T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

BOŞLUKLU VE BOŞLUKSUZ SANDVİÇ FDM DİKDÖRTGEN PLAKLARIN EĞİLME ANALİZİ

Yüksek Lisans Tezi

AHMED ABDULLAH AHMED AL HUTHAIFI

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORI

İstanbul – 2025

TEZ TANITIM FORMU

Yazar Adı Soyadı	**:** Ahmed Abdullah Ahmed AL HUTHAIFI
Tezin Dili	**:** Türkçe
Tezin Adı	**:** Boşluklu ve Boşluksuz Sandviç FDM Dikdörtgen Plakların Eğilme Analizi
Enstitü	**:** İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	**:** İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Tezin Türü	**:** Yüksek Lisans
Tezin Tarihi	**:** 13.06.2025
Sayfa Sayısı	**:** 120
Tez Danışmanları	**:** Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORI
Dizin Terimleri	**:** FDM, sandviç plak, ANSYS, deformasyon, gerilme analizi, asal gerilmeler, statik yükleme.
Türkçe Özet	**:** Bu tezde, FDM sandviç plakların statik davranışı ANSYS yazılımı ile incelenmiştir. Yedi model, farklı sınır şartları altında analiz edilerek deformasyon ve gerilme değerleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, malzeme dağılımı ve sınır koşullarının yapısal performansa etkisini göstermiştir.
Dağıtım Listesi	**:** 1. İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne 2. YÖK Ulusal Tez Merkezine

İmzası

Ahmed Abdullah Ahmed AL HUTHAIFI

T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

BOŞLUKLU VE BOŞLUKSUZ SANDVİÇ FDM DİKDÖRTGEN PLAKLARIN EĞİLME ANALİZİ

Yüksek Lisans Tezi

AHMED ABDULLAH AHMED AL HUTHAIFI

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORI

İstanbul – 2025

BEYAN

Bu tezin hazırlanmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğu, kullanılan verilerde herhangi tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez olarak sunulmadığını beyan ederim.

Ahmed Abdullah Ahmed AL HUTHAIFI

…/…/2025

İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Ahmed Abdullah Ahmed AL HUTHAIFI' nın "Boşluklu ve Boşluksuz Sandviç FDM Dikdörtgen Plakların Eğilme Analizi" adlı tez çalışması, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği anabilim dalı, İnşaat Mühendisliği bilim dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan *Dr. Öğr. Üyesi Arman ATASOY*

Üye *Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORI*
(Danışman)

Üye *Dr. Öğr. Üyesi Hamit ÖZTÜRK*

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

... / ... / 2025

Prof. Dr. İzzet GÜMÜŞ
Enstitü Müdürü

ÖZET

Bu tez çalışmasında, fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) malzemelerden oluşan çok katmanlı sandviç plakların statik davranışı, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılarak incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, farklı malzeme dağılımları, katman kombinasyonları ve sınır şartlarının plağın deformasyon ve gerilme değerlerine etkisini ortaya koymaktır. Çözüm sürecinde ANSYS yazılımı kullanılmış olup analizlerde SHELL281 tipi eleman tercih edilmiştir. Bu eleman, yüksek doğrulukta eğilme ve kesme etkilerini modelleyebilme yeteneğine sahiptir. Plak modelleri, 40×40 ağ yapısına sahip olup her biri 80 farklı malzeme katmanından oluşmaktadır. Yedi farklı model geliştirilmiş ve bu modeller üzerinde çeşitli sınır şartları (CCCC, CFCF, CCCF, SSSS vb.) uygulanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Malzeme olarak metal-seramik karışımı kullanılan fonksiyonel dereceli yüzey tabakaları ile izotrop homojen çekirdek malzeme kombinasyonları tercih edilmiştir. Malzeme özellikleri kalınlık boyunca üs yasası dağılımına göre değişmektedir. Her bir model için çözümler statik yük altında gerçekleştirilmiş, yükleme senaryosu olarak hem tekil yükler hem de üniform dağıtılmış yükler değerlendirilmiştir. Analiz sonucunda, sınır şartlarının, malzeme dağılım katsayısının (p-değeri), katman yapısının ve plak kalınlığının deformasyon ve gerilme davranışı üzerinde belirleyici olduğu görülmüştür. Özellikle CCCC sınır şartı altında en düşük deformasyon ve en yüksek gerilme değerlerine ulaşılmıştır. Ayrıca, p değeri arttıkça deformasyonun azaldığı, ancak ikinci asal gerilmelerin arttığı tespit edilmiştir. Bu tez çalışmasının sonuçları, ileri düzey yapısal analizlerde FD sandviç plakların tasarımına dair önemli bilgiler sunmakta ve özellikle havacılık, uzay ve biyomedikal mühendisliği gibi yüksek hassasiyet gerektiren alanlarda malzeme ve yapı optimizasyonuna katkı sağlamaktadır. En dikkat çekici sonuç, katman sayısının artırılmasıyla yapının rijitliğinin anlamlı biçimde artması ve gerilme dağılımının daha dengeli hale gelmesidir.

Anahtar Kelimeler: FDM, sandviç plak, ANSYS, deformasyon, gerilme analizi, asal gerilmeler, statik yükleme.

SUMMARY

In this thesis, the static behavior of multilayered sandwich plates composed of functionally graded (FG) materials is investigated using the finite element method (FEM). The main objective of the study is to examine the effects of different material distributions, layer combinations, and boundary conditions on the deformation and stress responses of the plates. The analysis is carried out using ANSYS software, and SHELL281 element are employed due to their high accuracy in modeling bending and shear effects. The plate models feature a 40×40 mesh structure and consist of 80 distinct material layers. Seven different models were developed and analyzed under various boundary conditions (such as CCCC, CFCF, CCCF, and SSSS). The sandwich plates consist of functionally graded face sheets made of a metal–ceramic mixture and an isotropic homogeneous core. The material properties vary continuously through the thickness of the plate according to a power-law distribution. Each model is subjected to static loading conditions, including both point loads and uniformly distributed loads. The analysis results reveal that boundary conditions, the material distribution exponent (*p*-value), the layer configuration, and the plate thickness significantly influence deformation and stress behavior. Notably, the CCCC boundary condition yields the lowest deflection and the highest stress values. It is also observed that an increase in the *p*-value leads to a decrease in deflection but an increase in the second principal stress. The findings of this thesis offer valuable insights for the design of FG sandwich plates in advanced structural analysis and contribute to material and structural optimization in high-precision fields such as aerospace, aviation, and biomedical engineering. The most prominent result is that increasing the number of layers significantly enhances the stiffness of the structure and leads to a more balanced stress distribution.

Keywords: FDM, sandwich plate, ANSYS, deformation, stress analysis, principal stresses, static loading

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **i**
SUMMARY ..... **ii**
İÇİNDEKİLER ..... **iii**
KISALTMALAR ..... **v**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **vi**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **viii**
ÖNSÖZ ..... **xii**
GİRİŞ **1**

BİRİNCİ BÖLÜM
LİTERATÜRE TARAMASI

1.1. Literatürde Yapılan Çalışmalar 2

İKİNCİ BÖLÜM
MATERYAL VE METOT

2.1. Katman Dizilimleri 10
2.2. Malzeme Özellikleri 12
2.3. Sınır Koşulları 14
2.4. Geometrik Modeller 15
2.5. Sonlu Elemanlar İle Modelleme 17

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Verifikasyon 34
3.2. Uygulama 1: CCCC Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=5 *b*=10) 37
3.3. Uygulama 2: CCCC Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=7 *b*=10) 38
3.4. Uygulama 3: CCCF Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=5 *b*=10) 39
3.5. Uygulama 4: CCCF Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=7 *b*=10) 40
3.6. Uygulama 5: CCCF Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=10 *b*=10) 42
3.7. Uygulama 6: CFCF Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=5 *b*=10) 43
3.8. Uygulama 7: CFCF Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=7 *b*=10) 44
3.9. Uygulama 8: CFCF Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=10 *b*=10) 45
3.10. Uygulama 9: CSCS Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=5 *b*=10) 46
3.11. Uygulama 10: CSCS Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=7 *b*=10) 48
3.12. Uygulama 11: CSCS Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=10 *b*=10) 49
3.13. Uygulama 12: SSSS Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=5 *b*=10) 50
3.14. Uygulama 13: SSSS Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=7 *b*=10) 52
3.15. Uygulama 14: SSSS Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=10 *b*=10) 53
3.16. Uygulama 15: CCCC Plak Modelinde Orta Nokta Çökme Analizi (*a*=10 *b*=10)……..54
3.17. Uygulama 16: CFCF Plak Modelinde Orta Nokta Çökme Analizi (*a*=10 *b*=10)…… 55

3.18. Uygulama 17: CCCC Sandviç Plaklarda Boyut Artışının Çökme Üzerine Etkisi (*a*=20, *b*=20 / *a*=30, *b*=30 / *a*=50, *b*=50) 57
3.19. Uygulama 18: CCCC Boşluklu Plakta Katman Dizilimlerine Göre Çökme Analizi (Model 2, *a*=10 *b*=10) 59
3.20. Uygulama 19: CCCC Boşluklu Plakta Katman Dizilimlerine Göre Çökme Analizi (Model 3, *a*=10 *b*=10) 60
3.21. Uygulama 20: CCCC Boşluklu Plakta Katman Dizilimlerine Göre Çökme Analizi (Model 4, *a*=10 *b*=10) 61
3.22. Uygulama 21: CCCC Boşluklu Plakta Katman Dizilimlerine Göre Çökme Analizi (Model 5, *a*=10 *b*=10) 63
3.23. Uygulama 22: CCCC Boşluklu Plakta Katman Dizilimlerine Göre Çökme Analizi (Model 6, *a*=10 *b*=10) 64
3.24. Uygulama 23: CCCC Boşluklu Plakta Katman Dizilimlerine Göre Çökme Analizi (Model 7, *a*=10 *b*=10) 65
3.25. Uygulama 24: Boşluk Konumuna Göre Boyutsuz Çökme Değerlerinin Karşılaştırılması 67
3.26. Uygulama 25: Malzeme Katsayısı (p=2) Altında Boşluklu Modellerin Çökme Karşılaştırması… 67
3.27. Gerilme Analizi 69
SONUÇLAR VE ÖNERİLER 94
KAYNAKÇA 96
ÖZGEÇMİŞ 101

KISALTMALAR

CCCC : Tüm kenarları ankastre sınır şartı

CCCF : Üç kenarı ankastre, bir kenarı serbest sınır şartı

CFCF : Karşılıklı kenarları ankastre, diğerleri serbest sınır şartı

FDM : Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme

GERİLME : Karma gerilme durumları için karşılaştırma gerilmesi

p : Malzeme özelliklerinin kalınlık boyunca dağılımını belirleyen üs

SHELL281 : ANSYS yazılımında kullanılan yüksek dereceli kabuk elemanı

SSSS : Tüm kenarları basit mesnetli sınır şartı

TEY : Tekil Yük (noktasal yük)

ÜDL : Üniform Dağıtılmış Yük

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. Her modelin düğüm sayısı ve sonlu eleman sayısı 20
Tablo 2. ANSYS Ortamında Kenar Koşullarının Uygulanış Şeması..... 26
Tablo 3. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri..... 35
Tablo 4. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri..... 36
Tablo 5. *a*=5, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri..... 37
Tablo 6. *a*=7, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri..... 38
Tablo 7. *a*=5, *b*=10 ve üç kenarı ankastre, bir kenarı serbest sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri..... 40
Tablo 8. *a*=7, *b*=10 ve üç kenarı ankastre, bir kenarı serbest sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri..... 41
Tablo 9. *a*=10, *b*=10 ve üç kenarı ankastre, bir kenarı serbest sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri..... 42
Tablo 10. *a*=5, *b*=10 ve üst ve alt kenarları ankastre, yan kenarları serbest olan sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri..... 43
Tablo 11. *a*=7, *b*=10 ve üst ve alt kenarları ankastre, yan kenarları serbest olan sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri..... 44
Tablo 12. *a*=10, *b*=10 ve üst ve alt kenarları ankastre, yan kenarları serbest olan sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri 46
Tablo 13. *a*=5, *b*=10 ve üst ve alt kenarları basit mesnetli, yan kenarları ankastre olan sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri 47
Tablo 14. *a*=7, *b*=10 ve üst ve alt kenarları basit mesnetli, yan kenarları ankastre olan sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri 48
Tablo 15. *a*=10, *b*=10 ve üst ve alt kenarları basit mesnetli, yan kenarları ankastre olan sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri 49
Tablo 16. *a*=5, *b*=10 ve kenarlarından basit mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri..... 51
Tablo 17. *a*=7, *b*=10 ve kenarlarından basit mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri..... 52

Tablo 18. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından basit mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri 53
Tablo 19. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri 54
Tablo 20. *a*=10, *b*=10 ve CFCF mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri 56
Tablo 21. *a*=20, *b*=20 / *a*=30, *b*=30 / *a*=50, *b*=50 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri. Plak Boyutunun Etkisi 57
Tablo 22. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri 59
Tablo 23. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri 60
Tablo 24. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri 62
Tablo 25. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri 63
Tablo 26. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri 64
Tablo 27. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri 66

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Farklı Malzeme Dağılımlarına Sahip Üç Katmanlı Sandviç Plaklar 11
Şekil 2. 7 Boşluksuz ve boşluklu Modelleri 15
Şekil 3. Model 1–7'ye ait boşluk sayısı ve boşluk alanı 16
Şekil 4. ANSYS'ta malzemelerin tanımı 20
Şekil 5. Shell281 ve düğüm noktaları 23
Şekil 6. İncelenen Sandviç Plak Modelleri İçin Farklı Kenar Koşulları 25
Şekil 7. Sandviç Plakta Kenar Tanımları ve Yönlendirme Noktaları 26
Şekil 8. *a*=5, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerlerinin karşılaştırılması 37
Şekil 9. *a*=7, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması 38
Şekil 10. *a*=5, *b*=10 ve üç kenarı ankastre, bir kenarı serbest sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması 40
Şekil 11. *a*=7, *b*=10 ve üç kenarı ankastre, bir kenarı serbest sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması 41
Şekil 12. *a*=10, *b*=10 ve üç kenarı ankastre, bir kenarı serbest sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması 42
Şekil 13. *a*=5, *b*=10 ve üst ve alt kenarları ankastre, yan kenarları serbest olan sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması 43
Şekil 14. *a*=7, *b*=10 ve üst ve alt kenarları ankastre, yan kenarları serbest olan sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması 45
Şekil 15. *a*=10, *b*=10 ve üst ve alt kenarları ankastre, yan kenarları serbest olan sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması 46
Şekil 16. *a*=5, *b*=10 ve CSCS mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması 47
Şekil 17. *a*=7, *b*=10 ve CSCS mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması 48
Şekil 18. *a*=10, *b*=10 ve CSCS mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması 50
Şekil 19. *a*=5, *b*=10 ve kenarlarından basit mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması 51

Şekil 20. *a*=7 *b*=10 ve kenarlarından basit mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması 52
Şekil 21. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından basit mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması 53
Şekil 22. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması 55
Şekil 23. *a*=10, *b*=10 ve CFCF mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması..... 56
Şekil 24. *a*=20, *b*=20 / *a*=30, *b*=30 / *a*=50, *b*=50 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması 57
Şekil 25. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması 59
Şekil 26. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması 61
Şekil 27. *a*=10, *b*=10ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması 62
Şekil 28. *a*=10, *b*=10ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması 63
Şekil 29. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması. 65
Şekil 30. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması 66
Şekil 31. Model 1–7 için boşluk yerleşimlerine göre çökme değerleri 67
Şekil 32. *p* = 2 için boşluklu CCCC plak modellerinde düşey yer değiştirme (çökme) değerlerinin karşılaştırması 67
Şekil 33. *p* = 1 durumunda 7 farklı modelin çökme değerleri karşılaştırılması..... 68
Şekil 34. 1-2-1 katman dizilimi ve *p* = 1 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa) 69
Şekil 35. 1-2-1 katman dizilimi ve *p* = 2 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa) 70
Şekil 36. 1-2-1 katman dizilimi ve *p* = 5 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa) 70
Şekil 37. 1-2-1 katman dizilimi ve *p* = 10 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa) 70
Şekil 38. 1-0-1 katman dizilimi ve *p* = 1 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa) 71
Şekil 39. 1-0-1 katman dizilimi ve *p* = 2 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa) 71
Şekil 40. 1-0-1 katman dizilimi ve *p* = 5 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa) 71

Şekil 41. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 10 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa) 72
Şekil 42. 2-1-2 katman dizilimi ve p = 1 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 72
Şekil 43. 2-1-2 katman dizilimi ve p = 2 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 72
Şekil 44. 2-1-2 katman dizilimi ve p = 5 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 73
Şekil 45. 2-1-2 katman dizilimi ve p = 10 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 73
Şekil 46. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa) 74
Şekil 47. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)..... 74
Şekil 48. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)..... 74
Şekil 49. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 75
Şekil 50. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 75
Şekil 51. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 75
Şekil 52. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 76
Şekil 53. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 76
Şekil 54. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 76
Şekil 55. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa) 77
Şekil 56. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa) 77
Şekil 57. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa) 77
Şekil 58. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 78
Şekil 59. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 78
Şekil 60. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 78
Şekil 61. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 79
Şekil 62. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 79
Şekil 63. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 80
Şekil 64. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa) 80
Şekil 65. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa) 80
Şekil 66. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa) 81
Şekil 67. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 81
Şekil 68. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 81
Şekil 69. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 82
Şekil 70. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 82
Şekil 71. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 82
Şekil 72. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 83
Şekil 73. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa) 83
Şekil 74. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa) 83

Şekil 75. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa) 84
Şekil 76. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 84
Şekil 77. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 84
Şekil 78. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 85
Şekil 79. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 85
Şekil 80. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 85
Şekil 81. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 86
Şekil 82. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa) 86
Şekil 83. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa) 86
Şekil 84. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa) 87
Şekil 85. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 87
Şekil 86. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 87
Şekil 87. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 88
Şekil 88. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 88
Şekil 89. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 89
Şekil 90. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 89
Şekil 91. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa) 90
Şekil 92. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa) 90
Şekil 93. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa) 90
Şekil 94. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 91
Şekil 95. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 91
Şekil 96. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 91
Şekil 97. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 92
Şekil 98. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 92
Şekil 99. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 93
boşluk sayısı, boşluk alanı ve yerleşim biçimi özetlenmiştir16Şekil 61. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)..... 79

ÖNSÖZ

Her şeyden önce bu süreçte bana güç sabır ve irade veren, hayatımın her anında yanımda olan Yüce Allah'a sonsuz şükürlerimi sunuyorum. O'nun lütfu ve inayeti olmadan ne bu akademik yolculuk başlar ne de başarıyla tamamlanabilirdi.

Bu tez eğitim hayatımın önemli bir dönüm noktasını oluşturmaktadır. Çalışmam süresince bana destek olan, yol gösteren ve moral veren birçok değerli kişinin katkısı olmuştur. Bu vesileyle, emeği geçen herkese en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Öncelikle tez sürecim boyunca akademik bilgi ve deneyimiyle yolumu aydınlatan, sabrıyla her aşamada yanımda olan değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad Noori'ye en derin şükranlarımı sunuyorum. Kendisi, verdiği yapıcı geri bildirimler ve yönlendirmeleriyle bu çalışmanın bilimsel niteliğini güçlendirmiştir. Onun akademik rehberliği olmadan bu tezi tamamlamak mümkün olmazdı.

Bu süreçte bana her zaman inanan ve destek olan aileme de içten teşekkür etmek isterim. Özellikle sevgili anneme ve babama, gösterdikleri sonsuz sabır, anlayış, cesaret ve moral desteğiyle bu zorlu süreci aşmamda büyük katkı sağlamışlardır. Onların varlığı ve desteği, bana güç vermiş ve bu akademik yolculuğu anlamlı kılmıştır.

Ayrıca, bu dönemde yanımda olan ve her an sabırla desteğini esirgemeyen sevgili eşime özel bir teşekkürü borç bilirim. Zorlu anlarda beni motive eden, yorgun düştüğümde anlayışla karşılayan ve varlığıyla her zaman güç veren eşim, bu yolculuğun görünmeyen kahramanlarından biridir. Varlığın, desteğin ve anlayışın için minnettarım.

Son olarak, bu çalışmada doğrudan ya da dolaylı katkısı olan tüm arkadaşlarıma ve eğitim hayatım boyunca yanımda olan herkese teşekkür ederim. Verdikleri manevi destek ve teşvik, bu süreci daha kolay ve katlanılabilir hale getirmiştir.

Teşekkürlerimle,

GİRİŞ

Mühendislik yapılarında kullanılan malzemelerin performansı, yapıların güvenliği ve uzun ömürlü olması açısından belirleyici bir rol oynamaktadır. Son yıllarda, özellikle havacılık, uzay ve biyomedikal mühendisliği gibi yüksek hassasiyet gerektiren alanlarda, klasik homojen malzemelerin sınırlı mekanik performansı yerine daha işlevsel alternatiflere olan ihtiyaç artmıştır. Bu ihtiyaca cevap olarak geliştirilen fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM), yapısal tasarımda önemli bir dönüşüm sağlamıştır. FDM'ler, iki farklı malzemenin genellikle metal ve seramiğin kalınlık boyunca sürekli değişen oranlarda bir araya getirilmesiyle elde edilmekte ve böylece hem yüksek dayanım hem de ısıl direnç özelliklerini bir arada sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, fonksiyonel derecelendirilmiş yüzey tabakalarına ve izotrop homojen çekirdek tabakaya sahip çok katmanlı sandviç plakların statik davranışları sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Amacım, farklı sınır şartları, malzeme dağılım katsayıları ve katman yapılarının, bu tür plakların deformasyon ve gerilme davranışı üzerindeki etkisini ortaya koymaktır. Analizler, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) temel alınarak, ticari bir yazılım olan ANSYS aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte SHELL281 tipi eleman kullanılmış; bu eleman türü hem ince hem de kalın kabuk yapıların analizinde eğilme ve kesme etkilerini dikkate alabilen yüksek doğruluklu bir modelleme yaklaşımı sunmaktadır.

Çalışmada yedi farklı plak modeli oluşturulmuş ve her biri 40×40 ağ yapısına sahip olacak şekilde modellenmiştir. Her bir model, 80 farklı malzeme katmanından oluşmakta ve çeşitli sınır koşulları altında incelenmiştir. Yükleme durumu olarak hem üniform dağıtılmış yükler hem de tekil (noktasal) yükler göz önünde bulundurulmuştur. Malzeme özelliklerinin plak kalınlığı boyunca dağılımı ise power-law (üs yasası) fonksiyonuna göre tanımlanmıştır. Elde edilen bulgular, sınır şartlarının ve malzeme dağılım katsayısının (p-değeri) yapı davranışı üzerinde önemli etkiler yarattığını göstermektedir.

Bu bağlamda tez çalışmam, çok katmanlı FD plakların tasarımına yönelik sayısal çözümler sunmakta ve mühendislik uygulamalarında bu yapıların etkinliğine dair kapsamlı bir değerlendirme ortaya koymaktadır.

BİRİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜRE TARAMASI

1.1. Literatürde Yapılan Çalışmalar

Qin vd. (2020), üç boyutlu kabuk teorisi ve Rayleigh-Ritz metotları yardımıyla fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli kabukların serbest titreşim davranışını araştırmıştır. Sınır koşulları ve elastik zemin temellerinin bu yapısal elemanların serbest titreşim davranışına etkisini teorik olarak sunmuştur. Singh ve Harshadır. (2021), yeni S-FDM plak modeli, üç gözeneklilik türüyle incelenmiştir. Sanal iş prensibi ve galerkin-vlasov yöntemi kullanılmıştır. Gözeneklilik ve termal ortamın burkulma üzerindeki etkisi sayısal olarak çözülmüştür. Bunu birkaç önemli sonuçları vardır, asimetrik plaklar daha yüksek burkulma sıcaklığına sahiptir. Elastik temel, asimetrik plakları en az etkiliyordur. Hacim kesir üssü ikide gözeneklilik etkisi kaybolmaktadır.

Adhikari vd. (2020), porozite hatası, FDM sandviç kombinasyonlarında burkulma analizine dahil edilmiştir. SEY ve HSDT kullanılmıştır. FDM sandviç plakların burkulma davranışları, düzensiz kenar yükü altında incelenmiş ve parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Sonuçları porozite dağılımı ve parametreler, burkulma yükünü etkileridir. Kumar vd. (2020), HSDT ve Hamilton ilkesi, Galerkin-Vlasov ile S-FDM plak elastik temel üzerindeki serbest titreşimini çözmüştür. Elastik temel ve konik oranlar etkisiyle parametrik incelemiştir.

Singh vd. (2020), Sigmoid yasasına göre değişen yüzeyli, homojen çekirdekli sandviç plakların doğrusal olmayan dinamik tepkisini araştırmıştır. Kullanmış yöntemi geometrik doğrusal olmayanlık için von Karman, çözüm için Airy ve Galerkin yöntemidir. Bu şekilde sonuçlanmış, İlk dört terimle %0.22 hata ile yeterli doğruluk sağlanmış; bu çalışma, bu tür plağın ilk doğrusal olmayan dinamik analizini ele alan çalışmadır. Abdelazız vd. (2011), yüksek dereceli kayma deformasyonu teorisi kullanmıştır. Fonksiyonel dereceli sandviç plakların statik tepkisi araştırılmıştır. Sonuçları bu şekilde birletilmiş, 4 bilinmeyen, kayma düzeltme faktörü yoktur, kayma gerilmeleri paraboliktir ve sonuçlar doğru ve basit, diğer teorilerle uyumludur.

Van Do ve Lee (2017), iyileştirilmiş ağsız radyal nokta interpolasyon yöntemi (RPIM) kullanmıştır. FDM sandviç plakların termal burkulma analizi yapılmıştır, iyileştirilmiş RPIM, burkulma davranışını doğru şekilde tahmin edilmiştir. Fazzolari

ve Carrera (2014), Kuazi-3D ESL, Zig-Zag (ZZ) modelleri, CUF, HTRF, PVD kullanmış, FDM izotropik ve sandviç plakların termal kararlılığı, kritik burkulma sıcaklıkları hesaplanmıştır ve parametrelerin etkisi sonuçlanmıştır.

Fazzolari (2015), HTRF ile lineerleştirilmiş burkulma analizi için ESL ve ZZ teorilerine dayalı Ritz modelleri kullanmıştır. FDM izotropik ve sandviç plakların burkulma davranışı çözülmüştür. Parametrelerin (hacim fraksiyonu, yükleme türü, vs.) burkulma yükleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Hadeji vd. (2011), dört değişkenli Gelişmiş Plak Teorisi (RPT) kullanılarak FDM sandviç plakların serbest titreşim analizi yapılmıştır. FDM sandviç plakların serbest titreşim davranışı incelenmiştir. Önerilen teori, klasik teorilerle karşılaştırıldığında doğru ve basittir, kesme gerilimlerini parabolik olarak değiştirir.

Yang vd. (2008), sandviç plak doğrusal olmayan lokal eğilmesini, gradyanlı çekirdek altında incelemiştir. Kayma deformasyonu teorisi, von Karman kinematikası, elastik temel, pertürbasyon ve Galerkin yöntemleri kullanılmıştır. Gradyanlı çekirdek, lokal deformasyon ve kayma gerilmelerini azaltır. Hacim fraksiyonu, Young modülü, çekirdek kalınlığı, sınır koşulları ve yük pozisyonu etkileri incelenmiştir. Kiani vd. (2011), FDM plakların ısıl yük altında burkulmasını incelemiştir. Elastik temel, Pasternak modeli ile modelleme yapılmış ve klasik levha teorisi, güç yasası dağılımı kullanılmıştır.

Meksi vd. (2017), yeni bir kayma deformasyonu teorisi tanıtılmıştır, dört bilinmeyenle türetilen hareket denklemleri kullanılmıştır. Fonksiyonel dereceli sandviç plakların eğilme, burkulma ve titreşim tepkileri çözülmüştür. Yeni model doğrulanmıştır, kritik burkulma yükleri ve plakların etkileri incelenmiştir. Naghavi vd. (2021), FSM ve RPT kullanılarak FD sandviç plakların statik analizini yapmıştır. Problemi iki FD plak tipi; FDM yüzeyler ve homojen çekirdek. FSM ve RPT ile hızlı ve esnek analiz yöntemi kullanılmıştır. Sonuçlar diğer teorilerle karşılaştırılmıştır.

Natarajan ve Manickam (2012), QUAD-8 kesme esnek elemanı ile FDM sandviç plakların eğilme ve titreşim davranışını incelemiştir. Homojen yüzeyler ile FDM çekirdek ve FDM yüzeyler ile homojen sert çekirdekli plaklar için statik analiz yapılmıştır. Formülasyon doğruluğu test edilmiş, gradyan indeksi ve plak oranının etkisi araştırılmıştır. Shen ve Li (2008), FDM yüzeyli sandviç plakların termal etkilerle eğilme analizi yapılmıştır. Sıcaklık, FDM özellikleri ve geometrik bozuklukların eğilme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, sıcaklık ve kalınlık oranlarının

eğilme davranışını etkilediği, ısıl iletkenlik durumunda ise postbükülme yolunun bifurkasyon tipi olmadığı belirlenmiştir.

Singh ve Harsha (2020), ısıl ortamda eğilme ve gerilme çözümü için ilk kez Galerkin Vlasov yöntemi kullanmıştır. Yüksek mertebeden kayma deformasyon teorisi ve modifiye edilmiş sigmoid fonksiyonu ile deplasman alanı tanımlanmıştır. Eşit, simetrik olmayan ve yeni bir simetrik olmayan porozite türleri incelenmiştir. Sonuçlar, ısıl etkilerin plağın rijitliğini artırdığını ve eşit porozite dağılımında daha fazla gerilme ile defleksiyon meydana geldiğini göstermektedir. Ayrıca, sınır koşulları gerilme ve defleksiyon dağılımlarını etkileyen önemli bir faktördür. Wang ve Shen (2013), FDM yüzlü sandviç plakların termal ortamda ve elastik zemin üzerindeki dinamik davranışı incelemiştir. Mori-Tanaka şeması ve pertürbasyon tekniği kullanılarak elde edilen sonuçlara göre, zemin sertliği, başlangıç gerilmeleri ve çekirdek-yüzey oranı dinamik davranışı önemli ölçüde etkilemektedir. FDM hacim fraksiyonu ise tek katmanlı plakalarda daha belirgin bir etkiye sahiptir.

Yaghoobi ve Yaghoobi (2013), elastik temel üzerindeki FDM yüzlü simetrik sandviç plakların burkulma analizi, FSDT teorisi ve Frobenius yöntemi kullanılarak mekanik, termal ve termo-mekanik yükler altında incelenmiştir. Plak boyutları, yükleme tipi, sınır koşulları ve elastik temel parametrelerinin etkileri analiz edilerek alandaki bilgi eksikliği giderilmiştir. Zenkour ve Sobhy (2010), Sinüzoidal kayma deformasyon teorisi kullanarak, FDM sandviç plakların termal burkulması incelemiştir. Malzeme özellikleri kalınlık boyunca kademeli değişirken, çekirdek katman homojen ve izotropik olarak modellenmiştir. Termal yükler (düzgün, lineer, lineer olmayan) ve plak parametrelerinin (gradyan indeksi, en-boy oranı, kalınlık oranı) kritik burkulma üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

Al-Itbi ve Noori (2023), fonksiyonel dereceli gözenekli (FGP) sandviç kirişlerin statik davranışı sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiştir. Gözeneklilik dağılımı, sınır koşulları ve malzeme türünün etkileri değerlendirilmiş, analizler ANSYS'te BEAM189 elemanı ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, gözeneklilik katsayısının kirişlerin statik tepkisi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Mezher vd. (2023) tarafından petek kirişlerin statik ve dinamik davranışı ANSYS 22 R1 kullanılarak incelenmiştir. Farklı gövde açıklık şekillerinin (dairesel, kare, beşgen, altıgen) yer değiştirme, gerilme ve serbest titreşim üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. 10 düğümlü tetrahedral elemanlarla modellenen kirişlerde, üç

farklı sınır koşulu uygulanmıştır. Sonuçlar, açıklık tipinin mekanik tepkiler üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Al-Itbi ve Noori (2022) tarafından fonksiyonel dereceli gözenekli (FGP) sandviç kirişlerin doğal frekansları üzerindeki gözeneklilik etkisi incelenmiştir. Malzeme özellikleri, kalınlık yönünde değişen gözeneklilikle belirlenmiştir. Dört farklı mesnetleme durumu (ankastre-ankastre, sabit-sabit, serbest, sabit-ankastre) için analizler yapılmış ve gözeneklilik oranları 0.1–0.9 arasında değiştirilmiştir. Simetrik malzeme dağılımı ve uniform çekirdek malzemesi için toplam 44 örnek incelenmiştir. Sonuçlar, gözeneklilik oranının doğal frekanslar üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Noori vd. (2024) tarafından fonksiyonel dereceli malzemelerden (FDM) oluşan dikdörtgen plakların sapma ve gerilme tepkileri sonlu eleman analizi ile incelenmiştir. Farklı malzeme gradyan profilleri, ankastre, basit mesnetli ve serbest kenar koşulları altında değerlendirilmiştir. Plaklara düzgün, sinüsoidal ve noktasal yükler uygulanarak, sınır ve yükleme koşullarının etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, malzeme gradyanı ile sınır ve yükleme koşullarının sapma ve gerilme değerlerini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Doori vd. (2024) tarafından fonksiyonel dereceli gözenekli (FGP) dairesel plakların eksenel simetrik eğilme davranışı incelenmiştir. Üç farklı gözeneklilik dağılımı ve çeşitli mesnet koşulları değerlendirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizler, literatürle uyumlu sonuçlar vermiştir. Artan gözeneklilik katsayısı ve çap/kalınlık oranının plak sapmasını artırdığı gözlemlenmiştir.

Qin vd. (2020) tarafından kalın fonksiyonel dereceli gözenekli grafen takviyeli kompozit (FGP-GPLRC) silindirik kabukların serbest titreşimi için birleşik bir çözüm sunulmuştur. Teorik modelleme için üç boyutlu kabuk teorisi kullanılmış, Rayleigh-Ritz yöntemi ve yapay yay tekniği uygulanmıştır. Çeşitli sınır koşulları, elastik temel modelleri (Winkler, Pasternak, Kerr), gözeneklilik dağılımları ve grafen desenleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, farklı parametrelerin titreşim davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Slimane vd. (2020) tarafından fonksiyonel dereceli plakların titreşim davranışı yüksek mertebeli kayma deformasyon teorisine dayalı analitik yöntemle incelenmiştir. Üretim sırasında oluşabilen mikro boşluklar ve gözeneklilik etkileri değerlendirilmiştir. Hareket denklemleri Hamilton prensibi ile elde edilip, basit mesnetli plaklar için Navier yöntemi kullanılmıştır. Önerilen sayısal yöntemle plakların frekans parametreleri hesaplanmış ve gözeneklilik katsayısının temel frekanslara etkisi detaylı olarak incelenmiştir.

