

KISMİ VE TAM DOLGU DUVARLI ÇELİK ÇERÇEVELERİN YATAY YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞININ ELASTO-PLASTİK ANALİZ YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Fırat KAYMAK ve Mehmet Emin TUNA*

Mimarlık Bölümü, Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi Maltepe 06570, Ankara

*Mimarlık Bölümü, Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi, Karabük Üniversitesi, Safranbolu 78600, Karabük

firatkaymak@gazi.edu.tr, metuna@karabuk.edu.tr

(Geliş/Received: 12.07.2010; Kabul/Accepted: 25.03.2011)

ÖZET

Yaklaşık olarak son 40 yıldan bu yana, dolgu duvarlı çerçevelerin dayanım ve davranışı konusunda yapılan çalışmalar, henüz standartlaşan bir yöntemle sonuçlanmamıştır. Ancak dolgu duvarların, yatay yük altındaki çelik ve betonarme çerçevelerin davranışını önemli ölçüde değiştirdiği bilinen bir gerçektir. Bu çalışmada, bilinen bu gerçeği aydınlatmak için taşıyıcı eleman olarak dikkate alınmayan dolgu duvarların yatay yükler (monotonik yükler) altındaki çelik çerçeveler üzerindeki olumlu ve olumsuz etkileri araştırılmıştır. İki katlı iki açıklıklı düzlem çelik çerçeve tasarlanmış, dolgu duvarlı, dolgu duvarsız ve bant pencere kombinasyonları olmak üzere toplam 7 adet model oluşturulmuş, dolgu duvar malzemesi olarak, hafif ve elastisite modülü yüksek gazbeton kullanılmıştır. Düzlem çerçeve boşluklarında kullanılan dolgu duvarlar için eşdeğer basınç çubuğu modeli tercih edilmiş ve elasto-plastik analiz yöntemi kullanılmıştır. Yapılan kabuller doğrultusunda, yerleştirilen simetrik ve asimetric dolgu duvarların çerçeve sistem üzerindeki göçme yükü, enerji tüketimi, süneklik, yatay deplasman ve göçme yükündeki taban kesme kuvvetleri, ayrıca yumuşak kat ve bant pencere modellerinde kısa kolon etkileri araştırılmıştır. Analiz ve modellemelerin yapılmasında SAP2000 statik analiz programı kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çelik çerçeve, dolgu duvar etkisi, elasto-plastik analiz, plastik mafsal, göçme yükü.

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOUR OF STEEL FRAMES WITH THE PARTIAL AND FULL INFILL WALLS UNDER HORIZONTAL LOADS WITH ELASTO-PLASTIC METHODS

ABSTRACT

For about 40 years, studies conducted on strength and behavior of infill walls have not been resulted in standardized consensus methods. However, it is a well-known fact that infill walls have significant impact on the behavior of steel and reinforced concrete frames under horizontal loads. In this study, positive and negative effects of infill walls (considered as non-structural members despite the aforementioned fact) on steel frames subjected to lateral monotonic loads are investigated. Within the study, a two-story, two-span planar steel frame is designed and modeled for seven different infill wall combinations such as with/without infill wall, band windows etc. For infill walls, gas concrete is used due to its light weight and high modulus of elasticity. In planar frames, the infill walls under horizontal loads are modeled with equivalent compression bar model and analyzed for elasto-plastic analysis. Based on certain assumptions, ultimate loads, energy dissipation, ductility, lateral displacements, and ultimate base shear forces of symmetrical and asymmetrical vertical infill walls on the frames are investigated. Moreover, short column issues on band window model are examined as well as soft story effects. Modeling and analyses are carried out in SAP2000 static analysis program.

Keywords: Steel frame, effects of infill walls, elasto-plastic analysis, plastic hinge, ultimate load.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çerçeve modeller, yapı tasarımında kullanılan taşıyıcı sistemler olup ve günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tasarım aşamasında tüm statik analizler ve davranış beklentileri, kolon ve kirişten oluşan çıplak çerçeve sistem üzerine kurulu iken uygulamada yapının fonksiyonunu yerine getirebilmesi için, çerçeve boşlukları uygun bir malzemeyle doldurulur. Mevcut analiz ve tasarım tekniklerinde çerçeve sistemli yapılarda sadece kolon, kiriş ve döşemelerin sistem içinde taşıyıcı oldukları, dolgu duvarların yatay yükler altında taşıyıcı etkilerinin ihmal edildiği analizler yapılmaktadır. Ancak dolgu duvarlar, yapısal olmayan elemanlar olarak düşünülmesine karşın yatay yüklerle maruz kaldığında çerçeveyle birlikte çalışmakta, çerçeve ile birlikte yatay olarak etkiyen, deprem yükleri altında, tasarımda incelenen çıplak çerçeveden oldukça farklı dayanım ve davranış göstermektedir.

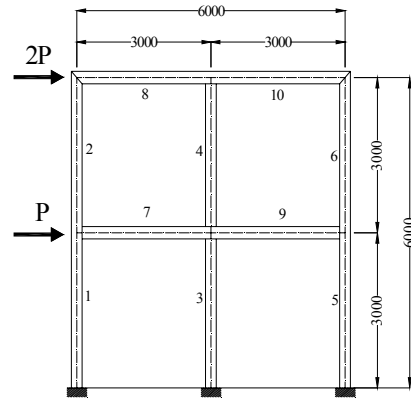
Deprem yükleri yapıya işletme yükleri gibi sürekli etkilediği için, yapı mühendisliğinde doğrusal olmayan elasto-plastik analiz yöntemi kullanılmaktadır. Dolgu malzemesinin dayanımı ne kadar düşük olursa olsun, yatay yükler altındaki davranış açısından, dolgunsuz çerçeveden farklı bir özelliğe sahip olan dolgulu çerçeve, sistemin sünekliğine ve enerji tüketimine, azımsanamayacak derecede etkilediği, bu konuda yapılan tüm analitik ve deneysel çalışmalarla somut olarak ortaya konulmaktadır. Elde edilen en genel sonuç, dolgu duvarlı çerçevelerin yanal deplasman ve sünekliğinin, dolgunsuz çerçevelere oranla daha az olduğudur. Dolgulu çerçeve dayanımının boş çerçeveye göre daha büyük olabileceği, tasarım-uygulama-sonuç ilişkisi yönünden herhangi bir sorun oluşturmayacağı ve güvenli tarafta kalacağı öngörülerinin eksikliği, olaya, yanal deplasman ve süneklik açısından yaklaşıldığında, çarpıcı bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

Uygulamalarda sıkça görülen dolgu duvarların çerçeve içerisinde rastgele ve bilinçsizce dağılımı, tasarım sırasında hesaplanmayan birçok faktör ve davranış karmaşıklığını meydana getirmektedir. Hafif ve sünek olması nedeni ile tercih edilen çelik çerçeveli yüksek yapılarda, deprem yükleri ile yer değiştirmelerin ve periyodun artacağı ve buna karşı alınabilecek diğer yapısal önlemlerin daha bilinçli tasarlanabilmesi için dolgu duvarların etkilerinin hesaba katılmasının gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

