

HİBRİT KATMANLI İNCE BİR KOMPOZİT PLAĞIN ANLIK BASINÇ YÜKÜ ALTINDAKİ DİNAMİK DAVRANIŞININ DENEYSEL ve SAYISAL İNCELENMESİ

Akın Ömercikoğlu ^a, Cenk Aksoylar ^b, Zahit Mecitoğlu ^a, Mehmet H. Omurtag ^b

^a İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Müh. Böl. Maslak/İstanbul

^b İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Müh. Böl. Maslak/İstanbul

ABSTRACT

In this study, dynamic response of a hibrit laminated composite plate under non-ideal blast load, which are including carbon, aramid and glass fibers together, are examined by experimentally and numerically. In the experimental study, material properties of composite samples, which are manufactured with epoxy resin, are obtained as a result of tensile tests. The experimental setup designed to perform blast load tests is introduced. During the experiments, pressure distribution over the plate is measured by the three miniature pressure sensors. The pressure distribution on the plate is approximated a blast pressure function which is determine the pressure variation on the time domain and space domain. The pressure function is applied on the finite element model of the laminated hibrid plate and transient response of the plate is obtained. The plate is discretized by Shell 91 element of ANSYS V11 software and strain time histories are obtained as a result of numerical analysis. The numerical and experimental results are compared and a good agreement is obtained. Moreover, displacement time history that are obtained from ANSYS are also compared with the result of a new mixed finite element analysis.

ÖZET

Bu çalışmada karbon, aramid ve cam elyaflarını birlikte içeren hibrit katmanlı kompozit bir plağın ideal olmayan anlık basınç yükü altındaki dinamik davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında, epoksi reçine kullanılarak imal edilmiş olan kompozit numunelerin, malzeme özellikleri çekme testleri sonucunda belirlenmiştir. Anlık basınç yükü deneylerini gerçekleştirmek için tasarlanan deney düzeneği tanıtılmıştır. Deneyler sırasında, plak yüzeyinde oluşan yük dağılımı üç adet minyatür basınç duyargasıyla ölçülmüştür. Plak yüzeyindeki oluşan basınç dağılımına, zamana ve konuma bağlı olarak değişen anlık basınç yükü fonksiyonuyla bir yaklaşımda bulunulmuştur. Daha sonra basınç yük fonksiyonu hibrit katmanlı plağın sonlu eleman modeline uygulanarak, plağın zamana bağlı cevabı elde edilmiştir. Plak, ANSYS V11 yazılımının Shell 91 elemanı ile modellenmiştir. Gerinim (strain) değerlerinin zamanla değişimi sayısal analizler sonucunda elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve iyi bir uyum yakalanmıştır. Ayrıca, ANSYS

analizlerinden elde edilen yer değiştirme sonuçları yeni geliştirilen karışık sonlu elemanlar analizlerinin sonuçlarıyla da karşılaştırılmıştır.

1. Giriş

Geçtiğimiz son 25 yıllık süreçte, kompozit malzemeler havacılık alanı başta olmak üzere bir çok alanda metal ve seramik malzemelerin yerini almaya başlamışlardır. Kompozit malzemelerin kullanım alanlarının ve miktarlarının artması, kompozit malzemeler üzerinde yürütülen araştırma ve geliştirme çalışmalarının da bunlara paralel olarak artmasına neden olmaktadır.

İnce plaklar ise havacılık, gemi inşaat ve savunma sanayii sektörlerinde genellikle taşıtların kaplamalarında sıkça kullanılan yapılardır. Bu yapılarda, gerek ağırlık gerekse sağladığı diğer avantajlar nedeniyle kompozit malzeme kullanımı da günden güne artmaktadır. İnce plaklar kullanıldıkları yere bağlı olarak; atmosferde oluşan türbülanslar, patlamalar ve şok dalgaları sebebiyle anlık basınç yüklerine maruz kalmaktadırlar. Bu nedenle, bu çalışmada ince kompozit plakların anlık basınç yükü altındaki dinamik davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

Çeşitli katmanlı kompozit plakların anlık basınç yükü altındaki lineer olmayan davranışları ile ilgili yapılmış çalışmalar literatürde mevcuttur [1-7]. Bu alışma kapsamında farklı olarak, anlık basınç yükü deneyleri yapılacak olan kompozit plaklar, polimer matris sınıfına giren epoksi reçine ve cam, aramid, karbon elyaf kumaşlar birlikte kullanılarak hibrit katmanlı olarak imal edilmişlerdir. Hibrit katmanlı kompozitler cam elyafının ucuz olma özelliğini, aramid elyafının yüksek darbe dayanımı özelliğini ve karbon elyafın yüksek çekme dayanımı özelliğini bir araya getirmektedir. Ayrıca alışma kapsamında, plakların katmanlaması yüksek elastisite modülüne sahip elyaflardan düşük elastisite modülüne sahip elyaflara göre gerçekleştirilmiş ve fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin elastik davranışı için de bir model oluşturulmaya çalışılmıştır.

