

**Proje No: 102M106**

**Çok katmanlı malzemelerde gerilme dalga geçişi**

Prof.Dr. Mustafa Güden  
Yard. Doç. Dr. Alper Taşdemirci

AĐUSTOS 2007  
İZMİR

## ÖNSÖZ

Bir çok mühendislik alanında kullanımı oluşan çok katmanlı ve fonksiyonel dereceli malzeme yapılarındaki gerilme dalga geçişine ilgi artmaktadır. Sonsuz ve yarı sonsuz homojen malzemelerde dalga geçişi üzerine analitik çözümler geliştirilmesine karşın, çok katmanlı malzemeler incelendiğinde çözüm oldukça kompleks bir hale gelmektedir. Çok katmanlı malzemelerde gerilme geçişi bir çok parametrenin kompleks fonksiyonu olup deneysel ve 3-boyutlu modellerle birlikte incelendiğinde daha iyi anlaşılacaktır. Bu uluslararası projede klasik yüksek hız test ve nümerik simülasyon metotları kullanılarak çok katmanlı malzemelerde dalga geçişini anlamaya yönelik yeni bir yaklaşım, University of Delaware'den Prof. Dr. I. W. Hall'un yöneticisi olduğu NSF projesi kapsamında çalışılmıştır. Proje çalışmaları Makina, Kimyasal Teknolojiler Malzeme ve imalat Sistemleri Araştırma Grubu tarafından desteklenmiştir.

## İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ .....	10
2. GENEL BİLGİLER.....	12
2.1 Çok katmanlı hafif zırh malzeme sistemleri .....	12
2.2 Fonksiyonel dereceli malzemeler .....	15
2.3 Projenin çıkış noktası ve amacı .....	17
3. GEREÇ ve YÖNTEM.....	18
3.1 Hopkinson Basınç Bar testi .....	18
3.2 Hopkinson Basınç Bar testi verilerinin işlenmesi.....	23
3.3 Tek, iki ve üç katmanlı seramik, kompozit ve lastik .....	25
3.4 Fonksiyonel dereceli SiC/Al metal matris kompozit.....	30
4. BULGULAR.....	34
4.1 Tek katmanlı seramik, kompozit ve lastik testi .....	34
4.2 İki katmanlı seramik ve kompozit testi.....	44
4.3 Üç katmanlı seramik, lastik ve kompozit testi.....	48
4.4 Fonksiyonel dereceli SiC/Al metal matris kompozit testi .....	55
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	81
5.1 Katmanlı seramik, lastik ve kompozit zırh yapıları .....	81
5.2 FD katmanlı SiC/Al kompozit yapılar.....	82

## Tablo Listesi

Tablo 1	Modelde kullanılan malzeme özellikleri .....	29
Tablo 2	FDM üretiminde kullanılan tozların özellikleri .....	30
Tablo 3	FD kompozit numunelerin sınıflandırılması .....	32
Tablo 4	Yüksek deformasyon testleri ve kırılan numuneler.....	76

## Şekil Listesi

Şekil 1	Çelik zırhda ters tabanca konsepti: merminin kinetik enerjisini zırhı delerek harcaması.	12
Şekil 2	Seramik (alüminyum oksit) ve S2 cam fiber SC15 epoksi kompozitten oluşan katmanlı zırh malzeme sistemi.	13
Şekil 3	(a) seramik ve polimer kompozitten oluşan çok katmanlı zırh koruma sistemi, (b) seramik tabakasının mermiyi deforme etmesi ve konik kırılması ve, (c) önden görünüş.	13
Şekil 4	Balistik teste tabi tutulmuş entegre zırhın epoksiye gömülmüş hasar bölgesi kesit görünüşü: alümina seramik ve S2/SC15 epoksi kompozit destek tabakası.	14
Şekil 5	(a) sürekli ve (b) kesikli FDM yapıları.	15
Şekil 6	(a) Duran yarı sonlu uzunluktaki çubuğa sonlu uzunluktaki bir çubuğun çarpması ve bunun sonucunda (b) farklı zamanlarda çubukta oluşan basma gerilmeleri.	19
Şekil 7	Yüksek deformasyon hızlarında kullanılan HBB'nın şematik gösterimi (a)HBB ve ölçüm sistemleri ve (b)genel şematik gösterim.	20
Şekil 8	University of Delaware HBB test düzeneği.	24
Şekil 9	HBB'dan elde edilen tipik birim şekil değişimi ölçümleri.	24
Şekil 10	Şekil 9'daki birim şekil değişimi ölçümünden hesaplanan (a) gerilme ve (b) birim şekil değişimi hızı grafikleri.	25
Şekil 11	Deneylerde kullanılan S2 cam fiber/SC-15 kompozit plakasının kalınlık yönündeki mikro yapısı	26
Şekil 12	(a) Sınırlandırılmış (lastik) 3 katmanlı test numunesi ve (a) birim şekil değişimi geyçlerin numune üzerinde yerleşimin şematik gösterimi.	27
Şekil 13	(a) HBB sonlu elemanlar çubuk meş modeli ve (b) çubuk kesit alanında kullanılan meş modeli.	28
Şekil 14	FD kompozit hazırlama basamakları.	31
Şekil 15	Toz basmada kullanılan çelik kalıp.	31
Şekil 16	İki katmanlı bir numunenin deformasyon sonrası kesit görünüşü.	32
Şekil 17	Seramik numune HBB testinde alan ve ileten çubuklarda birim şekil değişimi geyç değerleri: (a) deneysel ve (b) nümerik.	35
Şekil 18	Kompozit numune HBB testinde alan ve ileten çubuklarda birim şekil değişimi geyç değerleri: (a) deneysel ve (b) nümerik.	36
Şekil 19	(a) seramik numune üzerinden 3 farklı yerde hesaplanan Z-gerilmesi (numune boyunca), (b) kompozit numunede 3 yerden hesaplanan Z-gerilmesi ve numunenin ortasından deneysel ölçülen Z-gerilmesi, (c) seramik ve (d) kompozit.	38
Şekil 20	Seramik numunenin ortasındaki gerilmeler: (A)nümerik, (B) numune üzerindeki geyç ve (C) HBB'dan hesaplanan. (Grafikler zaman ekseninde kaydırılmıştır).	39
Şekil 21	(a) seramik ve (b) kompozit numunede gerilme-uzaklık-zaman grafikleri.	40
Şekil 22	EPDM lastik numunenin serbest ve sınırlı durumda HBB testi sonucunda ölçülen gerilme-birim şekil değişimi grafikleri .	41
Şekil 23	EPDM lastik numunenin Ogden modeli (nümerik) ve deneysel gerilme-şekil değişimi grafikleri.	42
Şekil 24	EPDM lastik malzemenin farklı zamanlarda HBB çubukları arasındaki deformasyonu: (a) deneysel ve (b) nümerik.	43
Şekil 25	İki katmanlı seramik/kompozit malzemede (a)deneysel ve (b)nümerik alan, geri gelen ve iletilen gerilmeler ve (c)nümerik gerilme-zaman-uzaklık grafiği.	45
Şekil 26	İki katmanlı malzemede gerilme hesaplamaları: (a)seramik numunede 3 farklı noktadan hesaplanan Z-gerilmesi ve (b)ortadan deneysel ölçülen gerilme, (c) kompozit numunede 3 farklı noktadan hesaplanan Z-gerilmesi ve (d)ortadan deneysel ölçülen gerilme.	47