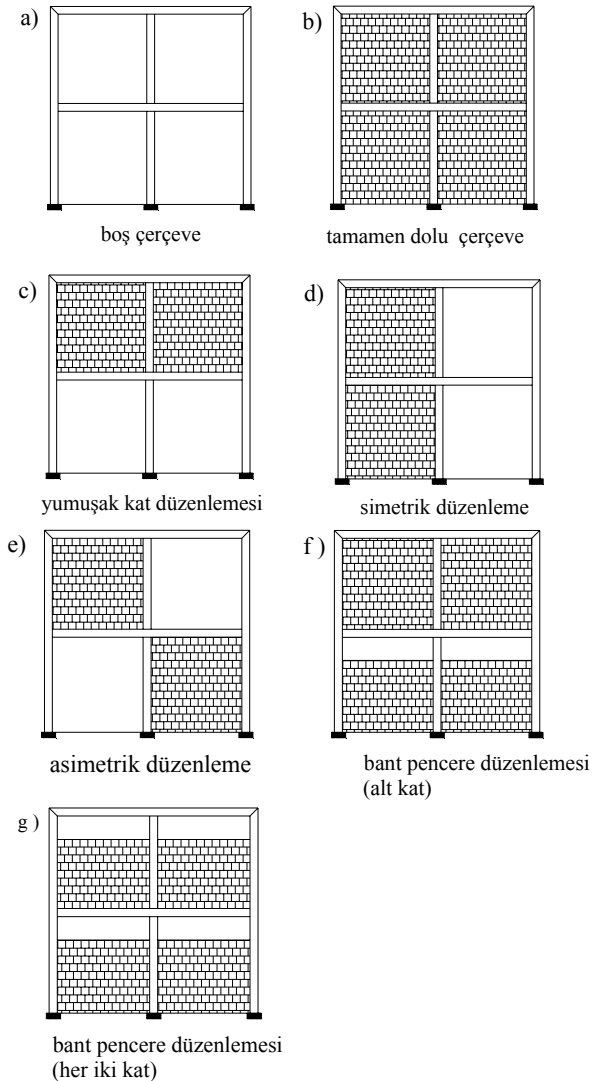
2. ÇALIŞMANIN YÖNTEMİ (METHOD OF STUDY)

Çalışmanın kapsamında 6000 mm genişliğinde ve yüksekliğinde, 2 katlı ve 2 açıklıklı çelik çerçeve üzerine (Şekil 1.) yerleştirilmiş değişik kombinasyonlarda dolgu duvarlar ile oluşturulmuş 7 tip çerçevenin depremi benzeştiren yatay yük altında elasto-plastik analizleri SAP 2000 programı [1]

kullanılarak yapılmış ve karşılaştırılmıştır. (Ölçüler mm'dir.)



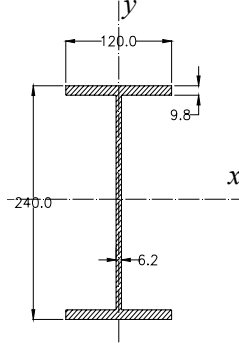
Şekil 1. Çerçeve boyutları ve uygulanan yatay yük (Frame dimensions and applied horizontal loads)



Şekil 2. İncelenen 7 Farklı Çerçeve Örneği [2] (Seven different frame types analyzed in the study)

İncelenen çerçevelerin tümünde kolon ve kirişler IPE-240 olarak seçilmiş, dolgu duvar malzemesi olarak G3 Sınıfı Gazbeton kullanılmıştır. Çelik malzemenin

ve G3 Sınıfı Gazbetonun mekanik özellikleri Tablo 1. ve 2.'de verilmiştir [3]. Kullanılan çelik kalitesi St-37'dir. Çerçevelerin kolon kiriş birleşim yerleri kaynaklı, mesnet yerleri ise ankastre kabul edilmiştir. IPE-240 SAP 2000 programında [1] tanımlanırken flanş ile gövde birleşimindeki dairesel birleşimler ihmal edilmiştir. Kesit verileri Şekil 3'e göredir. Artan deprem yükleri nedeni ile katlara etkiyen yükler P ve 2P olarak seçilmiştir (Şekil 1).



Şekil 3. Örnek çerçevelerin IPE-240 kolon ve kiriş kesiti (Cross-sections of frame columns (IPE-240) and beams)

Tablo 1. Çelik malzemenin mekanik özellikleri (Mechanical properties of steel material) [1]

Çelik IPE-240 Kesitin Mekanik Özellikleri	
Kesit Alanı	37,18 cm ²
Elastisite Modülü	2100000 kg/cm ²
Kayma Modülü	810000 kg/cm ²
Poission Oranı	0,3
Akma Mukavemeti	2400 kg/cm ²
Kopma Mukavemeti	3700 kg/cm ²
X'e göre Atalet Momenti	3670 cm ⁴
Y'ye göre Atalet Momenti	282 cm ⁴
X'e göre Elastik Modül	305,91 cm ³
Y'ye göre Elastik Modül	47,11 cm ³
X'e göre Plastik Modül	346 cm ³
Y'ye göre Plastik Modül	72,67 cm ³

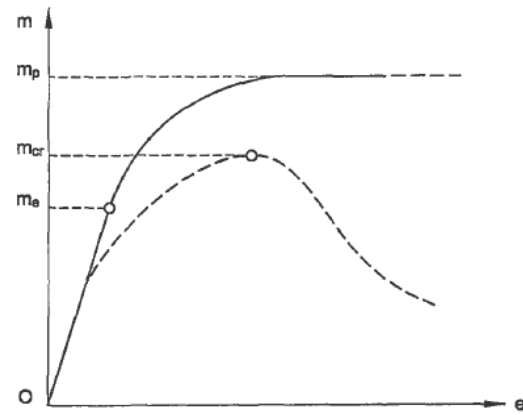
Tablo 2. Gazbeton dolgu duvarın mekanik özellikleri (Mechanical properties of gas concrete infill wall) [3]

G3 Sınıfı Gazbetonun Mekanik Özellikleri	
Blok ebatları	60cm*25cm*12,5cm
Duvar kalınlığı	12,5cm
Elastisite Modülü	22500 kg/cm ²
Poission Oranı	0,25
Basınç Dayanımı	35 kg/cm ²
Malzeme Mukavemeti	
Sınıfı	G3
Birim Hacim Ağırlığı	600 kg/m ³

3. ELASTO-PLASTİK ANALİZ (ELASTO-PLASTIC ANALYSIS)

Plastik analizin amacı, plastik deformasyonların oluşmasıyla yapının göçme yükünü tayin edebilmektir. Bu anlamda plastik tasarım, yapıda

mekanizma durumunu bertaraf edecek yapı boyutlarının belirlenmesi olarak da ifade edilebilir. Her iki durum için de, yapının yüklenmesi esnasında oluşan kalıcı deformasyonların belirlenmesi ve plastik bölgelerin yığılımı konusunda ilave analizlerin yapılması gerekebilir. Bu durumu anlatabilmek için, dış yüklerinin düzgün doğrusal olarak arttığı ve elasto-plastik bir yapı olan çelik çerçeve örneği ele alınmıştır. İlk olarak yapıdaki lokal kararsızlık durumlarının ve deplasmanlarının gerilme dağılımına etkilerinin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu kabul edilmiştir. Böylece yapının analizinde küçük deplasmanlar teorisi kullanılmıştır. Dış yükün şiddeti (m) ve yapı üzerindeki herhangi bir noktanın deplasmanı (e) arasındaki bağıntı, genel olarak Şekil 4' de gösterilen düz çizgi şeklinde olacaktır[4].

