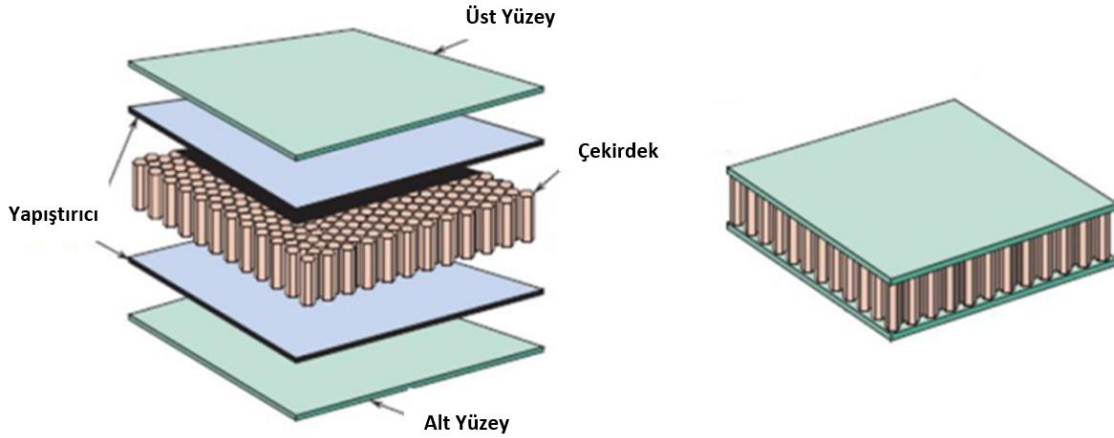


Sandviç Panellerin İki Boyutlu ve Hibrit Modellenmesi ve Karşılaştırmalar

Hazırlayan: Gökhan Özel

1. GİRİŞ

Günümüzde sandviç paneller savunma, havacılık-uzay, otomotiv, gemicilik gibi birçok alanda yapısal görevde kullanılmaktadır. Eğilme yükleri altında yüksek mukavemet/ağırlık oranları ile öne çıkan sandviç panellerde düzlem dışı yüklemelerin çekirdek bölgesi tarafından, düzlem içi yüklemelerin ise yüzey bölgeleri tarafından karşılanması hedeflenir. Çekirdek bölgelerinde polimer, kâğıt, köpük veya metal malzemeler farklı geometrik kesitlerde; yüzey bölgelerinde cam, karbon veya metalik malzemeler çok katmanlı olarak kullanılabilir.



Şekil 1 – Sandviç Panel Yapısı Örneği

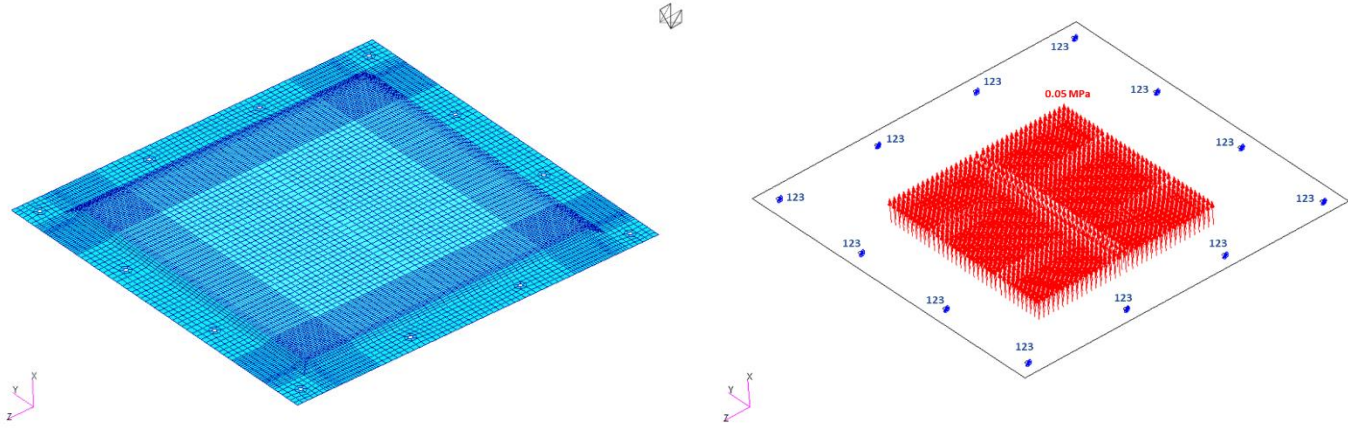
Sandviç panellerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizlerinde yaygın olarak kullanılan yöntem, iki boyutlu eleman ağı oluşturulup katmanlı özellik ataması yapılmasıdır. Tek bir yüzey üzerinde oluşturulan eleman ağının normal yönlerinde bütün katmanları temsil edecek şekilde kalınlık, malzeme ve açılı bilgileri sıralı olarak girilmektedir.

