

Araştırma Makalesi - Research Article

Tonoz Tipi Çelik Izgara Kabuk Sistemlerde Modüler Değişimlerin Yapı Davranışına Etkisi

Effect of Modular Changes on Structural Behavior in Vault Type Steel Gridshell Systems

İlyas Devran Çelik¹, Taha Koç^{2*}

Geliş / Received: 22/07/2022

Revize / Revised: 23/10/2022

Kabul / Accepted: 19/12/2022

ÖZ

Günümüzde kent nüfusları gitgide artış göstermektedir. Kent nüfuslarının artmasıyla beraber yüksek insan kullanım kapasitesine sahip geniş ve ferah kapalı mekânlar oluşturulma ihtiyacı doğmuştur. Bu ihtiyaç doğrultusunda geniş açıklıkları kolaylıkla geçebilecek yeni taşıyıcı sistemler arayışına gidilmiştir. Yakın zamanda keşfedilen modern taşıyıcı sistemlerin başında ızgara kabuk (Gridshell) taşıyıcı sistemler gelmektedir. Izgara kabuk taşıyıcı sistemler ile geniş açıklıklar ekonomik olarak geçilebilmektedir. Bu çalışmada tonoz tipi çelik ızgara kabuk sistemler sayısal olarak incelenmiştir. Oluşturulan sayısal modellerde tonoz tipi çelik ızgara kabuk sistemler sabit basıklık oranı için dörtgen, üçgen ve altıgen modül geometrileri dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında tonoz tipi çelik ızgara kabuk sistemleri, 3 farklı modül geometrisi için analiz edilmiştir. Analizlerde değişken açıklıklar için en uygun modül geometrisi, en uygun modül geometrisine ait en uygun modül boyu ve taşıyıcı sistemin m² düşen taşıyıcı sistem ağırlığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre tüm açıklıklarda dörtgen modül geometrisine sahip modellerde en az m²'ye düşen taşıyıcı sistem ağırlığına ulaşılmıştır. Açıklık artıca altıgen modül geometrisinin dörtgen modül geometrisine alternatif olabileceği görülmüştür. Çalışma da ayrıca analiz edilen sistemler simetrik kar, asimetrik kar ve rüzgâr yükleme durumları altında analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen düşey ve yatay yer değiştirmeler karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda altıgen modül geometrisi diğer 2 modül geometrisine göre yer değiştirmelere en dirençli modül geometrisi olduğu tespit edilmiştir. Yer değiştirme karşılaştırmaları incelendiğinde; tonoz tipi çelik ızgara kabuk sistemlerde asimetrik yükleme durumunda sistemlerin yer değiştirmelerinde olumsuz ölçüde artış meydana geldiği belirlenmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar tonoz tipi çelik ızgara kabuk sistemlerde farklı modül geometrileri için tasarımcılara bir perspektif sunacaktır.

Anahtar Kelimeler- *Izgara Kabuk, Tonoz, Modül Geometrisi, Modül Boyu, Konstrüksiyon Ağırlığı*

ABSTRACT

Today, population in urban areas is increasing gradually. With the increase in the urban population, the need to create large and spacious indoor spaces with high capacity for human usage has arisen. Along with this need, a search was made for new carrier systems that could easily cross wide spans in order to create spaces high volume spaces. Gridshell carrier systems are the leading modern carrier systems that have been discovered recently. In this study, vault type steel gridshell systems were numerically investigated. In the numerical models created, rectangular, triangular, and hexagonal module geometries were taken into account for the fixed flatness ratio of the vault type steel grid shell systems. Within the scope of the study, vault type steel grid shell systems were

¹ İletişim: devrancelik@sdu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-9011-4041>)

İnşaat Mühendisliği, Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Isparta, Türkiye

^{2*} Sorumlu yazar İletişim: taha.koc0@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-1802-9066>)

İnşaat Mühendisliği, Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Isparta, Türkiye

analysed for 3 different module geometries. In the analysis, the most suitable module geometry for variable spans, the most suitable module size of the most suitable module geometry and the carrier system weight per m² of the carrier system were determined. According to the results obtained, the weight of the carrier system, which decreased to at least m², was reached in the models with rectangular module geometry in all spans. It has been seen that the hexagonal module geometry can be an alternative to the rectangular module geometry as the span increases. In the study, the analysed systems were under symmetric snow, asymmetric snow, and wind loading conditions and the vertical and horizontal displacements span were compared. As a result of the analysis, it was determined that the hexagonal module geometry was the most resistant to displacements compared to the other 2 module geometries. When the displacement comparisons are examined; In the case of asymmetrical load in vault type steel grid shell systems, it was determined that the displacements of the systems increased negatively. The results obtained in this study will provide a perspective to the designers for different module geometries in vault type steel grid shell systems.

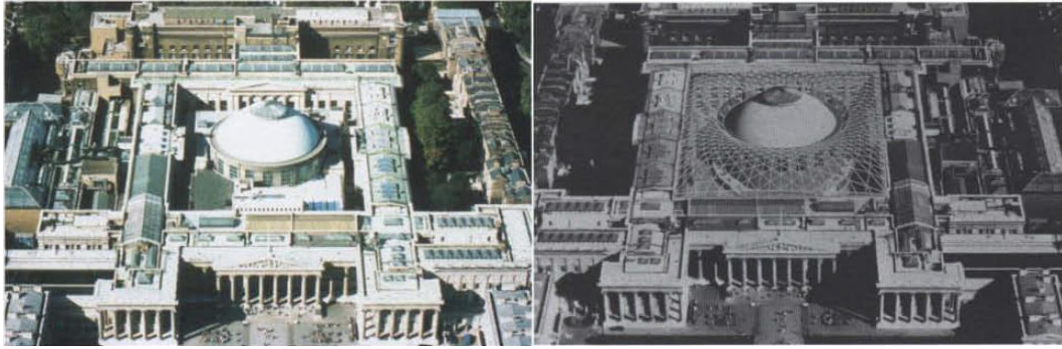
Keywords- Gridshell, Vault, Module Geometries, Module Length, Constructions Weight

I. GİRİŞ

Günümüzde birçok ülkede kentlerin nüfusu gittikçe artmaktadır. Nüfusun artmasıyla beraber şehirlerde toplu yaşam alanlarının genişlemesi ihtiyacı doğmuştur [1]. Ferah yaşam alanları ve yüksek hacimli alanlar oluşturmak amacıyla kent yapılaşmasında yeni yapı mecburiyeti meydana gelmiştir [1,2]. Meydana gelen yapılaşma ihtiyacıyla beraber mimari görünümler dikkate alınarak inşaa edilecek yapılarda kalabalık insan hareketliliğini kolaylıkla karşılayabilecek yapılar için yeni taşıyıcı sistemler tasarlanmaya başlanmıştır [1-4]. Gelişen teknoloji inşaat sektörüne de sirayet etmiştir. Öncelikli olarak tasarlanacak yapılarda kalabalık insan hareketliliğini karşılayabilmesinin yanında ekonomik olması, hafif olması, güvenilir olması ve kullanılabilir olması gibi faktörler dikkate alınmıştır. Dikkat edilen faktörler ışığında Gridshell (Izgara kabuk) taşıyıcı sistemler geliştirilmiştir [2,4,5]. Oluşturulan ızgara kabuk yapılar hafiflik, kullanım ömürlerinin uzun olması ve kent mimarisine kattığı estetik görünümü ile ön plana çıkmaktadır. Izgara kabuk sistemlerin yapı elamanlarında alüminyum, fiber glass, ahşap ve çelik yapı malzemesi kullanılabilmektedir [1,2,5].

Izgara kabuk sistemler güncel mimari algılara yeni bir soluk getirmiştir. Yapı tasarımında sağladığı kolaylıkların yanında mekân tasarımında da büyük avantajları bulunmaktadır [1,3,4]. Büyük açıklıkları kolaylıkla geçebilmesinin yanında yapı yüksekliği ile rahat ve konforlu mekânlar oluşturulabilmektedir [6,7]. Yüksek açıklıkların rahatlıkla geçilmesiyle beraber mekân tasarımında en önemli unsurlardan olan ölü alan oluşmasının önüne geçilmektedir. Böylelikle yoğun insan hareketi olacak mekânlarda karmaşanın önüne geçilebilmektedir. Mekân aydınlatmaları da ızgara kabuk sistemlerde estetik bir görünüm ile sağlanabilmektedir [1,8-10].

Dünyada yoğun insan hareketliliği olan birçok noktada kullanılmaktadır. Izgara kabuk sistemler başlıca müze, alışveriş merkezleri, kongre merkezleri, sergi alanları, botanik bahçelerinde tercih edilmektedir [1,9-13]. İngiltere'nin Londra şehrinde bulunan British Museum yapısının çatısında çelik ızgara kabuk konstrüksiyon uygulaması yapılmıştır. Dünyanın en eski müzelerinden olan British Museum dünyanın birçok yerinden turiste misafirlik eden yoğun insan hareketliliği oluşan mekânların başında gelmektedir. Geniş alana sahip olan çatısında farklı yüzey geometrisiyle beraber üçgen modül geometrisi ile birlikte çelik ızgara kabuk sistem kullanılarak estetik bir görünüm elde edilmiştir. Yeni eklenen çelik konstrüksiyon çatı kaplamasında cam yapı malzemesi kullanılarak hem alan aydınlatma sorununun önüne geçilmiş hem de kullanım ömrü uzun olan bir yapı oluşturulmuştur [3-5]. Şekil 1.'de British Museum binasının çatı kısmının uygulama öncesi ve sonrasına ait üstten görünümüne yer verilmiştir.



