

FARKLI SINIR ŞARTLARI VE FARKLI TABAKLANMA AÇILARI İÇİN TABAKALI KOMPOZİT BALPETEĞİ SANDVIÇ PLAĞIN SERBEST TİTREŞİM FREKANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Mohammad Bilal JALALI *^{ID}

Ali DOĞAN **^{ID}

Alınma:29.07.2022; düzeltme:15.01.2023; kabul:02.04.2023

Öz: Tabakalı kompozit sandviç elemanlar, inşaat, otomotiv, havacılık ve denizcilik gibi birçok sektörde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Yüksek mukavemet/ağırlık oranı, aşındırıcı olmayan, iyi yüzey vb gibi avantajlı özelliklere sahip olmalarından dolayı bu malzemelerin kullanımı yoğun olarak tercih edilmekte ve bu malzemelerle ilgili yapılan çalışmalar günden güne artmaktadır. Bu çalışmada, tabakalı kompozit sandviç plağın modal analizi yapılmıştır. Analizlerde, sonlu elemanlar modeli, ANSYS ve ABAQUS programları kullanılarak oluşturulmuştur. Tabakalı kompozit sandviç plağın çeşitli tabakalanma durumlarında serbest titreşim analizleri yapılarak doğal frekanslar elde edilmiştir. Elyaf açılarının, tabaka dizilim sırasının ve sınır koşullarının tabakalı kompozit balpeteği sandviç plağın doğal frekansları ve mod şekilleri üzerinde etkili olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit malzemeler, karbon fiber, cam fiber, doğal frekans, sonlu elemanlar programları

Comparison of Free Vibrations Frequencies of a Laminated Composite Honeycomb Sandwich Plate for Different Boundary Conditions and Different Lamination Angles

Abstract: Layered composite sandwich elements are used extensively in many industries such as construction, automotive, aviation and marine. Due to their advantageous properties such as high strength/weight ratio, non-abrasive, good surface, etc., the use of these materials is intensely preferred and the studies on these materials are increasing day by day. In this study, modal analysis of laminated composite sandwich plate was performed. In the analyses, the finite element model was created using ANSYS and ABAQUS programs. Natural frequencies were obtained by performing free vibration analyzes in various layering conditions of the laminated composite sandwich plate. It is seen that the fiber angles, layer array order and boundary conditions have an effect on the natural frequencies and mode shapes of the laminated composite honeycomb sandwich plate.

Keywords: Composite materials, carbon fiber, glass fiber, natural frequency, finite element programs

* Yazar 1 İletişim Adresi (İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimler Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,31200, Hatay, Türkiye)

** Yazar 2 İletişim Adresi (İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimler Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,31200, Hatay, Türkiye)

İletişim Yazarı: Yazar Adı Soyadı Ali Doğan (ali.dogan@iste.edu.tr)

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesinden meydana gelmektedir. Tabakalı kompozitler yüksek mukavemet, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, hafiflik gibi üstün özelliklere sahip olduğundan dolayı günümüzde kullanımı giderek artmaktadır. Liu ve ark. (2003), hibrit şekil değiştirme temelli sonlu elemanlar yöntemi kullanarak tabakalı kompozit kabukların serbest titreşimi üzerine çalışmışlardır. Malekzadeh (2009), hibrit bir metod kullanarak üç boyutlu elastisite teorisi yardımıyla tabakalı kalın plakların serbest titreşim analizini yapmıştır. Mahi ve ark. (2015), izotropik, fonksiyonel dereceli, sandviç ve tabakalı kompozit plakaların eğilme ve serbest titreşim analizi için yeni bir hiperbolik kayma deformasyon teorisi geliştirmiştir. Nikhil ve ark. (2018), viskoelastik çekirdek bölgesine sahip tabakalı hibrit kompozit sandviç plakların modal analizini yapmışlardır. Rajawat ve ark. (2018), sonlu elemanlar yöntemini kullanarak tabakalı plakların serbest titreşim analizini yapmışlardır. Kant ve ark. (2001), yaptıkları çalışmada tabakalı kompozit ve sandviç plakların serbest titreşimi için daha yüksek dereceli bir rafine teorisine dayalı analitik bir çözümü incelemişlerdir. Thai ve ark. (2010), iki değişkenli rafine plak teorisini kullanarak tabakalı kompozit plakların serbest titreşim analizini yapmışlardır. Fazzolari ve ark. (2013), Ritz yöntemini kullanarak, yüzeyleri anizotropik levhalardan oluşan sandviç plakların ısı ortamında serbest titreşim analizi üzerine çalışmışlardır. Piezoelektrik tabakalı kompozit plakların doğrusal olmayan serbest titreşimi Dash ve arkadaşları (2009) tarafından tahkik edilmiştir. Yadawad ve ark. (2018), sonlu elemanlar yaklaşımı ile birinci dereceden kayma deformasyon teorisi (FSDT) kullanılarak tabakalı kompozit plakların serbest titreşim analizini yapmışlardır. Dogan ve ark. (2012), kompozit silindirik sığ kabuklarda, kabuk elemanın kenarlarının oranının mod-şekilleri üzerindeki etkisinin kayma deformasyon sığ kabuk teorisi (SDSST) ve sonlu elemanlar metodunu (FEM) kullanarak incelemişlerdir. Tabakalı kompozit plakların farklı anizotropi durumlarında serbest titreşim karakteristikleri Dogan (2016) tarafından incelenmiştir.