Şekil 27	Üç katmanlı malzeme 10 m/s çarpan çubuk hızı HBB testinde alan, geri gelen ve iletilen gerilmeler: serbest lastik durumu: (a) deneysel ve (b) nümerik ve sınırlı lastik durumu:(c) deneysel ve (d) nümerik sonuçlar.....	50
Şekil 28	Üç tabakalı serbest lastik malzeme HBB testinde (V = 10 m/s) seramikteki (a)deneysel ve (b)nümerik gerilmeler ve kompozitteki (c) deneysel ve (d) nümerik gerilmeler.....	50
Şekil 29	Sınırlı lastik durumu için üç katmanlı malzemenin HBB testinde ..... (V = 10 m/s) (a) seramik malzemede oluşan deneysel ve nümerik gerilmeler ..... (b) kompozit malzemede oluşan deneysel ve nümerik gerilmeler. ....	51
Şekil 30	Üç katmanlı malzeme HBB testinde (V = 16 m/s) serbest ve ..... sınırlı lastik durumunda (a) seramik malzemedeki deneysel gerilmeler ve ..... (b) kompozit malzemedeki deneysel gerilmeler. ....	52
Şekil 31	Üç katmanlı malzeme HBB testinde (V = 16 m/s) serbest ve ..... sınırlı lastik durumunda (a) seramik malzemedeki nümerik gerilmeler ve ..... (b) kompozit malzemedeki nümerik gerilmeler.....	53
Şekil 32	Üç katmanlı seramik/lastik/kompozit malzemede nümerik..... gerilme-zaman-uzaklık grafiği (a) serbest lastik ve (b) sınırlı lastik durumları. ....	54
Şekil 33	23,5 m/s HBB testine tabi tutulmuş (a) seramik/kompozit (b) serbest lastikli üç katmanlı ve (c) sınırlı lastikli üç katmanlı malzemelerin deformasyon sonrası n resimleri. ....	55
Şekil 34	Statik deformasyon sonucunda Al ve FD SiC/Al kompozit numunelerde ..... nispi yoğunluk değişimi. ....	56
Şekil 35	Tek katmanlı Al ve kompozit nümunelerin gerilme-birim şekil değişimi grafikleri (a)saf Al, (b) %10SiC/Al ve (c)%20 SiC/Al.....	57
Şekil 36	Tek katmanlı nümunelerin gerilme-birim şekil değişimi grafikleri. ....	57
Şekil 37	(0/10) 2 katmanlı numunelerin gerilme-birim şekil değişimi grafikleri.....	58
Şekil 38	(10/20) 2 katmanlı numunelerin gerilme-birim şekil değişimi grafikleri. ....	59
Şekil 39	(0/10/20) 3 katmanlı numunelerin gerilme-birim şekil değişimi grafikleri. ....	59
Şekil 40	(0/5/10/15/20) 5 katmanlı numunelerin gerilme-birim şekil değişimi grafikleri. ....	60
Şekil 41	(0/2/4/6/8/10) 6 katmanlı numunelerin gerilme-birim şekil değişimi grafikleri. ....	60
Şekil 42	(0/10) 2 katmanlı numunenin tek katmanlı numunelerle karşılaştırılması. ....	61
Şekil 43	(10/20) 2 katmanlı numunenin tek katmanlı numunelerle karşılaştırılması. ....	61
Şekil 44	(0/10/20) 3 katmanlı numunenin tek katmanlı numunelerle karşılaştırılması. ....	62
Şekil 45	2 ve 3 katmanlı numunelerin karşılaştırılması. ....	62
Şekil 46	5 ve 6 katmanlı numunelerin karşılaştırılması. ....	63
Şekil 47	Çok katmanlı numunelerin karşılaştırılması.....	63
Şekil 48	Tek katmanlı numunelerde %10 birim şekil değişimindeki gerilme miktarının ..... %SiC miktarına göre değişimi. ....	64
Şekil 49	Çok katmanlı numunelerde %10 birim şekil değişimindeki gerilme miktarının ortalama %SiC oranına göre değişimi.....	65
Şekil 50	Al numunelerde deformasyon hızının birim şekil değişimi ile değişimi. ....	66
Şekil 51	0/2/4/6/8/10 numunelerde deformasyon hızının ..... birim şekil değişimi ile değişimi. ....	66
Şekil 52	Al numunelerin değişik deformasyon hızlarındaki ..... gerilme-birim şekil değişimi grafikleri. ....	67
Şekil 53	%10 SiC numunelerin değişik deformasyon hızlarındaki ..... gerilme-birim şekil değişimi grafikleri. ....	68
Şekil 54	%20 SiC numunelerin değişik deformasyon hızlarındaki ..... gerilme-birim şekil değişimi grafikleri. ....	68
Şekil 55	Tek katmanlı numunelerin benzer deformasyon hızlarında gerilme-birim şekil değişimi grafiklerinin karşılaştırılması.....	69
Şekil 56	0/10 numunenin benzer deformasyon hızlarında tek katmanlı malzemelerin gerilme-birim şekil değişimi grafikleri ile karşılaştırılması.....	69