Şekil 1. British Museum çatı çelik ızgara kabuk uygulaması [4]

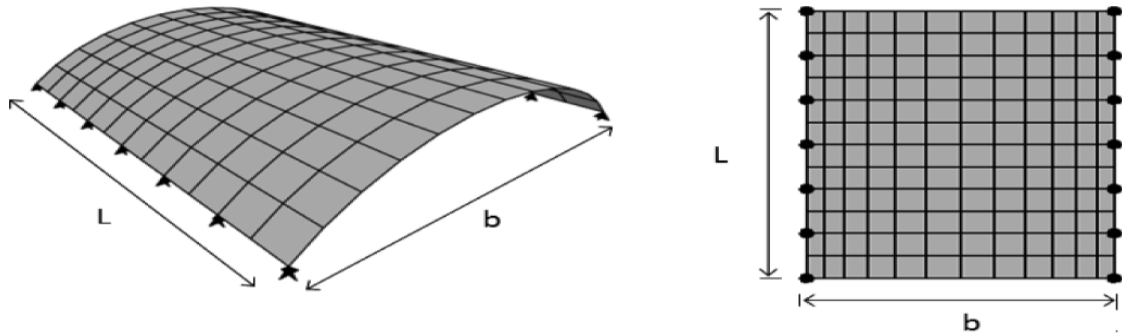
Estetik görünüşleri ile daha çok kültür sanat yapılarında kullanılan ızgara kabuk sistemlerin kullanıldığı bir diğer yapı ise Almanya'nın Berlin kentinde bulunan Deutsches Historisches Museum yapısıdır. British Museum yapısından farklı olarak üçgen modül geometrisi yerine dörtgen modül geometrisi tercih edilmiştir. Yapının avlu kısmında kullanılan ızgara kabuk sistem, 1.75metremodül boylarında dörtgen geometrisinden oluşmuştur. Avlu kısmı 40x40 metrelik bir alana sahiptir. Çift eğrilikli oluşturulan ızgara kabuk sistem modern yapısıyla yapıya estetik bir görünüm sağlamıştır [5,14,15]. Şekil 2.'de Deutsches Historisches Museum binasında uygulanan çelik ızgara kabuk uygulamasına yer verilmiştir.



Şekil 2. Deutsches Historisches Museum çatı çelik ızgara kabuk uygulaması [14]

Abedi ve ark.[16], çalışmalarında lamel desene sahip tek katmanlı ızgara kabuk tonoz sistemlerde aşık etkilerini göz önüne alarak stabilite davranışlarını incelemişlerdir. Tek katmanlı ızgara kabuk sistemlerin en büyük kullanım nedenlerinin geniş alanları kapatmak ve mimari görünüşlerinin güçlü olmasını söylemişlerdir. Bu tür yapılarda çok fazla ince elemanın bulunmasından dolayı stabilite analizi yapılması gerektiği üzerinde durmuşlardır. Çalışmalarında analizler için sonlu elemanlar programı olan Abaqus kullanmışlardır. Analizler, 0.1 ve 0.3 basıklık oranına sahip 2 farklı model üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Modeller ölü yük, kar yükü, rüzgar yükü, deprem yükü ve sıcaklık değişimi altında değerlendirilmiştir. Çalışmada ayrıca nadir ve orta kar yükü için 0.1 basıklık oranına sahip modelle sırasıyla 70x40x2 cm 100x50x3, 0.3 basıklık oranına sahip modelde ise 40x20x1.5 ve 40x40x1.5 cm kutu profil tercih edilmiştir. Çalışma sonucunda aşık yapılarının kararsızlık modunu değiştirebileceğini ve asimetrik kar yükleme durumunda yapısal taşıma kapasitesinin simetrik kar yükleme durumuna göre daha az artış olduğunu söylemişlerdir [16]. Kaveh ve Mirzaei [17], çalışmalarında 3 farklı konfigürasyona sahip tek katmanlı ızgara kabuk sistemler için 5 farklı basıklık oranı kullanarak Meta-sezgisel algoritma adı verdikleri bir analiz yöntemini kullanarak oluşturdukları modellere boyut optimizasyonu uygulamışlardır. Çalışmalarında tüm modeller Asce 7-10 yönetmeliğine uygun olarak çelik boru profil tercih etmişlerdir. Çalışmalarında analizler sonucunda maksimum yer değiştirmeler, yapı elemanlarının maksimum taşıma kapasiteleri ve metrekareye düşen taşıyıcı sistem ağırlığı parametrelerine bakılarak 0.17 basıklık oranında en ekonomik tasarım elde etmişlerdir. Sheidai ve ark. [18], çalışmalarında 4 farklı basıklık oranına sahip tek katmanlı ızgara kabuk sistemleri incelemişlerdir. Çalışma kapsamında oluşturulan tüm modellerde dörtgen modül

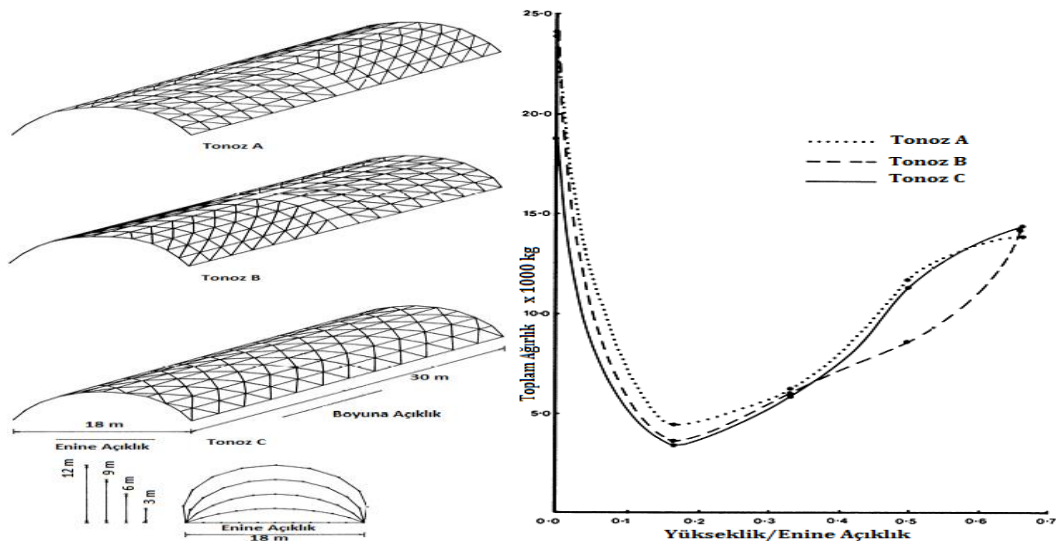
geometrisi ve yapı elemanlarında ise çelik kutu profil tercih etmişlerdir. Tüm modellerde enine açıklık 22 metredir. Boyuna açıklık ise yakın değerlere sahip olmasına karşın farklılık göstermektedir. Modellerin sahip oldukları basıklık oranları ise 0.12, 0.18, 0.23, 0.29 olarak belirlenmiştir. Çalışmalarının sonucunda tek katmanlı ızgara kabuk sistemlerde eğim açısının çökme yükünü direkt etki ettiği ve 0.2 basıklık oranında kritik hassasiyet gösterdiği sonucuna varmışlardır. Çökmenin mesnet noktalarından başladığı ve bundan dolayı bu tür yapılarda mesnet yerleşiminin önemli olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca çalışmalarında tek katmanlı ızgara kabuk sistemlerin daha büyük basıklık oranına sahip olabilme yeteneğine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 3.'te çalışma kapsamında oluşturulan modellerin 3 boyutlu ve üstten görünüşlerine yer verilmiştir. B enine açıklığı, L harfi ise boyuna açıklığı ifade etmektedir [18].



Şekil 3. Oluşturulan modellerin 3 boyutlu ve üstten görünüşleri [18]

Khalili ve ark. [19,20], Çalışmalarında 12 farklı model üzerinden tonoz tipi ızgara kabuk sistemleri incelemişlerdir. Yapılarda üçgen modül geometrisi kullanmışlardır. Çalışmalarında ızgara kabuk sistemlerde 6 kontrol noktası belirlemişlerdir. Analizleri 0.1, 0.3, 0.4, 0.5 basıklık oranlarına sahip modellerde 20, 40 ve 60 metre enine açıklık için gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları kapsamında oluşturulan yapılarda çelik boru profil kullanmışlardır. Analizlerde yapı elemanlarında oluşan maksimum yer değiştirme miktarı ve yapıdaki taban kesme kuvveti parametrelerini karşılaştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda ise tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde enine açıklık arttıkça taban kesme kuvvetlerinin ve yer değiştirmelerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca 0.3 ve 0.4 basıklık oranında 40 ve 60 metre enine açıklıkta yakın yer değiştirmeler meydana gelmiştir.

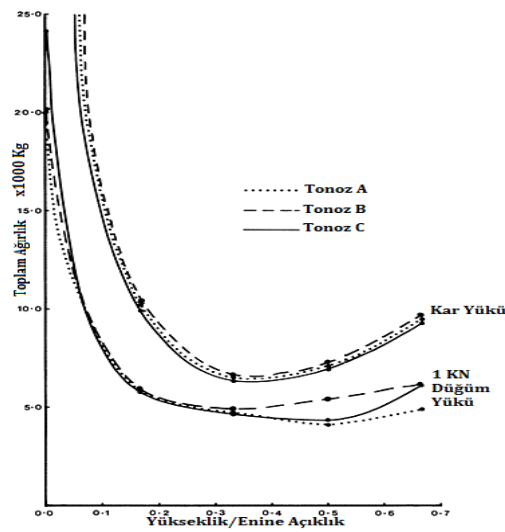
Makowski[21], çalışmasında 3 farklı yüzey geometrisine sahip olan tonoz tipi ızgara kabuk sistemin yapısal davranışını incelemiştir. Çalışma da her 3 tonoz tipi ızgara kabuk sistem 0.17, 0.34, 0.5 ve 0.67 basıklık oranı için analizleri gerçekleştirilmiştir [21]. Şekil 4.'te 3 farklı yüzey geometrisine sahip tonoz tipi ızgara kabuk sistemlere ve analizler sonucunda elde edilen taşıyıcı sistem ağırlıklarına yer verilmiştir.