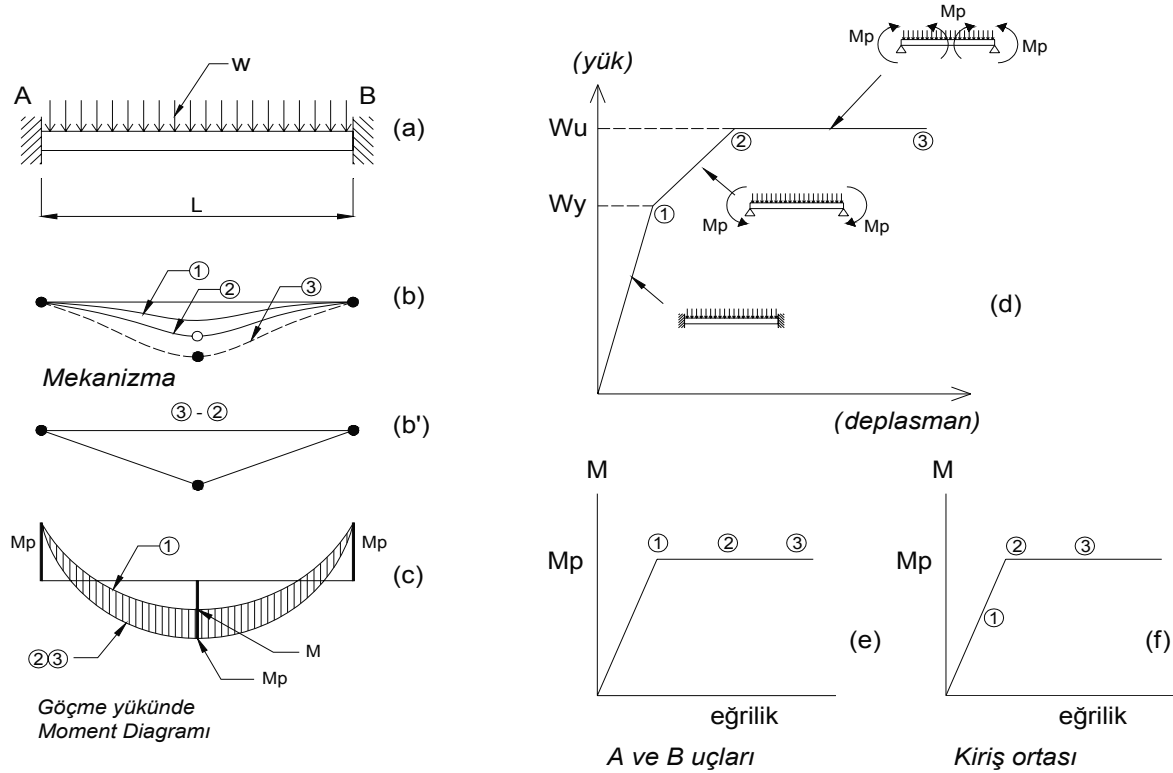


Şekil 4. Yük-Deplasman değişkenlerine bağlı göçme diyagramı[4] (Collapse diagram based on load-displacement variables)

Elastik limit yükü m_e değerine ulaşmadan önce yapı tamamen elastik durumdadır. Yükün artmasıyla plastik deformasyonlar oluşmaya başlar, plastik limit yükü m_p değerine ulaştıktan sonra, yükteki en küçük bir artışa karşılık deplasmanlar hızla ve büyük ölçüde artış gösterir. Bu durum yapıda plastik göçme safhasına gelindiğini gösterir. Bu olguyu idealize etmek gerekirse, yapı plastik göçme safhasında, sabit yük altında sınırsız plastik deformasyonlara ve deplasmanlara maruz kalacaktır, kabulü yapılabilir. Bu kabul ancak henüz başlamakta olan plastik göçme durumları için uygulanır. Kısacası, herhangi bir yapı elastik limitin ötesinde yüklendiğinde, plastik deformasyonlar oluşmaya başlar ve yük boşaldığında ise yapıda artık kalıcı şekil değiştirmeler oluşur[4].

4. MOMENT DAĞILIMINDA PLASTİK MAFSALIN ETKİSİ (EFFECT OF PLASTIC HINGE IN MOMENT DISTRIBUTION)

Herhangi bir hiperstatik taşıyıcı sistem elastik bölgenin ötesine yüklendiğinde elastik hale oranla daha çok yük taşıyacaktır. Buna ilave olarak plastik mafsal oluşumu ele alınan hiperstatik sistemde belirli dış yükler altındaki moment dağılımını, bu taşıyıcı sistemde aynı yüklerden oluşan elastik moment



Şekil 5. İki ucu ankastre kirişin göçme moment dağılımı (Ultimate moment distribution of a beam fixed at both ends)[5]

dağılımından farklı kılar. Bu fark taşıyıcı sisteme bir miktar daha yük taşıma kapasitesi sağlar. Özellikle çelik yapılar için önemli olan bu olgu, Şekil 5'de görülen iki ucu ankastre üniform yüklü kiriş ele alınarak açıklanmıştır.

Şekilde iki ucundan ankastre kirişte “w” yayılı yükü yavaş yavaş artırılırken bu yükün belirli bir değere ulaşması halinde, mesnetler civarında plastik mafsallar meydana gelir. Şekil 5 (d)' den görüldüğü gibi her bir plastik mafsallın oluşumu, sistemin hiperstatiklik derecesini bir derece azaltmaktadır[5].

5. ANALİZ VARSAYIMLARI (ANALYSIS ASSUMPTIONS)

Gerçekte birçok faktörün ve teoremin etkili olduğu plastik analiz yönteminde kapsamı daraltmak ve amacımızı en az teori ve yöntem kullanarak açıklayabilmek için başlangıçtaki kabullerimizi veya plastik taşıma yükü analizinin dayandığı varsayım ve sınırlandırmaları şöyle sıralayabiliriz;

- 1) Yükler ve taşıyıcı sistem aynı düzlem içinde yer alır. Taşıyıcı sistemin her elemanı, bu düzlem içinde yer alan bir simetri eksenine sahiptir.
- 2) Malzeme sünekler. Yani kopmadan, büyük plastik deformasyonlar yapabilir.
- 3) Denge denklemleri taşıyıcı sistemin deplasman yapmamış geometrisi göz önünde tutularak yazılır. Benzer şekilde, mekanizma hareketi için yazılacak virtuel-iş ifadesi yine küçük deplasmanlar varsayımına dayanarak yazılır. Analizler I. Mertebe nonlineer hesaba göredir.

4) Plastik taşıma yüküne ulaşmadan hiçbir instabilite (burkulma) durumu söz konusu olmayacaktır.

5) Taşıyıcı sistemin elemanlarının birleşimi, M_p plastikleşme momentini aktaracak şekilde bir süreklilik sağlayacaktır.

6) Kesme kuvvetlerinin, M_p plastikleşme momenti üzerine etkisi göz önünde tutulmayacaktır.

7) Orantılı yükleme söz konusudur. Sisteme etkileyen dış yük sistemine ait değişik yükler arasındaki oran yükleme sırasında sabit kalacaktır.

8) Dolgu duvarın, aksel kritik basınç veya kesme yüküne eriştikten sonra yerdeğiştirme (birim uzama) yapmadan gevrek bir şekilde göçtüğü kabul edilmiştir. Modellerin göçme yükü, dolgunun göçme yükü olarak kabul edilir.

9) Eşdeğer basınç çubuğunun çekme kuvvetine maruz kalmadığı ve dolgu duvarın ilk çatlaklardan hemen sonra çöktüğü varsayılmıştır. Dolgunun tamamen parçalanıp göçünceye kadarki enerji tüketimi ihmal edilmiştir.

5. ELASTO-PLASTİK ANALİZİN TEORİK ALT YAPISI (THEORETICAL BACKGROUND OF ELASTO-PLASTIC ANALYSIS)

Elasto-plastik analiz yöntemi, esas olarak sistem rijitliğinde plastik mafsallın oluşumu etkisini içeren ardışık statik itme analizlerinden oluşmaktadır. Bu çalışmada kullanılan elasto-plastik analiz yöntemi kısaca şöyledir;

- 1) Yapının üzerine gelen yükler ile elastik analizi yapılarak düğüm noktaları deplasmanları ve çubuk uç kuvvetleri hesaplanır. Bu ilk analizden elde edilen

çubuk uç kuvvetleri olan eğilme momenti ΔM_1 ile gösterilir.

2) Plastik mafsall oluşma olasılığı olan noktalarda, kesitlerin M_p ile gösterilen plastik taşıma kapasitesinin elastik analiz sonuçlarına oranı Eş. 1 şeklinde hesaplanır.

$$\Delta\lambda_1 = M_p / \Delta M_1 \quad (1)$$

Yapının plastik mafsall oluşturabilecek çeşitli kritik kesitleri için hesaplanan $\Delta\lambda$ oranlarının en küçüğü ilk plastik mafsall oluşmasına neden olan $\Delta\lambda_1$ katsayısı olarak alınır. Bu yük katsayısı ile elastik analiz sonucu bulunan deplasmanlar ve uç kuvvetleri çarpılarak ilk plastik mafsall oluşturulan kesit tesiri Eş. 2'deki ifade ile bulunur.

$$M_1 = \Delta\lambda_1 \Delta M_1 \quad (2)$$

3) İlk plastik mafsall oluşan noktaya bir gerçek mafsall konularak elde edilen yeni sistem, üzerindeki yüklerin etkisi altında ikinci kez yeniden elastik olarak çözümler ve bulunan kesit kuvvetleri ΔM_2 ile gösterilir.