Hu vd. (2020) tarafından elastik temel üzerindeki fonksiyonel dereceli gözenekli (FGP) plakların ses yayılım davranışı, modifiye Fourier serileri yöntemiyle incelenmiştir. Üç farklı gözeneklilik dağılımı değerlendirilmiş ve malzeme parametreleri gözeneklilik katsayısına göre belirlenmiştir. Hareket denklemleri, birinci mertebeden deformasyon teorisi (FSDT) ve Hamilton prensibi kullanılarak türetilmiştir. Plak yer değiştirmeleri, Fourier kosinüs serileri ve yardımcı polinom fonksiyonlarıyla ifade edilmiştir. Rayleigh integrali ile harmonik yüke karşı akustik tepki hesaplanmış, elde edilen sonuçlar literatürle uyum göstermiştir. Gözeneklilik dağılımı, sınır koşulları ve elastik temel parametrelerinin ses yayılımı üzerindeki etkileri detaylı olarak analiz edilmiştir. Hassan ve Kurgan (2019) tarafından ANSYS Mechanical APDL 17.1 kullanılarak dikdörtgen plakların burkulma analizi incelenmiştir. Homojen ve fonksiyonel dereceli plaklar için kabuk ve katı modeller değerlendirilmiş, farklı eleman tipleri ve sınır koşullarının etkileri karşılaştırılmıştır. ANSYS'te burkulma analizi prosedürleri açıklanmış ve ağ yapısı, sınır koşulları ile eleman seçeneklerinin etkileri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar çeşitli analitik çözümlerle karşılaştırılarak doğrulama yapılmıştır.

Ton (2024) tarafından elastik temel üzerindeki fonksiyonel dereceli gözenekli (FGP) sandviç plakların doğal frekansları, yüksek mertebeli kayma deformasyon teorisi (HSDT) ve sonlu eleman modeli kullanılarak incelenmiştir. Yapı, metal alt katman, seramik üst katman ve FGP çekirdekten oluşmaktadır. Analizler Matlab ile gerçekleştirilmiş ve literatürle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Ayrıca, çeşitli parametrelerin doğal frekanslar üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Badiey ve Kouchakzadeh (2010) tarafından dikdörtgen fonksiyonel dereceli plakların (FGP) kesme ve eksenel yükler altındaki burkulma davranışı incelenmiştir. Klasik plaka teorisine dayalı toplam potansiyel enerji türetilmiş ve kesme burkulma analizinde düzlem içi esneklik dikkate alınmıştır. Mekanik özelliklerin kalınlık boyunca güç fonksiyonu ile değiştiği varsayılmıştır. Farklı malzeme oranları ve güç yasası indisleri için kritik burkulma yükleri elde edilerek homojen plaklarla karşılaştırılmıştır.

Arefi (2016) tarafından fonksiyonel dereceli piezoelektrik katmanlı dikdörtgen plakaların stabilitesi incelenmiştir. Klasik plaka teorisi ve von Karman denklemi kullanılarak denklemler türetilmiş, kısa devre piezoelektrik katmanlar varsayılmıştır. Boyutsuz parametrelerin burkulma yükleri üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bian vd. (2005) tarafından fonksiyonel dereceli plakaların silindirik eğilme altındaki gerilme dağılımı incelenmiştir. Transfer matris yöntemi kullanılarak denklemler analitik olarak

çözülmüş ve sonuçlar önceki teorilerle karşılaştırılmıştır. Yöntemin daha doğru gerilme tahmini sağladığı gösterilmiş, sınır koşulları ve malzeme heterojenliğinin etkileri değerlendirilmiştir.

Chen'nin (2005), çalışmasında başlangıç gerilmesi altında fonksiyonel dereceli plakların doğrusal olmayan titreşim denklemleri incelenmiştir. Malzeme özellikleri kalınlık boyunca sürekli değişen bir güç yasası ile modellenmiştir. Galerkin yöntemi ile denklemler indirgenmiş, Runge-Kutta yöntemi ile doğrusal ve doğrusal olmayan frekanslar hesaplanmıştır. Sonuçlar, başlangıç gerilmesi ve malzeme bileşenlerinin titreşim davranışını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Nourmohammadi ve Behjat (2019) tarafından fonksiyonel dereceli piezoelektrik (FGP) plakların mekanik ve elektrik yükleri altındaki doğrusal olmayan tepkisi incelenmiştir. RPIM yöntemi kullanılarak FSDT ve Von Karman gerinimleri modellenmiş, Newton-Raphson ile çözümler elde edilmiştir. Analizler, doğrusal olmayan gerilmelerin daha düşük olduğunu ve FGP sensör/aktüatör tasarımında kullanılabileceğini göstermektedir.

Katiyar ve Gupta (2021) tarafından elastik zemin üzerindeki kusurlu ve gözenekli fonksiyonel dereceli plakların (B-FGP) serbest titreşimi incelenmiştir. Dairesel boşluk ve başlangıç kusurları modele dahil edilerek HSDT tabanlı formülasyon oluşturulmuştur. Malzeme özellikleri iki yönde derecelendirilmiş, sıcaklık dağılımı için yeni bir ifade türetilmiştir. Sonlu eleman yöntemiyle analiz yapılarak parametrelerin etkileri değerlendirilmiştir. Khorshidvand ve Damercheloo (2021) tarafından fonksiyonel dereceli gözenekli (FGP) plakların statik eğilme ve burkulma analizleri diferansiyel kuadratur yöntemiyle incelenmiştir. Gözeneklilik parametresi ve dağılım deseninin burkulma yükü, gerilme ve sapma üzerindeki etkileri değerlendirilmiş, artan gözenekliliğin burkulma yükünü düşürüp sapmayı artırdığı görülmüştür.

Liu vd. (2020) tarafından grafen nano plak (GPL) takviyeli fonksiyonel dereceli gözenekli (FGP) plakların dinamik analizi Rayleigh-Ritz yöntemiyle incelenmiştir. Model, elastik zemin ve sınır koşulları dikkate alınarak oluşturulmuş, sonuçlar sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulanmıştır. Mehrparvar ve Ghannadpour (2018) tarafından kesikli fonksiyonel dereceli plakların doğrusal olmayan davranışı incelenmiş, kesik boyutu ve sınır koşullarının etkileri analiz edilmiştir. Model, birinci dereceden kayma deformasyon teorisine dayanmakta olup, sonuçlar Abaqus ile doğrulanmıştır.

Nguyen vd. (2019) tarafından ilk kez izogeometrik Bezier sonlu eleman yöntemi kullanılarak, piezoelektrik katmanlarla güçlendirilmiş gözenekli fonksiyonel dereceli plakların eğilme ve geçici analizi yapılmıştır. Halpin-Tsai modeli ile mekanik özellikler belirlenmiş ve Newmark yöntemi ile zaman bağımlı denklemler çözülmüştür. Gözeneklilik, grafen plakası dağılımı ve elektriksel voltajın etkileri incelenmiş, sonuçlar gelecekteki çalışmalara referans olabilecek niteliktedir. Yin vd. (2021) tarafından fonksiyonel dereceli piezoelektrik (FGP) plakların burkulma ve yer değiştirme analizi için ölçeklenmiş sınır sonlu eleman yöntemi (SBFEM) kullanılmıştır. Yöntem, yüksek doğruluk ve hızlı yakınsama sağlarken hesaplama verimliliğini artırmaktadır. Geometrik değişkenler, malzeme bileşimi ve sınır koşullarının etkileri incelenmiştir.

Raki vd. (2012) tarafından fonksiyonel dereceli plakların termal yükler altındaki burkulma analizi yapılmış, denge ve stabilite denklemleri türetilmiştir. Kritik burkulma sıcaklıkları hesaplanmış ve SEY sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, yüksek mertebeden kayma deformasyon teorisinin doğru tahminler sunduğunu göstermektedir. Zhang vd. (2020) tarafından fonksiyonel dereceli plakların iç deliklerle burkulması, adaptif izo-geometrik analiz (IGA) ile incelenmiştir. LR B-spline taban fonksiyonları ve basit kuazi-3D hiperbolik kesme deformasyon teorisi (S-Q3HSDT) kullanılmıştır. Seviye set yöntemiyle iç delikler modellenmiş ve yerel iyileştirme hata tahmini ile yönlendirilmiştir. Farklı kesit türleri için yapılan sayısal analizler, yöntemin doğruluğunu ve yüksek hesaplama verimliliğini göstermektedir.

Zhang vd. (2021) tarafından fonksiyonel dereceli gözenekli çekirdek ve GPL takviyeli kompozit yüzeylerden oluşan üç katmanlı silindirin statik ve dinamik davranışları incelenmiştir. Sinüzoidal kesme deformasyon kabuk teorisi kullanılarak denklemler elde edilmiş, gözenek yerleşimi ve GPL dağılımının burkulma ve titreşim üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bulgular, mühendislik yapılarının tasarımına katkı sağlayabilir. Zhao vd. (2018) tarafından kalın fonksiyonel dereceli gözenekli dikdörtgen plakların titreşim analizi için üç boyutlu kesin bir çözüm sunulmuştur. Üç farklı gözenek dağılımı dikkate alınmış ve sınır koşulları göz önüne alınmadan, yer değiştirmeler geliştirilmiş Fourier serisi ile ifade edilmiştir. Rayleigh-Ritz yöntemiyle enerji fonksiyonu çözümlenmiş, doğruluğu literatürle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Ayrıca, elastik sınır koşulları için yeni sonuçlar sunulmuştur.

Daikh vd. (2023) tarafından yeni bir fonksiyonel dereceli (FD) plak modelinin eğilme davranışı incelenmiştir. Farklı sınır koşulları altında, dört farklı nano plak türü

analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki verilerle karşılaştırılarak modelin doğruluğu teyit edilmiştir. Hadji vd. (2011) tarafından fonksiyonel dereceli (FD) sandviç dikdörtgen plakların serbest titreşim analizi için dört değişkenli geliştirilmiş plak teorisi kullanılmıştır. Model, kayma düzeltme katsayısına ihtiyaç duymadan kesme gerilmelerinin kalınlık boyunca parabolik olarak dağılmasını sağlar. FD sandviç plaklar için iki farklı yapı ele alınmış ve elde edilen sonuçlar diğer teorilerle karşılaştırılarak modelin doğruluğu gösterilmiştir.

Aslan vd. (2023) tarafından değişken kesitli fonksiyonel dereceli (FD) sandviç kirişlerin serbest titreşim analizi sayısal yöntemle incelenmiştir. Çekirdek izotropik, yüzeyler ise FD malzemeden oluşmaktadır. Farklı sınır koşulları altında simetrik ve asimetrik kirişler analiz edilmiş, sonuçlar literatürle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Temel ve Noori (2020) tarafından kalınlığı değişen iki yönlü fonksiyonel dereceli (2D-FD) dairesel ve halkasal plakların serbest ve zorlanmış titreşim analizi için birleşik bir sayısal yöntem kullanılmıştır. Malzeme özellikleri hem kalınlıkta hem radyal yönde değişmektedir. Doori ve Noori (2025) tarafından eksenel simetrik FD plakların zorlanmış titreşim davranışı sonlu elemanlar yöntemi ve Laplace dönüşümü ile incelenmiştir. Malzeme özellikleri kalınlık boyunca değişmekte olup, elastik veya viskoelastik kabul edilmiştir. Thai vd. (2014) tarafından FD sandviç plaklar için sadeleştirilmiş yeni bir birinci mertebe kayma deformasyon teorisi sunulmuştur. Teori, kesme düzeltme katsayısı gerektirmez ve daha az bilinmeyen içerir. Eğilme, burkulma ve titreşim analizlerinde doğruluğu kanıtlanmıştır.

Literatür taraması sonucunda, boşluklu ve boşluksuz sandviç plakların ANSYS programı ile detaylı şekilde incelendiği kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu tez çalışmasında, söz konusu boşluğu doldurmak amacıyla, SHELL281 sonlu elemanları kullanılarak FD sandviç dikdörtgen plakların statik analizi gerçekleştirilmiştir. Çeşitli malzeme özellikleri ve geometrik parametreler dikkate alınarak yapılan analizlerde, boşluklu ve boşluksuz plakların karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi sağlanmış, gerilme dağılımları grafiksel olarak ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, boşlukların yapısal davranış üzerindeki etkilerini net bir şekilde göstermektedir.

Bu çalışma, FD sandviç plakların hem statik hem de dinamik analizine yönelik araştırmalar için bilimsel bir temel oluşturmakta ve ilgili alanda çalışma yapmak isteyen araştırmacılar için önemli bir kaynak niteliği taşımaktadır.

İKİNCİ BÖLÜM

MATERYAL VE METOT

Çok katmanlı plakların yapısal davranışlarını incelemek amacıyla, sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen tüm sayısal analizlerde ANSYS programı kullanılmıştır. Analizlerde, plak tipi yapıların modellenmesine uygun olan SHELL281 elemanı tercih edilmiştir.

SHELL281 elemanı, her düğümünde üç yer değiştirme ve üç dönme olmak üzere toplam altı serbestlik derecesine sahip sekiz düğümlü bir elemandır. Bu özellik sayesinde hem düzlemsel hem de eğilme etkileri aynı anda modellenebilmekte, bu da çok katmanlı plakların karmaşık davranışlarını gerçekçi bir şekilde incelemeye olanak sağlamaktadır.

Ayrıca bu eleman, kalın plak teorisine (Mindlin-Reissner teorisi) dayandığı için, özellikle kayma şekil değiştirmelerinin etkili olduğu kalın plak ve kabuk yapıların analizinde yüksek doğruluk sağlamaktadır. Katman tanımlama özelliği, farklı malzeme özelliklerine sahip çok katmanlı sistemlerin modellenmesini mümkün kılmış ve bu çalışmada kullanılan 80 katmanlı plak modelleri için son derece uygun bir çözüm sunmuştur. Plak kalınlığı 1m olarak kabul edilmiştir.

Bu tez kapsamında 4 adet katman dizilimi kullanılmıştır.

2.1. Katman Dizilimleri

1–0–1 Üst ve alt katman eşit kalınlığa sahip (1), orta katman yok (0).

2–1–2 Dış katmanlar eşit kalınlığa sahip (2), orta katman (1).

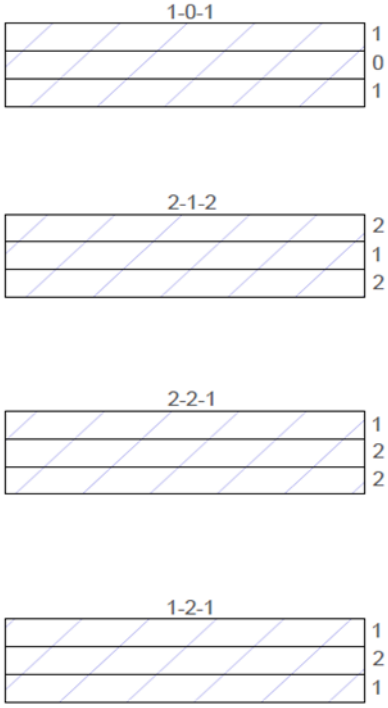
2–2–1 Alt ve orta katmanlar eşit kalınlığa sahip (2), üst katman daha ince (1). Rijitlik asimetrik.

1–2–1 Orta katman (2), dış katmanlar eşit kalınlığa sahip (1).

Şekil 1’de gösterilen yapı, üç katmandan oluşan bir sandviç plak modelini temsil etmektedir. Bu modelde üst ve alt yüzey tabakaları, metal ve seramik bileşenlerinin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden oluşmaktadır. Orta tabaka ise izotrop ve homojen özellik gösteren bir malzeme ile temsil edilmiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş yüzey tabakalarının malzeme özelliklerinin, plak kalınlığı boyunca sürekli ve düzgün biçimde değiştiği kabul edilmektedir. Bu değişimin, üstel türde bir dağılıma göre

gerçekleştiği varsayılmakta olup, ilgili dağılım aşağıda ayrıntılı şekilde tanımlanmaktadır.

$$P(z) = P_m + (P_c - P_m)V \quad (1)$$



Şekil 1. Farklı Malzeme Dağılımlarına Sahip Üç Katmanlı Sandviç Plaklar

P_m metal malzemenin mekanik özelliklerini P_c ise seramik malzemesinin mekanik özelliklerini, V ise hacim indeksini göstermektedir. Çok katmanlı plakların mekanik davranışlarını analiz edebilmek amacıyla, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) tabanlı bir mühendislik yazılımı olan ANSYS kullanılmıştır. ANSYS, karmaşık yapıların sayısal olarak modellenmesine ve çeşitli yükleme koşulları altında davranışlarının detaylı şekilde incelenmesine olanak sağlayan güçlü bir analiz programıdır.

Modelleme sürecinde, plak yapıları için uygun olan SHELL281 kabuk elemanı tercih edilmiş ve tüm geometri tanımlamaları, elastisite modülü ve Poison oranı, ve yüklemeler ANSYS ortamında gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları da yine bu program aracılığıyla elde edilerek grafiksel ve sayısal olarak değerlendirilmiştir.

Çok katmanlı plak yapıların dış yükler altındaki davranışını incelemek amacıyla statik yapısal analiz gerçekleştirilmiştir. Yani, zamana bağlı etkiler dikkate alınmamış; yalnızca yapı üzerine uygulanan sabit yükler altında meydana gelen şekil değiştirmeler ve iç gerilmeler analiz edilmiştir.

Bu tez çalışmasında, çok katmanlı plakların farklı yükleme koşulları altındaki mekanik davranışlarını inceleyebilmek amacıyla üniform yük ve tekil (noktasal) yük olmak üzere iki farklı yükleme türü uygulanmıştır.

Her iki yükleme durumu da aynı SHELL281 elemanı, 40×40 mesh yapısı ve farklı mesnetleme koşulları altında test edilmiş; elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak hem üniform hem de tekil yük uygulamaları sayesinde plağın genel ve yerel mekanik tepkileri detaylı biçimde analiz edilebilmiştir. Bu çeşitlilik çalışmanın mühendislik uygulamaları açısından daha geniş bir bakış açısı sunmasını sağlamıştır.

Statik analiz yöntemi, plağın belirli kenar şartları için nasıl deformasyona uğradığını, maksimum çökme miktarlarını ve gerilme dağılımlarını belirlemek için yeterli ve uygun bir yaklaşımdır. Bu nedenle çalışmada dinamik yükleme ya da zamana bağlı değişim gerektiren bir durum söz konusu olmamıştır. Dinamik yükleme durumu gelecekteki çalışmada ele alınacaktır.

Analizler yalnızca statik yükleme koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Ancak mühendislik uygulamalarında yapıların karşılaştığı yükler çoğu zaman zamana bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle, dinamik yükleme durumları da yapısal davranışın anlaşılması açısından büyük önem taşımaktadır.

Gelecekteki çalışmalarda, çok katmanlı plakların darbesel, titreşimli ya da periyodik yüklemeler altındaki davranışları incelenebilir. Bu kapsamda, zamanla değişen yük etkileri, dinamik analiz yöntemleriyle değerlendirilerek hem doğal frekanslar hem de zorlanmış titreşim tepkileri analiz edilebilir. Böylece, bu çalışmada elde edilen statik bulgular, dinamik yüklemelere karşı sistemin tepkisiyle desteklenmiş ve daha kapsamlı bir mühendislik değerlendirmesi yapılmış olur.

2.2. Malzeme Özellikleri

Malzeme özellikleri plak kalınlığı boyunca eşitlik 2-13 ile değişmektedir. z plağın orta ekseninden ölçülen düşey koordinattır. Tabakalanma durumu 1-0-1 için hacim indeksleri denklem 2-4 arasında verilmektedir. Bu denklemlerde p malzeme değişim katsayısıdır.

$$V_1(z) = \left(\frac{z - h_0}{h_1 - h_0}\right)^p \qquad h_0 \le z \le h_1 \quad ; \; h_0 = -0{,}5 \; ; \; h_1 = -0{,}25 \qquad (2)$$

$$V_2(z) = 1 \qquad h_1 \le z \le h_2 \quad ; h_1 = -0{,}25 \; ; h_2 = -0{,}25 \qquad (3)$$

$$V_3(z) = \left(\frac{z - h_3}{h_2 - h_3}\right)^p \qquad h_0 \le z \le h_1 \quad ; h_0 = -0{,}5 \; ; h_1 = -0{,}25 \qquad (4)$$

Tabakalanma durumu 2-1-2 için hacim indeksleri denklem 5-7 arasında verilmektedir

$$V_1(z) = \left(\frac{z - h_0}{h_1 - h_0}\right)^p \qquad h_0 \le z \le h_1 \quad ; h_0 = -0{,}5 \; ; h_1 = -0{,}1 \qquad (5)$$

$$V_2(z) = 1 \qquad h_1 \le z \le h_2 \quad ; h_1 = -0{,}1 \; ; h_2 = -0{,}1 \qquad (6)$$

$$V_3(z) = \left(\frac{z - h_3}{h_2 - h_3}\right)^p \qquad h_0 \le z \le h_1 \quad ; h_0 = -0{,}1 \; ; h_1 = -0{,}5 \qquad (7)$$

Tabakalanma durumu 2-2-1 için hacim indeksleri denklem 8-10 arasında verilmektedir.

$$V_1(z) = \left(\frac{z - h_0}{h_1 - h_0}\right)^p \qquad h_0 \le z \le h_1 \quad ; h_0 = -0{,}5 \; ; h_1 = -0{,}1 \qquad (8)$$

$$V_2(z) = 1 \qquad h_1 \le z \le h_2 \quad ; h_1 = -0{,}1 \; ; h_2 = -0{,}3 \qquad (9)$$

$$V_3(z) = \left(\frac{z - h_3}{h_2 - h_3}\right)^p \qquad h_0 \le z \le h_1 \quad ; h_0 = -0{,}3 \; ; h_1 = -0{,}5 \qquad (10)$$

Tabakalanma durumu 1-2-1 için hacim indeksleri denklem 11-13 arasında verilmektedir.

$$V_1(z) = \left(\frac{z - h_0}{h_1 - h_0}\right)^p \qquad h_0 \le z \le h_1 \quad ; h_0 = -0{,}5 \; ; h_1 = -0{,}25 \qquad (11)$$

$$V_2(z) = 1 \qquad h_1 \le z \le h_2 \quad ; h_1 = -0{,}25 \; ; h_2 = -0{,}25 \qquad (12)$$

$$V_3(z) = \left(\frac{z - h_3}{h_2 - h_3}\right)^p \qquad h_0 \le z \le h_1 \quad ; h_0 = -0{,}25 \; ; h_1 = -0{,}5 \qquad (13)$$

Bu bölümde, mevcut teorinin doğruluğunu doğrulamak ve güç kanunu indisi, tabaka kalınlık oranı (yani düzeni) ve enine kayma deformasyonunun, fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) sandviç plakların çökmesi, gerilmesi ve iç kuvvetler üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla çeşitli sayısal örnekler sunulmakta ve tartışılmaktadır. Aksi belirtilmedikçe, statik yükler altında alüminyum yüzey plakları (metal olarak) ve alümina çekirdeğinden (seramik olarak) oluşan, basit mesnetli bir Al/Al_2O_3 sandviç plak esas alınmaktadır. Alüminyumun elastisite modülü, Poisson oranı ve yoğunluğu sırasıyla E_m = 70 GPa, ν_m = 0.3 ve ρ_m = 2702 kg/m³, alüminanın ise E_c = 380 GPa, ν_c = 0.3 ve ρ_c = 3800 kg/m³'tür. Beş farklı sandviç plak düzeni ele alınmıştır (Bkz. Şekil 2). Kolaylık açısından, alttan üste her bir katmanın kalınlık oranı üç sayı kombinasyonu ile ifade edilmektedir; örneğin (1–0–1), (2–1–2), (2–2–1), (1–2–1).

2.3. Sınır Koşulları

Çok katmanlı plak yapıların farklı mesnetleme koşulları için mekanik davranışları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Farklı kenar sabitleme kombinasyonları kullanılarak plaklara uygulanan yükler altında meydana gelen şekil değiştirmeler analiz edilmiştir. Yapılan çalışmalarda toplamda yedi farklı mesnetleme durumu tanımlanmıştır:

CCCC (Dört kenarı ankastre mesnetli):

Plağın tüm kenarları yer değiştirme ve dönmeye karşı sabitlenmiştir. Bu en rijit mesnetleme türüdür ve çökme miktarını en çok sınırlayan durumdur.

CFCF (İki kenarı ankastre, iki kenarı serbest):

Plağının karşılıklı iki kenarı ankastre, diğer iki kenarı ise serbest bırakılmıştır. Bu durumda yapı daha esnek davranmakta, çökme miktarı artmaktadır.

CCCF (Üç kenarı ankastre, bir kenarı serbest):

Üç kenarı ankastre mesnetli olup bir kenarı serbest bırakılmıştır. Asimetrik yük dağılımları ve düzensiz şekil değişimleri bu durumda daha belirgindir.

SSSS (Dört kenarı basit mesnetli):

Plağının dört kenarı da yer değiştirmeye karşı sabitlenmiş, ancak kenar dönmelerine izin verilmiştir. Bu klasik bir plaka kenar şartıdır ve mühendislik uygulamalarında sıkça görülür.

CSCS (İki kenarı ankastre, iki kenarı basit mesnetli):

Plağının iki kenarı tamamen sabit, diğer iki kenarı ise yalnızca yer değiştirmeye karşı sabitlenmiş ama dönmeye izin verilmiştir. Bu yarı rijit bir mesnetleme türüdür.

CCCC – a ve b değişken (Plak boyutu değişken):

Bu durumda dört kenarı ankastre olan plağının boyutları (kısa kenar a, uzun kenar b) değiştirilerek, plak oranının şekil değiştirme üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

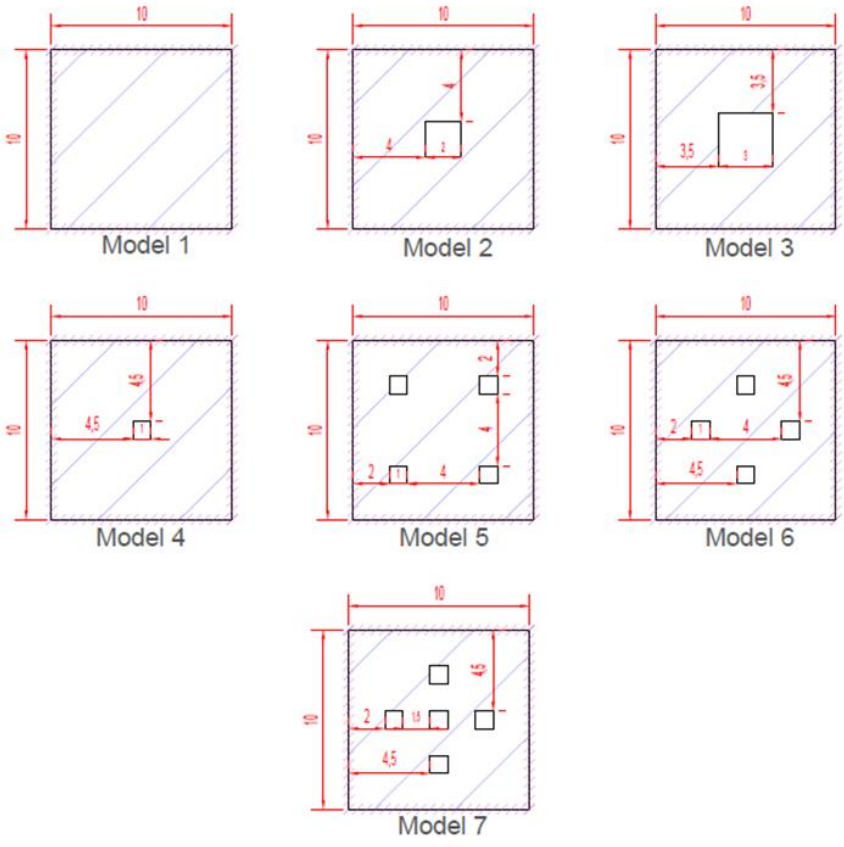
CCCC – ortada boşluk bulunan model:

Plak dört kenarından sabitlenmiş olup, orta kısmında geometrik bir boşluk (delik) tanımlanmıştır. Bu durum mühendislikte karşılaşılan bağlantı noktaları ya da zayıf bölgelerin davranışını simüle etmek amacıyla çalışmaya dahil edilmiştir.

Sonuç olarak, bu farklı mesnetleme koşulları sayesinde, aynı yapının sınır şartlarına bağlı olarak nasıl farklı tepkiler verdiği detaylı şekilde analiz edilmiştir. Bu çeşitlilik, çalışmanın mühendislik uygulamaları açısından daha geniş bir bakış sunmasına olanak sağlamıştır.

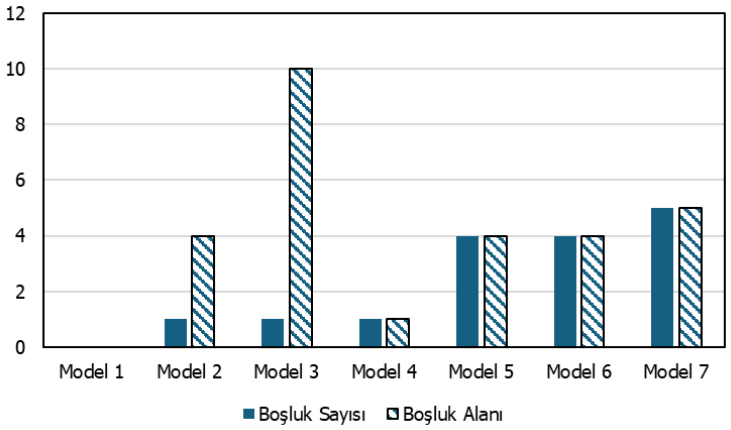
2.4. Geometrik Modeller

Bu modelde özel bir geometrik boşluk yer almamaktadır. Bu durum, özellikle boşluklu sistemlerle karşılaştırıldığında, sistemin daha rijit çalışmasına ve daha düşük çökme değerleri elde edilmesine katkı sağlamaktadır. Yine de katman dizilimi ve *p* katsayısı, sistemin deformasyon tepkisi üzerinde temel belirleyici etkenler olmaya devam etmektedir. Bu görsel, analizde kullanılan dört farklı katman diziliminin (sandviç yapılar) görsel tanımını vermektedir. Her dizilim, malzeme rijitliğini veya elastisite modülünü temsil eden katmanlardan oluşur.



Şekil 2. 7 Boşluksuz ve boşluklu Modelleri

Rijitliği en çok azalan yapı; yer değiştirme en yüksek olabilir çünkü hem merkez hem köşeler etkilenebilir.



Şekil 3. Model 1–7'ye ait boşluk sayısı ve boşluk alanı

Bu yapı, model geometrilerinin rijitlik ve çökme üzerindeki etkisini analiz ederken temel referans olarak kullanılabilir.

Şekil 2'de gösterilen 7 farklı sandviç plak modeli, plakların iç yapısındaki boşlukların sayısı, büyüklüğü ve yerleşim düzenine göre farklılık göstermektedir.

Şekil 3'te bu modellerin her biri için boşluk sayısı, toplam boşluk alanı ve yerleşim biçimi özetlenmiştir. Bu parametreler, plakların rijitlik özelliklerini doğrudan etkilemekte ve buna bağlı olarak yer değiştirme davranışlarında belirgin farklar oluşturmaktadır.

Model 1, boşluksuz yani tam plak modelidir. Hiçbir iç boşluğa sahip olmaması nedeniyle tüm modeller arasında en yüksek rijitliğe sahiptir. Yük altında en düşük yer değiştirme bu modelde beklenmektedir ve bu nedenle referans model olarak değerlendirilir.

Model 2, ortasında konumlandırılmış tek bir boşluğa sahiptir. Boşluk alanı 4,0 m^2 olup, merkezde yer aldığı için rijitlik kaybı sınırlı kalmakta, buna bağlı olarak da yer değiştirme miktarı görece düşüktür.

Model 3, yine tek boşluğa sahip bir modeldir ancak boşluk büyüklüğü 10,5 m^2 ile tüm modeller içinde en büyük alana sahiptir. Bu boşluk orta bölgededir ve büyük boyutu nedeniyle rijitlikte ciddi bir azalmaya yol açmakta, dolayısıyla yer değiştirme miktarının yüksek olması beklenmektedir.

Model 4, orta bölgede konumlanan küçük bir boşluğa (1,0 m^2) sahiptir. Boşluğun küçük olması nedeniyle rijitlik üzerindeki etkisi sınırlı olsa da merkezde yerleşiminden dolayı deformasyon üzerindeki etkisi Model 2'ye kıyasla daha belirgin olabilir.

Model 5, dört adet boşluk içerir ve bu boşluklar plak köşelerine yakın noktalarda konumlandırılmıştır. Toplam boşluk alanı 4,0 m² olup, boşlukların dağınık fakat simetrik yerleşimi nedeniyle rijitlik kaybı dengeli dağılmıştır. Bu nedenle yer değiştirme orta seviyelerde beklenmektedir.

Model 6, beş boşluğa sahiptir ve boşluklar alt sağ bölgeye yoğunlaşmıştır. Toplam boşluk alanı 5,0 m²'dir. Simetrik yerleşim nedeniyle rijitlik kaybı dengeli oluşmakta ve bu durum yük altında yönlü yer değiştirmelere neden olabilmektedir.

Model 7, en fazla boşluğa sahip modeldir (5 adet) ve toplam boşluk alanı 5,0 m²'dir. Boşluklar hem merkezde hem de köşelere yayılmış durumdadır. Bu yaygın ve düzenli yerleşim hem merkezi hem de çevresel rijitliği zayıflatarak yer değiştirmeyi maksimum seviyeye çıkarabilir. Bu nedenle, rijitliğin en çok azaldığı ve yer değiştirmenin en yüksek olabileceği model olarak öne çıkabılır.

Genel olarak değerlendirildiğinde hem boşluk sayısının hem de boşlukların yerleşim düzeninin plakların mekanik davranışı üzerinde önemli etkileri olduğu görülmektedir. Özellikle boşlukların merkeze yakın yerleşmesi ve toplam alanın artması, rijitliği azaltarak deformasyonu artırıcı bir rol oynamaktadır. Bu nedenle yapısal analizlerde yalnızca boşluk miktarı değil, aynı zamanda boşlukların geometrik dağılımı da dikkatle değerlendirilmelidir.

2.5. Sonlu Elemanlar İle Modelleme

Ele alınan problemin statik davranışının daha etkin bir şekilde araştırılabilmesi için optimum sonlu eleman ağının saptanması gerekmektedir. Bu amaç ile bu tezde çeşitli sonlu eleman ağları ile modeller geliştirilmiştir. Örneğin plak 10x10, 20x20,40x40,80x80 ve 100x100 olacak şekilde sonlu elemanlara bölünerek en büyük düşey yer değiştirme değerleri elde edilmiş ve literatür ile karşılaştırılmıştır. Tüm katman dizilimleri ve malzeme katsayıları için sonuçların 40x40 mesh ağından sonra değişmediği görülmüştür.

