



ARTAN YÜK ALTINDAKİ ELASTOPLASTİK TAŞIYICI ÇELİK ÇERÇEVELERDE ANKASTRELİK MOMENTLERİNİN İNCELENMESİ

Harika Fatma AÇIKSARI*, Hatip TOK

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Elasto-Plastik,
Kesit Plastikleşme Oranı,
Nonlineer Analiz,
Ankastrelilik Moment.*

Öz

Bu çalışmada elastoplastik malzemeli taşıyıcı sistemlerdeki ankastrelilik momentlerinin değişimi, elastik ötesi davranış için incelenmiştir. Buna bağlı olarak bir elemanın mafsallaşma esnasındaki ankastrelilik momentleri hesaplanmıştır. Yük artımı esnasında taşıyıcı sistemi oluşturan eleman kesitlerinde elastik ötesi davranışlar meydana gelmektedir. Bu durum sistem analizi esnasında dikkate alınmalıdır. Bu hali hesaplayan, doktora çalışması olan SOMEP ve SOEP analiz programı kullanılmıştır. Bu çalışmada, kesitlerin elastik ötesi davranışlarını dikkate alan kesit plastikleşme oranı elde edilerek, ankastrelilik momentlerini hesaplayan bir analiz yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem SOMEP analiz programına eklenmiştir. Kesit plastikleşme oranı elastik ötesi davranış olan kesitin plastikleşme oranını veren bir kavramdır. Çubuk uçlarındaki kesit plastikleşme oranını hesaplayan bağıntılar ortaya konularak analizler geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar grafik ve tablolar halinde sunulmuştur. Kullanılan malzeme ideal elasto-plastik malzeme olarak kabul edilmiştir. Çalışmada düzlem çerçevelerin ikinci mertebe elasto-plastik hesabı ile doğrusal olmayan analizi yapılmıştır. Malzeme ve geometri bakımından doğrusal olmayan analizler incelenirken, çubuk uçlarında oluşan kesit plastikleşmesi plastik mafsal olarak kabul edilmiştir.

INVESTIGATION OF FIXED END MOMENTS UNDER INCREASED LOAD IN STRUCTURAL ELASTOPLASTICS TEEL FRAMES

Keywords

*Elasto-Plastic,
Section Plasticization Ratio,
Nonlinear Analysis,
Fix End Moment.*

Abstract

In this study, the change of the fix end moments in the structural systems with elastoplastic material was investigated for beyond elastic behavior. Accordingly, the fix end moments of an element during the hinging have been calculated. During the load increase, beyond elastic behavior occur in the sections of the elements forming the structural system. This should be taken into account in the Structural Analysis of the system. SOMEP and SOEP analysis program, which is a doctoral study, was used to compute this state. In this study, an analysis method was developed to compute the fix end moments by obtaining section plasticization ratio which takes into account the beyond elastic states of the sections. This method was added to the SOMEP analysis program. Section plasticization ratio is a concept that gives the plasticization rate of the section which is the beyond elastic condition. In the analysis, the relations of indicating the change of fix end moments were revealed. The results obtained were presented in graph and charts. The material used was considered as the ideal elastoplastic material. In the study, nonlinear structural analysis of plane frames was performed by second order elasto-plastic analysis. In the examination of nonlinear analysis, in terms of materials and geometry, it was assumed that the plastic sections are accepted as a plastic hinge.

*İlgili yazar / Corresponding author: harikafatma@gmail.com, +90-344-300-1665

Alıntı / Cite

Açıksarı, H.F., Tok, H., (2023). Elastoplastik Malzemeye Taşıyıcı Sistemlerde Artan Yük Altında Ankastrilik Momentlerinin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 11(1), 394-410.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

H. F.Açıksarı, 0000-0003-1328-7074
H. Tok, 0000-0003-0513-0798

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	04.01.2022
Revizyon Tarihi / Revision Date	04.08.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	26.09.2022
Yayın Tarihi / Published Date	27.03.2023

INVESTIGATION OF FIXED END MOMENTS UNDER INCREASED LOAD IN STRUCTURAL ELASTOPLASTIC STEEL FRAMES

Harika Fatma AÇIKSARI[†], Hatip TOK

Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Kahramanmaraş, Turkey

Purpose and Scope

The aim of this study is to examine the change of the fixed end moments of the elastoplastic material structural systems for beyond behavior with the developed analysis method in structural analysis. Accordingly, the fix end moments of an element during the hinging have been calculated.

Design/methodology/approach

When the literature is examined, it is seen that there are many studies using the load increment calculation method to find the limit load with second order effects and to determine the collapse load. Within the scope of there search, there are studies on the need to choose a suitable material model for the structural system, taking into account the behavior models of the materials. One of these studies is the study of Uslu, F. (2016). In this study, an additional freedom of rotation is created in two-dimensional frames made of ideal elastic and full plastic material, with plastic hinges that are assumed to occur at the ends of the elements by increasing the loads step by step. Thus, by performing consecutive elastic analyses between two plastic hinges, the elastic-plastic analysis of the frames is performed. Similar to that of Tok, H.(2000) and Açıksarı, H.(2019) in some studies in the literature, changes in normal force and bending moment in sections were investigated during the analysis of the load increment calculation method of steel frames. As a result of the analysis, it was concluded that there was a change in the fix end moments by looking at the plasticization rate in the section.

Findings

In this study, a calculation method has been developed and examined with an analysis program that takes into account the second-order and material effects by using the stiffness matrix-displacement relationship. In the analysis program, firstly, the stiffness matrix of an element from local to global coordinates is created, then the stiffness matrix for each element of the system is transformed into the stiffness matrix of the system. The stiffness of a section, that is, the state of the plastic zone, is evaluated by the section plasticization rate. Considering this ratio, the stiffness matrix of an element is written. If the plasticization rate of the section is equal to one, the section becomes fully plastic; If it is equal to or less than zero, this part is perfectly elastic. The other case is between one and zero and the cross-section is partly elastic and partly plastic. SOMEPE and SOEP analysis programs, which are the doctoral studies of Tok, H. (2000), which calculate beyond behavior, were used. The developed SOMEPE method is a modified second-order elastoplastic calculation method. The special version of the SOMEPE method is called the SOEP method. When calculating with the SOMEPE method, sections with fully elastic, fully plastic or partially plastic regions are taken into account according to the stress distribution due to the axial force and bending moment at the element ends. However, in the SOEP method, the case that all the normal stresses in the cross-section are equal to the yield stress is the case of the fully plastic cross-section, and for the other cases, the case of the fully elastic cross-section is in question.

Originality

As a result of nonlinear analyzes SOMEPE, SOEP and SAP2000 analysis, the change of fix end moments according to the section plasticization rates, taking into account the beyond behavior of the steel frame systems, was observed. As a result of the calculations, this ratio took a value between zero and one, showing the situations between fully plastic and fully elastic for a section. The plasticization rate was expressed as a percentage of the

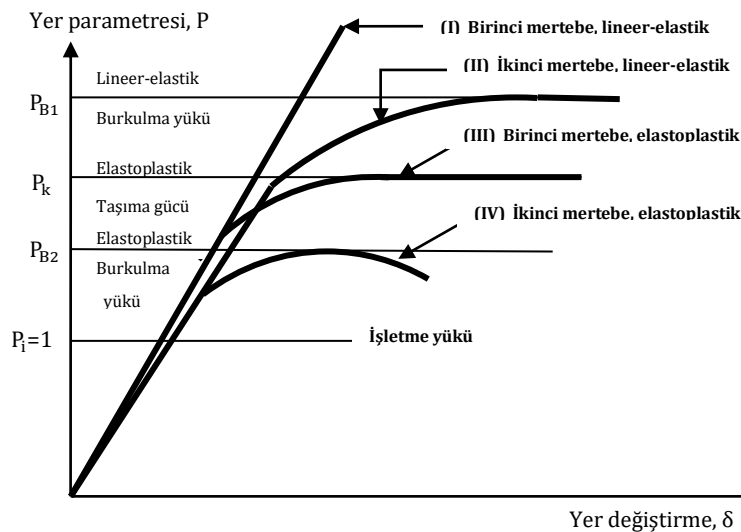
[†]İlgili yazar / Corresponding author: harikafatma@gmail.com, +90-344-300-1665

full plastic section and used in the fix end moment expression. Thus, with the equations obtained depending on the section plasticization rate, the effect of plastic deformations in the section on the fix end moments was revealed. The frame examples in this study, were calculated by the developed analysis method in the structural system. If the maximum stress at a section due to axial force and bending moment is smaller than the yielding stress, the section is considered as fully elastic and does not change the stiffness of the section. But, if some of the stresses at the section are equal to the yielding stress which is the maximum stress, plastic region at this section is the case and decreases the stiffness. Thus, the expressions of the equilibrium equations on the deformed geometry of the structural system were extracted and the stress and stiffness states in the cross-section were seen with a clear difference. By making analysis with this developed method, the formation of plastic hinges in the system was observed by increasing the lateral and vertical loads on the system separately or together. The result of the analysis gave the location, number, formation order of the plastic hinges and the collapse load parameters of the system. The results of the SOMEPE and SOEP calculation method proposed in this study are compared with the analysis results obtained in SAP2000, and it is seen that they are reliable. Analysis under current loads was made for two frame systems with concentrated load and distributed load. Similar studies for this structural system can be done by obtaining new relations for the loading conditions for other element loading conditions. It can also be examined for the plastic region, which expresses the beyond state, and the hardening region after it.