Şekil 57	10/20 malzemenin benzer deformasyon hızlarında tek katmanlı malzemelerin gerilme- birim şekil değişimi grafikleri ile karşılaştırılması.....	70
Şekil 58	2 ve3 katmanlı numunelerin gerilme- birim şekil ..... değişim eğrilerinin karşılaştırılması. ....	71
Şekil 59	0/5/10/15/20 numunelerin değişik deformasyon hızlardaki ..... gerilme- birim şekil değişimi eğrileri. ....	71
Şekil 60	0/2/4/6/8/10 numunelerin değişik deformasyon hızlardaki ..... gerilme- birim şekil değişimi eğrileri. ....	72
Şekil 61	5 ve 6 katmanlı numunelerin gerilme- birim şekil değişimi ..... eğrilerinin karşılaştırılması.....	72
Şekil 62	Statik ve yüksek hız deformasyon akma gerilmeleri. ....	73
Şekil 63	Tek katmanlı Al ve %20 SiC/Al malzemelerde akma gerilmesinin ..... deformasyon hızı ile değişimi. ....	74
Şekil 64	Al, 0/10 ve 0/10/20 malzemelerde akma gerilmesinin ..... deformasyon hızı ile değişimi. ....	74
Şekil 65	Al, 5 ve 6 tabakalı malzemelerde akma gerilmesinin ..... deformasyon hızı ile değişimi. ....	75
Şekil 66	Yüksek deformasyon sonucu kırılan numuneler; (a) 0/10/20 numunelerde ara yüzeyin ayrılması (0/10 ara yüzeyi), (b) 0/2/4/6/8/10 numunelerde ara yüzeyin ayrılması (0/2 ara yüzeyi) ve (c) 0/5/10/15/20 numunelerde ara yüzeylerin ayrılması. ....	76
Şekil 67	0/10/20 numunenin ayrılan 0/10 ara yüzeyinin TEM fotoğrafı.....	77
Şekil 68	0/10/20 numunenin ayrılan 0/10 ara yüzeyinin TEM fotoğrafı.....	77
Şekil 69	2 katmanlı numunenin profili (10/20), t = 0 mikrosaniye.....	78
Şekil 70	a) Modelleme sonucunda elde edilen deformasyon profili, b) 2 katmanlı numunenin test sonrasındaki fotoğrafı (t = 700 mikrosaniye).....	79
Şekil 71	10/20 numunenin gerilme-birim şekil değişimi davranışı. ....	80
Şekil 72	%10 ve %20 SiC içeren katmanlardaki gerilme değerleri. ....	80

## ÖZET

Katmanlı malzemelerin yüksek hız deformasyon davranışı deneysel ve nümerik metotlar birlikte kullanılarak incelenmiştir. Hopkinson Basınç Bar (HBB) tekniğinin, kullanılan nümerik modelleri doğrulamak için oldukça uygun bir metot olduğu gösterilmiştir. Kompleks çok katmanlı malzemelerdeki gerilme dalgası geçişinin modellenmesinin fizibilitesi ve faydaları açıkça görülmüştür. HBB’ında varsayılan tek yönlü dalga geçişi yaklaşımının, dalga geçişinin anlaşılmasında yetersiz olduğu ve dalga geçişinin anlaşılması için nümerik ve deneysel yöntemlerin birlikte kullanılması gerektiği gösterilmiştir. Poisson oranı yüksek arayüzey malzemesinin yatay yöndeki deformasyon sınırlandırılması durumunda arka tabakaya elastik dalgaların kolay geçtiği, ancak düşük elastik modüllü bir arayüzey malzemesinin ise arka tabakaya iletilen gerilmeyi azalttığı gösterilmiştir.

Projenin ikinci kısmında değişen takviye hacim oranlarına sahip SiC parçacık takviyeli Al matris metal matris kompozitlerden oluşan Fonksiyonel Dereceli Malzemeler (FDM), toz metalürjisi yöntemiyle hazırlanarak, statik ve dinamik yükler altındaki ezilme davranışları incelenmiştir. Dinamik testler basma tipi HBB testi kullanılarak 1000-3000s<sup>-1</sup> aralığında yapılmıştır. HBB ile yapılan dinamik testler FDM’nin katmanları arasında kompleks dalga yayınımlarını göstermiştir. Numuneler yüksek hızlarda yapılan dinamik basma testlerinde özellikle, empedansı en düşük olan katmanın ara yüzeyinden kırılmıştır. Bu sonuç, %10 ve %20 SiC katmanlı kompozit malzeme sisteminin LSDYNA-3 kullanılarak yapılan sonlu elemanlar modeliyle de doğrulanmıştır. Modelleme sonucunda, dinamik basma testleri esnasında en düşük empedansa sahip katmanın daha yüksek basma gerilme-zaman geçmişine sahip olduğu görülmüştür. Kırılan numunelerin mikroskobik olarak incelenmesi, katmanlı numunelerde mekanik olarak en zayıf bağın katmanlar arasındaki ara yüzeyler olduğunu göstermiştir. Bunun tek nedeni ara yüzeylerde ince bir oksit tabakasının oluşmasıdır.

Anahtar sözcükler: Çok katmanlı malzeme sistemleri, zırh malzeme sistemi, fonksiyonel dereceli kompozitler; gerilme dalga geçişi.

## ABSTRACT



The behavior of a multi-layer material at high strain rate was investigated by a combination of experimental and numerical techniques. It was shown that the Split Hopkinson Pressure Bar is a valuable tool to validate finite element modeling. The feasibility and usefulness of modeling stress wave propagation in complex multi-layer materials was thus demonstrated. The one dimensional stress state usually assumed for conventional SHPB testing is inapplicable but it is shown that both numerical and experimental results can nevertheless be coupled for a complete understanding of the wave propagation characteristics. It was shown that lateral constraint of an interlayer with a significant positive Poisson's ratio allows relatively easy transmission of the elastic compressive wave into the backing plate whereas a low modulus interlayer reduces the ease of elastic wave transmission.

In the second part of the project Functionally Graded Material (FGM) systems composing of SiC-particulate reinforced Al Metal Matrix Composites (MMCs) of varying reinforcement volume fractions were prepared and investigated for mechanical properties under compression at quasi-static and high strain rates. High strain rate tests in the range of  $1000-3000s^{-1}$  were conducted using a compression type Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) set-up. High strain rate testing in SHPB involved complex wave propagation events between the layers of FGM. The samples failed under compression at high strain rates particularly at the interface of the layer of the lowest impedance. This result was also confirmed with LSDYNA3 finite element modeling of a 10 and 20% SiC layered composite material system. The model has shown that higher compressive stress-time history occurred in the layer of the lowest impedance during SHPB testing. Microscopic observation of the failed samples was further shown that the mechanically weakest link of the layered samples was the interfaces between the layers. This was solely due to the formation of a thin oxide layer at the interfaces.

