





BAŞLANGIÇ EĞRİLİK KUSURLARININ MESNETLENME DURUMU VE MODÜL SAYISINA GÖRE DÜZLEMSEL ÇİFT TABAKALI UZAY KAFES SİSTEMLERİN DAVRANIŞINA ETKİSİ

Mojibullah NOORI^{**} 
Nurten TOPALOĞLU^{**} 
Mustafa TEMŞİ^{***} 
Hakan T. TÜRKER^{****} 

Alınma: 29.07.2019 ; düzeltme: 08.08.2019 ; kabul: 03.09.2019

Öz: Bu çalışmanın amacı, Düzlemsel Çift Tabakalı Uzay Kafes Sistemlerde, yaygın geometrik kusurlardan biri olan başlangıç eğrilik kusurunun mevcut olması durumunda, bu kusurun sistemin yük taşıma kapasitesine etkisini incelemektir. Yapı modellerinin simülasyonu için genel amaçlı sonlu elemanlar analiz programı olan ABAQUS programı kullanılmıştır. Elemanların tasarım hesabı ise “Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT)” ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu çalışmada elemanların malzeme ve geometri bakımından doğrusal olmayan davranışları göz önünde bulundurulmuş ve elemanlardaki başlangıç eğrilik kusurlarının sola çarpık olasılık dağılımına sahip olduğu kabul edilmiştir. Düzlemsel Çift Tabakalı Uzay Kafes Sistemlerde, başlangıç eğrilik kusurlarının sistemlerin yük taşıma kapasitesine önemli ölçüde etkisinin olduğu görülmüştür. Bu etkinin kusur dağılımı ile değişkenlik gösterdiği ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Uzay Kafes Sistemler, Düzlemsel Çift Tabakalı Uzay Kafes Sistemler, Başlangıç Kusurları, Eleman Eğrilik Kusuru, ABAQUS

The Effect of Initial Curvature Imperfections on the Behavior of Flat Double Layer Grid Systems According to Support Condition and Module Number

Abstract: The aim of this study is to investigate the effect of geometric curvature imperfection, which is one of the known type of geometric imperfections, on the load carrying capacity of Flat Double Layer Grid Systems. ABAQUS, a general purpose finite element analysis program, was used for the simulation of building models. Design calculation of the elements was carried out with “Load and Resistance Factor Design (LRFD)”. In addition, nonlinear behavior of the elements in terms of material and geometry is considered in this study and it is assumed that the initial curvature imperfections in the elements have a left skewed probability distribution. According to the results of the analysis, it has been found that the initial curvature imperfections have a significant effect on the load carrying capacity of the Flat Double Layer Grid Systems. This effect has found to vary according to imperfections.

Keywords: Space Structures, Flat Double Layer Grid Systems, Initial Imperfections, Element Curvature Imperfections, ABAQUS

* Bursa Uludağ Üniversitesi Görükle Kampüsü 16059 Nilüfer/BURSA

** Bursa Uludağ Üniversitesi Görükle Kampüsü 16059 Nilüfer/BURSA

*** Bursa Uludağ Üniversitesi Görükle Kampüsü 16059 Nilüfer/BURSA

**** Bursa Uludağ Üniversitesi Görükle Kampüsü 16059 Nilüfer/BURSA

İletişim Yazarı: Nurten Topaloğlu (nurtopaloglu@gmail.com)

1. GİRİŞ

Uzay Kafes Sistemler, çok sayıda bileşenin üç boyutlu formda bir araya getirilmesiyle oluşturulan sistemler olarak bilinmektedir. Sistemin elemanlarının üretilmesi ve montajı sırasında meydana gelen hatalar, sistemin kusursuz olmasına engel olmaktadır. Bu hatalar, üretim hataları olabildiği gibi insan kaynaklı hatalar da olabilmektedir. Örneğin, montaj sırasında civataların gereğinden fazla sıkılması veya az sıkılması, eleman ve yapı bazında kusurların ortaya çıkmasına ve iç gerilmelerin oluşmasına sebep olmaktadır.

Uzay kafes sistemlerin geniş çaptaki popülaritesi, bu yapıların birtakım avantajlarından kaynaklanmaktadır. Bu yapılar hafiftirler ve hafiflik, hiçbir rijitlik kaybı yaşanmadan elde edilen bir avantajdır. Fabrikalarda standart boyutlarda ve şekillerde, seri olarak üretilen basit elemanların birleşimi ile oluşturulduğundan dolayı sahada uygulaması kolay ve hızlı bir şekilde, az yetenekli işçi sınıfı ile mümkündür. Küçük boyutlarda elemanlardan oluşması nedeniyle malzemelerin taşınması ve bu yapıları inşa etmek oldukça kolay bir şekilde mümkündür. Bu sayede inşaat süresinden tasarruf sağlanır. Uzay kafes sistemlerin istenilen şekillerde yapılabilmesi sayesinde son derece özgün birçok yapı inşa edilebilmektedir. Ayrıca büyük rijitliklere sahip olduklarından dolayı simetrik olmayan ve ağır yüklemelere dayanıklıdır. Çok tabakalı uzay kafes sistemlerde tavan elemanlarının içinde aydınlatma araçları, klima kanalları ve diğer tesisatlar tutulabilmektedir. Böylece mimari açıdan daha düzgün bir görünüm elde edilebilmektedir. Fakat bu avantajların yanında uzay kafes sistemler aynı zamanda birtakım dezavantajlara da sahiptirler. Üretim ve tasarım hataları, yapım aşamasındaki hassasiyet sorunları ve hatalı uygulama problemleri bunlardan bazılarıdır.

Çift tabakalı uzay kafes sistemler, içsel hiperstatiklik dereceleri yüksek sistemlerdir. Affan tarafından yapılan daha önceki çalışmalar, uzay kafes sistemlerin stabilitesini etkilemeden çıkarılabilecek fazladan çubuk sayısının, toplam çubuk sayısının %15 ila %25'ini oluşturduğunu tahmin etmiştir. Bu tip yapı sistemlerinin tasarımcılar tarafından hatalı olarak güvenliğinin yüksek olduğu düşünülmekteydi (Affan, 1987; Affan ve Calladine, 1989). Ancak, 1978'de Amerika'nın Connecticut eyaletinde çift tabakalı uzay kafes sistemi ile inşa edilmiş Hartford Kapalı Spor Salonu çatısının (Coliseum space roof truss) çökmesi içsel hiperstatiklik dereceleri yüksek olan bu tip sistemlerin güvenliklerinin sorgulanmasına neden olmuştur (Smith ve Epstein, 1980; Martin ve Delatte, 2002). Uzay kafes sistemlerin yüksek dereceden hiperstatik olmaları, bu sistemlerin zincirleme göçme davranışını engelleyemediğini, aksine eleman boy (uzunluk/kısalık) kusurlarından kaynaklanan, eleman başlangıç iç kuvvetlerinin gelişmesine neden olduğunu göstermiştir (Schmidt vd. 1980). Ancak herhangi bir nedenden dolayı bir elemanın kapasitesine ulaşmasının ardından yüklerin diğer elemanlara aktarılmak sureti ile yapı güvenliğinin sağlanacağı düşünülmektedir (Martin ve Delatte, 2002; Türker ve Coşkun, 2004).