4) Plastik mafsall oluşmamış kesitlerde Eş. 3 ile bulunan $\Delta\lambda$ 'lardan en küçüğü $\Delta\lambda_2$ olarak alınır. Bu adımdaki kesit etkileri ve deplasmanlar $\Delta\lambda_2$ değeri ile çarpılıp ilk analizdeki değerlerle toplanarak Eş. 4 ile ikinci plastik mafsall oluştuğundaki değerler hesaplanır.

$$\Delta\lambda_2 = (M_p - M_1) / \Delta M_2 \quad (3)$$

$$P = \Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2 \quad (4)$$

5) İkinci plastik mafsall oluşan kesite bir gerçek mafsall daha yerleştirilerek, yapı göçünceye kadar 3. ve 4. adımlar tekrarlanır. Her mafsall oluştuğunda düğüm noktaları deplasmanları ile çubuk uç kuvvetleri sırasıyla,

$$\delta = \Delta\lambda_1 \delta_1 + \Delta\lambda_2 \delta_2 + \dots + \Delta\lambda_i \delta_i \quad (5)$$

$$M = \Delta\lambda_1 M_1 + \Delta\lambda_2 M_2 + \dots + \Delta\lambda_i M_i$$

şeklinde hesaplanır. Düğüm noktaları, başlangıçta seçilen bir deplasman sınırını aştığında veya sistemde yeterli sayıda plastik mafsall oluştuğunda, sistemin göçtüğüne karar verilir.

6) Yapının göçme mekanizmasına ulaştığı ana kadar elde edilen $\Delta\lambda_i$ yük katsayılarının toplamı, plastik taşıma gücüne karşılık gelen $\Delta\lambda_p$ yük katsayısını verir. Yapıda oluşan toplam plastik mafsall sayısı N ise $\Delta\lambda_p$ yük katsayısı, Eş. 6 ile hesaplanır. Plastik taşıma yükü ise başlangıçta seçilmiş ve ilk analizde sisteme yüklenmiş P_0 yükü kullanılarak Eş. 7 ile hesaplanır. Geometrik yönden doğrusal olmayan analiz için çözüm denklemi düzlem çerçeveler için Eş. 8'deki matris formundadır. Burada elastik çözümdeki rijitlik

K_e , geometrik rijitlik K_g , uygulanan yük P , deplasman u matrisiyle tanımlanmaktadır. Lineerleştirilmiş arımsal adımlarla denklem Eş. 9'daki şekli alır[6].

$$\Delta\lambda_p = \Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2 + \Delta\lambda_3 + \dots + \Delta\lambda_n = \sum_{i=1}^N \Delta\lambda \quad (6)$$

$$P_g = \Delta\lambda_p \cdot P_0 \quad (7)$$

$$[K_e + K_g] \cdot u = P \quad (8)$$

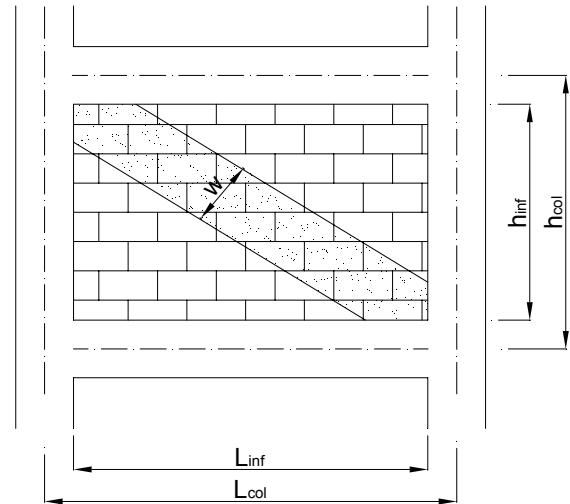
$$\{\Delta\bar{P}\}_i = [K_e + K_g]_{i-1} \{\Delta\bar{u}\}_i \quad (9)$$

$$\{\Delta\bar{u}\}_i = [K_e + K_g]_{i-1}^{-1} \{\Delta\bar{P}\}_i$$

6. DOLGU DUVAR MODELİ (INFILL WALL MODELING)

Dolgu duvarlar yapı taşıyıcı sisteminin hesabında nadiren göz önüne alınır. Bunun sebebi, yapının üç boyutlu hesabında karışıklığa neden olmamak ve dolgu duvarların yanal kuvvet kapasitesindeki ikincil etkilerinin ihmal edilmesidir. Bazı yönetmeliklerde, örneğin 2007 deprem yönetmeliğinde, deprem kuvvetlerinin hesabında dolgu duvarların düşey ağırlıkları hesaba katılmış, fakat çerçeve içinde modelleme tekniği ve analiz konusuna değinilmemiştir. Fakat son yıllarda yapılan bilimsel çalışmalarda dolgu duvarların modellenmesinde 2 yöntem geliştirilmiştir, sonlu elemanlar yöntemine dayanan mikro modelleme veya duvarın bir bütün yapı elemanı olarak hesaba katıldığı makro modelleme yöntemi alınmaktadır. Bu çalışmada, dolgu duvar özelliklerini eşdeğer sanal çapraz çubukla idealleştiren bir makro modelleme kullanılmıştır. Bu modellemede yer alan dolgu duvar parametreleri ve modelleme esasları aşağıda özetlenmiştir[7].

Çalışmada FEMA 356 [8] ve Mainstone (1971) [9] tarafından önerilen formüllere göre hesaplar yapılmıştır. Eşdeğer basınç çubuğuna göre efektif duvar genişliği (w) Eş. 10 ile basınç kapasitesi Eş. 13 ile



Şekil 6. Eşdeğer basınç çubuğu modeli (Equivalent compression bar model)

hesaplanır[8-9].

$$w = 0,175 \cdot (\lambda \cdot h_{col})^{-0,4} \cdot \sqrt{h_{col}^2 + L_{col}^2} \quad (10)$$

$$\lambda = \left[\frac{E_m \cdot t_{inf} \cdot \sin 2\theta}{4 \cdot E_s \cdot I_{col} \cdot h_{inf}} \right]^{1/4} \quad (11)$$

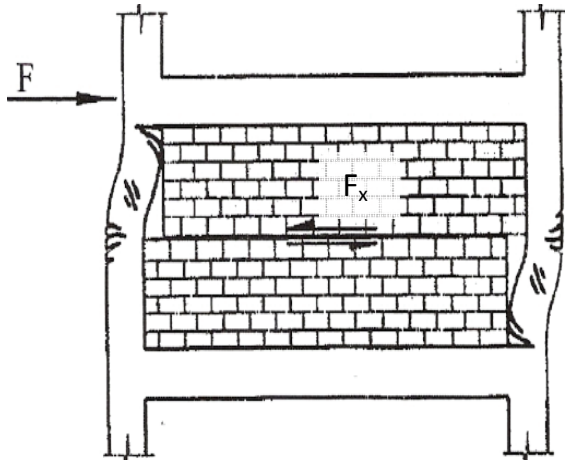
$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{h_{inf}}{L_{inf}} \right) \quad (12)$$

$$R_{cr} = t_{inf} \cdot f_m \cdot w \quad (13)$$

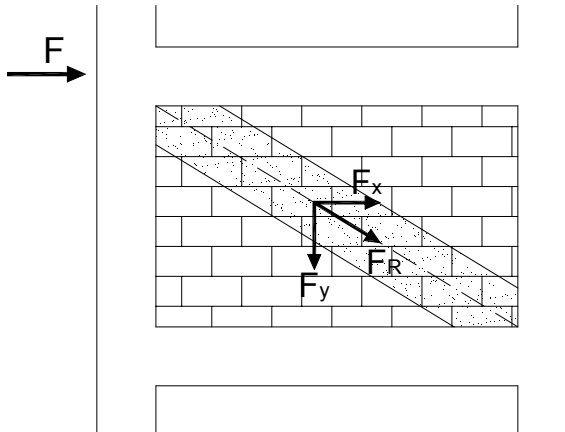
Duvarın kusursuz işçilikle örüldüğünü ve malzemenin kusursuzca imal edildiğini varsayıldığında kesme kuvveti Eş. 14'e göre hesaplanır.

$$R_s = A_n \cdot F_v \quad (14)$$

Gazbetonun kayma dayanımı ile çekme dayanımı eşit kabul edilmiştir. ($f_t = F_v$ alınmıştır.) Eğer $F_x < R_s$ ise dolgu duvar yatay kesme kuvvetine dayanıklıdır. Gazbeton için çekme dayanımı hesabı (f_t) Eş. 15 ile hesaplanır [10].