1. Giriş (Introduction)

Yapıların performans analizinin değerlendirilmesi için önce doğrusal olmayan davranışının belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için doğrusal olmayan statik itme analiz yöntemi kullanılmaktadır. Statik itme analiz yöntemi, yapıların deprem yükleri altındaki gerçek davranışının belirlenmesinde önemli bir yer tutmaktadır. Bundan dolayı tasarım halindeki yapının elastik ötesi davranışları dikkate alınmıştır. Elastik ötesi davranışları belirlemek için yapı elemanlarında kullanılan en mühim etken malzeme davranışının modellenmesidir (Üçerler,1995). Sonuç olarak yapının yatay deprem yükü altındaki davranışın gerçeğe en yakın olmasını hedefleyen çalışmalar önemli bir yer almıştır. Çeliğin plastikleşme özelliği göz önüne tutularak, diğer malzemelere göre kıyasla daha fazla plastikleşmeye sahiptir.

Elastik ötesi davranışlar tespit edilirken yapı elemanları için kullanılan en yaygın model noktasal mafsallı modeldir. Statik programları kullanarak yapı sisteminin modellenmesi ve sayısal hesapların yapılması için bilgisayar programlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Düzlem sistem analizi için plastik mafsallı hipotezinden faydalanılarak, elasto-plastik analiz incelenmiştir. Şekil 1 de yük parametresi-yer değiştirme bağıntıları verilmiştir (Parikh, 1966).



Şekil 1. Yük Parametresi - Yer Değiştirme Bağıntıları (Load Parameter - Displacement Relations)

Bu çalışmada çubuk uçlarının plastik kesit oranlarına göre ankastrel momentlerinin değişimi incelenmiştir. Çelik çerçeve sistemleri için yatay ve düşey yükler altında elasto-plastik analiz metodu kullanılmıştır. Çelik elemanların elastik ötesi davranışı incelenmiştir (Aysal, 1992). Analizde bu metodun tercih edilmesinin başlıca sebebi hem izostatik hem de hiperstatik düzlem sistemlerin analizinin yapılabilmesidir. Çalışmamızdaki analizde bu metodun kullanılmasında diğer bir önemli etken bilgisayar ortamında bir analiz gerçekleştirileceğinden bilgisayar tabanlı analiz için matris yöntemlerin çok daha elverişli olmasıdır. Yapı sistemlerinin doğrusal

olmayan analizinin gerekliliğini benimsemiş birçok araştırmacı, söz konusu konu üzerinde çalışmış ve yeni yöntemler geliştirmişlerdir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Malzemelerin elastik ötesi davranışlarını modellemek üzere çeşitli davranış kabulleri yapılmaktadır. İdeal elastoplastik, ideal plastik, pekleşmeli elasto-plastik, lineer pekleşen ve tam plastik modeller örnek verilebilir. Yapı koşullarını dikkate alarak uygun bir malzeme modeli esas alınmalıdır (Yılmaz, 2003).

Malzeme ve geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan uzay çubuk sistemlerin ikinci merteye elasto-plastik hesabı, limit yüklerin bulunması ve göçme güvenliklerinin tayini için bir yük artımı yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemde, yatay yüklere oranla daha az değişim gösteren düşey yüklerin sabit değerleri altında, aralarındaki oran sabit kalacak şekilde artan yatay yükler için hesap yapılmaktadır. Sisteme etkiyen düşey yüklerin belirli değerleri için, daha çok denge denklemlerine bağlı olan normal kuvvetler başlangıçta kolaylıkla tahmin edilebilmekte ve böylece geometri değişimlerinin denge denklemlerine olan etkisi doğrusallaştırılabilmektedir (İrtem, 1991).

Tek katlı iki açıklıklı çerçeve için deneyler yapılmıştır. Plastik bölgelerin oluşumu incelenmiş ve hesaplanan veriler sonuçlarla kıyaslanmıştır (Kanchanalai, 1977).

Tek gözlü, kapalı, dikdörtgen bir çerçevenin sabit ve değişken yatay yük etkisi altındaki elastik-plastik davranışı, taşıma gücü yöntemi ile ikinci merteye etkileri de dikkate alınmıştır. Ayrıca plastik mafsallı hipotezinden yararlanılarak yük-yer değiştirme bağıntıları elde edilmiştir (Aysal, 1992).

Düzlem sistemlerde ikinci merteye limit yükün hesabı için genel bir yük artımı yöntemi verilmektedir. Bu yöntemde yük çarpanıyla oluşturulan ilk plastik kesite, gerçek bir mafsallı yerleştirilmektedir. Mafsallı bir duruma gelen sistem, aynı şekilde yine çözülmektedir. Art arda plastik mafsallı oluşan kesite gerçek bir mafsallı yerleştirilerek hesap tekrarlanmaktadır. Bu arada sistem mafsallaştırma çarijitiğinin azaldığı gözlenebilmektedir. Sistemin kritik yükü, dış yük parametresinin altına düşünce işleme son verilmekte, son duruma ait yük parametresi sistemin limit yükünü vermektedir (Wood, 1958).

2. Merteye Teorisine göre analizde normal kuvvetlerin başlangıçta bilinmediği durumlar için ardışık yaklaşım yöntemi ve büyük geometri değişimlerini göz önüne almak için de yük artımı yöntemi verilmiştir. Verilen ardışık yaklaşım yönteminde, önce verilmiş dış etkilere ait normal kuvvetler tahmin edilmiştir ve sistem hesaplanarak 2. Merteye Teorisine göre normal kuvvetler bulunmaktadır. Yine bu yöntemle, bulunan normal kuvvetlerin başlangıçta tahmin edilenlere göre yakın bir değer sağlanmaktadır. Yük artımı yöntemiyle de, yüklere küçük artımlar verildiğinden dolayı yer değiştirmelerin küçük olması sağlanarak her artımda hesap doğrusallaştırılabilmekte ve geometri değişimlerinin uygunluk şartları üzerindeki etkisi hesaba katılmış olmaktadır (Çakıroğlu, 1980).

Lineer olmayan malzemeden yapılmış sistemlerde, artan yüklerle birlikte iç kuvvetler de artarak bazı kesitlerde lineer - elastik sınırı aşmakta ve bu kesitler dolayında plastik şekil değiştirmeler meydana gelmektedir. Kopma sırasındaki toplam şekil değiştirmelerin, lineer şekil değiştirmelere oranının büyük olduğu sünek malzemeden yapılmış sistemlerde, plastik şekil değiştirmelerin plastik mafsallı (veya genel anlamda plastik kesit) adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bunun dışındaki bölgelerde ise sistemin lineer - elastik davrandığı varsayılabilir (Özer, 1987).

Yapıların plastik analizinin esasları, elastik analizden üstünlükleri ve plastik analiz yöntemleri verilmiştir. Bu yöntemlerde eğilme momenti-eğrilik bağıntısı elastoplastik olarak idealleştirilmiş ve doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin eleman boyunca yayılmayıp belirli kesitlerde toplandığını varsayan plastik mafsallı hipotezi kullanılmıştır (Hodge, 1959).

Çok katlı rijit çelik çerçevelerin limit yükünün hesabı için, ikinci merteye elastoplastik hesap yöntemi uygulanmıştır. Çözümde malzeme ideal elastoplastik kabul edilmiş ve plastik mafsallı hipotezi kullanılmıştır. Ayrıca normal kuvvetin eğilme momentine etkisi de göz önünde tutulmuştur (Liapunov, 1974).

Yapı mekaniği problemlerinde doğrusal olmayan davranış, malzeme özellikleri nedeniyle bünye denklemlerinin doğrusal olmamasından ve geometri değişimlerinin denge denklemlerine ve geometrik uygunluk bağıntılarına etkisinden kaynaklanmaktadır. Malzeme davranışının ve geometri değişiminin doğrusal olmaması doğrusal olmayan davranışın başlıca sebepleridir (Özer, 2004).

İdeal elasto-plastik malzemeden yapılmış dikdörtgen kesitlerin Bernoulli-Navier hipotezi sonucu elde edilen moment-eğrilik bağıntısı ele alınarak, uç dönmeleri engellenmiş ideal elasto-plastik malzemeden yapılmış bir kolonun elastik ötesi davranışı incelenmiştir (Moy, 1996; Çakıroğlu, 1980).

İdeal elastik ve tam plastik malzemeden yapılmış çubuklara sahip iki boyutlu çerçevelerde, yüklerin adım adım artırılması ile çubuk uçlarında olduğu kabul edilen plastik mafsallarla, sonuçta, çerçevelerde bir göçme mekanizması oluşmaktadır. Her bir plastik mafsal çerçevede ilave bir dönme serbestliği oluşturmaktadır. Bu nedenle her plastik mafsal oluşumundan sonra rijitlik matris boyutunun artırıldığı bir çerçeve modeli ile birbirini takip eden iki plastik mafsal arasında ardışık elastik analizler yapılarak, çerçevelerin elastik-plastik analizi gerçekleştirilmektedir (Uslu, F. 2016).

