

4. OTURUM

ESKİŞEHİR'DE KAR YÜKÜNDEN HASAR GÖREN UZAY KAFES SİSTEMLER

Mizan DOĞAN, Eşref ÜNLÜOĞLU, Hasan GÖNEN
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

Uygulama alanı giderek artan uzay kafes sistemler, birbirlerine düğüm noktalarından bağlı basit çekmeye veya basınca çalışan doğrusal çubuklar ağından kurulu düzenlerdir. Bu sistem, çubuklar düzeni olarak üzerine etkiyen dış yükleri iki doğrultuda mesnetlere ileten ve boşluğun organize edilmesi ilkesine göre üretilen sistemlerdir. Uzay kafes sistemler en çok, sanayi yapıları, alışveriş merkezleri, showroom yapıları, gösteri ve fuar merkezleri ve spor komplekslerinde tercih edilmektedir. Bu çalışmada uzay kafes sistemlerin genel yapısı ve bölgelere göre kar yükünün etkisi araştırıldıktan sonra Eskişehir'de kar yükünden dolayı hasar gören uzay kafes sistemli yapılar incelenmiştir. Bu incelemede, model olarak seçilen bir uzay kafes sistemin, hazır bir paket program ile kar yükü farklı on değişik bölge etkileri altında yapılan çözümler sonucu bulunan değerler ile kıyaslanmıştır.

Anahtar kelimeler: uzay kafes sistem, kar yükü, ısı etkisi

1. Giriş

Yapı teknolojilerinde hafif, hızlı ve endüstrileşmiş çözümler arayışı uzay kafes sistemlerin doğmasına sebep olmuştur. Bu sistemler yapılarda büyük açıklıkların kolonsuz ve hafif bir yapı sistemi ile geçilmesini sağlayarak işlevsel olarak yapıların daha esnek ve kullanışlı olmasını sağlamaktadır.

Uzay kafes sistemlerin tarihte ortaya çıkışı deniz kabuklusunun geometrik yapısına duyulan hayranlıkla başlar. Çubuk ve düğümlerden tasarlanarak geliştirilen sistem; Dr. Max Mengerhausen'in deniz kabuklusunda hayran kaldığı logaritmik heliks büyümenin bir etkisi gibi yapılarda büyük açıklık geçebilen sistemlerdir [1].



Şekil 1. Dr. Max Mengerhausen ve ilk uzay kafes sistem modeli (1903-1988) [1]

İlk olarak Dr. Max Mengerlinghausen uzay kafes sistemleri geliştirmiş ve 1940'lı yıllarda yapılar da kullanmıştır. Mengerlinghausen "Bauhaus" ekolü ile ortaya çıkan mimaride berraklık, güzellik ve işlevsellik in en güzel örneğini uzay kafes sistemlerini geliştirerek ortaya koymuştur. Bauhaus'un kurucusu olan Gropius, Mengerlinghausen'nin geliştirdiğı çubuk/düğüm (uzay kafes) sistem ile ilk yapılar 1942 yılında yapılmıştır. Çubuk/düğüm sistemler kısa zamanda büyük programlar içinde endüstriyel şekilde üretilen sistemler olmuşlardır. Uzay kafes taşıyıcı sistemlerin birim elemanı, altı çubuk ve dört düğüm noktasından oluşan bir dörtyüzlüdür. Böyle bir dörtyüzlü her biri aynı düzlem içinde bulunmayan üç çubukla kolaylıkla büyütülebilmektedir. Çubuk birleşimleri, montajda çeşitli kolaylıklar sağlayan patentli düğüm noktası elemanları ile yapılmaktadırlar.

Statik yararları açısından, bu sistemler diğ er bir çok taşıyıcı sistemlere oranla çok daha hafiftirler. Sabit yüklerin azlığı sadece çatıda değil, alt sistem öğeleri ile temellerde kendini göstermekte ve buna bağı lı olarak maliyet önemli ölçüde azalmaktadır. Uzay kafes sistemler günümüzde büyük açıklıklı sanayi ve spor kompleksi yapıları ve uç ak hangarlarının örtülmeleri konusunda oldukça fazla uygulama alanı bulmaktadır (Şekil 2). Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte bu sistemlerle 150 m'ye kadar olan açıklıklar geçilmektedir. Bu strüktür sistemleriyle kare, dikdörtgen, poligon ve daire şeklindeki mekanlara uygun örtü biçimleri oluşturularak mimari görünüm kazandırmaktadır. Düzlem yüzeyler ve bunun katları geliştirilebileceğı gibi, ayrıca kubbe ve tonozsal biçimler ve bunların tekrarı şeklinde de kurulabilmektedir. Ayrıca Uzay kafes sistemlerde elektrik, sıhhi tesisat, havalandırma kanalları klima, iklimlendirme sistemleri gibi donatılar, bu sistemlerin oluş um ilkesinden doğ an boşluklarda kendilerine kolaylıkla yerleş im alanı bulabilmektedir. Uzay kafes sistemlerle geometrisi tanımlanan hemen her form çözülebilir. Bu da mimari isteklere statik olarak cevap verebilmek demektir.



Şekil 2. Çeşitli uzay kafes sistemler [2]

Uzay kafes sistemleri gerekli tasarım ve mühendislik hesapları yapıldığında her yükü taşıyabilir. Şekil 3’de görüldüğü gibi sürekli ve hareketli yüklerin olduğu köprüde taşıyıcı sistem olarak uzay kafes seçilmiştir.



Şekil 3. Hareketli yüklere maruz uzay kafes sistem köprü örneği [1]

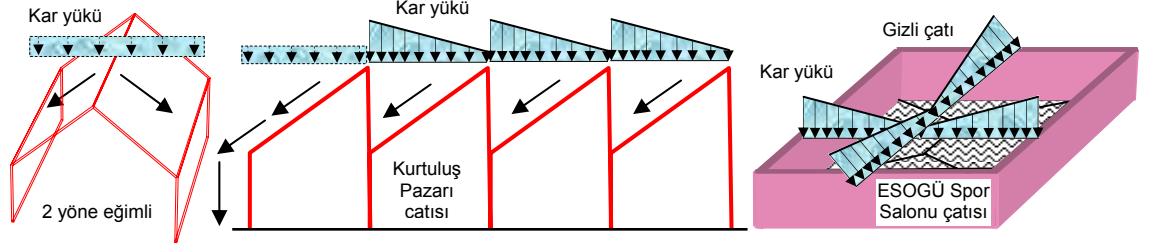
Bu çalışmada son yıllarda Eskişehir’de kar yükünden dolayı hasar gören Kurtuluş Pazarı, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Spor Salonu ve Kılıçoğlu Anadolu Lisesi uzay kafes sistem çatıları incelenmiştir (Şekil 4). Ayrıca bir spor salonunun uzay çatısı örnek alınarak Türkiye’nin değişik bölgelerinde olması durumu için kar yükleri altında çözümler yapılarak kesit tesirleri ve malzeme açısından karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 4. Eskişehir’de hasar gören uzay kafes sistem yapıları

2. Çatı Şeklinin Kar Yüküne Etkisi

Kar yükünün yapılara etkisinde en önemli parametre çatının şekli ve cephe rüzgarının yönüdür. Uzay kafes sistemler, genellikle spor salonu gibi geniş alanlı sistemlerin çatılarında kullanıldığı için kar yükünün en etkili olduğu yapı sistemidir. Eğer yapının çatısı kırık ve cephe rüzgarına dik yönde ise tipi şeklinde yağan kardan dolayı kar yükü etkisi aşırı derecede artmaktadır (Şekil 5).



Şekil 5. Çatı şekline göre kar yükü dağılımı

Buna karşı aynı çatı cephe rüzgarına paralel ise o kadar etkili olmayabilir. Ancak kırık çatıların yönü cephe rüzgarına paralel de olsa çatıya yağın normal kar erimeye başlayınca kayarak kırık çatının deresini doldurarak bu bölgedeki kar yükünü artırmaktadır. Kurtuluş pazarının çatısı bu şekilde olduğu için çatı kar yükünden dolayı büyük hasar görmüştür (Şekil 6).



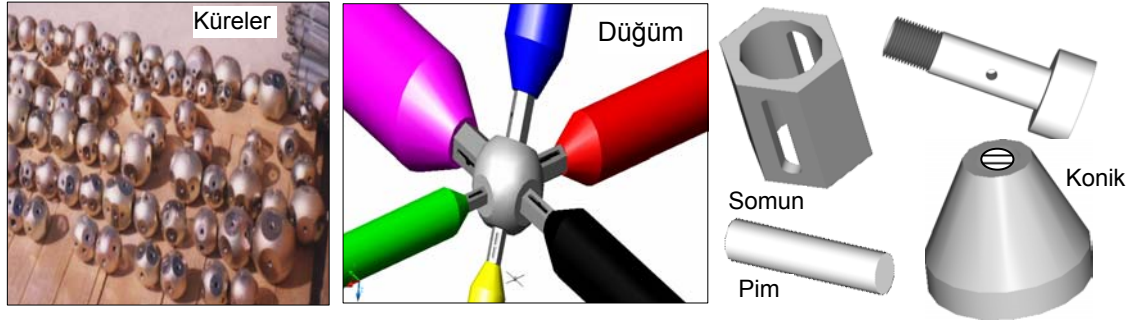
Şekil 6. Kurtuluş pazarı hasarı

Gizli çatı, cephe rüzgarı yönüne bağlı olmaksızın hem tipiden hem de normal yağın kardan dolayı yukarıda belirtildiği gibi her zaman için kar yükünün artmasına zemin hazırlamaktadır. Bu çatılarda diğer bir problem giderlerin kardan tıkanması sonucu gündüz eriyen karın gece donmasından dolayı çatı yükünü artırmakta ve bazı elemanların hasar görmesine sebep olabilmektedir. Üniversite spor salonu çatısı bu sebepten dolayı büyük hasar görmüş ve binlerce burkulan eleman değiştirilmiştir. Bu çatılar yapılması kaçınılmaz ise çatı altına bir ısıtma sistemi yapılarak kar yağdığı zaman çalıştırılır ve karın en kısa sürede eriyip gitmesi sağlanabilir.

3. Uzak Kafes Sistem Faydaları

Uzak kafes sistemler geniş açıklıkların geçilmesi için en uygun sistemdir. Uzak kafes sistemler ile kazanılacak hacim ve tüketilen yapı malzemesi arasındaki oran diğer yapı malzemelerinin tüketim oranına göre oldukça uygundur. Oluşturulacak hacim büyüklüğü ile yapı maliyeti ve geniş açıklıkların geçilmesinde diğer yapı elemanlarının ağırlığı ve maliyeti ile ters orantılıdır. Bu sistemler, iskele gereksinimini ortadan kaldırmak için genellikle zemin kotunda kurulmakta ve çeşitli yöntemler ile yerlerine monte edilmektedirler. Bu nitelikler uzak kafes sistemler ile

oluşan yapıların maliyetini ve yapım sürecini azaltmaktadır. Uzak kafes sistemleri diğerk yapı sistemlerinden ayıran en büyük özellik montaj edilen yapı bileşenlerinin sökülerek başka bir yerde tekrar uygulanmaya imkan vermesidir. Böyle bir şey betonarme için söz konusu değildir. Uzak kafes sistemler ise modüler olan yapı bileşenleri ile rahatlıkla sökülüp taşınmakta ve başka bir yerde yeniden kurulabilmektedir (Şekil 7). Bu nedenle kalıp ve iskele masrafı ortadan kalkmakta, inşaatın süratle bitirilmesi de ekonomi sağlamaktadır.



Şekil 7. Uzak kafes sistem düğümünde kullanılan elemanlar [2]

Çelikte de en hafif ve hiperstatik çözümü olan uzak kafes sistemlerdir. Uzak kafes sistemler yüksek derecede hiperstatik sistemlerdir. Sistem elemanlarını eğilmeye zorlamadığı için büyük açıklıkların geçilmesinde yapısal güven sağlanmaktadır. Uzak kafes sistemler diğerk yapı sistemlerine oranla daha hafiftir. Yapı sisteminden gelen sabit ve hareketli yükleri zemine ileten temel sistemleri de yapının hafif olması sebebi ile daha az yük taşıyacak şekilde ebatları küçük olmaktadır. Depremın etkisi yapının ağırlığı ile doğrusal orantılı olarak arttığı için uzak kafes sistemleri depremden daha az etkilenir. Betonarme yapı sistemlerine göre daha elastik ve sünektir [3].

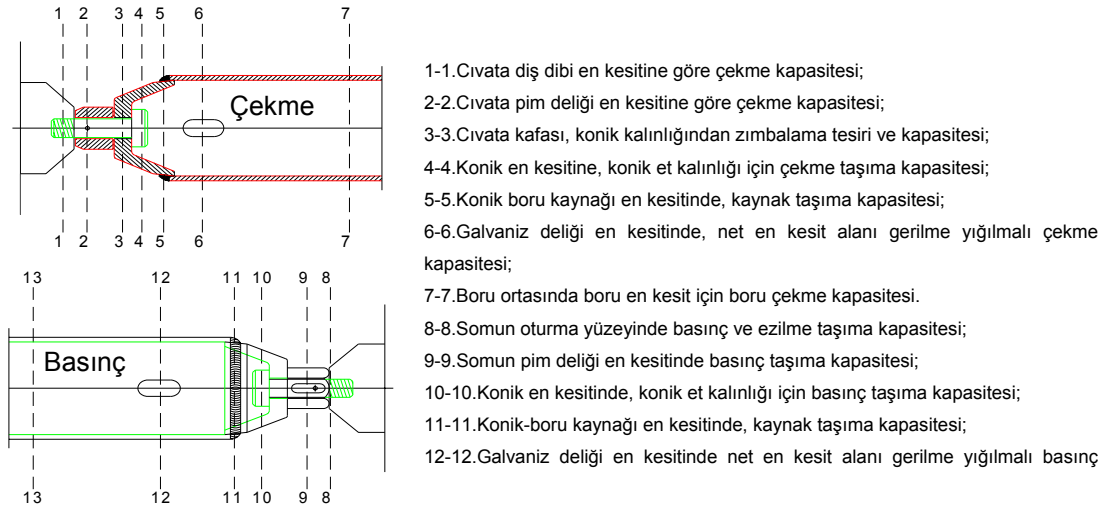
Çelik yapı malzemeleri; üretimi, dağıtımı ve yapı sistemlerinde kullanımı yaygınlaştıkça ucuzlamış ve günümüzde diğerk yapı malzemelerine göre daha ekonomik olarak kullanılabildiği alanlar bulmuştur. Yapı için gerekli açıklığın büyüklüğü arttıkça çelik kullanmak daha ekonomik bir hale gelmektedir. Uzak kafes sistemleri yapının olduğu yerde değil endüstriyel olarak projesine göre fabrikada üretilmektedir. Bu da yapı bileşenlerinin endüstrileşmiş bir seri üretim ile hızlı ve ekonomik olarak elde edilmesi demektir. Uzun süre şantiye kurma ve sabit giderlerin ortaya çıkmasını bu endüstrileşmiş yapım engellemektedir. Yapım yerinde sadece montaj yapılmaktadır. Hızlı yapılan montaj çok kısa sürer, şantiye ve şantiyenin sabit giderleri gibi masrafları ortadan kaldırır. Kurulum parçaların birbirine bağlanması ve bir somun anahtarı ile sıkıştırılmasından ibarettir. Sanayi tesislerindeki üretimin sürekliliği ve sürdürülebilirliği önemlidir. Kısa sürede inşaatı bitirilebilen uzak kafes sistemler üretime uzun süre ara vermeden tesisini yenilemek zorunda olan işletmeler içinde hızlı bir inşaat yöntemi olarak seçilebilir.

4. Uzak Kafes Sistemlerin Projelendirme Esasları

Uzak kafes sistemler, düğüm noktaları mafsallı bağlantılı kabulü ile tasarlanmış, narin kesitli boru elemanlardan teşkil edilmiş yüksek dereceden

hiperstatik sistemlerdir. Uzak kafes çatılarının hesaplarında yükler düğüm noktalarından aktarılır. Sadece eksenel yük alacak şekilde kesitler boyutlandırılır. Bu yüzden imalat ve montaj sonrası da bu koşul sağlanmalı, gerek kaplama detayları gerekse aksesuar bağlantıları elemanlara doğrudan veya kelepçeler ile bağlanmalı, tüm bu yükler küre elemanlar üzerinde bırakılmış ve dış çekilmiş delikler yardımı ile sisteme aktarılmalıdır. Statik hesaplar yapılırken, projenin uygulanacağı ülkenin ve bölgenin koşulları esas alınmalıdır. Seçilecek standart, uluslararası alanda kabul gören ve yaygın olarak kullanılan bir standart olmalıdır. Bu durumda hesaplarda bir standart bütünlüğü olmalı, bir kaç ülke normu bir arada kullanılmamalıdır.

Uzak kafes sistem elemanlarına gelecek kuvvetleri taşıyabilecek nitelikte seçilmelidir. Her elemana gelen çekme ve basınç yüklerinin mutlak değerce en büyük olanı boyutlamada esas alınmalıdır (Şekil 8). Bir elemanın çekme taşıma kapasitesi, boru galvaniz deliği en kesiti, kaynak, konik ve cıvata çekme kapasitesinin en küçüğü olarak seçilmelidir. Benzer şekilde bir borunun basınç taşıma kapasitesi, boru ortasında burkulmalı basınç, galvaniz deliği en kesitine basınç, kaynak, konik ve somun basınç kapasitesinin en küçüğü olarak seçilmelidir.



Şekil 8. Çekme ve basınç çubuk bağlantı detayları

Statik hesaplar yapılırken, çözüme dahil edilen dış yüklerin toplamı, mesnet reaksiyonlarının toplamını verir. Sıcak daldırma galvaniz işlerde, boru çekme ve basınç taşıma kapasiteleri hesabında, galvaniz deliği nedeniyle olan kayıplar hesaba dahil edilmelidir. Bu kısımlar, gerilme yığılması yaratan bölgelerdir. Net alan kullanılarak azaltılan en kesitler dahi büyük delik çaplarında problem yaratabilir. Konik et kalınlığında cıvata kafasının zımbalama tesiri önemlidir. Bu tesirin oluşmaması için hem konik et kalınlığı yeterli olmalı, hem de cıvata kafası yeterli çapta ve standartlara uygun seçilmelidir. Sıcak daldırma galvanizli işlerde, cıvata sonradan boru içine atıldığından, galvaniz delikleri çapı, cıvatanın sonradan içeri girmesine izin verecek büyüklükte olmalıdır. Galvaniz delikleri küçük yapılan borularda muhtemelen bu delik cıvata atımı için değil başka amaçlara yönelik olabilir. Bu tür projelerde, hazır galvanizli boru kullanmak gibi hatalı uygulama şekilleri kullanılmış olabilir.