Deneysel çalışmaların sayısal çalışmalarla karşılaştırılması sırasında yaşanan en büyük zorluklardan biri malzeme özelliklerinin tam olarak bilinemesidir. Literatürdeki farklı kaynaklarda aynı tip malzemeler için, farklı mekanik özellikler verilebildiği gibi, deneyler sırasında kullanılan malzemelerin, literatürde yer alan malzemenin aynısı olduğundan emin olmak da oldukça gttr. Özellikle ilgilenilen malzemeler arasında örgülü elyaf kompozit malzemeler yer alıyorsa, malzemelerin mekanik özelliklerini doğru bir şekilde elde etmek daha da zorlaşmaktadır. Bunun başlıca sebebi, örgülü elyaf kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin, imalat sırasında kullanılan yönteme, uygulanılan ısılı işleme ve matris olarak kullanılan reçinenin cinsine göre farklılık göstermesidir.

Bu alışma kapsamında, öncelikle hibrit katmanlı kompozit plakların imalatında kullanılacak olan cam/epoksi, aramid/epoksi ve karbon/epoksi malzemelerinin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testleri yapılmıştır. Malzeme zelliklerinin belirlenmesinin ardından, hibrit katmanlı kompozit plak imal edilip, anlık basınç yükü deneyleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, elde edilen deneysel veriler ANSYS 11 yazılımıyla yapılan analizlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, ANSYS 11 yazılımından elde edilen sonuçlar, yeni geliştirilen karışık sonlu elemanlar metodu ile yapılmış analizlerin sonuçları ile de karşılaştırılmıştır.

Yeni geliştirilen karışık sonlu elemanlar metodu ile yapılan analizlerde, von Karman plak teorisini kullanılmıştır. Doğrusal olmayan fonksiyonel, Hellinger-Reissner prensibi ile elde edilmiş ve artımsal formülasyon kullanılarak doğrusallaştırılmıştır [8-9]. Dinamik analizlerde

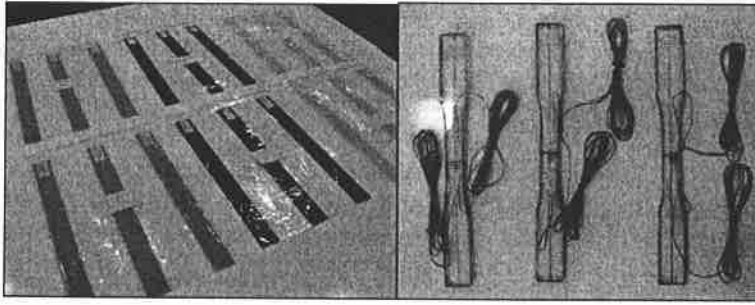
Newmark metodu kullanılmış ve iterasyonlar Newton-Raphson metodu ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca dinamik analizlerde kondensasyon yapılmamış, membran kuvvetlerinin ve eğilme momentlerinin zamana göre türevleri de hesaplanmıştır.

2. Çekme Deneyleri

Plak üretiminde kullanılan kompozitler, ortotrop malzemeler oldukları için mekanik özellikleri yöne bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle ortotrop malzemeleri tanımlamak için izotrop malzemelerde olduğu gibi tek bir elastisite modülü ve Poisson oranı yeterli olmamaktadır. Ortotrop malzemeleri tanımlayabilmek için 9 farklı malzeme özelliğinin bilinmesine gerek vardır. Bu 9 farklı malzeme özelliği şu şekilde sıralanabilir: E_{xx} , E_{yy} , E_{zz} , ν_{xy} , ν_{xz} , ν_{yz} , G_{xy} , G_{xz} , G_{yz} .