Bu çalışmadaki amaç, çeşitli parametreler ve çeşitli parametrik durum senaryolarında problemin simülasyonunun yapılması, çözümü, elde edilecek serbest titreşim frekanslarının tespit edilmesi ve en uygun tabaka ve malzeme optimizasyonunun sağlanması fikrine dayanmaktadır. Çalışma iki aşamadan oluşmaktadır; birinci aşamada, oluşturulan modelin doğruluğunu kanıtlamak için literatürdeki çalışmalarla karşılaştırma yapılarak kurulan modelin doğruluğu test edilmiştir. İkinci aşamada, tabaka sayısı ve açılarının değişiminin yanı sıra tabaka diziliminin tabakalı plaklar üzerindeki etkisi parametrik olarak tespit edilmeye çalışılmıştır. Tabaka sayısı, tabaka dizilimi, tabaka açısı, çeşitli mesnetlenme durumu gibi parametrelerin bir arada kullanılması, bu parametrelerin tabakalı plaklar üzerindeki optimum etkisinin araştırılması ve anlaşılması amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Tabakalı kompozit sandviç plaklar günümüzde birçok mühendislik alanında ilgi görmektedir. Dayanıklı ve hafif olmaları inşaat sektöründe kullanım alanlarını her geçen gün arttırmaktadır. Tabakalı kompozitlerin gerilme şekil değiştirme ilişkisi malzemenin statik ve dinamik davranışını doğrudan etkilemektedir. Genel olarak tabakalı kompozit plakların gerilme-şekil değiştirme ilişkisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ \bar{Q}_{13} & Q_{23} & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

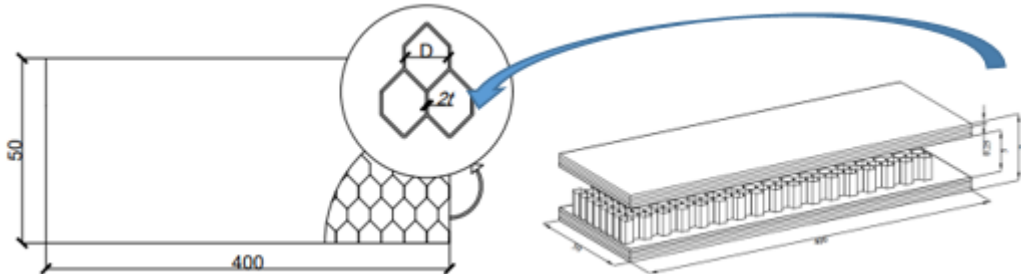
Herhangi bir numunenin doğal frekansı ve mod şekli, onun titreşim yapısını değerlendirmek için kullanılabilir. Serbest titreşim frekansı teorik olarak şu şekilde ifade edilebilir.

$$[K]\{\Delta\} + (\omega_{mn})^2[M]\{\Delta\} = 0 \quad (2)$$

Burada, $[K]$ rijitlik matrisi, $[M]$ kütle matrisi Δ deplasman vektörü ve ω_{mn} serbest titreşim frekansdır. Bu çalışmada bal peteğinin alt ve üstünde yer alan kapak tabakalar daha sert bir malzemeden yapılırken, çekirdek tabakası daha yumuşak bir malzemeden yapılmıştır. Yapının üst ve alt tabakalarında karbon fiber ve cam elyaf gibi ortotropik kompozit malzemeler ve çekirdek malzemesi olarak bal peteği gibi viskoelastik malzemeler kullanılmıştır. Modellenen numunelere, ANSYS (2020) ve ABAQUS (2020) programları kullanılarak doğal titreşim analizi yapılmıştır. Bu çalışmada seçilen geometri (400 x 50 x 7 mm) için Nikhil (2018) tarafından yapılmış olan çalışma referans olarak kullanılmıştır. Çalışmanın geometrisi Şekil 1’de verilmiştir. Çekirdek tabakanın kalınlığı 5 mm ve her bir kapak tabakası 0.25 mm kalınlığında 4 tabakadan oluşmaktadır. Balpeteği düzgün altıgendir. Burada bal peteği duvar kalınlığı “t” ve altıgenin çapı “D” dir. Fiber açısı, kompozit malzemenin tabaka sırası ve yapının sınır koşulları gibi parametreler titreşim davranışı üzerinde büyük etkiye sahiptir. Bu çalışmada bu parametrelerin doğal frekans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Mevcut çalışmanın malzeme özellikleri ve referans çalışmanın malzeme özellikleri Tablo 1 ve 2’de verilmiştir. Bu çalışmada shell eleman kullanılmıştır. ANSYS (workbench)’te geometriyi oluştururken shell elemanı modellemek için surface seçilmiş 1mm kalınlığında ve meshleme yaparak shell elemana dönüştürülmüştür. ABAQUS’te ise “default Shell” elemanı oluşturmak için menüden shell seçilmiştir. Mesh için çeşitli sayıda bölme gerçekleştirilmiş ve belli mesh oranından sonra sonuçlar değişmemektedir. Bu sebeple analizlerde işlem yükünün ve süresinin artmaması için çok aşırı mesh yapmaya gerek kalmamış en uygun oran belirlenmiştir. En uygun mesh sayısının optimum değeri bulunarak çalışmadaki bütün analizlerde kullanılmıştır. Tüm çalışma kapsamında 20x160 mesh yapılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

İlk önce mevcut çalışmanın doğrulanması için çalışmadaki ANSYS ve ABAQUS sonuçları Nikhil ve arkadaşları (2018) tarafından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çekirdek malzemesi olarak bal peteği ve üst-alt tabakalar olarak cam ve karbon fiber kumaşlar seçilmiştir. Cam ve karbon fiber kumaşların ve bal peteğinin malzeme özellikleri Tablo 1 ve 2 de verilmiştir. Her iki çalışmanın sonuçları Tablo 3 ve 4’te verilmiştir. Şekil 2’de bir ucu ankastre plağın, Şekil 3’de ise iki ucu ankastre plağın doğal frekans değerleri görülmektedir. Sonuçların çok yakın çıktığı görülmüştür. Böylelikle Nikhil’in modeli tekrar tasarlanarak mevcut çalışmamızdaki Ansys ve Abaqus modelinin doğruluğu sağlanmış oldu. Doğrulan modeller yardımıyla farklı dört durum incelenmiş ve parametrik bir çalışma yapılmıştır.