Çok katmanlı plakların sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal olarak analiz edilebilmesi için, her bir modelin yüzeyi düzenli ve homojen bir şekilde 40×40'lık bir ağ yapısına (mesh) bölünmüştür. Bu işlem, ANSYS yazılımı içerisinde tanımlanan geometri üzerine, otomatik ağ oluşturma (auto-mesh) komutu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

-Ağ yapısı oluşturulurken:

Eleman tipi olarak SHELL281 seçilmiştir.

Her kenar boyunca eşit sayıda bölme yapılmış, böylece ağ yapısı dörtgen ve düzenli bir şekilde tanımlanmıştır.

Elemanların boyutu, geometriye oranla yeterince küçük tutularak analiz hassasiyeti artırılmış, ancak işlem süresi açısından da dengeli bir yapı korunmuştur.

Mesh oluşturma sırasında serbest değil, eşlenmiş mesh yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem sayesinde ağ yapısı daha düzgün olmuş ve sayısal çözümleme sırasında kararlılık sağlanmıştır.

Ayrıca, tüm modellerde aynı ağ yapısı kullanılarak, farklı malzeme dağılımı veya sınır şartlarının etkileri karşılaştırmalı olarak incelenebilmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerde her bir plak modeli, yüzey boyunca 40×40'lık düzenli bir ağ yapısına bölünmüştür. Bu mesh yoğunluğunun seçilmesinde temel amaç, analiz doğruluğu ile işlem süresi arasında dengeli bir yapı kurmak olmuştur.

40×40'lık ağ kullanma nedenleri şu şekilde özetlenebilir:

-Yeterli sayısal hassasiyet sağlanması:

Yapıların deformasyonları, gerilme dağılımları ve maksimum çökme noktaları gibi büyüklüklerin doğru hesaplanabilmesi için ağ yoğunluğunun belirli bir seviyenin üzerinde olması gereklidir. Yapılan denemelerde, 40×40'lık mesh ile daha seyrek ağlara göre anlamlı şekilde daha doğru sonuçlar elde edilmiştir.

-Karşılaştırmalı analizlerin tutarlılığı:

Bu çalışmada farklı sınır şartları ve malzeme dağılımları ile oluşturulmuş birden fazla model analiz edilmiştir. Tüm modellerde aynı ağ yapısının kullanılması, sonuçların birbirleriyle sağlıklı şekilde karşılaştırılabilmesine imkân tanımıştır.

-Hesaplama süresinin makul düzeyde tutulması:

Daha yoğun bir ağ yapısı (örneğin 60×60 veya 80×80) ile analiz yapmak, işlem süresini ve bilgisayarın kaynak tüketimini ciddi şekilde artırmaktadır. 40×40'lık yapı ise hem yeterli doğruluğu sağlamış hem de işlem süresini uzatmadan analizlerin tamamlanmasına olanak vermiştir.

-SHELL281 elemanına uygunluk:

SHELL281 kabuk elemanı, düzgün dörtgen ağ yapılarında daha kararlı ve isabetli sonuçlar üretmektedir. 40×40'lık eşit bölünmüş ağ yapısı, bu elemanın performansını en verimli şekilde kullanmayı mümkün kılmıştır.

SHELL281 elemanı, ANSYS'ta ince ve orta kalınlıktaki katmanlı yapıların analizinde kullanılan, her düğümde 6 serbestlik derecesine sahip dört düğümlü gelişmiş bir kabuk elemanıdır. Bu elemanla yapılan analizlerde katman sayısı arttıkça hesap yükü artar; genellikle 50'nin üzerindeki katmanlarda çözüm süresi uzar. Eleman, izotropik, ortotropik veya anizotropik malzemelerle çalışabilir, ancak her katmanda malzeme özellikleri sabit kabul edilir. Delaminasyon veya katmanlar arası kayma gibi özel durumlar doğrudan modellenemez. Mesh kalitesi çözüm doğruluğu için kritiktir, bozuk veya dar açılı elemanlardan kaçınılmalıdır. Büyük deformasyonlar ve sıcaklık etkileri de modellenebilir, fakat bu durumlarda doğru çözüm ayarları yapılmalıdır. Kısacası, SHELL281 güçlü bir elemandır ancak katmanlı yapılar ve yüksek hassasiyet gerektiren analizlerde dikkatli kullanılmalıdır.

SHELL281 elemanının şekil fonksiyonları, dört düğümlü bir kabuk elemanı olduğu için her düğümde tanımlanan yer değiştirme ve dönme bileşenlerini, eleman içindeki herhangi bir noktaya düzgün biçimde yaymak amacıyla kullanılır. Bu şekil fonksiyonları, genellikle isoparametrik formda tanımlanır ve elemanın geometrisini, yer değiştirmesini ve diğer alan değişkenlerini tanımlamak için kullanılır. Elemanın içinde kullanılan şekil fonksiyonları hem yüzey boyunca hem de kalınlık boyunca değişimleri yakalayacak şekilde tasarlanmıştır.

Sonuç olarak, 40×40'lık mesh yapısı, bu tez kapsamında hem mühendislik açısından yeterli doğrulukta sonuçlar alınmasını sağlamış hem de çözüm süresini makul düzeyde tutarak analizlerin verimli bir şekilde tamamlanmasına katkı sunmuştur.

Toplam yedi farklı model oluşturulmuştur. Model 1, herhangi bir boşluk içermeyen tam plağı temsil ederken, Model 2 ile Model 7 arasında değişen diğer modellerde farklı konum ve büyüklüklerde kare biçimli boşluklar yerleştirilmiştir.

Her modelin düğüm sayısı ve sonlu eleman sayısı farklıdır. Bu değerler aşağıdaki Tabloda 1'de verilmiştir:

Tablo 1. Her modelin düğüm sayısı ve sonlu eleman sayısı

Model No	Düğüm Sayısı	Sonlu Eleman Sayısı
Model 1	4961	1600
Model 2	12633	4105
Model 3	10784	3490
Model 4	17242	5642
Model 5	6769	2192
Model 6	4797	1534
Model 7	5448	1740



Şekil 4. ANSYS'ta malzemelerin tanımı

Tanımlanan malzemeleri katmanlara tanımlatmak için aşağıda verilen kod kullanılmıştır.

sect,1,shell,,

secdata, 0.0125,1,0.0,3

secdata, 0.0125,2,0.0,3

secdata, 0.0125,3,0.0,3

secdata, 0.0125,4,0.0,3

secdata, 0.0125,5,0.0,3

secdata, 0.0125,6,0.0,3

secdata, 0.0125,7,0.0,3

secdata, 0.0125,8,0.0,3

secdata, 0.0125,9,0.0,3

secdata, 0.0125,10,0.0,3

.

.

.

secdata, 0.0125,78,0.0,3

secdata, 0.0125,79,0.0,3

secdata, 0.0125,80,0.0,3

secoffset,MID

seccontrol,,,, , , ,

Tezde kullanılan .csv dosyası örneği aşağı sunulmuştur.

MPTEMP

MPTEMP, 1,0.00E+00,

MPDATA,EX ,1,1,7.00E+10

MPTEMP

MPTEMP, 1,0.00E+00,

MPDATA,NUXY, 1,1,3.00E-01,

MPTEMP

MPTEMP, 1,0.00E+00,

MPDATA,DENS, 1,1,2.70E+03,

MPTEMP

MPTEMP, 1,0.00E+00,

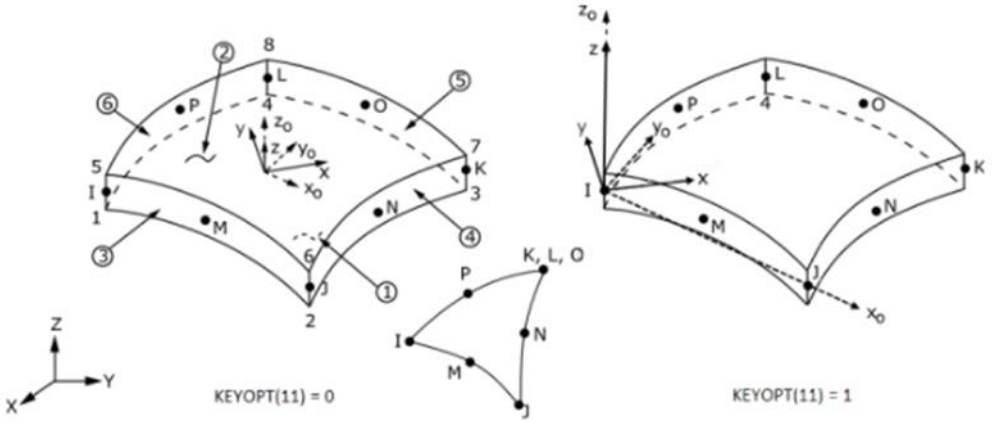
MPDATA,PRXY, 1,1,3.00E-01,

MPTEMP

```
MPTEMP,  1,0.00E+00,
MPDATA,EX  ,2,1,7.78E+10
MPTEMP
MPTEMP,  1,0.00E+00,
MPDATA,NUXY,  2,1,3.00E-01,
MPTEMP
MPTEMP,  1,0.00E+00,
MPDATA,DENS,  2,1,2.73E+03,
MPTEMP
MPTEMP,  1,0.00E+00,
MPDATA,PRXY,  2,1,3.00E-01,
.
.
.
MPDATA,PRXY,  79,1,3.00E-01,
MPTEMP
MPTEMP,  1,0.00E+00,
MPDATA,EX  ,80,1,7.78E+10
MPTEMP
MPTEMP,  1,0.00E+00,
MPDATA,NUXY,  80,1,3.00E-01,
MPTEMP
MPTEMP,  1,0.00E+00,
MPDATA,DENS,  80,1,2.70E+03,
MPTEMP
MPTEMP,  1,0.00E+00,
MPDATA,PRXY,  80,1,3.00E-01,
MPTEMP
```

Bu çalışmada çeşitli katman dizilimleri, mesnet koşulları, farklı boyutlar, malzeme değişim katsayıları, boşluklu ve boşluksuz plaklar için en büyük düşey yer değiştirme değerleri, birinci ve ikinci asal gerilmeler ile von-Mises gerilmeleri hesaplanmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan tüm sayısal analizlerde ANSYS yazılımı kullanılmıştır. Yapıların modellenmesinde tercih edilen eleman tipi ise SHELL281 kabuk elemanıdır (Şekil 3 (ANSYS (2013))).



Şekil 5. Shell281 ve düğüm noktaları

SHELL281 elemanı, çok katmanlı ve fonksiyonel olarak değişken (derecelendirilmiş) malzeme yapılarının analizinde yüksek doğruluk sağladığı için seçilmiştir. Özellikle bu çalışmada incelenen plaklar, farklı malzeme tabakalarının bir araya gelmesiyle oluşturulan kompleks yapılar içerdiğinden, her katman için ayrı ayrı malzeme tanımlamalarına izin veren bu eleman, çalışmanın gereksinimlerini tam olarak karşılamaktadır.

Ayrıca SHELL281'in 8 düğüm noktalı yapısı, altı serbestlik derecesi ve kalın kabuk teorisine dayalı formülasyonu sayesinde hem düzlem içi hem de eğilme davranışlarını eşzamanlı olarak incelemeye olanak sunmuştur. Bu yönüyle hem küçük hem de büyük şekil değişimleri göz önüne alınan analizlerde güvenilir sonuçlar elde edilmesi sağlanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen sayısal analizlerde SHELL281 elemanının tercih edilmesinin temel nedeni, elemanın çok katmanlı ve kalın kabuk yapıların analizine uygun özellikler taşımasıdır. İncelenen plak modelleri, farklı malzeme özelliklerine sahip birden fazla katmandan oluştuğu için, her katmanın ayrı ayrı tanımlanabildiği bir eleman tipi gerekmektedir. SHELL281 bu ihtiyaca doğrudan yanıt vermektedir.

Bu elemanın tercih edilmesindeki başlıca nedenler şunlardır:

Katmanlı yapı desteği:

SHELL281, birden fazla malzeme katmanının aynı eleman içerisinde tanımlanmasına izin verir. Bu özellik, çalışmada ele alınan çok katmanlı plakların modellenmesi için vazgeçilmezdir.

Kalın plak teorisine uygunluk:

Kullanılan eleman, Mindlin-Reissner teorisine dayandığı için kalın yapılarda meydana gelen kesme şekil değiştirmelerini ihmal etmeden analiz yapma imkânı sunar. Bu da analiz sonuçlarının doğruluğunu artırır.

Geniş analiz desteği:

SHELL281 hem doğrusal hem de doğrusal olmayan analizler için uygundur. Bu çalışmada büyük yer değiştirme, burkulma ve eğilme etkileri gibi farklı davranış biçimleri incelendiği için, elemanın bu esnekliği önemli bir avantaj sağlamıştır.

Her düğümde altı serbestlik derecesi bulunması sayesinde hem düzlemsel hem de eğilme etkileri aynı anda modellenebilmiş, bu da yapısal davranışın daha doğru şekilde temsil edilmesini sağlamıştır.

SHELL281 elemanı, belirli bir ağ yoğunluğuyla yüksek doğrulukta sonuçlar verirken, işlem süresi açısından da dengeli bir performans göstermektedir. Bu yönüyle hem güvenilir hem de hesaplamada verimli bir seçenek olmuştur.

Beş farklı kenar koşulu senaryosu oluşturularak analiz yapılmıştır.

Kenar Sabitleme Tanımları. Plakların dört kenarında uygulanan sabitleme türleri aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır:

Sembol tanım:

C: Ankastre (yer değiştirme ve dönme yok)

S: Basit mesnet (yer değiştirme yok, dönmeye izin var)

F: Serbest (kısıtlama yok)

Kullanılan tabaka durumu dizilimleri:

CCCC: Dört kenar da ankastre.

CCCF: Üç kenar ankastre, bir kenar serbest.

CFCF: Alt ve üst kenar ankastre, yan kenarlar serbest.

CSCS: Dikey kenarlar ankastre, yatay kenarlar basit mesnet.

SSSS: Tüm kenarlar basit mesnet.

Kenar koşullarının uygulama şekli ANSYS ortamında her kenar (i, j, k, l) için uygulanan sabitlemeler açıkça tanımlanmıştır:

UX, UY, UZ = 0: Üç yönde yer değiştirme kısıtlanmıştır

ROTX, ROTY, ROTZ = 0: Üç eksende dönme serbestlikleri kaldırılmıştır.

Örneğin:

CCCC mesnet durumu: Tüm kenarlarda hem yer değiştirme hem de dönme engellenmiştir.

CCCF mesnet durumu: L kenarı serbest bırakılmış, diğer üç kenarda tüm hareketler kısıtlanmıştır.

Analizin Amacı:

Farklı kenar sabitleme türlerinin plak davranışı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. İncelenen başlıca tepkiler:

Düşey yer değiştirme (çökme).

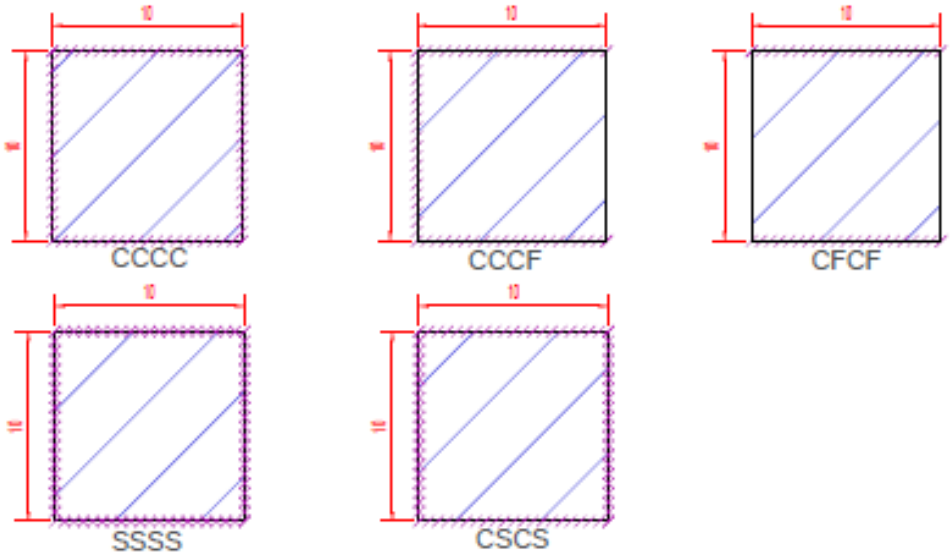
Gerilme dağılımı.

Kullanılan Yöntem ve Araçlar:

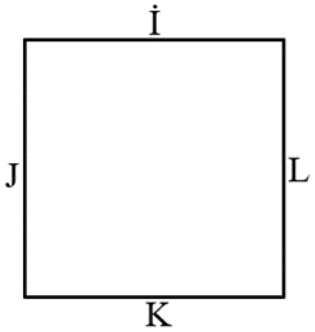
Yazılım: ANSYS

Eleman türü: SHELL281 (kalın plak modellemeleri için uygun)

Kenar sabitleme tanımı: ANSYS içindeki displacement constraint komutları ile yapılmıştır



Şekil 6. İncelenen Sandviç Plak Modelleri İçin Farklı Kenar Koşulları



Şekil 7. Sandviç Plakta Kenar Tanımları ve Yönlendirme Noktaları

Tablo 2. ANSYS Ortamında Kenar Koşullarının Uygulanış Şeması

No		İ	J	K	L
1	CCCC	UX=0 UY=0 UZ=0 ROTX=0 ROTY=0 ROTZ=0	UX=0 UY=0 UZ=0 ROTX=0 ROTY=0 ROTZ=0	UX=0 UY=0 UZ=0 ROTX=0 ROTY=0 ROTZ=0	UX=0 UY=0 UZ=0 ROTX=0 ROTY=0 ROTZ=0
2	CCCF	UX=0 UY=0 UZ=0 ROTX=0 ROTY=0 ROTZ=0	UX=0 UY=0 UZ=0 ROTX=0 ROTY=0 ROTZ=0	UX=0 UY=0 UZ=0 ROTX=0 ROTY=0 ROTZ=0	–
3	CFCF	UX=0 UY=0 UZ=0 ROTX=0 ROTY=0 ROTZ=0	–	UX=0 UY=0 UZ=0 ROTX=0 ROTY=0 ROTZ=0	–
4	CSCS	UX=0 UY=0 UZ=0 ROTX=0 ROTY=0 ROTZ=0	UZ=0 UX=0	UX=0 UY=0 UZ=0 ROTX=0 ROTY=0 ROTZ=0	UZ=0 UX=0
5	SSSS	UZ=0 UY=0	UZ=0 UX=0	UZ=0 UY=0	UZ=0 UX=0

SHELL281, ANSYS analiz programında kullanılan ve özellikle çok katmanlı kompozit yapılar ile kalın kabuk sistemlerin modellenmesinde tercih edilen gelişmiş bir kabuk elemanıdır. Bu eleman, her köşesinde birer tane olmak üzere toplam 8 düğüm noktasına sahiptir. Her bir düğüm noktasında üç konumsal (X, Y, Z yönlerinde yer değiştirme) ve üç açısal (X, Y, Z eksenleri etrafında dönme) olmak üzere altı serbestlik derecesi bulunur. Bu sayede yapıya gelen kuvvetlerin ve momentlerin detaylı bir şekilde analiz edilmesine olanak sağlar.

SHELL281, kalın plak teorisine dayalı olarak geliştirilmiştir. Bu teori, özellikle kalın yapı elemanlarında görülen kesme şekil değiştirmelerini de dikkate aldığı için, sadece ince kabuklar değil, aynı zamanda kalın kabuk yapıların da doğru şekilde analiz edilmesine imkân tanır. Eleman, birden fazla katmanla tanımlanabilir. Her katmana ait farklı malzeme özellikleri, kalınlık değerleri ve gerekirse lif yönleri ayrı ayrı belirlenebilir. Bu özellik, özellikle sandviç yapılarda veya işlevsel olarak değişken (derecelendirilmiş) malzeme kullanılan sistemlerde büyük avantaj sağlar.
Bu eleman hem doğrusal hem de doğrusal olmayan analizlerde kullanılabilir. Yapının zamanla uğradığı büyük şekil değiştirmeler, burkulma (stabilite) problemleri, doğal frekans analizleri (titreşim) ve ısı etkisi altındaki mekanik davranışlar (termal analizler) gibi karmaşık mühendislik problemleri için uygundur. Aynı zamanda farklı yapı parçalarının birbirine temas ettiği (kontak) durumlar da bu elemanla detaylı şekilde analiz edilebilir.

Sonuç olarak SHELL281 hem mühendislik hem de araştırma amaçlı çalışmalarda yüksek hassasiyetli sonuçlar sunan, çok yönlü bir kabuk elemanıdır. Özellikle kompozit ve sandviç yapıların analizinde sağladığı detaylı katman tanımı ve geniş kullanım alanı sayesinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesinde kullanılan SHELL281 kabuk elemanı tercih edilmiştir. Bu elemanın kullanılmasına yönelik bazı temel kabuller bulunmaktadır. Bu kabuller hem elemanın davranışını hem de analiz sonuçlarının geçerlilik sınırlarını belirlemede önem taşımaktadır. Aşağıda, SHELL281 elemanına özgü başlıca varsayımlar maddeler hâlinde sunulmuştur:
Sürekli ve düzgün bir yapı kabulü yapılır.

Modellenen yapı, süreksizlik veya çatlak içermeyen, homojen ve sürekli bir ortam olarak ele alınır.

Katmanlar arasında tam yapışma varsayılır.

Birden fazla malzeme katmanından oluşan yapılarda, katmanlar arasında herhangi bir kayma ya da ayrılma olmadığı, yük altında birlikte çalıştıkları kabul edilir.

Kesme şekil değiştirmeleri ihmal edilmez.

SHELL281, kalın kabuk/plak teorisine (Mindlin-Reissner teorisi) dayanır. Bu nedenle kayma şekil değiştirmeleri analizde dikkate alınır ve bu da kalın yapılarda daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlar.

Her düğüm noktasında altı serbestlik derecesi vardır.

Bu hem düzlem içi yer değiştirmelerin hem de eğilme ve burulma etkilerinin birlikte modellenebilmesini mümkün kılar.

Katman içinde malzeme homojen ve izotrop kabul edilir.

Her bir katman için malzeme özellikleri sabit kabul edilir. Ancak farklı katmanlara farklı malzeme özellikleri tanımlanabilir.

Geometrik olarak ince bir yapı modeli yapılır; ancak kalınlık etkileri ihmal edilmez.

Plak modeli, yapıyı hacimsel olarak değil, yüzeysel olarak temsil eder. Buna rağmen kalınlık boyunca oluşabilecek gerilmeler ve deformasyonlar analizde hesaba katılır.

Doğrusal ya da doğrusal olmayan davranışlar analiz amacına göre seçilir.

SHELL281 hem küçük hem de büyük şekil değiştirmeleri, malzeme doğrusal olmayanlıklarını ve burkulma gibi etkileri modellemeye uygundur.

Bu çalışmada zamana bağlı viskoelastik ya da yorulma etkileri modellenmemiştir. Böyle analizler için ek tanımlar ve modeller gereklidir.

SHELL281 kabuk elemanının sağladığı pek çok avantajın yanı sıra, belirli sınırlılıkları da bulunmaktadır. Bu kısıtlar, hem modelleme sürecinde dikkate alınması gereken teknik sınırları hem de elde edilen sonuçların geçerliliğini etkileyen hususları ortaya koymaktadır. Aşağıda, SHELL281 elemanının başlıca kısıtları açıklanmıştır:

Kabuk varsayımı nedeniyle kalınlık boyunca detaylı gerilme dağılımı elde edilemez.

SHELL281, yüzey tabanlı bir elemandır. Bu nedenle yapının kalınlık doğrultusundaki (z-ekseni) gerilme dağılımları yaklaşık olarak belirlenebilir; fakat hacim elemanlarında olduğu kadar detaylı sonuçlar sunmaz.

Katmanlar arası ayrılma (delaminasyon) modellenemez.

SHELL281, katmanların birbirine tam yapıştığı varsayımıyla çalışır. Dolayısıyla, kompozit yapılarda oluşabilecek katman ayrılması, çatlak ilerlemesi gibi hasar türleri doğrudan bu elemanla modellenemez.

Sadece kabuk geometrisine sahip yapılar için uygundur.

Hacimsel (3B) yapıların iç yapısı, bu elemanla temsil edilemez. Bu tür yapılar için hacim elemanları (örneğin SOLID186) tercih edilmelidir.

Keskin geometrik geçişlerde ağ kalitesi sorunları yaşanabilir.

SHELL281'in sağlıklı çalışabilmesi için yeterli ağ kalitesi (mesh) gerekir. Özellikle eğimli yüzeylerde veya keskin köşelerde ağ kalitesi düşerse, analiz sonuçları doğruluğunu yitirebilir.

Bu eleman, kalın kabuklar için geliştirilmiştir. Çok ince yapıların modellenmesinde, bu detay seviyesi gereksiz hesap yüküne neden olabilir ve daha basit kabuk elemanları tercih edilebilir.

Zamana bağlı malzeme davranışları için doğrudan yeterli değildir.

SHELL281, viskoelastik ya da yorulma gibi zamana bağlı davranışları doğrudan içermez. Bu tür analizler için ek malzeme modelleri ve çözüm teknikleri gereklidir.

Katman sayısının çok fazla olması çözüm süresini artırır.

Eleman içinde tanımlanan katman sayısı arttıkça, analiz süresi ve hesaplama maliyeti de artar. Bu nedenle karmaşık modellerde işlem gücü ve süre açısından sınırlamalar olabilir.

SHELL281 kabuk elemanı, sonlu elemanlar yöntemine göre düğüm noktaları arasında yer değiştirmelerin hesaplanmasında şekil fonksiyonlarından yararlanır. Şekil fonksiyonları, her düğümde tanımlanan yer değiştirme ve dönme büyüklüklerinin, elemanın içindeki herhangi bir noktaya nasıl yayıldığını tanımlayan matematiksel ifadelerdir.

SHELL281 elemanı, 8 düğüm noktasına sahip olup her düğümde 6 serbestlik derecesi bulunur (üç yer değiştirme + üç dönme). Eleman, izoparametrik yaklaşım kullanılarak tanımlanır. Bu yaklaşımda hem geometrik şekil hem de yer değiştirmeler aynı şekil fonksiyonları ile ifade edilir.

Şekil Fonksiyonlarının Temel Özellikleri:

İzoparametrik Formülasyon:

SHELL281'de kullanılan şekil fonksiyonları, elemanın fiziksel koordinatları ile referans (standart kare) koordinatlar arasındaki dönüşümü sağlar. Yani elemanın şekli bozulsa bile, analiz referans eleman üzerinden yapılır.

Sekiz Düğüm Noktası İçin Tanımlanır:

Her düğüm noktası için bir adet şekil fonksiyonu bulunur. Bu fonksiyonlar, genellikle Lagrange polinomları şeklindedir ve iki boyutlu kare referans eleman (ξ, η) üzerinde tanımlanır.

Doğrusal Olmayan Yer Değiştirmeleri Destekler:

Şekil fonksiyonları sayesinde, elemanın içinde doğrusal olmayan yer değiştirme ve dönmeler tanımlanabilir. Bu da büyük şekil değişimlerinin analizinde avantaj sağlar.

Eğilme ve düzlemsel etkileri birlikte modelleyebilir:

Eleman içinde hem membran (düzlem içi) hem de eğilme (düzlem dışı) etkiler, şekil fonksiyonları yoluyla aynı anda ifade edilir. Bu da karmaşık kabuk davranışlarının modellenmesini mümkün kılar.

Sayısal entegrasyon ile kullanılır:

Eleman içerisindeki gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin hesabında şekil fonksiyonlarının türevleri kullanılır. Bu işlemler genellikle sayısal integrasyon (örneğin Gauss integrasyonu) ile gerçekleştirilir.

Sonuç olarak:

SHELL281 elemanında kullanılan şekil fonksiyonları, yüksek doğruluk sağlayan sekiz düğümlü bir yapı üzerine kuruludur. Bu fonksiyonlar hem doğrusal hem de doğrusal olmayan analizlerde doğru yer değiştirme ve gerilme dağılımları elde etmeye olanak tanır.

SHELL281 elemanı, çok katmanlı plakların mekanik davranışlarının incelenmesinde kullanılmıştır. Ancak bu eleman yalnızca bu tür analizlerle sınırlı değildir. Sağladığı teknik imkânlar ve çok yönlü yapısı sayesinde, mühendislikte farklı alanlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Aşağıda SHELL281 elemanının kullanılabileceği bazı başlıca alanlar özetlenmiştir:

Havacılık ve uzay yapıları:

Uçak kanatları, gövde panelleri, uydu yapıları ve roket kaplamaları gibi hafif ve dayanıklı kabuk yapılarının analizinde kullanılır. Özellikle kompozit malzemelerle çalışılan uygulamalarda tercih edilir.

Otomotiv sanayi:

Araç gövdesi, kaporta parçaları, şasi elemanları gibi ince ama dayanıklı kabuk yapıların modellenmesinde etkilidir. Titreşim, darbe ve çarpışma analizlerinde sıkça kullanılır.

Gemi inşaatı ve denizcilik uygulamaları:

Gemi gövdesi, dış kaplama ve bölme duvarları gibi geniş yüzeyli yapılar için uygun bir elemandır. Su altı basınç etkileri ve dinamik yüklemeler analiz edilebilir.

İnşaat mühendisliği:

Kubbeler, silolar, boru hatları, tanklar ve ince kabuk yapılar gibi özel mühendislik yapılarının statik ve dinamik analizlerinde kullanılabilir. Ayrıca rüzgâr ve deprem yükleri altında davranış değerlendirmelerinde de etkilidir.

Basınçlı kap ve boru sistemleri:

SHELL281, iç basınç altında çalışan ince cidarlı kaplar ve borular için uygun bir model sunar. Gerilme dağılımı, burkulma ve deformasyon gibi etkiler detaylı olarak incelenebilir.

Enerji ve nükleer santraller:

Reaktör kaplamaları, ısı değiştirici elemanları ve yüksek sıcaklık altında çalışan ince yapılar için kullanılabilir. Termo-mekanik analizlerde güvenilir sonuçlar verir.

Savunma sanayi:

Zırhlı plakalar, radar gövdeleri ve fırlatma sistemleri gibi dayanıklılığı yüksek yapılar için uygun modelleme imkânı sağlar.

Mikro yapı sistemleri:

Bazı ileri düzey çalışmalarda mikro ölçekte kabuk yapıların modellenmesinde kullanılabilmektedir. Özellikle mikro-elektromekanik sistemlerin (MEMS) analizinde uygun sonuçlar sunar.

Sonuç olarak, SHELL281 elemanı, yalnızca klasik yapı sistemlerinde değil, aynı zamanda ileri mühendislik uygulamalarında da kullanılabilecek esnek ve güçlü bir modelleme aracıdır. Özellikle yüksek hassasiyet, çok katmanlı yapı analizi ve karmaşık yükleme koşulları gerektiren durumlarda tercih edilmektedir.

Bu tez çalışmasında incelenen plak modelleri, çok katmanlı, farklı malzeme özelliklerine sahip ve belirli kenar şartlarına bağlı olarak yük altında davranışı analiz edilen yapılardan oluşmaktadır. Bu tür yapıların hem düzlemsel hem de eğilme davranışlarının doğru şekilde temsil edilmesi, kullanılacak sonlu eleman türünün seçiminde belirleyici olmuştur.

Bu doğrultuda tercih edilen SHELL281 elemanı, çalışılan plak tipine oldukça uygun bir yapıya sahiptir. Bunun başlıca nedenleri şu şekilde özetlenebilir:
Katmanlı yapı desteği:

Tezde analiz edilen plaklar, birden fazla malzeme katmanından oluşmaktadır. SHELL281, her bir katman için ayrı ayrı malzeme özelliği, kalınlık ve yön bilgisi tanımlamaya olanak sunduğu için bu tür analizler için ideal bir tercihtir.

Kalın plaklar için uygunluk:

İncelenen plaklarda kayma şekil değiştirmeleri ihmal edilemeyecek seviyededir. SHELL281, kalın plak teorisine dayandığı için bu deformasyonları dikkate alır ve böylece daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlar.

Büyük şekil değişimlerine uygunluk:

Uygulanan bazı yüklemelerde plaklarda büyük yer değiştirmeler meydana gelebilmektedir. SHELL281, bu tür doğrusal olmayan (non-lineer) analizleri desteklediği için bu çalışmanın gereksinimlerini karşılamaktadır.

Yüksek serbestlik derecesi sayesinde detaylı analiz imkânı:

Eleman başına 6 serbestlik derecesine sahip olması, eğilme ve burulma gibi etkilerin modellenmesini mümkün kılmakta ve böylece plağın tüm davranış karakteristikleri daha hassas biçimde yakalanabilmektedir.

Ağ yapısına (mesh) uyumluluk ve işlem verimliliği:

SHELL281, düzenli ağ yapıları ile birlikte kullanıldığında hem sayısal kararlılık sağlar hem de hesaplama süresi açısından avantaj sunar. Bu durum, çok sayıda analiz yapılan bu çalışmada önemli bir kolaylık sağlamıştır.

Sonuç olarak, SHELL281 eleman tipi, bu tez kapsamında modellenen çok katmanlı plakların mekanik davranışlarının doğru ve etkin bir şekilde analiz edilebilmesi açısından son derece uygun bir elemandır. Hem yapısal esnekliği hem de sağladığı teknik doğruluk sayesinde, yapılan analizlerin güvenilirliğine önemli katkı sunmuştur.

Düşey yer değiştirmenin boyutsuzlaştırılması için eşitlik 14'te verilen bağıntı kullanılmıştır. Bu denklemde $\bar{w}$, boyutsuz çökme, w düşey yer değiştirme değeri, E_C seramik için elastisite modülü, h plak kalınlığı, a plak kenar uzunluğu ve q_0 ise düzgün yayılı yükü göstermektedir.

$$\bar{w} = \frac{10E_C h^3}{q_0 a^4} w \tag{14}$$

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

İlk örnek, mevcut teorinin FD sandviç plakların eğilme davranışlarını doğrulamayı amaçlamaktadır. Uzunluk/kalınlık oranı 10 olan kare bir plak, güç kanunu indeksi 0 ile 10 arasında değişecek şekilde analiz edilmiştir.

3.1 Verifikasyon

Elde edilen sayısal sonuçlar, literatürde geçerliliği kabul görmüş Thai vd. (2014) tarafından sunulan verilerle Tablo 3-4'te karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmanın temel amacı, gerçekleştirilen sayısal analizlerin doğruluğunu ve güvenilirliğini test etmektir. Aynı sınır şartları ve yükleme durumları altında yapılan hesaplamaların, literatürdeki verilerle örtüşüp örtüşmediği değerlendirilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, elde edilen sonuçların Thai vd. (2014) çalışmasıyla yüksek oranda uyumlu olduğu görülmüştür. Özellikle mesh yoğunluğu artırıldığında (örneğin 10x10'dan 100x100'e), sonuçlar daha da hassas hale gelmiş ve literatürdeki verilerle neredeyse birebir örtüşmüştür. Bu durum, kullanılan sonlu elemanlar yönteminin (SEY) doğru uygulandığını ve çözümün sayısal açıdan güvenilir olduğunu göstermektedir. Farklı katman durumları (1-0-1, 2-1-2, 2-2-1 ve 1-2-1) için elde edilen veriler de Thai vd. (2014) ile benzerlik göstermiş, bu da modelin farklı senaryolarda da tutarlı ve geçerli sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Gözlemlenen küçük farklılıklar, sayısal yuvarlamalar, farklı eleman tipleri veya malzeme tanımlama biçimlerindeki küçük değişikliklerden kaynaklanabilir. Ancak bu farklar, genel sonuçların doğruluğunu ve geçerliliğini etkileyecek düzeyde değildir.