Statik hesaplarda proje ve sözleşme şartlarına bağlı olarak göz önüne alınabilecek başlıca yük kriterleri, zati ağırlıklar, servis yükleri (aydınlatma, havalandırma, temizlik teçhizatı...), deprem yükleri, rüzgar yükleri ve sıcaklık tesirleridir. Kaynakların emniyet gerilmeleri şartnamelerde verilen limitlere uygun seçilmelidir. Kaynak kalınlığı boru kalınlığından fazla olamaz. Kaynak kalınlığının üst sınırı boru et kalınlığını geçmeyecek şekilde standartlarda yer alan koşullar ile sınırlı tutulmalıdır (Örneğin max. $a \leq 0,7t$ min.) (Şekil 9). Farklı malzeme kalitesinde olan çelik elemanların kaynaklanması halinde kaynak emniyet gerilmesi, düşük kalitedeki malzeme esas alınarak hesaplanmalıdır. Örneğin St52 boru kullanılarak yapılmış uzay çatılarda koniklerin St37 olması halinde, kaynak emniyet gerilmesi St37 için verilen değere göre seçilmelidir. Uzay kafes sistemlerde çubuk olarak kullanılan boru elemanlar kesinlikle bir bütün olmalı yani kaynaklı birleşimle çubuk yapılmamalıdır. Aksi halde bu tür çubuk elemanlarda hasar kaçınılmaz olmaktadır (Şekil 9)



Şekil 9. Kılıçoğlu Anadolu Lisesi uzay kafes sistem hasarları [4]

Yukarıdaki şekilde çatı hasarı görülen spor salonu çatısı $28.8 \times 43.68 \text{ m}^2$ 'dir. Çatı elemanları farklı boyutlarda olabilen borular, konikler, cıvatalar, somunlar ve kürelerden oluşmaktadır. Boru uçları koniktir. Konik ucunda yer alan cıvataya somun pim ile çakılmıştır.

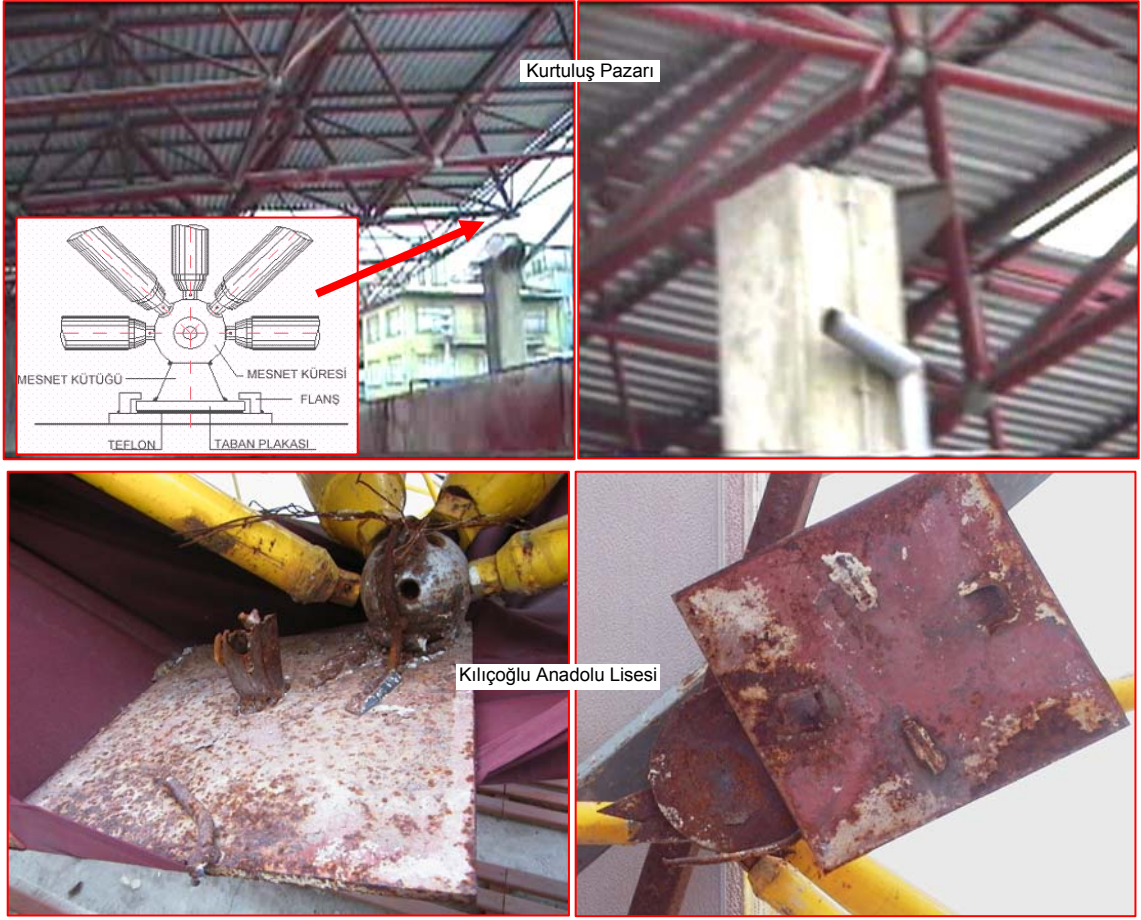
Etrafı açık yapılarda rüzgar basınç faktörleri, kapalı alanlara göre 3 kat daha fazla olmaktadır. Örneğin açık bir uzayı etkileyen rüzgar yükü emme katsayısı $C=1.2$, kapalı bir uzayı etkileyen rüzgar yükü emme kat sayısı $C=0.4$ olmaktadır [7]. Bu durum hesaplarda ve imalatı mutlakla göz önüne alınmış olmalıdır. Uzay çatı boru elemanlarının narinlik hesabında burkulma boyu hesaplanırken, küre aksından küre aksına olan boy esas alınmalıdır. Ayrıca çubukların maksimum olarak seçilen narinlik oranı standartlarda belirtilen orandan fazla olmamalıdır. Çubuklara gelen maksimum çekme ve basınç kuvvetlerine göre, eleman üzerinde teşkil edilen boru, cıvata, konik ve küre çapları uyumlu olmalıdır (Şekil 10). Bu homojenliğin sistemin tamamında sağlanmış olmasına dikkat edilmelidir.



Şekil 10. Kurtuluş pazarı uzay kafes sistem hasarları

Uzay model geometrisi tasarlanırken modül genişliğinin yüksekliğe oranı 0.8 sabitiyle pratik olarak hesaplanabilir [5]. Bu şekilde düğüm detaylarında minimum ölçülerle geçilmiş olunur. Bunun dışında boru akslarında dar açılar bırakmaktan kaçınılmalıdır. Aksi durumda somun yada cıvata çakışması sebebiyle büyük çapta küreler sistemde belirir. Montaj her zaman statik hesapların bir parçasıdır. Montaj tasarımının en başında dikkate alınmalı ve alınması gereken önlemler tespit edilmelidir. Örneğin dört açıklıklı bir uzayın ilk açıklığı komşu açıklıkların yardımıyla hafifletilse bile, montaj aşamasında bu dengeleyici yerleşimin olmaması ilk açıklıkta sorun yaratabilir. Benzer bir şekilde vinç ile kaldırılan uzayların kaldırma noktalarına yakın yerlerde veya farklı diğer bilgilerde, dikkate alınmaması halinde elemanlar tehlike yaratabilir. Bu yüzden montaj yöntemi, mutlaka analizin bir parçası olarak düşünülmeli ve paralel hazırlanmalıdır.

Uzay kafes sistemlerde mesnet bağlantıları sistemin sıcak ve soğuktan dolayı hareketine imkan verecek şekilde düzenlenmesi sistemin sağlıklı işlevini yapması bakımından önemlidir. Ayrıca sistemin mesnetleri bağlantı noktalarına tam aksında yapılmalıdır. Aksi halde çeşitli sebeplerden dolayı hasarlar kaçınılmaz olmaktadır (Şekil 11).



Şekil 11. Mesnet bağlantı hasarları

Uzay kafes sistemlerin kar yükünün diğer düşey yüklerden daha fazla etkili olduğu görülmüştür. Dünyada her kış birçok çatı kar yükü altında çökmekte; can ve mal kaybına neden olmaktadır (Şekil 12). Özellikle büyük alanları kaplayan spor, sergi, kongre salonu, süper market, pazaryeri ve hangar türü yapıların çelik yada ahşap taşıyıcılı çatıları çökmektedir. Çökme nedeni ilk bakışta kar yükü gibi görünmekle birlikte bu doğru değildir. Çöken çatıların hemen hepsi de proje, inşaat ve bakım hataları içermektedir. Kar yükü sadece çökmeyi tetiklemektedir.



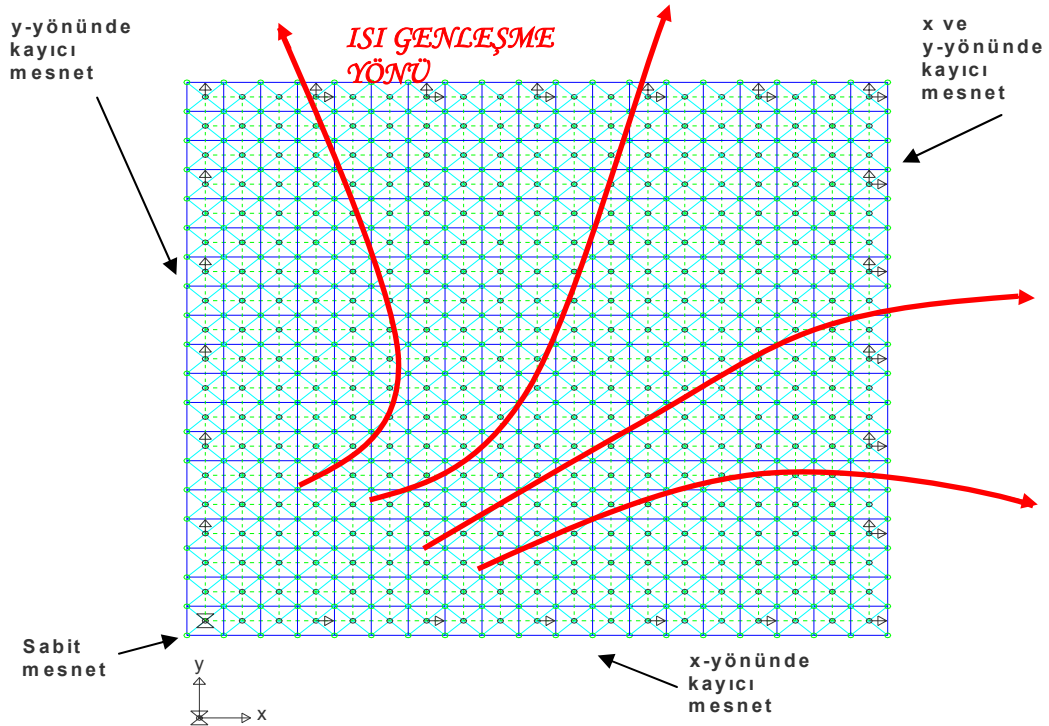
Şekil 12. Kar yükünden dolayı hasar gören uzay ve kafes yapıları [4]

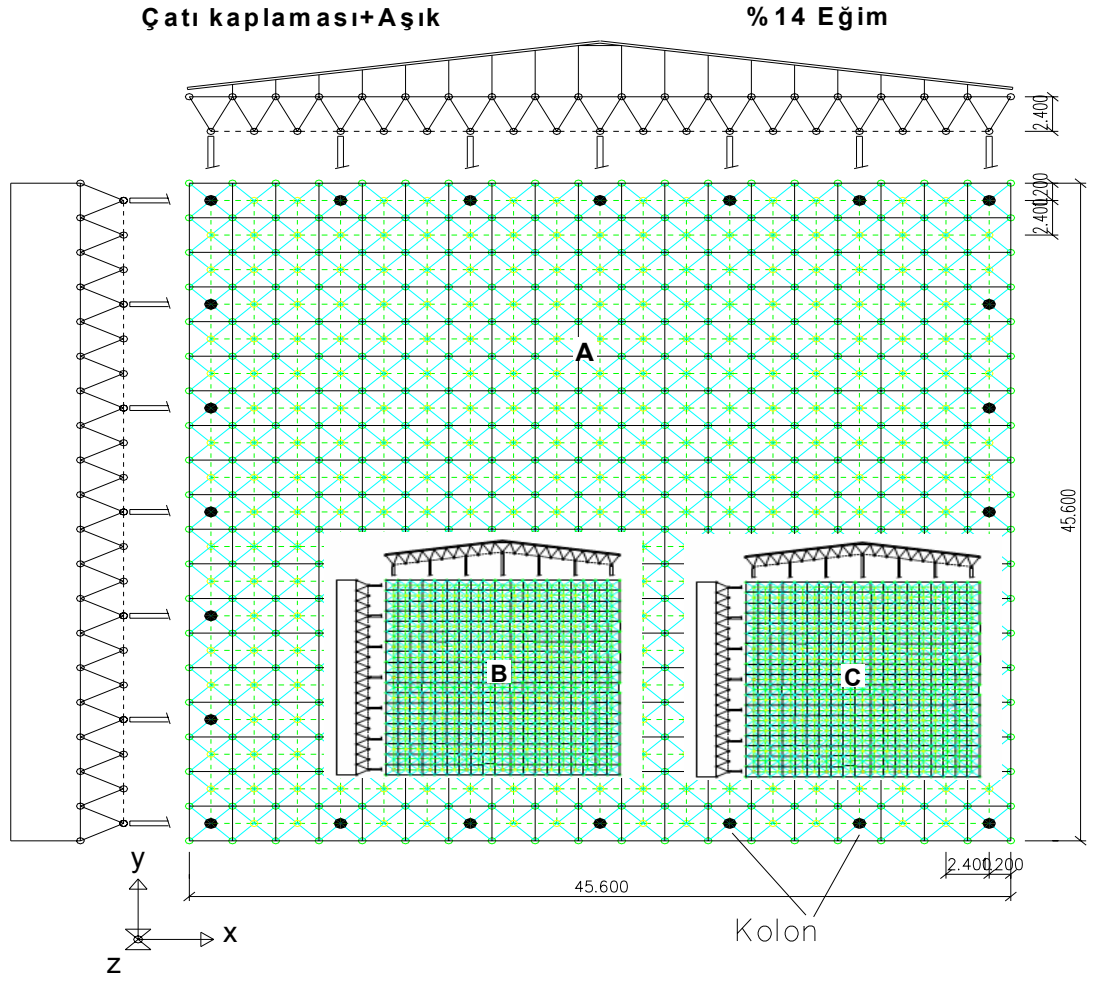
Bad Reichenhall/Almanya spor salonunun çökmesi sonrası Alman Teknik Denetim Kurumu (TÜV) geniş kapsamlı bir inceleme başlatmış, 200'den çok spor salonunda yaptığı incelemede çatıların %24'ünde proje ve hesap hatası, %29'unda malzeme ve inşaat hatası ve %37'sinde bakım hataları belirlemiştir. Kar yükü nedeniyle çöken çatı sadece %16'dır [4]. Doğu Karadeniz bölgesinde yapılan araştırmada kar verilerinin yük değerleri istatistiksel olarak incelenmiş; günümüz şartlarındaki değerlerin zamanın imkanlarıyla hazırlanmış TS498'deki değerlerden daha büyük olduğu görülmektedir.

5. Üç Değişik Çatı Tipine Göre Çözülen Model

Çelik yapılarda çatının şekli ve eğimi yapının ağırlığında ve dolayısıyla maliyetinde çok etkili bir parametredir. Bu nedenle bu bölümde 3 değişik çatı şekli için aynı yapı çözülerek, değişim bir grafikte gösterilmiştir. Özel ilavelerin haricinde standart modüle sahip ana bölüm uzay çatının çözümü aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.

Betonarme kolon sistemi üzerine oturtulan $43.2 \times 43.2 \text{ m}^2$ kare geometriye sahip olup 7.2 m kolon aralıklarına sahiptir. Yapı yüksekliği 15 m ve kaplama açısı 8° uzay diyagonal açısı 63° 'dir. Mesnetler ısı yüklerini sistem dışına atacak şekilde mesnet düzenlemesi yapılmıştır. Isı, yükleme durumları (zati, hareketli...), yükleme kombinasyonları, mesnet şartları yönetmelik kriterlerince alınmıştır. Bu çözümde 42 adet kombinasyon bulunmaktadır. Burada bazı kombinasyonlar devre dışı kalmaktadır. Hangi kombinasyonun nerede lüzumlu nerede lüzumsuz muhakemesini yapmak tamamen zaman kaybıdır. Sistem otomatik olarak devre dışı bırakır. Çözülen sistemde 761 adet düğüm noktası, 2888 adet çubuk, 10 çeşit yük, $E=21000000 \text{ kg/m}^2$, 22.3 kg/m^2 zati yük, 105 kg/m^2 ölü yük ve 80 kg/m^2 rüzgar yükü bulunmaktadır (Şekil 13) [6].





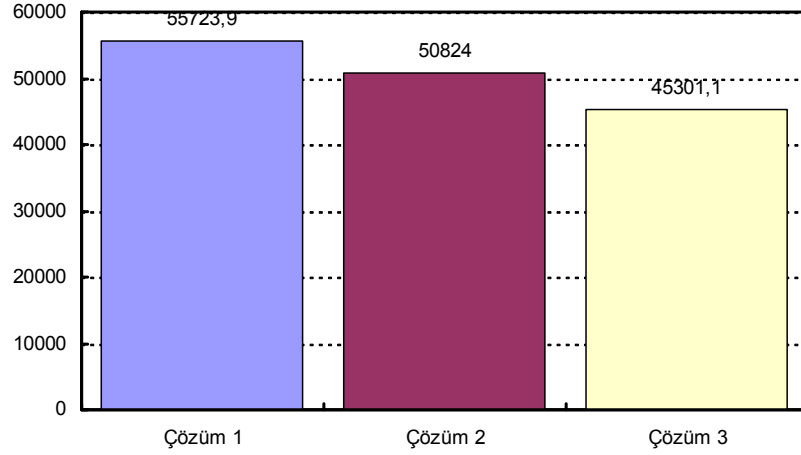
Şekil 13. Çözülen çatı tipleri

Alınan model üç değişik durum için çözülmüştür. Birinci durum çatı düzlem olarak ve mesnet düzenlerinin ısı yüklerini sönmüleyici şekilde açık mesnet tipinde çözümüdür. Çatı kaplaması eğimi aşık sistemiyle %14 eğim verilerek yapılmıştır (Şekil 13A). Bu çözüm sonucu bulunan kafes sistem eleman ağırlıkları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çözüm-1 Uzay Kafes Sistem Özet Değerleri

Toplam yapı ağırlığı [kg]	55723.9
Uzay kafes sistemin ağırlığı [kg]	45723.9
Aşık sistem ağırlığı [kg]	10000
En büyük boru çapı [inc]	6"
En büyük küre çapı [cm]	160
En büyük mesnet kuvveti [kg]	X = 4.559 Y = 0.000 Z = 19.451
Düşey yönde max. deplasman [m]	-0.102077
İmalat boru tip sayısı [adet]	109
İmalat kre tip sayısı [adet]	155

İkinci durumda çatı ortadan iki yöne %14 eğimle kırılma açısı verilerek, kırık çatı tipinde çözümü yapılmıştır (Şekil 13B). Bu durumda mesnet düzenlemesi birinci durumdaki gibi alınmıştır. Üçüncü durumda ise ikinci durumdan farklı olarak mesnetler x-yönünde kapalı, y-yönünde açık olarak çözülmüştür (Şekil 13C). Bu da ısı farkı yükünün y-yönünde dışarı atılması, x-yönünde sistem içinde sönümlenmesidir. Bu üç durumda yapılan çözümler sonucunda çatı ağırlığı değişimi Şekil 14’de verilmiştir.