Şekil 1:
Çalışmanın geometrisi

Tablo 1. Bu çalışmadaki parametrik analiz için kullanılan malzeme özellikleri.

Malzeme	Ex(GPa)	Ey(GPa)	Ez(GPa)	Gxy(GPa)	Gxz(GPa)	Gyz(GPa)	Yoğunluk(kg/m ³)
CFRP	230,000	23,000	23,000	9,000	9,000	8,214	1800,000
GFRP	45,000	10,000	10,000	5,000	5,000	3,846	2000,000
Bal Peteği	0,001	0,000	0,255	0,000	0,037	0,070	80,000

Tablo 2. Nikhil (2018)'in yaptığı çalışmadaki malzemelerin özellikleri

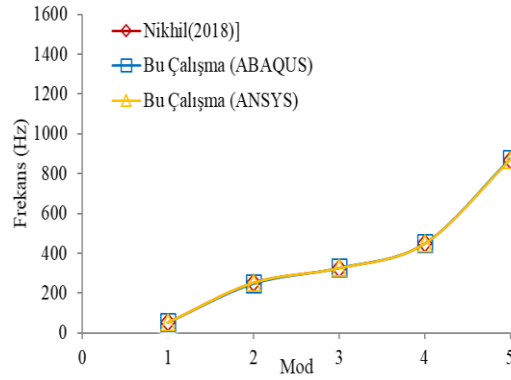
Malzeme	Ex(GPa)	Ey(GPa)	Ez(GPa)	Gxy(GPa)	Gxz(GPa)	Gyz(GPa)	Yoğunluk(kg/m ³)
CFRP	140,000	10,000	10,000	4,600	4,600	3,600	1650,000
GFRP	53,780	17,930	17,930	8,960	3,450	3,450	1900,000
Aluminium Bal Peteği	0,000	0,000	1,494	0,000	0,341	0,192	57,170
Kauçuk	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	950,000

Tablo 3. Bir ucu ankastre ve fiber açısı 0⁰ olan alt ve üst tabakalar cam fiber plak için doğal frekanslar

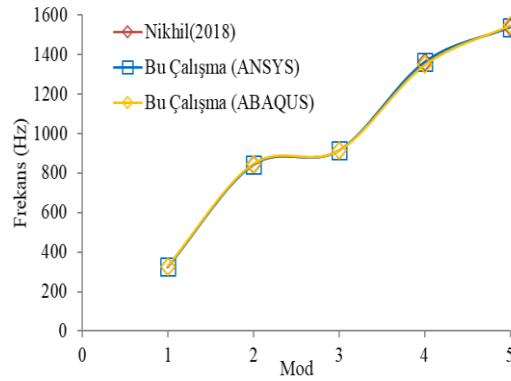
Mod No	Nikhil ANSYS(2018) (Hz)	Bu çalışma ANSYS (Hz)	Bu çalışma ABAQUS (Hz)
1	53,826	53,852	53,853
2	252,990	253,050	248,280
3	326,150	326,310	326,740
4	448,620	448,910	448,910
5	869,110	869,590	872,700

Tablo 4. İki ucu ankastre ve fiber açısı 0⁰ olan alt ve üst tabakalar cam fiber plak için doğal frekanslar

Mod No	Nikhil ANSYS(2018) (Hz)	Bu çalışma ANSYS (Hz)	Bu çalışma ABAQUS (Hz)
1	325,310	325,590	326,100
2	842,240	842,920	846,280
3	914,420	914,970	913,720
4	1360,900	1362,100	1348,000
5	1537,800	1539,100	1549,700



Şekil 2:
Bir ucu ankastre fiber açısı 0° , alt ve üst tabakalar cam fiber plağın frekanslarının karşılaştırılması

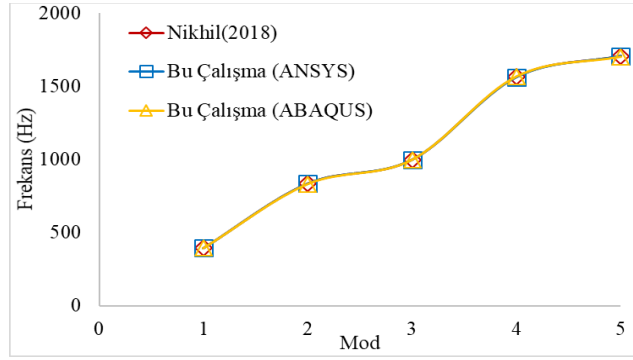


Şekil 3:
İki ucu ankastre fiber açısı 0° , alt ve üst tabakalar cam fiber plağın frekanslarının karşılaştırılması

Tablo 5. İki ucu ankastre, fiber açısı 0° , üst tabakalar cam fiber ve alt tabakalar karbon fiber için doğal frekanslar

Mod No	Nikhil ANSYS(2018) (Hz)	Bu Çalışma ANSYS (Hz)	Bu Çalışma ABAQUS (Hz)
1	394,380	394,390	394,370
2	836,040	836,080	832,960
3	998,910	999,390	998,890
4	1564,700	1563,900	1567,100
5	1707,700	1708,100	1701,900