Hibrit modelleme yaklaşımında ise çekirdek bölgesi 3B eleman ağı ile; üst ve alt yüzey bölgeleri iki ayrı 2B eleman ağı ile temsil edilmektedir. Çekirdek bölgesine ait 3B eleman ağı ile ortak düğümlere bağlanan yüzey bölgeleri 2B eleman ağı için yine katmanlı özellik ataması yapılmaktadır.

Bu yazıda fiziksel olarak aynı yapıyı temsil eden bu iki modelleme yaklaşımı ile sonlu eleman modelleri üzerinden özdeş koşullar altında incelemeler ve çıkarımlar yapılması hedeflenmiştir.

2. MODEL TANIMLARI

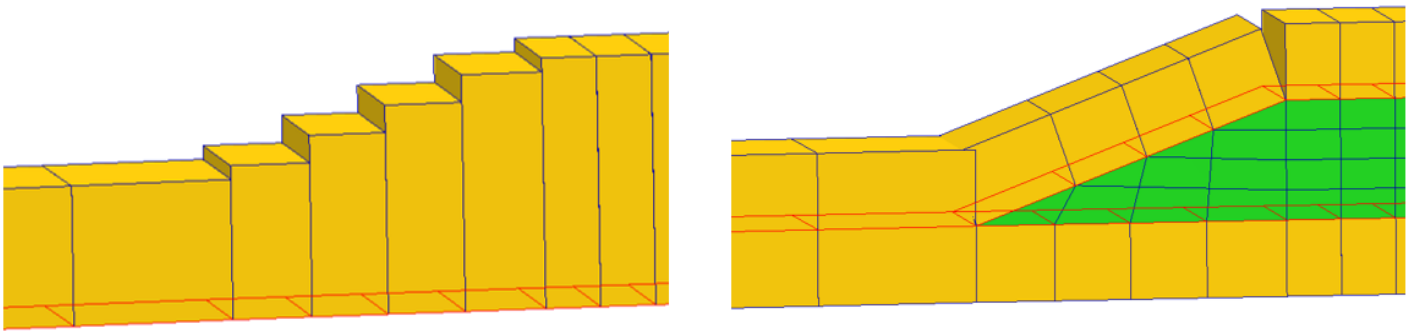
Düzlemsel bir sandviç panel numunesi, bağlayıcı deliklerinden global ekseninde öteleme yönlerinde sınırlandırılmış olup sabit basınç ile bir yükleme senaryosu gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2 – Sonlu Eleman Modeli Yükleme ve Sınır Koşulları

2B modellemede en dış yüzey üzerine eleman ağı örülüp, aynı yönde kalınlık atamaları yapılmıştır. Çekirdek rampa bölgesi, dört basamak yaratılarak temsil edilebilmektedir. Hibrit modellemede ise, iki boyutlu modellemedeki eleman ağına ek olarak çekirdek ve üst yüzey bölgelerinin elemanları oluşturulmuştur. Bağlantılar ortak düğüm noktalarını paylaşacak şekilde oluşturulup, kalınlık ve normal yönü bilgileri uygun şekilde güncellenmiştir.