Uzay kafes sistemlerdeki hatalar veya kusurlar pek çok araştırmanın konusu haline gelmiştir. Wada ve Wang, (1992) çift tabakalı uzay kafes sistemlerin elemanlarının dayanımlarının rastgele değişkenliği ve montaj hatalarının bu sistemlerin davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Montaj hataları gibi imalat hatalarının da bu yapıların yük taşıma kapasitelerindeki etkisinin çok büyük olduğunu göstermişlerdir. El-Sheikh (1995), kusurlu elemanların uzay kafes sistemler üzerindeki kapasite ve davranış etkileri ile birlikte kusurlu elemanların bulunması kritik olan bölgelerin belirlenmesini araştırmıştır. Geometrik kusurların tek tabakalı tonoz tipi uzay kafes sistemlerin yük taşıma kapasitelerinde ve güç tükenme mekanizmalarında azalmaya neden olduğunu göstermiştir.

Türker (2004), eleman boylarındaki küçük kusurların (uzunluk/kısalık) uzay kafes sistemlerin güvenliğine etkisini irdelenmiştir. Bu çalışma kapsamında uzay kafes sistemlerin elemanlarının boylarındaki kusurları dikkate alarak üç boyutlu lineer elastik çözüm yapan bir bilgisayar programı yazılmıştır. Hazırlanan program verilen eleman boyundaki kusur uzunluğu ve kusurlu eleman sayısını dikkate alarak kusur atanacak elemanları gelişi güzel belirlemekte ve verilen kusuru bu elemanlara atayıp yapının analizini gerçekleştirmektedir. Sonuç olarak kafes elemanlarının boylarındaki küçük kusurların yapı güvenliğini önemli ölçüde azalttığı

gösterilmiştir.

Zhou, Meng, & Wu (2009), öngerilmeli uzay kafes sistemlerde eleman başlangıç eğriliğinin stabilite analizlerine olan etkisini araştırmıştır. Elemanın başlangıç eğriliğinin, öngerilmeli kablo destekli kemer tipi uzay kafes sistemin, doğrusal olmayan stabilite performanslarına etkisi incelenmiştir. Eleman başlangıç eğriliğinin, burkulmadan önce yapının global rijitliği üzerinde çok az etkisi olduğunu, ancak burkulma sonrası yapının performansı ve yük taşıma kapasitesi üzerinde büyük etkisi olduğunu bulmuşlardır.

Yadollahi ve diğerleri (2011), başlangıç eğrilik geometrik kusurlarının çift tabakalı tonoz tipi uzay kafes yapılarının yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu sistemlerde kusurların düzgün ve rastgele dağıtılması suretiyle yapı modellerinin kapasitelerindeki değişimleri incelenmişlerdir. Kusurların yapı başlangıç rijitliği üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığını ancak, en önemli etkisinin sistemin maksimum taşıma kapasitesini düşürdüğünü göstermişlerdir.

Roudsari ve Gordini (2015), eleman başlangıç geometrik kusurlarına sahip çift tabakalı uzay kafes sistemlerin güvenilirliğini mesnetlenme şekillerine göre incelemişlerdir. Çalışmalarında çepeçevre mesnetlenme durumunun güvenilirliğinin, köşelerden mesnetlenmiş ve iki kenardan mesnetlenmiş sistemlere göre daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır.

Vatansever ve Alçiçek (2016), uzay kafes sistemlerinin artan düşey yükler altında doğrusal olmayan davranışını, elemanların başlangıç kusurları ve narinlik oranlarını dikkate alarak incelemişlerdir. Kafes sistemlerinin doğrusal olmayan analiz sonuçları, göçme sınır durumunda burkulan elemanların belirleyici olması halinde sistemin herhangi bir sünek davranış gözlenmeksizin ani olarak göçtüğünü göstermiştir. Ayrıca başlangıç kusuru miktarının sistemin göçme şeklini etkilemediği, ancak kusur miktarındaki artışın sistemin taşıma kapasitesinde azalmaya neden olduğunu göstermişlerdir.

Gordini ve diğ. (2018), çift tabakalı uzay kafes sistemlerde eleman başlangıç eğrilik geometrik kusurunun dikkate alınmasıyla, Monte-Carlo Simülasyon metodunu kullanarak bu yapıların güvenilirlik analizlerini yapmışlardır. Bu amaçla, Gamma dağılımına sahip eleman başlangıç eğrilik geometrik kusuru, yapı elemanlarına rastgele atanmıştır. Yapıların göçme davranışı ve yapının nihai kapasitesi doğrusal olmayan analiz metodu kullanılarak belirlenmiş ve bu prosedür Monte-Carlo Simülasyonu ile tekrarlanmıştır. Çalışma sonucu modül sayılarındaki artışın, başlangıç eğrilik kusurunun çift tabakalı uzay kafes sistemlerinde yük taşıma kapasitesinin etkisini azalttığını bulmuşlardır.

Bu çalışmada, başlangıç eğrilik kusurlarının Düzlemsel Çift Tabakalı Uzay Kafes Sistemlerin yük taşıma kapasitesine etkisi mesnetlenme durumu ve modül sayısı parametreleri dikkate alınarak incelenmiştir. Çeşitli nedenlerle oluşan ve oluşması engellenemeyen küçük eğrilik kusurlarının sistem içindeki konumu ve büyüklüğü de bilinmemektedir. Bu belirsizlik, alınması gereken önlemleri de güçleştirmektedir. Bu nedenle daha gerçekçi bir yaklaşım için başlangıç eğrilik kusurları, rastgele sayıda ve büyüklükte üretilerek sistem elemanları arasında gelişigüzel dağıtılmıştır. Farklı kusur dağılımı içeren analizler sonucunda; kusurlu ve kusursuz modellerin kuvvet/deplasman grafikleri oluşturulmuştur. Kusurlu modellerin minimum, maksimum ve ortalama yük taşıma kapasitelerinden yola çıkılarak başlangıç eğrilik kusurunun mesnetlenme durumu ve modül sayısı parametreleri için Düzlemsel Çift Tabakalı Uzay Kafes Sistemlerin yük taşıma kapasitesine etkisi yorumlanmıştır.

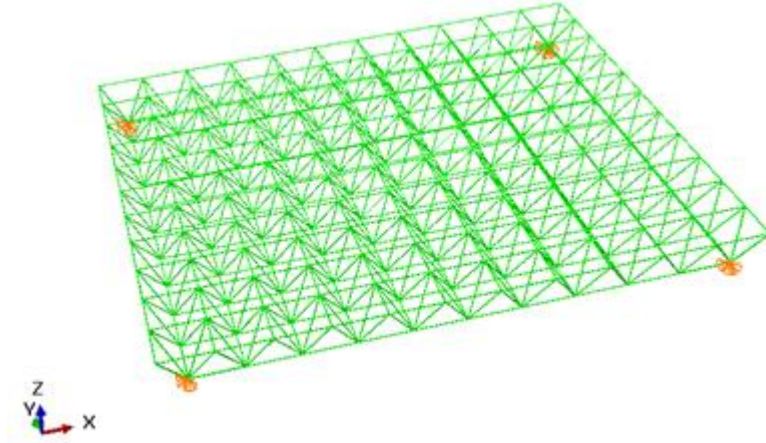
2. UZAY KAFES SİSTEMLERİN ANALİTİK MODELLERİNİN TANITILMASI

Bu çalışmada, en sık kullanılan uzay kafes sistem türlerinden düzlemsel çift tabakalı uzay kafes sistemler incelenmiştir. Başlangıç eğrilik kusurunun çift tabakalı uzay kafes sistemlerin yük taşıma kapasitesine etkisi iki parametre üzerinden değerlendirilmiştir. Bunlar mesnetlenme koşulları ve modül sayısı parametreleridir. Bu yapı sistemlerinin üç boyutlu olarak modellenmesi için MATHEMATICA programından yararlanılarak ABAQUS/Input dosyası oluşturulmuştur. Analizler, ABAQUS programında gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Oluşturulan