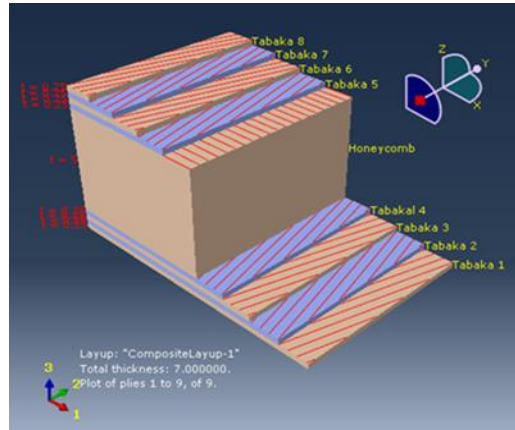
Karbon fiber cam fibere göre daha yüksek elastisite modülüne sahip bir kompozit malzemedir. Dört üst tabaka cam fiber ve dört alt tabaka karbon fiber çekirdek bölgesi bal peteği olarak tasarlanmış plak için elde edilen doğal titreşim frekans değerleri Tablo 5’de görülmektedir. Alt ve üst tabakaların tamamı cam fiber çekirdek bölgesi bal peteği olarak tasarlanmış plak için elde edilen doğal titreşim frekans değerleri Tablo 4’de görülmektedir. Tablo 5 ve Tablo 4 karşılaştırıldığında, Tablo 4’de elde edilen doğal frekansların Tablo 5’de elde edilen doğal frekans değerlerinden daha düşük olduğu görülmektedir. Böylelikle karbon fiberin etkisi açıkça görülmektedir (Şekil 3-4).



Şekil 4:

İki ucu ankastre, fiber açısı 0^0 , üst tabakalar cam fiber ve alt tabakalar karbon fiber plağın frekanslarının karşılaştırılması

Parametrik çalışma için modellenen hibrit plak Şekil 5’de görülmektedir. Bal peteğinden (BP) oluşan çekirdek malzemenin üst ve alt kapağı dörder tabakadan oluşmaktadır. Her üst ve alt kapak tabakalardan üç tabaka cam fiber (CF) ve bir tabaka karbon fiber (KF) kullanılmıştır. Sabit açıyla karbon fiberin dizi sırasına göre Şekil 6’da gösterildiği gibi ve farklı sınır şartlarına göre doğal frekanslar yardımıyla karbon fiberin etkisi incelenmiştir.



Şekil 5:

Honeycomb sandwich plağın Abaqus modelindeki tabakalanma gösterimi

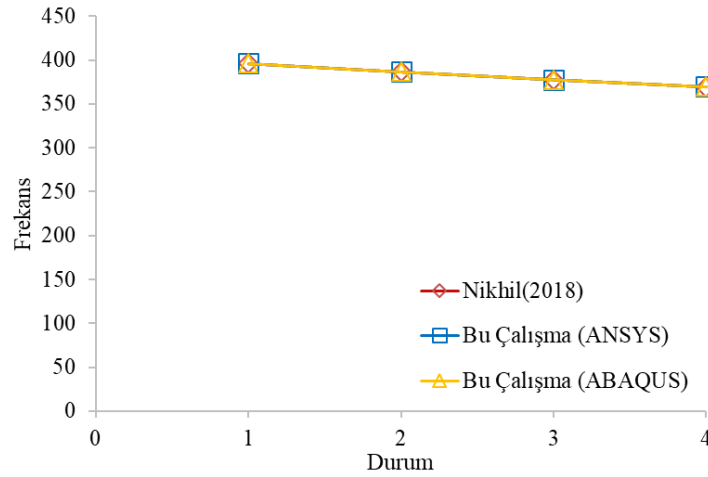
1. Durum	2. Durum	3. Durum	4. Durum
KF	CF	CF	CF
CF	KF	CF	CF
CF	CF	KF	CF
CF	CF	CF	KF
BP	BP	BP	BP
CF	CF	CF	KF
CF	CF	KF	CF
CF	KF	CF	CF
KF	CF	CF	CF

Şekil 6:

Farklı durumlar için tabakalanma dizilimi

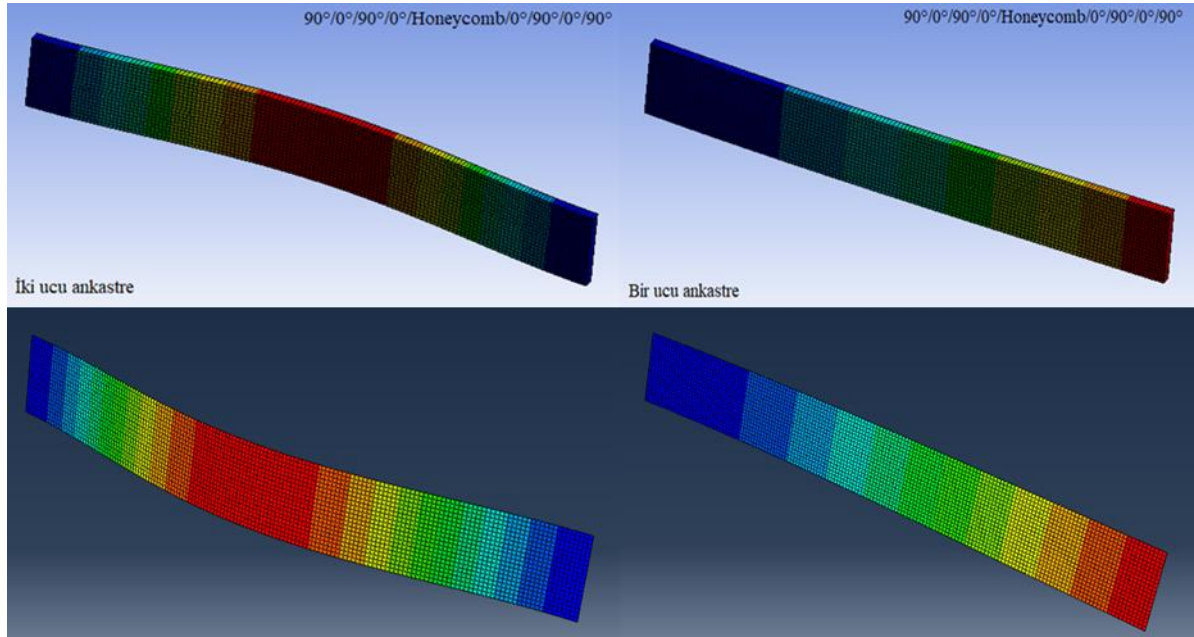
Tablo 6. İki ucu ankastre mesnetli, dört farklı durumda ve 0° fiber açısına sahip plak için doğal frekans değerleri