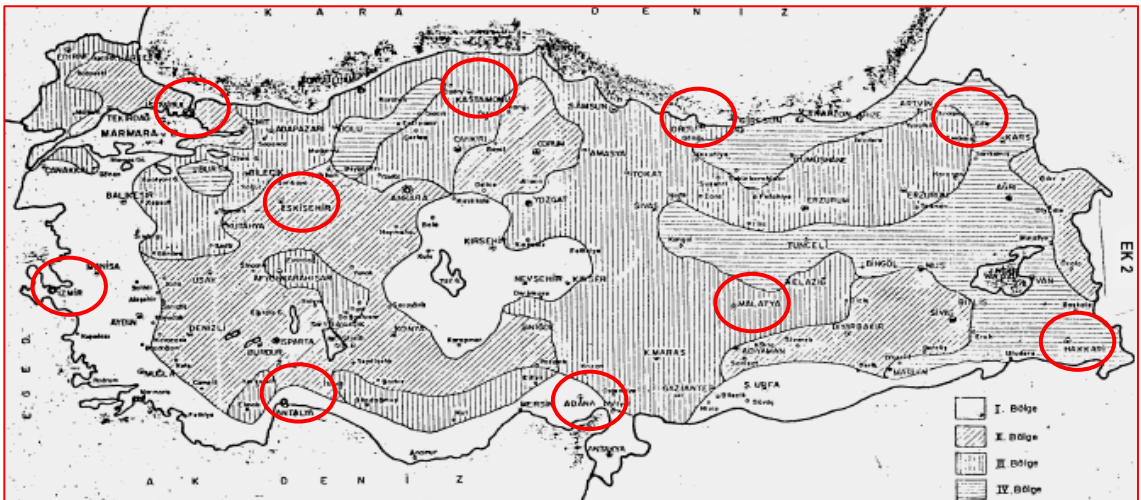


Şekil 14. Sistem Ağırlığı Değişim Grafığı

Şekil 14’ün incelenmesinden de görülebileceği gibi tüm yapılarda özellikle de uzay kafes sistem ile yapılan yapılarda sistem seçimi çok önemlidir. Günümüzde tüm hesaplamaların bilgisayarla yapıldığı düşünülürse mühendisliğin işin içine girdiği tek yerin sistem seçimi olduğunu söylemek hiç de zor değildir.

6. Farklı Bölge Koşullarında Çözüm ve Değerlendirme

Bu kısımda kar yükünün bölgelere göre değişiminin etkisinin, uzay kafes sistemler üzerine etkisinin incelenmesi yapılmıştır. Şekil 13’deki B modeli çatı sistemi model kabul edilerek Türkiye’nin farklı bölgelerindeki davranışı kar yükü ve deprem kuvvetleri altında incelenmiştir (Şekil 15).



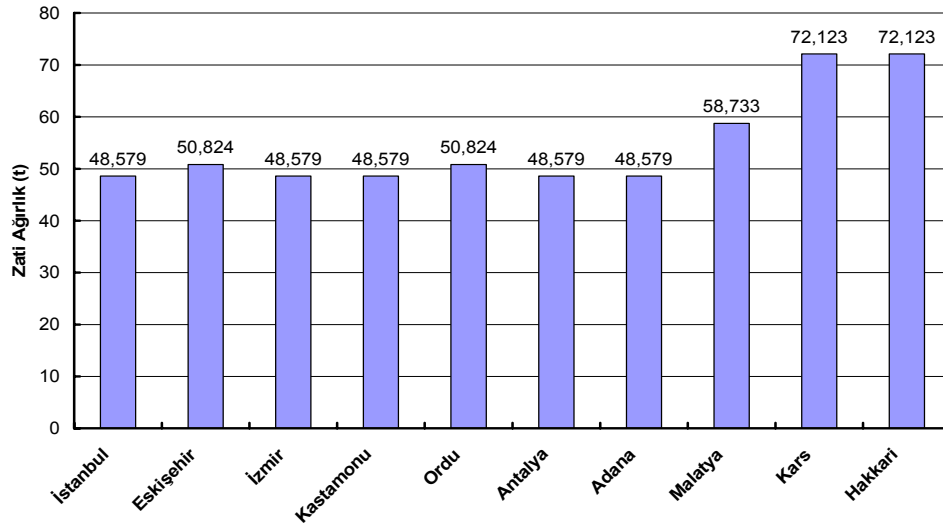
Şekil 15. Türkiye kar yağış yüksekliği haritası [7]

Burada esas olan yükler kar yükleri TS498 [5], deprem yükleri de Deprem Yönetmeliği kriterlerine göre belirlenmiştir (Tablo 2) [8].

Tablo 2. Her İlin Kendi Bölge Şartlarına Göre Hesaplanmış Sonuç Değerleri

Bölge No	İller	İlçeler	Dep. Bölgesi	Deprem kuvveti (kgf)	Rakım (m)	Kar yükü (kg/m ²) [TS498]	Zati ağırlık (kg)	Max. yatay dep.(m)	Max. düşey dep.(m)
1	İstanbul	Üsküdar	2	34,16	≤200	75	48,579	0,0449	0,0982
2	Eskişehir	Seyitgazi	2	26,85	800	85	50,824	0,0456	0,1004
3	İzmir	Çeşme	1	34,16	≤200	75	48,579	0,0449	0,0982
4	Kastamonu	Çatalzeyti	3	34,16	400	75	48,579	0,0449	0,0982
5	Ordu	Perşembe	3	17,9	600	85	50,824	0,0448	0,0994
6	Antalya	Alanya	1	25,62	≤200	75	48,579	0,0441	0,0974
7	Adana	Osmaniye	3	17,08	300	75	48,579	0,0434	0,0965
8	Malatya	Akçadağ	3	42,35	900	125	58,733	0,0508	0,1127
9	Kars	Sarıkamış	4	39,02	1800	184	72,123	0,0529	0,1194
10	Hakkari	Yüksekova	4	52,02	1800	184	72,123	0,0533	0,1200

Tablo 2’de Eskişehir deprem bölgesi koşulları baz alınarak yalnızca kar yükünün her ilçenin kendi bölge şartlarındaki değeri alınmıştır. Böylece kar yükü değişkeninin zati yüke ve deplasmana etkisi incelenmiştir (Şekil 16)



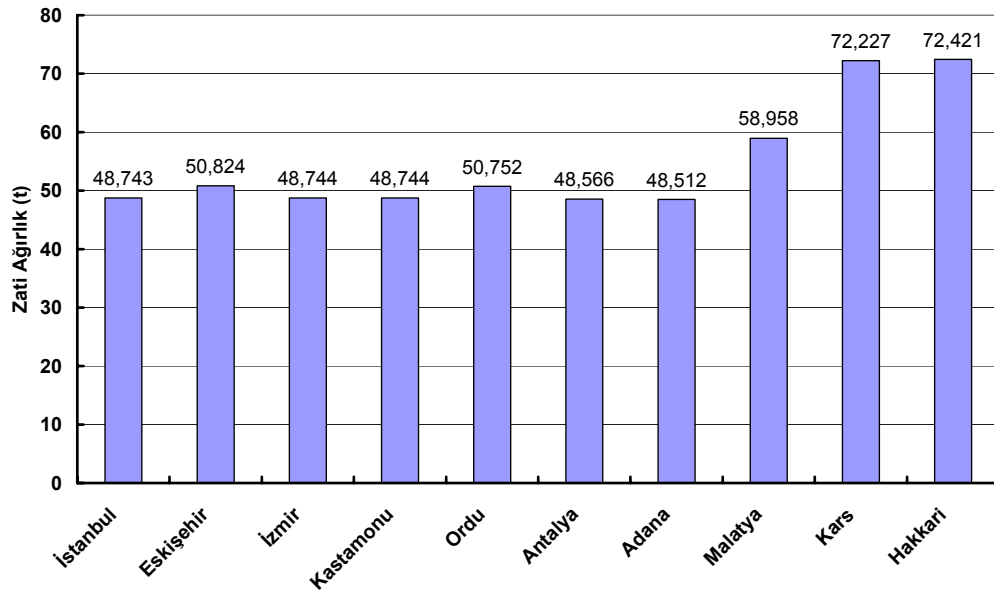
Şekil 16. Sabit bölgede değişken kar yükünün zati ağırlığa etki grafiği

Şekil 16’da deprem yükü Eskişehir bölgesi değeri ve kar yükü her ilçenin kendi değerleri alınarak çözüm yapılmış ve yapı ağırlığı hesaplanmıştır. Böylelikle yalnızca (salt) kar yükünün uzay kafes sistemlere etkisi incelenmiştir. Tüm bölge değerleri incelendiğinde zati ağırlıklar deprem yükünün sabit alındığında binde mertebesinde fark göstererek zati ağırlığın kar yüklerine bağlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. Her ilin kendi bölge şartlarına göre hesaplanmış sonuç değerleri

Bölge No	İller	İlçeler	Dep. Bölgesi	Deprem kuvveti (kgf)	Rakım (m)	Kar yükü (kg/m ²) [TS498]	Zati ağırlık (kg)	Max. yatay dep.(m)	Max. düşey dep. (m)
1	İstanbul	Üsküdar	2	26,85	≤200	75	48,579	0,0443	0,0976
2	Eskişehir	Seyitgazi	2	26,85	800	85	50,824	0,0456	0,1004
3	İzmir	Çeşme	1	26,85	≤200	75	48,579	0,0443	0,0976
4	Kastamon	Çatalzeyti	3	26,85	400	75	48,579	0,0443	0,0976
5	Ordu	Perşembe	3	26,85	600	85	50,824	0,0456	0,1004
6	Antalya	Alanya	1	26,85	≤200	75	48,579	0,0443	0,0976
7	Adana	Osmaniye	3	26,85	300	75	48,579	0,0443	0,0976
8	Malatya	Akçadağ	3	26,85	900	125	58,733	0,0498	0,1114
9	Kars	Sarıkamış	4	26,85	1800	184	72,123	0,0521	0,1185
10	Hakkari	Yüksekov	4	26,85	1800	184	72,123	0,0521	0,1185

Tablo 3’de Eskişehir deprem bölgesi koşulları baz alınarak yalnızca kar yükünün her ilin kendi bölge şartlarındaki değeri alınmıştır. Böylece kar yükü değişkeninin zati yüke ve deplasmana etkisi incelenmiştir (Şekil 17).



Şekil 17. Bölgelere göre zati ağırlık değişim grafiği

Şekil 17’de seçilen on ilin ilçelerinde kendi deprem bölge ve kar yükü etkileri hesaba katılarak ayrı ayrı çözüm yapılmış ve yapı ağırlığı hesaplanmıştır. Malatya’da diğerlerinin ortalamasına göre %20 artma, Kars ve Hakkari’de artış %50 civarındadır. Bu önemli artış kar yükünün ve dolayısıyla da deprem yükünün bu son üç bölgede artışıyla orantılıdır. Örneğin Ordu’da eşit kar yüküne sahipken deprem yükü Eskişehir’e oranla %30 daha azken zati ağırlıktaki azalmanın %1’lerin altında

kaldığı görülmektedir. Bu da kar yükünün uzay kafes sistemlerdeki etkisinin ne denli önemli olduğunu göstermektedir.

7. Sonuç ve Öneriler

Uzay kafes sistemlerde bir proje, aynı yükler altında, aynı açıklıkta, kolon düzeni ve çatı eğimi sabit tutularak yapılan düzenlemelerle yapı zati ağırlığının ve yapı maliyetlerinin %20'lere kadar azaldığı görülmüştür. Çatı tiplerinin kar yükleri üzerinde büyük bir etkisi olduğu incelenen yapılarda açıkça görülmektedir. Çözümlerden de görülebileceği gibi tip proje uygulamasından kesinlikle vazgeçilip her bölgenin kendi şartlarına göre yapılar yapılmalıdır. Depremleri hasarlarından öğrenildiği gibi kar yükünün oluşturduğu hasarları da çöken uzay kafes sistemlerden öğrenmemek için projelendirme, bazı dönemlerde yönetmelikte belirtilenden daha fazla kar olabileceği dikkate alınarak yapılmalıdır.

Eskişehir'de hasar gören uzay kafes sistemli yapılardan,

- Kurtuluş Pazarı, çatı tipinden dolayı kar yığılmasının oluşturduğu yükü sistem taşıyamadığı için hasar görmüştür. Bu pazar yerinin yaklaşık %25'inin hasar görmesi bu kısımdaki düğüm ve mesnet noktalarındaki hatalardan oluşabileceğini göstermektedir.
- ESOGÜ spor salonun hasar görmesi gizli çatı yapılmasından ve bu yerin karla dolması sonucu sistem hasar görmüştür. Yaklaşık 3000 elemandan 900 tanesi hasar görmüş ve bu elemanlar değiştirilmiştir.
- Kılıçoğlu Anadolu Lisesi spor salonunun hasar görmesi ise uzay kafes sistem elemanlarının, düğüm ve mesnetlerinin uzay kafes sistemin gerektirdiği malzeme ve uygulama kriterlere göre yapılmamasından kaynaklanmaktadır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] http://www.db.bauzeitung.de/sixcms/media.php/273/db1004_mengering.pdf
- [2] Ayhün E., Uzay Kafes Sistemlerin Farklı Bölge Koşullarında Davranışının İncelenmesi ve Karşılaştırmalı Proje Çözümleri, Yüksek Lisans Tezi, 2006
- [3] Öztürk A. Z., (2002), "Çelik Yapılar", Birsan Yayınevi
- [4] Topçu A., Kar yükü ve çöken çatılar, Eskişehir Orta Doğu Teknik Üniversitesi-Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Yapı Mekaniği Semineri-2006
- [5] TS 498, Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Hesap Değerleri, 1997
- [6] Kartal M., "FrameCAD Space Frame Editor Uyarlama 3.6 Kullanım Kitabı"
- [7] TS 648, Çelik Yapıların Yapım ve Hesap Kuralları, 1998
- [8] ABYYHY, (1998), "Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik"

SİSMİK YALITIMLI YÜKSELTİLMİŞ ÇELİK SIVI TANKLARININ DAVRANIŞI

Erdal Coşkun, Gökhan Yazıcı

İstanbul Kültür Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İKÜ
Ataköy Kampüsü Bakırköy / İstanbul

Özet

Çelik sıvı tankları, yakıt, endüstriyel kimyasallar, kullanma ve yangın söndürme suyu depolamakta yararlanılan mühendislik yapılarıdır. Depremlerde hasar görmeleri durumunda ise büyük maddi ve çevresel hasarlar ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, depremlerde sıvı depolarında oluşan hasar tiplerini ve bu hasarlara neden olan etmenleri belirlemek amacıyla çeşitli araştırmacılar tarafından saha çalışmaları yapılmıştır. Söz konusu saha araştırmalarında, sıvı depolarının depremlerde oldukça kötü performans sergiledikleri ve deprem dayanımlarının artırılması için yeni yöntemlerin geliştirilmesinin gerekliliği ortaya çıkmıştır. Sıvı tanklarını depremin yıkıcı etkilerinden korumayı hedefleyen yeni tekniklerden biri de sismik yalıttır. Sismik yalıtım sistemleri kullanılarak sıvı tanklarının sönüm kapasitelerinin artırılması ve tanka etkileyen hidrodinamik etkilerin azaltılması amaçlanmaktadır. Sismik yalıtım sistemlerinin diğer bir üstünlüğünde hasarın kolaylıkla değiştirilebilecek elemanlarda yoğunlaşmasıdır. Bu çalışmanın, birinci aşamasında kuvvetli yer hareketine maruz kalan sıvı tanklarında oluşan hidrodinamik etkilerin zaman içerisinde değişimini veren ifadeler özetlenmiştir. Bunu takiben sürtünmeli sarkaç mesnetleri üzerine oturan yükseltilmiş bir çelik sıvı deposunun hareket denklemleri çıkarılmıştır. Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin histeretik davranışı Bouc-Wen plastisite modeli kullanılarak modellenmiştir. İkinci aşamada, sismik yalıtım sistemi ve tank parametrelerinin dinamik davranışa etkisinin incelenmesi için bir parametrik çalışma yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda tankta oluşan hidrodinamik basınç ile tankı destekleyen yapı sistemine etkileyen kesme kuvveti ve moment değerlerinin azaldığı, buna karşın sıvı yüzeyi hareketinde küçük bir artış meydana geldiği görülmüştür. Parametrik analizin sonuçları ve sismik yalıttı yükseltilmiş çelik sıvı tanklarının tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar sonuçlar bölümünde özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yükseltilmiş Sıvı Tankları, Sismik Yalıtım

1. Giriş

Sıvı tankları, yakıt, endüstriyel kimyasallar, kullanma ve yangın söndürme suyu depolamakta yararlanılan kritik önemde mühendislik yapılarıdır. Deprem sonrasında etkilenen bölgenin kullanma suyu ihtiyacının karşılanması ve çıkan yangınları söndürülmesi için gereken suyun temin edilebilmesi için su tanklarının hizmette kalmaları gerekmektedir. San Francisco (1906) ve Büyük Kanto (1923) depremlerinde ortaya çıkan yangınlar, su temin edilemediği için kontrolden çıkmış ve oluşan kayıpların daha da artmasına neden olmuştur [1]. Benzer şekilde, yakıt ve kimyasal tanklarının hasar görmeleri durumunda doğrudan veya dolaylı olarak önemli maddi ve çevresel hasarlar ortaya çıkabilmektedir. Yakıt ve kimyasal tanklarında oluşan hasarlar 1933 Long Beach, 1960 Şili, 1964 Alaska, 1978 Miyagi

ve 1999 Kocaeli depremlerinde önemli ekonomik kayıplara ve çevresel zararlara yol açmıştır.

Bu nedenlerden dolayı, depremlerde sıvı depolarında oluşan hasar tiplerini ve bu hasarlara neden olan etmenleri belirlemek amacıyla çeşitli araştırmacılar tarafından saha çalışmaları yapılmıştır [2-11]. Söz konusu saha araştırmalarında, tank-sıvı-zemin etkileşiminin dinamik davranışı oldukça etkilediği ve sıvı tanklarının enerji sönümleme kapasitelerinin geleneksel yapı sistemlerine göre daha düşük olduğu vurgulanmıştır [12].

Tank-sıvı-zemin etkileşimi üzerine yapılan çalışmaların sonucu olarak mekanik benzer sistemler geliştirilmiştir. Mekanik benzer sistemler, sürekli sıvı kütlelerinin hareketini ve tank duvarıyla etkileşimini temsil etmekte kullanılan analitik modellerdir. Bu modellerin ilki ve en çok kullanılanı Housner tarafından rijit zemine oturan rijit duvarlı silindirik ve dikdörtgen tanklar için geliştirilen modeldir [13]. Bu modelde, sürekli sıvı kütlelerinin tabana yakın olan kısmının tankla beraber hareket ettiği ve serbest yüzeye yakın kısmının ise uzun periyotlu bir çalkalanma hareketi yaptığı kabul edilmiştir. Bu kabul doğrultusunda sürekli sıvı kütlesi, impulsif kütle ve konvektif kütle olmak üzere birbirinden ayrık iki tek serbestlik dereceli sistem ile temsil edilmiştir. İmpulsif kütle tank duvarına rijit olarak, konvektif kütle ise yaylarla tank duvarına bağlanmıştır. Haroun ve Housner, tank duvarlarının esnek olması durumunu araştırmış ve rijit zemine oturan çelik silindirik tanklarda sürekli sıvı kütlelerini birbirinden ayrık 3 tek serbestlik dereceli sistem ile temsil eden bir mekanik benzer sistem geliştirmiştir [14]. Veletsos, rijit zemine oturan tanklarda rijit ve esnek duvarlı tanklar için geliştirilen mekanik benzer modellerin teorik altyapısını ve uygulamada dikkat edilmesi gereken hususları örnekler ile açıklamıştır [15]. Veletsos ve Tang, tankın oturduğu zeminin de esnekliğini göz önüne alan bir mekanik benzer sistem geliştirmiştir [16]. Zemin koşulları ile tank duvarının esnekliğini göz önüne alan bu model Eurocode 8'de (Bölüm 4: Silolar, tanklar ve boru hatları) kullanılmaktadır [17]. Malhotra ve Veletsos, yere ankrajlanmamış silindirik tanklar için bir model geliştirmiştir [18]. Veletsos ve Younan, radyoaktif atık depolamasında kullanılan rijit ve esnek duvarlı silindirik tanklarda hidrodinamik etkilerinin belirlenebilmesi için bir mekanik benzer sistem geliştirmiştir [19,20]. Değişik geometrilere sahip tanklarda çalkalanma etkilerinin analizi ayrıntılı olarak [21] kaynağında ele alınmıştır.