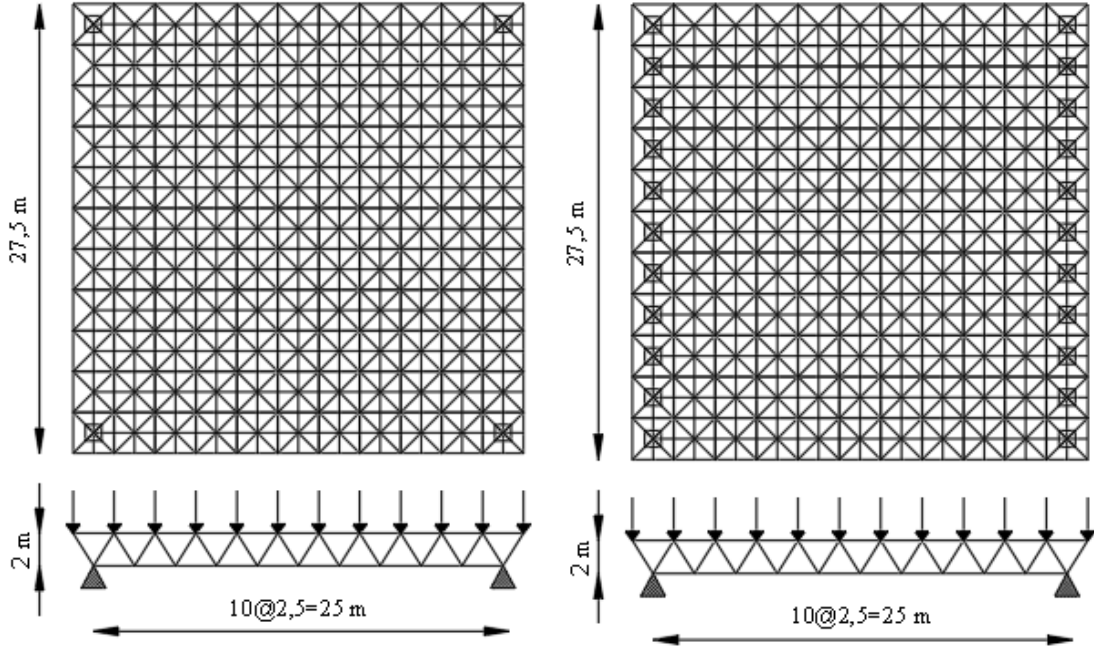
modellerin alt katman boyutları 25m x 25m ve derinlikleri 2m'dir. Köşe mesnet, iki kenardan mesnet ve dört kenardan mesnet durumlarına göre mesnetlenme koşullarının araştırılması için oluşturulan modellerde alt ve üst katmanlardaki eleman uzunlukları 2.5m, çapraz elemanların uzunlukları 2.67m ve modül sayısı 10x10 olarak dikkate alınmıştır. Modül sayısı etkilerini araştırmak için oluşturulan modellerin alt katmanları ise 12x12, 10x10 ve 8x8 modüllere sahiptir. Burada, alt katman boyutları sabit tutulduğundan elemanların uzunlukları her bir model için değişkenlik göstermektedir.

Bütün elemanlar boru tipi enkesite sahiptirler. Her bir eleman için ABAQUS programında yer alan B31 kiriş eleman kullanılmıştır. Kullanılan malzeme elasto-plastik bir davranışa sahip çelik malzemesidir. Kullanılan çelik malzemesinin akma dayanımı 355 MPa ve elastisite modülü 210000 MPa olarak alınmıştır.

Bu çalışma kapsamında mesnetlenme koşulları ve modül sayısı parametrelerini dikkate alan 6 adet düzlemsel çift tabakalı uzay kafes sistemi modellenmiştir. Bunlardan üçü mesnetlenme etkisini, diğer üçü de modül etkisini incelemek için oluşturulan modellerdir. Mesnetlenme etkisinin incelendiği Model A, Model B ve Model C sırasıyla köşe sabit mesnetli, iki kenar sabit mesnetli ve dört kenarı sabit mesnetli sistemlerdir. Köşe mesnetlenme durumunda mesnetler üzerindeki elemanlar güvenliğe alınmıştır. Diğer taraftan modül etkisinin incelendiği Model D, Model E ve Model F sırasıyla 12x12, 10x10 ve 8x8 modül sayısına sahip, köşelerde sabit mesnetlenmiş sistemlerdir. Hazırlanmış olan düzlemsel çift tabakalı uzay kafes sistem modellerinin boyutları, mesnetlenme koşulları ve yükleme tipi Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir.

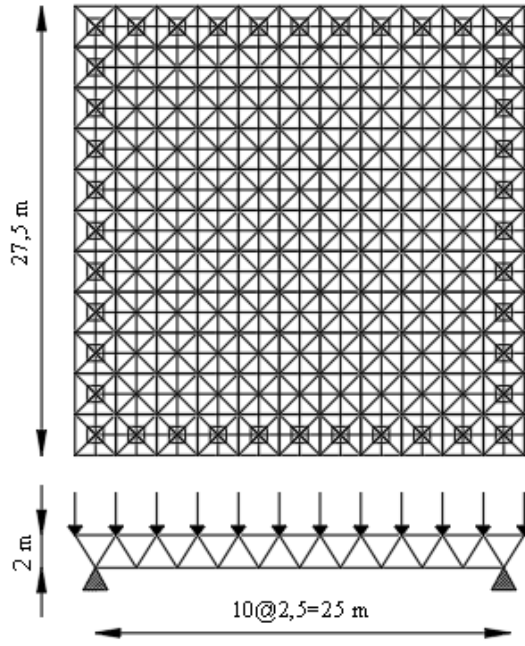


Şekil 1:
ABAQUS programında modellenen yapı örneği



a.

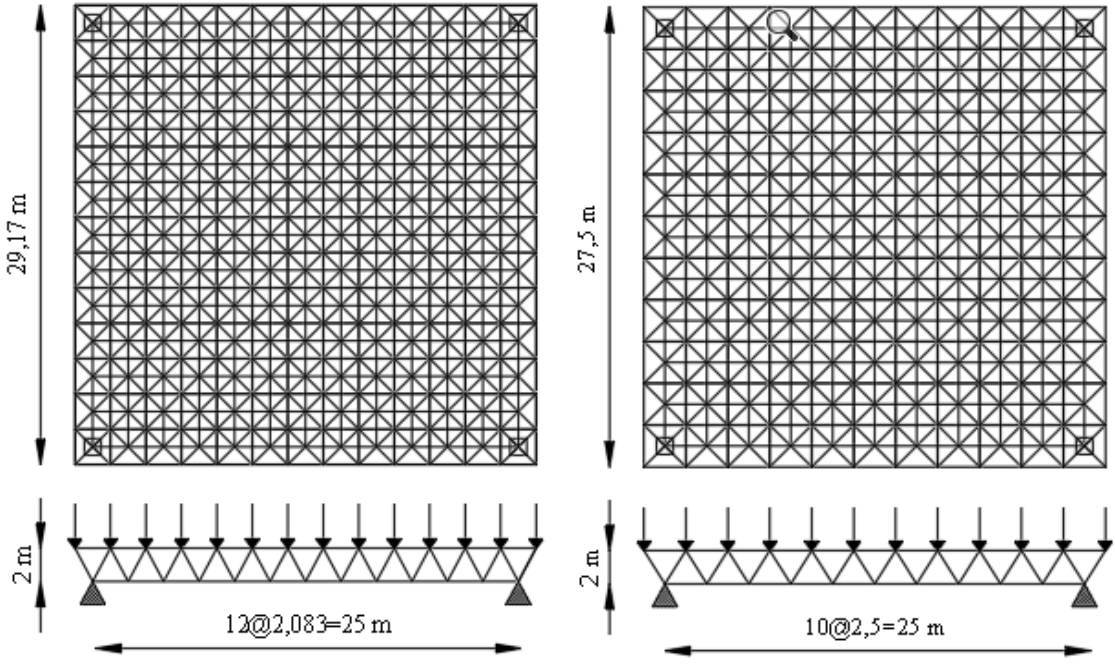
b.



c.