Key words: Multi-layered materials, armor material systems; functionally graded composites; stress wave propagation

## 1. GİRİŞ

Gerilme dalga geçişi izotropik, homojen elastik/plastik malzemelerde oldukça yaygın çalışılmasına karşın, bu diğer malzemeler için geçerli değildir. Jeolojiden otomobil ve savunma sanayisine kadar kullanım alanı bulan kompleks malzeme yapılarındaki gerilme dalga yayılımına ilgi artmaktadır. Diğer birçok malzemenin yanında, metal köpük, visko elastik ve fonksiyonel dereceli malzemeler elastik, plastik ve şok dalgaların geçtiği durumlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır ve bu malzemelerdeki gerilme dalgası geçişi üzerine önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Sonsuz ve yarı sonsuz homojen malzemelerde dalga geçişi üzerine bazı analitik çözümler de geliştirilmiştir. Çok katmanlı malzemeler incelendiğinde çözüm oldukça kompleks hale gelmektedir ve bir yaklaşım ise geçirgenlik katsayılarını kullanmaktır. Analitik çözümler sadece lineer elastik malzemeler için sonuç vermektedir ve bu çözümlerde deformasyon hızı, sıcaklık gibi etkiler genellikle ihmal edilmekte ve 3 eksenli gerilme dalgası geçişi çözümü de oldukça zordur.

Buna karşın, polimer ve köpük gibi doğrusal olmayan davranış gösteren malzemelerin davranışları daha iyi anlaşıldıkça ve karakterize edildikçe, spesifik uygulamalar için dalga geçişini düzenleyecek malzeme kombinizasyonlarına olanak sağlamaktadır. Örneğin, bir malzemedeki diğer malzemeye dalga geçişi iki malzeme arasındaki mekanik empedans farkına bağlıdır ve düşük empedanslı malzemedeki yüksek empedanslı malzemeye dalga geçişi daha kolaydır. Dalga geçiş/reflektans dalganın nispi empedansına ve dalga karakterine bağlıdır ve küçük boyutlu malzemelerde her bir ara yüzeyde birbirini izleyen geçiş/reflektans oluşmaktadır. Ortamın boyutlarına göre küçük dalga boylarında etki analitik olarak hesaplanabilir ve fakat boyutlar arttıkça problem karmaşıklaşır ve sadece nümerik metotlarla çözülebilir.

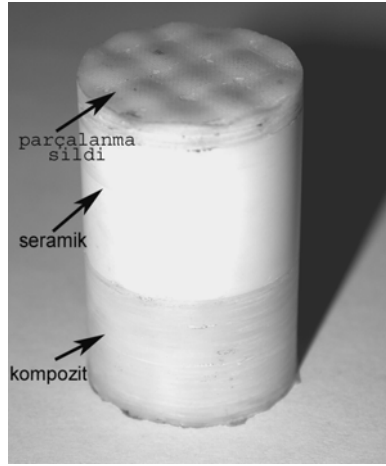
Katı malzeme kombinizasyonlarındaki gerilme dalga geçişi nümerik ve deneysel çalışmalarla incelenecektir. Amaç, istenen çeşitli etkileri oluşturmak için, dalga geçişini manipüle ederek malzeme sistemlerinin tasarlanmasıdır. Bu dalganın alçaltılması, geri dönmesi veya faz kaymasını da içine alabilir. Bu projeyi özellikle motive eden sistemler kalın polimerik kompozitler üzerine yerleştirilen seramik parçalardan oluşan zırh ve fonksiyonel dereceli metal matris kompozit malzeme sistemleridir. İlk başlarda basma gerilmesine maruz kalmasına karşın daha sonra yüzeyden dönen çekme gerilmeleri ile zırh sistemlerinde seramik tabaka kırılmaktadır. Benzer olarak fonksiyonel dereceli malzeme sistemlerinde bir çok ara yüzeyden dönen çekme gerilmeleri malzemedeki hasarlar oluşturabilir. Bu malzeme

sistemlerinde ortaya konulan ara yüzey malzemelerinin gerilme dalga geçişi üzerine oldukça etkili olduğu bulunmuştur. Buna karşın, yerleştirilen malzemenin boyutlarının ve empedansının dalga geçişi özelliklerine etkisi sistematik çalışılmamıştır. Uluslararası araştırma aktivitesini öneren bu projede çok katmanlı malzemelerde gerilme dalgası geçişi deneysel ve nümerik metotlarla ölçülmesi amaçlanmıştır.

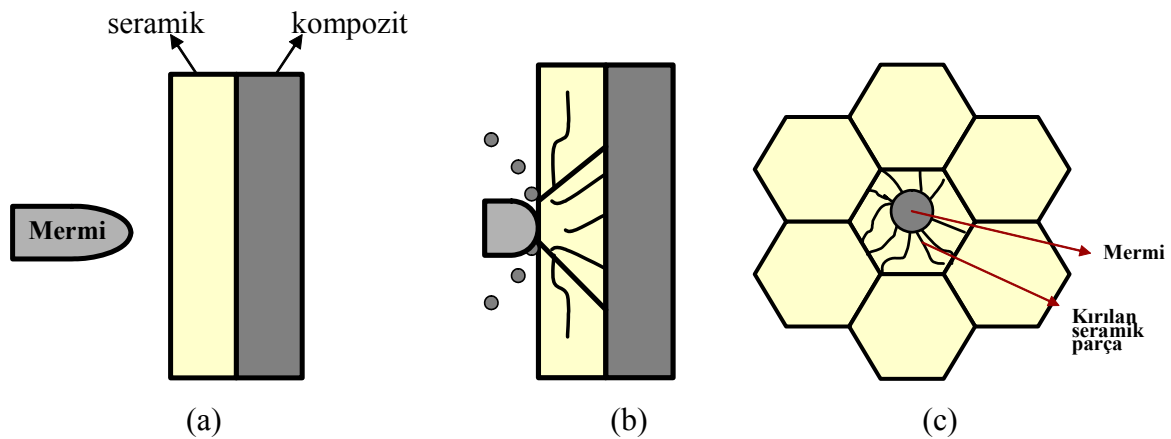
Proje iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda seramik/lastik/kompozitten oluşan konvansiyonel katmanlı zırh malzeme sistemlerinde gerilme dalgası geçişi deneysel ve nümerik metotlarla birlikte incelenmiştir. Hopkinson Basınç Bar (HBB) test sistemi gerilme dalgası geçişinin deneysel olarak ölçülmesi için kullanılmıştır. Bu yeni yaklaşım, nümerik hesaplanan gerilmeleri doğrulamak için kullanılabilir yeni bir yaklaşımdır. Projenin ikinci kısmında Fonksiyonel Dereceli (FD) SiC/Al kompozit malzeme yapıları hazırlanarak mekanik testlere tabi tutulmuştur. Bu malzemelerin deformasyon hızına bağlı mekanik özellikleri belirlenerek, sonuçlar nümerik sonuçlarla karşılaştırılmıştır.