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada çelik çerçeve sistemin ikinci merteye ve malzeme etkilerini dikkate alan bir hesap yöntemi elde edilmiştir. Bu hesap yöntemi ikinci merteye elastoplastik hesap metodu olup kısaca SOEP (second order elastoplastic analysis method) ve SOMEPEP (second order modified elastoplastic analysis method) olarak adı verilmiştir. SOMEPEP ve SOEP sistemin matris-deplasman yöntemiyle programlama dili kullanılarak bir yazılım programı geliştirilmiştir. SOMEPEP metoduyla hesap yaparken, çubuk uçlarındaki aksel kuvvet ve eğilme momentinden dolayı oluşan gerilme dağılımına göre tam elastik, tam plastik veya elasto-plastik bölgesi bulunan kesit durumları gözönüne alınır. SOEP ise kesitteki normal gerilmelerin tamamının akma gerilmesine eşit olması hali için tam plastik kesit durumu, bunun dışındaki haller için tam elastik durum söz konusudur. Bu hesap metodu plastik mafsalların oluşum sırası, yeri, sayısı ve sistemin göçme anındaki mekanizma durumunu vermektedir. Ayrıca çelik çerçeve sistemin dayanımı hakkında göçme yükü parametrelerini vermektedir.

Literatürde yer alan bazı çalışmalarda (Doan-Ngoc2016; Dang 2016.; Chuc 2016; Balling 2016.; Ngo-Huu2016) da benzer şekilde, statik yükler altında düzlemsel çelik çerçevelerin doğrusal olmayan analizi yapılarak aksel kuvvet ve eğilme momenti arasındaki ikinci mertebeden etkilerine dayalı olarak bir Matlab bilgisayar programı geliştirilmiştir. Çaprazlı çerçevelerin plastik analizi çok karmaşık olduğu için (Daryan 2020; Palizi 2020) bazı çalışmalarda gerekli optimizasyonlar kullanılarak, çelik çaprazlı çerçevelerin göçme mekanizmasını ve göçme yükünü belirlemek için bir program önerilmiştir.

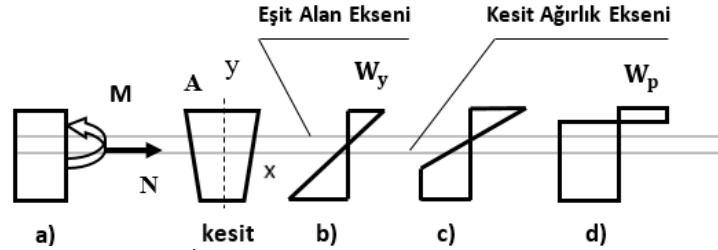
Yapı sistemlerinin analizinde ikinci merteye teorisi ve malzeme etkilerini dikkate alan hesap metodları geliştirilmiştir. Bu teoriye göre ileri hesap yöntemlerinden faydalanarak, çelik yapı elemanlarının yatay ve düşey yük etkileri altındaki doğrusal olmayan davranışları incelenmiştir. Bu çalışmada, taşıyıcı sistemin SOEP ve SOMEPEP analiz metoduna göre tasarlanmış yöntemler kullanılarak doğrusal olmayan statik itme analizi yapılmıştır (Tok, 2000).

Kullanılan sistemlerin nonlineer analizleri SOMEPEP elastoplastik analiz metodu ve SAP2000 programıyla yapılmıştır. Bu analizdeki amaç çelik çerçeve sistemlerin nonlineer davranışlarını da dikkate alarak plastisite oranlarına göre ankastre uç momentlerinin değişimini incelemektir. Bu çalışmada taşıyıcı sistemin deformasyona uğramış geometrisi üzerinde denge denklemleri ifadeleri çıkartılarak, malzemeyi elastoplastik kabul ederek ve kesitteki gerilme durumuna göre rijitlik ifadesini kullanarak bir hesap yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen bu metod kullanılarak sistem üzerindeki yatay ve düşey yükleri ayrı ayrı veya birlikte arttırarak sistemdeki plastik mafsal oluşumu incelenmiştir. Bu hesap metodu, plastik mafsalların yeri, sayısı, oluşum sırası ve sistemin göçme anındaki mekanizma durumunu vermektedir. Analizlerde birimler ton ve metre cinsinden alınmıştır (Açıksarı, 2019).

Literatürde, daha önceki çalışmalarda (Tok, 2000; Açıksarı, 2019) da benzer şekilde çelik çerçevelerin analizi esnasında kesitlerdeki normal kuvvet ve eğilme momenti değişimlerini incelerken, kesitte plastikleşme oranına bakarak ankastre uç momentlerinin değişimi tespit edilmiştir.

3.1. Kesit Plastikleşme Oranının Elde Edilmesi (Obtaining the Plastic Section Ratio)

Şekil 2'de verilen y-y simetri eksenine ve A kesit alanına sahip kesitte, W_y elastik, W_p plastik mukavemet momentlerini, M eğilme momentini ve N normal kuvveti ifade etmektedir. Normal gerilmeler yaratan kesit tesirlerinin, kesitte akma gerilmesi (σ_y) oluşturacak büyüklüğe ulaşması halinde, eğilme momenti M_{yc} , aksel kuvvet ise N_{yc} halini alır. Bu durumda normal gerilme dağılımı Şekil 2 (b)'deki gibidir. Kesit normal gerilmelerin daha büyük değerleri için Şekil 2 (c)' de plastik şekil değiştirmeler oluşur. Kesitteki normal gerilmelerin tamamının akma gerilmesine ulaşmasını sağlayan eğilme momenti M_{pc} , aksel kuvvet ise N_{pc} olması durumunda normal gerilme dağılımı Şekil 2(d)'de verilmiştir.



Şekil 2. Eğilme Momenti Ve Normal Kuvvet İle Oluşan Normal Gerilme Durumu (Normal Stress Under The Axial Force And Bending Moment)

Şekil 2 (b)'deki durum için normal gerilme, kesit tesiri ilişkisi Denklem (1) ile ifade edilebilir:

$$\sigma_y = \frac{M_{yc}}{W_y} + \frac{N_{yc}}{A} \quad (1)$$

Denklem (1)'in her iki tarafı σ_y ile bölüldüğünde, Denklem (2) elde edilir.

$$1 = \frac{M_{yc}}{M_y} + \frac{N_{yc}}{N_y} \quad (2)$$

Denklemden $M_y = W_y \sigma_y$ ve $N_y = A \sigma_y$ olmaktadır. Şekil 2 (d)'deki normal gerilme durumu dikdörtgen kesitler için Denklem (3) ile I kesitler için Denklem (4) ve (5) ile elde edilir (AISC, 1999).

$$\frac{M_{yc}}{M_y} + \left(\frac{N_{yc}}{N_y} \right)^2 = 1 \quad (3)$$

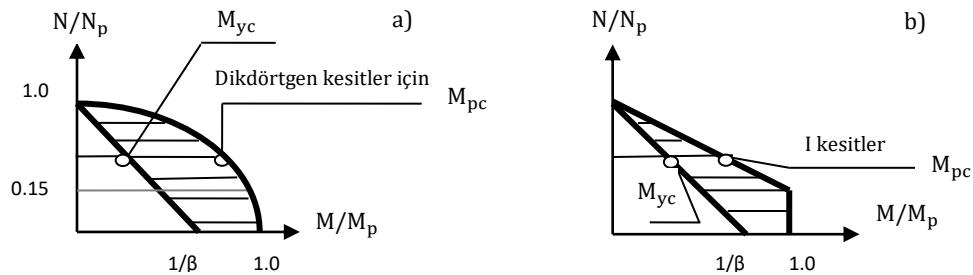
$1 \geq \frac{N_{pc}}{N_p} \geq 0.15$ için:

$$0.85 \frac{M_{pc}}{M_p} + \frac{N_{pc}}{N_p} = 1 \quad (4)$$

$0 \leq \frac{N_{pc}}{N_p} < 0.15$ için:

$$M_{pc} = M_p \quad (5)$$

Burada $M_p = W_p \sigma_y$ ve $N_p = N_y = A \sigma_y$ 'dir. Kesit faktörü dikdörtgen kesitlerde $\beta = \frac{W_p}{W_y}$ böylece $\beta = 1.5$ olur. I kesitlerinde ise $\beta = 1.12 - 1.20$ arasında değer alır. Denklem (3), (4) ve (5) ifadeleriyle Şekil 3'de verilen grafikler elde edilir.



Şekil 3. Elastik Ve Plastik Mukavemet Yüzeylerinde (A) Dikdörtgen Kesitler Ve (B) I Kesitlerde Diyagram (Elastic And Plastic Strength Surface Diagram In (A) Rectangular Sections And (B) I-Sections)

Bu grafiklerdeki eğriler elastik ve plastik mukavemet yüzeylerini temsil etmektedir. Bu grafiklerde taralı alanlardaki eğilme momenti ve normal kuvvet değerleri, tam elastik ve tam plastik durum arasında bulunur. Şekil 3'de taralı alanda gösterilen yatay çizgi üzerindeki M_{pc} ve M_{yc} 'nin arasında kalan moment değerlerinin M_{yc} farkı ile M_{pc} ve M_{yc} farkına oranıdır. Moment değerleri taralı alan dışında olması durumunda $M_{pc} = M_{yc}$ eşit alınır. Burada M kesit momenti, M_{yc} kesitin taşıyabileceği max elastik moment ve M_{pc} ise kesitte oluşan plastik momenttir. M_{pc} ve M_{yc} 'nin arasında kalan bu bölgedeki normal gerilme durumları dikkate alındığında plastikleşme parametresi rijitlik ifadelerinde kullanılarak statik analiz yapılır. Böylece rijitlik ifadelerinde kullanılan plastikleşme parametresi Denklem (6)'daki gibi elde edilir.

$$\eta = \frac{M_{ij} - M_{yc}}{M_{pc} - M_{yc}} \quad (6)$$

' η ' 0 ile 1 arasında olan bir değerdir. Kesit durumu için $\eta = 0$ durumunda tam elastik, $\eta = 1$ halinde ise tam plastiktir. Bu denklemde bir çubuk için M_{ij} eğilme momentini ifade ederken; M_{yc} elastik eğilme momenti kapasitesini M_{pc} ise plastik eğilme momenti kapasitesini ifade eder (Tok, 2002).