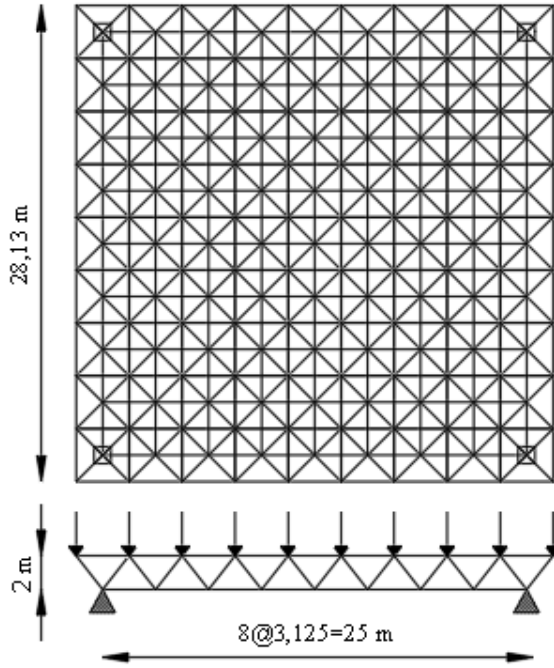
Şekil 2:

Mesnetlenme etkisinin incelendiği düzlemsel çift tabakalı uzay kafes sistem modelleri
a. Model A b. Model B c. Model C



a.

b.



c.

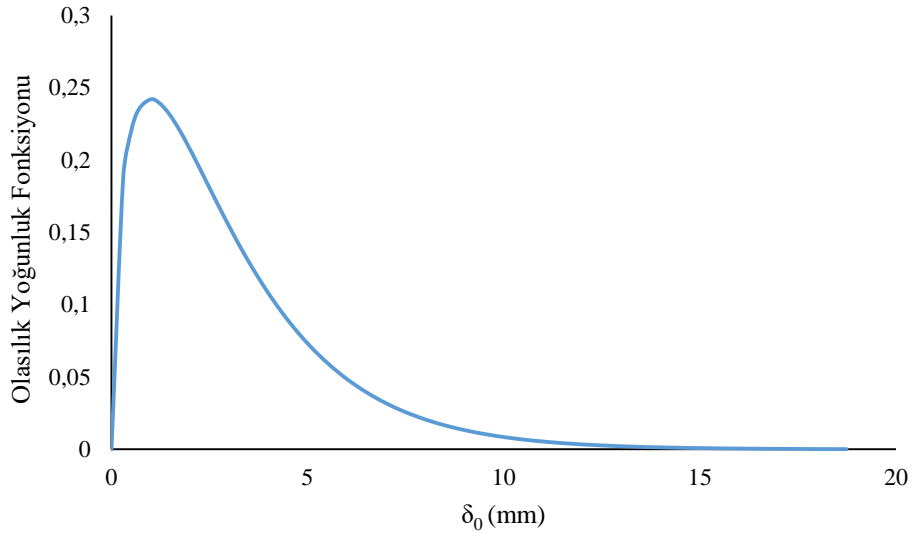
şekil 3:

Modül sayısı etkisinin incelendiği düzlemsel çift tabakalı uzay kafes sistem modelleri

a. Model D b. Model E c. Model F

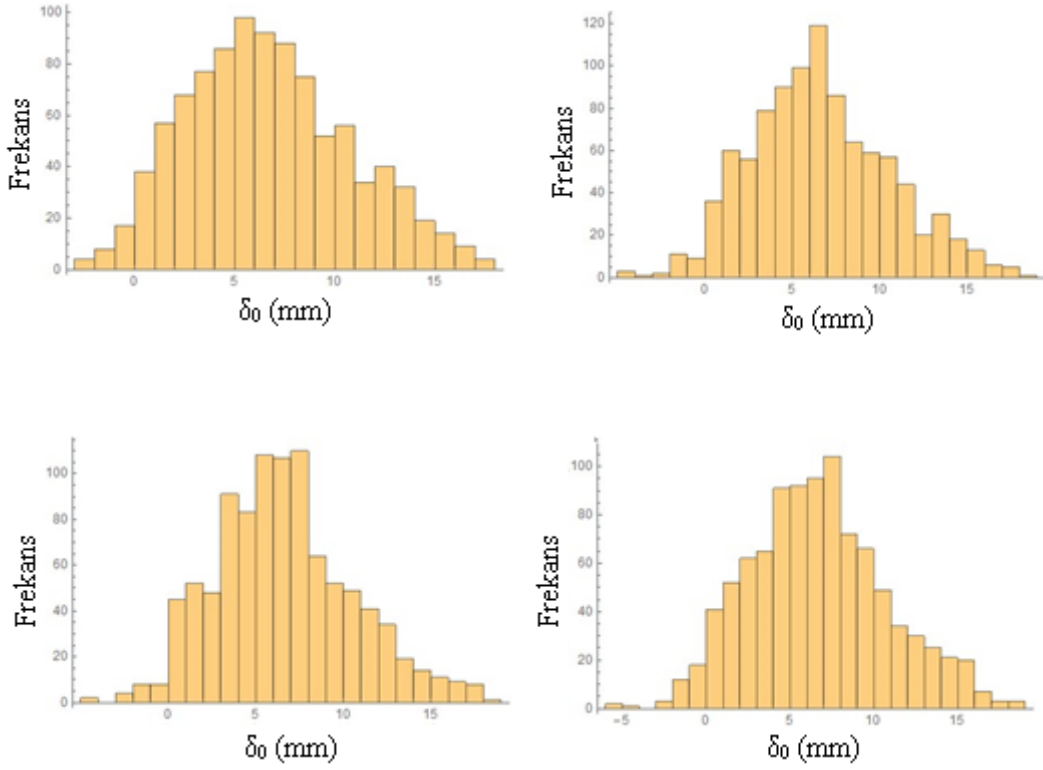
Düzlemsel çift tabakalı uzay kafes sistem modelleri başlangıçta kusurlu ve kusursuz sistemler olarak oluşturulmuştur. Kusursuz yapı modelleri, elemanlarında herhangi bir eğrilik kusuru bulunmayan sistemlerdir. Ancak bu sistemlerdeki elemanlarda basınç kuvveti altında burkulmanın gerçekleşebilmesi için sistem kapasitesini etkilemeyecek ve burkulmayı da tetikleyecek çok küçük bir eğrilik kusuru verilmiştir.