Bu malzeme özelliklerinden; E_{xx} ve ν_{xy} $0^\circ/90^\circ$ ile yönelmiş kompozit numunelerini x eksen yönünde çekerek, E_{yy} $0^\circ/90^\circ$ ile yönelmiş kompozit numunelerini y eksen yönünde çekerek elde edilmektedir. Eğer kullanılan kumaşların x ve y eksenlerindeki elyaf miktarları ve dokuma tipleri aynı ise E_{xx} ve E_{yy} elastisite modüllerinin aynı olduğu kabulüyle, sadece bir eksen yönünde çekme testi yapmak yeterli olmaktadır. Ayrıca G_{xy} malzeme özelliği, $-45^\circ/+45^\circ$ ile yönelmiş kompozit numunelerinin çekme testleri sonucunda elde edilmektedir. Geri kalan malzeme özellikleri, kompozit malzemenin kalınlık yönündeki özelliklerini içermektedir ve bu özellikleri çekme testleri sonucunda elde etmek oldukça güçtür. Bu nedenle, kalınlık yönündeki malzeme özellikleri için kullanılan epoksi reçinenin malzeme özelliklerinden yararlanılarak bir yaklaşımda bulunulabilir.

Cam/epoksi, kevlar/epoksi ve karbon/epoksinin E_{xx} , E_{yy} , ν_{xy} ve G_{xy} malzeme özelliklerini elde etmek amacıyla Şekil 1'in sol tarafında gösterildiği gibi her bir malzemeden 3 tane $0^\circ/90^\circ$ yönelimli, 3 tane de $-45^\circ/+45^\circ$ yönelimli olmak üzere toplam 6 adet çekme numunesi hazırlanmıştır. Numuneler, 4 katmanlı aynı tip elyaflardan üretilmiş kompozit plakardan CNC makinası yardımıyla doğru açılarda ve doğru boyutlarda kesilerek hassas bir şekilde elde edilmiştir. Kalınlık yönündeki diğer malzeme özelliklerini elde etmek içinse Şekil 1'in sağ tarafında gösterildiği gibi 3 adet epoksi çekme numunesi hazırlanmıştır. Epoksi çekme numuneleri için balsa ağacından kalıplar üretilmiş ve reçinenin bu kalıpların içinde donması ile numunelerin istenilen boyutlarda olması sağlanmıştır. Daha sonra, bütün çekme numunelerinin üzerlerine iki eksenli gerinim ölçerler (strain gauge) yapıştırılmıştır. Hazırlanan numunelerin çekme testleri İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi (UUBF) Kompozit Yapı Laboratuvarında (KYL) bulunan MTS marka 322 model deney donanımında gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri sırasında, numuneler üzerindeki gerinim değerleri VXi Marka EX1629 model gerinim ölçüm cihazı ile dinamik olarak ölçülürken, kuvvet verileride eş zamanlı olarak MTS cihazından ölçülmüştür. Daha sonra elde edilen değerler birlikte incelenerek malzemelere ait gerinim-gerilme grafikleri çizilmiş ve 3'er adet numuneye ait ortalama malzeme özellikleri hesaplanmıştır. Gerek çekme testleri sırasında gerekse hesaplamalar sırasında ASTM standartlarından faydalanılmıştır. Çekme testleri sonucunda elde edilen malzeme özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Kompozit ve epoksi çekme numuneleri

Çizelge 1. Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri

	Cam/Epoksi	Aramid/Epoksi	Karbon/Epoksi
Hacim Oranı, v_f	0.50	0.37	0.54
Elastisite Modülü, E_{xx}, E_{yy} (GPa)	18.5	19.6	46.7
Elastisite Modülü, E_{zz} (GPa) *	3.7	3.7	3.7
Kayma Modülü, G_{xy} (GPa)	2.7	1.2	2.8
Kayma Modülü, G_{xz}, G_{yz} (GPa) *	1.4	1.4	1.4
Poisson Oranı, ν_{xy}	0.14	0.09	0.20
Poisson Oranı, ν_{xz}, ν_{yz} *	0.353	0.353	0.353
Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	1793	1320	1399
Katman Kalınlığı, t (mm)	0.24	0.21	0.33

* Epoksi numunelerinin çekme deneyleri sonucunda elde edilen değerler.