3.2. Plastik Mafsallı Oluşumu (Plastic Hinge Formation)

Bir plastik mafsallı oluşabilmesi için normal kuvvet ve moment değerlerinin Şekil 3'de verilen plastik mukavemet yüzey eğrilerinde olması gerekiyor. Buna göre analiz esnasında plastik mafsallı şu şekilde oluşturulur. İlk aşamada, Denklem (3), (4) ve (5) ile dikdörtgen ve I kesitlerde tanımlanan bütün çubuk uç kesit plastikleşme değerleri hesap edilir. Bu değerlerin 1 den küçük olması halinde Denklem (7), (8a), (8b) ile kesitlerde k değerleri hesaplanır. Böylece k değerlerinden en küçük olanı seçilir ve bu değerle tanımlanan kesitlerdeki normal kuvvet ve moment değerleri çarpılarak yeni normal kuvvet ve yeni moment değerleri elde edilir. Bir önceki hesaplanan moment ve normal kuvvet değerlerine eklenir.

İkinci aşamada hesaplanan en küçük k değerlerinin bulunduğu kesite mafsallı ataması yapılarak taşıyıcı sitem aynı yükler altında tekrar analiz edilir. Analiz sonucundaki değerler normal kuvvet ve moment değerleri ile Denklem (7), (8a) ve (8b) yerine yazılarak göçme mekanizması elde edilene kadar işlem tekrarlanır. Denklemde M eğilme momenti, N aksel kuvvet ve k yük parametresidir.

Dikdörtgen kesitler için:

$$\left(\frac{M}{M_p} + \left(\frac{N}{N_p}\right)^2\right) + k\left(\frac{M}{M_p} + \left(\frac{N}{N_p}\right)^2\right) = 1 \quad (7)$$

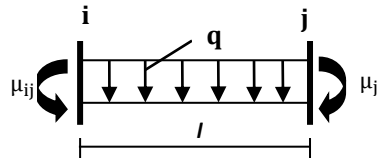
I kesitler için:

$$1 \geq \frac{N}{N_p} \geq 0.15 \text{ için:} \quad \left(0.85 \frac{M}{M_p} + \frac{N}{N_p}\right) + k\left(0.85 \frac{M}{M_p} + \frac{N}{N_p}\right) = 1 \quad (8a)$$

$$0 < \frac{N}{N_p} < 0.15 \text{ için:} \quad \left(\frac{M}{M_p}\right) + k\left(\frac{M}{M_p}\right) = 1 \quad (8b)$$

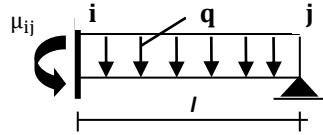
3.3. Kesit Plastikleşme Oranının Ankastrilik Momentlerine Etkisi (Effect of Plastic Section Ratio to Fix End Moments)

Şekil 4, Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de çubuklarda mesnet şartları ve yükleme durumu ankastrilik momentleri Denklem (9), (10), (14) ve (15) ile hesaplanmıştır. Düzgün yayılı yük ve tekil yük durumları için kesitplastikleşme oranının ankastrilik momentlerine etkisi Denklem (12), (13), (17) ve (18) ile incelenmiştir.



Şekil 4. İki Ucu Ankastrilik, Yayılı Yüklü Çubuğun Ankastrilik Momentleri (Fix End Moments Both End SareFixed Of A Uniformly Distributed Loaded Element)

$$\mu_{ij} = \frac{ql^2}{12} \quad \mu_{ji} = -\frac{ql^2}{12} \quad (9)$$



Şekil 5. Bir Ucu Mafsallı, Yayılı Yüklü Çubuğun Ankastrelilik Momentleri (Fix End Moments Of A Uniformly Distributed Loaded Element One End Is Hinged)

$$\mu_{ij} = \frac{ql^2}{8} \quad (10)$$

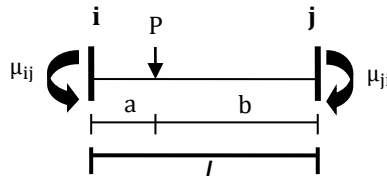
Düzgün yayılı yüklü çubuklarda iki ucu ankastre uçlu bir elemanın i uç değeriyle, düzgün yayılı yüklü çubuğun bir ucu mafsallı durumunda i uç değerinin ankastrelilik momentinin farkı ΔM_{qij} 'dir. Bulunan ΔM_{qij} değeri Denklem (12) ve (13)'e eklenerek bir çubuğun i ve j ucu için ankastrelilik momentlerinin değişimi elde edilmiştir.

$$\Delta M_{qij} = \frac{ql^2}{24} = \frac{ql^2}{8} - \frac{ql^2}{12} \quad (11)$$

Düzgün yayılı yüklü çubuklar için plastik kesit oranlarına göre ankastrelilik momentleri Denklem (12) ve (13) deki gibi hesaplanmıştır.

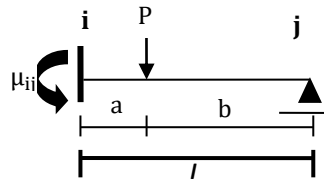
$$0 \leq \eta_i \leq 1 \text{ için:} \quad M_{q'ij} = \left(\frac{ql^2}{12} + \Delta M_{qij} \eta_j \right) (1 - \eta_i) \quad (12)$$

$$0 \leq \eta_j \leq 1 \text{ için:} \quad M_{q'ji} = - \left(\frac{ql^2}{12} + \Delta M_{qij} \eta_i \right) (1 - \eta_j) \quad (13)$$



Şekil6. İki Ucu Ankastre, Tekil Yüklü Çubuğun Ankastrelilik Momentleri (Fix End Moments Both End Sare Fixed Of A Concentrated Loaded Element)

$$\mu_{ij} = \frac{Pab^2}{l^2} \quad \mu_{ji} = - \frac{Pa^2b}{l^2} \quad (14)$$



Şekil 7. Bir Ucu Mafsallı, Tekil Yüklü Çubuğun Ankastrelilik Momentleri (Fix End Moments Of A Concentrated Loaded Element One End Is Hinged)

$$\mu_{ij} = \frac{Pab(b+l)}{2l^2} \quad (15)$$

Tekil yüklü çubuğun iki ucu ankastre uçlu bir elemanın i uç değeriyle, tekil yüklü çubuğun bir ucu mafsallı durumunda i uç değerinin ankastrelilik momentinin farkı ΔM_{pij} 'dir. Bulunan ΔM_{pij} değeri Denklem (14) ve (15)'e eklenerek bir çubuğun i ve j ucu için ankastrelilik momentlerinin değişimi elde edilmiştir.

$$\Delta M_{pij} = \frac{Pabl - Pa^2b}{2l^2} = \frac{Pab(b+l)}{2l^2} - \frac{Pab^2}{l^2} \quad (16)$$

Tekil yüklü çubuklar için plastik kesit oranlarına göre ankastrelik momentleri Denklem (17) ve (18) deki gibi hesaplanmıştır.

$$0 \leq \eta_i \leq 1 \text{ için: } M_{p'ij} = \left(\frac{Pab^2}{L^2} + \Delta M_{pij}\eta_j \right) (1 - \eta_i) \quad (17)$$

$$0 \leq \eta_j \leq 1 \text{ için: } M_{p'ji} = - \left(\frac{Pa^2b}{L^2} + \Delta M_{pij}\eta_i \right) (1 - \eta_j) \quad (18)$$

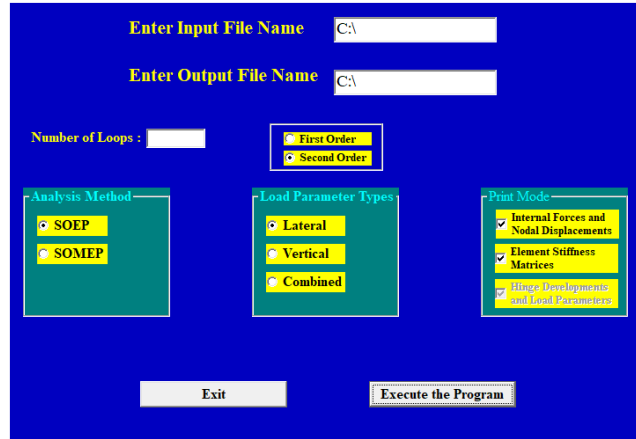
Denklem (17)'de $M_{p'ij}$ değeri M_{pij} i ucu mafsallaşma esnasındaki ankastrelik momentini, Denklem (18)'de $M_{p'ji}$ değeri ise M_{pji} j ucu mafsallaşma esnasındaki ankastrelik momentini ifade eder.

i ve j uçlu bir elemanın ankastre uç momentlerinin yüzde değişimi Denklem (19) bağıntısıyla elde edilmiştir. Burada $M_{\max u\check{c}}$ maximum alacağı ankastre uç moment değeri ve $M_{iu\check{c},ju\check{c}}$ analiz süresince çubuğun i ve j uçlarına etkiyen ankastre uç momentleridir.

$$M_{i,j\%} = \frac{M_{\max u\check{c}} - M_{iu\check{c},ju\check{c}}}{M_{\max u\check{c}}} \times 100 \quad (19)$$

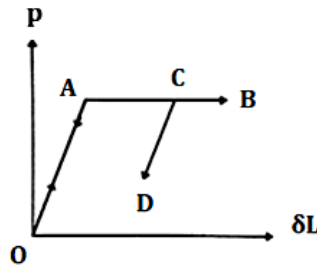
4. Bilgisayar Programı (Computer Program)

Nonlinear analizler yapılarak taşıyıcı sistemlerde, elastik ötesi durumda ankastrelik momentlerinin değişimleri hesaplanmıştır. Bu değişimler SAP2000, SOEP ve SOMEP analiz programlarıyla hesaplanarak analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Çelik malzemeli çerçevenin yatay ve düşey yükleri aşamalı arttırılmıştır. Taşıyıcı sistem SAP2000, SOEP ve SOMEP analiz programlarıyla modellenerek analizleri yapılmıştır. SAP2000 programında, çerçeve sistemin modellenmesi için, hem çerçeve sistemin hem de mafsal oluşum hallerinin görsellerinden faydalanılmıştır.