Sonuç olarak yapılan karşılaştırma çalışması geliştirilen modelin doğruluğunu desteklemekte ve kullanılan yöntemlerin bilimsel geçerliliğini teyit etmektedir.
Plağın sınır şartlarını tanımlamak için Tablo 3-4'te gösterilen dört harfli bir notasyon kullanılmaktadır.

Tablo 3. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

CCCC	*a*=10 *b*=10 / yük=1000 Pa / *a*=X *b*=Y/ *a*=kısa kenar *b*=uzun kenar				
	p	1–0–1		2–1–2	
		Bu Çalışma	Thai vd. (2014)	Bu Çalışma	Thai vd. (2014)
10x10	1	0,3929200	0,3923000	0,3473124	0,3469000
20x20		0,3928820	0,3923000	0,3472820	0,3469000
40x40		0,3928820	0,3923000	0,3472782	0,3469000
80x80		0,3928820	0,3923000	0,3472782	0,3469000
100x100		0,3928820	0,3923000	0,3472782	0,3469000
10x10	2	0,5659340	0,5674000	0,4810040	0,4828000
20x20		0,5658960	0,5674000	0,4809660	0,4828000
40x40		0,5658960	0,5674000	0,4809660	0,4828000
8x80		0,5658960	0,5674000	0,4809660	0,4828000
100x100		0,5658960	0,5674000	0,4809660	0,4828000
10x10	5	0,7728440	0,7685000	0,6583500	0,6626000
20x20		0,7727680	0,7685000	0,6583120	0,6626000
40x40		0,7727680	0,7685000	0,6582740	0,6626000
80x80		0,7727680	0,7685000	0,6582740	0,6626000
100x100		0,7727680	0,7685000	0,6582740	0,6626000
10x10	10	0,8403700	0,8327000	0,7387960	0,7412000
20x20		0,8402940	0,8327000	0,7387580	0,7412000
40x40		0,8402940	0,8327000	0,7387580	0,7412000
80x80		0,8402940	0,8327000	0,7387580	0,7412000
100x100		0,8402940	0,8327000	0,7387580	0,7412000

Tablo 4. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

CCCC	*a*=10 *b*=10 / yük=1000 Pa /*a*=X *b*=Y / *a*=kısa kenar *b*=uzun kenar				
	p	2–2–1		1–2–1	
		Bu Çalışma	Thai vd. (2014)	Bu Çalışma	Thai vd. (2014)
10x10	1	0,3269938	0,2930000	0,2731516	0,2718000
20x20		0,3269672	0,2930000	0,2731250	0,2718000
40x40		0,3269634	0,2930000	0,2731250	0,2718000
80x80		0,3269634	0,2930000	0,2731250	0,2718000
100x100		0,3269634	0,2930000	0,2731250	0,2718000
10x10	2	0,4230160	0,3777000	0,3375996	0,3380000
20x20		0,4229780	0,3777000	0,3375730	0,3380000
40x40		0,4229780	0,3777000	0,3375692	0,3380000
8x80		0,4229780	0,3777000	0,3375692	0,3380000
100x100		0,4229780	0,3777000	0,3375692	0,3380000
10x10	5	0,5228420	0,4897000	0,4219900	0,4247000
20x20		0,5227660	0,4897000	0,4219520	0,4247000
40x40		0,5227660	0,4897000	0,4219520	0,4247000
88x80		0,5227660	0,4897000	0,4219520	0,4247000
100x100		0,5227660	0,4897000	0,4219520	0,4247000
10x10	10	0,5587520	0,5452000	0,4653860	0,4693000
20x20		0,5586760	0,5452000	0,4653480	0,4693000
40x40		0,5586760	0,5452000	0,4653480	0,4693000
80x80		0,5586760	0,5452000	0,4653480	0,4693000
100x100		0,5586760	0,5452000	0,4653480	0,4693000

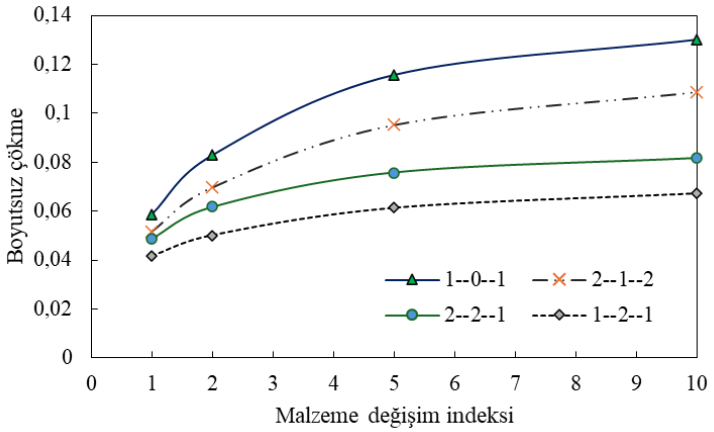
Tablo (3 – 4)'e göre bu çalışmada önerilen yöntemle elde edilen boyutsuz maksimum düşey yer değiştirme sonuçlarının, literatürde yer alan SEY ile elde edilen sonuçlarla büyük ölçüde örtüştüğü görülmektedir. Bu durum, önerilen modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini ortaya koymakta ve mevcut teorik yaklaşımlar ile tutarlılık sergilediğini göstermektedir.

3.2. Uygulama 1: CCCC Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=5 *b*=10)

1–0–1, 2–1–2, 2–2–1, 1–2–1 tabakalanma durumları için dikdörtgen bir plağın eğilme analizi yapılmıştır. Ele alınan plak 1000 Pa'lık düzgün yayılı yük etkisindedir. Farklı malzeme değişim indeksleri ve çeşitli kenar uzunlukları için maksimum düşey deplasman değerleri hesaplanmış ve boyutsuzlaştırılmıştır. Boyutsuzlaştırılan yer değiştirme değerleri ise Tablo (5-27) ve şekil (8-30) karşılaştırılmış olup farklı parametrelerin ektisi detaylı olarak incelenmiştir. Dört kenarı ankastre mesnetli (CCCC) olan 5 m × 10 m boyutlarındaki plak modeli için farklı katman dizilimlerinin düşey yer değiştirme (çökme) üzerindeki etkisi incelenmiştir. ANSYS ortamında gerçekleştirilen analizlerde, 40 × 40 sonlu eleman ağı kullanılarak dört farklı katman dizilimi (1–0–1, 2–1–2, 2–2–1 ve 1–2–1) dikkate alınmış, her bir dizilim için malzeme değişim katsayısı (p = 1, 2, 5, 10) ayrı ayrı Tablo 5'te ve Şekil 8'de değerlendirilmiştir.

Tablo 5. *a*=5, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

a=5 *b*=10 / yük=1000 Pa					
CCCC	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
40*40	1	0,0585922	0,0517750	0,0489136	0,0415948
	2	0,0828552	0,0697756	0,0617728	0,0501524
	5	0,1156948	0,0952166	0,0757264	0,0613510
	10	0,1301424	0,1086382	0,0815746	0,0672638



Şekil 8. *a*=5, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 5'e göre, malzeme değişim katsayısının artması tüm katman dizilimlerinde çökme miktarını artırmıştır. En fazla yer değiştirme, her p değeri için

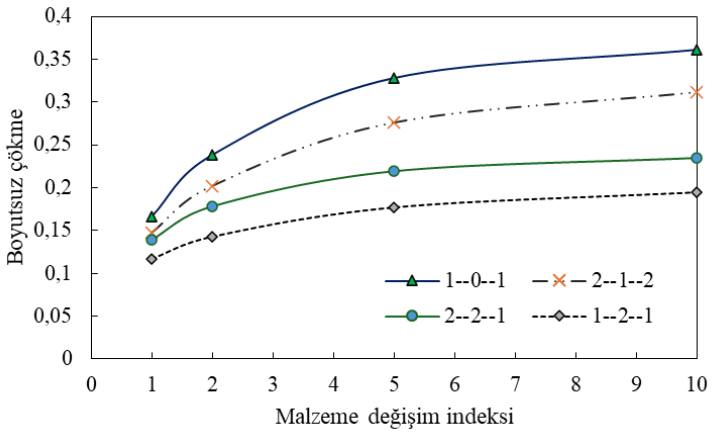
1–0–1 diziliminde gerçekleşmiştir. Örneğin, p = 10 için bu dizilimde boyutsuz çökme değeri 0,130 'ye ulaşmıştır. Buna karşılık, en düşük yer değiştirme 1–2–1 diziliminde gözlenmiştir; bu durumda ise dış katmanlar daha yumuşak, orta katman daha rijit malzemeden oluşmaktadır. Aynı p değeri için bu dizilimde boyutsuz çökme yalnızca 0,067 'dir. Şekil 8'deki grafik, bu eğilimi görsel olarak desteklemektedir. Grafik, her katman dizilimi için malzeme değişim katsayısının artışıyla düşey yer değiştirme arasındaki ilişkiyi net biçimde ortaya koymaktadır. Eğriler arası mesafeler, dizilimlerin yapısal performansa etkisini açıkça yansıtmaktadır. Özellikle 1–0–1 ve 1–2–1 arasındaki fark, katman yerleşiminin optimizasyonunda dikkate alınması gereken kritik bir parametre olduğunu göstermektedir.

3.3. Uygulama 2: CCCC Plak Modeli İçin Çökme Analizi (a=7 b=10)

Dört kenarı ankastre mesnetli (CCCC) ve boyutları 7 m × 10 m olan plak modeli için, çökme davranışı analiz edilmiştir. Her dizilim için malzeme değişim katsayısı p = 1, 2, 5, 10 olacak şekilde yer değiştirme değerleri Tablo 6'da ve Şekil 9'da hesaplanmıştır.

Tablo 6. a=7, b=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

a=7 b=10 / yük=1000 Pa					
CCCC	p	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
40x40	1	0,1665540	0,1472120	0,1387608	0,1166372
	2	0,2384234	0,2020080	0,1780490	0,1429218
	5	0,3280426	0,2761574	0,2194994	0,1773536
	10	0,3609696	0,3116722	0,2351630	0,1951946



Şekil 9. a=7, b=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

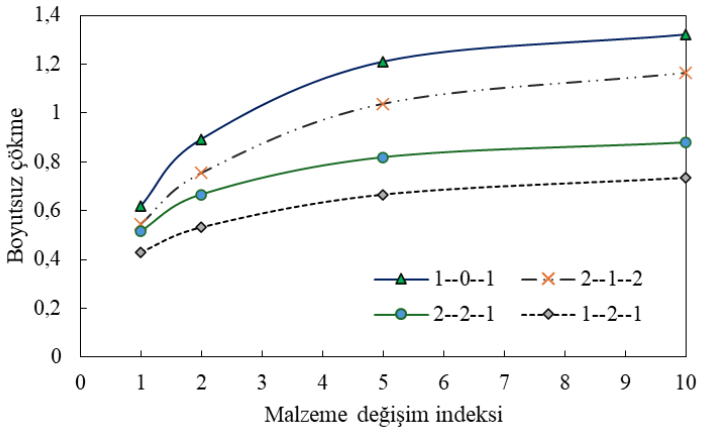
Tablo 6, incelendiğinde, *p* katsayısındaki artışla birlikte tüm katman dizilimlerinde düşey yer değiştirme (çökme) miktarının belirgin şekilde arttığı görülmektedir. 1–0–1 dizilimi, her *p* değeri için en yüksek çökme miktarını vermiştir. Buna karşılık, en düşük çökme değerleri 1–2–1 diziliminde elde edilmiştir. Bu durum, yumuşak malzemenin alt ve üstte, rijit malzemenin ortada yer aldığı dizilimin daha rijit bir yapı oluşturduğunu ve çökme miktarını azalttığını göstermektedir. Şekil 9, bu eğilimleri grafiksel olarak ortaya koymakta ve katman dizilimlerinin çökme davranışı üzerindeki etkisini görsel olarak desteklemektedir. Grafikten de görüleceği üzere, *p* katsayısı 10'a çıktığında 1–0–1 dizilimindeki boyutsuz çökme yaklaşık 0,361 'ye ulaşırken, 1–2–1 diziliminde bu değer 0,195 civarında kalmaktadır. Bu sonuçlar hem malzeme seçiminin hem de katman diziliminin yapı elemanlarının performansı üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

3.4. Uygulama 3: CCCF Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=5 *b*=10)

Üç kenarı ankastre, bir kenarı serbest (CCCF) olan 5 m × 10 m boyutlarındaki plak modeli için, farklı katman dizilimlerinin düşey yer değiştirme davranışları değerlendirilmiştir. ANSYS ortamında yürütülen çalışmada 40 × 40 sonlu eleman ağı kullanılarak dört farklı dizilim (1–0–1, 2–1–2, 2–2–1 ve 1–2–1) incelenmiştir. Malzeme değişim katsayısı p = 1, 2, 5 ve 10 olarak belirlenmiş ve her değer için maksimum çökme değerleri Tablo 7'de ve Şekil 10'da kaydedilmiştir.

Tablo 7. *a*=5, *b*=10 ve üç kenarı ankastre, bir kenarı serbest sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

a=5 *b*=10 / yük=1000 Pa					
CCCF	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
40x40	1	0,6183360	0,5465920	0,5145200	0,4294000
	2	0,8914040	0,7549080	0,6663300	0,5313920
	5	1,2086280	1,0374000	0,8195840	0,6648480
	10	1,3196640	1,1634840	0,8801180	0,7333240



Şekil 10. *a*=5, *b*=10 ve üç kenarı ankastre, bir kenarı serbest sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 7 incelendiğinde, *p* değeri arttıkça tüm dizilimlerde çökme miktarının arttığı açıkça görülmektedir. En fazla düşey yer değiştirme değeri 1–0–1 diziliminde *p* = 10 için yaklaşık 1,32 olarak hesaplanırken, en az boyutsuz çökme 1–2–1 diziliminde *p* = 1 için 0,429 olmuştur. Yumuşak malzemenin ortada yer aldığı 1–0–1 dizilimi, rijitliği azaltarak daha fazla şekil değiştirmeye neden olmaktadır. Şekil 10'da sunulan grafiksel gösterim, bu eğilimleri daha net ortaya koymaktadır. 1–0–1 diziliminde çökme artışı daha dik bir eğimle yükselirken, 1–2–1 dizilimi en düşük değer aralığında kalmaktadır. Bu durum, malzeme dağılımının ve dizilim sırasının yapısal davranış üzerindeki kritik etkisini vurgulamakta, tasarım sürecinde dikkat edilmesi gereken önemli bir kriter olduğunu göstermektedir.

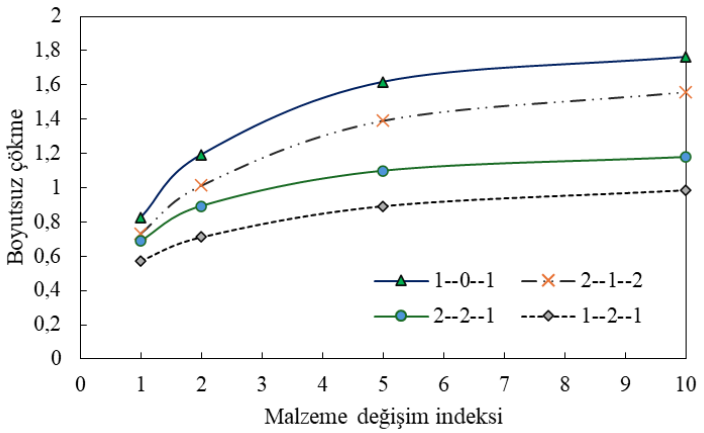
3.5. Uygulama 4: CCCF Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=7 *b*=10)

Üç kenarı ankastre mesnetli ve bir kenarı serbest olan (CCCF) 7 m × 10 m boyutlarındaki plak modeli için farklı katman dizilimlerinin boyutsuz çökme davranışı analiz edilmiştir ve Tablo 8'de ile Şekil 11'de verilmiştir. Analizler ANSYS ortamında

gerçekleştirilmiş ve her bir katman dizilimi için malzeme değişim katsayıları (p = 1, 2, 5, 10) dikkate alınmıştır.

Tablo 8. a=7, b=10 ve üç kenarı ankastre, bir kenarı serbest sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

a=7 b=10 / yük=1000 Pa					
CCCF	p	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
40x40	1	0,8277160	0,7316900	0,6886740	0,5741800
	2	1,1943780	1,0122060	0,8929240	0,7115120
	5	1,6180400	1,3910280	1,0990740	0,8911760
	10	1,7632380	1,5586080	1,1794440	0,9832880



Şekil 11. a=7, b=10 ve üç kenarı ankastre, bir kenarı serbest sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 8 incelendiğinde, p katsayısı arttıkça tüm dizilimlerde boyutsuz çökme değerlerinin belirgin şekilde yükseldiği görülmektedir. Özellikle 1–0–1 diziliminde, p = 10 için düşey yer değiştirme 1,763 ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. En düşük çökme değerleri yine 1–2–1 diziliminde gözlenmiş olup, p = 10 için 0,983 olarak belirlenmiştir. Şekil 11, bu artışı açıkça göstermekte ve her katman diziliminin farklı rijitlik etkisine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. 1–0–1 diziliminde, yumuşak malzemenin orta tabakada yer alması nedeniyle yapı daha fazla deformasyona uğramaktadır. Buna karşın, 1–2–1 dizilimi daha dengeli bir dağılım sunduğundan daha düşük çökme değerleri sergilemiştir.

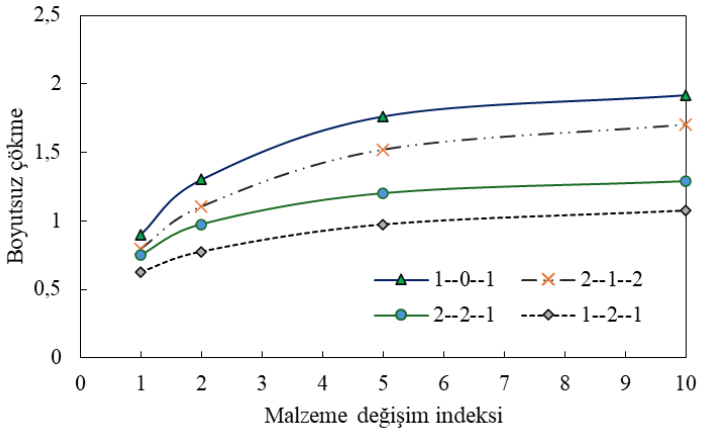
Bu sonuçlar hem malzeme diziliminin hem de plak boyutlarının yapısal performans üzerindeki etkisini ortaya koymakta, özellikle serbest kenar bulunan plaklarda deformasyonların daha yüksek olabileceğini göstermektedir.

3.6. Uygulama 5: CCCF Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=10 *b*=10)

Üç kenarı ankastre mesnetli ve bir kenarı serbest (CCCF) olan 10 m × 10 m boyutlarındaki plak modeli için dört farklı katman dizilimine göre düşey yer değiştirme davranışı analiz edilmiştir (Tablo 9 ve Şekil 12). Analizler ANSYS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, 40 × 40 sonlu eleman ağıyla modellenmiştir. Malzeme değişim katsayısı p = 1, 2, 5 ve 10 için her katman dizilimi (1–0–1, 2–1–2, 2–2–1 ve 1–2–1) ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Tablo 9. *a*=10, *b*=10 ve üç kenarı ankastre, bir kenarı serbest sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

a=10 *b*=10 / yük=1000 Pa					
CCCF	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
40x40	1	0,9029180	0,7981900	0,7511460	0,6258600
	2	1,3038180	1,1056860	0,9748520	0,7762640
	5	1,7655560	1,5192400	1,2007240	0,9731040
	10	1,9208620	1,7011460	1,2876680	1,0739560



Şekil 12. *a*=10, *b*=10 ve üç kenarı ankastre, bir kenarı serbest sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 9, incelendiğinde, tüm dizilimlerde p katsayısındaki artışa bağlı olarak boyutsuz çökme değerlerinin belirgin biçimde yükseldiği görülmektedir. Özellikle 1–0–1 dizilimi, her p değerinde en yüksek düşey yer değiştirmeyi üretmiştir; p = 10 için yaklaşık 1,92 'lik maksimum çökme değeri gözlenmiştir. Buna karşın 1–2–1 dizilimi, tüm p değerlerinde en düşük çökme değerlerini vererek yapının daha rijit davrandığını ortaya koymuştur. Şekil 12, bu eğilimi grafiksel olarak açık biçimde göstermektedir. Grafik üzerinde 1–0–1 diziliminde çökme miktarının diğer dizilimlere göre daha hızlı

yükseldiği gözlemlenmektedir. Bu durum, orta katmanda düşük rijitlikle malzeme bulunduğunda yapının şekil değiştirme direncinin azaldığını göstermektedir. Serbest kenarın bulunması da bu etkiyi kuvvetlendirmiştir.

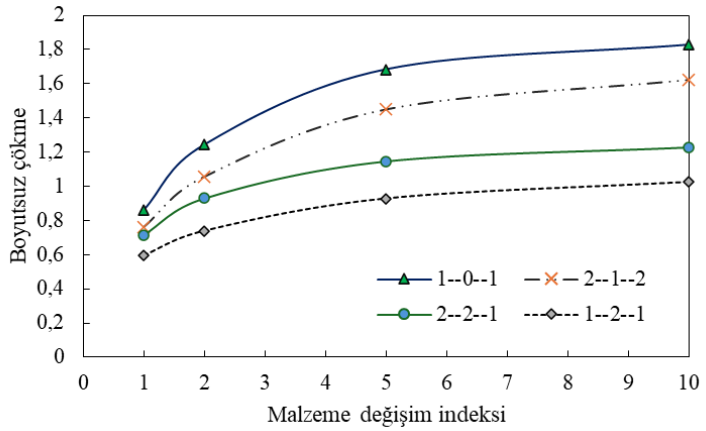
Sonuç olarak hem tablo hem de grafik verileri, malzeme katman dizilimi ile kenar koşullarının düşey yer değiştirme üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Rijitliğin artırılması ve serbest kenarın minimize edilmesi, yapısal deformasyonları azaltmak adına önem taşımaktadır.

3.7. Uygulama 6: CFCF Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=5 *b*=10)

Üst ve alt kenarları ankastre, yan kenarları serbest olan (CFCF) 5 m × 10 m boyutlarındaki plak modeli için dört farklı katman dizilimiyle çökme davranışı incelenmiştir (Tablo 10 ve Şekil 13). ANSYS ortamında 40×40 eleman ağı kullanılarak yapılan analizlerde, malzeme değişim katsayısı p = 1, 2, 5 ve 10 için sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 10. *a*=5, *b*=10 ve üst ve alt kenarları ankastre, yan kenarları serbest olan sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

a=5 *b*=10 / yük=1000 Pa					
CFCF	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
40x40	1	0,8601300	0,7603420	0,7154640	0,5958020
	2	1,2427520	1,0549940	0,9292520	0,7395560
	5	1,6835900	1,4486740	1,1459660	0,9277320
	10	1,8275340	1,6212320	1,2274380	1,0240620



Şekil 13. *a*=5, *b*=10 ve üst ve alt kenarları ankastre, yan kenarları serbest olan sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

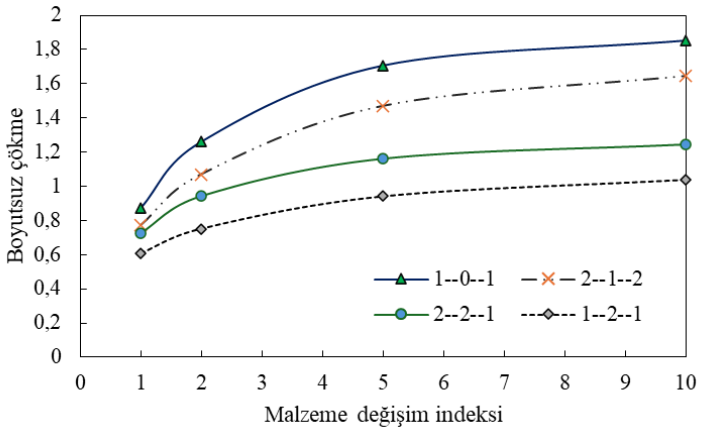
Tablo 10 incelendiğinde, p değeri arttıkça tüm dizilimlerde düşey yer değiştirme miktarının belirgin biçimde arttığı gözlemlenmektedir. En yüksek boyutsuz çökme değerleri 1–0–1 diziliminde görülürken, en düşük değerler 1–2–1 diziliminde elde edilmiştir. Bu durum, yumuşak malzemenin plak ortasında yer aldığı dizilimlerin rijitliği düşürerek daha büyük yer değiştirmelere yol açtığını bir kez daha teyit etmektedir. Şekil 13'ta sunulan grafik, her bir katman diziliminin malzeme değişim katsayısına karşı gösterdiği tepkileri görsel olarak net bir biçimde ortaya koymaktadır. Özellikle p = 10 için 1–0–1 diziliminde düşey yer değiştirme değeri yaklaşık 1,83 seviyesine ulaşmışken, 1–2–1 diziliminde bu değer 1,02 civarında kalmıştır. Bu fark, katman dizilimi ve malzeme yerleşiminin yapısal davranış üzerindeki etkisini vurgulamakta ve mühendislik tasarımlarında bu parametrelerin dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

3.8. Uygulama 7: CFCF Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=7 *b*=10)

Üst ve alt kenarları ankastre, yan kenarları serbest olan (CFCF) 7 m × 10 m boyutlarındaki plak modeli için dört farklı katman diziliminin (1–0–1, 2–1–2, 2–2–1, 1–2–1) düşey yer değiştirme (çökme) davranışı değerlendirilmiştir (Tablo 11 ve Şekil 14). Analizler, ANSYS ortamında 40×40 sonlu eleman ağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 11. *a*=7, *b*=10 üst ve alt kenarları ankastre, yan kenarları serbest olan sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

a=7 *b*=10 / yük=1000 Pa					
CFCF	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
40x40	1	0,8728600	0,7716280	0,7260660	0,6045800
	2	1,2612200	1,0704600	0,9430840	0,7505000
	5	1,7078720	1,4702580	1,1626480	0,9415260
	10	1,8544380	1,6453240	1,2457160	1,0393380



Şekil 14. *a*=7, *b*=10 üst ve alt kenarları ankastre, yan kenarları serbest olan sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

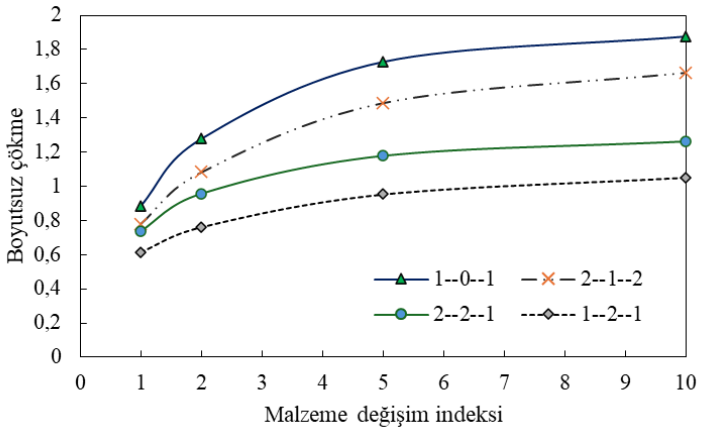
Tablo 11 incelendiğinde, malzeme değişim katsayısı (p) arttıkça tüm katman dizilimlerinde düşey yer değiştirme miktarının düzenli olarak yükseldiği gözlemlenmektedir. En yüksek boyutsuz çökme değerleri 1–0–1 diziliminde meydana gelmiş olup, bu dizilimde p = 10 için çökme değeri yaklaşık 1,854 olarak hesaplanmıştır. En düşük çökme ise 1–2–1 diziliminde ve p = 1 için 0,604 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, malzemenin orta tabakasında daha güçlü (sert) bir katmanın bulunmasının deformasyonun azalmasına neden olduğunu göstermektedir. Şekil 14 ise bu eğilimleri grafiksel olarak sunmaktadır. Grafik, her bir katman diziliminin malzeme değişim katsayısına karşı gösterdiği çökme artışını net biçimde ortaya koymaktadır. Özellikle 1–0–1 ve 2–1–2 dizilimlerinin, p katsayısı arttıkça çok daha belirgin bir deformasyon artışı gösterdiği görülmektedir. Buna karşılık, 1–2–1 ve 2–2–1 dizilimleri daha kontrollü ve sınırlı yer değiştirmeler sergilemiştir. Bu durum, katman yerleşiminin yapısal rijitlik üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

3.9. Uygulama 8: CFCF Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=10 *b*=10)

Üst ve alt kenarları ankastre, yan kenarları serbest olan (CFCF) 10 m × 10 m boyutlarındaki plak modeli için farklı katman dizilimlerinin çökme davranışı analiz edilmiştir. 40 × 40 sonlu eleman ağı kullanılarak yapılan analizlerde, dört farklı katman dizilimi (1–0–1, 2–1–2, 2–2–1 ve 1–2–1) dikkate alınmış ve malzeme değişim katsayısı (p = 1, 2, 5, 10) için düşey yer değiştirme Tablo 12'de ve Şekil 15'te değerleri elde edilmiştir.

Tablo 12. *a*=10, *b*=10 ve üst ve alt kenarları ankastre, yan kenarları serbest olan sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

a=10 *b*=10 / yük=1000 Pa					
CFCF	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
40x40	1	0,8839940	0,7814700	0,7353380	0,6123320
	2	1,2772180	1,0837220	0,9550540	0,7600760
	5	1,7289620	1,4888780	1,1769740	0,9534580
	10	1,8782640	1,6662240	1,2615240	1,0524860



Şekil 15. *a*=10, *b*=10 ve üst ve alt kenarları ankastre, yan kenarları serbest olan sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 12'ye göre, *p* katsayısının artışı ile birlikte tüm dizilimlerde boyutsuz çökme değerlerinde belirgin bir yükselme gözlemlenmektedir. En yüksek çökme, 1–0–1 diziliminde ve *p* = 10 için 1,878 olarak kaydedilmiş, en düşük çökme ise 1–2–1 diziliminde ve *p* = 1 için 0,612 olarak hesaplanmıştır. Yumuşak malzemenin ortada yer aldığı 1–0–1 dizilimi, düşük rijitliğe sahip olduğundan en fazla deformasyon göstermiştir. Şekil 15'te bu değişim net bir şekilde görülmektedir. Grafik, tüm dizilimlerin çökme davranışını malzeme değişim katsayısına göre karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Katman dizilimi 1–0–1 en üstte yer alırken, 1–2–1 en alt eğriyi oluşturmaktadır. Bu durum, katman sıralamasının yapısal rijitlik ve deformasyon davranışı üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir. Özellikle daha büyük boyutlu plaklarda deformasyon miktarlarının belirgin şekilde arttığı görülmektedir.

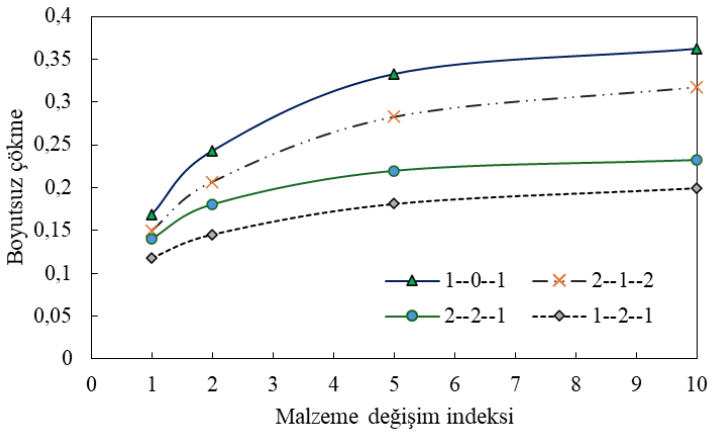
3.10. Uygulama 9: CSCS Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=5 *b*=10)

Üst ve alt kenarları basit mesnetli, yan kenarları ankastre olan (CSCS) 5 m × 10 m boyutlarındaki plak modeli için dört farklı katman diziliminin (1–0–1, 2–1–2, 2–

2–1, 1–2–1) düşey yer değiştirme (çökme) davranışı değerlendirilmiştir (Tablo 13 ve Şekil 16). Analizler, ANSYS ortamında 40×40 sonlu eleman ağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 13. *a*=5, *b*=10 üst ve alt kenarları basit mesnetli, yan kenarları ankastre olan sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

a=5 *b*=10 / yük=1000 Pa					
CSCS	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
40x40	1	0,1691570	0,1495224	0,1404442	0,1177354
	2	0,2433748	0,2067884	0,1803860	0,1453082
	5	0,3330662	0,2828416	0,2194804	0,1813664
	10	0,3625656	0,3177978	0,2320660	0,1999218



Şekil 16. *a*=5, *b*=10 ve CSCS mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 13 incelendiğinde, malzeme değişim katsayısı (*p*) arttıkça tüm katman dizilimlerinde düşey yer değiştirme miktarının düzenli olarak yükseldiği gözlemlenmektedir. En yüksek çökme değerleri 1–0–1 diziliminde meydana gelmiş olup, bu dizilimde *p* = 10 için çökme değeri yaklaşık 0,363 olarak hesaplanmıştır. En düşük çökme ise 1–2–1 diziliminde ve *p* = 1 için 0,118 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, orta tabakada zayıf (yumuşak) malzeme kullanımının yapısal rijitliği azalttığını ve çökme miktarını artırdığını göstermektedir. Dış katmanlarda rijit malzeme kullanımı ise yapının deformasyon direncini artırmıştır. Şekil 16 ise bu eğilimleri grafiksel olarak sunmaktadır. Grafik, her bir katman diziliminin malzeme değişim katsayısına karşı gösterdiği çökme artışını net biçimde ortaya koymaktadır. Özellikle 1–0–1 ve 2–1–2 dizilimlerinin, *p* katsayısı arttıkça belirgin şekilde artan

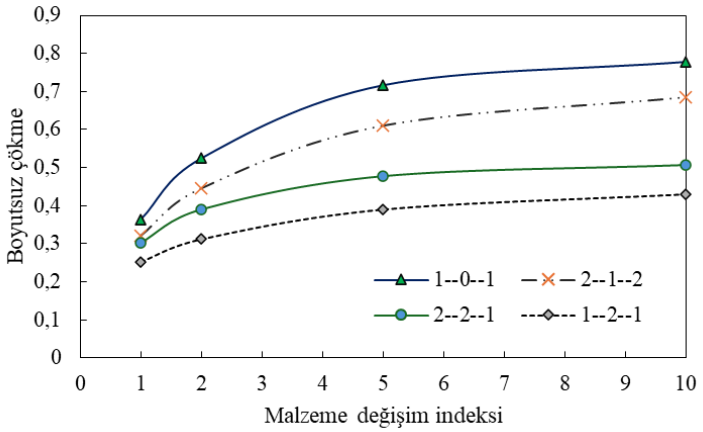
deformasyon gösterdiği dikkat çekmektedir. Buna karşın, 1–2–1 ve 2–2–1 dizilimleri daha sınırlı yer değiştirmeler sergilemiştir. Bu durum, katman diziliminin yalnızca çökme miktarını değil, aynı zamanda *p* değişim katsayısına duyarlılığı da etkilediğini ortaya koymaktadır. Özellikle rijit katmanların dışta olduğu dizilimlerde, malzeme değişiminin etkisi daha dengeli kalmıştır.