Şekil 4. 3 farklı yüzey geometrisine sahip tonoz tipi ızgara kabuk sistemler ve taşıyıcı sistem ağırlık karşılaştırılması [21]

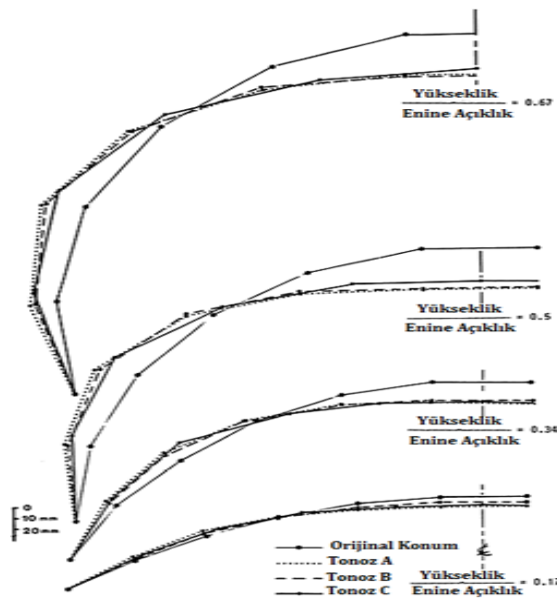
Makowski [21], çalışma kapsamında tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde enine açıklık 18 metre ve boyuna açıklık ise 30 metre olarak belirlenmiştir. Basıklık oranları 0.67, 0.5, 0.34, 0.17 basıklık oranları için sırasıyla yapı yükseklikleri 12 m, 9 m, 6 m, 3 m olarak belirlenmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde tonoz tipi ızgara kabuk sistemler kendi ağırlıkları üzerinden analizleri gerçekleştirilmiş ve 0.17 basıklık oranında en az taşıyıcı sistem ağırlığı elde edilmiştir [21,22].

Çalışmanın diğer bölümünde modeller 1 KN (Kilonewton) düğüm yükü ve kar yükü altında analiz edilmiştir. Analizler sonucunda kar yükü altında tüm 3 farklı yüzey geometrisine sahip tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde 0.34 basıklık oranında en az taşıyıcı sistem ağırlığına ulaşılmıştır [21]. Şekil 5.'te 3 farklı tonoz tipi ızgara kabuk sistemler kar yükü ve 1 KN (Kilonewton) düğüm yükü altında elde edilen taşıyıcı sistem ağırlıklarına ait grafiğe yer verilmiştir.



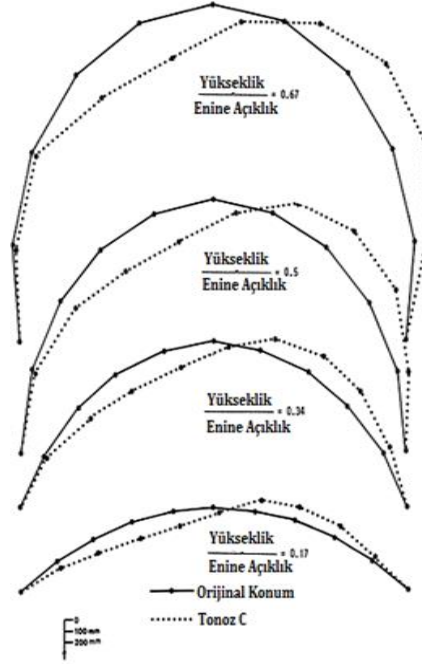
Şekil 5. 3 farklı tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerin kar ve 1 KN düğüm yükü altında taşıyıcı sistem ağırlık karşılaştırılması [21]

Çalışmanın ikinci bölümünde tüm tonoz tipi ızgara kabuk sisteme simetrik yükleme, C tipi tonoz ızgara kabuk sisteme ise asimetrik yükleme gerçekleştirilmiştir [21]. Şekil 6'da tüm tonoz tipi ızgara kabuk sistemlere uygulanan simetrik yükleme durumunda meydana gelen yer değiştirmeler ölçekli olarak yer verilmiştir.



Şekil 6. 3 farklı tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde simetrik yükleme durumunda oluşan yer değiştirme [21]

Makowski [21], çalışmanın son bölümde C tipi tonoz ızgara kabuk sisteme asimetrik yükleme altında analizleri gerçekleştirmiştir. Şekil7.'de C tipi tonoz ızgara kabuk sistemde asimetrik yükleme durumunda oluşan yer değiştirmelere ölçekli olarak yer verilmiştir. Asimetrik yükleme durumunda C tipi tonoz ızgara kabuk sistemde yer değiştirmelerde simetrik yüklemeye göre artış gözlenmiştir. Tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde asimetrik yükleme durumu taşıyıcı sistemi olumsuz etkilemektedir [21].



Şekil 7. C tipi tonoz ızgara kabuk sistemde asimetrik yükleme durumunda oluşan yer değiştirme [21]

Yapılan literatür araştırmasında ızgara kabuk sistemlerin birçok farklı formda tasarlanabildiği görülmüştür [21,23-27]. Izgara kabuk sistemlerde yüzey geometrisinin, modül geometrisinin yanında yapının yükseklik/açıklık (Basıklık Oranı) oranının büyük önem arz ettiği görülmüştür [17,18-,23-27,]. Literatürde bu tür taşıyıcı sistemlerde 0.2 basıklık oranının altında yapısal sorunlar ortaya çıktığı sonucuna varılmıştır [18,21,28-30]. Tonoz tipi ızgara kabuk sistemler üzerine yapılan literatür çalışmasında Makowski [21,22], Abedi ve ark. [16], Kaveh ve Mirzaei [17], Khalili ve ark. [19,20], çalışmaları dikkate alınarak ve tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde kullanım amacına uygun yapı oluşturma amacıyla çalışma kapsamında oluşturulan tüm modellerde basıklık oranı 0.35 olarak belirlenmiştir.

Çalışmada tonoz tipi çelik ızgara kabuk taşıyıcı sistemlerde ekonomik olarak yüksek açıklık geçebilmek amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında yapılarda yüksek hacim oluşturma, ekonomik yapı oluşturma ve yapı güvenliği ön planda tutulmuştur. Çalışma, farklı modül geometrilerinden meydana getirilerek tasarlanan tonoz tipine sahip çelik ızgara kabuk çelik konstrüksiyonlar için tasarımcılara yol gösterecektir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

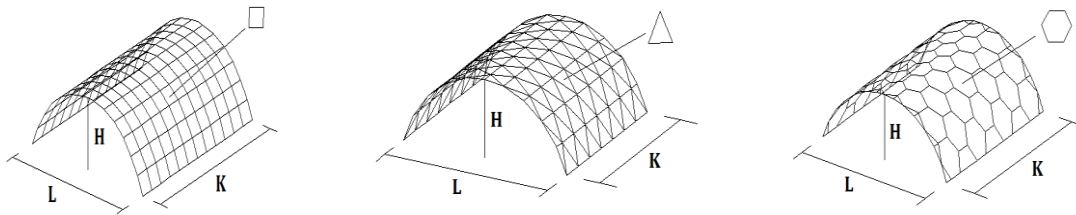
Çalışmada çevresel koşullar altında tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerin taban alanına düşen taşıyıcı sistem ağırlığı cinsinden farklı açıklıklar için karşılaştırılması amaçlanmıştır. Yapıların modellenmesinde yapısal analiz programı olan SAP2000 kullanılmıştır. Izgara kabuk sistemlerde sistemlerin tasarımında literatürde; alüminyum, fiberglass, ahşap ve çelik yapı malzemesi tercih edilebilmektedir. Tercih edilen malzeme tipine göre farklı birleşim detayları oluşturulmaktadır [1,3,10,11]. Çalışma kapsamında oluşturulan modellerde S275 standardına sahip yapı çeliği tercih edilmiştir. Tablo 1'de S275 standardına sahip yapı çeliğini malzeme özelliklerine yer verilmiştir.

Tablo 1. S275 Malzeme Özellikleri

Malzeme Özellikleri	N/mm ² (Newton/milimetrekare)
Akma Gerilmesi (Fy)	275
Kopma Gerilmesi (Fu)	430

Öncelikli olarak modellerde kullanılan yapı elemanlarına kesit tayini yapılmıştır. Yapılar da tasarım aşaması Amerikan AISC 360-10 yönetmeliğine uygun olarak yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında oluşturulan modellerde tasarım aşamasında ASD (Allowable Strength Design) emniyetli dayanıma göre tasarım yöntemi tercih edilmiştir. Tüm modellerde mesnetlenme koşulları ankastre olarak programa tanıtılmıştır.

Modellenen yapılar farklı açıklıklar boyunca 0.35 basıklık oranı için dörtgen, üçgen, altıgen modül geometrileri aralarında yapısal davranışları karşılaştırılmıştır. İlk olarak her 3 modül geometrisi için en uygun modül boyları tespit edilmiştir. Her bir modül geometrisinde yapı ağırlıkları üzerinden en uygun modül boyları bulunularak modül geometrileri kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Şekil 8’de 3 farklı modül geometrisine sahip tonoz tipi ızgara kabuk sistemlere yer verilmiştir.