Durum No	Açı	Nikhil (Ansys) (Hz)	Mevcut Çalışma (Ansys) (Hz)	Mecut Çalışma (Abaqus) (Hz)
1	0	396,011	396,160	396,150
2	0	386,474	386,650	386,630
3	0	377,554	377,750	377,730
4	0	369,285	369,500	369,490

**Şekil 7:**

Karbon fiber dizilişine göre doğal frekansların karşılaştırılması

Yaptığımız çalışma ile Nikhil' in yaptığı çalışma sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin tamamen uyumlu olduğu Tablo 6 ve Şekil 7'de görülmektedir. Buna ek olarak, Durum 1'den Durum 4'e gidildikçe, yani karbon fiber tabaka en dıştan merkeze doğru gittikçe doğal frekans değerleri azalmaktadır. Çalışmada tasarlanan modelin literatürdeki sonuçla karşılaştırılıp, doğruluğu tespit edildikten sonra ikinci aşama olarak tabakaların dizilimleri, tabaka açıları ve mesnetlenme çeşitleri değiştirilerek, çeşitli açılar, sınır koşulları ve tabaka dizilişine göre 4 farklı durum incelenmiştir. Çözümler Abaqus ve Ansys bilgisayar simülasyon programlarında modellenmiştir (Şekil 8). Her durum için gerekli tablolar ve grafikler aşağıda verilmiştir.



Şekil 8:
ANSYS ve ABAQUS mod şekilleri

Tablo 7. (0°/90°/0°/90°/ çekirdek /90°/0°/90°/0°) fiber açısına sahip plak için doğal frekans değerleri

Durum no	Bir ucu ankastre (ANSYS) (Hz)	İki ucu ankastre (ANSYS) (Hz)	Bir ucu ankastre (ABAQUS) (Hz)	İki ucu ankastre (ABAQUS) (Hz)
1	64,67	316,18	64,67	316,18
2	40,55	226,12	40,55	226,12
3	58,48	286,04	58,48	286,03
4	39,90	222,63	39,90	222,62

Tablo 8. (15°/-15°/15°/-15°/ çekirdek /-15°/15°/-15°/15°) fiber açısına sahip plak için doğal frekans değerleri

Durum no	Bir ucu ankastre (ANSYS) (Hz)	İki ucu ankastre (ANSYS) (Hz)	Bir ucu ankastre (ABAQUS) (Hz)	İki ucu ankastre (ABAQUS) (Hz)
1	59,92	299,34	59,92	299,30
2	59,07	293,32	59,06	293,30
3	56,55	280,81	56,54	280,78
4	55,60	274,77	55,59	274,75

Tablo 9. (30°/-30°/30°/-30°/ çekirdek/ -30°/30°/-30°/30°) fiber açısına sahip plak için doğal frekans değerleri

Durum no	Bir ucu ankastre (ANSYS) (Hz)	İki ucu ankastre (ANSYS) (Hz)	Bir ucu ankastre (ABAQUS) (Hz)	İki ucu ankastre (ABAQUS) (Hz)
1	44,59	246,07	44,57	245,90
2	44,53	244,67	44,50	244,52
3	42,92	235,45	42,90	235,32
4	42,76	233,57	42,74	233,45

Tablo 10. (45°/-45°/45°/-45°/ çekirdek /-45°/45°/-45°/45°) fiber açısına sahip plak için doğal frekans değerleri

Durum no	Bir ucu ankastre (ANSYS) (Hz)	İki ucu ankastre (ANSYS) (Hz)	Bir ucu ankastre (ABAQUS) (Hz)	İki ucu ankastre (ABAQUS) (Hz)
1	32,35	191,43	32,32	191,18
2	32,04	189,50	32,02	189,26
3	31,35	185,00	31,32	184,79
4	31,06	183,18	31,04	182,92

Tablo 11. (60°/-60°/60°/-60°/ çekirdek /-60°/60°/-60°/60°) fiber açısına sahip plak için doğal frekans değerleri

Durum no	Bir ucu ankastre (ANSYS) (Hz)	İki ucu ankastre (ANSYS) (Hz)	Bir ucu ankastre (ABAQUS) (Hz)	İki ucu ankastre (ABAQUS) (Hz)
1	27,50	165,16	27,49	165,05
2	27,04	162,38	27,03	162,28
3	26,58	159,51	26,57	159,42
4	26,17	157,11	26,17	157,02

Tablo 12. (75°/-75°/75°/-75°/ çekirdek /-75°/75°/-75°/75°) fiber açısına sahip plak için doğal frekans değerleri