Şekil 8. SOMEP Ve SOEP Programın Ara Yüzü (Interface Program SOMEP And SOEP)

Bilgisayar programında Şekil 8'deki analizde seçenekli analiz programı kullanılmıştır. Bu seçeneklerde yatay ile düşey yüklerin kademeli arttırılmasıyla veya yatay ve düşey yüklerin birlikte arttırılmasıyla nonlinear hesap yöntemi uygulanmıştır. SOMEP ve SOEP programın opsiyonlarında yatay yüklerin kademeli arttırılmasıyla (Load Lateral Parameter) "LLP", düşey yüklerin kademeli arttırılmasıyla "VLP" (Vertical Load Parameter) veya "LLP" ve "VLP" yüklerin birlikte arttırılmasıyla (Combined Load Parameter) "CLP" doğrusal olmayan hesap yöntemi uygulanmıştır (Açıksarı, 2019). Taşıyıcı sistemin nonlinear hesap yöntemi olan artımsal itme analizi, taşıyıcı sisteminin deprem esnasındaki davranışını daha gerçekçi sunmaktadır. Ayrıca hesaplamaların daha doğru bir şekilde yapılmasını sağlamaktadır. Analizde malzeme modeli olarak ideal elastoplastik için Şekil 9'daki davranış durumu kabul edilmiştir. Elastoplastik malzeme için bilineer (iki doğrudan oluşan) gerilme-deformasyon bağıntıları kullanılır. Kesit, en uç kısmındaki lifleri akmaya başlayınca kadar elastik kalmaktadır. Moment arttıkça plastik deformasyonların kesitte ve elemanın uzunluğu boyunca artarak yayıldığı kabul edilir (Yurtsever, 2005).

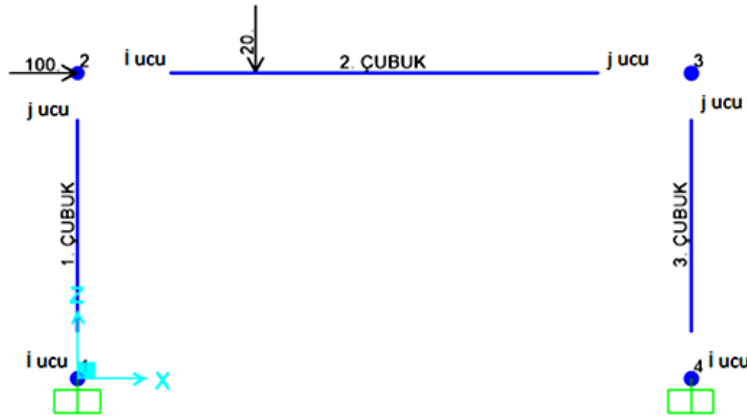


Şekil 9. İdeal Elastoplastik Malzeme Davranışı (Ideal Elastoplastic Material Behavior)

4.1. Tekil Yüklü Çerçeve Sistem (Frame System With Concentrated Load)

Şekil 10 için tekil yüklü örnekte statik itme analizi kullanılarak, çelik taşıyıcı sistemin SOEP ve SOMEP analiz metoduna, ankastrelilik momentlerin değişimini dikkate alan yazılım eklenerek yeni bir program elde edilmiştir. Böylece mevcut SOMEP ve SOEP analiz methodunun, programlama dili kullanılarak bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu çalışmada örnek olarak ele alınan sistemlerin nonlineer analizleri SOMEP elastoplastik analiz metodu ve SAP2000 programıyla yapılmıştır. Bu analizdeki örneklerde, çelik çerçeve sistemlerin nonlineer davranışlarını da dikkate alarak plastik kesit oranlarına göre ankastrelilik momentlerinin değişimi incelenmiştir. SAP2000 programında yapılan statik itme analizi sonucunda elde edilen moment değerleri kullanılarak kesit plastikleşme oranları hesaplanmıştır. Analizlerde malzeme bakımından ve geometri bakımından ikinci mertebeye etkileri göz önüne alınmıştır.

Şekil 10'daki örnekte kolonda H400*634, kirişte IPE750*222 çelik profili kullanılmıştır. Kolonlar arası açıklık 10,0 m ve yükseklik 5,0 m'dir. Çerçeveyi meydana getiren kesit alanları kolonda 0,0808 m², kirişte 0,0283 m² dir. Atalet momentleri ise kolonda 0,002756 m⁴ kirişte 0,002782 m⁴'tür. Çelik çerçevenin 2 numaralı düğüm noktasına 100 ton'luk tekil yatay yük yerleştirilmiştir. Buna ek olarak 2 numaralı elemana i ucundan 2 metre uzaklıkta 20 ton'luk düşey yük etki etmektedir.



Şekil 10. Tek Katlı Tek Açıklıklı Tekil Yüklü Çerçeve (Concentrated Loaded Frame With The One Span And One Storey)

Şekil 10'da modellenen örnek, çelik yapı sisteminde yatay ve düşey yük kesit plastikleşme oranının artan değerleri için hesaplanmıştır. Göçmeye karşı gelen yatay kesit plastikleşme oranı elde edilmiştir ve buna bağlı olarak SOMEP ve SOEP analiz metoduyla ankastrelilik momentlerinin değişimi adım adım tespit edilmiştir.

4.1.1. Tekil Yüklü Sistemin Analiz Sonuçları (Analysis Results Of Concentrated Loaded System)

Şekil 10'da iki ucu ankastre tekil yüklü çerçeve için kirişteki (2. Çubuk) 2. düğüm ve 3. düğüm noktasında bulunan i ve j uçlarında ankastrelilik momentlerin değerleri Denklem (14) bağıntısına göre hesaplanmıştır. Bu değerler Şekil 11'de görüldüğü gibidir.

2 nolu çubuktaki hesaplamalar sonucunda SOMEP ve SOEP analizinde i uçlarının ankastrelilik momenti doğrusal artış göstermiştir. Elastik moment kapasitesi aşılmamıştır. Başka bir ifadeyle $M \leq M_y$ için Tablo 1 ve Tablo 2 veriler sonucu Tablo 3'de gösterimi yapılan değerlerle belirtilmiştir.

Tablo 1. Tekil Yük İçin SOMEPE Ankaştrelik Momentleri (SOMEPE Fix End Moments For The Concentrated Load)

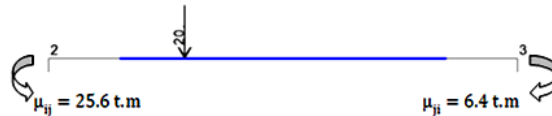
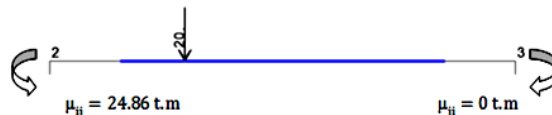
Analiz Adımları	Yük Çarpanı	Düğüm	Ankaştre Ucu	Ankaştrelik Moment(tm)
1	1	2	i	25.6
		3	j	6.4
2	1.47	2	i	25.6
		3	j	6.4
3	1.91	2	i	24.86
		3	j	0
4	2.08	2	i	15.64
		3	j	0
5	2.11	2	i	10.7
		3	j	0
6	2.151678	2	i	7.5
		3	j	0
7	2.151849	2	i	0
		3	j	0

Tablo 2. Tekil Yük İçin SOEP Ankaştrelik Momentleri (SOEP Fix End Moments For The Concentrated Load)

Analiz Adımları	Yük Çarpanı	Düğüm	Ankaştre Ucu	Ankaştrelik Moment(tm)
1	1	2	i	25.6
		3	j	6.4
2	1.47	2	i	25.6
		3	j	6.4
3	1.91	2	i	28.8
		3	j	0
4	2.08	2	i	28.8
		3	j	0
5	2.11	2	i	28.8
		3	j	0
6	2.151678	2	i	0
		3	j	0
7	2.151849	2	i	0
		3	j	0

Tablo 3. Tekil Yük İçin SOMEPE Ve SOEP Ankaştrelik Momentleri (SOMEPE And SOEP Fix End Moments For The Concentrated Load)

Analiz Adımları	Yük Çarpanı	SOMEPE Ankaştrelik Momenti(t.m)	SOEP Ankaştrelik Momenti(t.m)	My(t.m)	Mp(t.m)
1	1	80	80	171.648	197.4
2	1.47	118	118	171.648	197.4
3	1.91	153.143	153.143	171.648	197.4
4	2.08	168.14	168.139	171.648	197.4
5	2.11	176.464	168.883	171.648	197.4
6	2.1516	195.329	195.339	171.648	197.4
7	2.1518	195.456	195.426	171.648	197.4