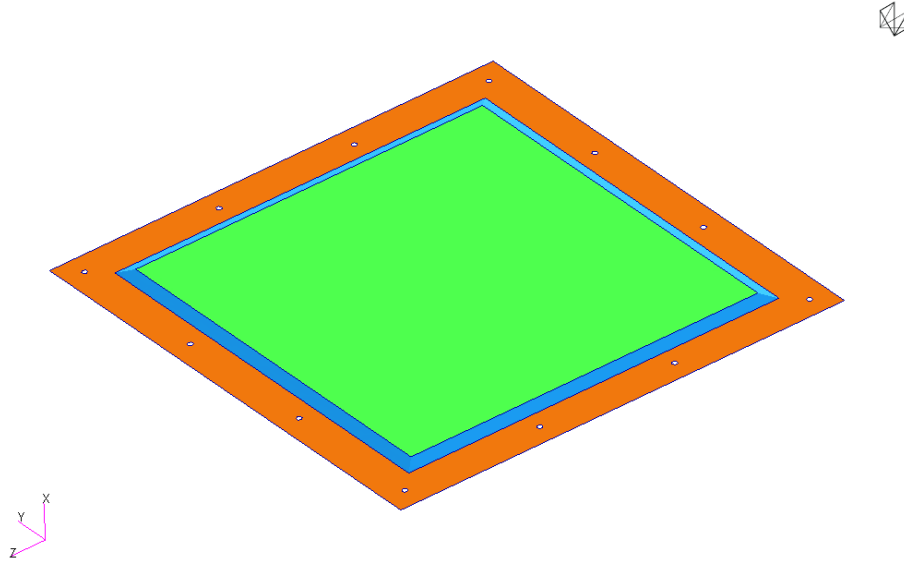
Aşağıdaki kesit görselinde; kırmızı kafes görüntü ile kabuk elemanlar, sarı içi dolu görüntü ile kabuk elemanlara ait kalınlıklar ve yeşil içi dolu görüntü ile çekirdek bölgesi katı elemanlar gösterilmiştir.



Şekil 3 – Eleman Modelleme Yaklaşımları (solda 2B Model, sağda Hibrit Model)

Modeller çekirdek ve yüzeyleri izdüşümsel olarak bölecek şekilde üç ana bölgeye ayrılmıştır. MSC Nastran çözümlerinin karşılaştırılması tanımlanan bu bölgeler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki görselde çekirdek

elemanlarının olmadığı monolitik bölge turuncu, çekirdek elemanlarının açılı olduğu rampa bölgesi mavi ve çekirdek elemanlarının açısını bitirdiği tam boy bölge yeşil ile gösterilmiştir.