Şekil 8. Farklı modül geometrilerine sahip ızgara kabuk sistemler

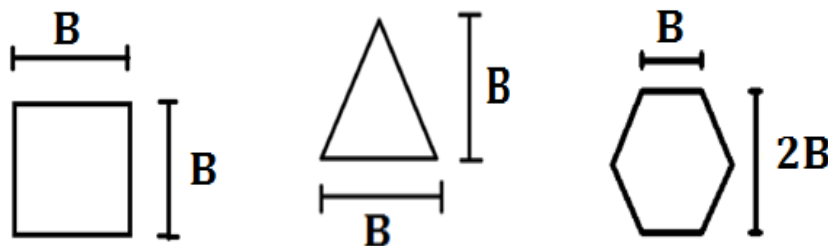
Şekil 8.’de gösterilen modellerde L harfi açıklığı, H harfi yapı yüksekliğini, K harfi ise yapı derinliğini temsil etmektedir.

Modeller 20, 30, 40 ve 50 metre açıklık için analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapı yükseklikleri her açıklık için basıklık oranı 0.35’i sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Tablo 2’de her bir açıklık için belirlenen yapı yüksekliklerine yer verilmiştir.

Tablo 2. Yapı yükseklikleri

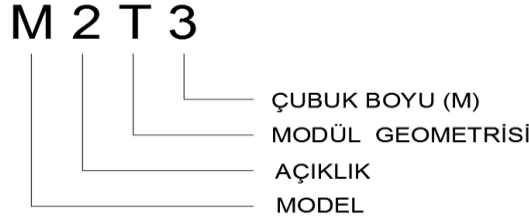
Açıklık (m)	Yapı Yüksekliği (m)
20	7
30	10.5
40	14
50	17.5

Şekil 9.’da 3 modül geometrisi için alt parametre olan modül boyuna yer verilmiştir. Şekilde gösterilen B harfi 3 modül geometrisi içinde modül boyunu ifade etmektedir. Şekil 9.’ da sırasıyla dörtgen, üçgen ve altıgen modül geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 9. 3 modül geometrine ait modül boyu gösterimi

Çalışmada oluşturulan modeller sahip oldukları açıklık, modül geometrisi ve modül boylarına göre 4 haneli kodlanmıştır. Şekil 10'da model numaralarının kodlama gösterimine yer verilmiştir. Açıklık kısaltması açıklık miktarının ilk sayısına uygun olarak yapılmıştır. Modül geometrisinin kodlaması dörtgen için S harfi (Square), üçgen için T harfi (Triangle), altıgen için ise H harfi (Hexagonal) kullanılmıştır.



Şekil 10. Modellerin numaralarının kodlanış gösterimi

Çalışmada ilk olarak 20, 30, 40 ve 50 metre açıklıkta oluşturulan modellerde dörtgen, üçgen, altıgen modül geometrilerinde analizlerde dikkate alınan yüklenme durumları ve sınır koşullar için en uygun modül boyları tespit edilmiştir. Dörtgen ve üçgen modül geometrisinde modül boyu 2 metreden başlayarak yarım metre artırılarak 4 metre modül boyuna kadar analizleri gerçekleştirilmiştir. Altıgen modül geometrisinde ise analizler 3 metre modül boyunda başlamıştır. Tablo 3'te oluşturulan bütün modellere ait geometrik parametrelere ait değerlere yer verilmiştir.

Tablo 3. Model geometrik parametreleri

Açıklık (m)	Model Numaraları	H(m)	K (m)
20	M2S2-M2T2	7	24
	M2S3-M2T3	7	27
	M2H3	7	33
	M2H4	7	32
	M2S3.5-M2T3.5-M2S4-M2T4-M2H3.5	7	28
	30	M3S2-M3T2	10.5
M3S3-M3T3		10.5	27
M3S3.5-M3T3.5-M3S4-M3T4-M3H3.5		10.5	28
M3H3		10.5	33
40	M4S2-M4T2	14	26
	M4S3-M4T3	14	27
	M4H3	14	33
	M4S3.5-M4T3.5 M4H3.5	14	28
50	M5S2-M5T2	17.5	26
	M5S3-M5T3	17.5	27
	M5S3.5-M5T3.5-M5H3.5-M5S4-M5T4	17.5	28
	M5H4	17.5	32
	M5H3	17.5	33

Tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde K harfi ile gösterilen yapı derinliği değişkenlik göstermektedir. Yapı derinliği modül geometrilerine göre 24 metre ile 33 metre aralığında seçilmiştir. Modellerde 140x140 dan başlayarak maksimum 400x400 SHS tercih edilmiştir. Analizlerde kullanılan kesitlerde üretim ve montaj aşamasında kolaylık sağlaması nedeniyle kesit ebatlarında değişiklik yapılmamış ve cidar kalınlıkları maksimum 15 mm'yi geçmeyecek şekilde tasarımı yapılmıştır. Tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde farklı profil kesit kullanılması montaj aşamasında birleşim bölgelerinde montaj zorluğu meydana getirmektedir. Tablo 4'te çalışmada kabul edilen sınır durum ve yüklenme koşulları için optimum sınırları belirlenen modellerde kullanılan profil kesit özelliklerine yer verilmiştir.

Tablo 4. Optimum Modellerde kullanılan kesit özellikleri

Açıklık (m)	Optimum Model Numaraları	Kullanılan Profil (mm)
20	M2S4	SHS140x140X4/7/8
	M2T4	SHS140X140X4/5
	M2H3.5	SHS250X250X4/5/./9
30	M3S4	SHS220X220X4/5/./8
	M3T4	SHS200X200X4/7
	M3H3	SHS280X280X4/5/./9/11/13
40	M4S3	SHS280X280X4/5/6/7/8
	M4T3.5	SHS250X250X4/5/6/10
	M4H3	SHS350X350X4/5/6/./10
50	M5S4	SHS350X350X4/5/6/7/8
	M5T4	SHS350X350X4/5/9
	M5H3	SHS400X400X4/5/./12

Optimum modeller 3 yükleme durumu altında analiz edilmiş ve yer değiştirme miktarları hesaplanmıştır. Analizlerde kullanılan yükler G (Ölü Yük) , K (Kar Yüğü), SK (Sol Kar Yüğü), SR (Sol Rüzgâr) yüklemelerinden oluşmaktadır. Tanımlanan yükler üç şekilde kombine edilmiş ve sonuçlar bu durumlar için elde edilmiştir.

- G+K
- G+SK
- G+SR

III. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Çalışmada oluşturulan modellerin tümünde SHS (Square Hollow Section) çelik kutu profil kesit kullanılmıştır. Tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde genellikle ekstenel basınç altında kritik burkulmalardan dolayı gevrek göçme meydana gelmektedir. Bu sebepten dolayı tasarım aşamasında yapı elemanlarına kesit tayini yapılırken yapı elemanlarının kapasitelerinin %70 kapasiteyi geçmeyecek şekilde kesit tayini yapılmıştır. Kapasite sınırının %70'nin altında tutulması ile kesitlere gelen maksimum yük değerinin, o kesit için hesaplanan kritik burkulma yükünün ortalama 2/3'de kalınması amaçlanmıştır.

Tasarlanan sistemlerde açıklık boyunca yer değiştirme rijitliği diğer yöndeki yer değiştirme rijitliğinden görece olarak düşük olması sebebi ile tüm modellerde açıklık doğrultusu olan X yönündeki doğal titreşim periyotları karşılaştırılmıştır. Modellerdeki eksen yerleşimi şekil 7 üzerinde gösterilmiştir. Tablo 5'te 20 metre açıklığa ait modellerin Modal analiz sonucunda elde edilen X yönü 1. Doğal titreşim periyotlarına yer verilmiştir.

Tablo 5. 20 metre açıklıkta oluşturulan modellerin 1. doğal titreşim periyot değerleri

Açıklık (m)	Modül Geometrisi	Modül Boyu(m)	X Yönü 1.Doğal Titreşim Periyotları (saniye)
20	Dörtgen	2	0.465
		3	0.418
		3.5	0.407
		4	0.456
20	Üçgen	2	0.542
		3	0.452
		3.5	0.504
		4	0.484
20	Altıgen	3	0.256
		3.5	0.289
		4	0.282

Tablo 5'te 20 metre açıklık için oluşturulan modellerin 1. Doğal titreşim periyotları incelendiğinde en rijit yapı davranışı diğer iki modül geometrisine göre altıgen modül geometrisinde olduğu görülmektedir. Altıgen modül geometrisinde 1.doğal titreşim periyotları 3 metre modül boyunda 0.256 saniye, 3.5 metrelik modül boyunda 0.289 saniye, 4 metrelik modül boyunda ise 0.282 saniye olarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 6’da 30 metre için oluşturulan dörtgen, üçgen, altıgen modül geometrilerinde modellenen yapıların X yönü 1.doğal titreşim periyot değerlerine yer verilmiştir.

Tablo 6. 30 metre açıklıkta oluşturulan modellerin 1.doğal titreşim periyot değerleri

Açıklık (m)	Modül Geometrisi	Modül Boyu(m)	X Yönü 1.Doğal Titreşim Periyotları (saniye)
30	Dörtgen	2	0.694
		3	0.535
		3.5	0.594
		4	0.586
30	Üçgen	2	0.770
		3	0.670
		3.5	0.660
		4	0.635
30	Altıgen	3	0.475
		3.5	0.444

Tablo 6.’da 30 metre açıklık için modellenen yapıların 1.doğal titreşim periyotları incelendiğinde 20 metre açıklıkta da olduğu gibi altıgen modül geometrisi en rijit yapı görülmüştür. Altıgen modül geometrisini, dörtgen modül geometrisi takip etmiştir. 30 metre açıklıkta üçgen modül geometrisinde en yüksek 1. Doğal titreşim periyot değerleri görülmüştür.