Kusurlu sistemlerde kusurların yeri ve büyüklüğü bilinmemektedir. Bu bağlamda rastgele eleman başlangıç eğrilik kusurlarının oluşturulması ve bunların yapı modelinin elemanları arasında gelişigüzel bir şekilde atanması için MATHEMATICA paket programı kullanılmıştır. Başlangıç eğrilik kusurlarının kafes elemanlarına rastgele dağıtılmasında Gamma dağılımlı olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılmıştır. Elemanların orta noktasındaki başlangıç eğrilik kusur büyüklüğünün (δ_0), sola çarpık dağılım gösteren bir olasılık dağılımına sahip olduğu varsayılmıştır (Şekil 4). Ortalama değer parametresi bu tip yapılarda izin verilen bir değer olması sebebiyle (μ) L/1000 olarak seçilmiştir. Standart sapma (σ) büyüklüğü 2.5L/1000 olarak alınmıştır. Aynı zamanda üst sınır olarak maksimum kusur büyüklüğü 7.5L/1000 olarak sınırlandırılmıştır. MATHEMATICA programında yazılan kod yardımıyla rastgele sayıda üretilen kusurların model elemanlarında gelişigüzel dağılımı yapılmıştır. Her bir model için farklı kusur dağılımlarını içeren 30'ar adet analiz ABAQUS programında gerçekleştirilmiştir. Bunlardan seçilen 4 örnek için oluşturulan histogramlar, Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4:

Sola çarpık olasılık dağılımı yoğunluk fonksiyonu (L = 2,5 m)



Şekil 5:

MATHEMATICA paket programında üretilen 4 farklı örnek olasılıktaki kusurlar

Şekil 2 ve Şekil 3'te görüldüğü gibi modellerin üst katmanlarının düğüm noktalarına kuvvet kontrollü yükleme yapılmıştır. Yapılan parametrik çalışmada dikkate alınan modellerin (Şekil 2 ve Şekil 3) eleman kesitleri, 0.5 kN/m^2 lik yayılı sabit yük, 0.75 kN/m^2 lik yayılı hareketli yük durumları dikkate alınarak YDKT'ye göre tasarlanmıştır.

Sadeleştirmek amacıyla yapı modellerinin elemanları; üst katman elemanları, alt katman elemanları ve çapraz elemanlar olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. Yapı modellerinin tasarımında bu gruplardan her birinin en kritik elemanı dikkate alınmıştır.

Kusurlu elemanların kapasiteleri farklı narinlikte farklı hassasiyetler göstereceğinden tüm elemanların narinlik oranı sabit bir değer olarak 115 seçilmiştir. Ayrıca aynı eleman grupları için farklı modellerdeki kritik elemanların kapasite oranları sabit tutulmuştur. Aşağıdaki bağıntıya göre hesaplanan kapasite oranları Tablo 1'de verilmiştir.

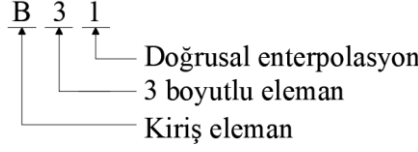
$$CR_c = \frac{P_{uc}}{P_n}$$

Burada; CR_c kritik elemanın kapasite oranını, P_{uc} talep edilen basınç kuvvetini ve P_n basınç elemanının kapasitesini göstermektedir.

Tüm elemanlar için sabit narinlik oranı ve kritik elemanlar için sabit kapasite oranları dikkate alınarak seçilen eleman kesitleri Tablo 2'de verilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan kiriş eleman tipi ABAQUS programında B31 olarak ifade edilmektedir. Şekil 6'da gösterildiği gibi, B harfi kiriş kolon elemanı anlamına gelen İngilizce "Beam" kelimesini ifade etmektedir. B harfinden sonraki birinci rakam 3 boyutlu bir eleman kullanıldığına işaret ederken ikinci rakam sonlu eleman parçalarının doğrusal bir çubuk elemanı

olduğuna işaret eder. Yani elemanların analizinde doğrusal enterpolasyon kullanıldığını gösterir (ABAQUS 2016).



Şekil 6.

ABAQUS programında kiriş elemanların isimlendirilmesi

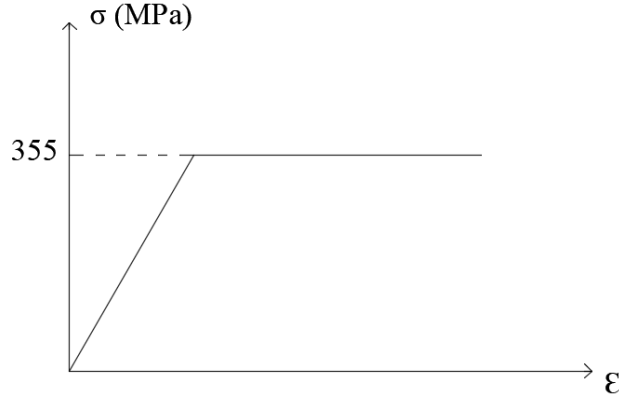
Tablo 1. Kritik kapasite oranı bağıntısına göre hesaplanan kapasite oranları

Modeller	Talep Edilen Kuvvetler (kN)			Eleman Kapasiteleri (kN)			Kapasite Oranları		
	Üst	Alt	Çapraz	Üst	Alt	Çapraz	Üst	Alt	Çapraz
Model A	205	89	95	235	105	113	0.872	0.848	0.841
Model B	123	79	46	139	92	54	0.885	0.859	0.852
Model C	67	36	19	76	42	23	0.882	0.857	0.826
Model D	186	98	84	214	116	102	0.870	0.845	0.823
Model E	205	89	95	235	105	113	0.872	0.848	0.841
Model F	230	68	116	264	80	137	0.871	0.850	0.847

Tablo 2. Sabit narinlik oranı ve sabit kapasite oranları dikkate alınarak seçilen eleman kesitleri

Modeller	Kullanılan Eleman Kesitleri		
	Üst Katman Elemanları	Alt Katman Elemanları	Çapraz Elemanlar
Model A	CHS 68.6/8	CHS 64.8/3.5	CHS 69/3.5
Model B	CHS 66/4.6	CHS 62.6/3.2	CHS 67/1.7
Model C	CHS 64/2.5	CHS 62.8/1.4	CHS 66.4/0.7
Model D	CHS 59/8.7	CHS 55.2/4.8	CHS 64/3.5
Model E	CHS 68.6/8	CHS 64.8/3.5	CHS 69/3.5
Model F	CHS 69.6/7	CHS 73.6/2.2	CHS 68.8/3.9

Oluşturulan modeller, ABAQUS programında kuvvet kontrollü yükleme bağlamında “Static, General” analiz tipi kullanılarak analiz edilmiştir. Malzeme ve geometride doğrusal olmayan davranış esas alınmıştır. Burada 355 MPa akma dayanımına sahip çelik malzemeye elasto-plastik özelliğinin verilmesi suretiyle doğrusal olmayan malzeme davranışı, bütün elemanlara kapasitelerini etkilemeyecek kadar küçük eğrilik kusuru verilmek suretiyle de doğrusal olmayan geometri davranışı elde edilmiştir. Şekil 7’de kullanılan çelik malzemesinin elasto-plastik davranışını gösteren gerilme-birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir.



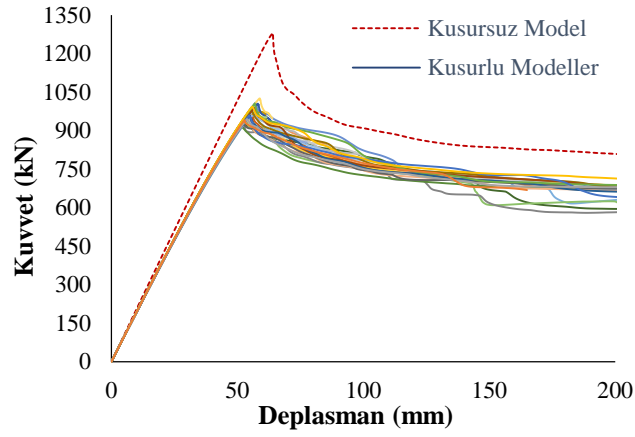
şekil 7:
Elasto-plastik elik malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği

3. BULGULAR VE TARTIşMA

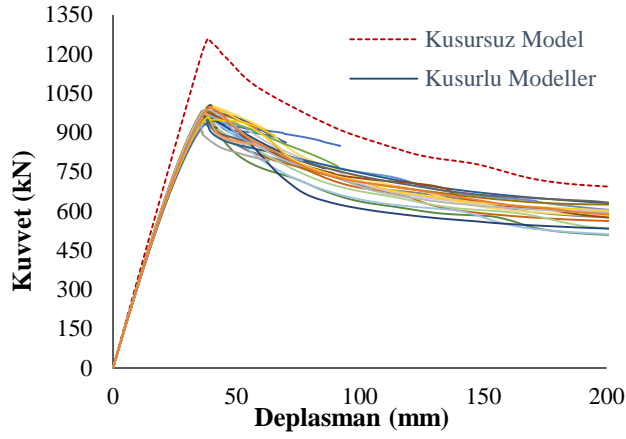
Bu çalışmada başlangıç eğrilik kusurunun dözlemsel çift tabakalı uzay kafes sistemlerin yük taşıma kapasitesine etkisi, mesnetlenme koşulları ve modül sayısı parametreleri dikkate alınarak araştırılmıştır. Her bir eleman için gelişigöznel belirlenen başlangıç eğrilik kusuru elemanlar 10 eşit parçaya bölünerek verilmiştir. MATHEMATICA programında yazılan kod ile elemanların eğrilikleri 10 eşit parçadaki koordinatları hesaplanarak ABAQUS programı için input dosyası oluşturulmuştur. İncelenen parametrelere bağlı olarak üretilen her bir model için farklı kusur dağılımlarını içeren 30'ar adet analiz, ABAQUS programında gerçekleştirilmiştir. Her bir analiz sonucunda, modelin mesnet reaksiyonlarının toplamı sisteme etkileyen kuvveti ve sistemin alt katmanının orta noktasında oluşan dözey deplasman da deplasman değerlerini gösterecek şekilde kuvvet-deplasman grafikleri çizilmiştir (şekil 8). Bu grafiklerdeki tepe noktası maksimum sistem kapasite değerlerini göstermektedir. Mesnetlenme durumu etkisinin incelenmesi amacıyla Model A, Model B ve Model C; modül sayısı etkisinin incelenmesi için Model D, Model E ve Model F oluşturulup 30 farklı kusur dağılımı için analiz edilmiştir.

şekil 8'de kırmızı kesik çizgiler kusursuz çift tabakalı uzay kafes sistemini göstermektedir. Analiz sonrası oluşturulan ve şekil 8'de gösterilen kuvvet-deplasman grafikleri incelendiğinde Model A, Model B ve Model C için başlangıç eğrilik kusurları bulunmasının, sistemlerin yük taşıma kapasitelerini olumsuz yönde etkilediği görölmektedir. Eğrilik kusurunun yapının yük taşıma kapasitesini azalttığı görölmektedir. Başlangıç rijitliği değişmemekte, belirli bir yük değerinden sonra rijitliklerin kusursuz modele kıyasla azaldığı görölmektedir. Bunun sebebi; eğrilik kusurlarının, ikincil mertebe etkileri oluşturarak elemanların kapasite değerlerine ulaşmadan burkulmasına neden olmasındır.

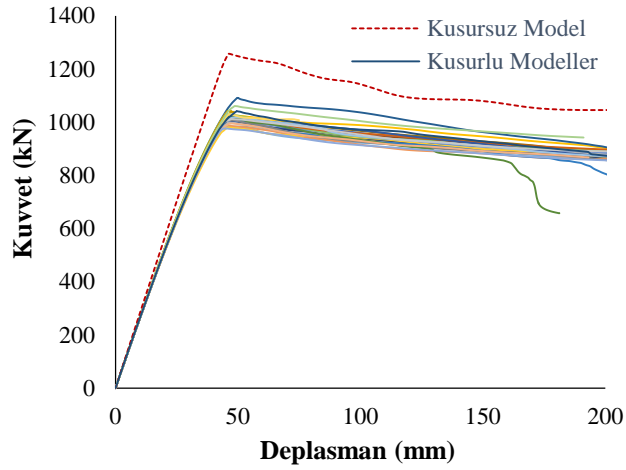
Farklı kusur dağılımlarına sahip çift tabakalı uzay kafes sistemlerine ait yük taşıma kapasiteleri ve eğrilik kusurlarından kaynaklı kapasite azalım oranları Tablo 3'te detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Tablo 3'e göre Model A'ya ait sistemlerdeki kapasite azalım oranları %20-%28.7 aralığında iken Model B ve Model C'ye ait sistemlerde sırasıyla %20-%26.3 ve %13.2-%22.3 oranında kapasite dözüşü gerçekleşmiştir. Her modele ait maksimum ve minimum kapasite azalım oranlarının ortalamasından yola çıkılarak çift tabakalı uzay kafes sistemlerin yük taşıma kapasitesinin, eğrilik kusurlarının dağılımından önemli bir şekilde etkilenmediği sonucuna varılabilir.



a.



b.



c.

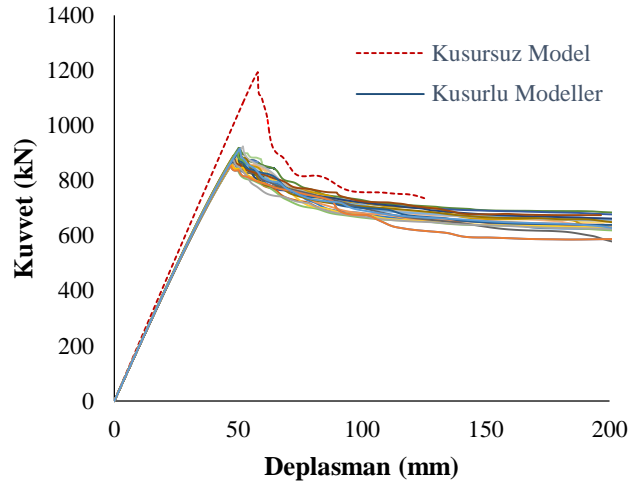
Şekil 8:

Mesnetlenme durumlarına göre çift tabakalı uzay kafes sistemlerin kuvvet-deplasman grafikleri
a. Model A b. Model B c. Model C

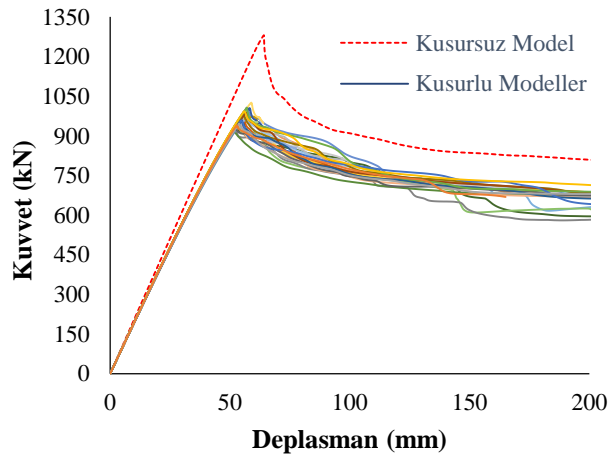
Tablo 3. Mesnetlenme durumlarına göre kusurlu ve kusursuz modellere ait kapasite değerleri ve kapasite azalım oranları

Modeller	Sistem Kapasite Değerleri (kN)			Kapasite Azalım Oranları (%)			
	Kusursuz Model	Maks.	Min.	Ort.	Maks.	Min.	Ort.
Model A	1280	1025	913	936	28.7	20.0	23.4
Model B	1259	1006	928	971	26.3	20.0	23.0
Model C	1257	1091	976	1116	22.3	13.2	21.0

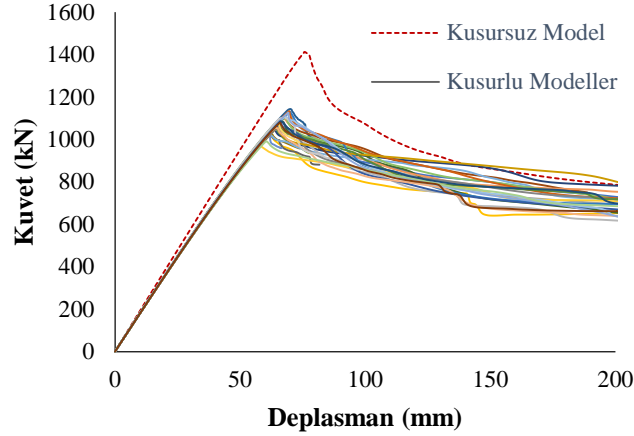
Modül sayısı etkisini gösteren kuvvet-deplasman grafikleri Şekil 9'da gösterilmiştir. Bu eğriler farklı modül sayılarında kusurlu çift tabakalı uzay kafes sistemler ile kusursuz çift tabakalı uzay kafes sistemlerin kapasitelerini karşılaştırmaktadır. Şekil 9'da sırasıyla Model D, Model E ve Model F'ye ait sistemlerin kuvvet-deplasman grafiklerine gösterilmektedir.



a.



b.



c.