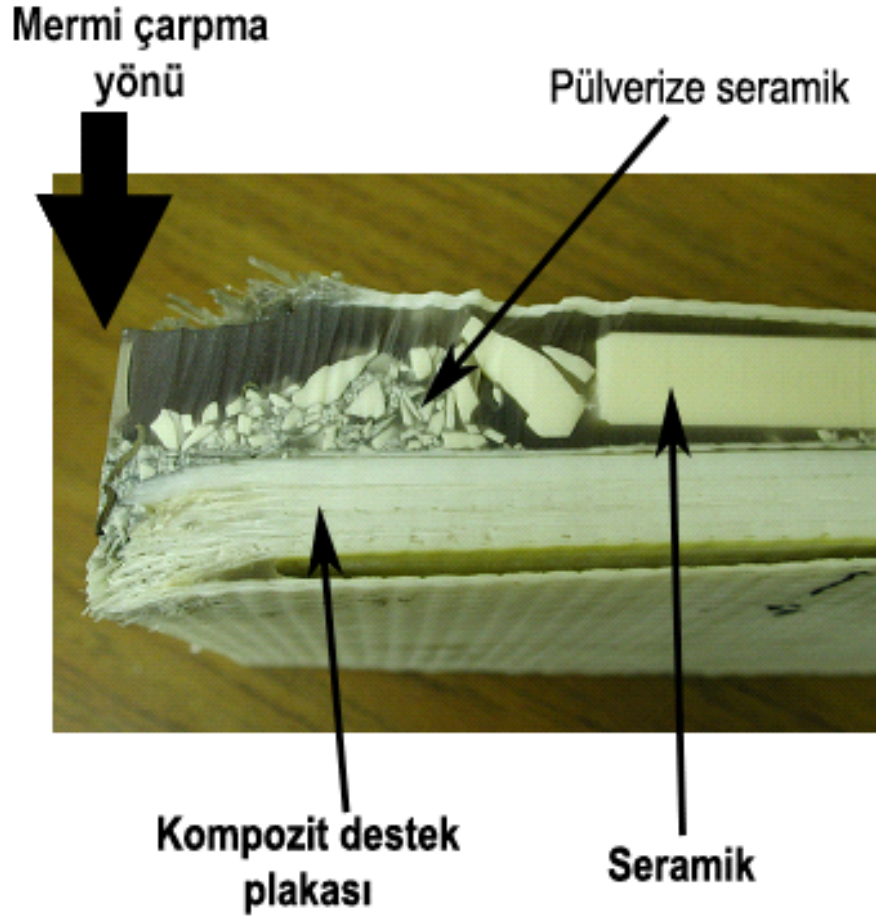
Seramik tabaka genellikle konik şekilde kırılarak arka kompozit destek tabakasına iletilen basınç ve enerjiyi azaltmaktadır (Şekil 3). Keramik tabaka ise kırılma esnasında, merminin toplam kinetik enerjisinin sadece küçük bir miktarını sönmülemektedir (VIECHNICKI, 1989). Enerji sönmüleme mekanizması esasen çarpma esnasında oluşan pülverize seramik tanecikleri (Şekil 4'den görüleceği üzere) ile merminin ucu arasındaki sürtünmedir. Kompozit arka destek tabakası parçalanmış mermi ve seramik parçacıklarını tutar ve merminin seramik tabakası ile teması sonrasında arta kalan kinetik enerjisini çeşitli deformasyon mekanizmaları ile sönmüler. Keramik tabaka genellikle altıgen veya kare şeklindeki fayansların yapıştirılması ile oluşturulmaktadır (Şekil 3(c)).



Şekil 2 Keramik (alüminyum oksit) ve S2 cam fiber SC15 epoksi kompozitten oluşan katmanlı zırh malzeme sistemi.



Şekil 3 (a) seramik ve polimer kompozitten oluşan çok katmanlı zırh koruma sistemi, (b) seramik tabakasının mermiyi deforme etmesi ve konik kırılması ve, (c) önden görünüş.



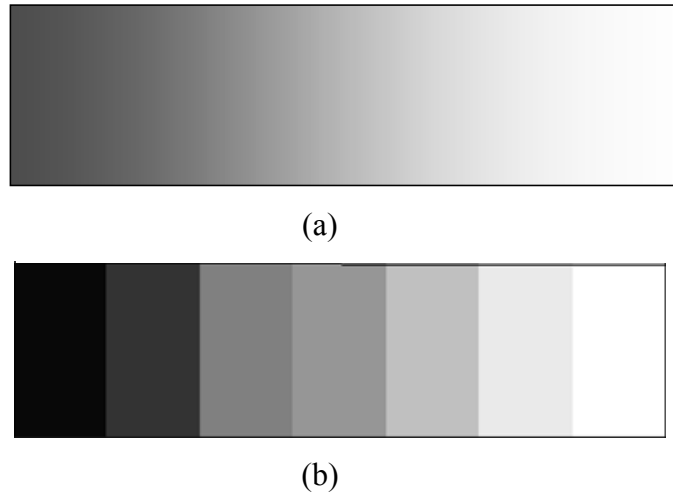
Şekil 4 Balistik teste tabi tutulmuş entegre zırhın epoksiye gömülmüş hasar bölgesi kesit görünüşü: alümina seramik ve S2/SC15 epoksi kompozit destek tabakası.

Entegre kompozit zırh yapıların çalışma mekanizmalarının anlaşılmasına paralel, önemli fonksiyonları yerine getirecek tabakalarda ilave edilmiştir. Seramik tabakanın önüne yerleştirilen ince bir polimer kompozit plaka (parçalanma şildi; Şekil 2) kırılan ve arka tabakadan ayrılan seramik parçalarının saçılmasını önlemekte ve seramikle kompozit destek tabakaları arasında yerleştirilen ince bir lastik tabakası ise kırılan seramiklerin kompozit destek tabakasına yapışık kalmasını sağlamaktadır. İnce lastik tabakası çarpma enerjisini vizkosönümleme etkisiyle absorbe ederek zırhın “çoklu çarpma” kabiliyetini artırdığı varsayılmaktadır. Ara yüzey malzemesinin yumuşak malzemedan (düşük elastik modüllü) seçilmesi zırh yapısında belirli fonksiyonların yerine getirilmesinde oldukça önemlidir. Yumuşak ara yüzey malzemesinin yüksek deformasyon hızlarında ve yüksek gerilme miktarlarında düşük akustik empedans (yoğunluk x ses hız) göstermesi ve bu düşük değeri

yüksek deformasyon miktarlarına kadar muhafaza etmesi arka destek tabakasına iletilen gerilme dalga miktarını azaltması açısından oldukça önemli bir zırh tasarım parametresidir. Lastiğin arka kompozit destek tabakasına iletilen gerilme dalgasını geciktirmekte ve aynı zamanda dalganın boyutunu azaltmakta olduğu ileri sürülmektedir (GAMA, 2001, TAŞDEMİRCİ, 2004a, 2004b, 2005a, 2005b).