Tablo 7’de 40 metre açıklıkta oluşturulan modellerin X yönü 1.doğal titreşim periyotlarına yer verilmiştir.

Tablo 7. 40 metre açıklıkta oluşturulan modellerin 1.doğal titreşim periyot değerleri

Açıklık (m)	Modül Geometrisi	Modül Boyu(m)	X Yönü 1.Doğal Titreşim Periyotları (saniye)
40	Dörtgen	2	0.987
		3	0.827
		3.5	0.824
40	Üçgen	2	0.963
		3	0.915
		3.5	0.887
40	Altıgen	3	0.654
		3.5	0.709

Tablodaki 1.doğal titreşim periyot değerleri incelendiğinde de en rijit yapı davranışı altıgen modül geometrisinde gerçekleşmiştir. Altıgen modül geometrisi 0.65-0.7 saniye periyot değerleri gözlenirken dörtgen ve üçgen modül geometrilerinde 0.8-1 saniye aralığında periyot değerleri gözlenmiştir.

Tablo 8’de 50 metre açıklıkta oluşturulan modellerin X yönü 1.doğal titreşim periyotlarına yer verilmiştir.

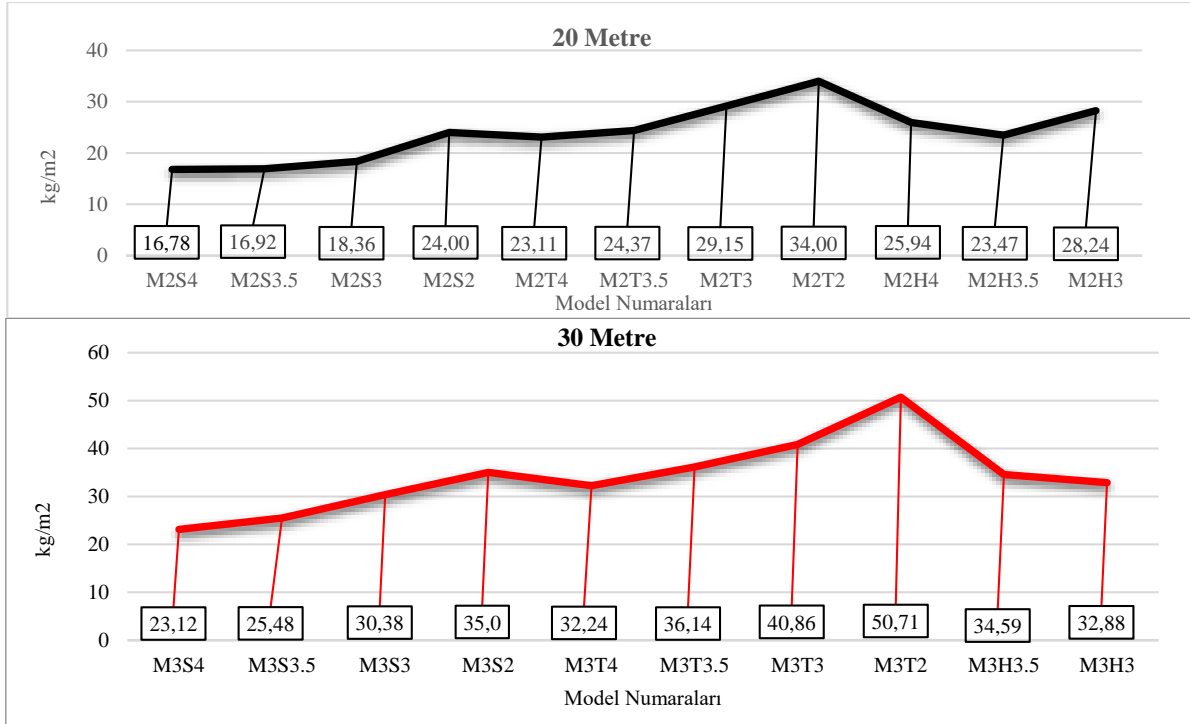
Tablo 8. 50 metre açıklıkta oluşturulan modellerin 1.doğal titreşim periyot değerleri

Açıklık (m)	Modül Geometrisi	Modül Boyu(m)	X Yönü 1.Doğal Titreşim Periyotları (saniye)
50	Dörtgen	2	1.065
		3	1.024
		3.5	1.017
		4	1.007
50	Üçgen	2	1.249
		3	1.015
		3.5	1.016
		4	1.006
50	Altıgen	3	0.881
		3.5	0.870
		4	0.890

Çalışmadaki son açıklık olan 50 metre açıklıkta modellenen yapıların 1.doğal titreşim periyotları incelendiğinde en rijit yapı davranışı diğer tüm açıklıklarda olduğu gibi altıgen modül geometrisinde görülmüştür.

Altıgen modül geometrisinde yaklaşık 0.88 saniye periyot değerleri gözlenirken dörtgen ve üçgen modül geometrilerinde 1 saniye civarlarında periyot değerleri gözlenmiştir.

Çalışmada kullanılan modüllerin metrekareye düşen taşıyıcı sistem ağırlıkları bakımından kıyaslanması amacıyla, her bir açıklık için 150 kg/m² yayılı yük durumu için kesit dağılımları hesaplanmıştır. Şekil 11.'de 20 ve 30 metre açıklıklarda analizleri gerçekleştirilen modellerin m²'ye düşen kg cinsinden metrekareye düşen taşıyıcı sistem ağırlıklarına yer verilmiştir.



Şekil 11. 20 ve 30 metre açıklık için oluşturulan modellerin kg/m² cinsinden ağırlık karşılaştırılması

Şekil 11 incelendiğinde 20 metre açıklık için dörtgen modül geometrisine en uygun modül boyu 4metre, üçgen modül geometrisinde 4 metre, altıgen modül geometrisinde ise 3.5 metre modül boyu diğer modül boylarına sahip modellere göre daha az taşıyıcı sistem ağırlığına sahiptir. 30 metre açıklık için ise dörtgen modül geometrisinde 4 metre, üçgen modül geometrisinde 4 metre, altıgen modül geometrisinde ise 3 metre modül boyunda en az metrekareye düşen taşıyıcı sistem ağırlığına ulaşılmıştır.

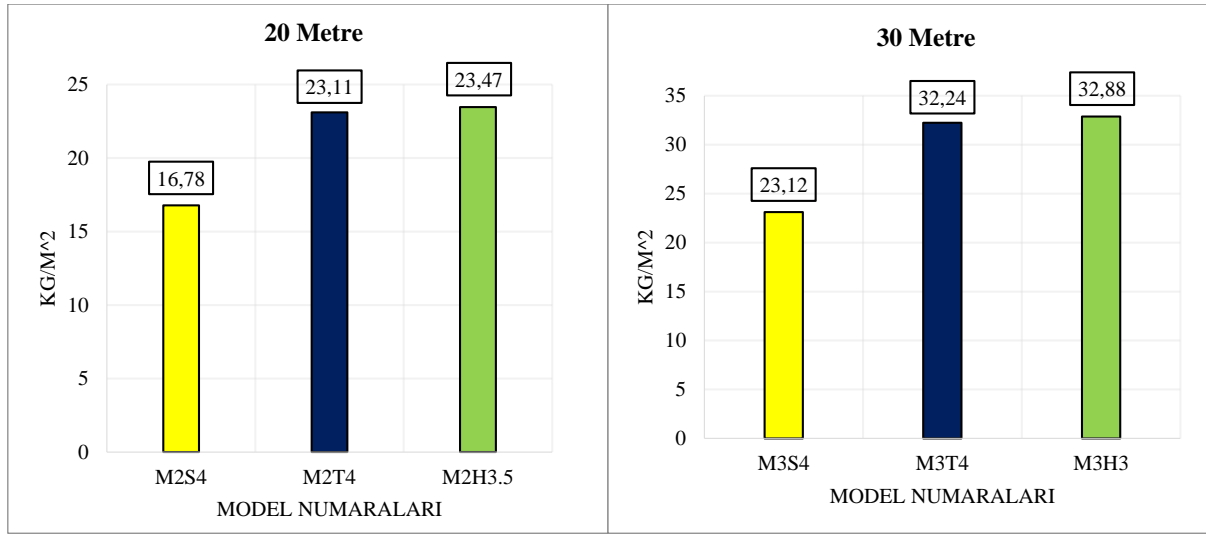
Analizler 40 ve 50 metre açıklık da gerçekleştirilmiştir. Şekil 12.'de 40 ve 50 metre açıklığa sahip yapıların m²'ye düşen kg cinsinden taşıyıcı sistem ağırlıkları gösterilmiştir.