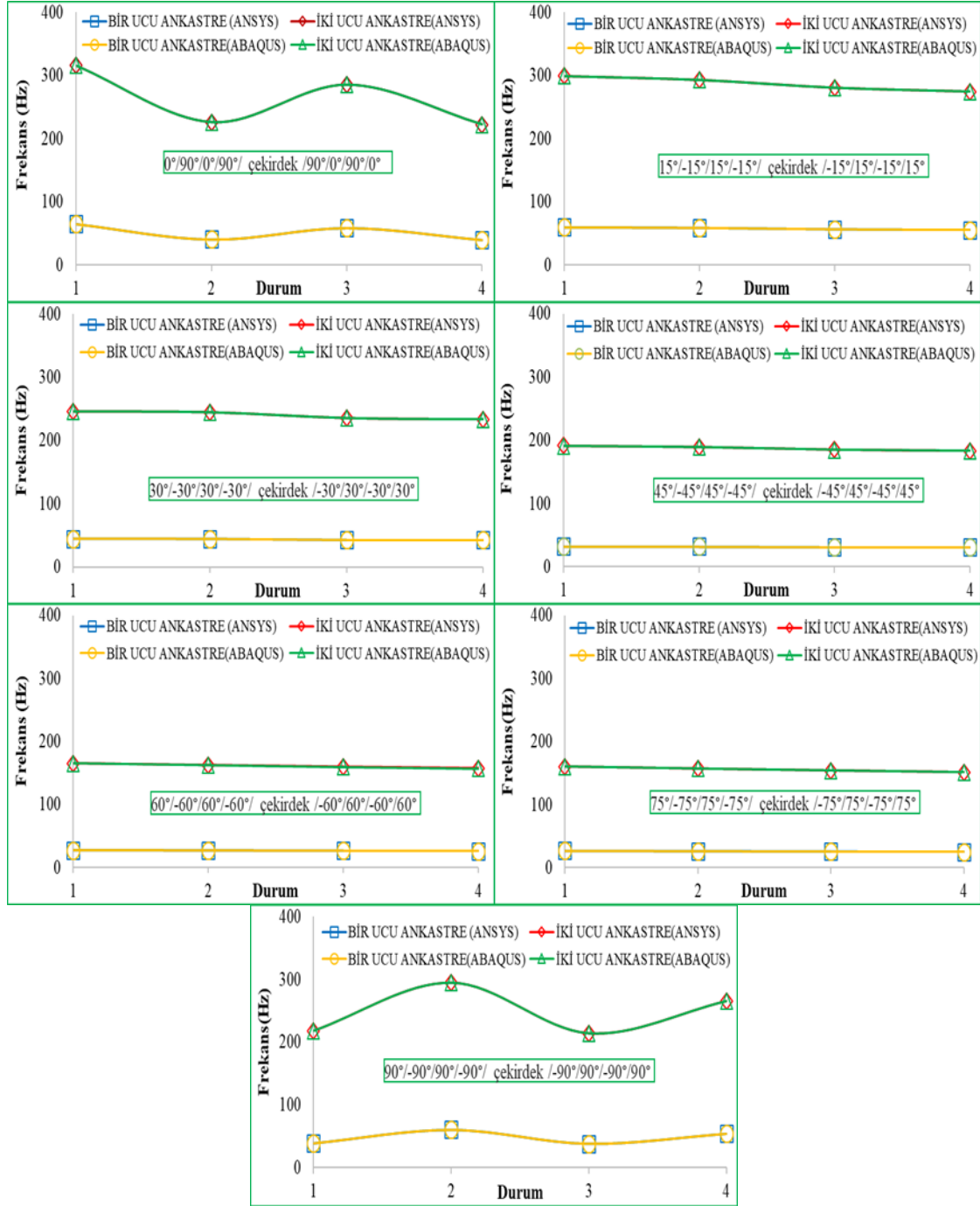
Durum no	Bir ucu ankastre (ANSYS) (Hz)	İki ucu ankastre (ANSYS) (Hz)	Bir ucu ankastre (ABAQUS) (Hz)	İki ucu ankastre (ABAQUS) (Hz)
1	26,74	160,19	26,74	160,17
2	26,20	156,99	26,20	156,98
3	25,72	154,07	25,71	154,05
4	25,25	151,31	25,25	151,29

Tablo 13. (90°/0°/90°/0°/ çekirdek /0°/90°/0°/90°) fiber açısına sahip plak için doğal frekans değerleri

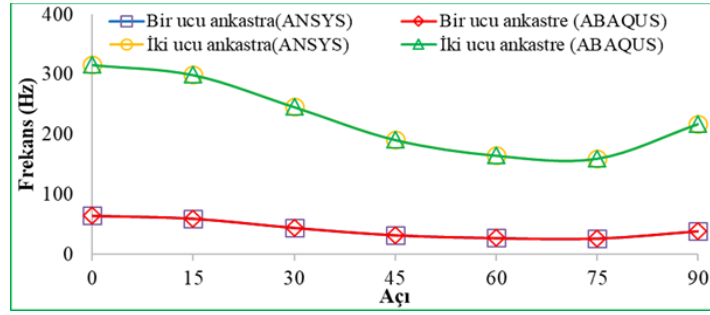
Durum no	Bir ucu ankastre (ANSYS) (Hz)	İki ucu ankastre (ANSYS) (Hz)	Bir ucu ankastre (ABAQUS) (Hz)	İki ucu ankastre (ABAQUS) (Hz)
1	39,07	217,93	39,07	217,93
2	60,38	295,26	60,38	295,25
3	38,34	213,86	38,34	213,85
4	54,27	265,61	54,27	265,61

Bu bölümdeki sonuçlara bakıldığında fiber açısının 0 dan 90 dereceye kadar artmasıyla frekans değerleri azalmış 90 derecede tekrar artmıştır. Çapraz-katlı durum olan 0 ve 90 dereceli durumların frekansları diğer açılara göre daha yüksektir. Ayrıca, karbon fiber tabakanın merkeze olan uzaklığının sadece 0 ve 90 dereceli açı dizilimlerinde daha etkili olduğu görülmüştür. Diğer açı dizilimlerinde durum değişiminin frekans değerlerini çok etkilemediği tespit edilmiştir (Şekil 9). 0 ve 90 dereceli açı dizilimleri dışındaki açı durumlarında, yani açı değerleri 15 dereceden 75 dereceye arttıkça ve karbon fiber malzemeli tabakanın plak merkezine yaklaşmasıyla frekans değerlerinde bir miktar azalma meydana gelmektedir (Şekil 9). Mesnetlenme çeşidinin değişimi frekans değerlerini etkilemektedir. İki ucu ankastre hibrit sandviç plak için elde edilen frekans değerleri bir ucu ankastre olan plak için elde edilen frekans değerlerine göre çok daha yüksektir