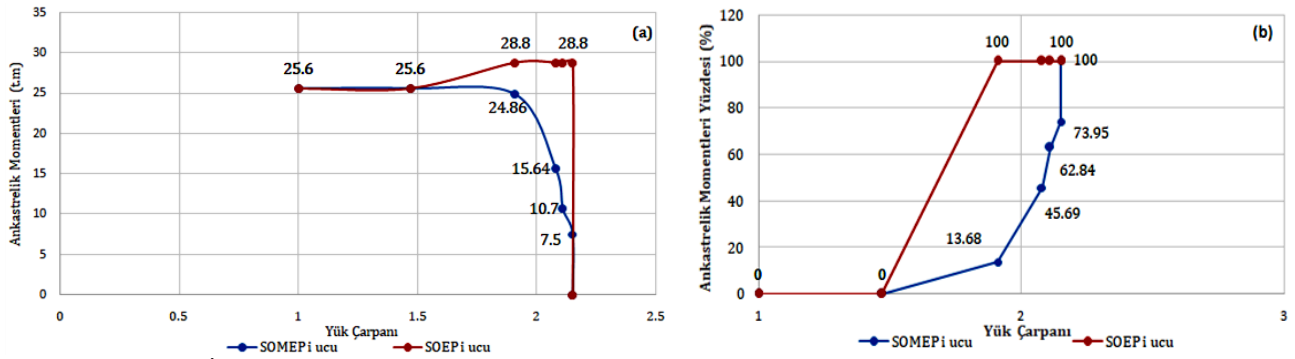
**Şekil 11.** 2 Nolu Çubuğun Ankaştrelik Momentleri (Fix End Moments Of Element No. 2)**Şekil 12.** SOMEPE Analizine Göre Ankaştrelik Momentleri (Fix End Moments With Respect To SOMEPE Analysis)

Şekil 10'daki örnekte 2. çubuktaki (2. düğüm ve 3. düğüm) düğüm noktalarında i ve j uçlarının SOMEPE metoduna göre analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Analiz sonucu Denklem (17) ve (18) bağıntılarına göre 2 nolu çubuk ankastrelik moment değerleri Şekil 12'de verilmiştir. Hem SOMEPE hem de SOEP analiz metoduna göre elde edilen i ucu ankastrelik momentlerinin değişimleri Tablo 3'de verilmiştir. Şekil 10'daki örnekte 2. çubuktaki (2. düğüm ve 3. düğüm noktası) düğüm noktalarında i ve j uçlarının SOEP metoduna göre analiz sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Analiz sonucu Denklem (15) bağıntısına göre 2 nolu çubuk ankastrelik moment değerleri Şekil 13'de verilmiştir.



Şekil 13. j Ucu Mafsallı 2 Nolu Çubuğun Ankastrelik Momentleri (Fix End Moments Of Element No. 2 With Hinged j End)

Elastoplastik analiz metodunda hesaplanan (2. çubuk 2. düğüm noktası) i ucu ankastrelik moment değerleri Şekil 14' de SOMEPE ve SOEP değişimi grafikte doğrusal bir artış seyretmemiştir. Elde edilen veriler SOMEPE elastoplastik analiz metoduna göre 2. çubuk i ucunda elastik moment kapasitesi aşılmaktadır. Bu durumda elastik bölgenin ötesine geçildiği ama tam plastikleşmenin gerçekleşmediği elastoplastik durumu Tablo 3 de verilmiştir. Yani $M_y \leq M \leq M_p$ 'dir. Ardışık analizler sonucu Şekil 14'de verilen grafikte SOMEPE ve SOEP i ve j uçlarının ankastrelik momentleri son ardışık yük çarpanı artımı durumunda verilen Tablo 3'de görüldüğü gibi tam plastik kesit durum olduğu görülmektedir. Yani $M = M_p$ 'dir. Tablo 3'de verilen ilk yük çarpanı için ankastrelik momentler Şekil 11'deki değerleri alır. Şekil 12'de ise, ardışık hesaplamalar sonucunda elde edilen yük çarpanı için ankastrelik momentleri hesaplanmıştır. Çelik çerçevenin SOEP ve SOMEPE analiz metodundan göçme yük çarpanı ve ankastrelik moment değerleri, başlangıç ankastrelik momentleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 14'deki değerler ile karşılaştırma sonuçları verilmiştir. Ankastrelik momentlerinin plastik kesit oranlarının değişimi yüzde olarak Şekil 14'de gösterilmiştir.



Şekil 14. Tekil Yük İçin 2 Nolu Çubuğun SOMEPE Ve SOEP (A) Ankastrelik Momentleri Ve (B) Yüzdesel Değişimi (SOMEPE And SOEP (A) Fix End Moments And (B) Percentage Changing Concentrated Load For The Element No. 2)

Tablo 4. SOMEPE Ve SAP2000 İçin Moment Değerleri (Moment Values For SOMEPE And SAP2000)

Adım No	Çubuk No	SOMEPE Analiz Metodu (t.m)		SAP2000 Analiz Metodu (t.m)	
1	1. Çubuk	M _i = 155.949	M _j = 80	M _i = 182.39	M _j = 79.91
	2. Çubuk	M _i = 80	M _j = 103.119	M _i = 79.91	M _j = 133.01
	3. Çubuk	M _i = 103.119	M _j = 161.285	M _i = 133.01	M _j = 201.03
2	1. Çubuk	M _i = 229.885	M _j = 117.928	M _i = 278.52	M _j = 127.06
	2. Çubuk	M _i = 117.928	M _j = 152.008	M _i = 127.06	M _j = 186.41
	3. Çubuk	M _i = 152.008	M _j = 237.752	M _i = 186.41	M _j = 293.03
3	1. Çubuk	M _i = 298.532	M _j = 153.143	M _i = 328.43	M _j = 148.53
	2. Çubuk	M _i = 153.143	M _j = 197.4	M _i = 148.53	M _j = 188.47
	3. Çubuk	M _i = 197.4	M _j = 308.748	M _i = 188.47	M _j = 329.35
	1. Çubuk	M _i = 342.24	M _j = 168.14	M _i = 339.95	M _j = 172.31

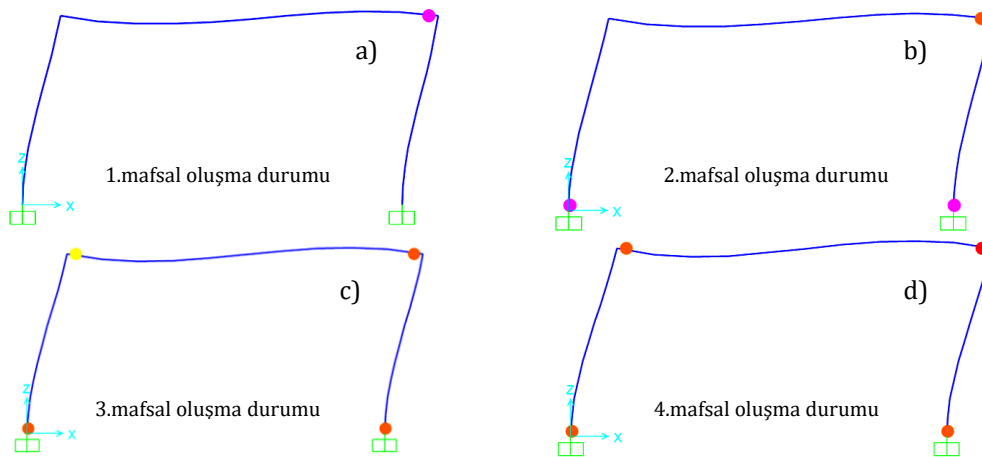
4	2. Çubuk	Mi = 168.14	Mj = 197.4	Mi = 172.31	Mj = 190.76
	3. Çubuk	Mi = 197.4	Mj = 335.1	Mi = 190.76	Mj = 339.80
	1. Çubuk	Mi = 342.24	Mj = 176.464	Mi = 341.12	Mj = 186.39
5	2. Çubuk	Mi = 176.464	Mj = 197.4	Mi = 186.39	Mj = 192.28
	3. Çubuk	Mi = 197.4	Mj = 342.4	Mi = 192.28	Mj = 340.85
	1. Çubuk	Mi = 342.4	Mj = 195.329	Mi = 344.01	Mj = 189.67
6	2. Çubuk	Mi = 195.329	Mj = 197.4	Mi = 189.67	Mj = 195.67
	3. Çubuk	Mi = 197.4	Mj = 342.24	Mi = 195.67	Mj = 343.73
	1. Çubuk	Mi = 342.24	Mj = 195.456	Mi = 349.07	Mj = 195.52
7	2. Çubuk	Mi = 195.456	Mj = 197.4	Mi = 195.52	Mj = 201.61
	3. Çubuk	Mi = 197.4	Mj = 342.24	Mi = 201.61	Mj = 348.78

İdeal elastoplastik malzemenin moment değerleri bağıntılar ile hesaplanmıştır. SOMEP de malzeme modeli Şekil 9'daki gibi kabul edilmiştir. SAP2000 de ise iterasyon hatası oluşmaması için Şekil 9'da A-B doğru parçasına %10 eğim verilmiştir. Moment değerleri SAP2000 ve SOMEP analiz metodu sonuçlarına göre karşılaştırılması Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 5. Sistemde 2. Çubuk i Ucu İçin Plastikleşme Parametrelerinin Karşılaştırılması (Comparison Of The Plasticization Parameters For Element 2 i End İn The System)

SOMEP Analiz Metodu		SAP2000 Pushover Analiz Metodu	
Analiz Adımları	Kesit Plastikleşme Oranı	Analiz Adımları	Kesit Plastikleşme Oranı
1	-3.558	1	3.562
2	-2.086	2	1.731
3	-2.086	3	0.897
4	-0.136	4	0.025
5	0.187	5	0.572
6	0.919	6	0.699
7	0.924	7	0.926

İdeal elastoplastik malzemenin SOMEP elastoplastik analiz metodu ve SAP2000 statik itme analizi metoduna göre 2. çubuk i ucu için plastik kesit oranlarının karşılaştırılması Tablo 5'de verilmiştir.