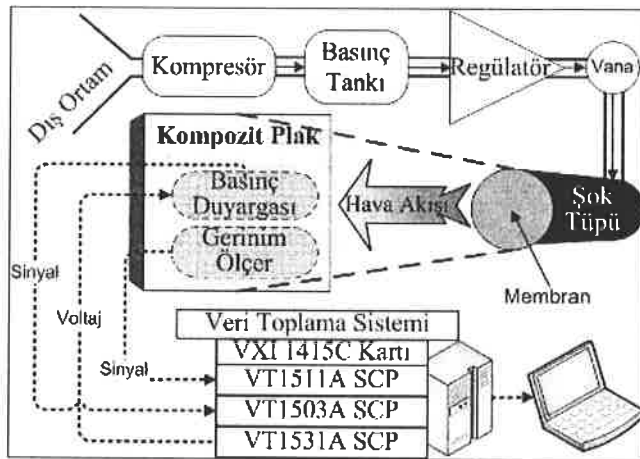
3. Anlık Basınc Yüğü Deneyleri

Malzeme özellikleri belirlendikten sonra hibrit katmanlı kompozit plak KYL'da bulunan Heatcon Composite Systems marka, HCS7500-06-321212 model kompozit imalat masası kullanılarak imal edilmiştir. İmalat yöntemi olarak elle yatırma ve vakumlama yöntemi tercih edilmiştir. Reçinenin kürleşme süresince ısıtım işlem uygulanmıştır. Kompozit plak; karbon elyaf "K", aramid elyaf "A" ve cam elyaf "C" olmak üzere 9 kat elyaf kumaştan şu şekilde katmanlanmıştır: K/K/K/A/A/A/C/C/C. Katmanlama sırasında elyafların elastisite modüllerinin yüksekte düşüğe doğru sıralanmasına dikkat edilmiştir. Bu şekilde fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin elastik davranışı modellenmeye çalışılmıştır. Plak imalatında ve çekme deneyleri sırasında kullanılan elyaflara ve reçineye ait özellikler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Kullanılan elyafların ve reçinenin özellikleri

Malzeme	Markası	Kodu	g/m ² Ağırlığı	Dokuma Tipi
Karbon Elyaf	Texindustria	CC 302	300	Plain
Cam Elyaf	Texindustria	EE 280	280	Plain
Kevlar Elyaf	Texindustria	115	115	Twill 2/2
Epoksi Reçine	Hexion	MGS L285 / 287	-	-

Hibrit katmanlı kompozit plağın anlık basınç yükü deneylerini gerçekleştirebilmek için Şekil 2’de gösterilen şemaya göre bir deney düzeneği kurulmuştur. Deney düzeneğinin çalışması, kompresörün dış ortamdan aldığı havayı, basınç tankına göndererek tank içerisinde depolamasıyla başlamaktadır. Tank içerisinde yeterli basınca ulaşıldıktan sonra kompresör kapatılmakta ve regülatör yardımıyla tanktan çıkış basıncı ayarlanmaktadır. Hava akışı, basınç tankının üzerinde bulunan vananın açılmasıyla başlatılmaktadır. Basınç tankından çıkan basınçlı hava Şekil 3’te gösterilen deney platformuna bağlı olan şok tüpünün içerisinde birikmektedir. Şok tüpünün içerisinde yeterli basınca ulaşıldığında, tüpün ağzında bulunan membran yırtılarak platformun diğer tarafına bağlı olan kompozit plak üzerinde anlık basınç yükü oluşturmaktadır. Deneyler sırasında membranın düzgün bir şekilde yırtılması plak yüzeyinde matematiksel olarak modellenebilecek bir basınç yükünün oluşması açısından oldukça önemlidir. Membranın yırtılması ile ilgili olarak yapılan 40’ın üzerindeki deneme sonucunda, orta noktasından zayıflatılmış 0.20 mm’lik pirinç levhanın arkasına yerleştirilen 4 mm kauçuk lastiğin istenilen en iyi yırtılma şeklini sağladığı belirlenmiştir.