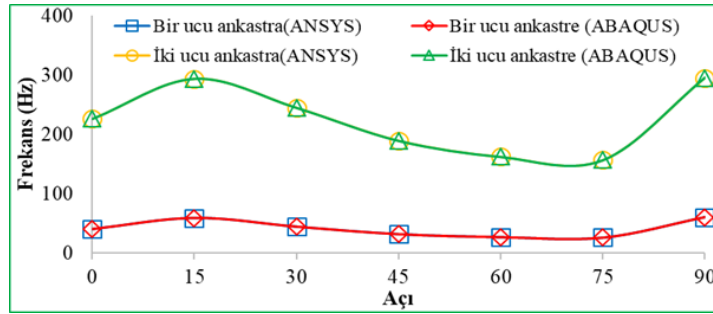
(Şekil 10-15). Fakat farklı açı dizilimleri için her iki mesnetlenmede de frekans değişim davranışı benzemektedir (Şekil 14-15).



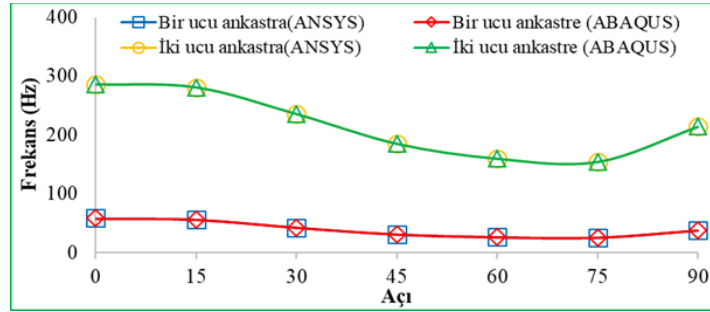
Şekil 9: Çeşitli sınır koşulları ve karbon fiber dizilişine göre doğal frekansların karşılaştırılması



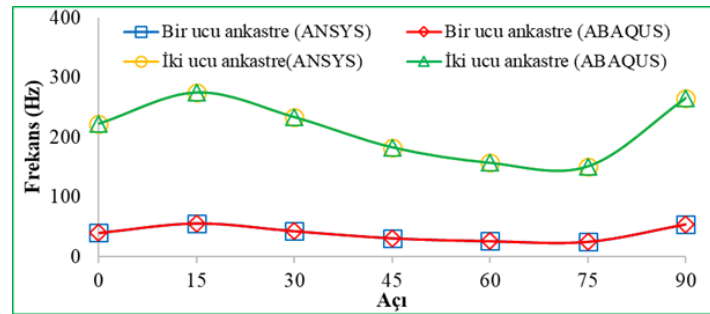
Şekil 10:
Durum 1 için frekans-açı grafiği



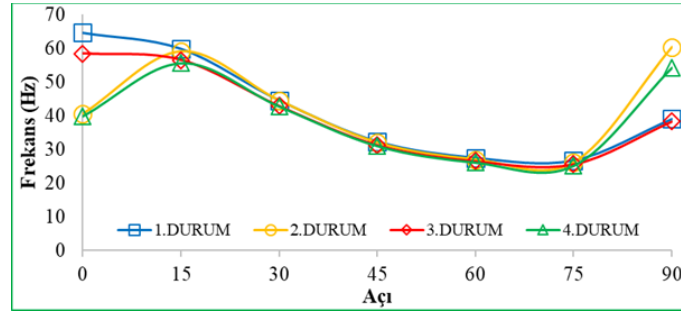
Şekil 11:
Durum 2 için frekans-açı grafiği



Şekil 12:
Durum 3 için frekans-açı grafiği

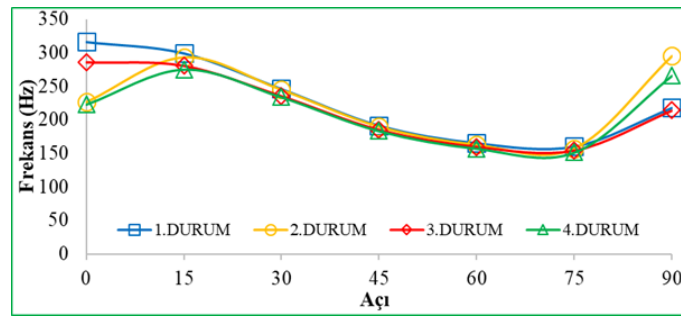


Şekil 13:
Durum 4 için frekans-açı grafiği



Şekil 14:

Bir ucu ankastre sınır koşulunda açı-frekans grafiği (ANSYS)



Şekil 15:

İki ucu ankastre sınır koşulunda açı-frekans grafiği (ANSYS)

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada hibrit tabakalı kompozit sandviç plağın modal analizi yapılarak serbest titreşim frekansları bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar daha önce yayınlanmış araştırmalar ile karşılaştırılmış ve hibrit plak modelinin doğru tasarlandığı tespit edildikten sonra parametrik çalışmaya geçilmiştir. Parametrik çalışmada, farklı tabaka dizilimi ve farklı açıların çeşitliliği oluşturularak hibrit plağın serbest titreşim frekansları bulunmuştur.