Şekil 12. 40 ve 50 metre açıklık için oluşturulan modellerin kg/m² cinsinden ağırlık karşılaştırılması

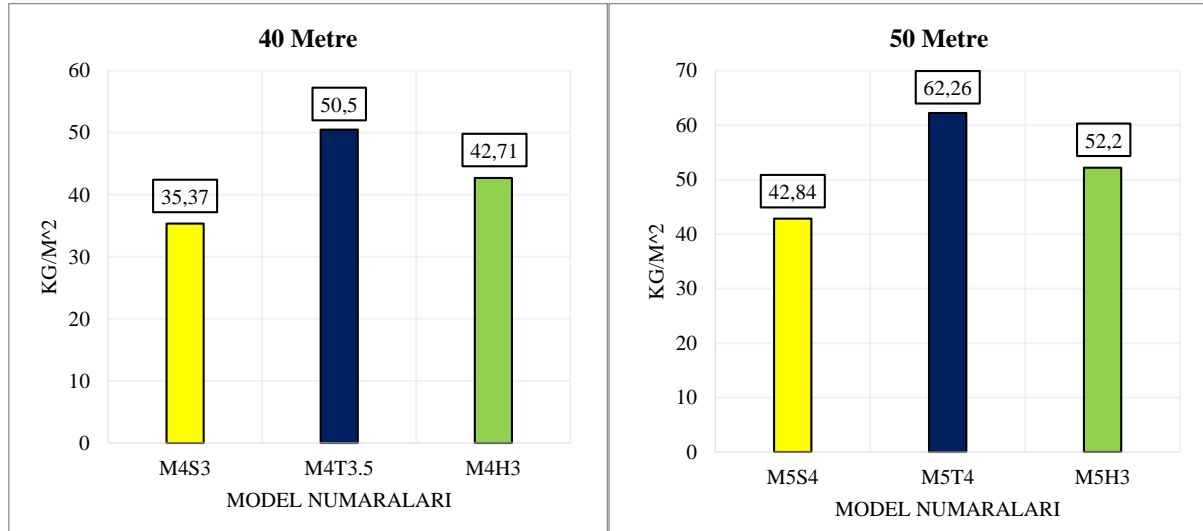
Şekil 12. incelendiğinde 40 metre açıklık için dörtgen modül geometrisinde en uygun modül boyu 3 metre, üçgen modül geometrisinde 3.5 metre, altıgen modül geometrisinde ise 3 metre modül boyu diğer modül boylarına sahip modellere göre daha az taşıyıcı sistem ağırlığına sahiptir. 50 metre açıklık için ise dörtgen modül geometrisi ve üçgen modül geometrisi için 4 metre, altıgen modül geometrisi içinse 3 metre modül boyunda en az taşıyıcı sistem ağırlığına ulaşılmıştır. Bütün açıklıklara bakıldığında dörtgen ve üçgen modül geometrisi için 4 metrelik modül boyu en uygun modül boyu olmuştur. 40 metre açıklık istisna olarak dörtgen ve üçgen modül geometrisinde farklılık oluşmuştur. Dörtgen modül geometrisinde modül boyu 1 metre azalarak 3 metre olurken, üçgende ise 0.5 metre modül boyu azalarak 3.5 metre modül boyunda en uygun sonuç yakalanmıştır. Altıgen modül geometrisinde ise 30, 40 ve 50 metre açıklıklarda en uygun boyu 3 metre olarak gerçekleşirken 20 metre açıklık da modül boyu diğer açıklıklara göre 0.5 metre artarak, 3.5 metre modül boyu olarak gerçekleşmiştir.

Çalışmada tüm açıklıklarda dörtgen, üçgen ve altıgen modül geometrisi için en uygun modül boyu tespit edilmiştir. En uygun modül boyları tespit edilen modül geometrileri için açıklık parametresi altında karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 13'te 20 ve 30 metre açıklık için en uygun modül boylarında 3 modül geometrisi kendi aralarında karşılaştırılmıştır.



Şekil 13. 20 ve 30 metre açıklık için en uygun modül boylarında 3 modül geometrisi ağırlık karşılaştırılması

3 modül geometrisi en uygun modül boyları için karşılaştırıldığında hem 20 metre hem de 30 metre açıklıkta metrekareye düşen taşıyıcı sistem ağırlığı en az dörtgen modül geometrisinde elde edilmiştir. Üçgen ve altıgen modül geometrilerine bakıldığında yakın sonuçlar vermiştir. Şekil 14'te 40 ve 50 metre açıklıkta en uygun modül boylarında ortaya çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır.



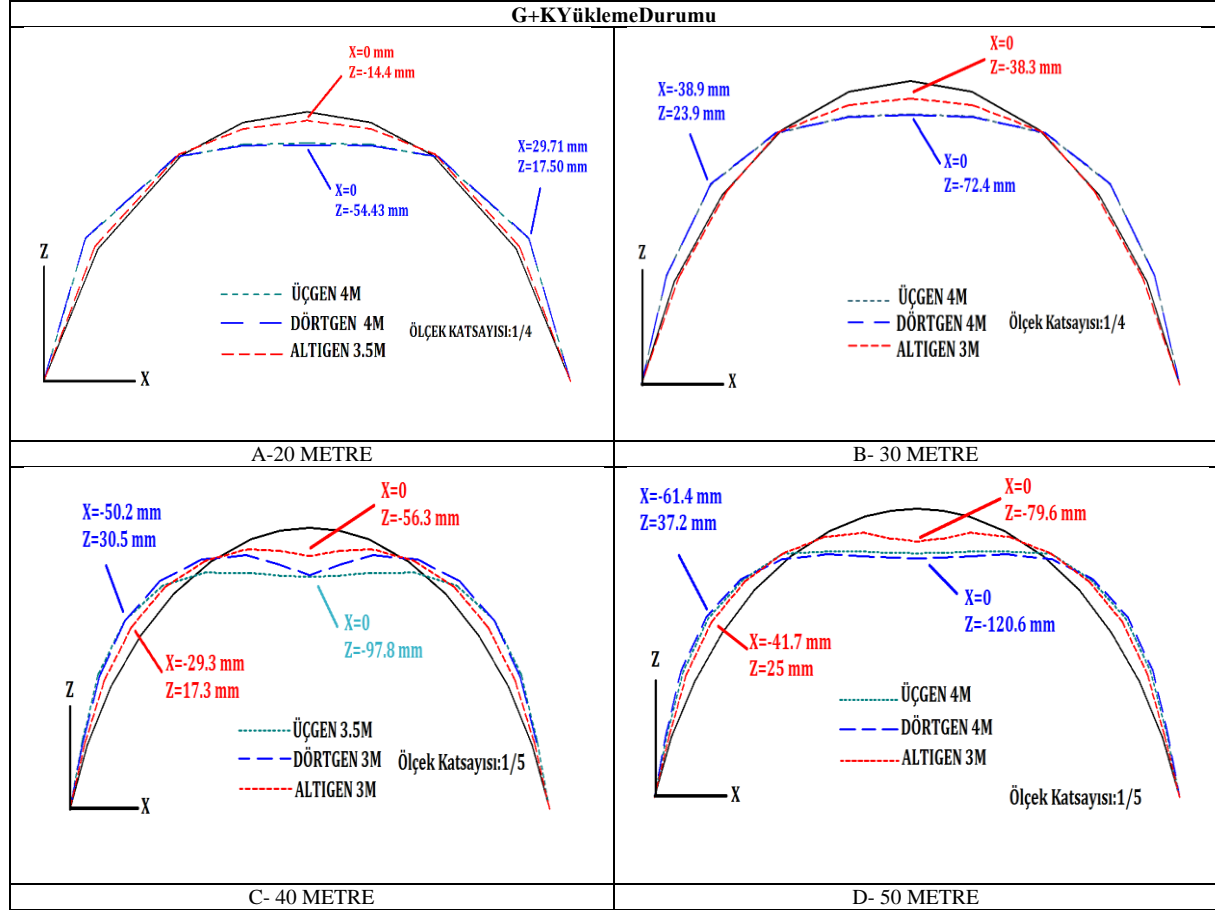
Şekil 14. 40 ve 50 metre açıklık için en uygun modül boylarında 3 modül geometrisi ağırlık karşılaştırılması

40 ve 50 metre açıklıkta da diğer açıklıklarda olduğu gibi metrekareye düşen taşıyıcı sistem ağırlığı en az dörtgen modül geometrisinde sağlanmıştır. Bu açıklıklarda diğer açıklıklardan farklı olarak üçgen ve altıgen modül geometrilerinde görece farklar oluşmuştur. Her iki açıklıkta da dörtgen modül geometrisini altıgen modül geometrisi takip etmiştir. Son açıklık olan 40 ve 50 metre de en fazla metrekareye düşen taşıyıcı sistem ağırlıkları üçgen modül geometrisinde çıkmıştır.

Çalışmanın son bölümünde tüm açıklıklar için her 3 modül geometrisinde en uygun modül boyları tespit edilen yapılar kar, asimetrik kar ve rüzgar yüklemesi altında yer değiştirmeleri incelenmiştir [31]. Modellenen yapılar Isparta ilinin merkez ilçesinde bulunduğu dikkate alınarak kar yüklemesi gerçekleştirilmiştir. Yapılara H/3 yapı yüksekliğine kadar olan yapı elemanlarına 60 kg/m², H/3 yapı yüksekliğinin üzerinde olan yapı elemanlarına ise 120 kg/m² kar yüklemesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada oluşturulan tonoz tipi çelik ızgara kabuk sistemlerde sehim şartı düşey yer değiştirmelerin açıklığa oranı L/300 sınır şartını aşmaması gerekir. L harfi açıklığı ifade

etmektedir. Şehir şartı 20 metre açıklık için 66.67 mm, 30 metre için 100 mm, 40 metre için 133.33 mm ve 50 metre açıklık için ise 166.67 mm'dir.