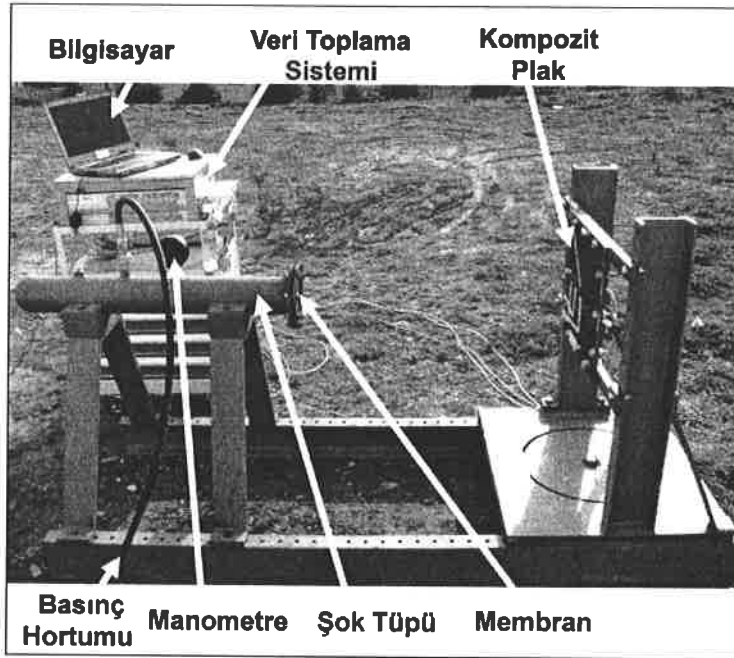
Şekil 2. Deney düzeneği şeması

Kompozit plağın dış boyutları 404 mm x 404 mm’dir. Kompozit plak Şekil 3’de gösterilen şok tüpünün de bağlı bulunduğu deney platformuna, et kalınlığı 1.2 cm olan demir bir çerçevenin üzerinde, 12 adet M12 ve 48 adet M5 civata kullanılarak ankastre olarak bağlanmaktadır. Bağlama işleminin ardından anlık basınç yükünün etki ettiği gerçek plak boyutu 300 mm x 300 mm olmaktadır. Ayrıca, deneyler sırasında şok tüpü ile plak arasındaki mesafe 85 cm olarak ayarlanmıştır.

Anlık basınç yükünün büyüklüğünü ve karakteristiğini ölçmek için, kompozit plağın ön yüzüne 3 adet Kulite Semiconductors marka LQ-125 model minyatür basınç duyargası yapıştırılmıştır. Basınç duyargalarından biri tam merkeze (B1), diğerleri de merkezden kenara doğru 7.5 cm (B2) ve 12.5 cm (B3) uzağa düz bir hat oluşturacak şekilde yerleştirilmiştir. B3 basınç duyargası, kenarda yer alan vidaların oluşturabileceği dalgalanmalardan etkilenmemesi için en uç noktaya yerleştirilmemiştir. Plak yüzeyindeki gerinim değerlerini ölçmek amacıyla da plak arka yüzeyinin ortasına 3 eksenli TML marka gerinim ölçer rozeti yapıştırılmıştır. Deneyler sırasında gerek basınç duyargalarından gerekse gerinim ölçerlerden gelen verileri

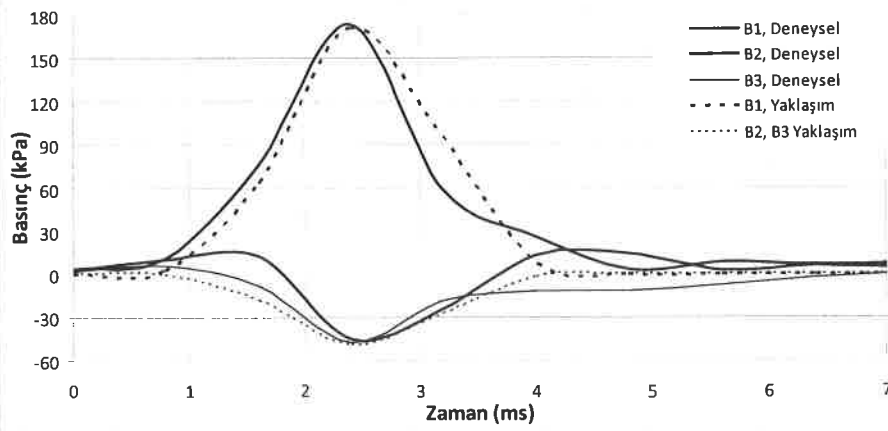
ölçebilmek için VXI Technology marka VT 1413C veri toplama kartı ve ona bağlı bulunan VT 1511A, 1503A ve 1531A sinyal koşullandırıcı kartlar kullanılmıştır.

Anlık basınç yükü deneyleri sonucunda plak yüzeyinde oluşan yük dağılımı B1, B2 ve B3 basınç duyargalarından Şekil 4’de verildiği gibi ölçülmüştür. Membranın yırtılmasıyla birlikte anlık basınç yükü plağın orta noktasına etkimekte, ve tepe noktasına ulaştıktan sonra sıfıra düşmektedir. Literatürde bu tarzda oluşan yükler ideal olmayan anlık basınç yükü olarak adlandırılmaktadır [10]. Plağın orta noktasından kenarlara doğru uzaklaşılınca ise, anlık basınç yükü ufak bir artım gösterdikten hemen sonra, emme etkisi yaratmakta ve daha sonra sıfır değerine çıkmaktadır. Yapılan çalışmalar neticesinde deneysel olarak elde edilen yük dağılımı için Denklem 1’de verilen fonksiyonla matematiksel bir yaklaşım yapılmıştır. Yaklaşım fonksiyonunda P_t tepe noktası basıncını, P_e kenar kısımlarda oluşan emme basıncı, t_e yükün etki ettiği süreyi ve a ile b ’de plak boyutları ifade etmektedir. Şekil 4’de verilen yaklaşım fonksiyonunda $P_t = 173$ kPa, $P_e = 50$ kPa, $t_e = 0.005$ sn ve $a = b = 0.3$ m olarak alınmıştır.