Şekil 4 – Sandviç Panel Alt Bölge İsimlendirmeleri

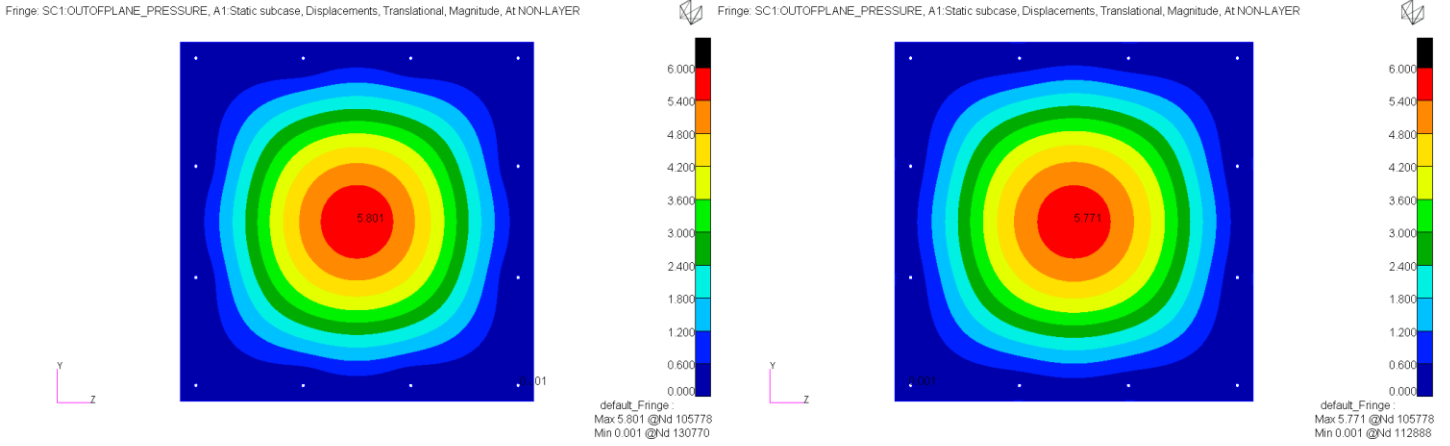
3. ANALİZ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Her iki model için MSC Nastran 2020 SP1 Lineer Statik çözümlerinden elde edilen sonuçlar aynı fiziksel bölgeler için karşılaştırmalı olarak MSC Patran 2021.1 üzerinden inceleni, aşağıdaki tabloda şeklinde derlenmiştir. Gerilme sonuçları için averajlanmamış eleman çıktıları alınmış olup Hasar İndeksi hesaplamalarında Hill teorisi kullanılmıştır. Yüzde fark hesaplamalarında 2B modelleme referans alınmıştır.

Tablo 1 – Karşılaştırmalı Analiz Sonuçları Özeti

Lokasyon	Parametre	Birim	2B Modelleme	Hibrit Modelleme	Yüzdesele Fark
-	Maks. Deformasyon	mm	5.801	5.771	%-0.5
Monolitik Bölge	Maks. Hasar İndeksi	-	0.487	0.078	%-84.0
Rampa Bölgesi	Maks. Hasar İndeksi	-	0.040	0.037	%-7.5
Rampa Bölgesi	Maks. 13 Kesme Gerilmesi	MPa	1.472	0.093	%-93.7
Rampa Bölgesi	Maks. 23 Kesme Gerilmesi	MPa	1.450	0.090	%-93.8
Tam Boy Bölge	Maks. Hasar İndeksi	-	0.030	0.043	%43.3
Tam Boy Bölge	Maks. 13 Kesme Gerilmesi	MPa	0.600	0.447	%-25.5
Tam Boy Bölge	Maks. 23 Kesme Gerilmesi	MPa	0.585	0.443	%-24.3

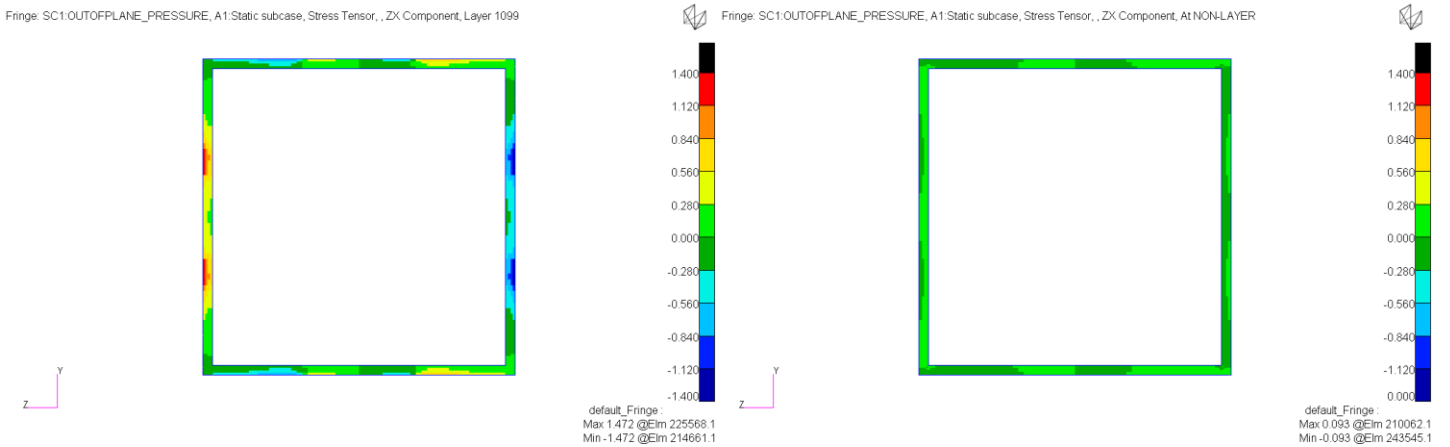
Deplasman sonuçları karşılaştırıldığında, maksimum değer mertebelerinin ve genel dağılımların aynı olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, her iki modelin de benzer katılığı sergilediği anlaşılmıştır.