3.11. Uygulama 10: CSCS Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=7 *b*=10)

Üst ve alt kenarları basit mesnetli, yan kenarları ankastre olan (CSCS) 7 m × 10 m boyutlarındaki plak modeli için dört farklı katman diziliminin (1–0–1, 2–1–2, 2–2–1, 1–2–1) düşey yer değiştirme (çökme) davranışı değerlendirilmiştir (Tablo 14 ve Şekil 17). Analizler, ANSYS ortamında 40×40 sonlu eleman ağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 14. *a*=7, *b*=10 ve üst ve alt kenarları basit mesnetli, yan kenarları ankastre olan sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

a=7 *b*=10 / yük=1000 Pa					
CSCS	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
40x40	1	0,3639526	0,3217194	0,3024154	0,2528938
	2	0,5244000	0,4458920	0,3900700	0,3127438
	5	0,7163000	0,6100900	0,4778880	0,3910200
	10	0,7776700	0,6845320	0,5071860	0,4312620



Şekil 17. *a*=7, *b*=10 ve CSCS mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 14 incelendiğinde, malzeme değişim katsayısı (*p*) arttıkça tüm katman dizilimlerinde düşey yer değiştirme miktarının belirgin biçimde yükseldiği

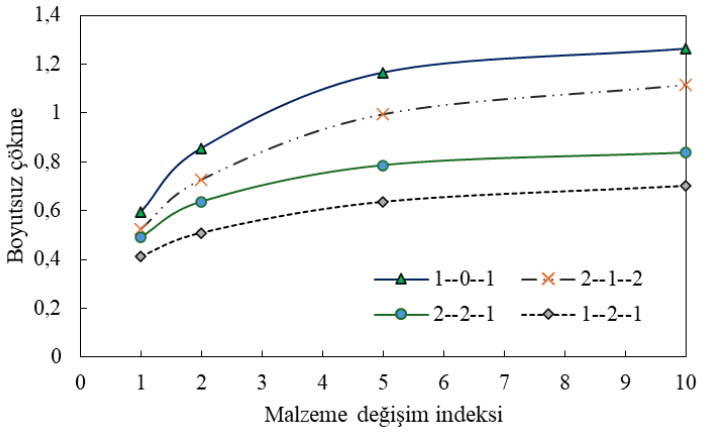
görülmektedir. En yüksek çökme değerleri, 1–0–1 diziliminde meydana gelmiş olup, bu dizilimde p = 10 için çökme değeri yaklaşık 0,778 olarak hesaplanmıştır. Buna karşın en düşük çökme ise 1–2–1 diziliminde ve p = 1 için 0,253 olarak bulunmuştur. Bu veriler, orta tabakada daha yumuşak malzeme kullanıldığında yapının rijitliğinin azaldığını ve bunun da deformasyonu artırdığını göstermektedir. Dış katmanlarda rijit malzeme kullanımının ise deformasyonu ciddi biçimde azalttığı anlaşılmaktadır. Şekil 17 incelendiğinde, katman dizilimlerine göre çökme davranışı grafiksel olarak açıkça gözlemlenmektedir. 1–0–1 dizilimi, tüm p değerlerinde en yüksek çökme değerlerine sahipken, 1–2–1 dizilimi en düşük değerlerle en rijit yapı davranışını sergilemiştir. 2–1–2 ve 2–2–1 dizilimleri orta seviyede çökme göstermiştir. Grafik, ayrıca p katsayısının artmasıyla birlikte eğrilerin eğiminin değiştiğini ve çökme oranındaki artışın bazı dizilimlerde daha hızlı gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda özellikle 1–0–1 dizilimi p'ye karşı daha hassas davranış göstermiştir.

3.12. Uygulama 11: CSCS Plak Modeli İçin Çökme Analizi (a=10 b=10)

Üst ve alt kenarları basit mesnetli, yan kenarları ankastre olan (CSCS) 10 m × 10 m boyutlarındaki kare plaka modeli için dört farklı katman diziliminin (1–0–1, 2–1–2, 2–2–1, 1–2–1) düşey yer değiştirme (çökme) davranışı değerlendirilmiştir (Tablo 15 ve Şekil 18). Analizler, ANSYS ortamında 40×40 sonlu eleman ağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 15. a=10, b=10 ve üst ve alt kenarları basit mesnetli, yan kenarları ankastre olan sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

a=10 b=10 / yük=1000 Pa					
CSCS	p	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
40x40	1	0,5928000	0,5240200	0,4928980	0,4114640
	2	0,8550000	0,7272820	0,6378300	0,5095040
	5	1,1661060	0,9954100	0,7858020	0,6377920
	10	1,2641840	1,1158320	0,8368740	0,7036460



Şekil 18. *a*=10, *b*=10 ve CSCS mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

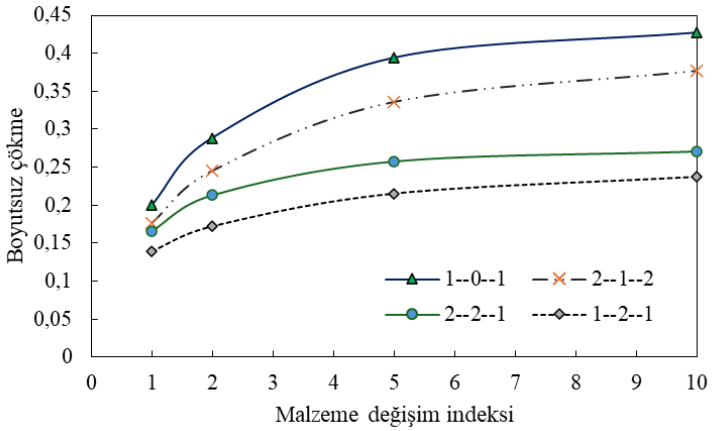
Tablo 15 incelendiğinde, malzeme değişim katsayısı (p) arttıkça tüm katman dizilimlerinde düşey yer değiştirme miktarının istikrarlı şekilde arttığı görülmektedir. En yüksek çökme değeri, 1–0–1 diziliminde ve $p = 10$ için 1,264 olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık en düşük çökme değeri, 1–2–1 diziliminde ve $p = 1$ için 0,411'dir. Bu veriler, önceki analizlerle paralel olarak, dış katmanlarda rijit malzeme kullanımının yapının genel rijitliğini artırdığını ve deformasyonu azalttığını doğrulamaktadır. Şekil 18 incelendiğinde, grafiksel olarak da benzer eğilimler net biçimde gözlemlenmektedir. Özellikle 1–0–1 ve 2–1–2 dizilimlerinde, p katsayısı arttıkça dik bir artış eğrisi ortaya çıkmıştır. Bu durum, yapının rijitliğinin malzeme farkına karşı daha duyarlı olduğunu göstermektedir. Öte yandan, 1–2–1 ve 2–2–1 dizilimleri daha sınırlı ve kontrollü çökme değerleri göstermiştir. Bu fark, rijit tabakaların dışta yer aldığı dizilimlerin, yük altındaki deformasyonlara karşı daha dirençli olduğunu ortaya koymaktadır.

3.13. Uygulama 12: SSSS Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=5 *b*=10)

Tüm kenarları basit mesnetli olan (SSSS) 5 m × 10 m boyutlarındaki plak modeli için dört farklı katman diziliminin (1–0–1, 2–1–2, 2–2–1, 1–2–1) düşey yer değiştirme (çökme) davranışı değerlendirilmiştir (Tablo 16 ve Şekil 19). Analizler, ANSYS ortamında 40×40 sonlu eleman ağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 16. *a*=5, *b*=10 ve kenarlarından basit mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

a=5 *b*=10 / yük=1000 Pa					
SSSS	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
40x40	1	0,2002106	0,1769774	0,1659574	0,1390154
	2	0,2886442	0,2455522	0,2131268	0,1720564
	5	0,3941740	0,3359238	0,2576058	0,2152662
	10	0,4272720	0,3767434	0,2707576	0,2374392



Şekil 19. *a*=5, *b*=10 ve kenarlarından basit mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

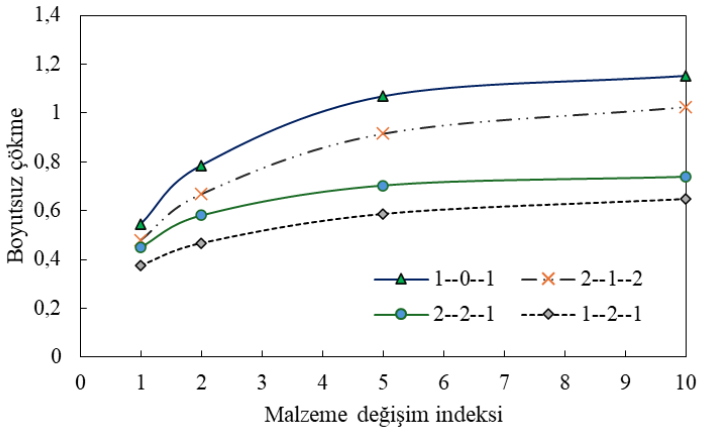
Tablo 16 incelendiğinde, malzeme değişim katsayısı (*p*) arttıkça tüm katman dizilimlerinde düşey yer değiştirme miktarında düzenli bir artış gözlemlenmektedir. En yüksek çökme değeri, 1–0–1 diziliminde ve *p* = 10 için 0,428 olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık en düşük çökme değeri, 1–2–1 diziliminde ve *p* = 1 için 0,139 olarak belirlenmiştir. Bu veriler, orta tabakada zayıf malzeme kullanılması durumunda yapının daha fazla deformasyona uğradığını; dış tabakalarda rijit malzeme tercih edildiğinde ise çökme miktarının belirgin şekilde azaldığını göstermektedir. Şekil 19 incelendiğinde, grafikler katman dizilimlerinin çökme üzerindeki etkisini net biçimde göstermektedir. 1–0–1 ve 2–1–2 dizilimlerinde, *p* katsayısının artmasıyla birlikte çökme eğrileri daha dik ve belirgin bir artış göstermektedir. Buna karşılık, 1–2–1 ve 2–2–1 dizilimlerinde yer değiştirme artışı daha sınırlı kalmış, yapının daha rijit bir davranış sergilediği görülmüştür. Grafik aynı zamanda, dış katmanlara rijit malzeme yerleştirilmesinin sadece çökme miktarını değil, *p* katsayısına karşı duyarlılığı da azalttığını ortaya koymaktadır.

3.14. Uygulama 13: SSSS Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=7 *b*=10)

Tüm kenarları basit mesnetli olan (SSSS) 7 m × 10 m boyutlarındaki plak modeli için dört farklı katman diziliminin (1–0–1, 2–1–2, 2–2–1, 1–2–1) düşey yer değiştirme (çökme) davranışı değerlendirilmiştir (Tablo 17 ve Şekil 20). Analizler, ANSYS ortamında 40×40 sonlu eleman ağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 17. *a*=7, *b*=10 ve kenarlarından basit mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

a=7 *b*=10 / yük=1000 Pa					
SSSS	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
40x40	1	0,5434380	0,4803960	0,4503380	0,3762532
	2	0,7853460	0,6689520	0,5803740	0,4672480
	5	1,0696620	0,9154200	0,7029620	0,5862260
	10	1,1536800	1,0245180	0,7385300	0,6470640



Şekil 20. *a*=7 *b*=10 ve kenarlarından basit mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 17 incelendiğinde, malzeme değişim katsayısı (*p*) arttıkça tüm katman dizilimlerinde düşey yer değiştirme değerlerinde anlamlı bir artış gözlemlenmektedir. En yüksek çökme değeri, 1–0–1 diziliminde ve *p* = 10 için 1,154 olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük çökme değeri 1–2–1 diziliminde ve *p* = 1 için 0,376'dir. Bu veriler, orta tabakada zayıf (elastikiyeti düşük) malzeme bulunan dizilimlerde deformasyonun ciddi oranda arttığını; dış tabakalarda rijit malzeme tercih edilmesi durumunda ise yapının daha az deformasyona uğradığını ortaya koymaktadır. Şekil 20 incelendiğinde, grafik eğrileri bu eğilimleri açık biçimde yansıtmaktadır. 1–0–1 ve 2–1–2 dizilimleri, *p* katsayısı arttıkça oldukça dik bir artış göstermektedir. Bu, ele alınan

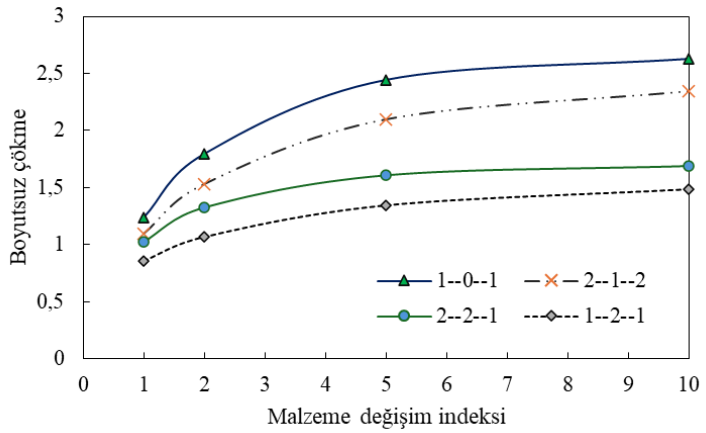
dizilimlerin rijitlik bakımından daha duyarlı ve zayıf yapı sergilediğini gösterir. Buna karşılık, 1–2–1 ve 2–2–1 dizilimlerinde eğrilerin eğimi daha düşük kalmış, deformasyon artışı daha kontrollü gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, katman yerleşiminin hem deformasyon düzeyini hem de *p* katsayısına karşı gösterilen yapısal tepkiselliği doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır.

3.15. Uygulama 14: SSSS Plak Modeli İçin Çökme Analizi (*a*=10 *b*=10)

Tüm kenarları basit mesnetli olan (SSSS) 10 m × 10 m boyutlarındaki kare plak modeli için dört farklı katman diziliminin (1–0–1, 2–1–2, 2–2–1, 1–2–1) düşey yer değiştirme (çökme) davranışı değerlendirilmiştir (Tablo 18 ve Şekil 21). Analizler, ANSYS ortamında 40×40 sonlu eleman ağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 18. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından basit mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

a=10 *b*=10 / yük=1000 Pa					
SSSS	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
40x40	1	1,2429040	1,0987700	1,0297620	0,8588000
	2	1,7991860	1,5338700	1,3302660	1,0690540
	5	2,4454140	2,0997280	1,6131380	1,3439080
	10	2,6288780	2,3463100	1,6942300	1,4842040



Şekil 21. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından basit mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 18 incelendiğinde, malzeme değişim katsayısı (*p*) arttıkça tüm katman dizilimlerinde düşey yer değiştirme değerlerinde belirgin bir artış meydana geldiği görülmektedir. En yüksek çökme değeri, 1–0–1 diziliminde ve *p* = 10 için 2,629 olarak hesaplanmıştır. En düşük çökme ise, 1–2–1 diziliminde ve *p* = 1 için 0,858 olarak elde

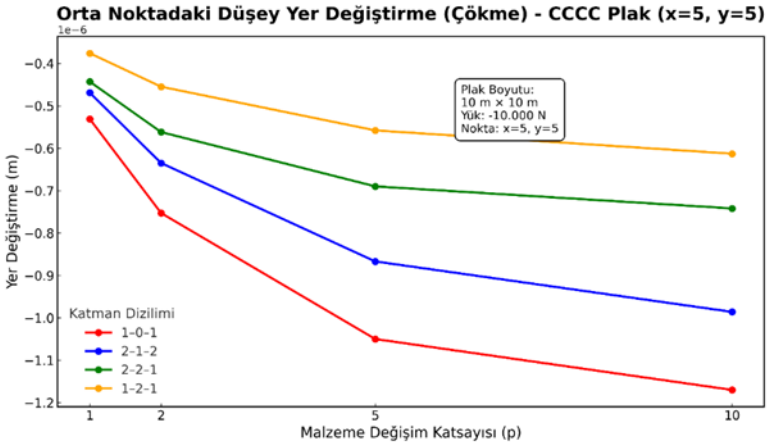
edilmiştir. Bu değerler, yapının en zayıf katmanına uygulanan yüklerin etkisini artırarak çökme miktarını büyüttüğünü; dış tabakalarda rijit malzeme kullanımının ise bu etkiyi ciddi ölçüde azalttığını göstermektedir. Şekil 21 incelendiğinde, tüm eğrilerde artan *p* katsayısına karşılık gelen çökme artışı net biçimde gözlemlenmektedir. 1–0–1 ve 2–1–2 dizilimleri, özellikle *p*>2 durumlarında keskin artış eğrileri sergilemektedir. Bu durum, söz konusu dizilimlerin rijitlik açısından en düşük yapılar olduğunu ve *p*'ye karşı oldukça duyarlı davrandığını göstermektedir. Öte yandan, 2–2–1 ve 1–2–1 dizilimleri daha sınırlı ve dengeli bir çökme eğilimi göstermiştir. Bu fark, özellikle yüksek rijitlikteki dış katmanların, yapının deformasyon karakteristiğini ne ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır.

3.16. Uygulama 15: CCCC Plak Modelinde Orta Nokta Çökme Analizi (*a*=10 *b*=10)

Dört kenarı da ankastre olan (CCCC) 10 m × 10 m boyutlarındaki kare plak modeli için, plaka ortasındaki nokta (x = 5, y = 5) esas alınarak yapılan çökme analizi sunulmaktadır (Tablo 19 ve Şekil 22). İnceleme, dört farklı katman dizilimi (1–0–1, 2–1–2, 2–2–1, 1–2–1) dikkate alınarak, ANSYS ortamında 40×40 sonlu eleman ağı ile gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yük negatif yönlü olup-10.000 Pa değerindedir.

Tablo 19. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için maksimum düşey deplasman değerleri

a=10 *b*=10 / yük= -10000 N					
CCCC	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
40x40	1	-5,31E-07	-4,69E-07	-4,43E-07	-3,76E-07
	2	-7,53E-07	-6,35E-07	-5,62E-07	-4,55E-07
	5	-1,05E-06	-8,67E-07	-6,90E-07	-5,58E-07
	10	-1,17E-06	-9,86E-07	-7,42E-07	-6,13E-07



Şekil 22. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 19 incelendiğinde, tüm katman dizilimlerinde malzeme değişim katsayısı (*p*) arttıkça çökme (negatif yer değiştirme) değerlerinde mutlak anlamda bir artış gözlemlenmektedir. En yüksek çökme değeri, 1–0–1 diziliminde ve *p* = 10 için -1,17E–06 m olarak hesaplanmıştır. En düşük çökme ise, 1–2–1 diziliminde ve *p* = 1 için -3,76E–07 m olarak elde edilmiştir. Bu durum, orta katmanda zayıf malzeme kullanıldığında rijitliğin azaldığını ve yük etkisiyle oluşan deformasyonun daha büyük olduğunu; dış katmanlarda rijit malzeme kullanımı ile bu etkinin sınırlandığını göstermektedir. Şekil 22 incelendiğinde, grafiksel olarak çökme davranışının *p* katsayısına bağlı değişimi net biçimde görülmektedir. En dik eğri 1–0–1 dizilimine ait olup, *p* değerine karşı en yüksek duyarlılığı göstermektedir. Buna karşılık, 1–2–1 ve 2–2–1 dizilimleri daha az eğimli ve daha kontrollü bir çökme artışı sergilemiştir. Bu, dış katmanların rijitliğinin, sistemin genel deformasyon eğilimini dengelediğini göstermektedir.

Ek olarak, "ortası = 2641" bilgisi, ANSYS analizinde bu noktanın yer değiştirme değerinin alındığı düğüm numarasını ifade etmektedir ve analiz doğruluğu açısından önemli bir referans noktasıdır.

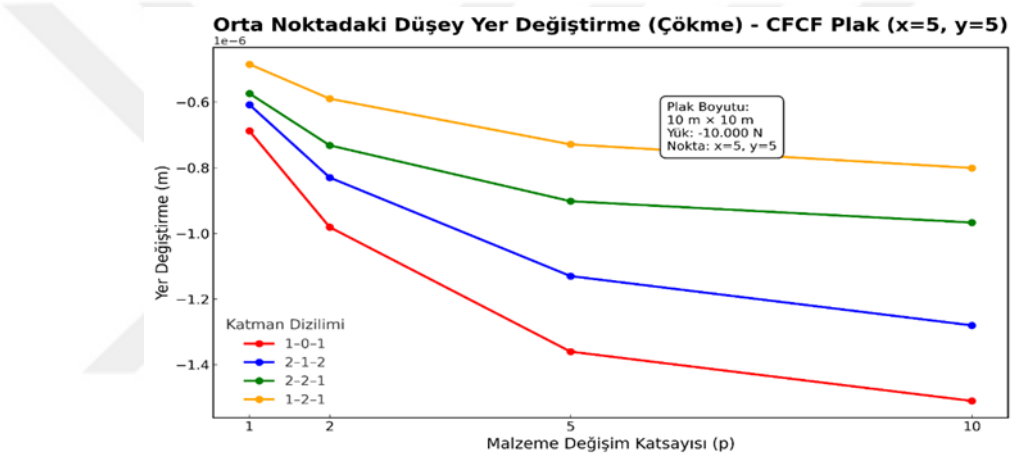
3.17. Uygulama 16: CFCF Plak Modelinde Orta Nokta Çökme Analizi (*a*=10 *b*=10)

Üst ve alt kenarları ankastre, yan kenarları serbest olan (CFCF) 10 m × 10 m boyutlarındaki plak modeli için, plak ortasında (x = 5, y = 5) meydana gelen düşey yer değiştirme (çökme) değerlendirilmektedir (Tablo 20 ve Şekil 23). Hesaplamalar, dört farklı katman dizilimi (1–0–1, 2–1–2, 2–2–1, 1–2–1) dikkate alınarak ANSYS

ortamında 40×40 sonlu eleman ağı ile gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yük negatif yönlü olup-10.000 Pa değerindedir.

Tablo 20. *a*=10, *b*=10 ve CFCF mesnetli sandviç dikdörtgen plak için maksimum düşey deplasman değerleri

a=10 *b*=10 / yük= -10000 N					
CFCF	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
40x40	1	-6,88E-07	-6,08E-07	-5,74E-07	-4,85E-07
	2	-9,81E-07	-8,30E-07	-7,32E-07	-5,90E-07
	5	-1,36E-06	-1,13E-06	-9,02E-07	-7,29E-07
	10	-1,51E-06	-1,28E-06	-9,67E-07	-8,01E-07



Şekil 23. *a*=10, *b*=10 ve CFCF mesnetli sandviç dikdörtgen plak için maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

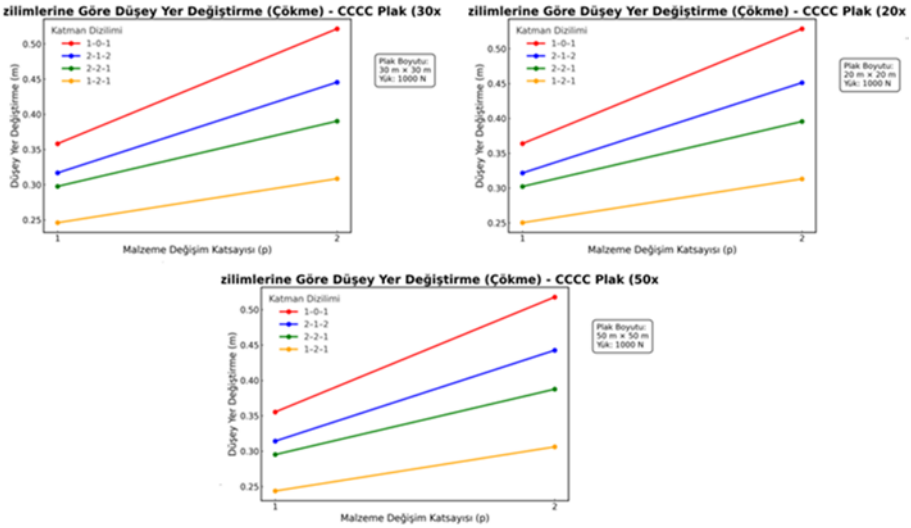
Tablo 20 incelendiğinde, malzeme değişim katsayısı (*p*) arttıkça tüm katman dizilimlerinde düşey yer değiştirme (negatif yönde) değerlerinin mutlak olarak arttığı gözlemlenmektedir. En yüksek deformasyon, 1–0–1 diziliminde ve *p* = 10 için -1,51E–06 m olarak hesaplanmıştır. En düşük deformasyon ise, 1–2–1 diziliminde ve *p* = 1 için -4,85E–07 m olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar orta tabakada zayıf (daha elastik) malzeme kullanıldığında sistemin rijitliğinin düştüğünü ve deformasyonun arttığını; dış tabakalarda rijit malzeme kullanıldığında ise çökmenin sınırlandığını göstermektedir. Şekil 23 bu eğilimleri grafiksel olarak yansıtmaktadır. Özellikle 1–0–1 ve 2–1–2 dizilimlerinde, artan *p* katsayısı ile birlikte çökme değerlerinin daha dik bir eğimle arttığı görülmektedir. Buna karşılık, 2–2–1 ve 1–2–1 dizilimleri daha yatay eğrilerle daha kontrollü bir çökme artışı sergilemiştir. Bu, dış katmanların rijitliğinin sistemin genel deformasyon direncini belirlediğini göstermektedir.

Ek olarak, "ortası = 2641" bilgisi, bu hesaplamaların ANSYS analizinde esas alınan orta düğüm numarasına karşılık gelmekte olup, yer değiştirmenin tam orta noktadaki değeri olarak değerlendirilmiştir. Bu sayısal referans, hesaplama güvenilirliği açısından önem arz etmektedir.

3.18. Uygulama 17: CCCC Sandviç Plaklarda Boyut Artışının Çökme Üzerine Etkisi (*a*=20, *b*=20 / *a*=30, *b*=30 / *a*=50, *b*=50)

Tablo 21. *a*=20, *b*=20 / *a*=30, *b*=30 / *a*=50, *b*=50 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri. Plak Boyutunun Etkisi

		a=20 *b*=20 / yük= -10000 Pa			
CCCC	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
	1	0,3637788	0,3216225	0,3023138	0,2503250
40x40	2	0,5285088	0,4511550	0,3955088	0,3131438
		a=30 *b*=30 / yük= -10000 Pa			
CCCC	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
	1	0,3582321	0,3167277	0,2976057	0,2459773
40x40	2	0,5213975	0,4454960	0,3902788	0,3084990
		a=50 *b*=50 / yük= -10000 Pa			
CCCC	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
	1	0,3553578	0,3141962	0,2951718	0,2437229
40x40	2	0,5177302	0,4425693	0,3875757	0,3060915



Şekil 24. *a*=20, *b*=20 / *a*=30, *b*=30 / *a*=50, *b*=50 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

Tüm kenarları ankastre (CCCC) olan plaklar için plak boyutunun artmasının düşey yer değiştirme (çökme) üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analizlerde her bir boyut için dört farklı katman dizilimi (1–0–1, 2–1–2, 2–2–1, 1–2–1) ve iki farklı malzeme değişim katsayısı (p = 1 ve 2) kullanılmıştır (Tablo 21 ve Şekil 24). Hesaplamalar, ANSYS ortamında 40×40 sonlu eleman ağı ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 22 Genel Bulgular:

1. Plak Boyutu Artışıyla Çökme Davranışı:

Plak boyutu 20 m → 30 m → 50 m olarak arttıkça, her katman diziliminde çökme değerleri çok hafif azalma göstermektedir.

Örneğin, 1–0–1 dizilimi için p = 1 değerinde:

20×20 plakta: 0,3638

30×30 plakta: 0,3582

50×50 plakta: 0,3554

Bu durum, büyük boyutlu plaklarda sınır koşullarının rijitlik katkısının nispeten daha fazla etkili olduğunu ve sistemin daha stabil hâle geldiğini göstermektedir.

2. Katman dizilimlerinin etkisi değişmiyor:

Her boyutta 1–0–1 dizilimi en fazla çökme, 1–2–1 dizilimi ise en düşük çökme üretmiştir.

Bu sonuç, katman yerleşiminin etkisinin plak boyutundan bağımsız olarak korunduğunu göstermektedir.

3. Malzeme değişim katsayısı etkisi:

Her boyutta p = 2 durumunda çökme, p = 1'e göre yaklaşık %40–45 oranında artmaktadır.

Bu artış oranı da plak boyutundan bağımsızdır, yani p'nin etkisi tutarlıdır.

Grafiksel Yorumlar (Şekil 24):

Grafiklerdeki tüm eğriler, plak boyutu artsa da benzer eğilimde kalmaktadır.

Eğrilerin dikliği değişmeden korunmakta, yani geometri büyüse bile malzeme dizilimi ve p katsayısına bağlı duyarlılık sabit kalmaktadır.

En dik eğri her zaman 1–0–1 dizilimine, en yatay eğri ise 1–2–1 dizilimine aittir.

Sonuç:

CCCC plaklarda boyut (a = b) arttıkça, çökme değerlerinde çok sınırlı bir azalma meydana gelmektedir. Ancak katman dizilimi ve malzeme değişim katsayısının etkileri sabit ve belirgindir.

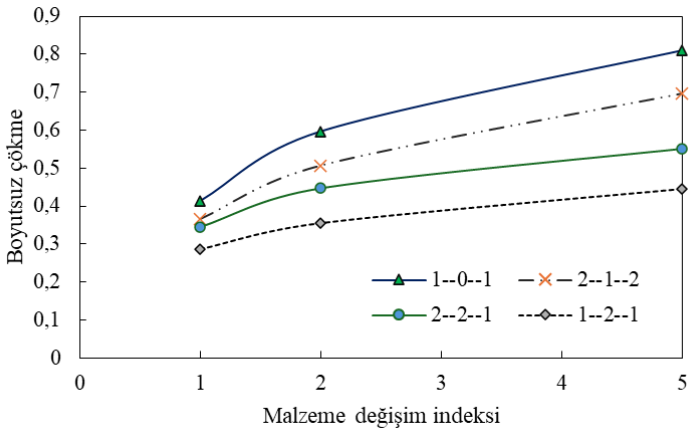
Yapısal tasarımda malzeme dizilimi hala birincil belirleyici unsur olmaya devam etmektedir. Plak geometrisinin büyümesi, bu etkinin yönünü değiştirmemektedir.

3.19. Uygulama 18: CCCC Boşluklu Plakta Katman Dizilimlerine Göre Çökme Analizi (Model 2, *a*=10 *b*=10)

Dört kenarı ankastre (CCCC) olan, 10 m × 10 m boyutlarındaki ve merkezinde 2 m × 2 m kare boşluk bulunan Model 2 tipi plak için dört farklı katman diziliminin (1–0–1, 2–1–2, 2–2–1, 1–2–1) düşey yer değiştirme (çökme) davranışı değerlendirilmiştir (Tablo 22 ve Şekil 25). Analizler ANSYS ortamında, 40×40 sonlu eleman ağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 22. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

a=10 *b*=10 / yük=1000 Pa / boşluk(2x2) model 2					
CCCC	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
40x40	1	0,4140100	0,3659704	0,3444624	0,2873066
	2	0,5972080	0,5064640	0,4464240	0,3558396
	5	0,8104640	0,6953620	0,5500500	0,4455120



Şekil 25. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 22 incelendiğinde, malzeme değişim katsayısı (*p*) arttıkça tüm katman dizilimlerinde düşey yer değiştirme miktarında düzenli bir artış meydana geldiği gözlemlenmektedir. En yüksek çökme değeri, 1–0–1 diziliminde ve $p = 5$ için 0,811 olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık, en düşük çökme değeri 1–2–1 diziliminde ve $p = 1$ için 0,287 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, orta tabakada zayıf malzeme

bulunduğunda sistemin rijitliğinin düştüğünü ve deformasyonun arttığını; dış tabakalarda rijit malzeme kullanıldığında ise çökmenin sınırlandığını göstermektedir. Şekil 25 bu eğilimleri grafiksel olarak ortaya koymaktadır. Özellikle 1–0–1 ve 2–1–2 dizilimlerinde, *p* katsayısının artışıyla çökme miktarının çok daha dik bir şekilde arttığı dikkat çekmektedir. Buna karşın, 1–2–1 ve 2–2–1 dizilimleri daha sınırlı ve dengeli yer değiştirmeler sergilemiştir.

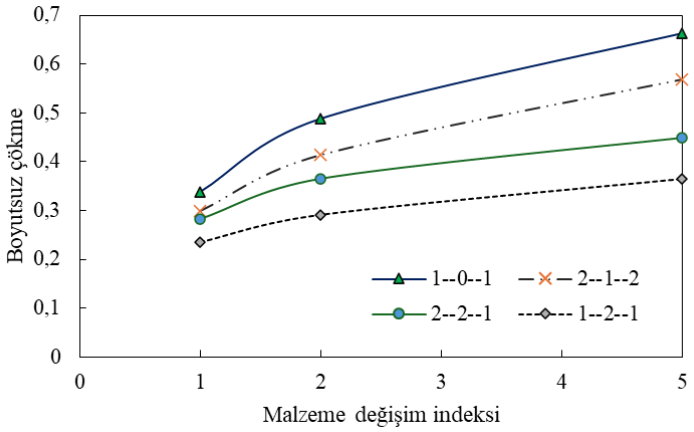
Özellikle vurgulanmalıdır ki, bu analizde kullanılan 2 m × 2 m merkez boşluğu, yapısal rijitliği düşürerek tüm dizilimlerde çökme miktarını artırmıştır. Boşluklu model, aynı geometriye sahip boşluksuz CCCC plaklara kıyasla daha yüksek yer değiştirme değerleri üretmiştir. Buna rağmen, katman dizilimi ve *p* katsayısı gibi parametrelerin etkisi boşluk varlığında da belirleyiciliğini korumuş; dış katmanlarda rijit malzeme bulundurulan dizilimler (örneğin 1–2–1) boşluğa rağmen en düşük deformasyon seviyelerini sağlamıştır.