Sıvı tanklarının depreme karşı dayanımlarının artırılması için yeni yaklaşımlar denenmektedir. Bu yaklaşımlardan biri de sismik yalıtımdır. Sismik yalıtım yönteminde yapının periyodunun uzatılması yoluyla rezonans etkilerinin azaltılması ve yapı sisteminin enerji sönümleme kapasitesinin artırılması amaçlanmaktadır. Günümüzde kullanılan sismik yalıtım sistemleri ve bunların çalışma prensipleri ile ilgili ayrıntılı bilgi [22-24] kaynaklarından elde edilebilir. Chalhoub ve Kelly, sismik yalıtımlı tankların davranışını deneysel olarak incelemiştir [25]. Sarsma tablasında gerçekleştirilen deneyler sonucunda tank duvarına etkiyen hidrodinamik basınçların önemli ölçüde azaldığı buna karşın çalkalanma yüksekliğinde bir miktar artış olduğu gözlenmiştir. Zayas ve Low, sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin kullanıldığı endüstriyel tank proje uygulamalarını [26] kaynağında sunmuştur. Söz konusu makalede, Pittsburg, Kaliforniya'da bulunan Dow Chemicals tesisinde yangın söndürme amacıyla 1930 yılında yapılan bir yükseltilmiş su tankının sismik yalıtım sistemi ile 1988 yılında takviye edildiğini

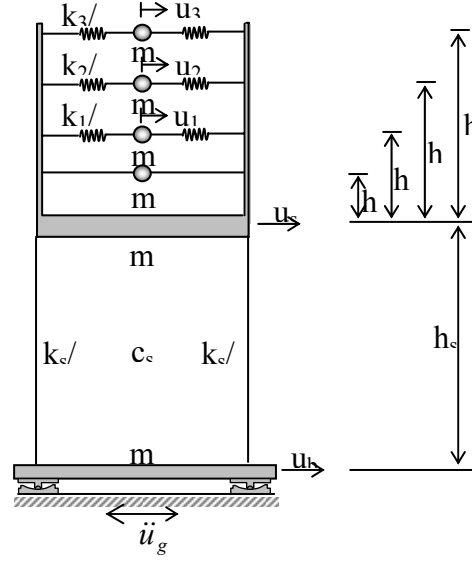
ve 1989 Loma Prieta depreminde iyi performans gösterdiğini belirtilmiştir. Söz konusu su tankının altına yerleştirilen sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin yerleşimi Şekil 1’de görülmektedir. Malhotra, silindir tankların korunması için çeşitli sismik yalıtım ve enerji sönümleme uygulamaları önermiştir [27-29]. Shenton ve Hampton depremlerde yükseltilmiş sıvı tanklarında oluşan hidrodinamik kuvvetlerin pratik olarak hesaplanabilmesi için bir modal analiz yöntemi önermiştir [30]. Shirmali ve Jangid, Haroun tarafından geliştirilen mekanik benzer sistemi kullanarak sürtünmeli sarkaç ve kurşun çekirdekli elastomer mesnetler üzerine oturan yükseltilmiş sıvı tanklarının zaman artımı yöntemiyle analizi için pratik bir yöntem geliştirmiştir [31-33].



Şekil 1. Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin üzerine oturan amonyak tankı [26]

2. Yükseltilmiş Sıvı Tankının Modeli

Sıvı tankları doğrudan zemine oturan ve yükseltilmiş tanklar olarak iki ana grupta incelenebilir. Yükseltilmiş tanklarda sıvı haznesi betonarme veya çelik bir yapı sistemi üzerine oturtulmaktadır. Bu tanklar genellikle kullanma ve yangın söndürme sistemlerinde kullanılmaktadır. Günümüzde kullanılan yükseltilmiş sıvı tanklarının depolama kapasiteleri tipik olarak 300 ile 45.000 m³ arasında değişmektedir [30]. En yaygın kullanılan tank geometrileri ise silindirik, küresel, prizmatik ve koniktir. Bu çalışmada, silindirik bir sıvı tankı için hidrodinamik etkileri veren ifadeler [15] kaynağından yararlanılarak sunulmuştur. Şekil 2’de yükseltilmiş bir sıvı tankının 3 konvektif (çalkalanma) modunu göz önüne alan modeli verilmiştir. Diğer tank geometrileri için hidrodinamik etkiler [21] kaynağından elde edilebilir.



Şekil 2. Yükseltilmiş Sıvı Tankının Dinamik Modeli

Bu modelde, m_0 impulsif kütleyi temsil etmektedir ve (1) ifadesiyle hesaplanabilir.

$$m_0 = m_l \sum_{n=1}^{\infty} \frac{16}{\pi^3} \frac{H}{R} \frac{1}{(2n-1)^3} \frac{I_1 \left[(2n-1) \frac{\pi R}{2 H} \right]}{I_1' \left[(2n-1) \frac{\pi R}{2 H} \right]} \quad (1)$$

Bu ifadede, m_l toplam sıvı kütlesini, H sıvı yüksekliğini, R tank yarıçapını temsil etmektedir. I_1 ve I_1' ise sırasıyla birinci derece ve birinci mertebeden Modifiye Bessel fonksiyonunu ve onun birinci türevini temsil etmektedir [15].

Modelde, m_1 , m_2 ve m_3 ile gösterilen kütleler konvektif bileşenin ilk 3 moduna ait kütleleri temsil etmektedir. Sürekli sıvı kütlelerinin sonsuz tane çalkalanma modu vardır ancak 3 çalkalanma modu kullanılarak hidrodinamik etkiler yeterli hassasiyetle elde edilebilmektedir. Sistemin j . çalkalanma moduna karşılık gelen kütleyi temsil eden m_j (2) ifadesiyle elde edilebilir. Bu ifadede λ_j , $J_1'(\lambda) = 0$ ifadesinin j . köküdür. J_1' , 1. derece ve 1.mertebeden Bessel fonksiyonunun birinci türevidir.

$$m_j = \left[\frac{2}{\lambda_j^2 - 1} \frac{R}{\lambda_j H} \tanh \left(\lambda_j \frac{H}{R} \right) \right] m_l \quad (2)$$

Konvektif bileşenlerin k_1, k_2 ve k_3 ile gösterilen rijitlikleri ve titreşim frekansları (3) ve (4) ifadelerinin yardımıyla hesaplanabilir. (4) ifadesinde g , yer çekimi ivmesini temsil etmektedir.

$$k_j = m_j \omega_j^2 \quad (3)$$

$$\omega_j^2 = \frac{\lambda_j g}{R} \tanh \left(\lambda_j \frac{H}{R} \right) \quad (4)$$

İmpulsif kütlenin yüksekliği h_0 , (5) ve (6) ifadelerinden elde edilebilir.

$$h_0 = H \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \left[1 - \frac{2(-1)^{n+1}}{(2n-1)\pi} \right] \alpha_n}{\sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n} \quad (5)$$

$$\alpha_n = \frac{16}{\pi^3} \frac{H}{R} \frac{1}{(2n-1)^3} \frac{I_1 \left[(2n-1) \frac{\pi}{2} \frac{R}{H} \right]}{I_1' \left[(2n-1) \frac{\pi}{2} \frac{R}{H} \right]} \quad (6)$$

Konvektif kütlelerin tank tabanından yükseklikleri h_j , (7) ifadesiyle elde edilebilir.

$$h_j = \left[1 - \frac{R}{\lambda_j H} \tanh \left(\frac{\lambda_j}{2} \frac{H}{R} \right) \right] H \quad (7)$$

Tank duvarına herhangi bir t anında etkiyen taban kesme kuvveti impulsif ve konvektif bileşenlerin toplamı olarak (8) ifadesinde verilmiştir.

$$Q(t) = m_0 \ddot{x}_s(t) + \sum_{j=1}^{\infty} m_j A_j(t) \quad (8)$$

$A_j(t)$, j . konvektif kütle sine etkiyen ivmenin zaman içerisindeki değişimini vermektedir (9).

$$A_j(t) = \omega_j \int_0^t \ddot{x}_s(\tau) \sin[\omega_j(t-\tau)] d\tau \quad (9)$$

Taban kesme kuvvetinin maksimum değeri impulsif taban kesme kuvvetinin maksimum değeriyle konvektif modların maksimumlarının karelerinin toplamının karekökünün toplanmasıyla bulunabilir (10). Bu ifadede $\ddot{x}_{s,\max}$, tank tabanına etkiyen maksimum ivmeyi ve A_j ise $A_j(t)$ 'nin maksimum değerini temsil etmektedir.

$$Q_{\max} = m_0 \ddot{x}_{s,\max} + \sqrt{\sum_{j=1}^{\infty} [m_j A_j]^2} \quad (10)$$

Tank duvarına herhangi bir t anında etkiyen moment, impulsif ve konvektif bileşenlerin toplamı olarak (11) ifadesinde verilmiştir.

$$M(t) = m_0 h_0 \ddot{x}_s(t) + \sum_{j=1}^{\infty} m_j h_j A_j(t) \quad (11)$$

Tank duvarına ve temeline etkiyen maksimum moment değeri (12) ifadesiyle hesaplanabilir.

$$M_{\max} = m_0 h_0 \ddot{x}_{s,\max} + \sqrt{\sum_{j=1}^{\infty} (m_j h_j A_j)^2} \quad (12)$$

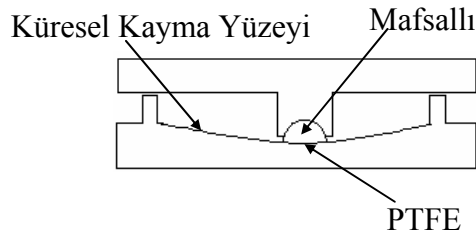
Tank içerisinde muhafaza edilen sıvının çalkalanma nedeniyle dışarı taşmasını engellemek amacıyla serbest sıvı yüzeyi ile tank duvarının en yüksek noktası

arasında bir emniyet payı bırakılmaktadır. Bu emniyet payı (13) ifadesiyle hesaplanabilir.

$$d_{\max} = R \sqrt{\sum_{j=1}^{\infty} \left(\frac{2}{\lambda_j^2 - 1} \frac{A_j}{g} \right)^2} \quad (13)$$

3. Sürtünmeli Sarkaç Sistemi

Sürtünmeli sarkaç mesnetleri, küresel çelik bir yüzey üzerinde hareket eden mafsallı bir kayıcıdan oluşmaktadır (Şekil 3). Mafsallı kayıcı, küresel yüzey üzerinde hareket ettikçe taşınan kütle yükselmekte ve yerçekiminin etkisiyle geri gelmektedir. Mafsallı kayıcının altında bulunan PTFE tabaka ile paslanmaz çelik içbükey yüzey arasında oluşan sürtünme sayesinde yapıya iletilen enerjinin bir kısmı sönmölenmektedir.



Şekil 3. Sürtünmeli Sarkaç Mesnetinin Kesiti

Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinde oluşan geri-döndürücü kuvvet (14) ifadesiyle hesaplanabilir.

$$F_{fps} = \frac{W}{R_{fps}} x_b + \mu W Z \quad (14)$$

Yukarıdaki ifadede, R_{fps} sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin eğrilik yarıçapını, x_b mesnetin yatay deplasmanını, W mesnede etkiyen düşey kuvveti ve μ ise PTFE kompozit ile çelik kayma yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısıdır. Z boyutsuz histeretik değişkeninin değeri (15)'de verilen Bouc-Wen modeli [33] ile elde edilebilir.

$$Y\dot{Z} + \gamma|\dot{u}|Z|Z|^{\eta-1} + \beta\dot{u}|Z|^{\eta} - A\dot{u} = 0 \quad (15)$$

Bouc-Wen ifadesinde β, γ, A ve η boyutsuz katsayılarıdır ve histeretik çevrimin şeklini tanımlamakta kullanılmaktadır. Y ise bir deplasman büyüklüğüdür. $A = 1$ ve $\beta + \gamma = 1$ olduğunda Y mesnedin akma şekil değiştirmesini göstermektedir. $\eta = 2$, $A = 1$ ve $\beta + \gamma = 1$ ($\gamma = 0.9$, $\beta = 0.1$) olması durumunda, deneysel sonuçlara yakın histeretik çevrimlerinin elde edildiği görölmüşdür [34].

4. Sismik Yalıtımlı Yükseltilmiş Sıvı Tankının Hareket İfadeleri

Sabit tabanlı yükseltilmiş sıvı tankının hareket denklemi bağıl yer değiştirmeler cinsinden (16) ifadesinde verilmiştir [31].

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = -[m]\{r\}\ddot{u}_g \quad (16)$$

Bu hareket ifadesinde, kütle sönüm ve rijitlik matrisleri (17)'de, bağıl yer değiştirmeler ve etki vektörü (21)'de verilmiştir.

$$[m] = \begin{bmatrix} m_3 & 0 & 0 & m_3 \\ 0 & m_2 & 0 & m_2 \\ 0 & 0 & m_1 & m_1 \\ m_3 & m_2 & m_1 & M + m_s \end{bmatrix} \quad [c] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_s \end{bmatrix} \quad [k] = \begin{bmatrix} k_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_s \end{bmatrix} \quad (17)$$

Yukarıdaki ifadede, M toplam sıvı kütlelerini (18) temsil etmektedir. Tankı taşıyan yapının rijitliği ve sönümü sırasıyla k_s (19) ve c_s (20) ile gösterilmektedir.

$$M = m_0 + m_1 + m_2 + m_3 \quad (18)$$

$$k_s = \left(\frac{2\pi}{T_s} \right)^2 (M + m_s) \quad (19)$$

$$c_s = 2\xi_s (M + m_s) \omega_s \quad (20)$$

Sistemin bağıl yer değiştirme ve etki matrisleri (21)'de verilmiştir.

$$\{x\} = \begin{Bmatrix} u_3 - u_s \\ u_2 - u_s \\ u_1 - u_s \\ u_s - u_g \end{Bmatrix} \quad \{r\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (21)$$

Sismik yalıtımlı yükseltilmiş sıvı tankının hareket denklemi bağıl yer değiştirmeler cinsinden (20) ifadesinde verilmiştir [32]. Sisteme ait kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri sırasıyla (21), (22) ve (23) ifadeleriyle verilmiştir. Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin toplam rijitliği k_b , (24) ifadesiyle verilmiştir. Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinde oluşan toplam geri döndürücü kuvvetin histeretik bileşeni ise F (25) ifadesinde verilmiştir. Sistemin bağıl yer değiştirme ve etki matrisleri sırasıyla (26) ve (27) ifadeleriyle verilmiştir.

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} + \{F\} = -[m]\{r\}\ddot{u}_g \quad (20)$$

$$[m] = \begin{bmatrix} m_3 & 0 & 0 & m_3 & m_3 \\ 0 & m_2 & 0 & m_2 & m_2 \\ 0 & 0 & m_1 & m_1 & m_1 \\ m_3 & m_2 & m_1 & M + m_s & M + m_s \\ m_3 & m_2 & m_1 & M + m_s & M + m_s + m_b \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$[c] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_b \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_b \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$k_b = \frac{W}{R} \quad (24)$$

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \mu WZ \end{Bmatrix} \quad (25)$$

$$\{x\} = \begin{Bmatrix} u_3 - u_s \\ u_2 - u_s \\ u_1 - u_s \\ u_s - u_b \\ u_b - u_g \end{Bmatrix} \quad (26)$$

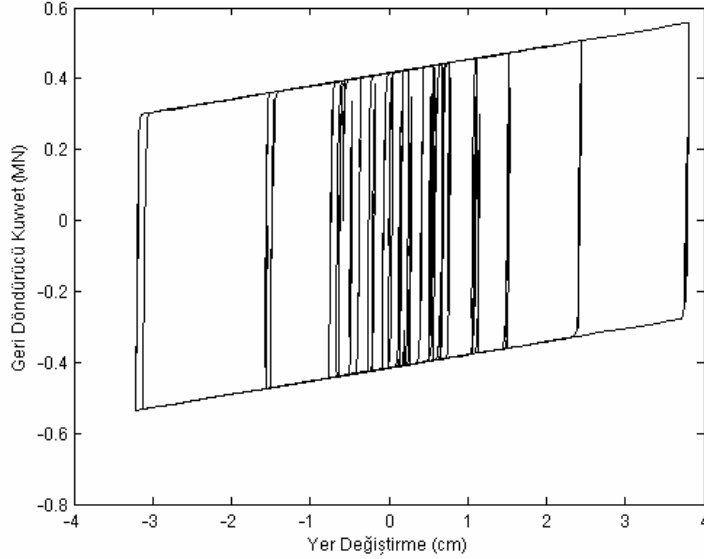
$$[r] = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (27)$$

5. Sayısal Uygulama

Sayısal uygulama olarak çapı 6 m ve sıvı yüksekliği 6 m olan bir yükseltilmiş su deposu sabit tabanlı ve sismik yalıtımlı olarak analiz edilmiştir. Analizde El-Centro 1940 Kuzey-Güney ivme kaydı kullanılmıştır. Sismik yalıtım sisteminde kullanılan sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin periyodu 3s ve sürtünme katsayısı 0.05 olarak alınmıştır. Yükseltilmiş sıvı tankını taşıyan yapı sisteminin yanal rijitliği (19) ifadesiyle hesaplanmıştır. Titreşim periyodunun değeri tipik tank tasarımları incelenerek 1 s olarak kabul edilmiştir [30,32]. Yapı sisteminin sönüm oranı ise %2 olarak alınmıştır. Aynı incelemede yapı sisteminin kütlelerinin sıvı kütlelerinin yaklaşık %10'u kadar olduğu ve sismik yalıtım sistemi üzerinde bulunan m_b kütlelerinin sıvı kütlelerinin yaklaşık %15'i kadar olduğu kabul edilmiştir. Analizde tankı taşıyan

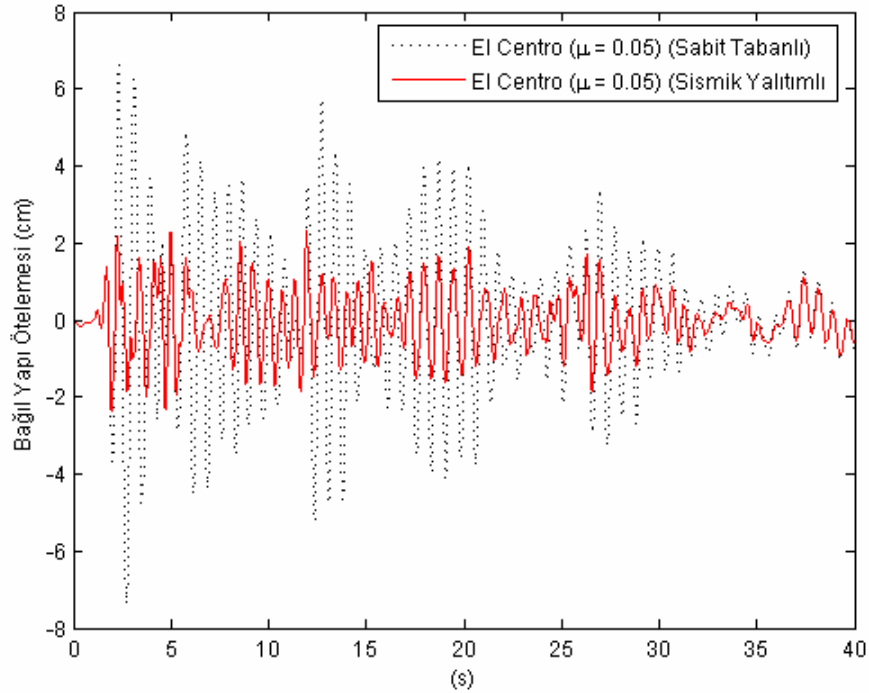
yapının kütesinin ve %75'i x_s ve geri kalan %25'i ise x_b serbestlik derecesine dağıtılmıştır [30].