## 2.2 Fonksiyonel dereceli malzemeler

Fonksiyonel Dereceli Malzemeler (FDM) kompozisyon veya mikro yapıda sürekli ve kesikli dereceli (Şekil 5) yapı oluşturmak amacı ile tasarlanan malzeme grubudur. FDM'in kullanımı ile sağlanabilecek faydaların bazıları şunlardır; a)termal gerilmelerin bölgesel kontrolü b)termo-mekanik yükler altında bölgesel plastik deformasyonun ve çatlak oluşumunun engellenmesi c)ara yüzeylerdeki gerilmelerin azaltılması ve iki farklı malzeme arasındaki ara yüzey mukavemetinin artırılması ve d)sünek malzemelerde aşınma ve korozyon direncini artırmak için kullanılan kalın seramik kaplamaların kaplanan sünek malzeme ile entegrasyonun sağlanması (SURESH, 1997, MORTENSON, 1995)



Şekil 5 (a) sürekli ve (b) kesikli FDM yapıları.

FDM'ye yönelik ilk çalışmalar, 1980'li yıllarda havacılık endüstrisinin gereksinim duyduğu, yüksek sıcaklığa ve termal gerilmelere dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi ile

Japonya'da 1987 yılında "Research on the Basic Technology for the Development of Functionally Gradient Material for Relaxation of Thermal Stress" başlığı altında oldukça büyük bir proje başlatıldı (KAWASAKI, 1997). Projenin temel amacı uzay gemilerinde kullanılan ateşleme sistemi için yüksek ısı dirençli malzemelerin geliştirilmesiydi. Oluşan yüksek termal gerilmelere karşı metalik malzemeler konvansiyonel olarak seramik ile kaplanmaktaydı. Buna karşın oluşan termal ve şok gerilmeler kaplamada çatlaklar oluşturmaktaydı. Dereceli seramik kaplama kullanımı, oluşan termal gerilmeleri önlemek için yeni bir yöntem olarak bu projede seçildi ve daha sonra bu yaklaşım farklı malzemelerin birleştirilmesinde de kullanıldı. Günümüzde, FDM kullanımına yönelik çalışmalar oldukça farklı alanlardadır. Bunların bazıları şunlardır: seramik-parçacık takviyeli polimer kompozitler (KAWASAKI, 1997, BUTCHER, 1999), Ti-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sentetik diş kökleri (IWASAKI, 1997) sentetik kemik/TiO<sub>2</sub> kompozit kaplamalar (KUMAR, 2001) ve iç ve dış yüzeyinde yoğun seramik parçacıkları bulunduran alüminyum tüpler (ZHANG,1998).

FDM'nin önemli potansiyel kullanım alanlarından birisi de savunma sanayinde kullanılmak üzere tasarlanan zırh yapılarıdır (CHIN,1999). Hafif zırh olarak adlandırılan çok katmanlı seramik-kompozit yapılar, konvansiyonel çelik zırhların yerini almaktadır. Daha önce belirtildiği üzere, çok katmanlı zırh yapıların temel çalışma prensibi, merminin sert seramik tabaka tarafından ezilmesi ve mermi deformasyonu sonucunda arta kalan kinetik enerjinin daha plastik olan kompozit tabaka tarafından sönmülmesidir. Ancak, sert seramik tabakası aynı zamanda oldukça kırılğan olması nedeni ile yatay yönde kırılmalar göstermektedir. Bu ise "çoklu çarpma" özelliğini kısıtlamaktadır. Amerikan ordusunun önem verdiği bir diğer zırh malzemesi ise fonksiyonel dereceli seramik parçacık takviyeli alüminyum metal matris kompozit malzeme (Fonksiyonel dereceli zırh kompozit)sistemleridir (CHIN, 1999). Fonksiyonel dereceli zırh kompozit malzeme sistemlerini geliştirmesindeki temel amaç gerilme dalgası geçişini kontrol ederek yatay yönde oluşan hasarları azaltmak ve dolayısı ile zırhın "çoklu çarpma" kapasitesini artırmaktır. Fonksiyonel dereceli kompozit malzeme sistemlerinin zırh malzemesi olarak kullanılmasında ortaya çıkacak potansiyel faydalar şöyle sıralanabilir; a)yüksek mukavemet/ağırlık oranı, b)sert ve sünek fazları tek bir yapı içinde toplaması, c)mermi-teması esnasında oluşacak basma gerilme dalgasının zırh arka yüzeyinden çekme dalgası olarak dönmesini geciktirerek zırhın kırılmasını geciktirmesi ve dolayısı ile koruma kapasitesini artırması. Bahsedilen potansiyel faydaları henüz test edilmemiş bu malzemeler üzerine literatürde sadece dalga geçişi modelleri mevcuttur (BRUCK, 2000, LI, 2001).