Şekil 7. Duvar üzerindeki kesme kuvveti (Shear force on infill wall)



Şekil 8. Dolgu duvarda kesme kuvvetinin bulunması (Determination of shear forces in the infill walls)

$$f_t = 0,5187 \cdot f_m \cdot \left(\frac{R_{cr}}{f_m \cdot L_{inf} \cdot t_{inf} - 1,683 \cdot R_{cr}} \right) \quad (15)$$

Duvarın elastik hesabında ilk çatladığı andaki yük elastik sınır yük kabul edilecektir. Bu yük, kesme veya basınç kuvveti olabilir. Büyük olan yük duvarda ilk çatlakları oluşturacaktır. Çerçeve örneğine göre dolgu duvarın efektif genişliğini hesaplırsak, üst kat için dolgu yüksekliği 276 cm, alt kat için 288 cm olduğundan dolayı farklı efektif genişlikler çıkacaktır.

$$\theta_{üst} = \tan^{-1} \left(\frac{276}{276} \right) = 45^\circ \quad \theta_{alt} = \tan^{-1} \left(\frac{288}{276} \right) = 46,23^\circ$$

$$\lambda_{üst} = \left[\frac{22500 \cdot 12,5 \cdot 1}{4 \cdot 2100000 \cdot 3670 \cdot 276} \right]^{1/4} = 0,0135$$

$$w_{üst} = 0,175 \cdot (0,0135 \cdot 300)^{-0,4} \cdot \sqrt{300^2 + 300^2}$$

$$w_{ner} = 0,175 \cdot 0,572 \cdot 424,26 = 42,47 \text{ cm} = 424,7 \text{ mm}$$

$$\lambda_{alt} = \left[\frac{22500 \cdot 12,5 \cdot 0,99}{4 \cdot 2100000 \cdot 3670 \cdot 288} \right]^{1/4} = 0,0133$$

$$w_{alt} = 0,175 \cdot (0,0133 \cdot 300)^{-0,4} \cdot 424,26$$

$$w_{alt} = 0,175 \cdot 0,574 \cdot 424,26 = 42,62 \text{ cm} = 426,2 \text{ mm}$$

Kesme Kuvvet Kapasitesini hesabı;

$$R_{cr} = f_m \cdot t_{inf} \cdot w = 35 \cdot 12,5 \cdot 42,62 = 18646,25 \text{ kg}$$

(dolgu duvarın diyagonal basınç yükü kapasitesi)

$$f_t = 0,5187 \cdot 35 \cdot \left(\frac{18646,25}{35 \cdot 276 \cdot 12,5 - 1,683 \cdot 18646,25} \right)$$

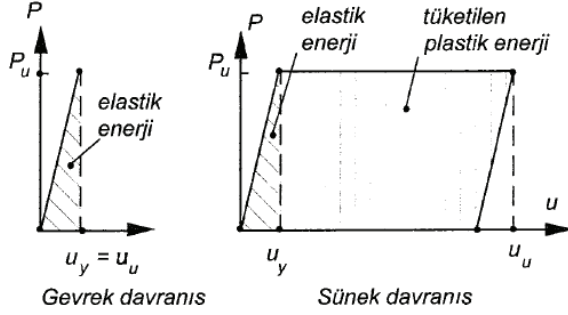
$$f_t = 3,78 \text{ kg/cm}^2 \text{ (duvarın çekme mukavemeti)}$$

Dolgu duvarın çekme mukavemeti, kayma mukavemetine eşit kabul edildiğinden, duvarın karşı koyabileceği maksimum kesme kuvveti, Eş. 14'den $R_s = 13041 \text{ kg}$ bulunur. Bu kesme kuvvetini oluşturacak diyagonal basınç kuvveti ise, Şekil 8'e göre $F_R = F_x / \cos \theta$ dır. Buna göre $F_R = 18851,77 \text{ kg}$ dır. Fakat R_{cr} kuvveti F_R den küçük olduğundan duvarda öncelikle ezilme çatlakları görülecektir. Yükün biraz daha artmasıyla kesme kuvveti sınırına gelmesi ile duvar tamamen göçecektir. İlk çatlakların oluşması ile göçme arasında yaklaşık 206 kg lık yük farkı vardır. Yani çatlakların oluşmasından hemen sonra duvar çökecektir. Bu sebeple eşdeğer aksel basınç çubuğunda basınç kuvveti 18852 kg değerine ulaştığında dolgu duvarın tamamen çökeceği kabul edilmiştir.

7. ENERJİ TÜKETME VE SÜNEKLİK (ENERGY DISSIPATION AND DUCTILITY)

Dış kuvvetlerin yaptığı iş sistemin toplam şekil

değiştirme enerjisine eşit olacağından, sistemin tükettiği enerji, yük-deplasman eğrisinde bir çevrim için histeresis eğrisinin içindeki alana eşittir. Bu da ileri yüklemde eğrinin altındaki alandan, yük boşaltma durumundaki eğrinin altındaki alanın çıkarılması ile bulunabilir[11]. Şekil 9'daki grafikteki elastik enerji+tüketilen plastik enerji, toplam tüketilen enerjiye eşittir.



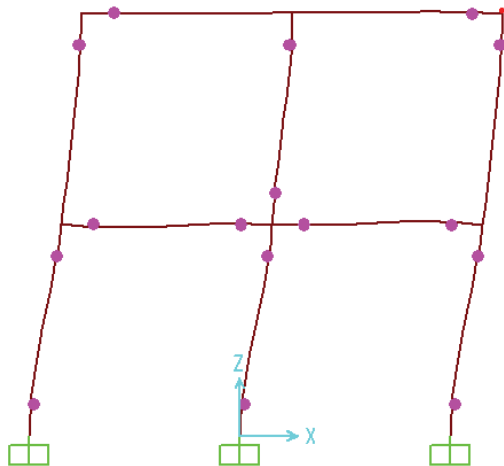
Şekil 9. Elastik ve plastik enerji (Elastic and plastic Energy) [12]

Süneklik, bir kesitin, bir elemanın veya bir taşıyıcı sistemin, dış yükte önemli bir değişme olmaksızın, elastik sınırın ötesinde şekil değiştirme, dolayısı ile yerdeğiştirme yapma yeteneği olarak tanımlanabilir. Sayısal tanımı, güç tükenme durumu ile elastik sınır şekildeğiştirme'nin oranı olarak yapılabilir (Eş.16) [12].

$$\eta = u_u / u_y \quad (16)$$

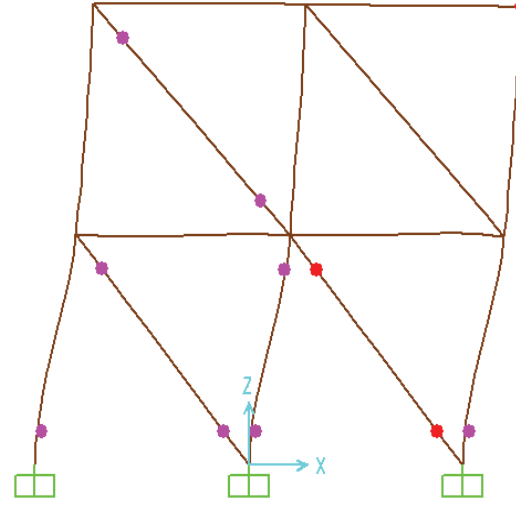
8. ANALİTİK ÇALIŞMALARIN KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF ANALYTICAL STUDIES)