Ele alınan tank tipi ve deprem kaydı için sismik yalıtıcıların yer değiştirmelerinin ± 4 cm içerisinde kaldığı Şekil 4'de görülmektedir. Sismik yalıtım düzleminde ortaya çıkabilecek büyük yer değiştirmeler sürtünme artırılarak veya sisteme viskoz sönümleyiciler ekleyerek sınırlandırılabilir.

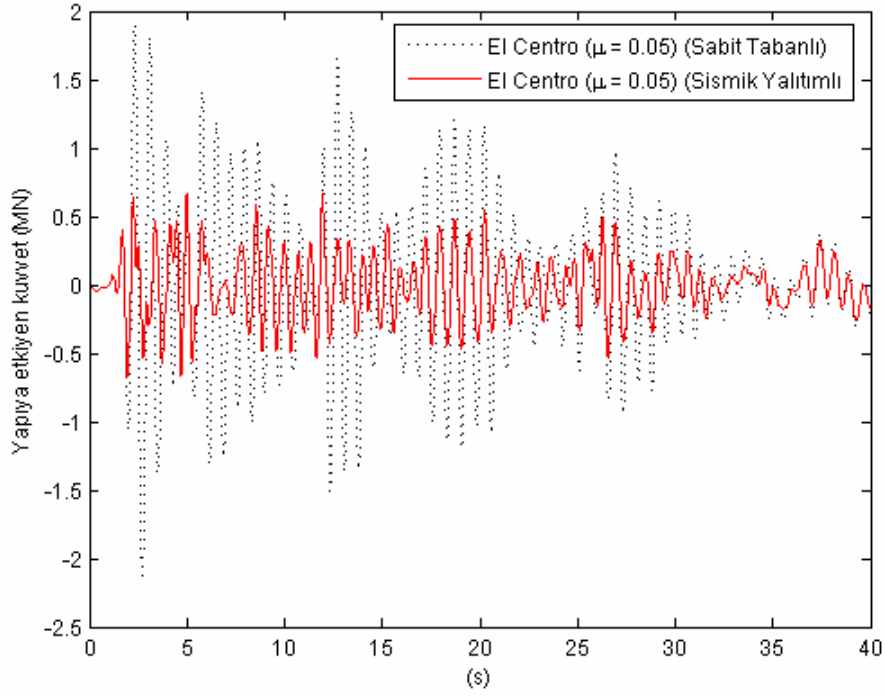


Şekil 4. Sismik Yalıtım Sisteminin Kuvvet-Yer Değişirme Grafiği

Burada başka bir önemli nokta da yer değiştirmelerin sismik yalıtım düzleminde yoğunlaştığıdır. Tankı taşıyan yapıda oluşan bağıl öteleme ve kuvvet değerlerinin maksimumlarının yaklaşık 4 misli azaldığı sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da görülmektedir.

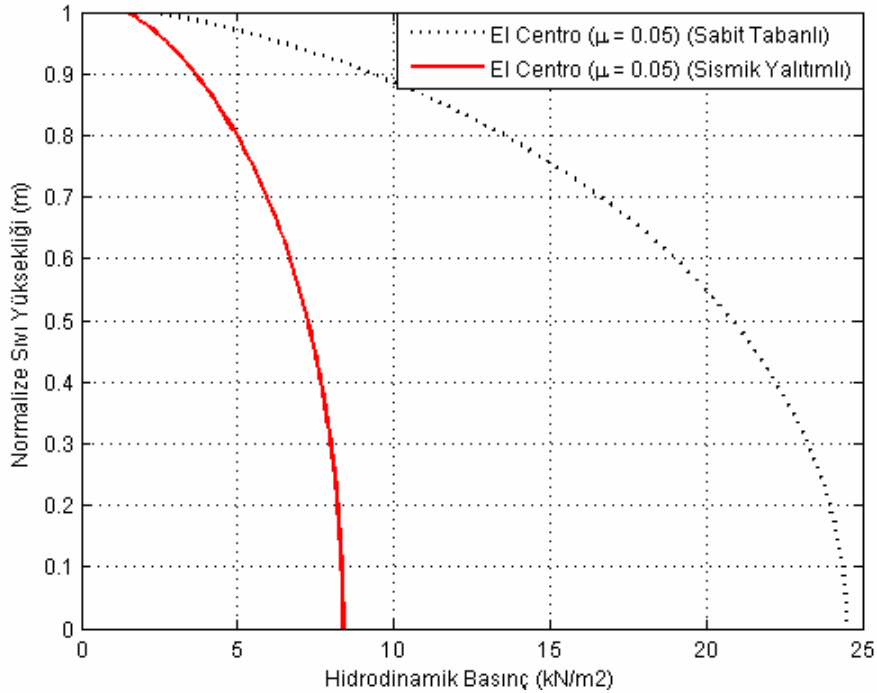


Şekil 5. Bağıl Yapı Ötelemesi ($u_s - u_b$)



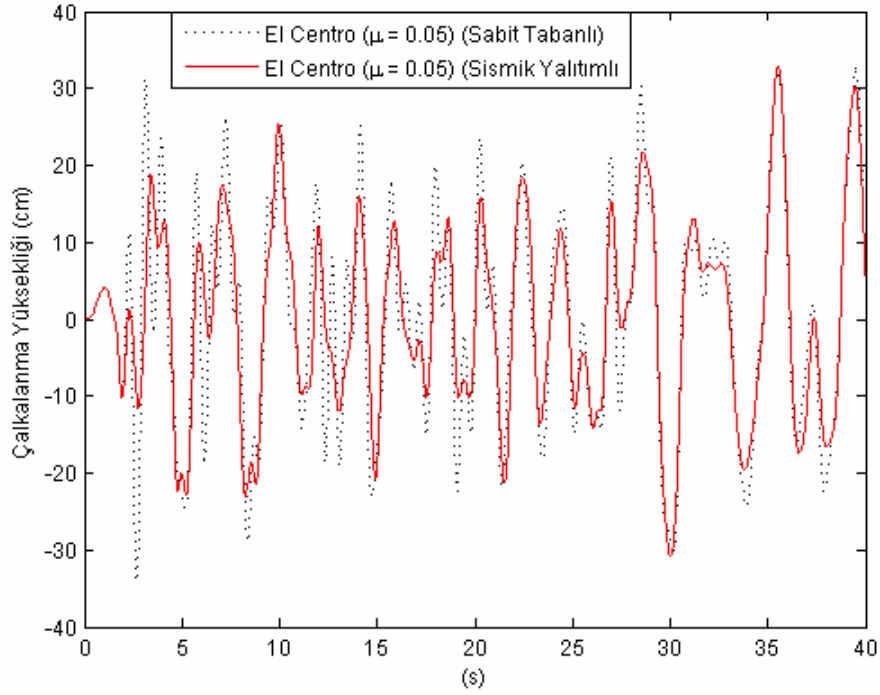
Şekil 6. Tankı Taşıyan Yapıya Etkiyen Kuvvet

Tank içerisinde oluşan hidrodinamik basınç, tank duvarında burkulmaların oluşmasına yol açabilmektedir. Taban hareketi sonucu tank duvarına etkiyen hidrodinamik basıncın da sismik yalıtım uygulamasıyla yaklaşık 3 misli azaldığı Şekil 7’de görülmektedir.



Şekil 7. Tank Duvarında Oluşan Maksimum Hidrodinamik Basınç Dağılımı

Tank tasarımında bir başka önemli parametre de çalkalanma yüksekliğidir. Ele alınan tank tipinde çalkalanma yüksekliğinde önemli bir değişim gözlenmemiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Çalkalanma Yüksekliğinin Zamana Göre Değişimi

Sonuçlar

Bu çalışmada sismik yalıtım sisteminin yükseltilmiş sıvı tanklarına etkiyen yüklerin azaltılmasında kullanılabileceği görülmektedir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken birkaç faktör bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, sismik yalıtım düzleminde oluşan yer değiştirmelere adapte olabilecek esnek boru bağlantılarının teşkil edilmesidir. Diğer bir konu da sismik yalıtım sistemi tasarımında ele alınan sürtünme katsayısının kirlenme ve korozyon gibi nedenlerden dolayı zamanla artabileceği göz önünde bulundurulmasıdır. Tasarımda göz önüne alınacak hidrodynamic etkiler sürtünme katsayısının maksimum ve minimum değerleri hesaplanmalıdır. Taşıyıcı sistem yüksekliğinin taban açıklığına olan oranının yüksek olması durumunda, sismik yalıtıcıların yerinden kalkma durumu detaylı olarak incelenmeli ve gerekli önlemler alınmalıdır. Yine bu tip tanklarda devrilme momenti etkisiyle sismik yalıtım sistemi elemanlarına gelen ek yükler hesaplanmalı ve gerekiyorsa sürtünme katsayısının düşey yükteki artışa bağlı olarak değişimi modele eklenmelidir.

Kaynaklar

- [1] Liu, H., Schubert, D.H., Yang, Z., and Lang, R., Comparative study of linear-elastic and nonlinear-inelastic seismic responses of fluid-tank systems, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, August 1-6, 1996.
- [2] Steinbrugge, K.V., and Rodrigo, F.A., The Chilean Earthquakes of May 1960: A Structural Engineering Viewpoint, Bulletin of the Seismological Society of America, 53, 225–307, 1963.
- [3] Hanson, R. D., “Behavior of liquid-storage tanks, the Great Alaska Earthquake of 1964.” National Academy of Science, Washington, D. C., 7, 331-339, 1973.

- [4] Niwa, A., and Clough, R.W., Buckling of Cylindrical Liquid Storage Tanks Under Earthquake Loading, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10, 107–122, 1982.
- [5] Haroun, M.A., Behavior of Unanchored Oil Storage Tanks: Imperial Valley Earthquake, *Journal of Technical Councils of ASCE*, 109(1), 23-40, 1983.
- [6] Manos, G.C., and Clough, R.W., Tank Damage During the 1983 Coalinga Earthquake, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 13, 449–466, 1985.
- [7] Nielsen, R., and Kiremidjian, A.S., Damage to Oil Refineries from Major Earthquakes, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 112, 1481-1491, 1986.
- [8] Wyllie, L.A., Bolt, B., Durkin, M.E., Gates, J.H., McCormick, D., Smith, P.D., Abrahamson, N., Castro, G., Escalante, L., Luft, R., Olson, R.S. and Vallenias, J., The Chile Earthquake of March 3, 1985, *Earthquake Spectra*, 2(2), Chapter 5, pp. 373-409, 1986.
- [9] Manos, G.C., Evaluation of the Earthquake Performance of Anchored Wine Tanks During the San Juan Argentina 1977 Earthquake, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 20, 1099-1114, 1991.
- [10] Hamada, M., The 1999 Kocaeli earthquake, Turkey: investigation into damage to civil engineering structures, Reconnaissance Team Report, Japanese Society of Civil Engineers, 1999.
- [11] Sezen, H., and Whittaker, A.S., Seismic Performance of Industrial Facilities Affected by 1999 Turkey Earthquake, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 20(1), 28–36, 2006.
- [12] Jaiswal, O.R., Rai, D.C., and Jain, S.K., Review of code provisions on design seismic forces for liquid storage tanks, Report No. IITK-GSDMA-EQ-01-V1.0, Indian Institute of Technology Kanpur, India, 2004.
- [13] Housner, G.W., The dynamic behavior of water tanks, *Bulletin of Seismological Society of America*, 53, 381-387, 1963.
- [14] Haroun, M.A., and Housner, G.W., Seismic design of liquid-storage tanks, *Journal of Technical Councils*, ASCE, 107, 191-207, 1981.
- [15] Veletsos, A.S., 1984. Seismic response and design of liquid storage tanks, *Proceedings of Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems*, ASCE, New York, 255-370 and 443-461.
- [16] Veletsos, A.S., and Tang, Y., 1992. Dynamic response of flexibly supported liquid storage tanks, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 118, 264-283.
- [17] Eurocode 8, Design provisions of earthquake resistance of structures, Part 4: Silos, tanks and pipelines. European Committee for Standardization, Brussels, 1998.
- [18] Malhotra, P.K., and Veletsos, A.S., Uplifting response of unanchored liquid storage tanks, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 120, Issue 12, pp. 3525-3547, 1994.
- [19] Veletsos, A.S. and Younan, A.H., Dynamics of Solid-Containing Tanks. I: Flexible Tanks, *ASCE J. Struct. Engrg.*, Volume 124, Issue 1, pp. 52-61, 1998.
- [20] Veletsos, A.S. and Younan, A.H., Dynamics of Solid-Containing Tanks. II: Flexible Tanks, *ASCE J. Struct. Engrg.*, Volume 124, Issue 1, pp. 62-70, 1998.
- [21] Ibrahim, R.A., *Liquid Sloshing Dynamics: Theory and Applications*, Cambridge University Press, 970 pp, 2005.

- [22] Kelly, J.M., "Base Isolation: Origins and Development". National Information Service for Earthquake Engineering (NISEE) Website. 25 March, 2004.
- [23] Naeim, F., and Kelly, J.M., Design of seismic isolated structures: From theory to practice, Wiley, New York, 1999.
- [24] Skinner, R.I., Robinson, W.H., and McVerry, G.H., An introduction to seismic isolation, Wiley, Chichester, England, 1993.
- [25] Chalhoub, M.S., and Kelly, J.M., Shake table test of cylindrical water tanks in base isolated structures, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 116, 1451-1472, 1990.
- [26] Zayas, V.A., and Low, D.S., Application of seismic isolation to industrial tanks, Proceedings of the ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference, Honolulu, Hawaii, USA, July 23-27, 273-284, 1995.
- [27] Malhotra, P.K., Method for seismic base isolation of liquid storage tanks, Journal of Structural Engineering, ASCE, 123, 113-116, 1997a.
- [28] Malhotra, P.K., New method for seismic isolation of liquid storage tanks, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 26, 839-847, 1997b.
- [29] Malhotra, P.K., Seismic strengthening of liquid storage tanks with energy-dissipating anchors, Journal of Structural Engineering, ASCE, 124, 405-414, 1998.
- [30] Shenton, H.W., and Hampton, H.P., Seismic Response of Isolated Elevated Water Tanks, Journal of Structural Engineering, Journal of Structural Engineering, ASCE, 125, 965-976, 1999.
- [31] Shirmali, M.K., and Jangid, R.S., Earthquake response of isolated elevated liquid storage steel tanks, Journal of Constructional Steel Research, 59(10), 1267-1288, 2003.
- [32] Shirmali, M.K., and Jangid, R.S., The seismic response of elevated liquid storage tanks isolated by lead-rubber bearings, Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 36(3), 141-164, 2003.
- [33] Wen, Y.K., Method of random vibration of hysteretic system, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 102, 249-263, 1976.
- [34] Constantinou, M.C., Mokha, A., and Reinhorn, A.M., Teflon bearings in base isolation II: Modelling. Journal of Structural Engineering, ASCE, 116, 455-474, 1990.

DÜZLEM ÇELİK ÇERÇEVELERİN DOĞRUSAL OLMAYAN DİNAMİK ANALİZİ

M. Aydın Kömür, Mustafa Sönmez
Aksaray Üniversitesi, İnşaat Müh. Böl., 68100, Aksaray

Özet

Bu çalışmada, düzlem çelik çerçeve sistemlerin doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizleri yapılarak performansları değerlendirilmiştir. Bu amaçla 3 katlı- 4 açıklıklı ve 9 katlı-4 açıklıklı olarak tasarlanmış olan iki çerçeve sistem kullanılmıştır. Marmara ve düzce depremlerinin doğu-batı ve kuzey-güney bileşenleri olmak üzere toplam 4 ivme kaydından yararlanılmıştır. Analizler Ruaumoko bilgisayar programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar FEMA 356 da katlar arası göreceli yerdeğiştirme oranlarına göre tanımlanan performans seviyeleri ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Doğrusal Olmayan Davranış, Dinamik Analiz, Göreceli Yerdeğiştirme Oranı, Performans Seviyesi

1. Giriş

Bugün inşaat mühendisliğinde kullanılan birden fazla yapıım sistemi vardır. Bu sistemlerin hangisinin kullanılacağıında ekonomi, malzeme ve eğitim gibi faktörler etkili olmaktadır. Ülkemiz tasarımcıları alışkanlıklarında etkisinde kalarak seçim yapmakta ve daha çok deneyime ve bilgiye sahip olduklarını düşündükleri betonarme iskeletli sisteme yönelmektedirler. Yüzölçümünün büyük bir kısmı deprem tehdidi altında bulunan Türkiye’de 1999 yılında iki büyük deprem meydana gelmiştir. 17 ağustos ve 12 kasımda meydana gelen bu depremlerden edinilen acı tecrübeler ışığında çelik taşıyıcı sistemin kullanımı gündeme gelmiş ve betonarmeye alternatif bir sistem olarak ülkemiz koşullarındaki kullanımı sorgulanmaya başlamıştır [1].

Çelik üretiminde Türkiye dünyada ön sıralarda yerini almasına rağmen, bu üretim potansiyeli inşaat sektörüne aynı düzeyde yansımamaktadır [2]. Ülkemizdeki “Çelik İnşaat” ın toplam inşaat yüzölçümü içindeki payı, yaklaşık olarak %5 civarındadır. Bu oranın büyük bölümünü endüstri yapıları, büyük açıklıklı çatılar ve köprüler oluşturmaktadır. Çok katlı çelik yapı uygulamalar ise yok denecek kadar azdır. Uygulamadaki bu durum, çoğu kez çelik iskeletli yapıların betonarme iskeletli yapılara göre daha pahalı bir maliyette olmaları ile açıklanmaya çalışılır. Bu gerekçe, sıradan betonarme yapılar için kabul edilebilirse de, özellikle depreme dayanıklı olarak projelendirilen ve her bakımdan çok sıkı bir denetim ile projesine uygun olarak inşa edilen betonarme bir yapının da, çelik bir yapı kadar maliyetli olduğunu unutmamak gerekir[3].