Şekil 9:

Modül sayısına göre çift tabakalı uzay kafes sistemlerin kuvvet-deplasman grafikleri
a. Model D b. Model E c. Model F

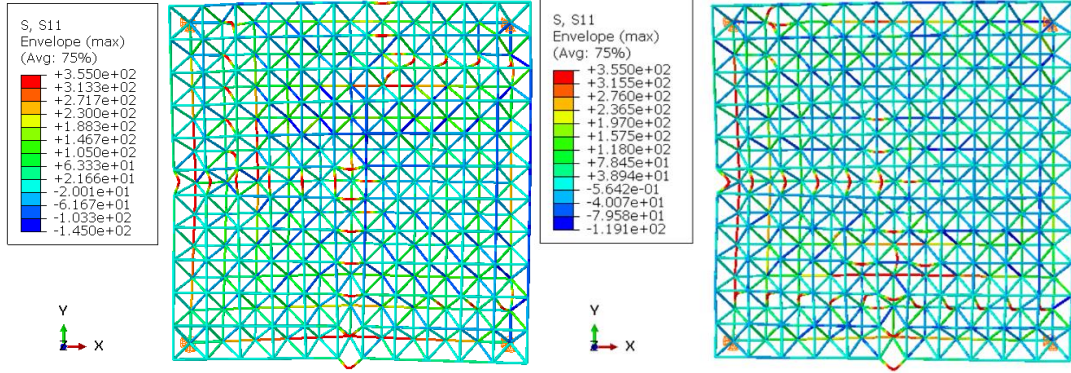
Modül sayısı parametresinin incelendiği her bir modele ait sistemlerin maksimum ve minimum kapasite değerleri, ortalama kapasite değerleri, kusursuz modellerin sistem kapasiteleri ve kusurlu modellerin kusursuz modellere göre yük taşıma kapasitelerinde oluşan azalma oranları Tablo 4'te gösterilmiştir. Modül sayısı ile eleman uzunluklarının ters orantılı olduğu düşünüldüğünde modül sayısının azalması eleman uzunluklarının artmasına neden olacaktır. Narinliklerin sabit tutulması öngörüldüğünden elemanların kesitleri farklı seçilerek sabit narinlik oranı korunmuştur. Bu durumlara bağlı olarak elemanların yük taşıma kapasitelerinde çok küçük miktarlarda değişiklikler gözlenmiştir. Tablo 4'e göre Model D, Model E ve Model F'de yük taşıma kapasitesinde sırasıyla %28.5, %28.7, %31.3 oranlarında azalma olduğu görülmektedir. Bu oranlardan da anlaşılacağı üzere, yapıların farklı modül sayısına sahip olması düzlemsel çift tabakalı uzay kafes sistemlerin başlangıç kusur etkisini bariz bir şekilde etkilemediği görülmektedir.

Tablo 4. Modül sayısına göre kusurlu ve kusursuz modellere ait kapasite değerleri ve kapasite azalım oranları

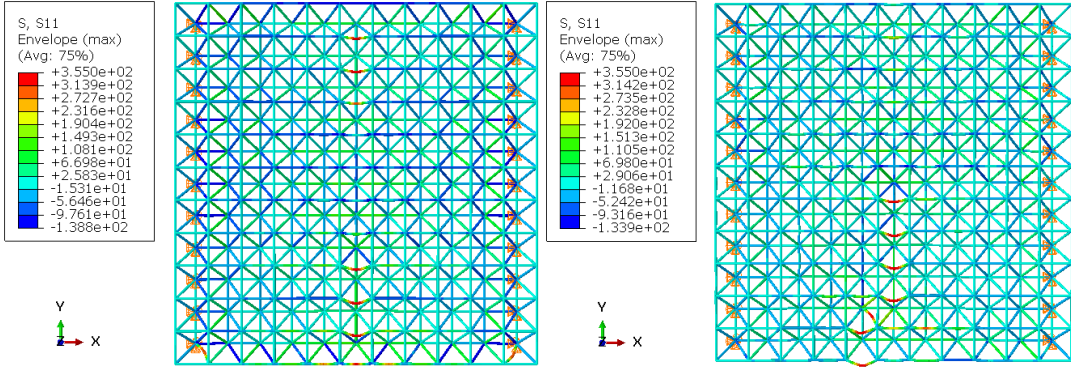
Modeller	Sistem Kapasite Değerleri (kN)				Kapasite Azalım Oranları (%)		
	Kusursuz Model	Kusurlu Model			Maks.	Min.	Ort.
		Maks.	Min.	Ort.			
Model D	1193	923	853	893	28.5	22.6	25.0
Model E	1280	1025	913	936	28.7	20.0	23.4
Model F	1411	1143	969	1073	31.3	19.0	24.0

Ayrıca kuvvet-deplasman eğrisinin nihai birim şekil değiştirme ile akma birim şekil değiştirmesi arasında kalan kısmının altındaki alanlar kıyaslanarak, modül sayısının değişmesinin başlangıç eğrilik kusurları bulunan sistemlerin kusursuz sistemlere göre sünekliğine önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

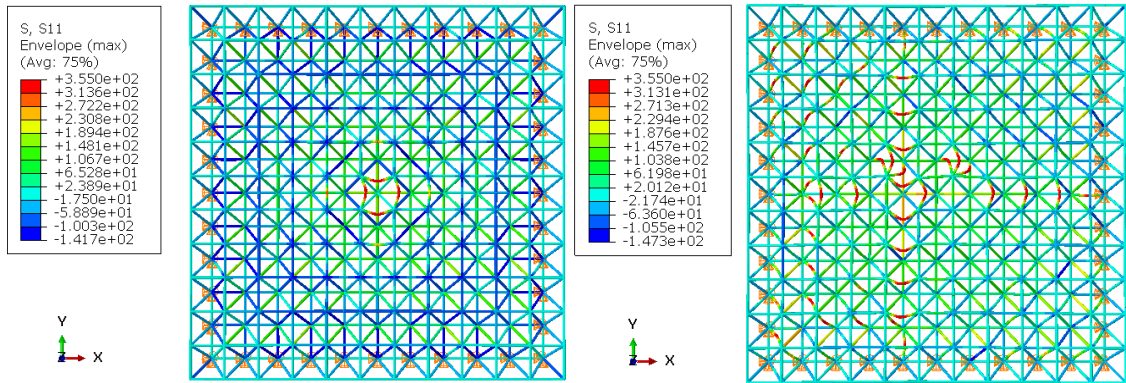
Şekil 10, 11, 12, 13 ve 14'te tüm modeller için ABAQUS programında yapılan analizler sonucu oluşturulan kusurlu ve kusursuz sistemlerin şekil değiştirmiş görselleri gösterilmektedir.