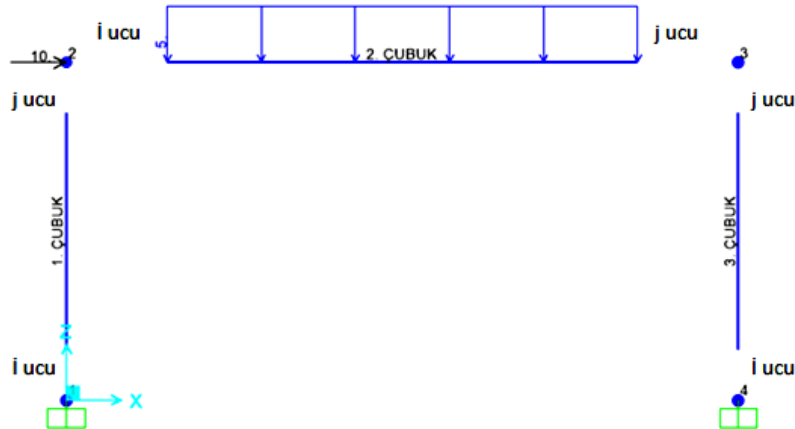


Şekil 15. Çerçeve Sistemdeki (A) Elastik Ötesi-Hemen Kullanım Seviyesi Aralığı (Minimum Hasar, Pembe), (B) Göçme Bölgesi (Turuncu), (C) Gerilmenin Boşalıp Kırılmaların Başladığı Aralık (Sarı) Ve (D) Tamamen Göçme Noktası (Kırmızı) Plastik Mafsal Oluşma Durumları (In The Frame System (A) Beyond Elastic-İmmediate Use Level Range (Minimum Damage, Pink), (B) Failure Zone (Orange), (C) The Range Where The Stress Is Released And The Fractures Begin (Yellow) And (D) Complete Collapse Point (Red) Plastic Hinge Formation Situations

Çerçeveler, bir plastik mafsallı geliştirilene kadar uygulanan yüklerin her adımda kademeli olarak artırıldığı adım adım elastoplastik analiz yöntemi kullanılarak analiz edilir. Bu elastoplastik analiz, bir sonraki plastik mafsallı geliştirilene kadar dış yükleri aşamalı olarak artırarak ve yeni azaltılmış plastik momentleri uygulayarak tekrarlanır. Bu adım adım elastoplastik analiz, çerçeve kısmen veya tamamen çökene kadar devam eder (Uslu,2021; Bayer, 2021; Saraçoğlu, 2021). İdeal elastoplastik malzemenin SAP2000 ve SOMEPE analiz metodu sonuçlarına göre Şekil 15’de çubuk uçlarında plastik mafsallı oluşum sırası aşamalı olarak gösterilmiştir.

4.2. Yayılı yüklü çerçeve sistem (Frame System With Uniformly Distributed Load)

Şekil 16’da yayılı yüklü örnek için düzlem çelik çerçeve incelenmiştir. Bu örnekte çelik yapı sisteminin SOEP ve SOMEPE analiz metoduna göre hesap yöntemleri kullanılarak doğrusal olmayan statik itme analizi yapılmıştır. Sistemde kolonlar H400*634, kirişte IPE750*222 çelik profili kullanılmıştır. Çelik çerçevenin kolonlar arası açıklık 10,0 m, kat yüksekliği ise 5,0 m’dir. Çerçeveyi meydana getiren kesit alanları kolonda 0,0808 m², kirişte 0,0283 m² dir. Atalet momentleri ise kolonda 0,002756 m⁴, kirişte 0,002782 m⁴tür. Çerçevenin 2 numaralı düğüm noktasına 10 tonluk tekil yatay yük, 2 numaralı elemana 5 tonluk yayılı yük etki etmektedir.



Şekil 16. Tek Katlı Tek Açıklıklı Yayılı Yüklü Çerçeve (Uniformly Distributed Loaded Frame With The One Span And One Storey)

4.2.2. Yayılı Yüklü Sistemin Analiz Sonuçları (Analysis Result Of Uniformly Distributed Loaded System)

Şekil 16’da tek katlı tek açıklıklı yayılı yüklü çerçeve için (2. Çubuk) 2. düğüm ve 3. düğüm noktasında bulunan i ve j uçlarında ankastrelik momentlerin değerleri Denklem (9) bağıntısına göre hesaplanmıştır. Bu değerler Şekil 17’de görüldüğü gibidir.

Tablo 6. Yayılı Yük İçin SOMEPE Ankastrelik Momentleri (SOMEPE Fix End Moments For Uniformly Distributed Load)

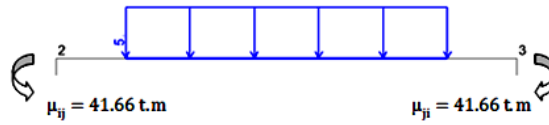
Analiz Adımları	Yük Çarpanı	Düğüm	Ankastre Ucu	Ankastrelik Moment(tm)
1	3.72	2	i	41.66
		3	j	41.66
2	4.66	2	i	62.5
		3	j	0
3	5.66	2	i	62.5
		3	j	0
4	6.66	2	i	57.326
		3	j	0
5	7.66	2	i	28
		3	j	0
6	8.66	2	i	10.45
		3	j	0
7	9.66	2	i	2.86
		3	j	0
8	10.66	2	i	0.22
		3	j	0

Tablo 7. Yayılı Yük İçin SOEP Ankastrilik Momentleri (SOEP Fix End Moments For Uniformly Distributed Load)

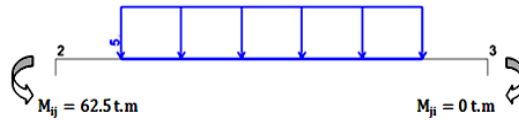
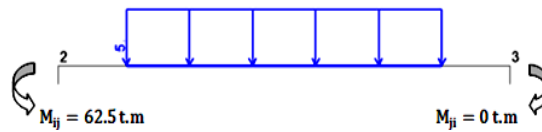
Analiz Adımları	Yük Çarpanı	Düğüm	Ankastr Ucu	Ankastrilik Moment(t.m)
1	3.72	2	i	41.66
		3	j	41.66
2	4.66	2	i	62.5
		3	j	0
3	5.66	2	i	0
		3	j	0
4	6.66	2	i	0
		3	j	0
5	7.66	2	i	0
		3	j	0
6	8.66	2	i	0
		3	j	0
7	9.66	2	i	0
		3	j	0
8	10.66	2	i	0
		3	j	0

Tablo 8. Yayılı Yük İçin SOMEPE Ve SOEP Ankastrilik Momentleri (SOMEPE And SOEP Fix End Moments For Uniformly Distributed Load)

Analiz Adımları	Yük Çarpanı	SOMEPE Ankastrilik Momenti(t.m)	SOEP Ankastrilik Momenti(t.m)	My(t.m)	Mp(t.m)
1	3.72	41.66	87.769	171.648	197.4
2	4.66	62.5	109.776	171.648	197.4
3	5.66	62.5	197.4	171.648	197.4
4	6.66	57.326	197.4	171.648	197.4
5	7.66	28	197.4	171.648	197.4
6	8.66	10.45	197.4	171.648	197.4
7	9.66	2.86	197.4	171.648	197.4
8	10.66	0.22	197.4	171.648	197.4

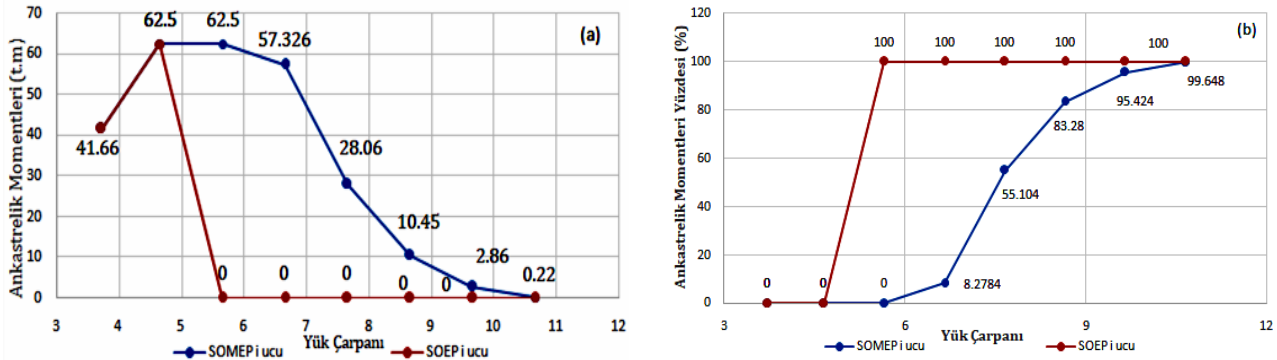
**Şekil 17.** 2 Nolu Çubuğun Ankastrilik Momentleri (Fix End Moments Of Element No. 2)

2 nolu çubuktaki hesaplamalar sonucunda SOMEPE ve SOEP i uçlarının ankastrilik momenti doğrusal artış göstermiştir. Elastik moment kapasitesinin aşılmamıştır. Başka bir ifadeyle $M \leq My$ olduğu Tablo 6 ve Tablo 7 veriler sonucu Tablo 8'de gösterimi yapılan değerlerle belirtilmiştir.