Bu çalışmada literatürden alınmış iki farklı düzlem çelik çerçeve sistemin, ülkemizde 1999 yılında meydana gelmiş bulunan iki büyük depremdeki davranışları incelenmiştir. Yapı davranışının belirlenmesinde; doğrusal olmayan zaman tanım

alanında hesap yönteminden yararlanılmıştır. Çerçeve sistemlerin analizleri Ruaumoko[4] programı ile gerçekleştirilmiştir.

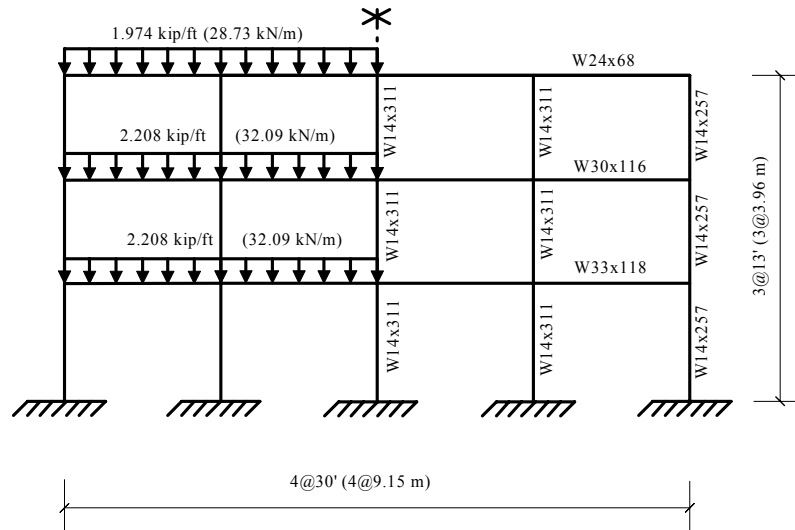
2. Doğrusal Olmayan Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi

Bu hesap yönteminde taşıyıcı sistemin deprem yükleri altındaki dinamik hareketi incelenir. Yöntemle, taşıyıcı sistemdeki doğrusal olmayan davranış gözönüne alınarak sistemin hareket denklemi artımsal olarak entegre edilir ve her bir zaman artımında sistemde meydana gelen yerdeğiştirme, plastik şekildeğiştirme ve iç kuvvetler ile bu büyüklüklerin deprem talebine karşı gelen maksimum değerleri hesaplanır. Söz konusu yöntemde, daha önce kaydedilen veya yapay yollarla üretilen benzeştirilmiş deprem yer hareketleri kullanılır.

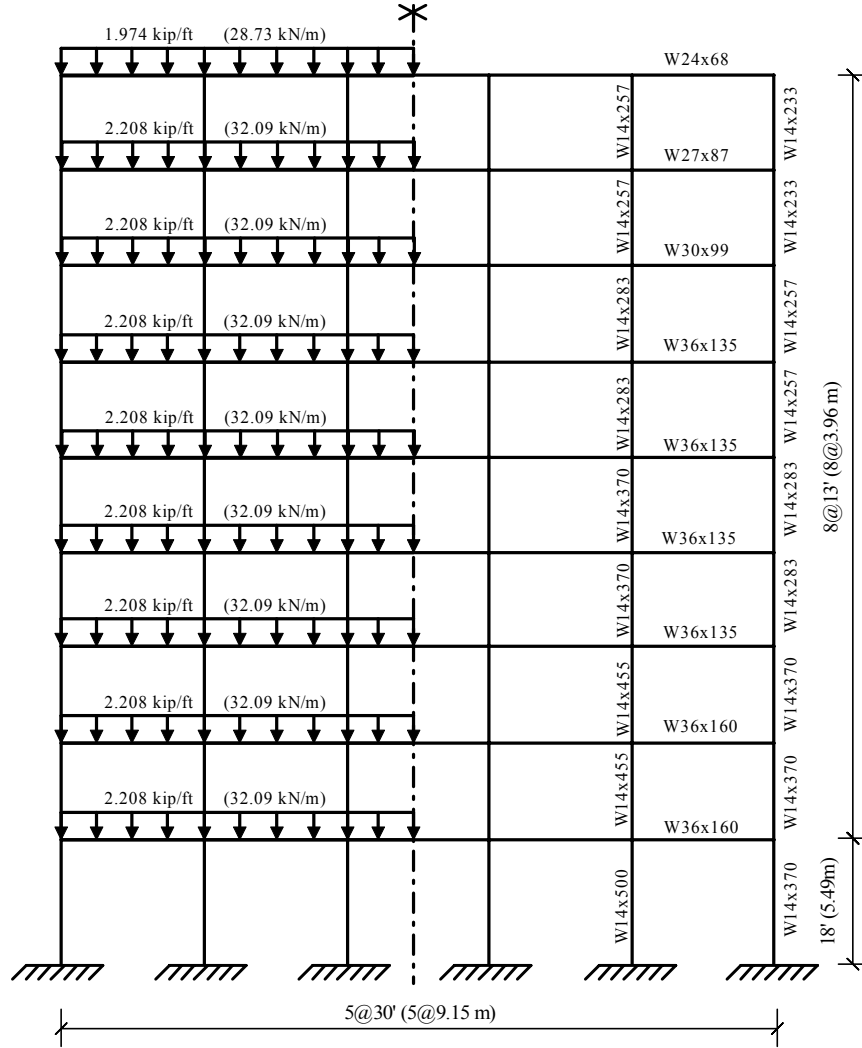
Doğrusal olmayan zaman tanım alanında hesap yöntemi yapı davranışını en gerçekçi şekilde belirleyebilen bir yöntem olup her türlü yapıya uygulanabilmektedir. Bu yöntem daha çok akademik düzeyde çalışma yapanlar tarafından tercih edilmektedir. Pratikte çalışan mühendisler söz konusu yöntemi karmaşıklığı ve pratik tasarım uygulamalarına uygun olmaması gibi sebeplerden dolayı uygulamamaktadırlar.

3. Çerçeve Sistemlerin Tanımlanması

Bu çalışmada, daha önce bazı araştırmacılar [5-6] tarafından çalışılan 3 katlı-4 açıklıklı ve 9 katlı-5 açıklıklı çelik çerçeve sistemler dikkate alınmıştır (Şekil 1-2). Söz konusu sistemler Uniform Building Code[7]' a göre tasarlanmıştır. Bütün kolonlar 50 ksi (345 MPa) çeliği ve kirişlerde ise 36 ksi (248 MPa) çeliği olarak tanımlanmıştır. Kolonlarda beklenen akma gerilmesi 57,6 ksi (397 MPa) ve kirişlerde ise 49,2



Şekil 1. Çalışmaya konu olan 3 katlı çelik çerçeve sistem.



Şekil 2. Çalışmaya konu olan 9 katlı çelik çerçeve sistem

ksi (339 MPa) olarak dikkate alınmıştır. Çerçeve sistemlerde bütün kolonlar güçlü eksenleri etrafında eğilmektedirler.

Çerçeve sistemlerin doğrusal olmayan dinamik analizleri Ruaumoko programı ile gerçekleştirilmiştir. Modellemede düğüm noktalarının rijit davrandığı kabul edilmiştir. Çerçeve sistemlerin her bir katı rijit diyagram olarak modellenmiştir. Böylece her bir kattaki düğüm noktalarının aynı yatay yerdeğiştirmeyi yaptığı kabul edilmiştir. Dinamik analizde kütle matrisi olarak yoğunlaştırılmış kütle matrisi modeli, sönüm olarak da Rayleigh sönümü kullanılmıştır. Zaman adım integrasyonu Newmark ın sabit ortalama ivme metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Kirişler, Gibersonun tek bileşenli kiriş modeli kullanılarak modellenmiştir. Bu modelde doğrusal olmayan davranış eleman uç kısımlarındaki dönel yaylarla sağlanmaktadır. Elemanın diğer kısımları elastik kabul edilmektedir. Yani eleman uçlarında plastik mafsallar oluşmaktadır. Mafsal rijitliği ise elasto-plastik histeresis kuralı ile temsil edilmektedir. Modellemede eleman uçlarında rijit bölgeler ve eksenel deformasyonlar dikkate alınmamıştır.

Kolonlar Ruaumoko da tanımlanan kiriş-kolon elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Bu elemanların kirişlerde olduğu gibi elasto-plastik davrandıkları

varsayılmıştır. Kolonların doğrusal olmayan özellikleri için eksenal kuvvet-moment karşılıklı etki diyagramından yararlanılmıştır. Bu diyagram her iki eksene göre simetriktr. Karşılıklı etki diyagramı için AISC-LRFD [8] de verilen denklemler kullanılmıştır.

$$\frac{P}{P_y} + \frac{8}{9} \frac{M}{M_p} \leq 1 \quad 0 \leq \frac{P}{P_y} \leq 0.2$$

$$\frac{1}{2} \frac{P}{P_y} + \frac{M}{M_p} \leq 1 \quad 0.2 < \frac{P}{P_y} \leq 1$$

Burada P/P_y eksenal yükün eksenal yük taşıma kapasitesine oranını, M/M_p ise momentin moment taşıma kapasitesine oranını göstermektedir.

4. Analiz Sonuçları

Bu çalışmada 3 ve 9 katlı çelik çerçeve sistemlerin Marmara ve Düzce depreminin doğu-batı ve kuzey-güney olmak üzere 4 farklı ivme kaydı için doğrusal olmayan dinamik analizleri yapılmıştır. Analizlerden elde edilen sonuçlar tablo 1 de verilmiştir. Ayrıca Marmara depreminin Yarımca istasyonu doğu-batı bileşeni için çerçeve sistemlerde taban kesme kuvvetinin tepe yerdeğiştirmesi ile değışimleri gösterilmiştir(Şekil 3).

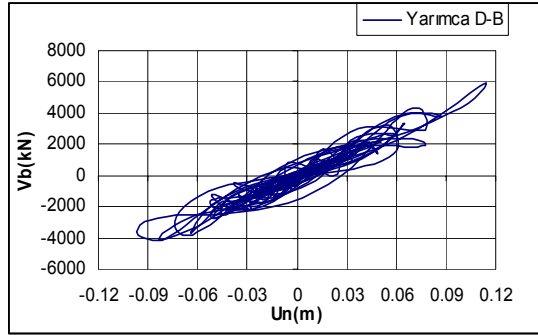
Burada elde edilen birinci moda ait doğal titreşim periyotları literatürde verilen değerlerden küçük çıkmıştır. Bunun nedeni, 3 katlı çerçeve sistemde tüm düğüm noktalarının rijit olarak modellenmesi, 9 katlı çerçeve sistemde ise bodrum katının dikkate alınmamasıdır.

Katlar arası görelı yerdeğıştirmelere bakıldığında 3 katlı çelik çerçeve sistemde, düzce depreminin doğu-batı bileşeni hariç maksimum görelı katlar arası yerdeğıştirmeler 2. katta meydana gelmiştir. Düzce depremi doğu-batı bileşeni kullanılarak yapılan analizde ise 3. katta gerçekleşmiştir. 9 katlı çerçeve sistemde maksimum görelı katlar arası yerdeğıştirme iki ivme kaydı için 1. katta, iki ivme kaydı içinse 8. katta gerçekleşmiştir. Gerek 3 katlı çerçeve sistemde gerekse 9 katlı çerçeve sistemde maksimum görelı katlar arası yerdeğıştirme Düzce depremi doğu-batı bileşeninden elde edilmiştir. Söz konusu ivme kaydının maksimum ivmesi(0.513g) diğır kayıtların maksimum ivmelerine göre daha büyüktür.

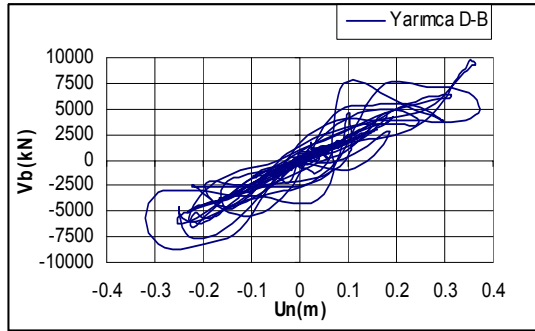
Tablo 1. 3 ve 9 katlı çerçeve sistemin analizinden elde edilen sonuçlar

Çerçeve Sistem	Deprem	İstasyon	MYİ(g)	$ V_b _{\max}$ (kN)	$ U_n _{\max}$ (cm)	$\delta_{\max}$ (cm)	T_1 (sn)
3 Katlı	Marmara (1999)	YarımcaD-B	0.230	5898.10	11.38	4.42 (2.kat)	0.912
		YarımcaK-G	0.322	5421.20	12.19	4.64 (2.kat)	
	Düzce (1999)	DüzceD-B	0.513	6795.10	19.39	8.08 (3. kat)	
		DüzceK-G	0.410	6607.40	15.74	6.53 (2.kat)	
9 Katlı	Marmara (1999)	YarımcaD-B	0.230	9791.30	37.19	7.26 (1.kat)	2.164
		YarımcaK-G	0.322	8211.40	35.81	5.24 (8.kat)	
	Düzce (1999)	Düzce D-B	0.513	9846.90	51.42	9.60 (1.kat)	
		Düzce K-G	0.410	9880.90	37.77	7.09 (8. kat)	

MYİ: Maksimum yer ivmesi V_b : Taban kesme kuvveti U_n : Tepe yerdeğiştirmesi δ : Göreli katlararası yerdeğiştirme



(a) 3 katlı çerçeve sistem



(b) 9 katlı çerçeve sistem

Şekil 3. Taban kesme kuvvetinin Tepe yerdeğiştirmesi ile değişimi

FEMA 356[9] dokümanında katlar arası göreli yerdeğiştirmelere bağlı olarak birkaç performans seviyesi tanımlanmıştır. Bu dokümanda; can güvenliği ve göçmenin önlenmesi gibi performans seviyeleri sırasıyla % 2.5 ve % 5 lik katlar arası göreli yerdeğiştirme oranı ile sınırlandırılmıştır. Çalışmaya konu olan çerçeve sistemlerde katlararası göreli yerdeğiştirme 9.9 cm ye karşılık gelmektedir. Dolayısı ile çerçeve sistemler tüm deprem kayıtları için can güvenliği performans seviyesinde kalmıştır.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada 3 katlı-4 açıklıklı ve 9 katlı- 5 açıklıklı elik düzlem ereve sistemin Marmara ve düzce depremleri için doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizleri yapılmıştır. Her iki ereve sistemin tüm deprem kayıtları için FEMA 356 da verilen can güvenliği performans seviyesini aşmadığı belirlenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Işık, B., Hafıf elik Yapıların Geleneksel Yapılar ile Benzerlikleri, <http://www.tucsa.org.tr>,2001.
- [2] Yıllık Rapor, Demir elik reticileri Derneği, Ankara, 2002.
- [3] Yardımcı, N., TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı, 435, 2005.
- [4] Carr, A., Ruaumoko, Software for Inelastic Dynamic Analysis. Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand, 2000.
- [5] Gupta, A. ve Krawinkler, H., Behaviour of Ductile SMRFs at Various Seismic Hazard Levels, Journal of Structural Engineering, Vol. 126, No. 1, pp. 98-106, 2000.
- [6] Hasan, R., Xu, L. ve Grierson, D.E., Push-over analysis for performance-based seismic design, Computers and Structures, Vol. 80, pp. 2483-2493, 2002.
- [7] UBC, Structural Engineering Design Provisions, Uniform Building Code, vol. 2. International Building Officials, 1994.
- [8] American Institute of Steel Construction Manuel of Steel Construction, Load & Resistance Factor Design, Vol. 1, Second Ed. USA, 1995.
- [9] FEMA-356, Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, U.S.A, 2000.

UZAY KAFES ÇELİK SİSTEMLERİN STOKASTİK SONLU ELEMAN ANALİZİ

Alemdar BAYRAKTAR¹, Özlem ÇAVDAR², Hasan Basri BAŞAĞA¹, Ahmet ÇAVDAR²

¹KTÜ, Müh. Fak., İnşaat Müh. Böl., Trabzon

²KTÜ, Gümüşhane Müh. Fak., İnş. Müh. Böl., Gümüşhane

Özet

Bu çalışmada uzay çelik bir kulenin stokastik ve deterministik analizi gerçekleştirilmiştir. Analitik analizlerde sonlu elemanlar yöntemine dayalı Perturbation yöntemi ile sayısal bir hesaplama yapan Monte Carlo Simülasyon (MCS) yöntemi kullanılmakta ve bu iki yöntemin formülasyonu genel hatlarıyla verilmektedir. Uzay kafes çelik sistem örneği üzerinde rastgele değişken olarak elastisite modülü ve kesit alanı alınarak, farklı yükleme durumları (düşey, yatay ve bileşik) için ayrı ayrı stokastik ve deterministik analizler gerçekleştirilmiştir. Stokastik analiz sonuçları, Perturbation yöntemi için FORTRAN tabanlı bilgisayar programı kullanılarak; Monte Carlo yöntemi için ise yine FORTRAN dilinde yazılan ayrı bir program ile elde edilmiştir. Sonuçlara göre, değişim katsayısının (COV) %10-15 değerlerine kadar olan durumlarda, Perturbation yönteminden elde edilen değerlerin Monte Carlo yönteminden elde edilen sonuçlara çok yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca, COV değerinin artmasının, deterministik sonuçlar ile stokastik sonuçlar arasındaki farkı arttırdığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Stokastik sonlu elemanlar yöntemi, Monte Carlo yöntemi, uzay kafes, Perturbation yöntemi.

1. Giriş

Geleneksel yapısal çözümleme bir yapının geometrik yerleşimi ve malzeme özelliklerinin belirli olduğu varsayımı esas alınarak yapılmaktadır. Ancak tasarım değerlerinin kesin olarak belirlenememesinden dolayı yapıdan beklenen davranış ile yapının gösterdiği davranış arasında farklılıklar ortaya çıkmaktadır. 1960'lı yıllara kadar benimsenen yapısal kabullere, ilk olarak Soong ve Bogdanoff [1] gerçekleştirdikleri bir çalışmayla yeni bir bakış açısı kazandırarak; yapısal bir sistemin rastgele özellikleri olduğu kabulünü ortaya koymuşlardır. Belirsiz parametreler dikkate alınarak yapılan yapısal çözümlemelerde Perturbation ve Monte Carlo yöntemi olarak adlandırılan iki yöntem kullanılmaktadır. Perturbation yöntemi yapısal özelliklerdeki küçük istatistiksel değişimleri ele alarak problemin çözümüne gitmektedir. Monte Carlo yöntemi ise yapısal özelliklerdeki büyük istatistiksel değişimleri ele almaktadır. Her iki tekniğinde problemin doğasına bağlı olarak bazı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu yöntemler ve uygulama alanları hususunda birçok çalışma mevcut olup genellikle ele alınan problem her iki yöntemle göre çözümü gerçekleştirilip sonuçların doğruluğu mukayese edilmektedir.

Vanmarcke ve Grigoriu [2] basit bir kirişin stokastik sonlu eleman analizini gerçekleştirmiştir. Ikeda vd. [3] yaptıkları çalışmada malzeme ve yapıların dayanımlarındaki belirsizlik ve bu belirsizlik üzerinde dallanmanın etkisi üzerinde durmuşlardır. Çalışmalarında maksimum dayanımın olasılıklı değişimini ifade etmek için başlangıçtaki yetersizliğin stokastikliğinin teorisini bir yetersizlik duyarlılığı kuralı ile kullanmışlardır. Bu yöntemin uygulanabilirliğini gösterebilmek için de

geniş kapsamlı bir kafes kubbe örneğini analiz etmişlerdir. Perturbation yöntemini kullanarak Zhang ve Cheng [4] rastgele çözümlerin standart sapmalarının değerlendirilmesi için bir basit formülasyon türetmişlerdir.