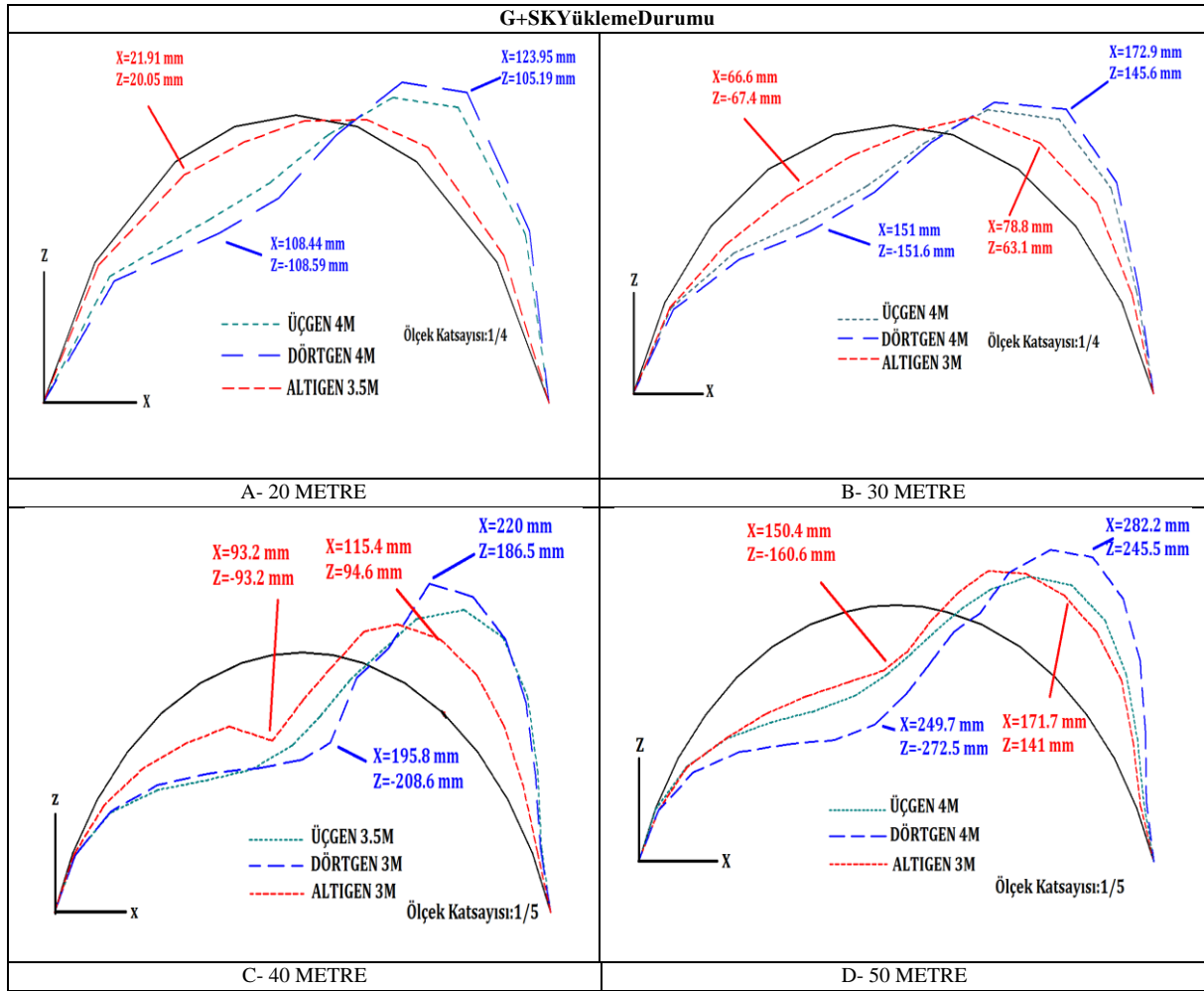
Şekil 15'te 20, 30, 40, 50 metre açıklıklarda en uygun modül boyları belirlenen modül geometrilerine ait yapıların G+K yüklemesi altında meydana gelen yer değiştirmelere yer verilmiştir.



Şekil 15. Tüm açıklıklarda en uygun modellerin G+K yüklemesi durumunda meydana gelen yer değiştirme

Şekil 15.'te m^2 'ye düşen en az taşıyıcı sistem ağırlığı olan modellerde G+K yüklemesinde meydana gelen yer değiştirmeler karşılaştırılmalı gösterimi grafiklerde yer alan ölçek katsayısı kullanılarak gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde tüm açıklıklarda düşey yer değiştirmeye en dirençli modül geometrisinin altıgen modül geometrisi olduğu görülmektedir. Tüm açıklıklarla G+K yüklemesi durumunda şehir şartı sağlanmıştır.

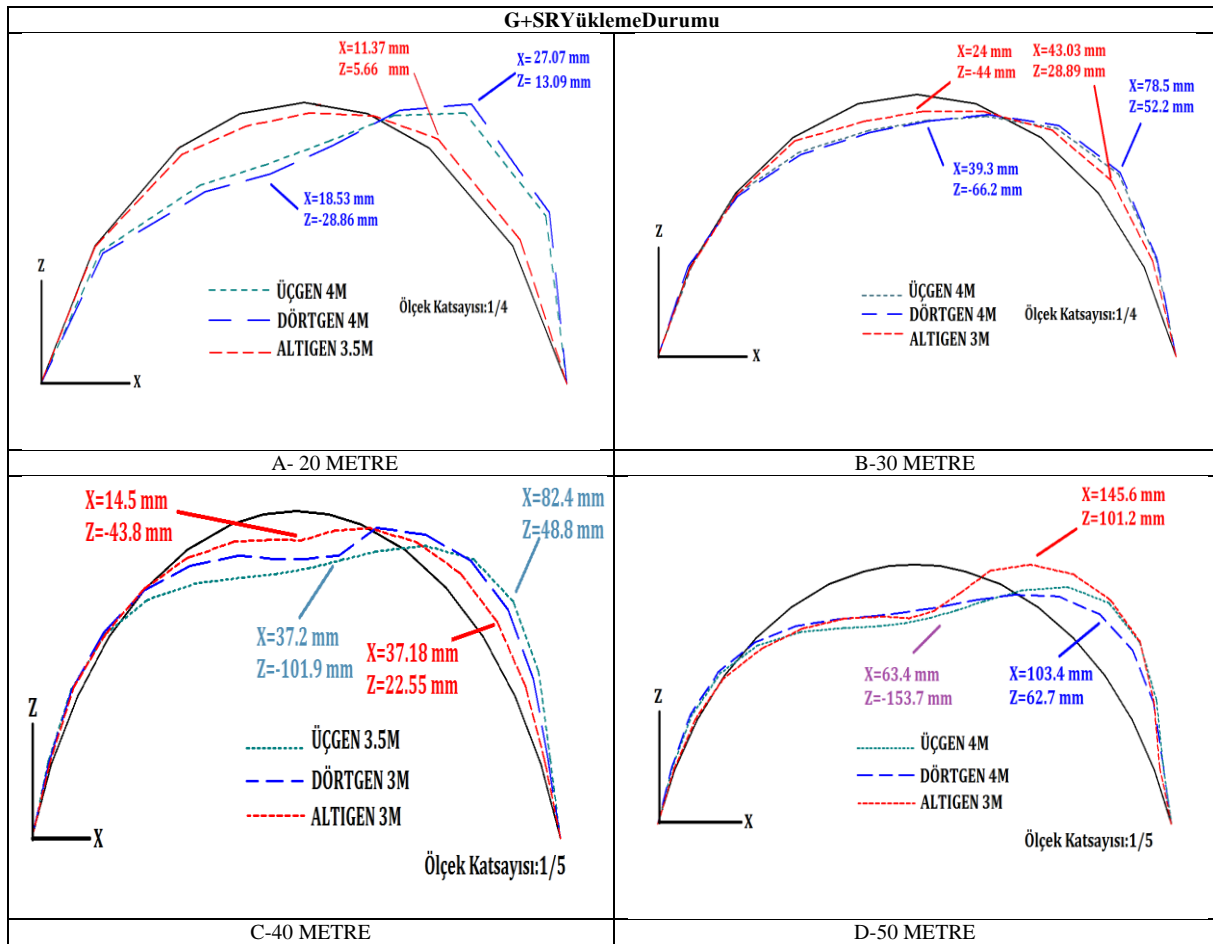
G+K yüklemesi sonrasında m^2 'ye düşen en az taşıyıcı sistem ağırlığı olan modellere asimetrik kar yüklemesi uygulanmıştır. Yapıların sadece sol bölümünde kar durumunun olduğu dikkate alınmıştır. Şekil 16'da G+SK asimetrik kar yüklemesi altında m^2 'ye düşen en az taşıyıcı sistem ağırlığı olan modeller de meydana gelen düşey yer değiştirmelere yer verilmiştir.



Şekil 16. Tüm açıklıklarda en uygun modellerin G+SK asimetrik kar yüklemesi altında meydana gelen yer değiştirme

Şekil 16'da asimetrik kar yüklemesi altında yer değiştirmeler incelendiğinde 20 ve 30 metre açıklıklarda üçgen ve dörtgen modül geometrilerinde yakın yer değiştirmeler ortaya çıkmıştır. Açıklığın arttığı 40 metre açıklıkta altıgen ve dörtgen modül geometrilerinde yapısal davranışı etkileyecek ve göçme mekanizmasını etkileyecek yer değiştirmeler meydana gelmiştir. Yapılan analizde tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde literatürde benzer olarak asimetrik yüklemeye altında tüm modül geometrilerinde yer değiştirmeler artış görülmüştür. Açıklıklarında hepsinde altıgen ve üçgen modül geometrisinde sehim şartı sağlanırken, dörtgen modül geometrisinde sehim şartı sağlanmamıştır. Tüm açıklıklarda dörtgen modül geometrisinde asimetrik kar yüklemesi olumsuz etkilenmiştir.

Şekil 17'dem²'ye düşen en az taşıyıcı sistem ağırlığı olan en uygun modellerde rüzgâr etkisi altında meydana gelen yer değiştirmelere yer verilmiştir.