3.20. Uygulama 19: CCCC Boşluklu Plakta Katman Dizilimlerine Göre Çökme Analizi (Model 3, *a*=10 *b*=10)

Dört kenarı ankastre (CCCC) olan ve merkezinde 3 m × 3 m ölçülerinde kare boşluk bulunan 10 m × 10 m boyutlarındaki Model 3 tipi plak için dört farklı katman diziliminin (1–0–1, 2–1–2, 2–2–1, 1–2–1) düşey yer değiştirme (çökme) davranışı değerlendirilmiştir (Tablo 23 ve Şekil 26). Hesaplamalar, ANSYS ortamında 40×40 sonlu eleman ağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 23. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

a=10 *b*=10 / yük=1000 Pa / boşluk(3x3) model 3					
CCCC	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
40x40	1	0,3384622	0,2991968	0,2816332	0,2349882
	2	0,4880720	0,4137440	0,3648190	0,2908900
	5	0,6624160	0,5681380	0,4492740	0,3640400



Şekil 26. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 23 incelendiğinde, malzeme değişim katsayısı (*p*) arttıkça tüm katman dizilimlerinde çökme değerlerinin düzenli şekilde yükseldiği görülmektedir. En yüksek çökme değeri, 1–0–1 diziliminde ve *p* = 5 için 0,662 olarak hesaplanmıştır. En düşük değer ise, 1–2–1 diziliminde ve *p* = 1 için 0,235'tir. Bu sonuçlar, orta tabakada zayıf malzeme bulundurmanın yapısal rijitliği azalttığını ve daha büyük deformasyonlara yol açtığını göstermektedir. Şekil 26, her bir katman diziliminin malzeme değişim katsayısına karşı gösterdiği çökme davranışını grafiksel olarak sunmaktadır. Özellikle 1–0–1 ve 2–1–2 dizilimlerinde, *p* katsayısı arttıkça deformasyonun hızlı bir şekilde arttığı, buna karşılık 1–2–1 ve 2–2–1 dizilimlerinde eğrilerin daha yatay kaldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, dış katmanlarda rijit malzeme kullanımının rijitlik açısından daha avantajlı olduğunu bir kez daha ortaya koymaktadır.

Bu modelde kullanılan 3 m × 3 m merkez boşluğu, boşluk bulunmayan aynı boyuttaki CCCC plak ile karşılaştırıldığında çökme değerlerini daha da yükseltmiştir. Boşluğun artması, yapısal sürekliliği zayıflattığı için tüm dizilimlerde deformasyonun daha büyük değerlerde gerçekleşmesine neden olmuştur. Yine de dış katmanlara rijit malzeme yerleştirilen 1–2–1 ve 2–2–1 dizilimleri, artan boşluk etkisine rağmen deformasyonu en iyi şekilde sınırlandırmayı başarmıştır.

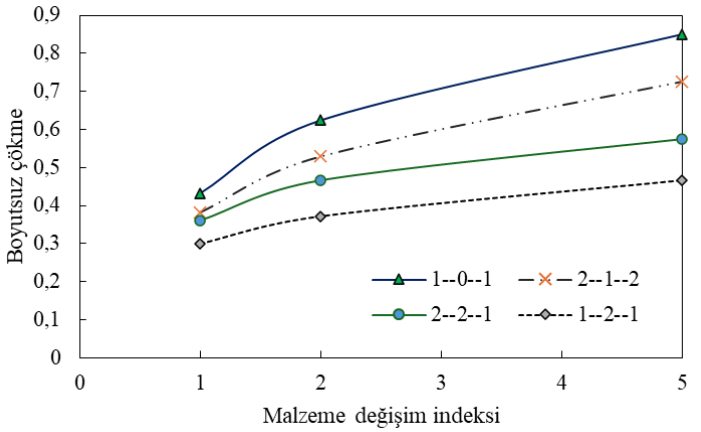
3.21. Uygulama 20: CCCC Boşluklu Plakta Katman Dizilimlerine Göre Çökme Analizi (Model 4, *a*=10 *b*=10)

Dört kenarı ankastre (CCCC) olan, 10 m × 10 m boyutlarındaki ve merkezinde 1 m × 1 m kare boşluk bulunan Model 4 tipi plak için dört farklı katman diziliminin (1–0–1, 2–1–2, 2–2–1, 1–2–1) düşey yer değiştirme (çökme) davranışı

değerlendirilmiştir (Tablo 24 ve Şekil 27). Hesaplamalar ANSYS ortamında 40×40 sonlu eleman ağı ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 24. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

a=10 *b*=10 / yük=1000 Pa / boşluk(1x1) model 4					
CCCC	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
40x40	1	0,4330480	0,3827740	0,3603350	0,3007700
	2	0,6242640	0,5299480	0,4666400	0,3721454
	5	0,8495660	0,7265600	0,5757000	0,4656140



Şekil 27. *a*=10, *b*=10ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 24 incelendiğinde, malzeme değişim katsayısı (*p*) arttıkça tüm katman dizilimlerinde çökme miktarında düzenli bir artış gözlemlenmektedir. En yüksek çökme, 1–0–1 diziliminde ve *p* = 5 için 0,850 olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık, en düşük çökme değeri 1–2–1 diziliminde ve *p* = 1 için 0,301 olarak belirlenmiştir. Bu eğilim, daha önceki tüm modellerde olduğu gibi, dış katmanlarda rijit malzeme bulundurmanın yapısal rijitliği artırarak deformasyonu azalttığını bir kez daha doğrulamaktadır. Şekil 27'de yer alan grafik, her katman diziliminin malzeme değişim katsayısına karşılık gelen düşey yer değiştirme davranışını açık biçimde göstermektedir. 1–0–1 dizilimi en dik eğriyle en yüksek deformasyonu üretirken, 1–2–1 dizilimi en yatay eğrilerden biriyle en düşük deformasyon değerlerini sunmuştur. Bu durum, rijitlik açısından dış tabakalara yerleştirilen sert malzemenin yapının stabilitesini ciddi ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır.

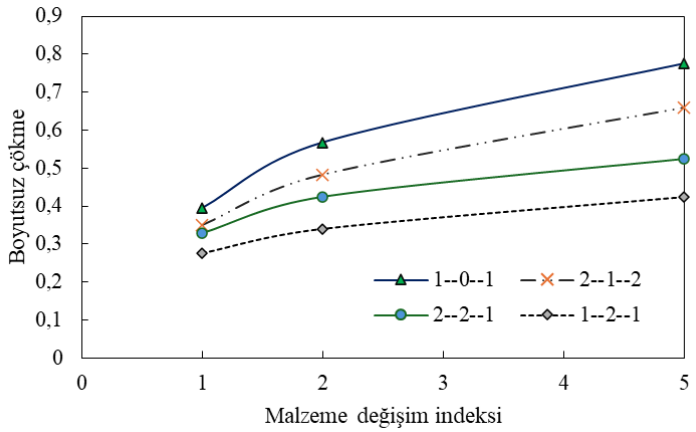
Bu analizde kullanılan 1 m × 1 m merkez boşluğu, daha önce incelenen 2×2 ve 3×3 boşluklara kıyasla daha sınırlı bir kesinti oluşturduğu için, genel çökme değerleri daha düşüktür. Ancak boşluk yine de sistemin rijitliğini zayıflatmakta ve deformasyonun artmasına neden olmaktadır. Yine de katman dizilimi ve malzeme değişim katsayısı (*p*) gibi parametrelerin etkisi, boşluk küçük olsa dahi belirleyiciliğini korumaktadır.

3.22. Uygulama 21: CCCC Boşluklu Plakta Katman Dizilimlerine Göre Çökme Analizi (Model 5, *a*=10 *b*=10)

Dört kenarı ankastre (CCCC) olan ve 10 m × 10 m boyutlarına sahip Model 5 plak için dört farklı katman diziliminin (1–0–1, 2–1–2, 2–2–1, 1–2–1) düşey yer değiştirme (çökme) davranışı değerlendirilmiştir (Tablo 25 ve Şekil 28). Analizler ANSYS ortamında, 40×40 sonlu eleman ağı ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 25. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

a=10 *b*=10 / yük=1000 Pa / model 5					
CCCC	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
10x10	1	0,3945920	0,3488020	0,3284264	0,2744702
	2	0,5681000	0,4828660	0,4245740	0,3390208
	5	0,7766440	0,6605920	0,5248560	0,4235100



Şekil 28. *a*=10, *b*=10ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 25 incelendiğinde, malzeme değişim katsayısının (*p*) artışıyla birlikte tüm katman dizilimlerinde çökme miktarının belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmektedir. En yüksek çökme değeri, 1–0–1 diziliminde ve *p* = 5 için 0,777

olarak elde edilmiştir. En düşük değer ise, 1–2–1 diziliminde ve $p = 1$ için 0,275 olarak hesaplanmıştır. Bu fark, orta katmanda yumuşak malzeme bulunduğunda yapının daha fazla deformasyona uğradığını; dış katmanlara yerleştirilen rijit malzemenin ise çökme miktarını önemli ölçüde sınırladığını göstermektedir. Şekil 28, bu davranışları grafiksel olarak yansıtmaktadır. Grafiklerde 1–0–1 ve 2–1–2 dizilimleri, malzeme değişim katsayısı arttıkça daha dik eğrilerle artan çökme eğilimi göstermiştir. Buna karşın, 2–2–1 ve özellikle 1–2–1 dizilimleri, daha kontrollü ve yatay eğrilerle yer değiştirme değerlerinde daha düşük seviyede kalmıştır.

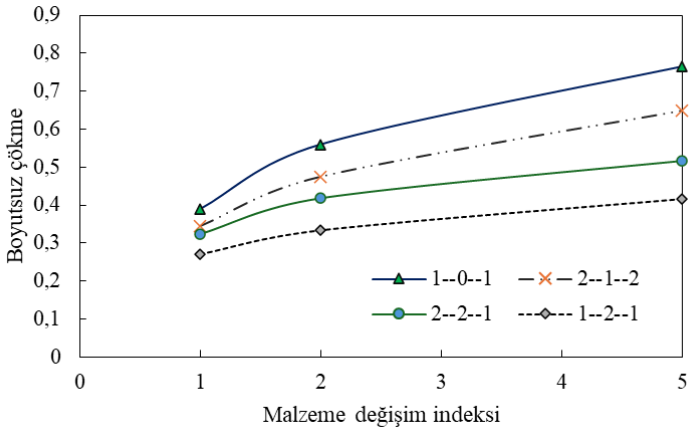
Bu modelde, daha önceki boşluklu yapıların aksine boşluk yer almamaktadır. Bu nedenle çökme değerleri, eşdeğer boyutlara sahip boşluklu modellerle karşılaştırıldığında daha düşüktür. Bu sonuç, boşluk bulunmayan tam plak formunun yapısal rijitliğe olumlu katkı sağladığını ve deformasyon miktarını azalttığını ortaya koymaktadır. Yine de katman dizilimi ve p katsayısı bu modelde de çökme davranışını belirleyen en kritik faktörler olarak öne çıkmaktadır.

3.23. Uygulama 22: CCCC Boşluklu Plakta Katman Dizilimlerine Göre Çökme Analizi (Model 6, *a*=10 *b*=10)

Dört kenarı ankastre (CCCC) olan ve 10 m × 10 m boyutlarındaki Model 6 plak için dört farklı katman diziliminin (1–0–1, 2–1–2, 2–2–1, 1–2–1) düşey yer değiştirme (çökme) davranışı değerlendirilmiştir Dört kenarı ankastre (CCCC) olan ve 10 m × 10 m boyutlarına sahip Model 5 plak için dört farklı katman diziliminin (1–0–1, 2–1–2, 2–2–1, 1–2–1) düşey yer değiştirme (çökme) davranışı değerlendirilmiştir (Tablo 26 ve Şekil 29). Analizler ANSYS ortamında, 40×40 sonlu eleman ağı ile gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar ANSYS ortamında 40×40 sonlu eleman ağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 26. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

a=10 *b*=10 / yük=1000 Pa / model 6					
CCCC	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
10x10	1	0,3890060	0,3438430	0,3238170	0,2708792
	2	0,5594740	0,4749240	0,4180760	0,3341340
	5	0,7647500	0,6501420	0,5160780	0,4169360



Şekil 29. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 26'de görüldüğü üzere, malzeme değişim katsayısı (*p*) arttıkça tüm dizilimlerde çökme değerleri düzenli olarak artış göstermektedir. En yüksek çökme değeri, 1–0–1 diziliminde ve $p = 5$ için 0,765 olarak elde edilmiştir. En düşük çökme ise, 1–2–1 diziliminde ve $p = 1$ için 0,271'dir. Bu fark, özellikle orta katmanda zayıf malzeme bulunan dizilimlerde deformasyonun daha hızlı arttığını, dış katmanlarda rijit malzeme bulunan dizilimlerin ise daha stabil sonuçlar verdiğini göstermektedir. Şekil 29, bu değişimi grafiksel olarak sunmaktadır. Grafik incelendiğinde, 1–0–1 ve 2–1–2 dizilimlerinin p katsayısı arttıkça daha dik bir artış eğrisi izlediği, buna karşılık 1–2–1 ve 2–2–1 dizilimlerinin daha yatay eğrilerle ilerlediği net biçimde gözlemlenmektedir. Bu durum, rijit malzemenin yerleşiminin sistemin genel deformasyon davranışında belirleyici bir rol oynadığını bir kez daha ortaya koymaktadır.

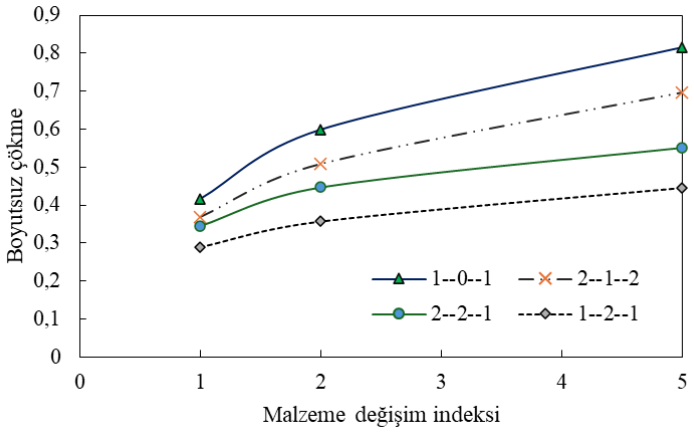
Bu modelde özel bir boşluk veya geometrik kesinti yer almamakta; dolayısıyla çökme değerleri boşluklu modellerle kıyaslandığında daha düşüktür. Ancak sonuçlar, yine katman dizilimi ve *p* katsayısı parametrelerinin sistemin rijitliğine olan etkisini güçlü biçimde göstermektedir.

3.24. Uygulama 23: CCCC Boşluklu Plakta Katman Dizilimlerine Göre Çökme Analizi (Model 7, *a*=10 *b*=10)

Dört kenarı ankastre (CCCC) olan, 10 m × 10 m boyutlarındaki Model 7 tipi plak için dört farklı katman diziliminin (1–0–1, 2–1–2, 2–2–1, 1–2–1) düşey yer değiştirme (çökme) davranışı değerlendirilmiştir (Tablo 27 ve Şekil 30). Sonlu eleman analizleri ANSYS ortamında, 40×40'lık ağ yapısıyla gerçekleştirilmiştir.

Tablo 27. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey deplasman değerleri

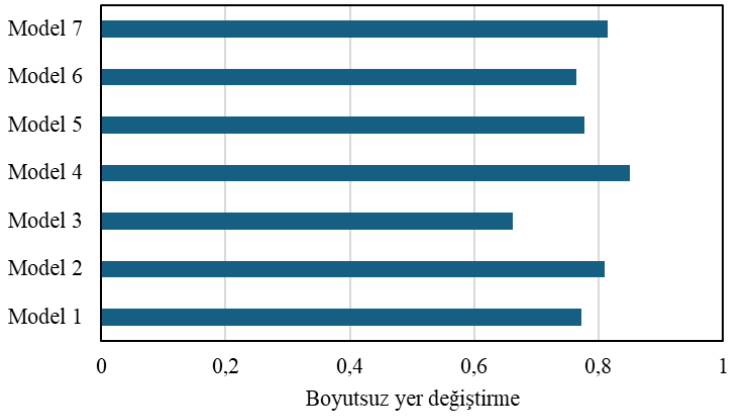
a=10 *b*=10 / yük=1000 Pa / model 7					
CCCC	*p*	1–0–1	2–1–2	2–2–1	1–2–1
10x10	1	0,4155300	0,3673194	0,3458570	0,2890052
	2	0,5983100	0,5074140	0,4471460	0,3570214
	5	0,8150620	0,6957040	0,5511900	0,4460060



Şekil 30. *a*=10, *b*=10 ve kenarlarından ankastre mesnetli sandviç dikdörtgen plak için boyutsuz maksimum düşey değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 27'e bakıldığında, malzeme değişim katsayısı (*p*) arttıkça bütün katman dizilimlerinde çökme miktarının belirgin şekilde yükseldiği görülmektedir. En fazla çökme, 1–0–1 diziliminde ve *p* = 5 için 0,815 olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık en düşük çökme değeri, 1–2–1 diziliminde ve *p* = 1 için 0,289 seviyesindedir. Bu sonuç, orta katmanda zayıf (yumuşak) malzeme bulunan sistemlerin rijitliğinin ciddi biçimde azaldığını, dış katmanlara sert malzeme yerleştirilen sistemlerin ise deformasyonu sınırladığını göstermektedir. Şekil 30, bu eğilimleri görselleştirerek desteklemektedir. Özellikle 1–0–1 ve 2–1–2 dizilimlerinin artan *p* katsayısıyla birlikte daha dik eğrilerle yüksek deformasyon değerlerine ulaştığı görülmektedir. Diğer yandan, 1–2–1 ve 2–2–1 dizilimlerinin eğrileri daha yatay seyretmiş, bu dizilimlerin daha rijit yapılar sunduğu anlaşılmıştır.

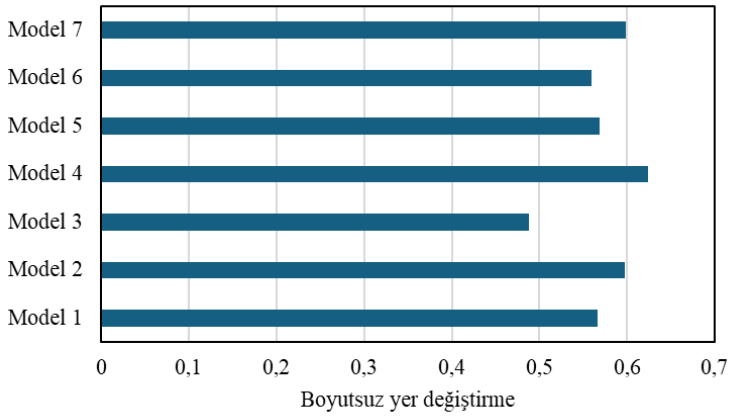
3.25. Uygulama 24: Boşluk Konumuna Göre Boyutsuz Çökme Değerlerinin Karşılaştırılması



Şekil 31. Model 1–7 için boşluk yerleşimlerine göre çökme değerleri

Şekil 31'de boşluk yerleşimlerine göre boyutsuz çökme değerlerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Bu örnekte malzeme değişim katsayısı p = 5 ve katman dizilimi 1-0-1 olarak alınmıştır. Model 4 en yüksek çökme değerini göstermiştir. Bu, merkeze yakın boşluğun rijitliği ciddi şekilde azalttığını ortaya koyar. Model 3 en düşük çökme değerine sahiptir. Boşluğun köşeye yakın olması, sistemin genel rijitliğini daha az etkilemiş olabilir. Boşluksuz durumda yer değiştirmenin büyük olmasının sebebi orta noktanın daha fazla yer değiştirmesidir.

3.26. Uygulama 25: Malzeme Katsayısı (p=2) Altında Boşluklu Modellerin Çökme Karşılaştırması



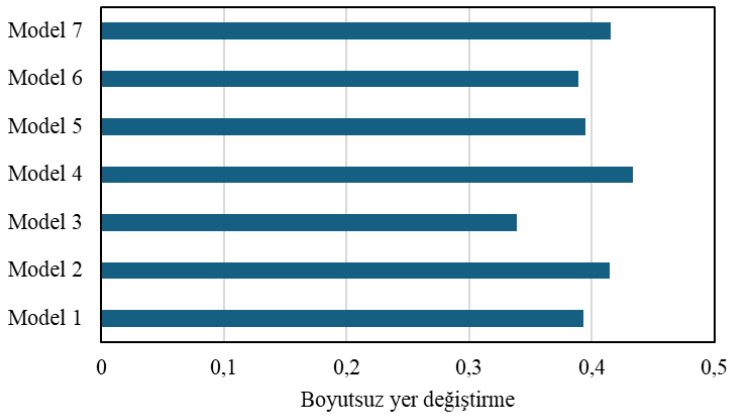
Şekil 32. p = 2 için boşluklu CCCC plak modellerinde düşey yer değiştirme (çökme) değerlerinin karşılaştırması

Şekil 32'ye göre model 4 p = 2'de en yüksek çökme değerini göstermeye devam ediyor. Bu, boşluğun merkezi konumlarda yapının rijitliğini ciddi biçimde etkilediğini tekrar doğruluyor.

Model 3, p = 2 için de görece daha az çökme değerine sahiptir.

Model 7 (Yayılmış Boşluklar) modeli dengeli ama yaygın boşluk dağılımına rağmen yüksek deformasyon üretmektedir. Bu örnekte de önceki örnekte olduğu gibi katman dizilimi 1-0-1 olarak alınmıştır.

Uygulama 26: Boşluk Konumu ve Dağılımının Çökme Üzerine Etkisi: Modeller 1–7 Karşılaştırması



Şekil 33. p = 1 durumunda 7 farklı modelin çökme değerleri karşılaştırılması

Şekil 33'e göre Model 4 yine en fazla çökme gösteren modeldir. Bu, boşluğun konumunun merkezileştikçe deformasyonu artırdığını kanıtlar. Bu örnekte de önceki örnekte olduğu gibi katman dizilimi 1-0-1 olarak alınmıştır. Model 3 düşük çökme değeriyle yine dikkat çekmektedir. Köşeye yakın boşluklar rijitlik açısından daha az olumsuz etki yaratır. Model 7, boşluklar küçük ama çok sayıda olduğunda toplam etki büyür ve çökme artar. Bu üç grafik birlikte değerlendirildiğinde:

Boşlukların alanı kadar yerleşim yeri de yapısal performans üzerinde belirleyici olmaktadır.

Merkez konumundaki boşluklar en zayıflatıcı etkileri yaratmaktadır.

Geometrik Modellerin Açıklaması:

Model 1: Boşluk içermeyen tam plaktır. Diğer modellerin karşılaştırmasında referans model olarak kullanılmıştır.

Model 2: Plağın orta bölgesinde tek kare (2x2) boşluk bulunmaktadır.

Model 3: Plağın orta bölgesinde tek kare (3x3) boşluk bulunmaktadır.

Model 4: Plağın orta bölgesinde tek kare (1x1) boşluk bulunmaktadır.

Model 5: Dört köşeye yakın bölgelerde küçük kare boşluklar yer almaktadır.

Model 6: Dört adet kare boşluk vardır.

Model 7: Plağın iç kısmına dağınık şekilde beş küçük boşluk yerleştirilmiştir.

Boşluklu ve Boşluksuz Modellerin Karşılaştırılması:

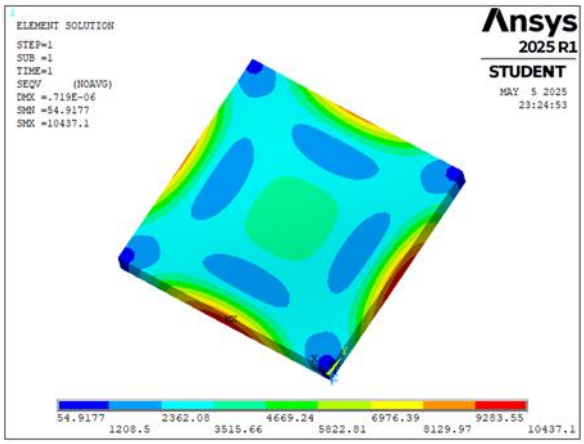
Boşluk içermeyen plak (Model 1), yük taşıma kapasitesi açısından daha rijit bir davranış göstermektedir. Buna karşın, boşluk içeren modellerde (Model 2–7), hem gerilme yığılması hem de şekil değiştirme miktarlarında artış gözlemlenmiştir. Bu tür yapılar aynı zamanda titreşim modları açısından da farklılık gösterebilir.

Bu nedenle, boşlukların hem konumu hem de boyutu dikkatli biçimde analiz edilmiştir.

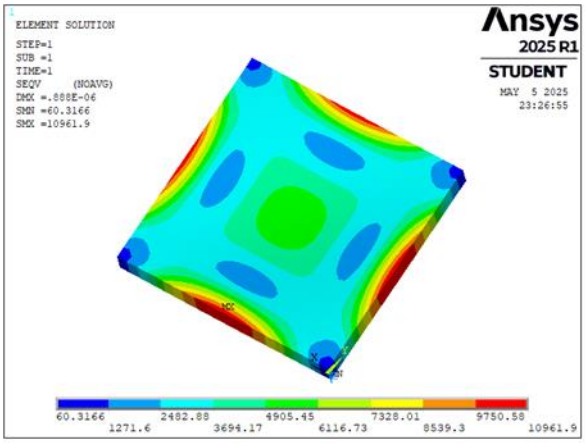
Her modelde kullanılan sonlu eleman ağı (mesh), modelin geometrik karmaşıklığına göre özelleştirilmiştir. Özellikle boşluklu modellerde daha doğru sonuçlar elde edebilmek için ağ yoğunluğu artırılmış, kenar bölgelerinde inceleme hassasiyeti yükseltilmiştir.

3.27. Gerilme Analizi

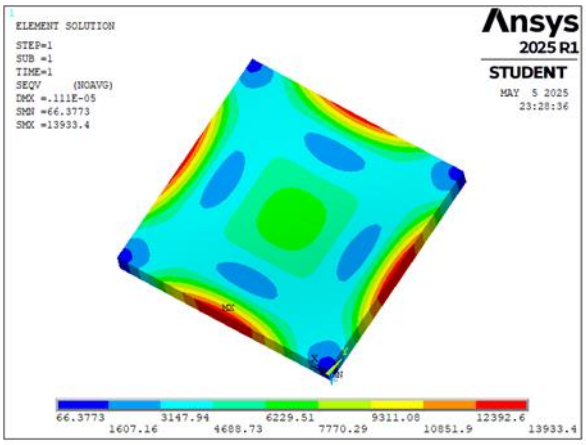
Plak boyunca gerilme dağılımlarının daha iyi bir şekilde yorumlayabilmek ve plağın gerilme davranışını görselleştirebilmesi amacıyla CCCC mesnetli plak için von-Mises gerilme grafikleri şekil (34-37)'de verilmiştir. Bu grafiklerde en büyük gerilme kırmızı ve en düşük gerilme ise mavi renk ile gösterilmiştir.



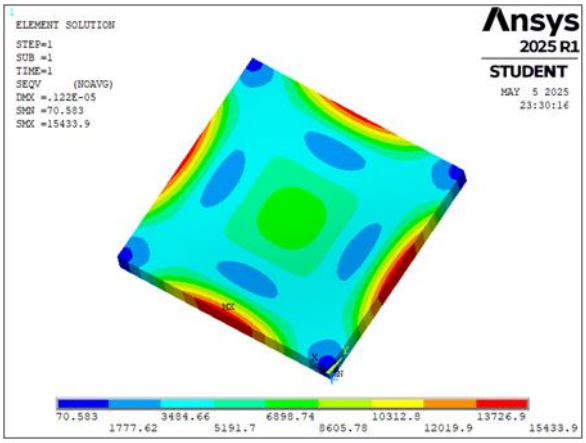
Şekil 34. 1-2-1 katman dizilimi ve $p = 1$ için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)



Şekil 35. 1-2-1 katman dizilimi ve $p = 2$ için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)



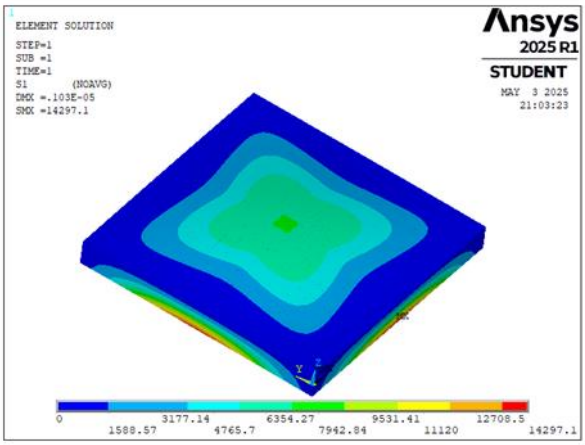
Şekil 36. 1-2-1 katman dizilimi ve $p = 5$ için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)



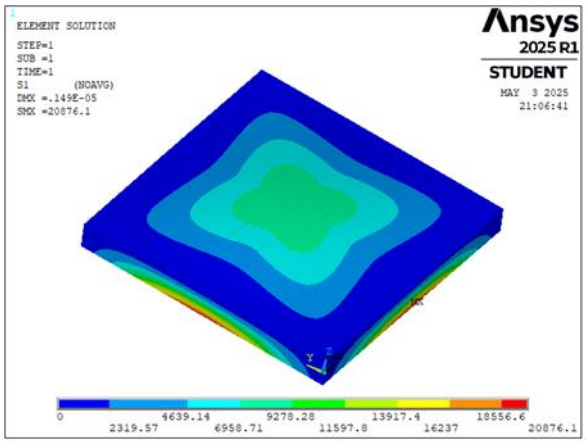
Şekil 37. 1-2-1 katman dizilimi ve $p = 10$ için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)

Şekil (34-37) incelendiğinde tüm malzeme katsayıları için en büyük von-mises gerilmelerinin mesnetlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, p değeri arttıkça von-Mises gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.

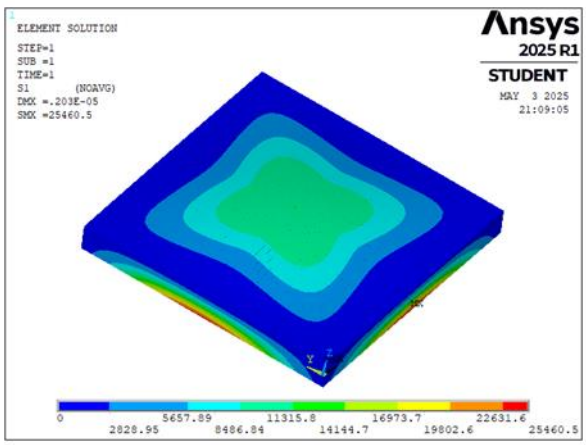
Plaktaki gerilme dağılımını daha net analiz edebilmek ve plağın genel gerilme davranışını görsel olarak inceleyebilmek amacıyla, CCCC mesnet koşuluna plak için birinci asal gerilme grafikleri Şekil (38-41)'de sunulmuştur.



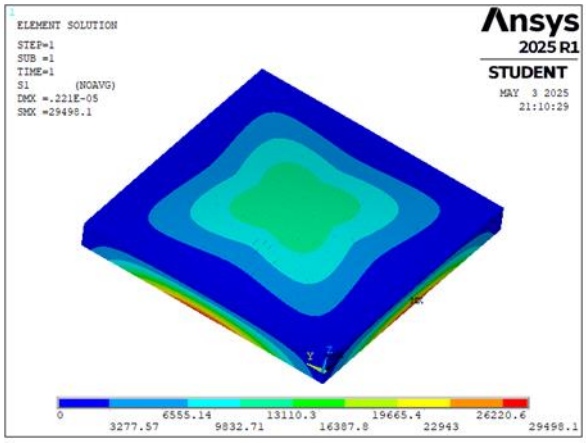
Şekil 38. 1-0-1 katman dizilimi ve $p = 1$ için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)



Şekil 39. 1-0-1 katman dizilimi ve $p = 2$ için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)



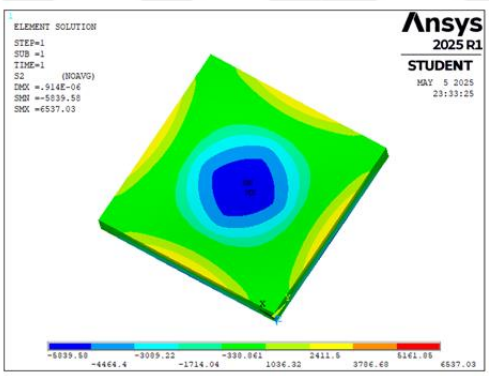
Şekil 40. 1-0-1 katman dizilimi ve $p = 5$ için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)



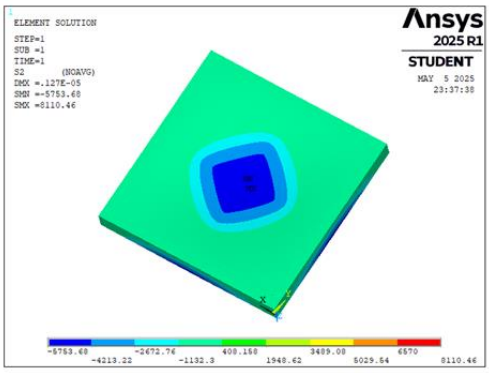
Şekil 41. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 10 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)

Şekil (38-41) incelendiğinde tüm malzeme katsayıları için en büyük birinci asal gerilmelerinin mesnetlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, p değeri arttıkça birinci asal gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.

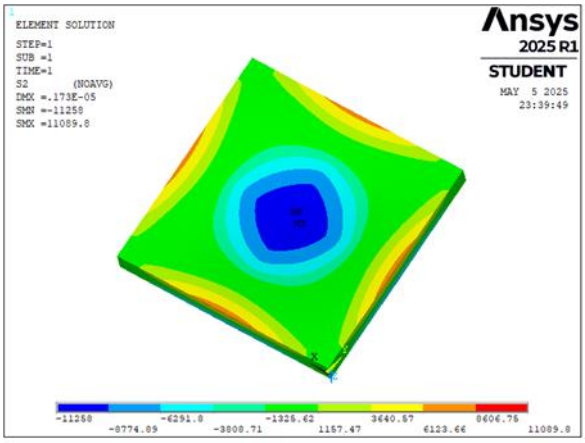
Plaktaki gerilme dağılımını daha net analiz edebilmek ve plağın genel gerilme davranışını görsel olarak inceleyebilmek amacıyla, CCCC mesnet koşuluna plak için ikinci asal gerilme grafikleri Şekil (42-45)'te sunulmuştur.