Banik [5] Perturbation ve Monte Carlo yöntemini uzay kafes bir kuleye her iki metodun karışımından oluşan yöntemi ise deprem etkisine maruz kalan belirsiz rijitlikli çok katlı bir yapının dinamik analizini gerçekleştirmek için kullanmıştır. Çalışmanın sonucunda yapısal özelliklerdeki belirsizliklere bağlı olarak yapı davranışında önemli bir değişim olabileceği sonucuna varılmıştır. Doltsinis ve Kang [6] farklı sayıda çubuk elemanlardan oluşan kafes bir yapının stokastik analizini gerçekleştirmişlerdir. Çubuk elemanların kesit alanları ve elastisite modülü rastgele değişken olarak dikkate alınmıştır. Analizler sonucunda elde edilen veriler Monte Carlo yönteminden elde edilen sonuçlarla mukayese edilmiştir. Paola [7] ise düğüm noktalarına deterministik yükler etkileyen ve çeşitli elemanlarında belirsizlikler olan lineer elastik kafes sistemin olasılıklı tanımlamasına yeni bir yaklaşım getirmiştir. Allegri vd. [8] yaptıkları çalışmada uzay uygulamaları için büyük kompozit kafeslerin yapısal tepkisi üzerine mekanik belirsizliklerin etkilerini modellemek için bir karma teknik sunmuşlardır.

Bu çalışmada statik (yatay, düşey ve bileşik) yükler altındaki uzay kafes çelik sistemine sahip bir yapının çözümlemeleri, deterministik ve stokastik sonlu eleman yöntemlerine göre FORTRAN esaslı bir bilgisayar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çubuk kesit alanı (A) ve elastisite modülü (E) rastgele değişken olarak seçilerek her bir değişkene göre ayrı ayrı stokastik statik analizleri yapılmıştır. Perturbation ve Monte Carlo yöntemleriyle elde edilen sonuçlar birbirleriyle ve deterministik sonuçlarla karşılaştırılmaktadır.

1.1. Stokastik Sonlu Elemanlar Yöntemi

Değişken sistem parametreleriyle, olasılıklı çözümleme yapma yöntemlerinden biri olan stokastik sonlu elemanlar yöntemi, değişken özellikli yapıların tepki frekanslarını tahmin etmek için geliştirilmiştir. Stokastik sonlu elemanlar yöntemi, yapısal sistemdeki belirsizlikleri karşılamak için Perturbation tekniği veya kısmi türev yöntemi kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi formülasyonlarının değiştirilmesinden ibarettir. Temel değişkenler stokastik olduğu için deterministik analiz boyunca hesaplanan her nitelik ayrıca stokastiktir. Bu nedenle stokastik tepkileri elde etmek için, temel değişkenlerin stokastik değişimi açısından, deterministik analizin her adımındaki niceliklerin stokastik değişiminin hesaba katılması gerekmektedir. Bu temel fikir uygulaması basit gibi görünmesine rağmen bunu gerçekleştirmek oldukça güçtür. Çünkü temel değişkenler açısından değişik niceliklerin kısmi türevlerinin büyük matris toplanmaları gibi oldukça karışık hesaplar içermektedir. Bu eksiklikleri ortadan kaldırmak ve istenilen yöntemi elde etmek için stokastik sonlu elemanlarda iki yöntem kullanılmaktadır : (1) Perturbation yöntemi (2) Monte Carlo yöntemi.

1.1.1. Perturbation Yöntemi

Perturbation yöntemi belirsiz parametrelerle yapısal analizi gerçekleştirmek için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. 1960'lı yıllardan beri Perturbation yöntemi stokastik problemleri çözmek için etkili bir yöntem olarak belirlenmiştir.

Perturbation yöntemi ortalama değer parametrelerine göre davranışları, Taylor serileri açılımı açısından kütle matrislerini ve rijitlik matrisini hesaplamak için geliştirilmiş bir yöntemdir. Taylor serileri genellikle birinci derece için açıklanmıştır. Dolayısıyla bu yöntem birinci derece Perturbation yöntem olarak adlandırılmıştır.

Tek rastgele değişkenli sistemin statik davranışını tanımlayan Perturbation esaslı stokastik sonlu eleman denklemleri [9]:

$$\text{Sıfırıncı derece : } K_{\alpha\beta}^0(b_\ell^0)q_\beta^0(b_\ell^0) = Q_\alpha^0(b_\ell^0) \quad (1)$$

$$\text{Birinci derece : } K_{\alpha\beta}^0(b_\ell^0)q_\beta^{\cdot\rho}(b_\ell^0) = Q_\alpha^{\cdot\rho}(b_\ell^0) - K_{\alpha\beta}^{\cdot\rho}(b_\ell^0)q_\beta^0(b_\ell^0) \quad (2)$$

$$\text{İkinci derece : } K_{\alpha\beta}^0(b_\ell^0)q_\beta^{(2)}(b_\ell^0) = [Q_\alpha^{\cdot\rho\sigma}(b_\ell^0) - 2K_{\alpha\beta}^{\cdot\rho}(b_\ell^0)q_\beta^{\cdot\sigma}(b_\ell^0) - K_{\alpha\beta}^{\cdot\rho\sigma}(b_\ell^0)q_\beta^0(b_\ell^0)]S_b^{\rho\sigma} \quad (3)$$

Yukarıda verilen denklem takımında $\alpha = 1, 2, \dots, N$ ve $\rho = 1, 2, \dots, N^-$ olmak üzere; $q_\alpha^0(b_\ell^0)$, N lineer eşdeğer cebirsel denklemin bir sistemi (ϵ^0 terim), $q_\alpha^{\cdot\rho}(b_\ell^0)$, N lineer eşdeğer cebirsel denklemin N^- sistemleri (ϵ^1 terim) ve $q_\alpha^{(2)}(b_\ell^0)$, N lineer eşdeğer cebirsel denklemin bir sistemini (ϵ^2 terim) göstermekte ve

$$q_\alpha^{(2)}(b_\ell^0) = q_\alpha^{\cdot\rho\sigma}(b_\ell^0)S_b^{\rho\sigma} \quad (4)$$

ifadesine eşittir.

Burada $b_\ell^0, K_{\alpha\beta}^0, Q_\alpha^0, q_\beta^0$ ve $S_b^{\rho\sigma}$ sırasıyla; düğüm noktası rastgele değişkeni, rijitlik matrisi, yük vektörü, yerdeğiştirme ve düğüm noktası rastgele değişkenlerinin kovaryans matrisini ifade etmektedir.

1.1.2. Monte Carlo Yöntemi

Monte Carlo Yöntemi, herhangi bir fiziksel test yapmadan sayısal olarak sonuç üretmek amacıyla kullanılan özel bir tekniktir. Bu yöntem, X değişkenine ait olasılık yoğunluk fonksiyonuna göre üretilen bir grup rastgele değerlerle işlem yapmaktadır. Değişken için seçilen rastgele değerler $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}$ vektörü ile gösterilebilir. Burada N , simulasyon sayısını göstermektedir. Bu yöntemde, her bir X değeri için rijitlik ve kütle matrisleri oluşturulmakta ve yerdeğiştirme ve gerilme değerleri hesaplanmaktadır. N simulasyonun sonunda değişkene ait her bir rastgele değer için yerdeğiştirme ve gerilme vektörleri elde edilmektedir. $\{\{u\}_1, \{u\}_2, \{u\}_3, \dots, \{u\}_N\}$ yerdeğiştirme vektörlerini, $\{\{\sigma\}_1, \{\sigma\}_2, \{\sigma\}_3, \dots, \{\sigma\}_N\}$ gerilme vektörlerini göstermek üzere yerdeğiştirmenin ve gerilmenin beklenen değerleri (ortalama değerleri);

$$\mu_{\{u\}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{u\}_i \quad (5)$$

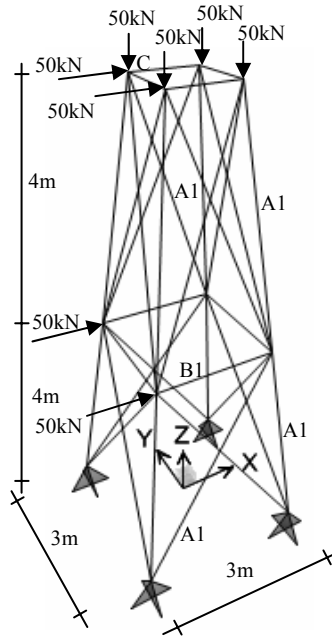
$$\mu_{\{\sigma\}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{\sigma\}_i \quad (6)$$

formülleri ile hesaplanmaktadır

2. Sayısal Uygulama

Bu çalışmada, statik yükler altındaki uzay kafes çelik sistemine sahip bir yapının çözümlmeleri deterministik ve stokastik sonlu eleman yöntemlerine göre gerçekleştirilmektedir. Bu amaçla örnek bir uzay kafes yapı seçilmiştir (Şekil 1). Stokastik analizde, uzay kafes sisteminin yerdeğiştirme ve kesit tesir (gerilme) değerleri, kesitin (A) ve malzeme özelliklerinin (E) farklı belirsizlikleri kullanılarak Perturbation ve Monte Carlo yöntemleriyle elde edilmektedir. Bu iki yöntemden elde edilen sonuçlar birbiriyle ve deterministik sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Uzay kafes sisteminin analizlerde kullanılan malzeme ve kesit özellikleri Tablo 1’de verilmektedir.

Perturbation yöntemine dayalı analizler, FORTRAN tabanlı bilgisayar programı kullanılarak; Monte Carlo yöntemine dayalı analizlerinde ise ayrı bir FORTRAN programı hazırlanarak gerçekleştirilmiştir. Her bir rastgele değişken için 5 farklı (0.05, 0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25) değişim katsayısına (COV) göre düşey yük, yatay yük ve hem yatay hem de düşey yük (bileşik yükleme hali) olmak üzere üç farklı yükleme durumu için sonuçlar elde edilmiştir. Mutlak değerce düğüm noktası en büyük yerdeğiştirme değerleri ve mutlak değerce en büyük kesit tesirleri (gerilme) Perturbation ve Monte Carlo yöntemi için grafiklerle ve tablolarla gösterilmekte ayrıca mukayeseleri sunulmaktadır. Monte Carlo yöntemi (MCS) 10000 simülasyon (örnekleme) sayısı için gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, MCS yönteminden elde edilen kesin sonuçlara göre yorumlanmıştır.



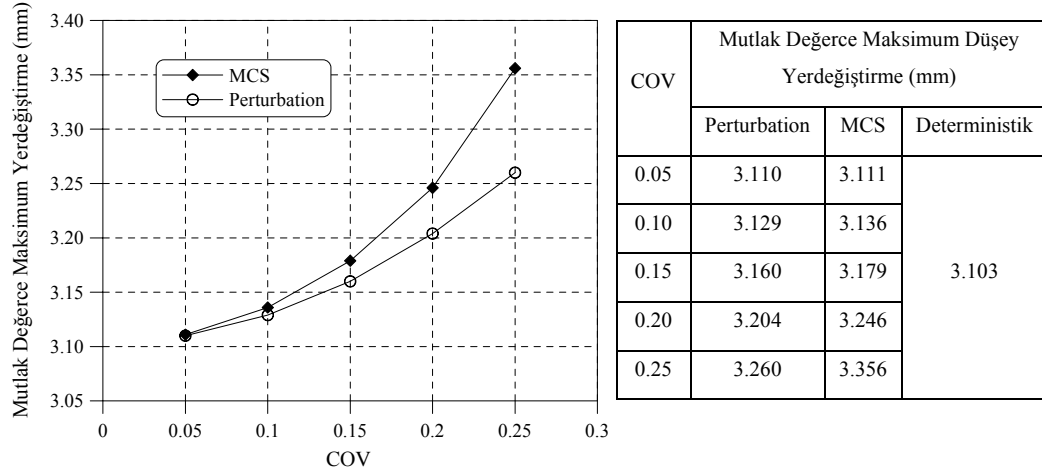
Şekil 1. Bileşik yük altında örnek uzay kafes çelik yapı ve kesit özellikleri

Tablo 1. Uzak Kafes Sistemin Çubuk Kesit ve Malzeme Özellikleri

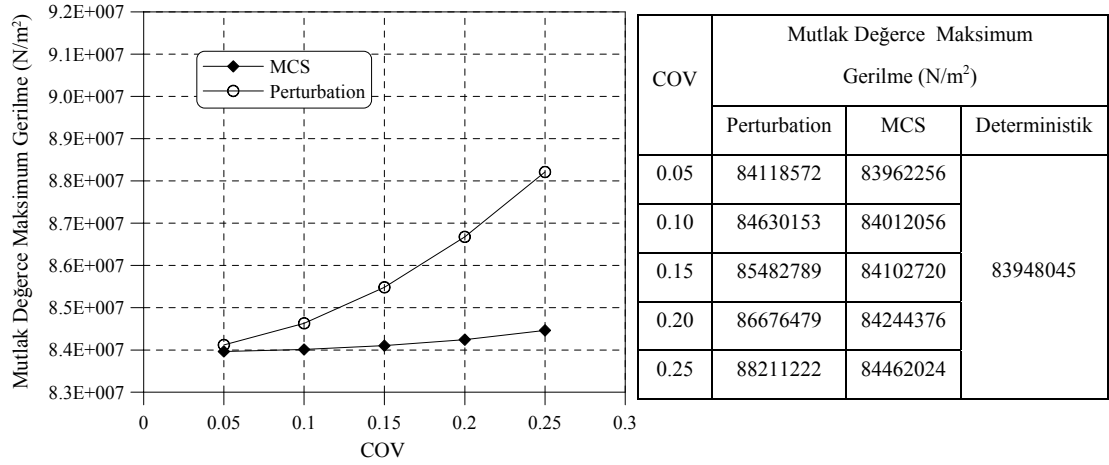
Çubuk grubu	Kesit	Kesit alanı	Elastisite Modülü	Birim Hacim Ağırlık
Alt düzeydeki köşe elemanlar	A ₁	$3.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	$2.0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$	78.60 kN/m^3
Üst düzeydeki köşe elemanlar		$3.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$		
Alt düzeydeki diyagonal elemanlar		$3.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$		
Üst düzeydeki diyagonal elemanlar		$3.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$		
Alt düzeydeki yatay elemanlar	B ₁	$1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$		
Üst düzeydeki yatay elemanlar	C ₁	$0.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$		

2.1. Düşey yükleme durumu

Şekil 2’de görüldüğü gibi düşey yükler etkisi altında gerçekleştirilen analizlerde elde edilen sonuçlara göre E’nin rastgele değişken olduğu durumda COV değeri büyüdükçe MCS ve Perturbation yönteminden elde edilen yerdeğiştirme değerleri birbirinden uzaklaşmaktadır. En fazla uzaklaşmanın meydana geldiği %25 COV değeri için, yerdeğiştirmelerde %2.8 lik bir sapma meydana gelmiştir. Ancak gerilme değerlerinde, yerdeğiştirme değerlerine göre daha az sapma oluşmuştur. En büyük farkın meydana geldiği yerde %1 oranında bir değişim görülmektedir (Şekil 3). İki stokastik yöntem deterministik yöntemle göre değerlendirildiğinde ise hem gerilme hem de yerdeğiştirme için deterministik yöntemden elde edilen değerler COV değeri büyüdükçe birbirinden uzaklaşmaktadır.

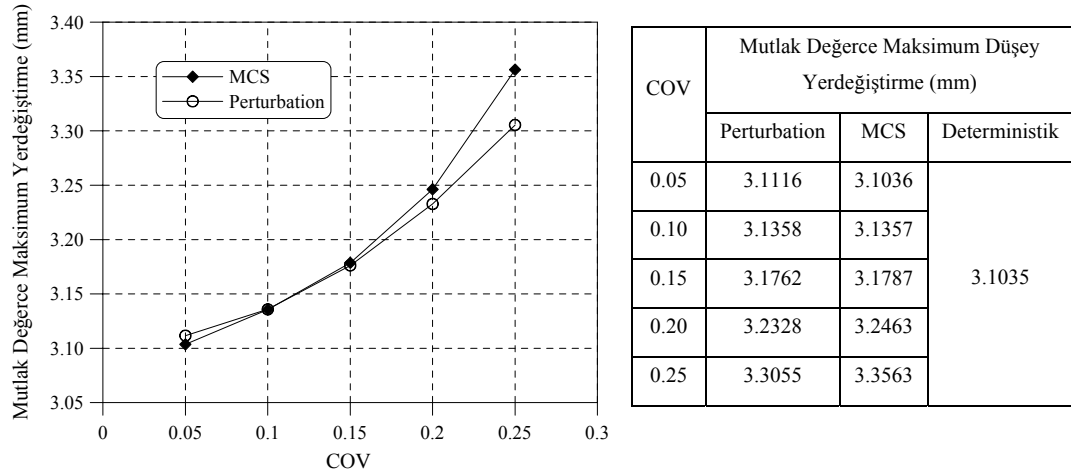


Şekil 2. Düşey yükleme durumunda rastgele değişken E için COV’a göre mutlak değerce maksimum düşey yerdeğiştirme değişimi

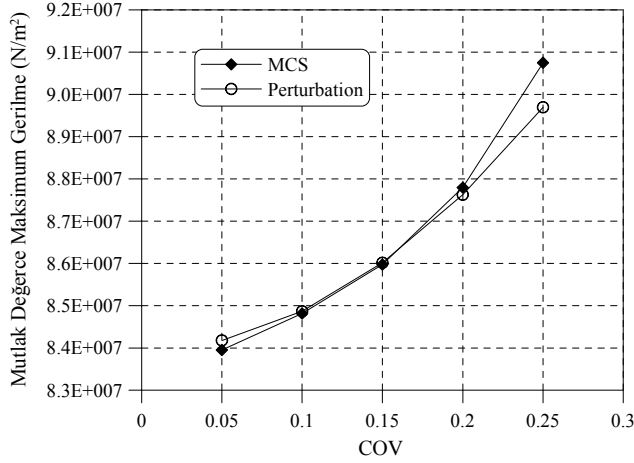


Şekil 3. Düşey yükleme durumunda rastgele değişken E için COV'a göre mutlak değerce maksimum gerilme değişimi

Rastgele değişken en kesit alanı (A) için elde edilen sonuçlar da hem yerdeğiştirme değerleri hem de gerilme değerleri için Perturbation ve MCS yöntemi birbiri ile paralellik göstermektedir (Şekil 4-5). İki yöntem arasındaki en büyük fark %25 COV için yerdeğiştirmelerde %1.5, gerilmelerde %1 olarak görülmektedir. COV değeri arttıkça stokastik yöntemlerden elde edilen sonuçlar ile deterministik analizden elde edilen sonuçlar birbirinden uzaklaşmaktadır.