Göçme mekanizmaları, SAP 2000 programı ile pushover analiz (statik itme analiz) yapılarak elde edilmiştir. Çerçevelerin göçme anındaki, plastik mafsal yerleri aşağıdaki gibidir. Dolgu duvarı temsil eden sanal çapraz çubuk üzerinde yeterli basınç yükü

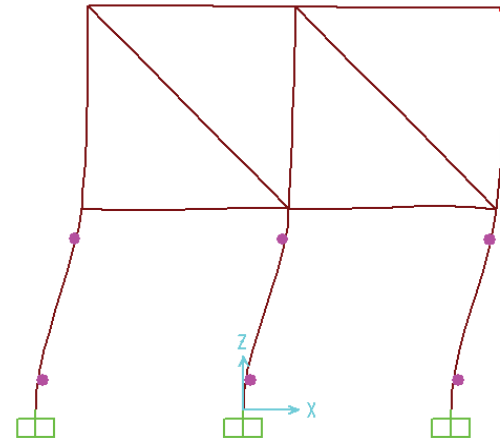


Şekil 10. "a" Modeli göçme mekanizması (Collapse mechanism for "a" model)

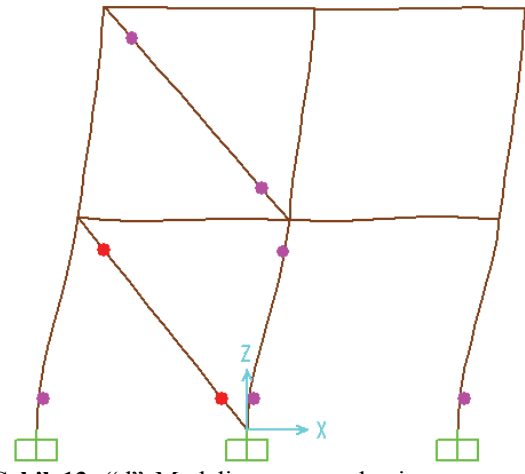
oluştduğunda, çubuğun başı ve sonunda plastik mafsal oluşmaktadır. Bu durum dolgunun göçtüğünün belirtisidir.(Şekil 10.-16.)



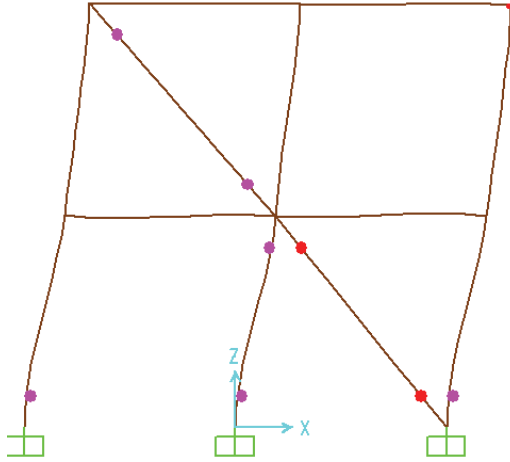
Şekil 11. "b" Modeli göçme mekanizması (Collapse mechanism for "b" model)



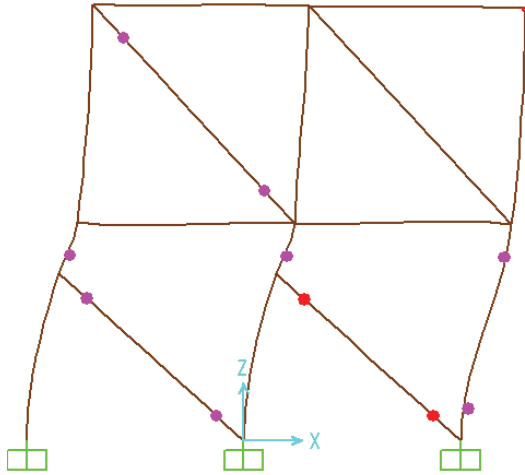
Şekil 12. "c" Modeli göçme mekanizması (Collapse mechanism for "c" model)



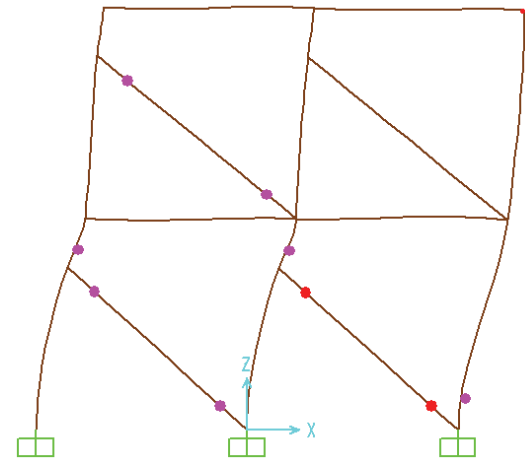
Şekil 13. "d" Modeli göçme mekanizması (Collapse mechanism for "d" model)



Şekil 14. "e" Modeli göçme mekanizması (Collapse mechanism for "e" model)



Şekil 15. "f" Modeli göçme mekanizması (Collapse mechanism for "f" model)

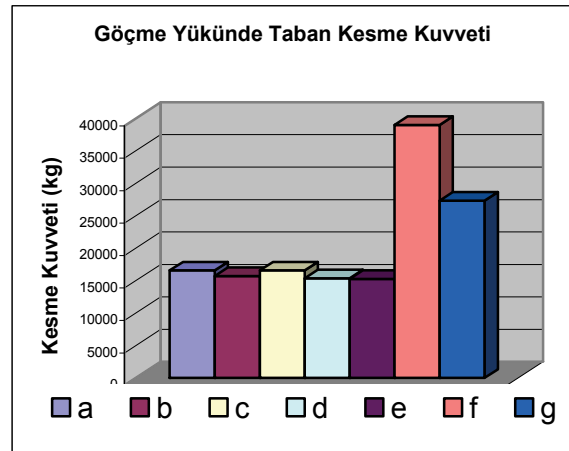


Şekil 16. "g" Modeli Göçme Mekanizması (Collapse Mechanism for "g" model)

Sap 2000 programı ile yapılan nonlineer elasto-plastik analiz sonuçlarına göre, göçme yükü en fazla olan model "b" tam dolgulu modeldir. En az olan ise boş çerçevedir. Boş çerçeveden sonra "c" modeli yumuşak kat modeli gelmekte, daha sonra simetrik ve

asimetrik cephe düzenlemeleri olan modeller "d" ve "e" gelmektedir. Yumuşak kat "c" (Şekil 12.) mekanizmasında plastik mafsalsal sayısı azalmıştır. Sistem daha az mafsalsal ile göçmüştür. Çünkü kolondaki kesme kuvvetleri oldukça yüksek değerlere ulaşarak ani göçme meydana gelmiştir. Dolgulu modeller arasında göçme yükü en düşük olan yumuşak katlı model olan ("c") aynı zamanda en düşük süneklik değerine sahiptir. En yüksek süneklik ("f") alt katı bant pencereli olan model ve onu takip eden ("g") modelidir.