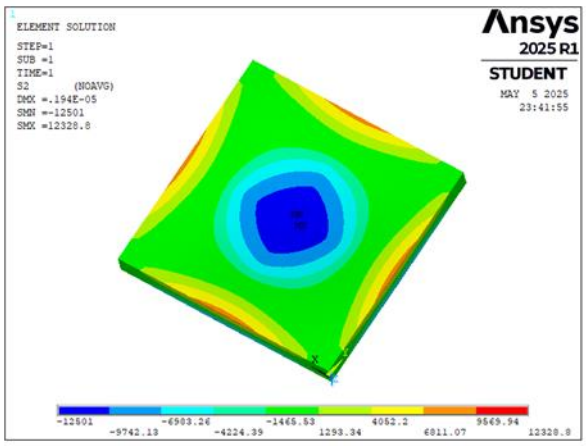
Şekil 42. 2-1-2 katman dizilimi ve p = 1 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)



Şekil 43. 2-1-2 katman dizilimi ve p = 2 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)



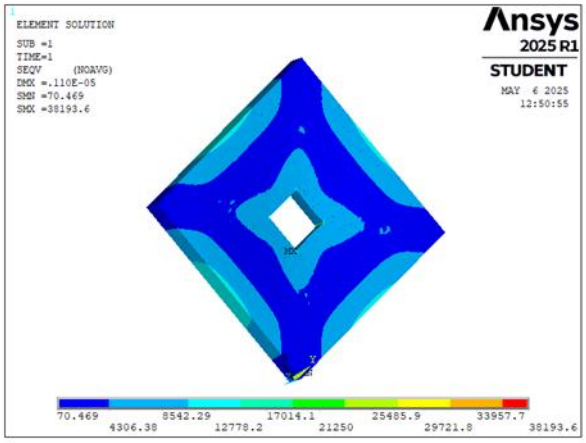
Şekil 44. 2-1-2 katman dizilimi ve p = 5 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)



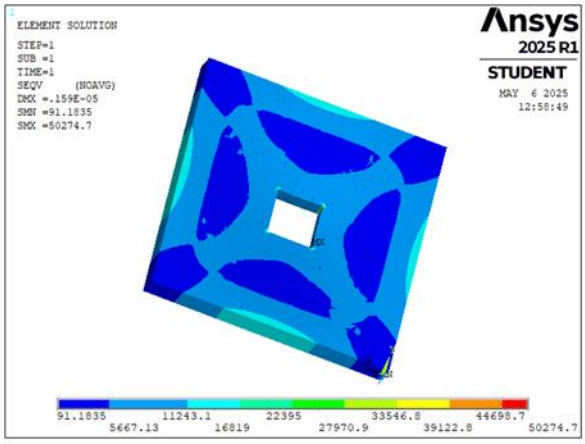
Şekil 45. 2-1-2 katman dizilimi ve p = 10 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)

Şekil (42-45) incelendiğinde tüm malzeme katsayıları için en büyük ikinci asal gerilmelerinin mesnetlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, p değeri arttıkça ikinci asal gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.

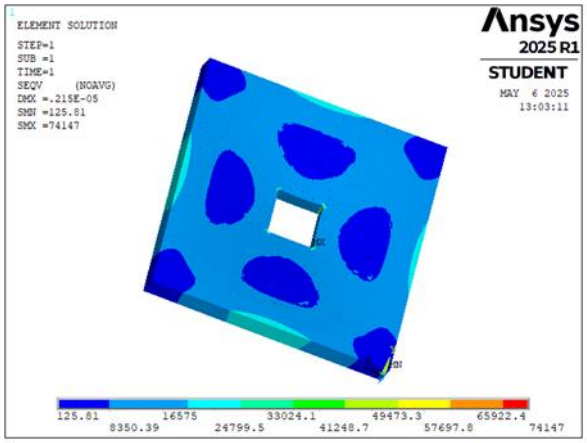
Gerilme dağılımlarını detaylı şekilde değerlendirmek ve plağın mekanik tepkisini daha iyi görselleştirmek için, CCCC kenar şartlarına sahip model 1 boşluk (2x2) plak için von-Mises gerilme değerleri grafiksel olarak Şekil (46-48)'de gösterilmiştir.



Şekil 46. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)



Şekil 47. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)

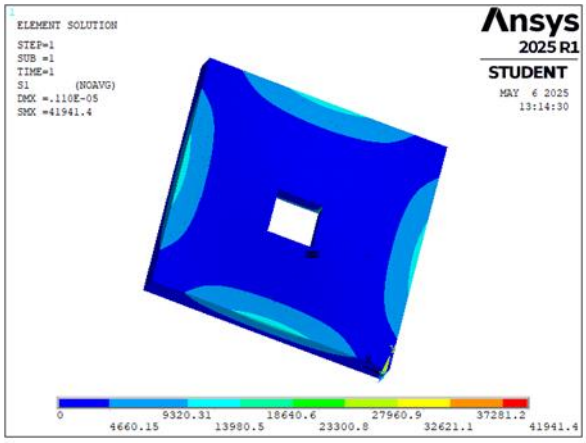


Şekil 48. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)

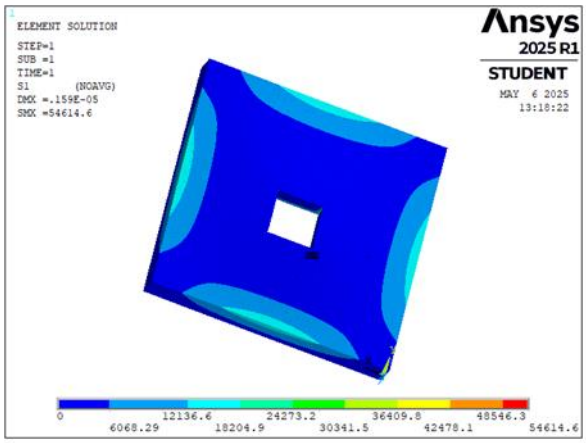
Şekil (46-48) incelendiğinde tüm malzeme katsayıları için en büyük von-mises gerilmelerinin mesnetlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, p değeri arttıkça von-Mises gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.

Gerilme dağılımlarını detaylı şekilde değerlendirmek ve plağın mekanik tepkisini daha iyi görselleştirmek için, CCCC kenar şartlarına sahip model 1 boşluk

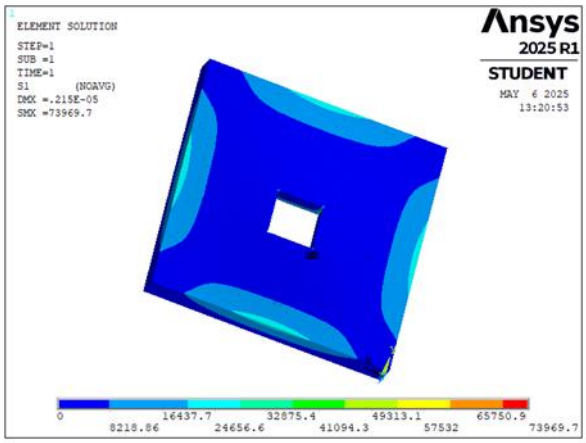
(2x2) plak için birinci asal gerilme değerleri grafiksel olarak Şekil (49-51)'de gösterilmiştir.



Şekil 49. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)



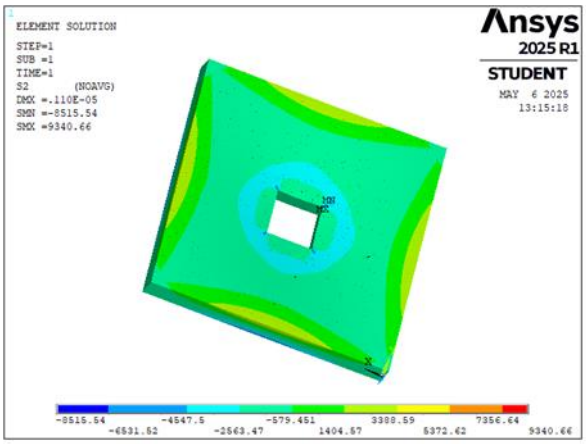
Şekil 50. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)



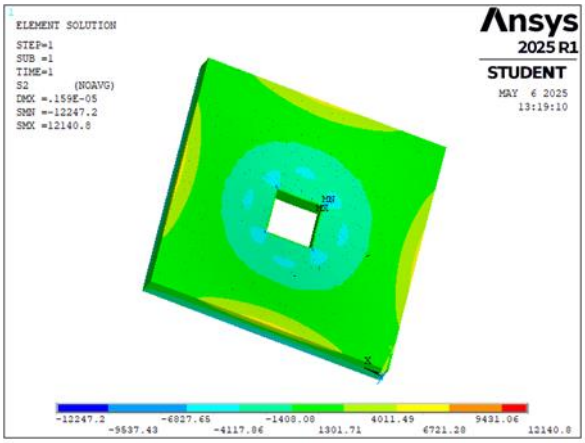
Şekil 51. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)

Şekil (49-51) incelendiğinde tüm malzeme katsayıları için en büyük için birinci gerilmelerinin mesnetlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, p değeri arttıkça için birinci gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.

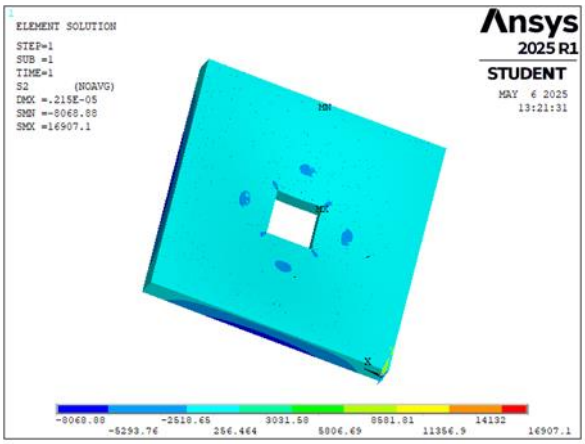
Gerilme dağılımlarını detaylı şekilde değerlendirmek ve plağın mekanik tepkisini daha iyi görselleştirmek için, CCCC kenar şartlarına sahip model 1 boşluk (2x2) plak için ikinci asal gerilme değerleri grafiksel olarak Şekil (52-54)'te gösterilmiştir.



Şekil 52. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)



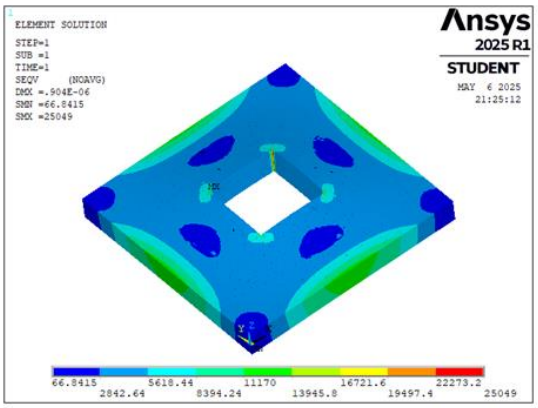
Şekil 53. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)



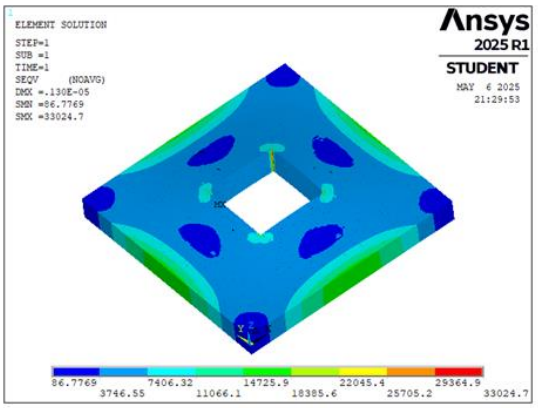
Şekil 54. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)

Şekil (52-54) incelendiğinde tüm malzeme katsayıları için en büyük için ikinci asal gerilmelerinin mesnetlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, p değeri arttıkça için ikinci asal gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.

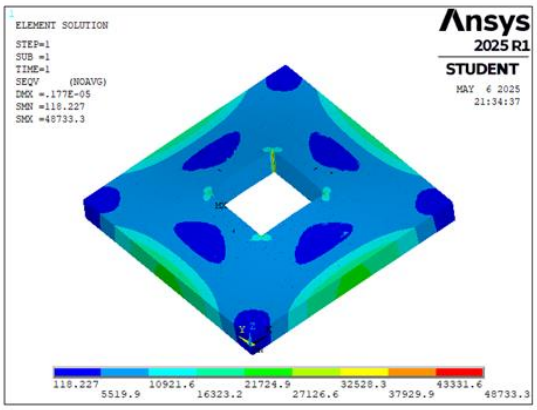
Model 2 (3x3 boşluklu) plağın CCCC kenar şartları altındaki gerilme davranışını daha ayrıntılı analiz edebilmek ve mekanik tepkisini görselleştirebilmek amacıyla, von-mises gerilme dağılımları Şekil (55-57)'de grafiksel olarak sunulmuştur.



Şekil 55. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)



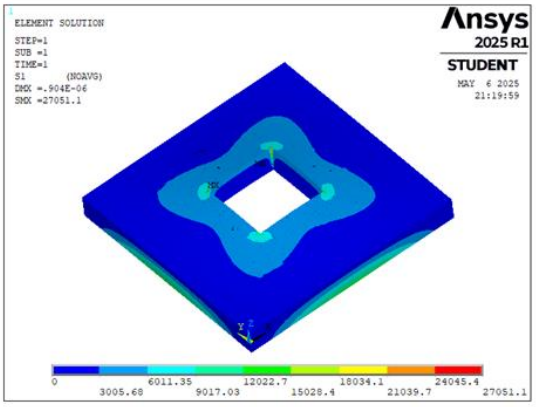
Şekil 56. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)



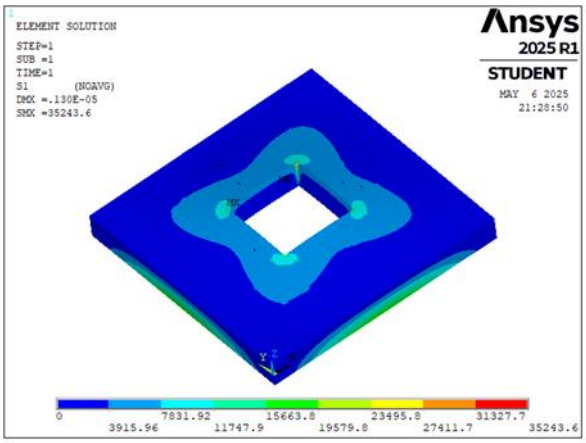
Şekil 57. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)

Şekil (55-57) incelendiğinde tüm malzeme katsayıları için en büyük için von-Mises gerilmelerinin mesnetlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, *p* değeri arttıkça için von-Mises gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.

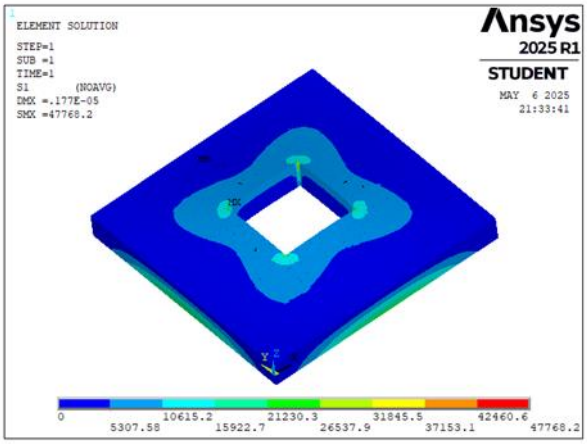
CCCC kenar koşullarına sahip ve 3x3 boşluklu model 2 plak için, birinci asal gerilme dağılımları detaylı bir şekilde incelenmiş ve bu değerlere ilişkin grafikler Şekil (58-60)'da gösterilmiştir.



Şekil 58. 1-0-1 katman dizilimi ve *p* = 1 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)



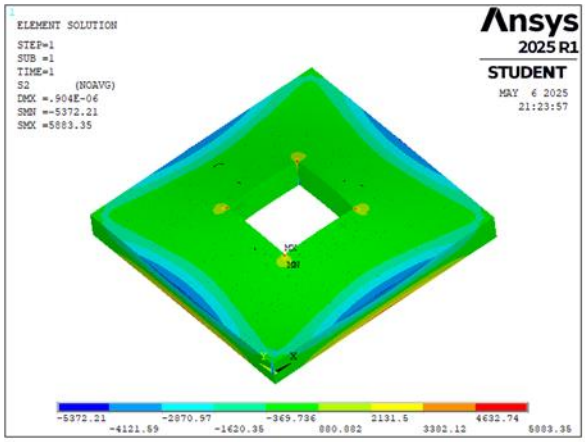
Şekil 59. 1-0-1 katman dizilimi ve *p* = 2 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)



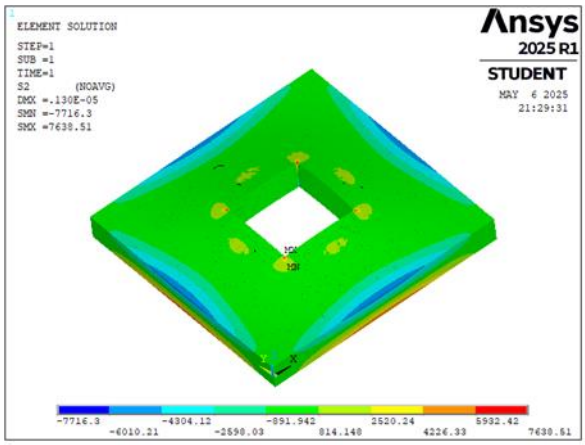
Şekil 60. 1-0-1 katman dizilimi ve *p* = 5 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)

Şekil (58-60) incelendiğinde tüm malzeme katsayıları için en büyük için birinci asal gerilmelerinin mesnetlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, *p* değeri arttıkça için birinci asal gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir. Kritik mühendislik yapıları tasarlanırken gerilme dağılımları önem arz etmektedir.

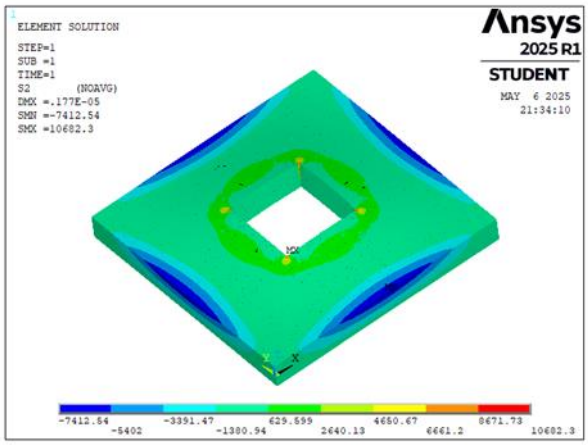
CCCC kenar koşullarına sahip ve 3x3 boşluklu model 2 plak için, ikinci asal gerilme dağılımları detaylı bir şekilde incelenmiş ve bu değerlere ilişkin grafikler Şekil (61-63)'te gösterilmiştir.



Şekil 61. 1-0-1 katman dizilimi ve *p* = 1 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)



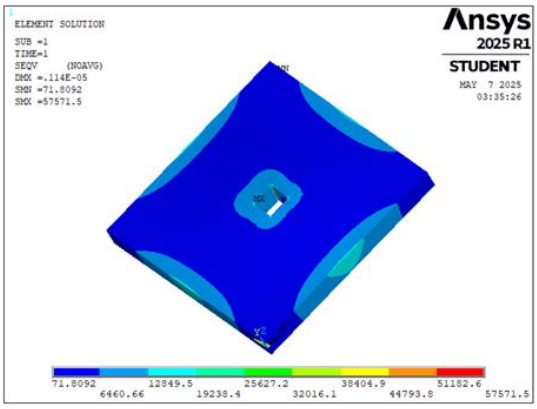
Şekil 62. 1-0-1 katman dizilimi ve *p* = 2 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)



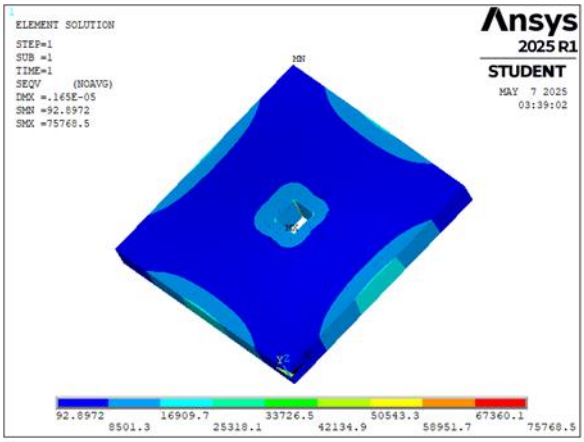
Şekil 63. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)

Şekil (61-63) incelendiğinde tüm malzeme katsayıları için en büyük için ikinci asal gerilmelerinin mesnetlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, p değeri arttıkça için ikinci asal gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.

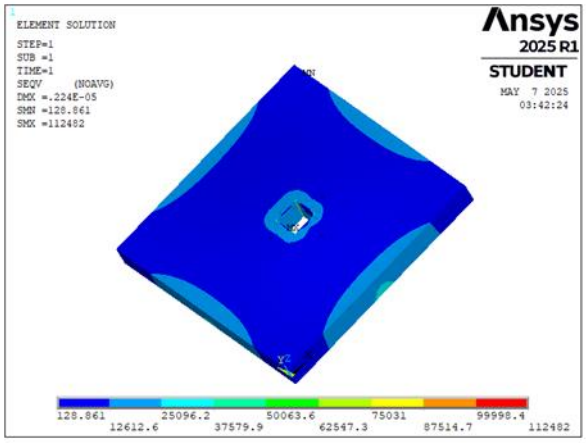
Gerilme dağılımlarının daha kapsamlı bir şekilde analiz edilebilmesi ve model 3 plağın yapısal davranışının görselleştirilebilmesi için, CCCC kenar koşullarına sahip 1x1 boşluklu yapı için von-Mises gerilme grafiklerine Şekil (64-66)'da yer verilmiştir.



Şekil 64. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)



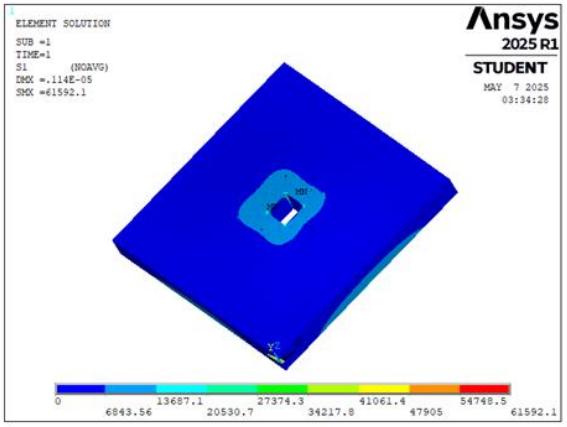
Şekil 65. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)



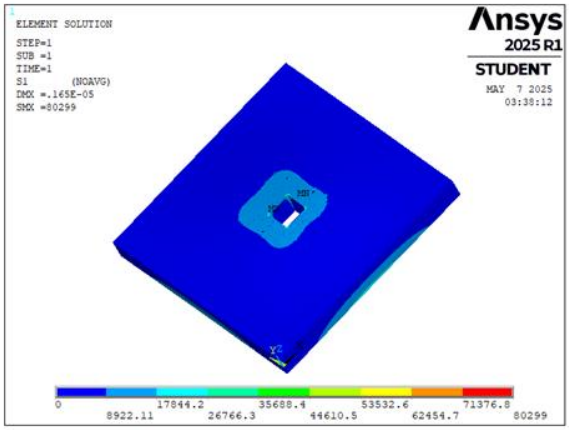
Şekil 66. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)

Şekil (64-66) incelendiğinde tüm malzeme katsayıları için en büyük için von-Mises gerilmelerinin mesnetlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, p değeri arttıkça için von-Mises gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.

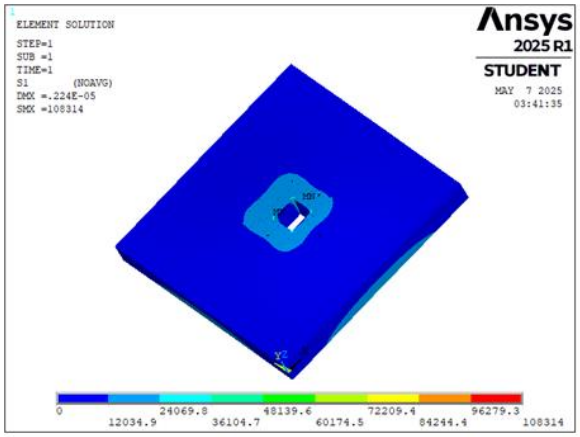
Gerilme dağılımlarının daha kapsamlı bir şekilde analiz edilebilmesi ve model 3 plağın yapısal davranışının görselleştirilebilmesi için, CCCC kenar koşullarına sahip 1x1 boşluklu yapı için birinci asal gerilme grafiklerine Şekil (67-69)'da yer verilmiştir.



Şekil 67. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)



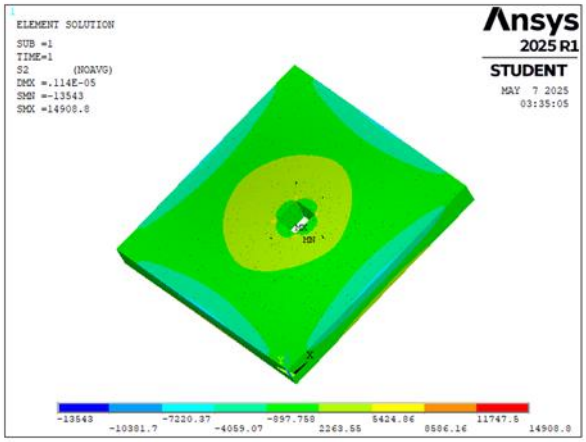
Şekil 68. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)



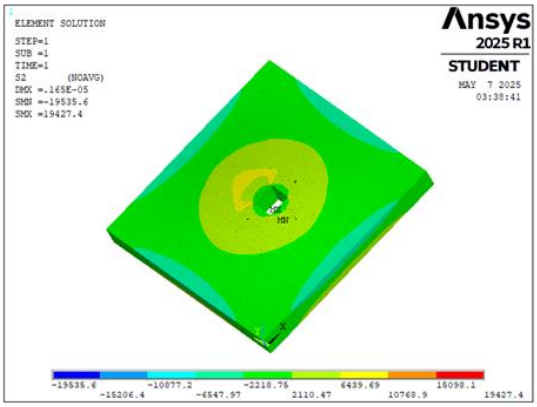
Şekil 69. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)

Şekil (67-69) incelendiğinde tüm malzeme katsayıları için en büyük için birinci asal gerilmelerinin mesnetlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, p değeri arttıkça için birinci asal gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.

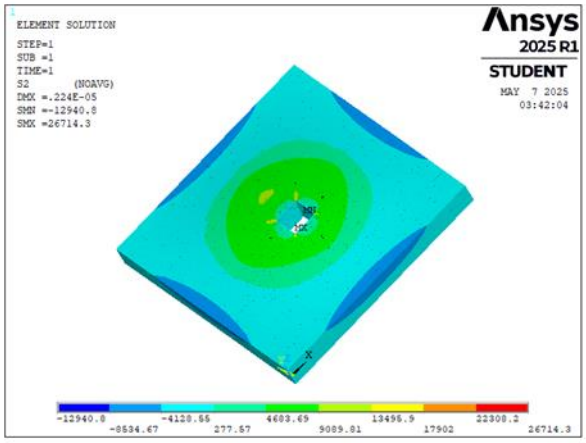
Plağın mekanik tepkisini daha iyi anlayabilmek ve gerilme dağılımını detaylandırmak amacıyla, CCCC mesnetli 1x1 boşluklu model 3 plak için ikinci asal gerilme sonuçları Şekil (70-72)'de gösterilmiştir.



Şekil 70. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)



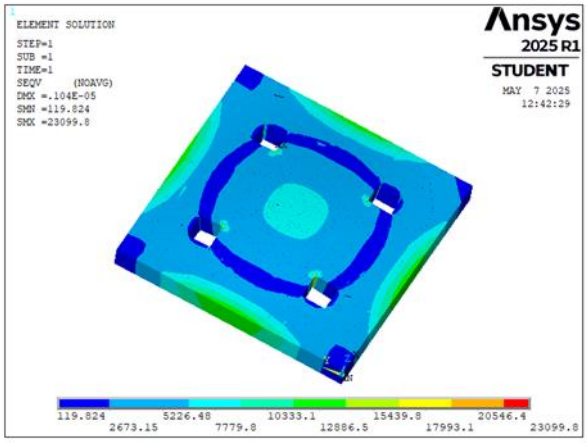
Şekil 71. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)



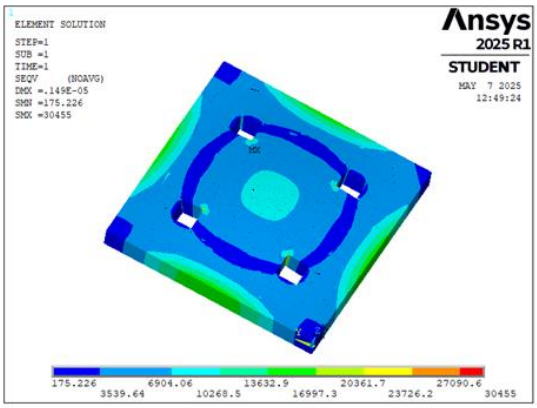
Şekil 72. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)

Şekil (70-72) incelendiğinde tüm malzeme katsayıları için en büyük için ikinci asal gerilmelerinin mesnetlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, p değeri arttıkça için ikinci asal gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.

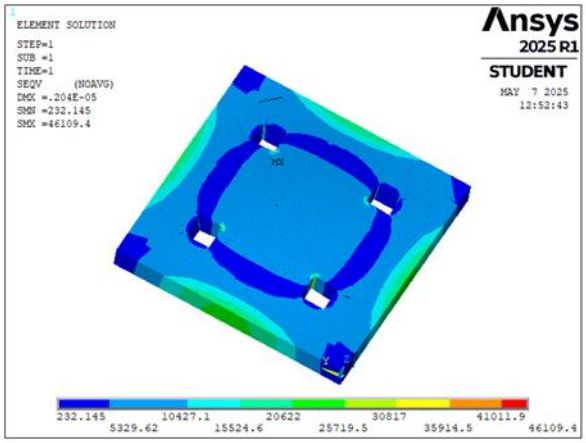
Model 4'ün yapısal tepkisini görselleştirmek ve gerilme dağılımlarını daha ayrıntılı analiz edebilmek amacıyla, CCCC kenar şartlarına sahip boşluklu plak için von-Mises gerilme grafiklerine Şekil (73-75)'ta yer verilmiştir.



Şekil 73. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)



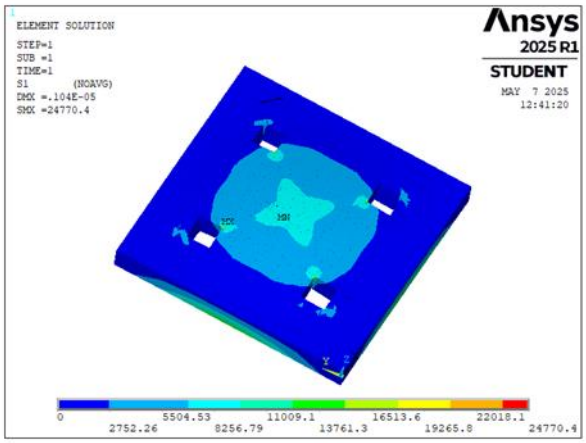
Şekil 74. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)



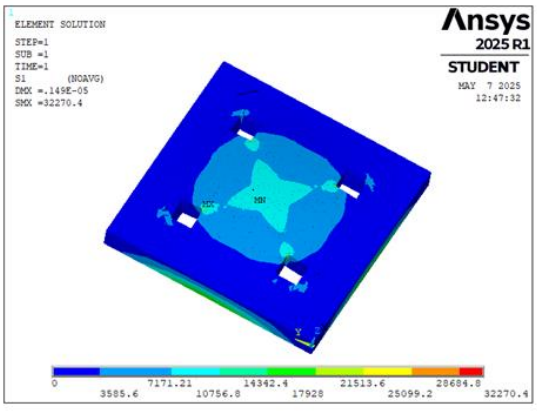
Şekil 75. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)

Şekil (73-75) incelendiğinde tüm malzeme katsayıları için en büyük için von-Mises gerilmelerinin mesnetlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, p değeri arttıkça için von-Mises gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.

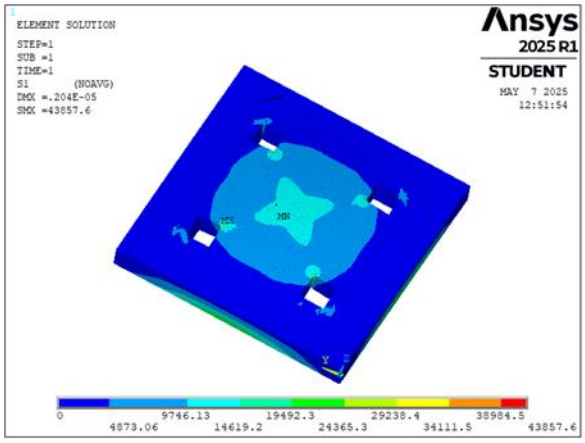
CCCC kenar koşulları altındaki boşluklu model 4 plağın gerilme davranışını daha iyi anlamak ve yapısal özelliklerini görsel olarak incelemek amacıyla, birinci asal gerilme dağılımları Şekil (76-78)'de sunulmuştur.



Şekil 76. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)



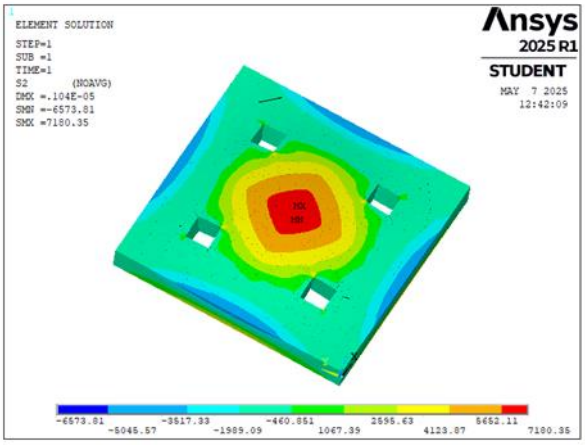
Şekil 77. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)



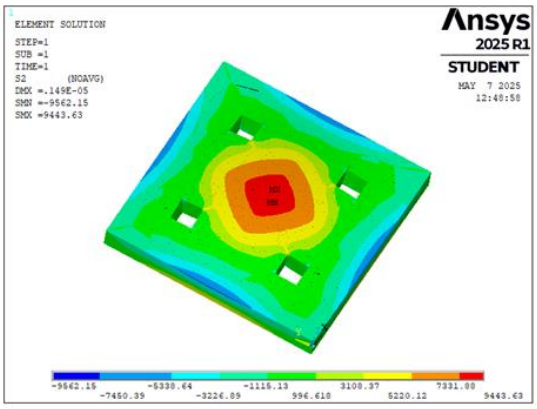
Şekil 78. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)

Şekil (76-78) incelendiğinde tüm malzeme katsayıları için en büyük için birinci asal gerilmelerinin mesnetlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, p değeri arttıkça için birinci asal gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.