### 2.3 Projenin çıkış noktası ve amacı

Gerilme dalgasının geçişinin önemli olduğu uygulamalarda örneğin zırh tasarımında performans ölçümleri genellikle balistik testlerle yapılmaktadır. Bu tür testler hem yorucu ve hem de pahalı olmalarının yanında katmanlar ve katmanlar arası gerilme dalgası geçişi hakkında hiç bir bilgi vermemektedirler. Ayrıca test esnasında etkili olan bazı dış faktörler (örneğin aynı mermi hızında atışların tekrarlanması ve merminin zırha dik vurması ve benzeri zorluklar) zırh performansı hakkında yanıltıcı bilgilerin elde edilmesine sebep olmaktadır. Gelişmiş zırh tasarımında detaylı nümerik ve deneysel gerilme dalgası geçiş analizini içeren bir prosedürün takip edilmesi zorunludur. Örneğin farklı ara yüzey malzemelerinin farklı hızlardaki deformasyonunda arka kompozit destek plakasına iletilen gerilmenin şiddeti ve iletim zaman gecikmesi yeni bir yaklaşımla HBB testi ile tespit edilebilir. Deneysel verilere dayalı gerilme dalgası ölçüm tekniği balistik testlerin sadece tasarlanmış optimum konfigürasyonlarda yapılmasını da gerekli kılmalıdır. Nümerik analizler gelişmiş sonlu elemanlar (FEA) kodları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Mermi ile zırh teması esnasında gerilme dalgası katmanlara doğru ve katmanlar arasında ilerlemektedir. Katmanlar arasında ilerleyen gerilme dalgasının boyutu ve şekli tabakaların akustik empedansına bağlı değişmektedir. İlk bir kaç saniyede oluşan basma gerilmesi ilk tabakadan başlayarak ilerlemektedir. Bu gerilme dalgasının bir kısmı ilk ve ikinci tabakaların ara yüzeyinden geri dönmekte, kalan dalga ise diğer katmanlara iletilmektedir. Katmanlar arası yüzeyler ve serbest yüzeylerden yansıyan kompleks gerilme dalgasının anlaşılabilmesi sonlu elemanlar metodu ile tüm katmanların modellenmesini zorunlu kılmaktadır. Modelleme her bir katmanın yüksek hızlardaki mekanik özelliklerin belirlenmesini gerektirmektedir. Fakat deneysel gerilme dalgası geçiş analizi oldukça gelişmiş test düzenekleri gerektirmektedir. Bu projenin amacı klasik HBBB düzeneğini ve nümerik metotları kullanarak çok katmanlı malzemelerde gerilme dalgası ilerleyişini incelemektir. Bahsedilen yaklaşım literatürde daha önce rastlanmamıştır. Benzer yaklaşım FDM 'de (SiC-parçacık takviyeli Al metal matris kompozit) uygulanmıştır. Al metal matris malzeme sistemleri proje kapsamında hazırlanarak statik ve dinamik testlere tabii tutulmuştur.

### 3. GEREÇ VE YÖNTEM

#### 3.1 Hopkinson Basınç Bar testi

Kolsky tarafından 1949 yılında tasarlanan HBB testi (KOLSKY, 1949) malzemelerin yüksek hız deformasyon özelliklerini ve yapısal denklemlerini belirlemek ve test etmek için kullanılan en yaygın metotlardan biridir. Uzun çubuklarda tek yönlü elastik dalga geçişi prensibi temel alınarak geliştirilen bu test metodu ile yüksek hızlarda basma, çekme, kayma ve eğilme testleri yapılabilmektedir. Teknik, önceleri metalik malzemeleri test etmek amacıyla kullanılmış, sonradan da seramik ve kompozit malzemelerde test edilmeğe başlanmıştır. Nümerik metotlarla birleştirildiğinde, HBB test metodu çapma olaylarının laboratuvar ortamında belirlenmesinde ve malzeme yapısal denklemlerinin kısa sürede doğrulanmasında araştırmacılara basit ve ekonomik bir yöntem sağlamaktadır.

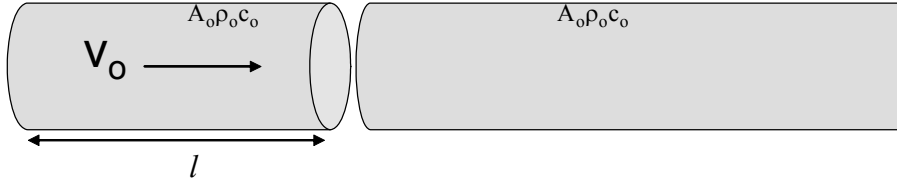
HBB testi çubukların çarpması ile oluşan tek yönlü elastik dalga geçişine dayandırılmıştır. Yarı sonlu uzunlukta duran bir çubuğa, uzunluğu  $l$  olan bir çubuk  $v_0$  hızı ile çarpması durumu Şekil 6(a)'da gösterilmektedir. Bu şekilde çarpan ve duran çubuklar aynı malzemeden yapılmıştır. Burada  $A$ ,  $\rho$  ve  $c_0$  sırası ile çubuğun kesit alanı, yoğunluğu ve elastik dalga hızıdır. Farklı zamanlarda ( $t$ ), duran çubukta oluşan basma gerilmeleri dağılımı ise Şekil 6(b)'de gösterilmektedir.  $0 < t < l/c_0$  zaman aralığında, çapma sonucunda oluşan basma gerilmesi her iki çubukta  $v_0/2$  parçacık hızı oluşturmaktadır.  $2l/c_0 > t > l/c_0$  aralığında ise, serbest yüzeyden geri dönen çekme gerilmesi çarpan çubukta oluşan basma gerilmesini yok etmektedir. Zaman  $2l/c_0$ 'ya ulaştığında çarpan çubukta gerilme ve parçacık hızı sıfır olmakta, ancak diğer çubukta ise basma gerilmesi halen ilerlemektedir.  $2l/c_0$  zamanından sonra, yarı sonlu çubukta dalga boyu ( $\lambda$ ), çarpan çubuğun iki katı olan bir basma gerilmesi ilerlemektedir. İkinci çubukta oluşan elastik gerilme ( $\sigma$ ), birim şekil değişimi ( $\epsilon$ ) ve dalga geçiş süresi ( $T$ ) aşağıdaki eşitliklerle hesaplanabilir:

$$\sigma = \frac{\rho_0 c_0 v_0}{2} \quad (1)$$

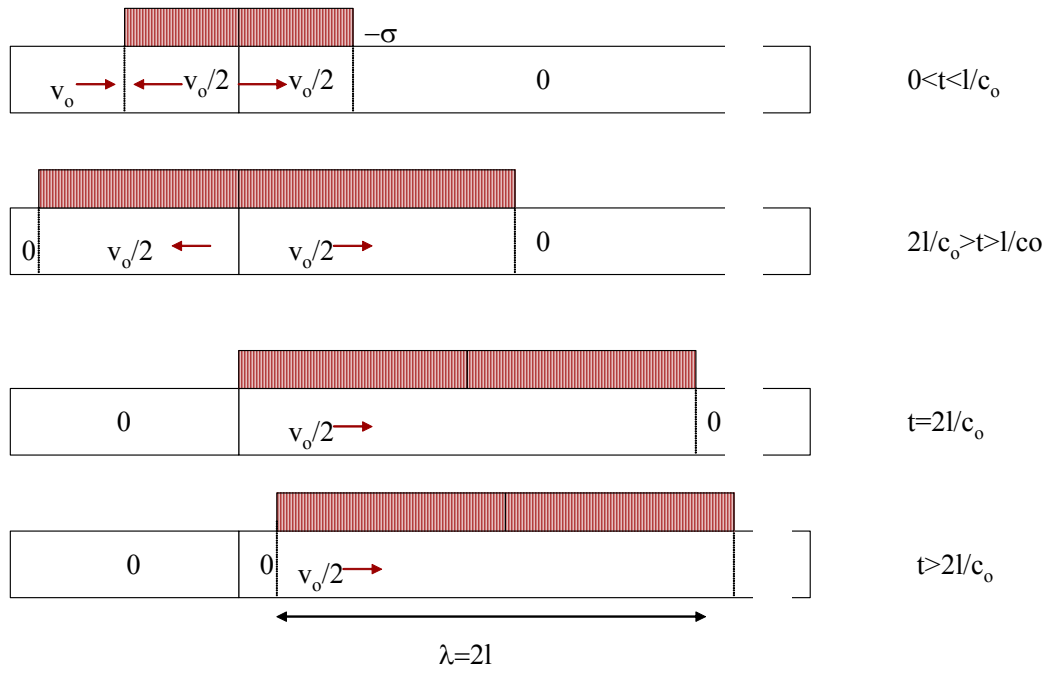
$$\epsilon = \frac{v_0}{2c_0} \quad (2)$$