Şekil 3. Deney Düzenegi

$$P(x, y, t) = \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{t_e}\right) \right]^3 \left\{ \frac{P_t + P_e}{2^3 2^4 2^4} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right) \right]^4 \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi y}{b}\right) \right]^4 - \frac{P_e}{2^3} \right\}$$

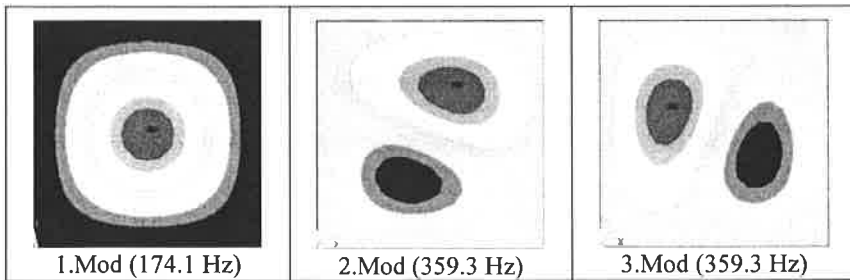


Şekil 4. B1, B2 ve B3 basınç duyargalarından ölçülen basınçların yaklaşım fonksiyonlarıyla karşılaştırılması

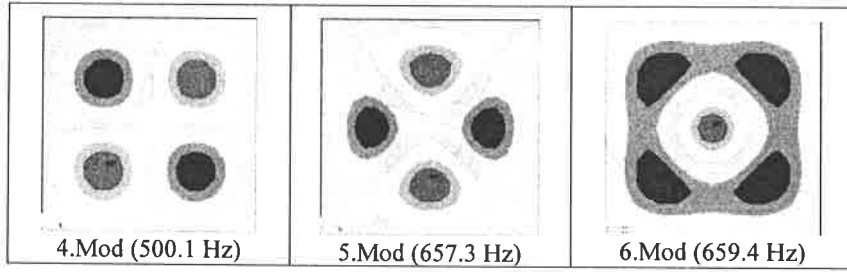
4. Sayısal Analizler

Elde edilen deneysel veriler ANSYS 11 sonlu elemanlar yazılımında yapılan analizlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca, ANSYS 11 yazılımından elde edilmiş sonuçlar yeni geliştirilen karışık sonlu elemanlar metodu analizleriyle kıyaslanmıştır.

ANSYS 11 sonlu elemanlar yazılımı ile yapılan analizlerde ANSYS kütüphanesinde yer alan 8 düğüm noktalı Shell 91 elemanı kullanılmıştır. Shell 91 elemanın, her bir düğüm noktasında x, y, z eksenleri doğrultusunda yer değiştirmeler ve bu eksenler etrafındaki dönmeler olmak üzere toplam 6 serbestlik derecesi bulunmaktadır. Shell 91 elemanı büyük deformasyonlardan kaynaklanan, doğrusal olmayan davranışları da hesaba katmaktadır. Hibrit katmanlı kompozit plak Shell 91 elemanı kullanılarak modellendikten sonra kenarlarından ankastre olarak mesnetlenmiştir. Yapılan ilk analizler neticesinde 400 elemandan oluşan çözüm ağının gerekli olan yakınsamayı sağladığı belirlenmiştir. Plakın ilk 6 mod şekli Block Lanczos yöntemi kullanılarak Şekil 5 ve 6'daki gibi elde edilmiştir. Daha sonra, Denklem 1'de verilen basınç fonksiyonu plak yüzeyine uygulanmıştır. Yükleme sırasındaki zaman adımı 0.1 ms ve zaman integrasyon yöntemi olarakta Newton Rapson seçilmiştir. Kompozit plakın sonlu eleman modeline kütle matrisi çarpanı 5, katılık matrisi çarpanı da 10^{-5} olmak üzere Rayleigh'in vizkoz sönümü uygulanmıştır.