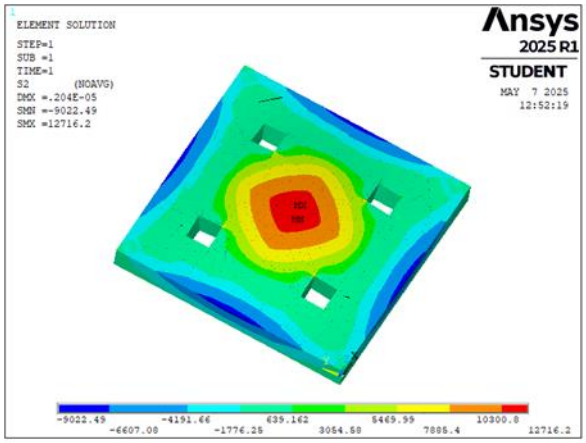
CCCC kenar koşulları altındaki boşluklu model 4 plağın gerilme davranışını daha iyi anlamak ve yapısal özelliklerini görsel olarak incelemek amacıyla, ikinci asal gerilme dağılımları Şekil (79-81)'de sunulmuştur.



Şekil 79. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)



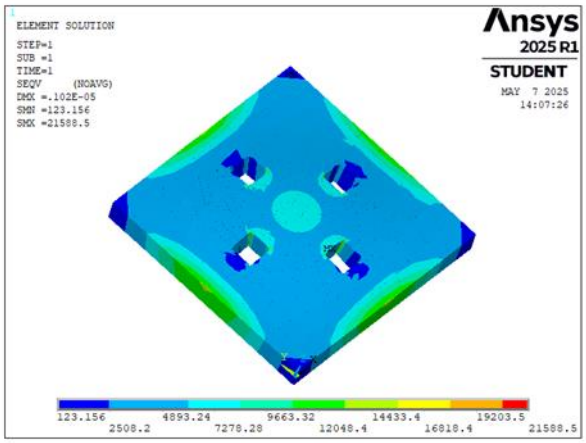
Şekil 80. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)



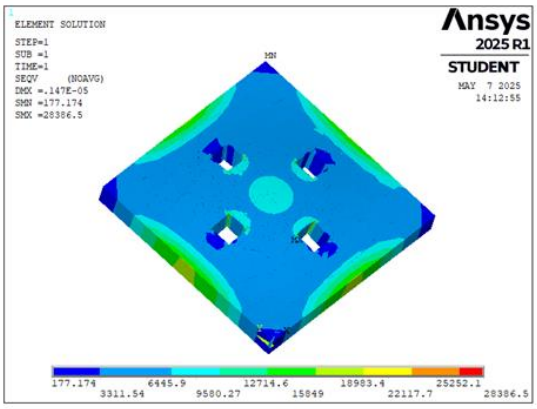
Şekil 81. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)

Şekil (79-81) incelendiğinde tüm malzeme katsayıları için en büyük için ikinci asal gerilmelerinin mesnetlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, p değeri arttıkça için ikinci asal gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.

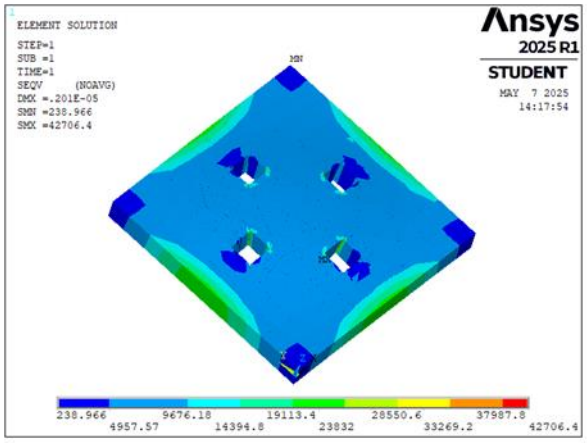
Boşluklu model 5 plağın CCCC kenar şartları altındaki gerilme tepkisini daha iyi analiz edebilmek ve yapısal davranışını görselleştirmek amacıyla, von-Mises gerilme dağılımları Şekil (82-84)'ta verilmiştir.



Şekil 82. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)



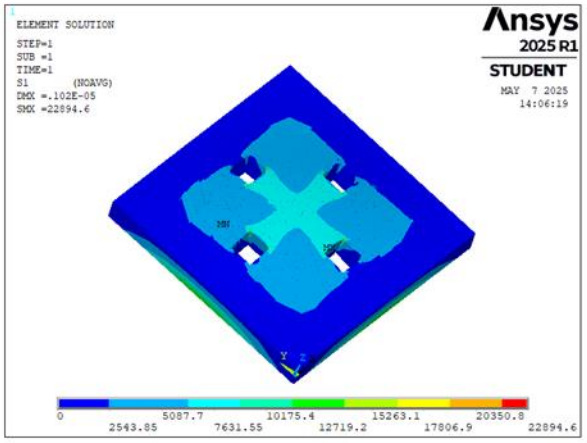
Şekil 83. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)



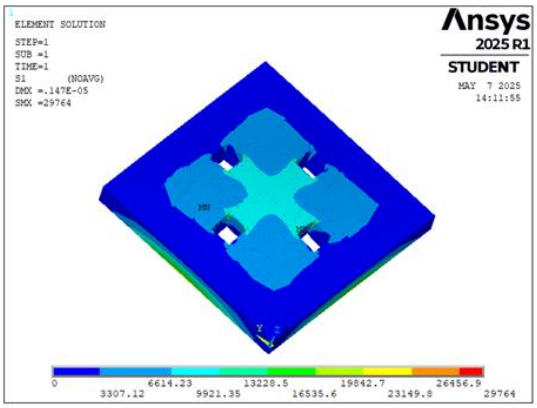
Şekil 84. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)

Şekil (82-84) incelendiğinde tüm malzeme katsayıları için en büyük için von-Mises gerilmelerinin mesnetlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, p değeri arttıkça için von-Mises gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.

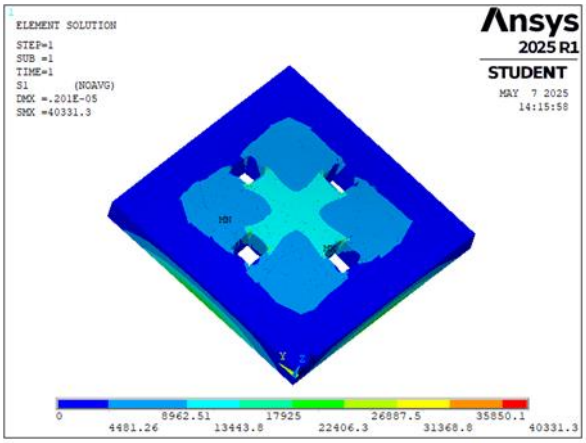
Model 5 (boşluklu) plağın yapısal özelliklerini ortaya koymak ve CCCC sınır koşulları altındaki gerilme davranışını detaylı şekilde incelemek için, birinci asal gerilme grafiklerine Şekil (85-87)'da yer verilmiştir



Şekil 85. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)



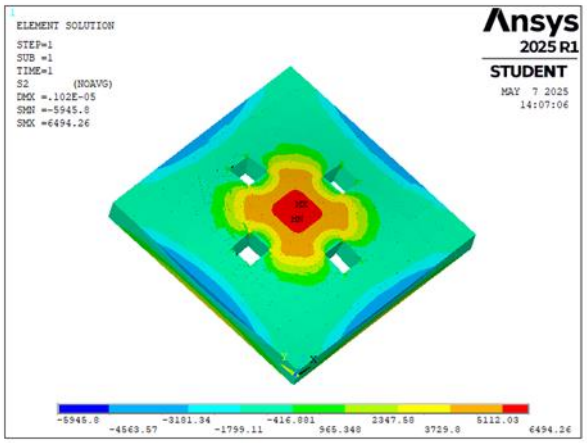
Şekil 86. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)



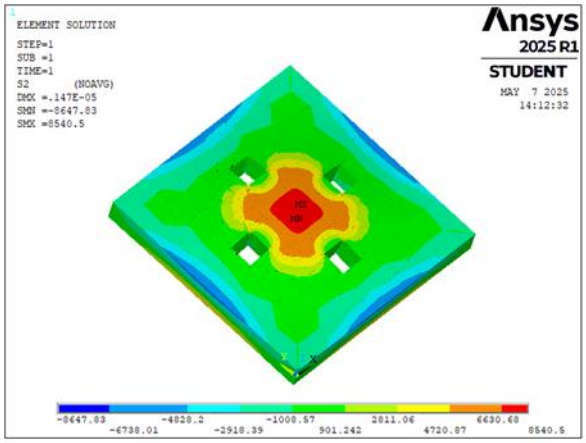
Şekil 87. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)

Şekil (85-87) incelendiğinde tüm malzeme katsayıları için en büyük için birinci asal gerilmelerinin mesnetlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, p değeri arttıkça için birinci asal gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.

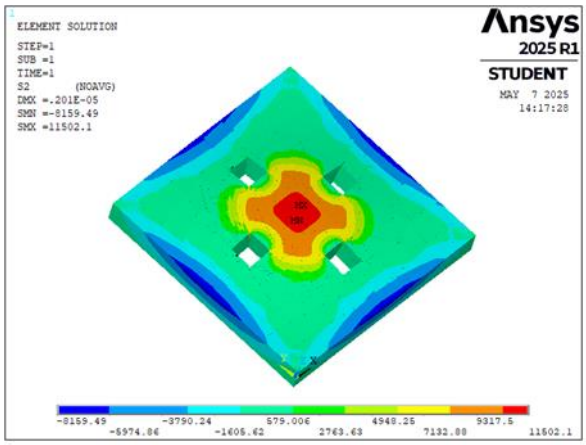
Model 5 (boşluklu) plağın yapısal özelliklerini ortaya koymak ve CCCC sınır koşulları altındaki gerilme davranışını detaylı şekilde incelemek için, ikinci asal gerilme grafiklerine Şekil (88-90)'da yer verilmiştir



Şekil 88. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)



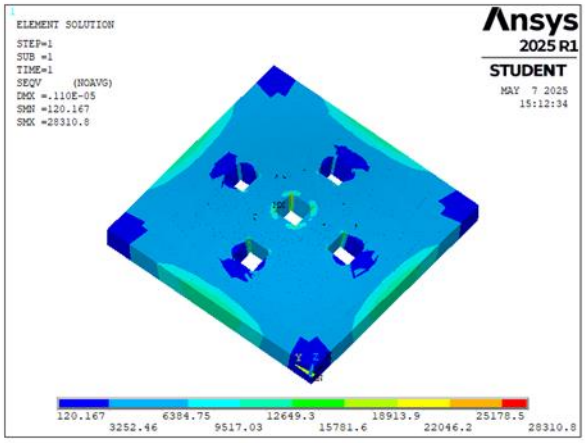
Şekil 89. 1-0-1 katman dizilimi ve $p = 2$ için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)



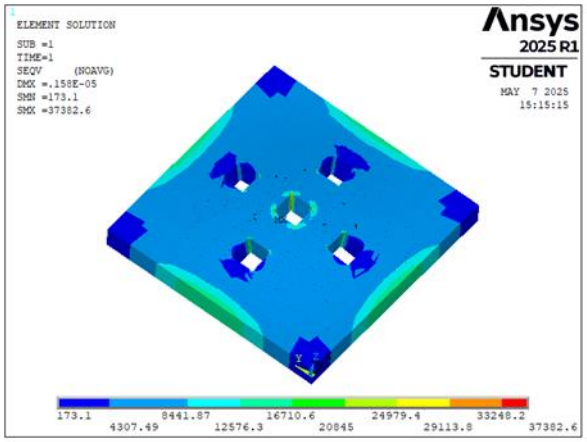
Şekil 90. 1-0-1 katman dizilimi ve $p = 5$ için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)

Şekil (88-90) incelendiğinde tüm malzeme katsayıları için en büyük için ikinci asal gerilmelerinin mesnetlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, p değeri arttıkça için ikinci asal gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.

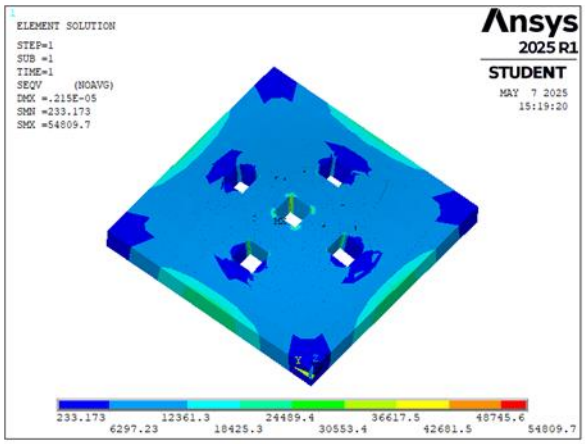
Model 6 (boşluklu) plağın CCCC kenar koşulları altındaki gerilme tepkisini ayrıntılı şekilde analiz etmek ve yapısal karakteristiklerini ortaya koymak amacıyla, von-Mises gerilme dağılımları Şekil (91-93)'te sunulmuştur.



Şekil 91. 1-0-1 katman dizilimi ve $p = 1$ için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)



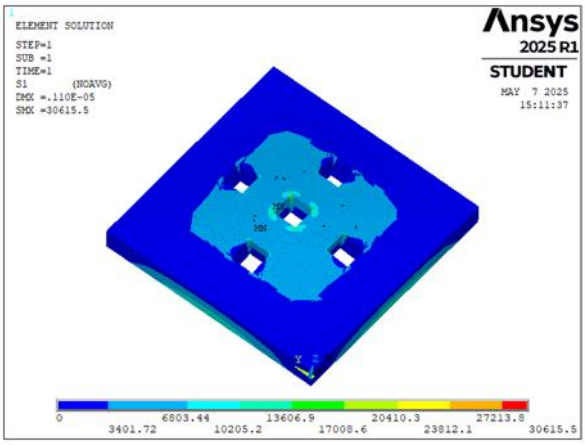
Şekil 92. 1-0-1 katman dizilimi ve $p = 2$ için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)



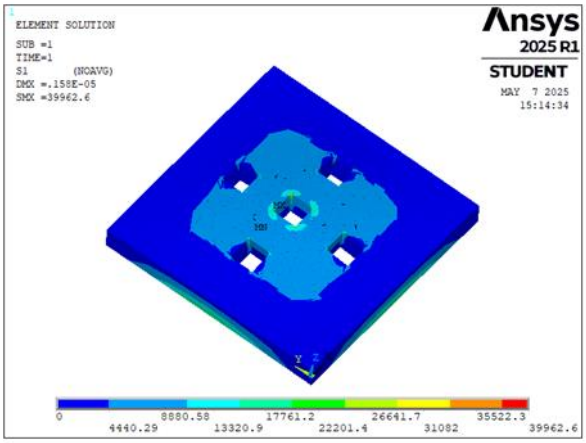
Şekil 93. 1-0-1 katman dizilimi ve $p = 5$ için von-Mises gerilme dağılımı (Pa)

Şekil (91-93) incelendiğinde tüm malzeme katsayıları için en büyük için von-Mises gerilmelerinin mesnetlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, p değeri arttıkça için von-Mises gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.

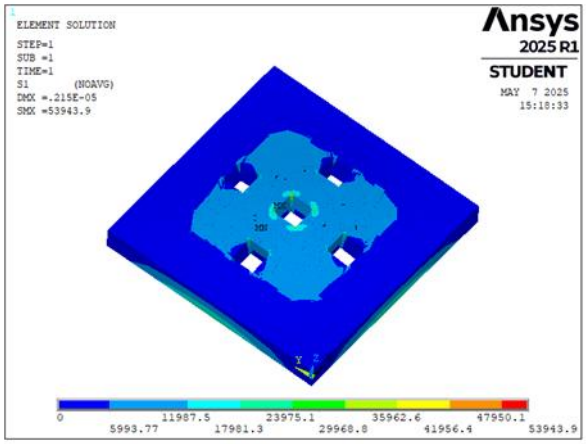
Model 6 (boşluklu) plağın CCCC kenar koşulları altındaki gerilme tepkisini ayrıntılı şekilde analiz etmek ve yapısal karakteristiklerini ortaya koymak amacıyla birinci asal gerilme dağılımları Şekil (94-96)'da sunulmuştur.



Şekil 94. 1-0-1 katman dizilimi ve $p = 1$ için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)



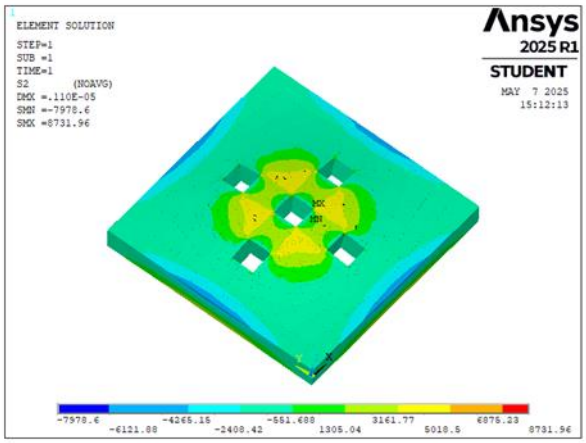
Şekil 95. 1-0-1 katman dizilimi ve $p = 2$ için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)



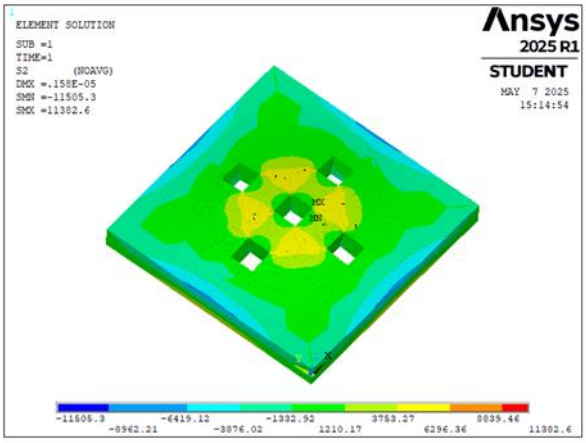
Şekil 96. 1-0-1 katman dizilimi ve $p = 5$ için birinci asal gerilme dağılımı (Pa)

Şekil (94-96) incelendiğinde tüm malzeme katsayıları için en büyük için birinci asal gerilmelerinin mesnetlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, p değeri arttıkça için birinci asal gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.

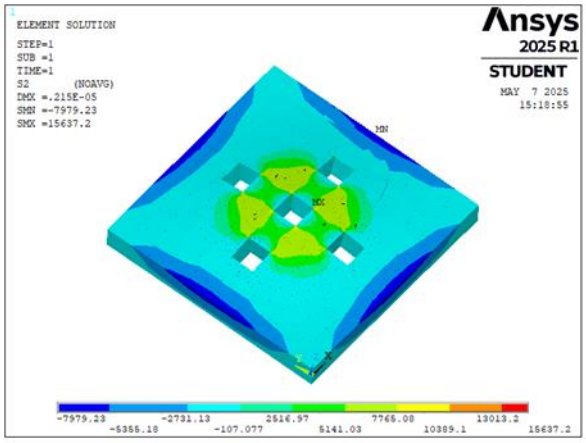
Model 6 (boşluklu) plağın CCCC kenar koşulları altındaki gerilme tepkisini ayrıntılı şekilde analiz etmek ve yapısal karakteristiklerini ortaya koymak amacıyla ikinci asal gerilme dağılımları Şekil (97-99)'de sunulmuştur.



Şekil 97. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 1 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)



Şekil 98. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 2 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)



Şekil 99. 1-0-1 katman dizilimi ve p = 5 için ikinci asal gerilme dağılımı (Pa)

Şekil (97-99) incelendiğinde tüm malzeme katsayıları için en büyük için ikinci asal gerilmelerinin mesnetlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, p değeri arttıkça için ikinci asal gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde farklı sınır şartları içi analiz edilen boşluklu ve boşluksuz FDM üretimli sandviç plakların eğilme davranışları sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılarak ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Amaç, farklı malzeme dağılım katsayıları ve sınır şartlarının, plakların yapısal tepkileri üzerindeki etkisini ortaya koymak ve boşlukların sistematik olarak deformasyon davranışına olan katkısını değerlendirmektir.

Tez kapsamında oluşturulan yedi ayrı modelde; boşluk durumu (var/yok), plak boyutları, FD malzeme değişim indeksi (*p* değeri), ve sınır şartları (CCCC, CCCF, CFCF vb.) dikkate alınarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, tablo ve grafiklerle görselleştirilmiş, sayısal doğruluk açısından hem model içi hem de model dışı karşılaştırmalar yapılmıştır.

Analiz sonuçlarına göre, boşluksuz plak modelleri, genel olarak daha yüksek rijitlik göstermektedir. Bu durum, plak gövdesinin tüm hacminin etkin şekilde yük taşıma kapasitesi sunmasından kaynaklanmaktadır. Buna karşın, boşluklu plaklar, malzeme tasarrufu ve ağırlık azaltımı gibi avantajlara sahip olmakla birlikte, deformasyon açısından daha zayıf bir performans sergilemektedir. Özellikle yüksek *p* değerlerinde, yani malzeme geçişinin daha belirgin olduğu durumlarda, eğilme davranışındaki fark daha da artmaktadır.

Çalışmada kullanılan CCCC sınır şartları, beklenildiği üzere en düşük çökme değerlerini üretmiş ve yapının en rijit davranış sergilediği durum olarak öne çıkmıştır. Diğer sınır koşulları ise daha fazla serbestlik sağladığı için deformasyon miktarını artırmıştır. Bu durum, mühendislik tasarımlarında sınır koşullarının ne kadar kritik bir rol oynadığını açıkça göstermektedir.

Ayrıca, malzeme geçiş katsayısı *p* arttıkça, yani yüzeyden çekirdeğe doğru malzeme geçişi daha keskin hale geldikçe, deformasyon değerlerinde belirgin bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. Bu da yüksek elastik modüle sahip malzemelerin yüzeyde daha yoğun bulunmasının, yapının genel dayanımını artırdığını ortaya koymaktadır.

Katman dizilimi açısından en büyük yer değiştirme değerleri 1-0-1'de ve en küçük yer değiştirme değerleri 1-2-1'de elde edilmiştir. İncelenen diğer dizilimlerden 2-1-2'nin sonuçları 1-2-1' yakın iken 2-2-1'in sonuçları ise 1-2-1 katman dizilimine yakın çıkmıştır.

Bu tezde elde edilen bulgular doğrultusunda aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

Mekanik performansın öncelikli olduğu uygulamalarda boşluksuz yapılar tercih edilmelidir. Boşluklu yapılar ağırlık azaltımı sağlasa da yüksek deformasyon riski taşıdıkları için özellikle taşıyıcı yapı elemanlarında sınırlı kullanılmalıdır.

Malzeme dağılımının tasarım sürecine entegre edilmesi gereklidir. FD malzeme özelliklerinin dikkatli planlanması, yüzeyde yüksek dayanım, çekirdekte ise esneklik gibi özelliklerin istenen seviyede elde edilmesini sağlar. Bu bağlamda, p katsayısının uygulama amacına göre optimize edilmesi önerilmektedir.

Sınır şartlarının seçiminde uygulama koşulları dikkate alınmalıdır.

İleri çalışmalar için zamana bağlı (dinamik) yükleme koşulları ve sıcaklık değişimlerinin etkisi araştırılmalıdır. Bu tezde yalnızca statik yükleme altında analiz yapılmış olup, gerçek kullanım koşullarında karşılaşılan yük çeşitliliği daha kompleks davranışlara neden olabilir.

Deneysel doğrulamalar gerçekleştirilmelidir. Sayısal analizlerin doğruluğunu artırmak amacıyla, benzer plak modelleri laboratuvar ortamında üretilip test edilerek SEY analiz sonuçları ile karşılaştırılabilir.

FDM üretim teknolojisinin sınırları gözetilerek tasarım yapılmalıdır. Üretimde oluşabilecek katman hataları veya delaminasyon riski gibi problemler, analizlerde hesaba katılmamış olabileceğinden, üretim sonrası kontrollerle desteklenmelidir.

Bu tez, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin yapı mühendisliği alanındaki uygulamalarına katkı sağlamakta ve özellikle sandviç yapıların tasarımında dikkate alınması gereken çok sayıda değişkeni detaylı şekilde ortaya koymaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalar, bu tezin sunduğu bulgular üzerinden geliştirilebilir ve özellikle hafif, dayanıklı ve optimize edilmiş yapıların tasarımına yönelik yeni yaklaşımların önünü açabilir.

KAYNAKÇA

Abdelaziz, H. H., Atmane, H. A., Mechab, I., Boumia, L., Tounsi, A., ve El Abbas, A. B. (2011). Static analysis of functionally graded sandwich plates using an efficient and simple refined theory. *Chinese journal of aeronautics*, 24(4), 434-448.

Adhikari, B., Dash, P., ve Singh, B. N. (2020). Buckling analysis of porous FGM sandwich plates under various types nonuniform edge compression based on higher order shear deformation theory. *Composite Structures*, *251*, 112597.

Al-ıtbı, S. K., ve Noori, A. R. (2022). Finite element analysis for the static response of functionally graded porous sandwich beams. *International Journal of Engineering Technologies IJET*, *8*(1), 13-20.

Al-ıtbı, S. K., ve Noori, A. R. (2022). Influence of porosity on the free vibration response of sandwich functionally graded porous beams. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, *7*(4), 291-301.

ANSYS, Inc. (2013). *ANSYS Release 15.0*. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc.

Arefi, M. (2017). Buckling analysis of the functionally graded sandwich rectangular plates integrated with piezoelectric layers under bi-axial loads. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, *19*(6), 712-735.

Aslan, T. A., Noori, A. R., ve Temel, B. (2023, December). An efficient approach for free vibration analysis of functionally graded sandwich beams of variable cross-section. In *Structures* (Vol. 58, p. 105397). Elsevier.

Badiey, M., ve Kouchakzadeh, M. A. (2010). Buckling of a functionally graded plate (FGP) under shear and in-plane directional loading. *coordinates*, *2*, 2.

Bian, Z. G., Chen, W. Q., Lim, C. W., ve Zhang, N. (2005). Analytical solutions for single-and multi-span functionally graded plates in cylindrical bending. *International Journal of Solids and Structures*, *42*(24-25), 6433-6456.

Chen, C. S. (2005). Nonlinear vibration of a shear deformable functionally graded plate. *Composite Structures*, *68*(3), 295-302.

Daikh, A. A., Belarbi, M. O., Ahmed, D., Houari, M. S. A., Avcar, M., Tounsi, A., & Eltaher, M. A. (2023). Static analysis of functionally graded plate structures resting on variable elastic foundation under various boundary conditions. *Acta Mechanica*, *234*(2), 775-806.

Doori, S. G. M., ve Noori, A. R. (2025). Transient analysis of functionally graded axisymmetric plates via finite element method in the Laplace domain. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, *53*(5), 3369-3395.

Doori, S. G. M., Noori, A. R., ve Etemadi, A. (2024). Static response of functionally graded porous circular plates via finite element method. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *49*(10), 14167-14181.

Fazzolari, F. A. (2016). Stability analysis of FGM sandwich plates by using variable-kinematics Ritz models. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 23(9), 1104-1113.

Fazzolari, F. A., ve Carrera, E. (2014). Thermal stability of FGM sandwich plates under various through-the-thickness temperature distributions. *Journal of Thermal Stresses*, *37*(12), 1449-1481.

Hadji, L., Atmane, H. A., Tounsi, A., Mechab, I., ve Adda Bedia, E. A. (2011). Free vibration of functionally graded sandwich plates using four-variable refined plate theory. *Applied Mathematics and Mechanics*, *32*, 925-942.

Hassan, A. H. A., ve Kurgan, N. (2019). Modeling and buckling analysis of rectangular plates in ansys. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, *11*(1), 310-329.

Hu, Z., Zhou, K., ve Chen, Y. (2020). Sound radiation analysis of functionally graded porous plates with arbitrary boundary conditions and resting on elastic foundation. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, *20*(05), 2050068.

Katiyar, V., ve Gupta, A. (2023). Vibration response of a geometrically discontinuous bi-directional functionally graded plate resting on elastic foundations in thermal environment with initial imperfections. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, *51*(6), 3480-3508.

Khorshidvand, A. R., ve Damercheloo, A. R. (2023). Bending, axial buckling and shear buckling analyses of FG-porous plates based on a refined plate theory. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, *21*(2), 705-724.

Kiani, Y., Bagherizadeh, E., ve Eslami, M. R. (2011). Thermal buckling of clamped thin rectangular FGM plates resting on Pasternak elastic foundation (Three approximate analytical solutions). *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, *91*(7), 581-593.

Kumar, V., Singh, S. J., Saran, V. H., ve Harsha, S. P. (2020). An analytical framework for rectangular FGM tapered plate resting on the elastic foundation. *Materials Today: Proceedings*, *28*, 1719-1726.

Liu, J., Deng, X., Wang, Q., Zhong, R., Xiong, R., ve Zhao, J. (2020). A unified modeling method for dynamic analysis of GPL-reinforced FGP plate resting on Winkler-Pasternak foundation with elastic boundary conditions. *Composite Structures*, *244*, 112217.

Mehrparvar, M., ve Ghannadpour, S. A. M. (2018). Plate assembly technique for nonlinear analysis of relatively thick functionally graded plates containing

rectangular holes subjected to in-plane compressive load. *Composite Structures*, *202*, 867-880.

Meksi, R., Benyoucef, S., Mahmoudi, A., Tounsi, A., Adda Bedia, E. A., ve Mahmoud, S. R. (2019). An analytical solution for bending, buckling and vibration responses of FGM sandwich plates. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, *21*(2), 727-757.

Mezher, N. A. M., Noorı, A. R., ve Ertürkmen, D. (2023). Influence of the web opening shapes on the bending and free vibration responses of castellated steel beams. *International Journal of Engineering Technologies IJET*, 8(2), 83-100.

Naghavi, M., Sarrami-Foroushani, S., ve Azhari, F. (2022). Bending analysis of functionally graded sandwich plates using the refined finite strip method. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, *24*(1), 448-483.

Natarajan, S., ve Manickam, G. (2012). Bending and vibration of functionally graded material sandwich plates using an accurate theory. *Finite Elements in Analysis and Design*, *57*, 32-42.

Nguyen, L. B., Nguyen, N. V., Thai, C. H., Ferreira, A. M. J., ve Nguyen-Xuan, H. (2019). An isogeometric Bézier finite element analysis for piezoelectric FG porous plates reinforced by graphene platelets. *Composite Structures*, *214*, 227-245.

Noori, M., Bilgin, A., Diallo, H., Al Rousan, M. O., ve Noori, A. R. (2024). A study on the influence of material gradient index on bending and stress responses of FGM rectangular plates using the Finite Element Method. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, *9*(3), 239-254.

Nourmohammadi, H., ve Behjat, B. (2019). Geometrically nonlinear analysis of functionally graded piezoelectric plate using mesh-free RPIM. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, *99*, 131-141.

Qin, B., Wang, Q., Zhong, R., Zhao, X., ve Shuai, C. (2020). A three-dimensional solution for free vibration of FGP-GPLRC cylindrical shells resting on elastic foundations: a comparative and parametric study. *International Journal of Mechanical Sciences*, *187*, 105896.

Raki, M., Alipour, R., ve Kamanbedast, A. (2012). Thermal buckling of thin rectangular FGM plate. *World Applied Sciences Journal*, *16*(1), 52-62.

Reddy, J. (2006). Mechanics of advanced materials and structures. *Mech Adv Mater Struct*, *13*, 443-455.

Shen, H. S., ve Li, S. R. (2008). Postbuckling of sandwich plates with FGM face sheets and temperature-dependent properties. *Composites Part B: Engineering*, *39*(2), 332-344.

Singh, S. A., ve Harsha, S. P. (2020). Thermo-mechanical analysis of porous sandwich S-FGM plate for different boundary conditions using Galerkin Vlasov's method: a semi-analytical approach. *Thin-Walled Structures*, *150*, 106668.

Singh, S. J., ve Harsha, S. P. (2020). Thermal buckling of porous symmetric and non-symmetric sandwich plate with homogenous core and S-FGM face sheets resting on Pasternak foundation. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, *16*(4), 707-731.

Singh, S. J., Nataraj, C., ve Harsha, S. P. (2021). Nonlinear dynamic analysis of a sandwich plate with S-FGM face sheets and homogeneous core subjected to harmonic excitation. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, *23*(6), 1831-1869.

Slimane, M., Adda, H. M., Mohamed, M., Hakima, B., voira, H., ve Sabrina, B. (2020). Effects of even pores distribution of functionally graded plate porous rectangular and square. *Procedia Structural Integrity*, *26*, 35-45.

Thai, H. T., Nguyen, T. K., Vo, T. P., ve Lee, J. (2014). Analysis of functionally graded sandwich plates using a new first-order shear deformation theory. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, *45*, 211-225.

Temel, B., ve Noori, A. R. (2020). A unified solution for the vibration analysis of two-directional functionally graded axisymmetric Mindlin–Reissner plates with variable thickness. *International Journal of Mechanical Sciences*, *174*, 105471.

Ton, L. H. T. (2024). The critical load of functionally graded porous plate with linear variable thickness lay on pasternak foundation. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, *22*(4), 127-130.

Van Do, V. N., ve Lee, C. H. (2017). Thermal buckling analyses of FGM sandwich plates using the improved radial point interpolation mesh-free method. *Composite Structures*, *177*, 171-186.

Wang, Z. X., ve Shen, H. S. (2013). Nonlinear dynamic response of sandwich plates with FGM face sheets resting on elastic foundations in thermal environments. *Ocean Engineering*, 57, 99-110.

Yaghoobi, H., ve Yaghoobi, P. (2013). Buckling analysis of sandwich plates with FGM face sheets resting on elastic foundation with various boundary conditions: an analytical approach. *Meccanica*, 48, 2019-2035.

Yang, J., Kitipornchai, S., ve Liew, K. M. (2008). Nonlinear local bending of FGM sandwich plates. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, *3*(10), 1977-1992.

Yin, Z., Zhang, J., Yang, F., Ye, W., Liu, J., ve Lin, G. (2021). An efficient scaled boundary finite element approach in bending and bucking analysis of functionally graded piezoelectric plates. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, *132*, 168-181.

Zenkour, A. M., ve Sobhy, M. (2010). Thermal buckling of various types of FGM sandwich plates. *Composite Structures*, *93*(1), 93-102.

Zhang, C., Wang, L., Eyvazian, A., Khan, A., ve Sebaey, T. A. (2021). Analytical solution for static and dynamic analysis of FGP cylinders integrated with FG-GPLs patches exposed to longitudinal magnetic field. *Engineering with Computers*, 1-19.

Zhang, J., Yu, T., ve Bui, T. Q. (2021). Composite FG plates with different internal cutouts: Adaptive IGA buckling analysis without trimmed surfaces. *Composite Structures*, *259*, 113392.

Zhao, J., Choe, K., Xie, F., Wang, A., Shuai, C., ve Wang, Q. (2018). Three-dimensional exact solution for vibration analysis of thick functionally graded porous (FGP) rectangular plates with arbitrary boundary conditions. *Composites Part B: Engineering*, *155*, 369-381.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: AL HUTHAIFI, AHMED ABDULLAH AHMED
Uyruğu	: YEMEN
Doğum tarihi ve yeri	: YEMEN
Telefon	:
Faks	:
e-mail	:

Eğitim

Derece	**Eğitim Birimi**	**Mezuniyet Tarihi**
Yüksek lisans		
Lisans		
Lise		

İş Deneyimi

Yıl	**Yer**	**Görev**

Yabancı Dil

Yayınlar

Hobiler