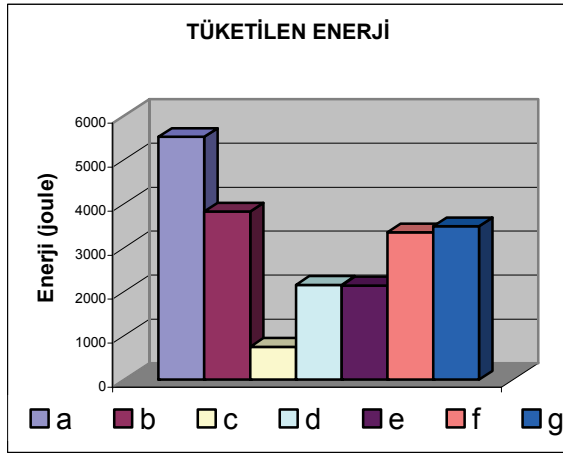
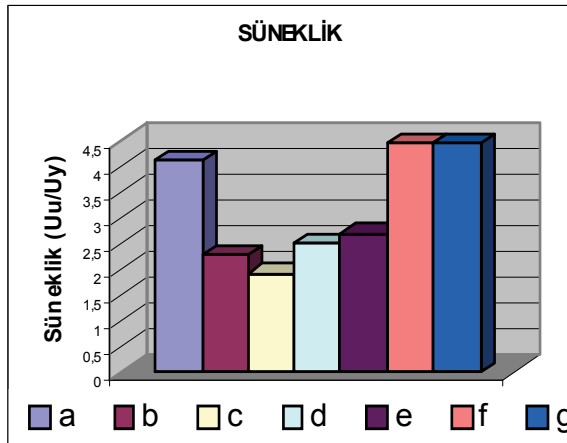
Göçme anında en yüksek taban kesme kuvveti ise alt katı bant pencereli ("f") modelinde görülmektedir. Onu takip eden, alt ve üst katı bant pencereli ("g") modeli ikinci sırada gelmektedir (Şekil 15.-16.) ve (Tablo 3.). İlk plastik mafsalsal "c" modelinde (Şekil 12.) kolonda olurken tam dolgulu modellerde ("b,d,e") eşdeğer basınç çubuğunda olmaktadır ve hemen sonra kolonlarda oluşmaktadır. Yatay eksene göre simetrik olan kat modeli ("d"), asimetrik kat modeline ("e") göre daha yüksek göçme yüküne sahiptir. En fazla enerji tüketimi ("a") modelinde, (Şekil 10.) en az enerji tüketimi ise ("c") modelindedir (Şekil 12.). Dolgulu modeller arasında ("b") modeli (Şekil 11.) enerji tüketimi açısından en yüksek kapasiteye sahiptir.



Şekil 17. Çerçeve modellerin taban kesme kuvvetleri (Base shear forces of the frame models)

Tablo 3. Çerçeve modellerinin elasto-plastik analiz sonuçları (Elasto-plastic analysis results of the frame models)

ELASTO-PLASTİK ANALİZ SONUÇLARI						
Çerçeve Modeli	Göçme Yüğü (P_g)	Plastik Yatay Deplasman (U_u)	Elastik Yatay Deplasman (U_v)	Taban Kesme Kuvveti (V_T)	Tüketilen Enerji (W_g)	Süneklik (U_u/U_v)
a	5515 kg	149,85 mm	36,48 mm	16554 kg	5516,06 joule	4,11
b	14188 kg	39,91 mm	17,33 mm	15692 kg	3815,87 joule	2,30
c	5519 kg	37,74 mm	20,02 mm	16557 kg	743,45 joule	1,89
d	9563 kg	47,75 mm	19,15 mm	15358 kg	2150,73 joule	2,49
e	9528 kg	45,92 mm	17,14 mm	15256 kg	2137,65 joule	2,68
f	12991 kg	45,08 mm	10,10 mm	38973 kg	3345,74 joule	4,46
g	12947 kg	47,62 mm	10,74 mm	27331 kg	3480,61 joule	4,43

**Şekil 18.** Çerçeve modellerin tükettiği enerji (Energy dissipation in the frame models)**Şekil 19.** Çerçeve modellerin süneklik kapasitesi (Ductility capacities of the frame models)

Bu değerlendirmeleri aşağıdaki ana başlıklar altında açıklayabiliriz;

* Dolgu duvarlar, boş çerçevenin göçme yükünü artırmış, deplasmanını azaltmıştır.

* Tam dolgu duvarlı çelik çerçevelerin ("b,c,d,e") sünekliği kısmi bant pencereli modellere ("f,g") göre daha düşüktür. Dolgu duvarın elastisite modülü

çelikten 93 kat daha düşük olması çerçeve sistemi gevrek hale getirmiş , fakat buna karşılık bant pencereli modellerde , pencere boşluğundaki kısa kolon (60 cm lik), moment altında sünek bir davranış göstermiştir.

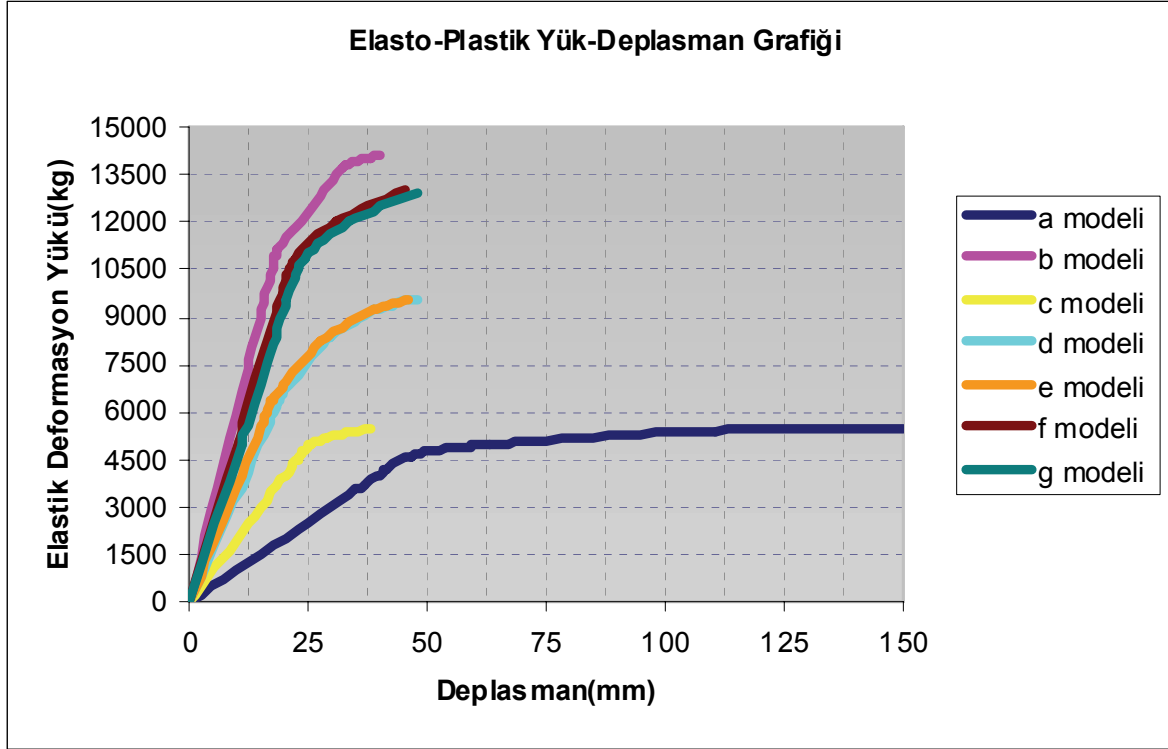
* Yumuşak kat düzenlemesi çerçevenin ani göçmesine (kesme göçmesi) sebep olmuştur. Çünkü alt katta yatay ötelenmeye karşı hiçbir çapraz çubuk yoktur. Bant pencereli modellerin sünekliğinin boş çerçeveye göre fazla olması ise (az bir farkla) sünekliğin matematiksel tanımı gereği , göçme anındaki deplasmanın , elastik sınır deplasmanına oranı olduğunu hatırlayarak , (bant pencereli modellerin elastik sınır deplasmanları diğer modellere oranla küçüktür. $\eta_f=10.10\text{mm}$, $\eta_g=10.74\text{mm}$) sayısal değeri yüksek çıkarmıştır (Tablo 3.). Bant pencereli modeller, ("f,g") dolu çerçevelere ("b,c,d,e") oranla daha fazla plastik deformasyon (göçme yükündeki deplasman) yapmıştır.