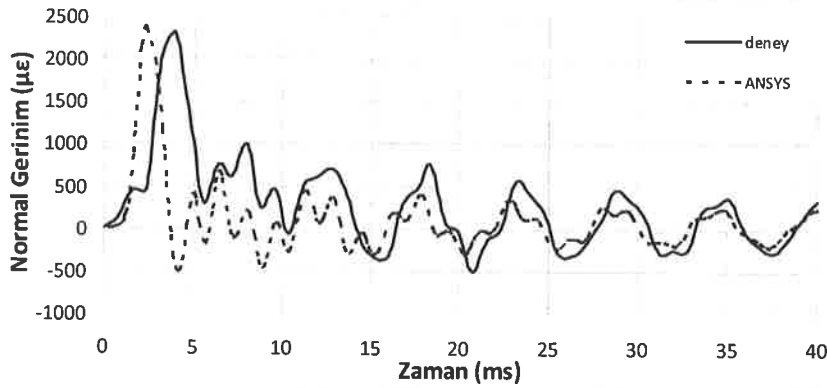
Şekil 5. Plakın 1. , 2. ve 3. mod şekilleri



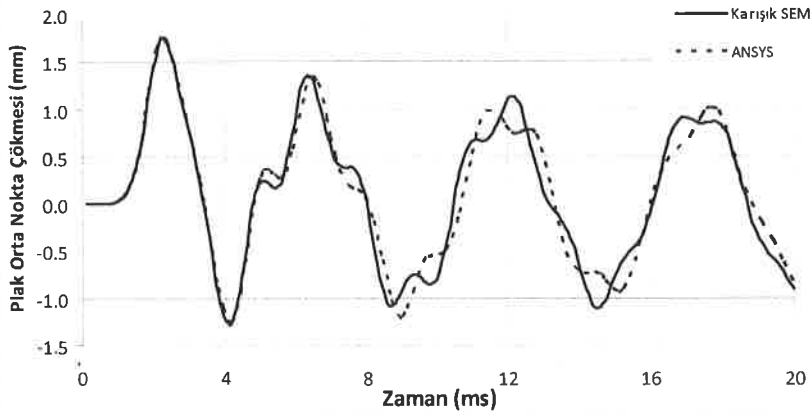
Şekil 6. Plakın 4. , 5. ve 6. mod şekilleri

Yeni geliştirilen karışık sonlu elemanlar metodu ile yapılan analizlerde, dört düğüm noktalı elemanlardan oluşan 20×20 'lik bir çözüm ağı kullanılmıştır. Geliştirilen yeni elemanın her bir düğüm noktasında üç yerdeğiştirme, üç membran kuvveti ve üç eğilme momenti olmak üzere toplam 9 serbestlik derecesi bulunmaktadır. Karışık sonlu eleman, 48 serbestlik derecesi bulunan Shell 91 elemanından %25 daha az serbestlik derecesine sahiptir. Karışık sonlu eleman ile yapılan analizlerde, ANSYS analizlerinde kullanılan sönüm ve zaman adımı parametrelerinin aynıları kullanılmıştır.

Deneyisel çalışmada, plak arka yüzeyinin ortasında yer alan 3 eksenli gerinim ölçer rozetinden gerinim değerleri ölçülmüştür. Beklendiği üzere her üç gerinim değerinin de zamanla değişimi benzer olarak elde edilmiştir. Yapılan sonlu elemanlar analizleri ile de bu sonuçlar doğrulanmıştır. Plak üzerindeki yatay eksenden ölçülen gerinimin ANSYS yazılımından elde edilen sonuçlarla karşılaştırması Şekil 7'de verilmiştir. Ayrıca, karışık sonlu elemanlar metodu ile elde edilen plak orta noktası çökmeleri ve ANSYS sonuçlarıyla karşılaştırılması Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 7. Deneyel sonuçların ANSYS ile karşılaştırılması



Şekil 8. Karışık Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) sonuçlarının ANSYS ile karşılaştırılması