Şekil 5 – Deformasyon Sonuçları (solda 2B Model, sağda Hibrit Model)

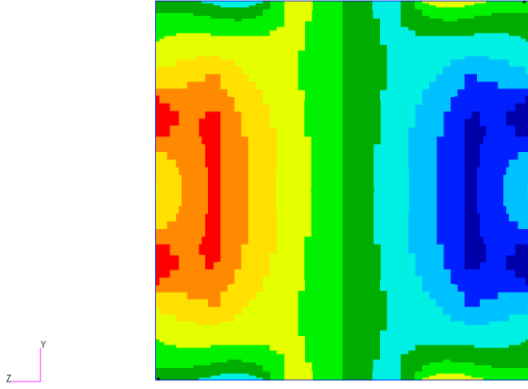
2B modelleme yönteminin temeli olan Klasik Laminasyon Teorisi'nde yapılarda bulunan katmanlarının tek bir katılık matrisi olarak hesaplanır. Dolayısıyla katmanlar kendi içerisinde herhangi bir serbestlik derecesine sahip değildir. Diğer bir deyişle, her bir katman için gerinim değeri ayrıca hesaplanıp dikkate alınmasına rağmen katmanlar birbirinden bağımsız hareket etme yeteneğine sahip değildir. Hibrit modellemede ise çekirdek bölgesi kalınlık yönünde birden fazla sıra eleman ile ayrıca temsil edildiğinden, çekirdek bölgesinin daha yüksek serbestlik derecesinden söz edilebilir.

Çekirdek bölgesinin sergilediği bu farktan dolayı, Hibrit modellemede çekirdek üzerinden okunan kesme gerilmeleri tüm bölgelerde daha düşük okunmuştur. Bu durum özellikle rampa bölgesindeki gerilme mertebelerinde yüksek etkiye sahiptir.

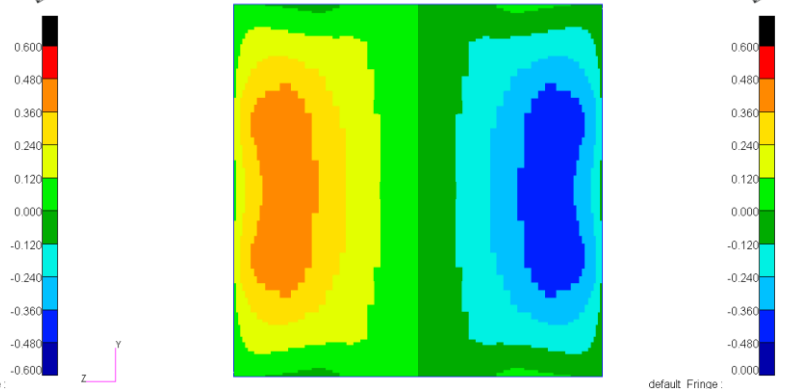


Şekil 6 – Rampa Bölgesi Çekirdek 13 Kesme Gerilmeleri (solda 2B Model, sağda Hibrit Model)