**Şekil 18.** SOMEPE Analizine Göre Ankastrilik Momentleri (Fix End Moments With Respect To SOMEPE Analysis)**Şekil 19.** j Ucu Mafsallı 2 Nolu Çubuğun Ankastrilik Momentleri (Fix End Moments Of Element No. 2 With Hinged j End)

Şekil 16'daki örnekte 2. çubuktaki (2. düğüm ve 3. düğüm) düğüm noktalarında i ve j uçlarının SOMEPE metoduna göre analiz sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Analiz sonucu Denklem (12) ve (13) bağıntılarına göre 2 nolu çubuk ankastrilik moment değerleri Şekil 18'de verilmiştir. Hem SOMEPE hem de SOEP analiz metoduna göre elde edilen i ucu ankastrilik momentlerinin değişimleri Tablo 8'de verilmiştir.

Şekil 16'daki örnekte 2. çubuktaki (2. düğüm ve 3. düğüm noktası) düğüm noktalarında i ve j uçlarının SOEP metoduna göre analiz sonuçları Tablo 7'de verilmiştir. Analiz sonucu (9) bağıntısına göre 2 nolu çubuk ankastrel moment değerleri Şekil 19'da verilmiştir. Elastoplastik analiz metodunda hesaplanan (2. çubuk 2. düğüm noktası) i ucu ankastrel moment değerleri Şekil 20'deki grafikte doğrusal bir artış seyretmemiştir. Elde edilen veriler SOMEPE elastoplastik analiz metoduna göre 2. çubuk i ucunda elastik moment kapasitesi aşılmaktadır. Bu durumda elastik bölgenin ötesine geçildiği ama tam plastikleşmenin gerçekleşmediği elastoplastik durumu Tablo 8'de verilmiştir. Bu durum $M_y \leq M \leq M_p$ 'dir. Ardışık analizler sonucu Şekil 20'de verilen grafikte SOMEPE ve SOEP i ve j uçlarının ankastrel momentleri son ardışık yük çarpanı artımı durumunda Tablo 8'de görüldüğü gibi tam plastik kesit durum olduğu görülmektedir. Yani $M = M_p$ 'dir. Tablo 8 de verilen ilk yük çarpanı için ankastrel momentler Şekil 17'deki değerleri alır. Şekil 18'de ise, ardışık hesaplamalar sonucunda elde edilen yük çarpanı için ankastrel momentleri hesaplanmıştır. Çelik çerçevenin SOEP ve SOMEPE analiz metodundan göçme yük çarpanı ve ankastrel moment değerleri, başlangıç ankastrel momentleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca Şekil 20'deki değerler ile karşılaştırma sonuçları verilmiştir. Ankastrel momentlerinin plastik kesit oranlarının değişimi yüzde olarak Şekil 20'de gösterilmiştir.



Şekil 20. Yayılı Yük İçin 2 Nolu Çubuğun SOMEPE Ve SOEP (A) Ankastrel Momentleri Ve (B) Yüzdese Değişimi (SOMEPE And SOEP (A) Fix End Moments And (B) Percentage Changing Uniformly Distributed Load For The Element No. 2)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, yüklü çerçeve sistemlerin yüklerinin artımı esnasında çubuk uçlarında oluşan plastikleşmenin, kesit plastikleşme oranına göre ankastrel momentlerine etkisi incelenmiştir. Plastikleşme oranı tam plastik kesitin yüzdesi olarak ifade edilerek ankastrel moment ifadesinde kullanılmıştır. Bu oran, bir kesit için tam plastik ve tam elastik arası durumları gösteren sıfır ile bir arasında bir değerdir. Böylece kesit plastikleşme oranına bağlı olarak elde edilen Denklemler (12), (13), (17) ve (18)'de görüldüğü üzere kesitte oluşan plastik deformasyonların ankastr uç momentlerine etkisi ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada önerilen SOMEPE ve SOEP hesap metodunun sonuçları, SAP2000'de elde edilen analiz sonuçlarıyla kıyaslanarak güvenilir olduğu görülmektedir. Tekil yük ve yayılı yüklü için iki çerçeve sistem üzerinde çalışılmıştır. Sistemlerin mevcut yükler altında analizi yapılmıştır. Daha sonra yatay yükleri göçme mekanizması oluşuncaya kadar arttırılmıştır. Elde edilen sonuçlar grafiklerle ve tablolarla ifade edilmiştir. Daha önce çalışılan SOMEPE ve SOEP bilgisayar programına kesit plastikleşme oranına göre ankastrel momentler veren yeni bağıntılar eklenmiştir. Benzer çalışmalar diğer çubuk yükleme durumları için yükleme durumlarına yönelik yeni bağıntılar elde edilerek yapılabilir. Elastik ötesi durumu ifade eden plastik bölge ve sonrası olan pekleşme bölgesi için de incelenebilir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde değerli katkılarını esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hatip TOK'a en derin saygılarımı sunarım.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

Açıksarı, H.F., 2019. Çelik Taşıyıcı Sistemlerin Doğrusal Olmayan Analizinde Ankastr Momentlerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.

- American Institute of Steel Construction, Inc. (AISC) (1999), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings Supplement No. Chicago, IL.
- Aysal SE., 1992. Kapalı dikdörtgen çelik çerçevelerin elastik-plastik analizi. Doktora Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çakıroğlu, A., 1980. Özer, E., Malzeme ve Geometri Değişimi Bakımından Lineer Olmayan Sistemler, Cilt I, İ.T.Ü. Kütüphanesi, İstanbul.
- Daryan, A.S., Palizi, S., 2020. New plastic analysis procedure for collapse prediction of braced frames by means of genetical go-rithm, Journal of Structural Engineering (United States), 146(1), 1–14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002462](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002462).
- Doan-Ngoc, T., N., Dang, X.L., Chuc, Q. T., Balling, R. J., Ngo-Huu, C., 2016. Second-order Plastic-hinge Analysis of Planar Steel Frames Using Corotational Beam-column Element, Journal of Constructional Steel Research, 121, 413–426. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.03.016>.
- Hodge, P.G., 1959. Plastic Analysis of Structures, McGraw-Hill series in engineering sciences, New York.
- İrtem, E., 1991. Uzun çubuk sistemlerde ikinci mertebe limit yükün hesabı için bir yük artımı yöntemi. Doktora Tezi, G.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İstanbul.
- Kanchanalai, T., 1977. "The design and behavior of beam-columns in unbraced steel frames." AISI Project No. 189, Report No. 2, Civil Engineering/Structures Research Lab., University of Texas at Austin, pp. 300.
- Liapunov, S., 1974. Ultimate strength of multistory steel rigid frames. J. Struct. Div., 100, (8) , pp.1643.
- Moy, SSJ., 1996. Plastic Methods for Steel and Concrete Structures, Ed. 2, MACMILLAN, London.
- Özer, E., 1980. Çakıroğlu A., Malzeme ve Geometri Değişimi Bakımından Lineer Olmayan Sistemler I. Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- Özer, E., 2004. "Yapı Sistemlerinin Lineer Olmayan Analizi", Ders Notları, sayfalar 1-238, <https://dokumen.tips/documents/yapi-sistemlerinin-dogrusal-olmayan-analizi>.
- Özer, E., 2004. "Yapı Sistemlerinin Lineer Olmayan Analizi Ders Notları", www.ins.itu.edu.tr/eozer, İstanbul.
- Parikh, B.P., 1966. The elastic-plastic analysis and design of unbraced multistory steel frames, PhD. Dissertation, Lehigh University, pp.53-63.
- Tok, H., 2000. Evaluation of Collapse Loads and Mechanisms of Multistory Structures By Nonlinear Analysis Methods. Doctoral Thesis, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Tok, H., 2002. Elastoplastik Malzemeli Taşıyıcı Sistemlerde Yük Artımı Oranlarının Göçme Yüküne ve Sistem Davranışına Etkileri. 4. Mühendislik-Mimarlık Sempozyumu, sayfa 491-500, Balıkesir, Türkiye, 11-12-13 Eylül.
- Uslu, F. 2016. İki Boyutlu Çerçevelerin Plastik Analizinde Eksenel Kuvvetlerin Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Uslu, F., Bayer, M.T., Saraçoğlu, M.H., 2021. New Elastoplastic Analysis of Two-Dimensional Frames When Some Plastic Hinges Unload Elastically, Int J Steel Struct 21, 525–538. <https://doi.org/10.1007/s13296-021-00453-6>.
- Üçerler, C., 1995. Özet Çok Katlı Çelik Çerçevelerin H. Mertebe Limit Yüklerinin Hesabı. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir.
- Wood, R.H., 1958. The stability of Tall Buildings, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, pp. 11-69. <https://doi.org/10.1680/iicep.1958.2424>.
- Yılmaz, M., 2003. Elasto-Plastik Çerçeve Sistemlerin Dinamik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yurtsever, M., 2005. Çelik Çerçevelerin Eurocode 3'e Göre Boyutlandırılmasında Kullanılan Plastik Hesap Yöntemleri. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.