Şekil 4. Düşey yükleme durumunda rastgele değişken A için COV'a göre mutlak değerce maksimum düşey yerdeğiştirme değişimi

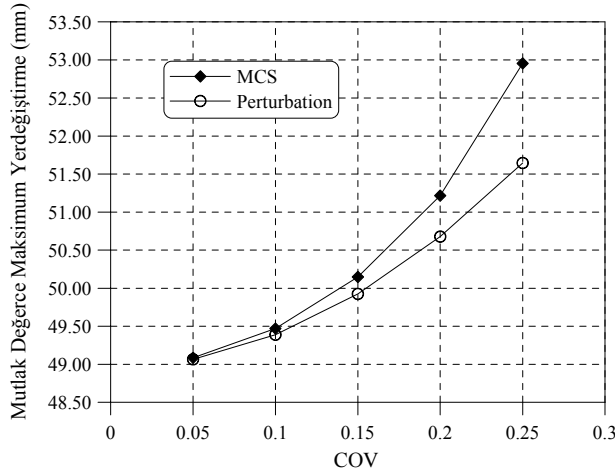


COV	Mutlak Değerce Maksimum Gerilme (N/m²)		
	Perturbation	MCS	Deterministik
0.05	84177931	83950728	83948045
0.10	84867590	84816208	
0.15	86017022	85973336	
0.20	87626226	87793536	
0.25	89695203	90749192	

Şekil 5. Düşey yükleme durumunda rastgele değişken A için COV'a göre mutlak değerce maksimum gerilme değişimi

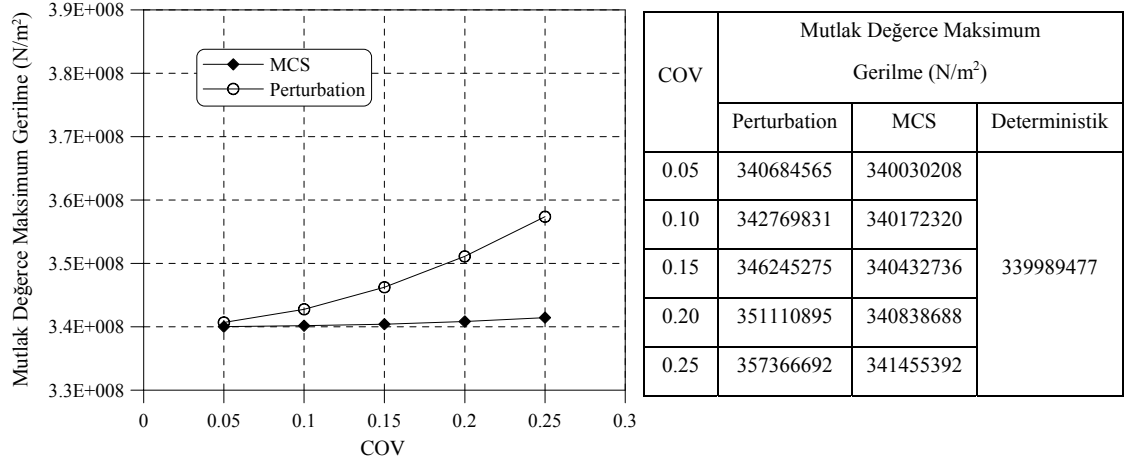
2.2. Yatay yükleme durumu

Yatay yükler etkisi altında gerçekleştirilen analizlerde elde edilen sonuçlara göre E'nin rastgele değişken olduğu durumda COV değeri büyüdükçe düşey yükleme durumunda olduğu gibi MCS ve Perturbation yönteminden elde edilen yerdeğiştirme değerleri birbirinden uzaklaşmaktadır (Şekil 6). %25 COV için, iki stokastik yöntemden elde edilen yatay yerdeğiştirmelerde %2 lik bir fark oluşmaktadır. Gerilme değerlerinde ise %25 COV için %4.6 oranında Perturbation yönteminden elde edilen değerlerin MCS değerlerinden uzaklaştığı görülmüştür (Şekil 7). COV arttıkça MCS ve Perturbation yönteminden elde edilen değerler, deterministik analizden elde edilen değerlerden uzaklaşmaktadır.



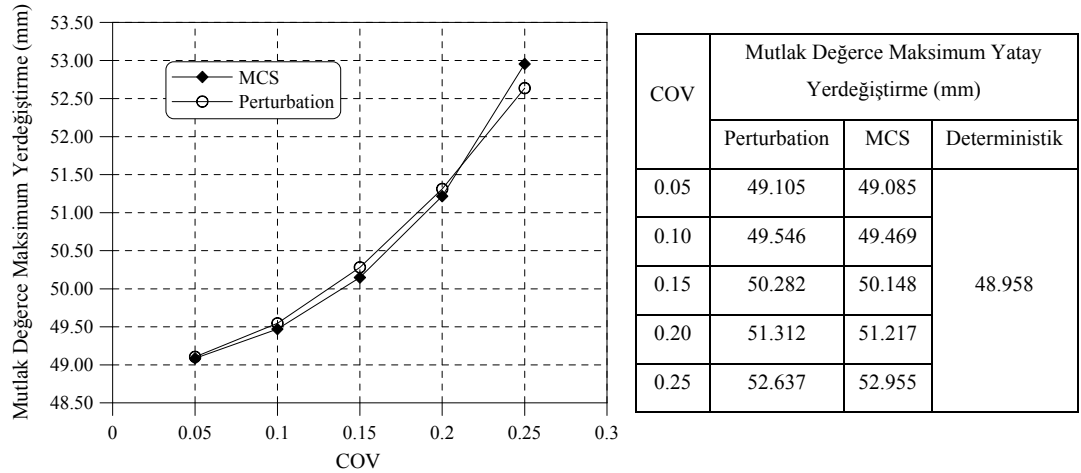
COV	Mutlak Değerce Maksimum Yatay Yerdeğiştirme (mm)		
	Perturbation	MCS	Deterministik
0.05	49.065	49.085	48.958
0.10	49.388	49.469	
0.15	49.925	50.148	
0.20	50.678	51.217	
0.25	51.646	52.955	

Şekil 6. Yatay yükleme durumunda rastgele değişken E için COV'a göre mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirme değişimi

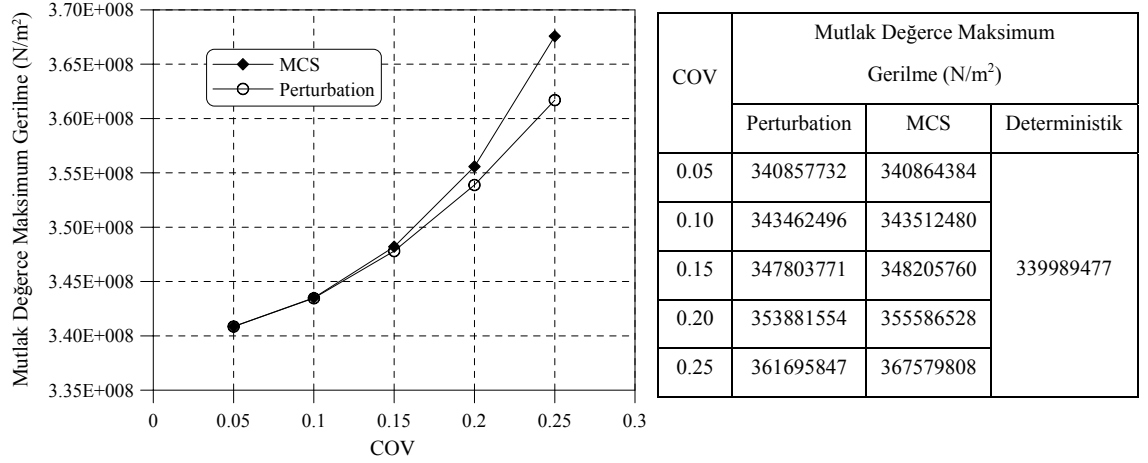


Şekil 7. Yatay yükleme durumunda rastgele değişken E için COV katsayısına göre mutlak değerce maksimum gerilme değişimi

Rastgele değişken en kesit alanı (A) için elde edilen sonuçlar da hem yerdeğiştirme değerleri hem de gerilme değerleri için Perturbation ve MCS yöntemi birbiri ile paralellik göstermektedir (Şekil 8-9). İki yöntem arasındaki en büyük fark %25 COV için yerdeğiştirmelerde %0.6, gerilmelerde %1.6 olarak görülmektedir. COV değeri arttıkça stokastik yöntemlerden elde edilen sonuçlar ile deterministik analizden elde edilen sonuçlar birbirinden uzaklaşmaktadır.



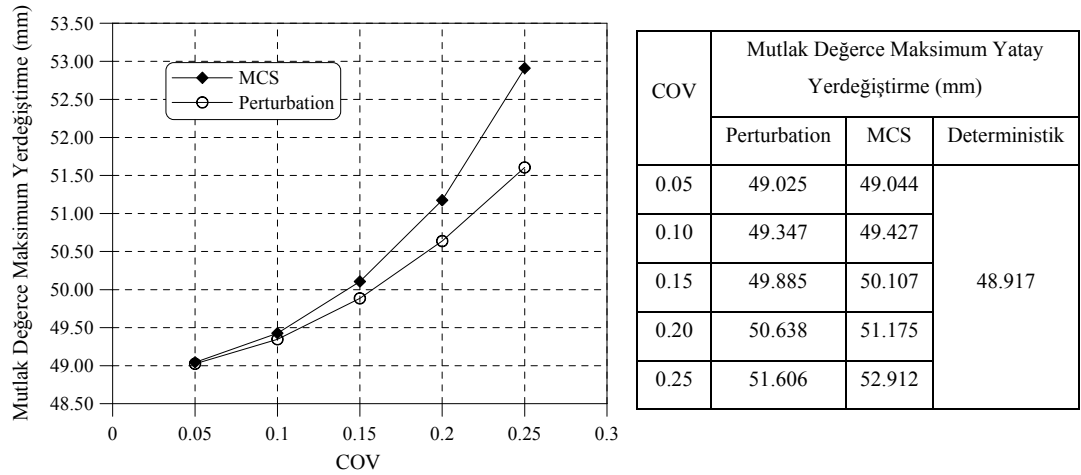
Şekil 8. Yatay yükleme durumunda rastgele değişken A için COV katsayısına göre mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirme değişimi



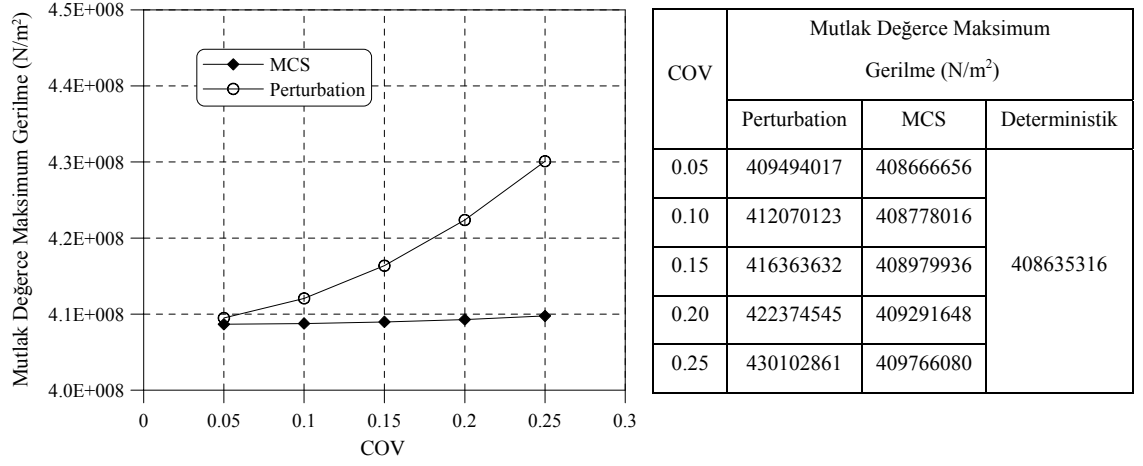
Şekil 9. Yatay yükleme durumunda rastgele değişken A için COV'a göre mutlak değerce maksimum gerilme değişimi

2.3. Bileşik yükleme durumu

Bileşik yükleme (düşey ve yatay yükün aynı anda etkimesi) altında yapılan analizlerde E'nin rastgele değişken olduğu durumda COV değeri arttıkça, MCS ve Perturbation yönteminden elde edilen mutlak değerce en büyük yatay yerdeğiştirme değerlerinin birbirine yakın çıktığı görülmektedir (Şekil 10). Gerilme değerlerinde ise yerdeğiştirmeye göre daha farklı çıktığı görülmektedir (Şekil 11). %25 COV için yatay yerdeğiştirmelerde %2.5 oranında, gerilmede ise %4.9 oranında perturbation değerlerinin MCS değerlerine yaklaştığı görülmüştür.

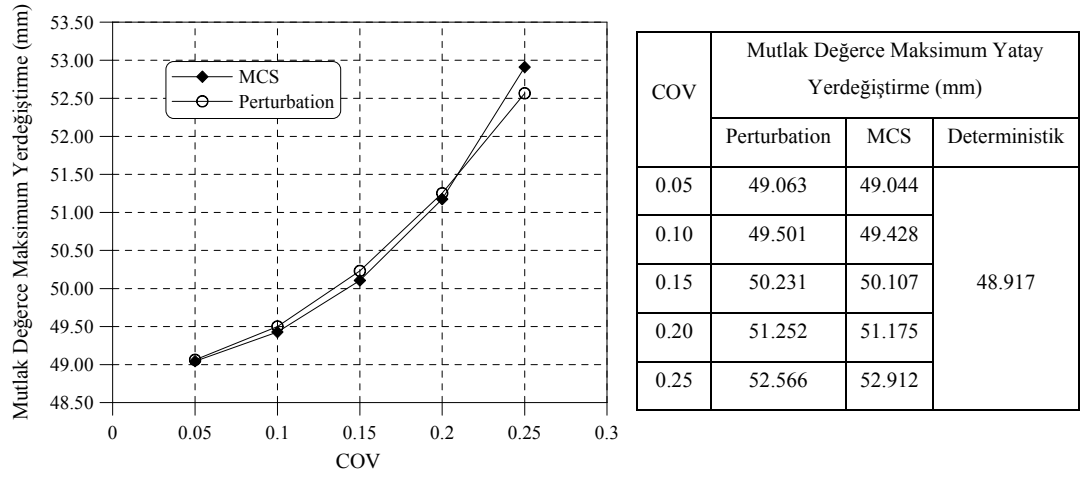


Şekil 10. Bileşik yükleme durumunda rastgele değişken E için COV'a göre mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirme değişimi

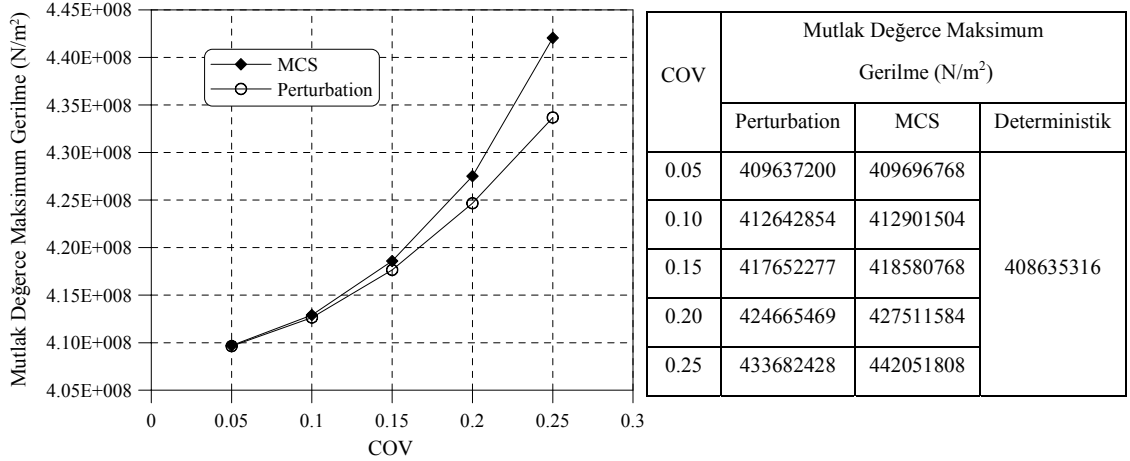


Şekil 11. Bileşik yükleme durumunda rastgele değişken E için COV'a göre mutlak değerce maksimum gerilme değişimi

Kesit alanı (A) rastgele değişkeni için iki stokastik yöntemden elde edilen sonuçlara göre hem yerdeğiştirme hem de gerilme değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir (Şekil 12-13). %25 COV için yatay yerdeğiştirme değerlerinde %0.6 oranında, gerilmelerde ise %1.9 oranında bir yakınsama elde edilmiştir.



Şekil 12. Bileşik yükleme durumunda rastgele değişken A için COV'a göre mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirme değişimi



Şekil 13. Bileşik yükleme durumunda rastgele değişken A için COV katsayısına göre mutlak değerce maksimum gerilme değişimi

3. Sonuçlar

Bu çalışmada, iki katlı uzay çelik bir kulenin stokastik ve deterministik analizi gerçekleştirilmiştir. Stokastik analiz için Perturbation ve Monte Carlo yöntemleri kullanılarak, farklı COV değerleri dikkate alınarak elastisite ve kesit alanı değişkenlerine göre yerdeğiştirme ve gerilme sonuçları, yatay, düşey ve bileşik yükleme durumları için elde edilmiştir. Bu iki yöntemden elde edilen sonuçlar birbiriyle ve deterministik sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Elde edilen bütün sonuçlarda, COV değerinin %10-%15 oranına kadar Perturbation yönteminden elde edilen sonuçların, MCS yönteminden elde edilen sonuçlara çok yakın olduğu görülmektedir.
- Çelik malzemesinin hem kesit alanı hem de elastisite modülü için COV değerlerinin en yüksek %10 düzeyinde olabileceği düşünüldüğünde, rastgele değişken olarak elastisite veya kesit alanının dikkate alınması durumunda, Perturbation yönteminin MCS yöntemi yerine kullanılabileceği görülmüştür.
- COV değeri arttıkça, deterministik ile stokastik analiz sonuçları arasındaki farkın arttığı görülmektedir.

4. Kaynaklar

- [1] Soong, T.T., ve Bogdanoff, J.L., 1963. On the Natural Frequency a Disordered Linear Chain of N-Degrees of Freedom, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.6, pp. 225-237.
- [2] Vanmarcke, E., ve Grigoriu, M., 1983. Stochastic Finite Element Analysis of Simple Beam, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 109(5), pp. 1203-1214.
- [3] Ikeda K., Murota K., Maruyama K. ve Yasunami H., 1998. Uncertainty in the strength of materials and structures, *Computers and Structures*, 67, 71-82.
- [4] Zhang, L. Ve Chen, S., 1991. The Standart Deviations of the Eigensolutions for Random MDOF Systems, *Computers and Structures*, Vol. 39, pp. 603-607.

- [5] Banik S., S., 2003. Dynamic analysis of structures with uncertain properties, PhD Thesis, University of Windsor, Canada.
- [6] Doltsinis, I. and Kang, Z., 2004. Robust design of structures using optimization methods, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 193, 2221–2237.
- [7] Paola M., D., 2004. Probabilistic analysis of truss structures with uncertain parameters (virtual distortion method approach), Probabilistic Engineering Mechanics, 19, 321–329.
- [8] Allegri, G., Corradi, S., and Marchetti, M., 2006. Stochastic Analysis of the Vibrations of an Uncertain Composite Truss for Space Applications, Composites Science and Technology , 66, 273–282.
- [9] Kleiber, M. and Hien, T., 1992. The Stochastic Finite Element Method, John Wiley and Sons, New York, NY.