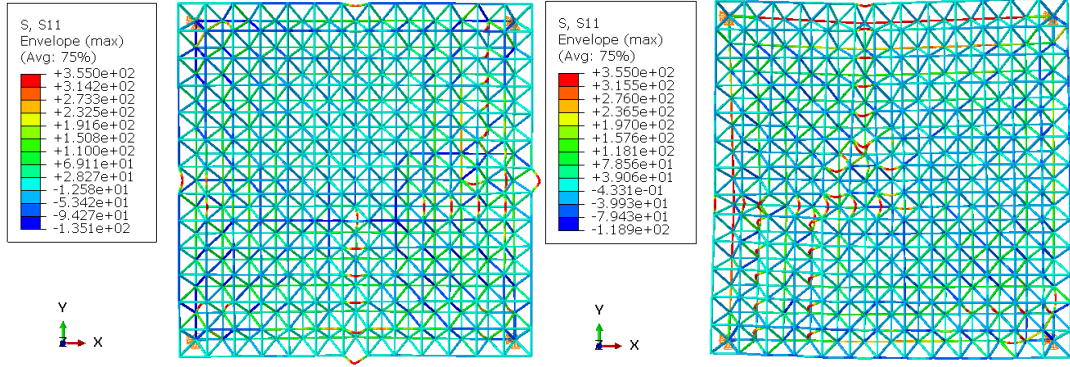
Şekil 10:
Model A ve Model E için ABAQUS programında kusurlu ve kusursuz yapı analiz sonuçları



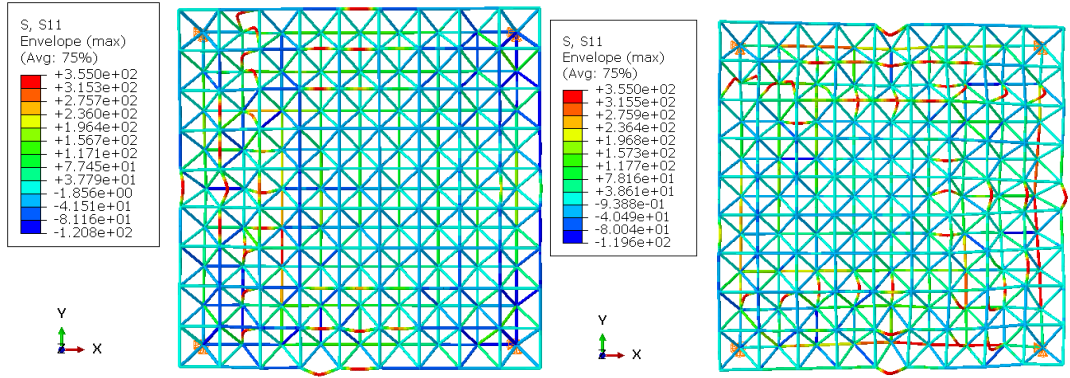
Şekil 11:
Model B için ABAQUS programında kusurlu ve kusursuz yapı analiz sonuçları



Şekil 12:
Model C için ABAQUS programında kusurlu ve kusursuz yapı analiz sonuçları



Şekil 13:
Model D için ABAQUS programında kusurlu ve kusursuz yapı analiz sonuçları



Şekil 14:
Model F için ABAQUS programında kusurlu ve kusursuz yapı analiz sonuçları

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında Düzlemsel Çift Tabakalı Uzay Kafes Sistemlerde gelişigüzel dağıtılmış başlangıç eğrilik kusurunun sistemin yük taşıma kapasitesine etkisi, mesnetlenme koşulları ve modül sayısı parametreleri dikkate alınarak incelenmiştir. Yapılan analizlerin sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

1. Başlangıç eğrilik kusurları, Düzlemsel Çift Tabakalı Uzay Kafes Sistemlerin yük taşıma kapasitesini olumsuz yönde etkilemektedir ve bu etki kusur dağılımına bağlı olarak değişmektedir.
2. Yapıların farklı mesnetlenme durumlarında olması, Düzlemsel Çift Tabakalı Uzay Kafes Sistemlerin başlangıç kusur etkisini bariz bir şekilde etkilemediğini göstermektedir.
3. Yapıların farklı modül sayısına sahip olması, Düzlemsel Çift Tabakalı Uzay Kafes Sistemlerin başlangıç kusur etkisini bariz bir şekilde etkilemediğini göstermektedir.
4. Modellerde başlangıç rijitliği değişmemekte, belirli bir yük değerinden sonra kusurlu sistemlerin rijitliklerinin kusursuz sistemlere göre azaldığı görülmektedir.

KAYNAKLAR

1. ABAQUS/Standard, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 2001
2. Affan, A., & Calladine, C. R. (2017). Initial Bar Tensions in Pin-Jointed Assemblies. *International Journal of Space Structures*, 4(1), 1–16. <https://doi.org/10.1177/026635118900400101>
3. El-Sheikh, A. I. (1995). Sensitivity of Space Trusses to Member Geometric Imperfections. *International Journal of Space Structures*, 10(2), 89–98. <https://doi.org/10.1177/026635119501000202>
4. El-sheikh, A. I., & McConnef, R. E. (1993). Experimental Study of Behavior of Composite Space Trusses. *J. Struct. Eng.*, 119(3), 747–766. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1993\)119:3\(747\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:3(747))
5. Gordini, M., Habibi, M. R., Tavana, M. H., TahamouliRoudsari, M., & Amiri, M. (2018). Reliability Analysis of Space Structures Using Monte-Carlo Simulation Method. *Structures*, 14(April 2017), 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.03.011>
6. H.E Alçiçek, C. V. (2016). Uzak Kafes Çatı Sistemlerinin Artan Düşey Yükler Altında Doğrusal Olmayan Davranışı, Uluslararası Katılımlı 7. Çelik Yapılar Sempozyumu, 83–92.
7. Martin, R., & Delatte, N. J. (2002). Another Look at Hartford Civic Center Coliseum Collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 15(1), 31–36. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0887-3828\(2001\)15:1\(31\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0887-3828(2001)15:1(31))
8. Roudsari, M. T., & Gordini, M. (2015). Random imperfection effect on reliability of space structures with different supports. *Structural Engineering and Mechanics*, 55(3), 461–472. <https://doi.org/10.12989/sem.2015.55.3.461>
9. Sheidaii, M. R., & Gordini, M. (2015). Effect of Random Distribution of Member Length Imperfection on Collapse Behavior and Reliability of Flat Double-Layer Grid Space Structures. *Advances in Structural Engineering*, 18(9), 1475–1485. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.18.9.1475>
10. Türker HT, Coşkun H, Aksoğan O; (2004). The Factors Affecting the Structural Efficiency of Double Layer Grids A Case Study; Çukurova Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29–38.
11. Türker, H. T. (2004). Eleman Boylarındaki Küçük Kusurların Çelik Uzay Kafes Sistemlerinin Kapasitesine Etkisinin İrdelenmesi Giriş Bilgisayar Programının Hazırlanması, 6. Çelik Yapılar Sempozyumu, 455–464.
12. Wada, A., & Wang, Z. (1992). Influences of uncertainties on mechanical behavior of a double-layer space truss. *International Journal of Space Structures*. <https://doi.org/10.1177/026635119200700306>
13. Wolfram Research, Inc., Mathematica, Version 11.0, Champaign, IL (2017).
14. Yadollahi, M. M., Gül, R., Polat, R., Yadollahi, B. M., & Gül, M. S. (2011). The Effect of Initial Geometric Imperfection on the Load Bearing Capacity of Double Layer Barrel Vault Space Structures. 3rd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, (May), 25–28.