Fiber açısının 0 dan 90 dereceye kadar artmasıyla frekans değerleri azalmış 90 derecede tekrar artmıştır (Tablo 7-13). Çapraz-katlı durum olan 0 ve 90 dereceli durumların frekansları diğer açılara göre daha yüksektir. Ayrıca, karbon fiber tabakanın merkeze olan uzaklığının değişiminin frekans değerleri üzerine etkisi 0 ve 90 dereceli açı dizilimlerinde daha fazladır. Diğer açı dizilimlerinde durum değişiminin frekans değerlerini çok etkilemediği tespit edilmiştir (Şekil 9).

Karbon fiber malzemeli tabakanın plak merkezine yaklaşmasıyla frekans değerlerinde bir azalma meydana gelmektedir (Şekil 10-13). Fakat bu azalma miktarı her açı değerinde aynı oranda olmamaktadır. Bu durum bize göstermektedir ki, güçlü malzemenin plak merkezinden uzakta yerleştirilmesi frekans değerlerini arttırmasına rağmen, bu artış miktarını açı değişimi de etkilemektedir (Şekil 14-15). Bu durumda doğru tabaka dizilimi ve doğru açı yönelimini sağlayacak optimizasyon çalışmaları dayanım ve maliyet arasında uygun bir dengenin sağlanabilmesi için önemlidir.

Karbon fiber gibi güçlü malzemeler daha yüksek bir doğal frekans değerine sahiptir. Fakat karbon fiber maliyeti daha yüksektir. Bunun yerine, tamamı tabakalı kompozit plak yerine hibrit lamine kompozit sandviç plağın kullanılmasıyla daha uygun maliyetli çözümler elde edilebilir. Parametrik analizin sonuçları, tabaka dizilimini, fiber açı yönelimini ve sınır koşullarını değiştirmenin, yapının geometrisini değiştirmeden kompozit bir yapının titreşim davranışını değiştirebileceğini göstermiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Bu çalışmanın yazarları olarak, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını onaylarız.

YAZAR KATKISI

Ali DOĞAN, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikirsel içeriğin eleştirel incelemesi, son onay ve tam sorumluluk kısımlarına, Mohammad Bilal JALALI, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, son onay ve tam sorumluluk kısımlarına katkı sağlamıştır.

KAYNAKLAR

1. ABAQUS. (2020) Theory Manual Hibbit, Karlsson and Sorenson Inc. Pawtucket, USA.
2. ANSYS:Release 20. (2020) Swanson Analysis System Inc., Houston.
3. Dash, P., and Singh, B. N. (2009) "Nonlinear free vibration of piezoelectric laminated composite plate." *Finite Elements in Analysis and Design*, 45(10), 686-694. Doi: [10.1016/j.finel.2009.05.004](https://doi.org/10.1016/j.finel.2009.05.004)
4. Dogan, A. (2012) " Investigation of the effect of shell plan-form dimensions on mode-shapes of the laminated composite cylindrical shallow shells using SDSST and FEM" *Steel and Composite Structures*, 12(4), 303-324, 2012. Doi:[10.12989/scs.2012.12.4.303](https://doi.org/10.12989/scs.2012.12.4.303)
5. Dogan, A. (2016) " Tabakalı kompozit plakların serbest titreşim analizinde kalınlığın ve anizotropinin etkisi." *Nigde University Journal of Engineering Sciences*, 5(1), 1,37-53. Doi: [10.28948/ngumuh.239352](https://doi.org/10.28948/ngumuh.239352)
6. Fazzolari, F. A., and Carrera, E. (2013) "Free vibration analysis of sandwich plates with anisotropic face sheets in thermal environment by using the hierarchical trigonometric Ritz formulation." *Composites Part B: Engineering*, 50, 67-81. Doi: [10.1016/j.compositesb.2013.01.020](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.01.020)
7. Kant, T., and Swaminathan, K. (2001) "Analytical solutions for free vibration of laminated composite and sandwich plates based on a higher-order refined theory." *Composite Structures*, 53(1), 73-85. Doi: [10.1016/S0263-8223\(00\)00180-X](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00180-X)
8. Liu, M. L., and To, C. W. S. (2003) "Free vibration analysis of laminated composite shell structures using hybrid strain based layerwise finite elements." *Finite elements in analysis and design* 40(1), 83-120. Doi: [10.1016/S0168-874X\(02\)00193-2](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(02)00193-2)
9. Mahi, A., Adda Bedia, E. A., Tounsi, A. (2015) "A new hyperbolic shear deformation theory for bending and free vibration analysis of isotropic, functionally graded, sandwich and laminated composite plates." *Applied Mathematical Modelling*, 39(9), 2489-2508. Doi: [10.1016/j.apm.2014.10.045](https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.10.045)
10. Malekzadeh, P. (2009) "Three-dimensional free vibration analysis of thick laminated annular sector plates using a hybrid method." *Composite Structures*, 90(4), 428-437. Doi:[10.1016/j.compstruct.2009.04.015](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.04.015). Doi: [10.1016/j.compstruct.2009.04.015](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.04.015)
11. Nikhil, M. K., Indrajeet, B.S., Utkarsh, D.C., Manoharan, R. (2018) "Modal Analysis of Hybrid Laminated Composite Sandwich Plate." *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 12453-12466. Doi: [10.1016/j.matpr.2018.02.225](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.225)

12. Rajawat, A.S., Sharma, A.K., and Gehlot, P. (2018) "Free vibration analysis of Stiffened Laminated Plate using FEM." *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 5313-5321. Doi: [10.1016/j.matpr.2017.12.115](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.115)
13. Thai H. T., and Kim, S. E. (2010) "Free vibration of laminated composite plates using two variable refined plate theory." *International Journal of Mechanical Sciences*, 52(4), 626-633. Doi: [10.1016/j.ijmecsci.2010.01.002](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2010.01.002)
14. Yadawad, G., and Fernandes, R. J. (2018) "Free Vibration Analysis of Laminated Composite Plate using FSDT with Finite Element Approach." *International Journal of Mechanics and Solids*, 13(1), 1-8.