Fringe: SC1.OUTOFPLANE_PRESSURE, A1:Static subcase, Stress Tensor, ,ZX Component, Layer 1099



Fringe: SC1.OUTOFPLANE_PRESSURE, A1:Static subcase, Stress Tensor, ,ZX Component, At NON-LAYER



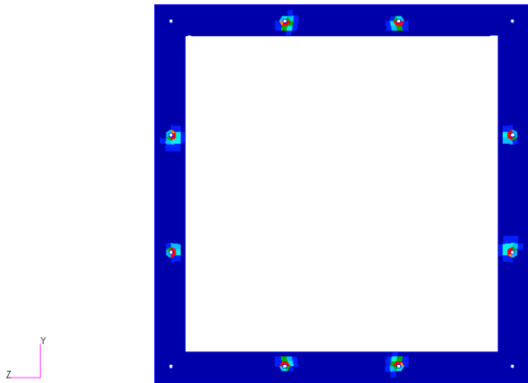
default_Fringe :
Max 0.600 @Elm 222813.1
Min -0.600 @Elm 211906.1

default_Fringe :
Max 0.447 @Elm 227052.1
Min -0.447 @Elm 216145.1

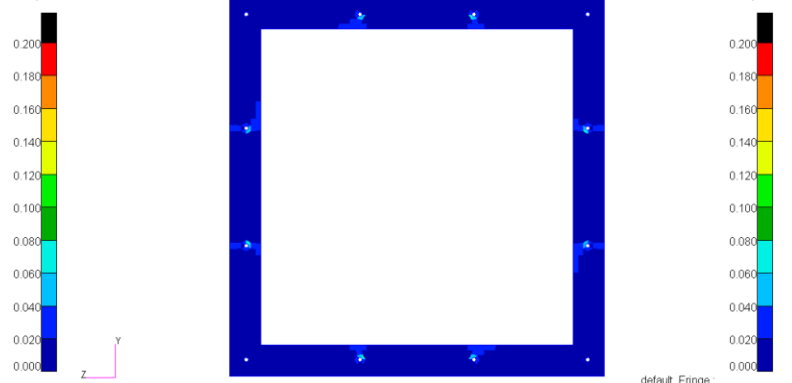
Şekil 7 – Tam Boy Bölge Çekirdek 13 Kesme Gerilmeleri (solda 2B Model, sağda Hibrit Model)

Sandviç yapılar da tam boy çekirdek bölgesi genellikle büyük bir alana sahiptir ve yük uygulama noktalarını barındırır. Hibrit modellemede tam boy bölgelerde artan çekirdek esnekliği, yüzey bölgelerinin daha çok zorlanmasına sebebiyet verir. Uygulanan yüklemenin taşınmasında yüzey katmanlarını daha etkin görev aldığı gözlemlenir. Bu etki tam boy bölgelerdeki gerilmelerin artması ve monolitik bölgelerdeki gerilmelerin azalması sonuçlarını doğurur.

Fringe: SC1.OUTOFPLANE_PRESSURE, A1:Static subcase, Failure Indices, Ply Indices, , Maximum,46 of 47 layers



Fringe: SC1.OUTOFPLANE_PRESSURE, A1:Static subcase, Failure Indices, Ply Indices, , Maximum,46 of 46 layers