5. Sonuç ve Değerlendirme

Gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleriyle, plak yüzeyinde ölçülen maksimum gerinim değeri için oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Deneysel olarak ölçülen maksimum gerinim değeri ile sayısal olarak hesaplanan maksimum gerinim değeri arasında %3.1 fark bulunmaktadır. Anlık basınç yükünün etki ettiği ve hemen sonrasındaki bölgede, gerinimin zamanla değişim karakteristiği de deneysel sonuçlarla benzer çıkmıştır. Fakat bu bölgede sonlu elemanlar analizi ile hesaplanan değerler, deneysel sonuçlardan elde edilen gerinim değerlerinden, bir miktar düşük olarak hesaplanmıştır. Bu farklılığın basınç fonksiyonundaki yaklaşımdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Hibrit katmanlı kompozit plağın serbest titreşim yaptığı bölgede ise, deneysel ve sayısal sonuçlar titreşim frekansı açısından tutarlılık göstermektedir. Gerek deneysel, gerekse sayısal sonuçlarda gerinim değerlerine 1. mod dışında başka bir moddan da katkı geldiği net bir şekilde görülmektedir. Gerinim değerlerine katkı yapan bu mod daha dikkatli bir şekilde incelenip frekansı hesaplandığında ise, frekansının 680 ila 700 Hz arasında olduğu görülmüştür. Geometrik nonlineerlikler ve düzlem içi katılık etkileri sebebiyle titreşim frekanslarının doğal frekanslardan bir miktar daha yüksek olacağı da göz önünde bulundurularak, titreşime katkı yapan diğer modun Şekil 6'da verilen 6. mod olduğu düşünülmektedir. İlk bakışta 1. moddan sonra sırasıyla diğer modların etkin olacağı görüşü hakim olsa da, anlık basınç yükünün ve plağın, plak orta noktasından geçen x, y ve köşegen eksenlerine göre simetrik olmasından dolayı titreşime sadece bu eksenlere göre simetrik olan modlardan katkı gelmektedir. Şekil 5'ten de görülebileceği gibi 2., 3. ve 4. modlar x ve y eksenlerine göre simetrik değilken, 5. mod da köşegen eksenlerine göre simetrik değildir. Şekil 6'da gösterilen 6. mod ise hem x ve y eksenlerine göre hem de köşegen eksenlerine göre simetriktir.

ANSYS'te gerçekleştirilen sayısal analizlerde toplam 6726 bilinmeyen sayısı bulunurken, yeni geliştirilen karışık sonlu elemanlar metodunda bilinmeyen sayısı %45 daha azaltılmış olarak 3729'dur. Buna rağmen, geliştirilen karışık sonlu elemanlarla elde edilen yer değiştirme sonuçları, ANSYS sonuçları ile son derece uyumludur. Hatta zorlanmış titreşim bölgesinde birbirinin aynı sonuçlar elde edilmiştir. Karışık sonlu elemanın teorik

formülasyonu aynı sempozyumda “Plakların doğrusal olmayan dinamik davranışının karışık SE yöntemi ile analizi” başlıklı bildirisinde daha detaylı bir şekilde yer almaktadır [11].

Teşekkür

Bu bildiri TÜBİTAK tarafından desteklenen 106M450 nolu “Anlık Basınç Yüğü Etkisindeki Homojen Olmayan Plakların Doğrusal Olmayan Dinamik Davranışının, Sonlu Elemanlarla Çözümü” projesi kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan hazırlanmıştır.

Kaynaklar

- [1] Türkmen, H.S., Mecitoğlu, Z., “Nonlinear structural response of laminated composite plates subjected to blast loading” AIAA Journal, 37 (12) 1639-1647, 1999.
- [2] Batra, R.C., Hassan, N.M., “Response of fiber reinforced composites to underwater explosive loads” Composites Part B: Engineering, 38 (4) 448-468, 2007.
- [3] Harras, B., Benamar, R., White G.R., “Experimental and Theoretical investigation of the linear and non-linear dynamic behaviour of a glare 3 Hybrid composite panel” Journal of Sound and Vibration, 252 281-315, 2002.
- [4] Batra, R.C., Hassan, N.M., “Blast resistance of unidirectional fiber reinforced composites” Composites Part B: Engineering, 39 (3) 513-536, 2008.
- [5] - Türkmen, H.S., Mecitoğlu, Z., “Dynamic response of a stiffened laminated composite plate subjected to blast load” Journal of Sound and Vibration, 221(3) 371-389, 1999.
- [6] Kazancı, Z., Mecitoğlu, Z., “Nonlinear dynamic behavior of simply supported laminated composite plates subjected to blast load” Journal of Sound and Vibration, 317 (5) 883-897 2008.
- [7] Jacinto, A.C., Ambrossini, R.D. and Danesi R.F., “Experimental and computational analysis of plates under air blast loading” International Journal of Impact Engineering, 25 927-947, 2001.
- [8] Başar, Y., Omurtag, M.H., “Free-vibration analysis of thin/thick laminated structures by layer-wise shell models” Computers and Structures, 74 409-427, 2000.
- [9] Doğruoğlu, A.N., Omurtag, M.H., “Stability analysis of composite-plate foundation interaction by mixed FEM” Journal of Engineering Mechanics ASCE, 126(9) 928-936, 2000.
- [10] Baker, W.E., “Explosions in Air” University of Texas Press-1973.
- [11] Aksoylar, C., Ömercikoğlu, A., Mecitoğlu, Z., Omurtag, M.H., “Plakların doğrusal olmayan dinamik davranışının karışık SE yöntemi ile analizi”, XVI. Ulusal Mekanik Kongresi, Kayseri, 22-26 Haziran 2008.