colony optimization for constrained engineering design problems. Eng Comput 27(1):155–182. 2010.
- [9] Bekdas, G., Nigdeli, S. M. Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search. Engng. Structures 33(9): 2716-2723 DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.05.024 2011



- [10] Dede, T. Optimum design of grillage structures to LRFD-AISC with teaching-learning based optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, (2013) 1-10.
- [11] Zhou, K. Topology optimization of truss-like continuum structures for natural frequencies. *Structural and Multidisciplinary Optimization* April 2013, Volume 47, Issue 4, pp 613-619
- [12] Ahraria, A., Ataib, Ali A. Fully Stressed Design Evolution Strategy for Shape and Size Optimization of Truss Structures. *Computers & Structures* Volume 123, July 2013, Pages 58–67. 2013.
- [13] Jahjough, M. M., Arafa, M. H., Alqedra, M. A. Artificial Bee Colony (ABC) algorithm in the design Optimization of RC continuous beams. *Structural and Multidisciplinary Optimization* June 2013, Volume 47, Issue 6, pp 963-979
- [14] Leon, S. A unified library of nonlinear solution schemes: an excursion into nonlinear computational mechanics. University of Illinois at Urbana-Champaign, MS Thesis in CE. 2010.
- [15] Shames, I. H., Dym, C. L. *Energy and finite element methods in structural mechanics*. Taylor and Francis. 1985
- [16] Toklu, Y. C. Nonlinear Analysis of Trusses Through Energy Minimisation. *Computers and Structures*, Volume 82, Issues 20-21, Pages 1581-1589. 2004.
- [17] Toklu, Y. C., Bekdaş, G., Temür, R. Analysis of Trusses by Total Potential Optimization Method Coupled with Harmony Search. *Structural Engineering Mechanics, An International Journal*, 45(2) 183-199. 2013.
- [18] Toklu, Y. C. Structural Analysis, Metaheuristic Algorithms and the Method TPO/MA. In: *Proceedings of the 14th EU/ME Workshop*, Eds. A. Fink and J. Geiger, 28.02 - 01.03 2013, Helmut Schmidt University, Hamburg, Germany, pp. 44-50. 2013.
- [19] Toklu, Y. C. and Toklu, N. E. Analysis of structures by Total Potential Optimization using Meta-heuristic Algorithms (TPO/MA) in Siarry, P. “Heuristics : Theory and Applications”, Nova Science. 2013.