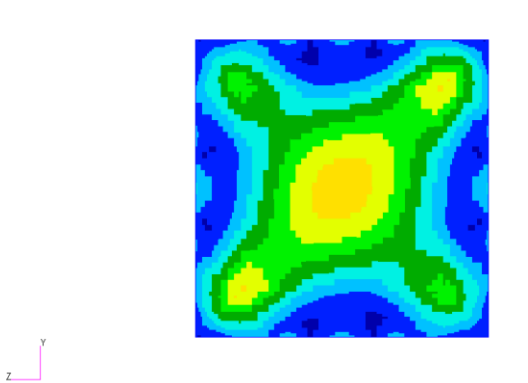


default_Fringe :
Max 0.487 @Elm 211624.1
Min 7.71-05 @Elm 211851.1

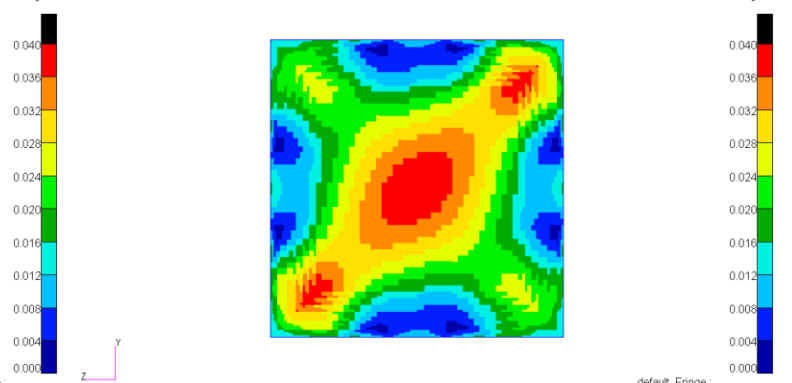
default_Fringe :
Max 0.078 @Elm 206655.1
Min 1.12-04 @Elm 222554.1

Şekil 8 – Monolitik Bölge Hasar İndeksi Sonuçları (solda 2B Model, sağda Hibrit Model)

Fringe: SC1.OUTOFPLANE_PRESSURE, A1:Static subcase, Failure Indices, Ply Indices, , Maximum,46 of 47 layers



Fringe: SC1.OUTOFPLANE_PRESSURE, A1:Static subcase, Failure Indices, Ply Indices, , Maximum,46 of 46 layers



default_Fringe :
Max 0.030 @Elm 208179.1
Min 0.003 @Elm 233894.1

default_Fringe :
Max 0.043 @Elm 208573.1
Min -6.80-04 @Elm 224065.1

Şekil 9 – Tam Boy Bölge Hasar İndeksi Sonuçları (solda 2B Model, sağda Hibrit Model)

Tablo 1'deki sonuçlardan görüldüğü üzere, deformasyon sonuçları haricindeki sonuçlarda (gerilme ve hasar indeksi) hemen her bölgede kayda değer seviyelerde farklar mevcuttur. Hibrit modelleme yöntemi ile gerçekleştirilecek olan analizlerde uygun tanımlamalarla 2B modelleme ile aynı katılık elde edilebilmesine karşın çekirdek ve yüzey malzeme tipleri, modulus değerleri, panel geometrisi ve yükleme koşulları elde edilen sonuçlar üzerinde yüksek etkiye sahiptir. Dolayısıyla uygun modelleme yöntemi seçiminde durum bazlı karar verilmeli ve test sonuçları göz önünde bulundurulmalıdır.

Günümüzde sandviç yapıların endüstriyel uygulamalardaki incelemeleri çoğunlukla 2B modelleme ile gerçekleştirilmektedir. Bu yaklaşımda, sonlu elemanlar üzerinden okunan gerilmeleri kullanılarak ek olarak analitik dayanım hesaplamaları yapılması tavsiye edilir. Hibrit modellemede ise analitik hesaplamaların işaret ettiği ilgili hasar modlarının bazıları sonlu elemanlar üzerinde direkt olarak gözlemlenebilir. Bu farklılık kinematik olarak alt ve üst yüzeylerin bağımsız hareket edebilme kabiliyetinden kaynaklanmaktadır.

4. KAYNAKÇA VE REFERANSLAR

- I. MSC Nastran Quick Reference Guide
- II. MSC Nastran Reference Guide
- III. <https://aerospaceengineeringblog.com/sandwich-panel/>
- IV. https://www.researchgate.net/figure/A-typical-sandwich-construction_fig1_330654548