* Bant pencereli kısmi dolgu duvarlar, kolon kesme kuvvetini en fazla artıran düzenlemelerdir.

* Cephede yatay eksene göre simetrik dolgu duvar düzenlemeleri ("d"), asimetrik ("e") düzenlemelerden daha az sünektir.

* Dolgu duvarlar yatay deplasmanı düşürdüğü için boş çerçeveye göre tüketilen enerji azalmıştır. P- δ diagramında grafiğin altında kalan alan tüketilen enerjiyi temsil eder. Buna göre, en fazla alan boş çerçevededir. Diğer modellerde gevrek göçme oluşmuştur.

* Bant pencereli modellerin ("f,g") enerji tüketimi, "c,d,e" modellerine göre daha yüksek , dolu çerçevele modele ("b") göre daha azdır. Çünkü bant pencerinin geometrisinden kaynaklanan kısa kolon kesme kuvvetlerini artırmıştır. (açıkta kalan kolon boyu 60cm). Kısa kolonlu modeller ("f,g") yumuşak katlı (açıkta kalan kolon boyu 288cm) modele ("c") oranla daha fazla enerji tüketmiştir. Boş çerçevede ise ("a") plastik deplasman , diğer modellere oranla daha yüksek, dolayısı ile grafik altında kalan alan daha fazla , enerji tüketimi de daha fazladır. (Şekil 20.).



Şekil 20. Modellerin yük-deplasman grafikleri (Load-displacement curves of the models)

9. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada iki katlı ve iki açıklıklı düzlem bir çelik çerçeve tasarlanarak , çerçevenin dolgu duvarlı ,dolgu duvarsız ve bant pencere kombinasyonları için elasto-plastik analiz gerçekleştirilmiştir.Yatay yük etkisindeki düzlem çerçevede gaz beton dolgu duvarlar için eşdeğer basınç çubuğu modeli kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçların yapılan kabuller ile sınırlı olduğu düşünülerek, deneysel çalışmalarla da tahkik edilmesi , kullanılan teorik yöntem ve kabuller ile karşılaştırılması değerlendirmenin daha rasyonel olmasını sağlayacaktır. Bu çerçevede , bu çalışmadan çıkarılabilecek sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

Dolgu duvarların boş çerçeveye göre daha az enerji tükettiği gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak çelik çerçeve sistemde, sünek ve gevrek malzemelerin (çelik ve gazbeton) bir arada kullanılması gösterilebilir. Deprem davranışı açısından (hem süneklik ,hem de enerji tüketimi yüksek) bant pencere modeller (“f,g”) yumuşak katlı , simetrik ve asimetrik düzenlemelere (“d,e”) oranla daha güvenli olduğu gözlenmiştir. Yumuşak kat modeli diğer modellere göre hem enerji tüketimi hem de süneklik değerleri açısından geride kalmıştır. Boş çerçeve güncel hayatta olduğu gibi kullanılamıyacağından, kullanılabilirlik açısından “b” tam dolgu model enerji tüketimi kapasitesi ile bant pencerelerin (“f,g”) önüne geçmiştir. Sistemde oluşan plastik mafsallarda yük değerlerinde (momentlerde) önemli etkisinin olduğu görülmüştür. Bu etkinin ihmal edilmesi analizlerin gerçek dışı

sonuçlar vermesine sebep olmaktadır. Dolgu duvar etkisinin yapının davranışında büyük etkilerinin olduğu elastik ötesi statik itme analizi sonuçlarının oldukça fazla değişiklik göstermesinden anlaşılmaktadır. Dolgulu çerçevelerde beklenildiği gibi ilk plastik mafsallarda eşdeğer basınç çubuğu üzerinde meydana gelirken, dolgu duvarların mevcut olmadığı çerçevede ise ilk plastik mafsallarda giriş ve kolonlar üzerinde meydana gelmektedir. Bu farklılık çerçevelerde dolgu duvar etkisiyle meydana gelen yapısal değişimin en önemli göstergesidir. Bu sonuçlara göre proje ve tasarım safhasında dolgu duvarların sadece düşey ağırlıkları değil, yatay yüklere karşı olan mukavemeti ve sistemin moment dağılımındaki değişimleri dikkate alınarak , uygun bir modelleme tekniği ile çözüm aranmalıdır.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

w	Efektif duvar genişliği
λ	Dolgu duvarın rijitlik katsayısı
I_{col}	Kolonun atalet momenti
R_{rc}	Dolgu duvarın basınç yükü kapasitesi
E_m	Dolgu duvarın elastisite modülü
E_s	Kolonun elastisite modülü
t_{inf}	Dolgu duvarın net kalınlığı
R_s	Dolgu duvarın kesme kuvvet kapasitesi
F_x	Basınç çubuğunda oluşan yatay kesme kuvveti
F_R	Eşdeğer basınç çubuğunda oluşan basınç kuvveti

A_n	Dolgu duvarın yatay kesit alanı
F_v	Dolgu duvarın kayma mukavemeti
f_t	Dolgu duvarın çekme mukavemeti
f_m	Dolgu duvarın basınç mukavemeti
L_{inf}	Dolgu duvarın uzunluğu
h_{inf}	Dolgu duvarın yüksekliği
θ	Eşdeğer basınç çubuğunun yatayla yaptığı açı
h_{col}	Kolonun yüksekliği
L_{col}	Kirişin uzunluğu
η	Süneklik
U_u	Göçme yükündeki yerdeğiştirme
U_y	Elastik sınır yükündeki yerdeğiştirme
M_p	Plastik Moment
ΔM_n	n.analizden elde edilen eğilme momenti
$\Delta \lambda_n$	n. analizdeki yük katsayısı
P_g	Göçme yükü
P_o	İlk analizde sisteme yüklenmiş birim yük
K_e	Rijitlik matrisi
K_g	Geometrik rijitlik matrisi
u	Deplasmanlar matrisi

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. SAP2000 "Structural Analysis Program, Nonlinear Version 9.0.9", **Computers and Structure, Inc. Berkeley**, California , 2000.
2. Autocad 2008 , **Autodesk , Inc.** USA, 2007
3. AKG Gazbeton, "Ürün özellikleri: Teknik özellikler", <http://www.akg.gazbeton.com/default.asp?mid=250&L=TR>
4. Damcı E., "Uzay Çerçeve Sistemlerin Elastik-Plastik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü ,1-5, İstanbul, 2002.
5. Arda S. T., Uzgider E., "Çelik Yapılarda Taşıma Gücü", **İTÜ yayınları** sayı:1326, 11-17 , İstanbul, 1986.
6. Bağcı M., Demir A., Şeker S., "Düzlemsel Çelik Çerçevelerin Doğrusal Olmayan Analizi" , **C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi** , 4(2), 201-210, Manisa, 2008.
7. Kaltakçı M.Y., Köken A., Kamanlı M., Arslan H.M., "Çok Katlı ve Çok Açıklıklı dolgu duvarlı çelik çerçevelerin tersinir-tekrarlanı yatay yükler altındaki lineer olmayan hesabı", **2. Ulusal Çelik Yapılar Sempozyumu** , Eskişehir , 2007.
8. FEMA 356, "Presentandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings", **Federal Emergency Management Agency**, Washington D.C., 2000.
9. Mainstone R.J., "On the Stiffness and Strength of Infilled Frames" **Proc. Int. Civil Eng.**, 57-90, 1971.
10. Alakoç A., **Gazbeton blokların ve Duvarların Yapısal Davranışının Deneysel Olarak incelenmesi**, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1999.
11. Korkmaz H. H., **Bant Pencereci Dolgu Duvarlı Çelik Çerçevelerin Tersinir Tekrarlanı Yükler Altındaki Davranışının İncelenmesi**, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü , 85-86 , 2004.
12. Celep Z., **Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış ve Çözümleme**, Beta Dağıtım , İstanbul, 60-62, 2008.