Şekil 17. Tüm açıklıklarda en uygun modellerin G+SR yüklemeye durumu altında meydana gelen yer değiştirmeler

Şekil 17'de G+SR yüklemeye durumunda meydana gelen yer değiştirmeler incelendiğinde tüm yüklemeye durumunda olduğu gibi yer değiştirmeye en dirençli modül geometrisi altıgen olmuştur. Tüm açıklıklarda G+SR yüklemeye durumunda sehim şartı sağlanmıştır. Dörtgen ve üçgen modül geometrisinin ise yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tonoz tipi ızgara kabuk sistemler incelendiğinde, bu çalışma modül geometrilerinin toplam taşıyıcı sistem ağırlığına doğrudan etki ettiğini göstermektedir. Farklı modül geometrileri ve modül boylarının yapı ağırlığına etkisinin yanında yapı davranışına olan etkisi de göz ardı edilmemelidir. Yapılan analizler sonucunda 20, 30, 40 ve 50 metre açıklıklar boyunca 3 farklı modül geometrilerinin metrekareye düşen taşıyıcı sistem ağırlıkları incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar grafikler yardımıyla karşılaştırılmıştır. Bütün açıklıklar için oluşturulan modellerde 0.35 basıklık oranı sabit tutulmuştur. Tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde yapı derinliğinin burkulma davranışına etki göstermesinden dolayı bütün modül geometrileri ve modül boyları için yapı derinlikleri yakın tutulmuştur.

Çalışmada modellenen tonoz tipi ızgara kabuk sistemler AISC 360-10 Amerikan çelik tasarım yönetmeliğine uygun olarak ASD emniyetli dayanıma göre tasarım metodu ile analizler gerçekleştirilmiştir. Analizi gerçekleştirilen yapılarda çelik kutu profil (SHS) kullanılmış olup, yapı elemanların da profil et kalınlıkları birbirine yakın tercih edilmiştir.

- Çalışmanın ilk bölümünde modellerin analizleri gerçekleştirildiğinde tüm açıklıklarda altıgen modül geometrisi diğer modül geometrileri olan dörtgen ve üçgene göre daha rijit yapı davranışı sergilediği görülmüştür.

- Analizleri gerçekleştirilen modeller daha sonra yapı elemanlarının %70 kapasiteyi aşmamasına dikkat edilerek tasarımları gerçekleştirilmiştir. Tasarımı yapılan modeller nihai metrekareye düşen taşıyıcı sistem ağırlıkları hesaplanmıştır. Hesaplanan yapı ağırlıkları yapının kapladığı taban alanına bölünerek kg/m^2 cinsinden m^2 'ye düşen taşıyıcı sistem ağırlığı elde edilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde dörtgen modül geometrisinde, diğer modül geometrileri olan üçgen ve altıgen modül geometrilerine göre metrekareye daha az kesit ihtiyacı doğmuştur. Bütün açıklıklar boyunca dörtgen modül geometrisi en ekonomik sonuçları vermiştir. 20 ve 30 metre açıklıklarda üçgen ve altıgen modül geometrileri göreceli olarak yakın sonuçlar verirken açıklık arttıkça m^2 düşen taşıyıcı sistem ağırlığında aralarındaki fark da artış görülmektedir. 40 metre ve 50 metre de üçgen modül geometrisi ekonomik sonuçlar vermemektedir. Üçgen modül geometrisine göre dörtgen ve altıgen modül geometrisi 40 ve 50 metre de daha yakın sonuçlar vermektedir. Grafikler incelendiğinde üçgen modül geometrisinde diğer modül geometrilerine göre metrekareye düşen taşıyıcı sistem ağırlığına etkisi daha fazla olduğu gözlenmiştir.
- Çalışmanın son bölümünde m^2 (metrekare) düşen taşıyıcı sistem ağırlıkları üzerinden tüm açıklıklarda her 3modül geometrisi içinde en uygun modül boyu olan modeller tespit edilmiştir. m^2 'ye düşen en az taşıyıcı sistem ağırlığı olan modeller kar yüklemesi, asimetrik kar yüklemesi ve rüzgâr yüklemesi altında yer değiştirmeleri incelenmiştir. Analizler sonucunda tüm açıklıklarda yer değiştirmeye en dirençli modül geometrisi altıgen olmuştur. Ayrıca asimetrik kar yüklemesi sonucunda dörtgen modül geometrisinde yer değiştirmelerin arttığı gözlenmiştir.

Yapılan bu çalışmada dörtgen, üçgen, altıgen modül geometrilerinde tonoz tipi ızgara kabuk sistemler statik yüklemeye altında yapısal davranışları incelenmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda ızgara kabuk sistemler dinamik yüklemeye altında tonoz tipinden farklı olarak amorf formda genişletilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Özüer, Ç. (2020). *Modern Yapı Kabuklarının Geometrik Tasarımı ve Uygulanması*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [2] Türkçü, H. Ç. (2003). *Çağdaş Taşıyıcı Sistemler*. Birsen yayınları, İstanbul, 347.
- [3] Vardar Öz, Ö. M. (2012). *Tek Tabakalı Uzay Kafes Sistemlerin Tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] Barnes, M. & Dickson, M. (2000). *Widespan Roof Structures*. Thomas Telford, London, 328s.
- [5] Chilton, J. (2000). *Space Grid Structures*. Architectural Press, Oxford, 180s.
- [6] Seele, 2021. <https://seele.com/facades/steel-glass-design>, (8.11.2021)
- [7] EtnaYapı. (2018). <http://www.etnayapi.com>, (20.12.2021)
- [8] Naicu, D. (2012). *Geometry and Performance of Timber Gridshells*. Master's thesis, The University of Bath, Department of Architecture and Civil Engineering, Bath.
- [9] Akyürek, M. E. (2020). *Hiperbolik Paraboloidlerin Yapı Endüstrisindeki Yeri*. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] Koç, S. (2020). *Ahşap Izgara Kabuk Strüktürlerin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [11] Demirbaş, B. (2019). *Büyük Açıklı Yapıların Tarihsel Gelişim Süreci ve Ahşap Kabuk Sistemlerin Yapısal Özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [12] Kara, T. (2019). *Tek Tabakalı Kubbelerin Taşıyıcı Sistemlerinin Yönetmelikler Açısından Değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [13] Orbay, A., & Savaşır, K. (2014). Tonoz Biçimli Çift Katlı Uzay Kafes Sistemlerin Çeşitli Kriterler Açısından Etkinliğinin Karşılaştırılmasına Yönelik Bir Araştırma. *DEÜ Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(1), 39-49.
- [14] Schlaich Bergermann, (2021). <https://www.sbp.de/projekt>, (20.12.2021).
- [15] Tensaform, (2021). <http://www.tensaform.com/tr/projeler/tamamlanmis-projelerimiz/>, (14.12.2021).
- [16] Abedi, K., Fard., & M., Samavati, O. (2015). Stability Analysis of Lattice Single-Layer Barrel Vault Considering the Effects of Purlins. *IASS Amsterdam Symposium: Future Visions. 2015*, Amsterdam.
- [17] Kaveh, A., & Mirzaei, B. (2014). Shape Size Optimization of Single-layer Barrel Vaults Using Improved. *International Journal of Civil Engineering*, 12(4), 447-465.
- [18] Sheidaii, M. R., & Babaei, M., & Bayrami, S. (2013). Collapse Behavior of Single-Layer Space Barrel Vaults under Non-Uniform. *International Journal of Steel Structures*, 13(4), 723-730.

- [19] Khalili, R., & Poursha, M. (2018). Investigation of Single-Layer Barrel Vault Under the Horizontal Earthquake. *11th International Congress on Civil Engineering*, 8-10 Mayıs, Tahrán.
- [20] Khalili, R., & Poursha, M., & Abedi, K. (2020). Behavior factor and displacement amplification factor for the seismic. *Journal of Constructional Steel Research*, 169, 105987.
- [21] Makowski, Z. S. (2006). *Analysis, Design and Construction of Braced Barrel Vaults*. Taylor & Francis, Guildford UK, 477s.
- [22] Makowski, Z. S. (1972). *Space Structures*. International Association for Bridge and Structural Engineering. Zurich.
- [23] El-Sheikh, A. (2001). Performance of Single-layer Barrel Vaults with Different Configurations. *International Journal of Space Structures*, 16(2), 111-123.
- [24] El-Sheikh, A. (2002). Effect of Geometric Imperfections on Single-Layer Barrel Vaults. *International Journal of Space Structures*, 17(4), 271-283.
- [25] El-Sheikh, A. (2001). Configurations of Single-layer Barrel Vaults. *Advances in Structural Engineering*, 4(2), 53-64.
- [26] Seifi., & H., Javana A. R., & Xu, S., & Zhao, Y., & Xie, Y. M. (2018). Design Optimization and Additive Manufacturing Of Nodes İn Gridshell. *Engineering Structures*, 160, 161-170.
- [27] Cai, J., & Yixiang, X., & Wang, F., & Feng, J., & Zhang, J., (2011). A Computational Study of The Static and Dynamic Response Of A Hybrid Barrel Vault Structure. *Advance Steel Construction*, 8(4), 317-330.
- [28] Pathak, M., & K. Shah, B. J. (2010). Buckling Strength of Single-Layer Steel Braced. *Nirma University Journal Of Engineering And Technology*, 1(1).
- [29] Sun, G., & Wu, M., & Chen, Z., & Xue, S. (2019). Numerical and Experimental Investigation of the Mechanical Behavior of Cable-Supported Barrel Vault Structures with Varying Temperature. *Advances in Civil Engineering*, Vol 2019, 572196.
- [30] Talatahari, S., & Jahani, Y. (2015). Hybrid Charged System Search - Particle Swarm Optimization for Design Of Single-layer Barrel Vault Structure. *Asian Journal of Civil Engineering*, 16(4), 515-533.
- [31] EN 1991 1-4, (2005). *Euro code 1 Actions on structures - Part 1-4 General actions Wind actions*, European Committee for Standardization, Brussels.