ve

$$T = \frac{2l}{c_0} \quad (3)$$

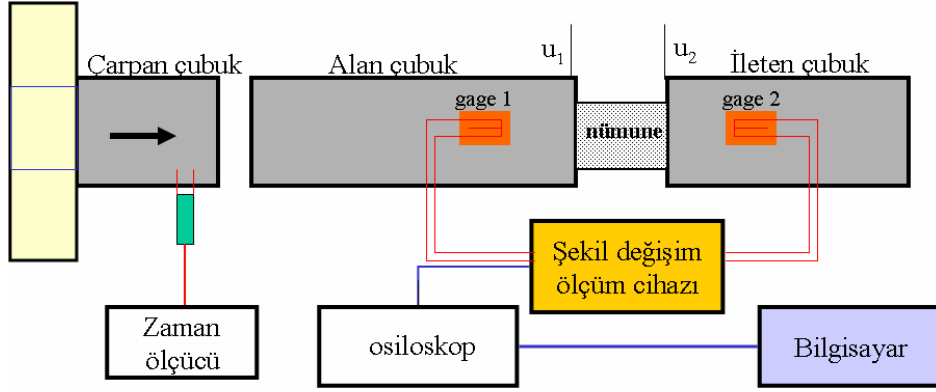


(a)

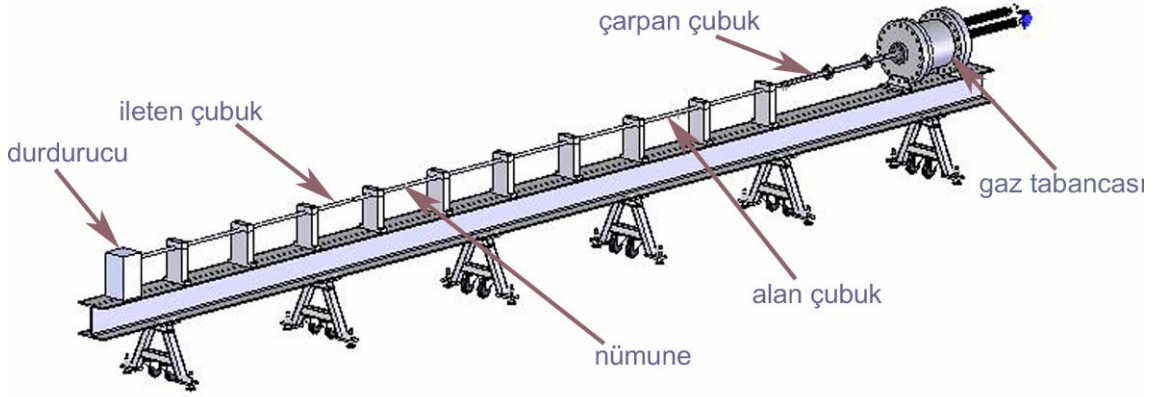


(b)

Şekil 6 (a) Duran yarı sonlu uzunluktaki çubuğa sonlu uzunluktaki bir çubuğun çarpması ve bunun sonucunda (b) farklı zamanlarda çubukta oluşan basma gerilmeleri.



(a)



(b)

Şekil 7 Yüksek deformasyon hızlarında kullanılan HBB'nın şematik gösterimi (a)HBB ve ölçüm sistemleri ve (b)genel şematik gösterim.

Şekil 7 (a) ve (b)'de gösterilen tipik HBB düzeneği çarpan, alan ve ileten çubuklardan oluşmuştur. Gaz tabancası ile fırlatılan çarpan çubuk, alan çubuk'a çarpınca bu çubukta yüksekliği sabit bir basma gerilme dalgası oluşturur. Alınan gerilme dalgası alan çubuk üzerinde hareket ederek, alan çubuk-numune-ileten çubuk ara yüzeylerinden bir kısmı çekme dalgası olarak geri alan çubuk'a, gerisi ise ileten çubuk'a iletilir. Her iki çubukta oluşan birim şekil değişim miktarları çubuklar üzerine yerleştirilen birim şekil değişim geyçleri ve bir osiloskop yardımıyla ölçülür. Bu ölçümlerin sonucunda numunenin gerilme dalgası geçişi

sırasındaki birim şekil değişim miktarı, deformasyon hızı ( $\dot{\epsilon}$ ) ve gerilmesi kolayca hesaplanabilir. Alan ve ileten çubuklardaki uzamalar (Şekil 7(a)),

$$u_1 = C_{\zeta} \int_0^t (-\epsilon_a + \epsilon_g) d\tau \quad (4)$$

ve

$$u_2 = -C_{\zeta} \int_0^t \epsilon_i d\tau \quad (5)$$

denklemleri ile hesaplanabilir. Denklem 4 ve 5’de,  $u$  elastik uzama miktarını,  $a$ ,  $g$  ve  $i$  alan, geri gelen ve iletilen dalgaları ve  $\zeta$  çubuğu göstermektedir. Numunedeki birim şekil değişim miktarı aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$\epsilon_n = \frac{u_2 - u_1}{U_n} = \frac{C_{\zeta}}{U_n} \int_0^t (-\epsilon_i + \epsilon_a - \epsilon_g) d\tau \quad (6)$$

Denklem 6’da  $U$  numunenin test edilmeden önceki uzunluğunu  $n$  ise numuneyi temsil eder. Her bir arayüzeydeki, alan çubuk-numune (1) ve numune-ileten çubuk (2), kuvvetler şöyledir:

$$P_1 = A_{\zeta} E_{\zeta} (\epsilon_a + \epsilon_g) \quad (7)$$

ve

$$P_2 = A_{\zeta} E_{\zeta} \epsilon_i \quad (8)$$

$A$  kesit alanını,  $E$  ise elastik modülünü göstermektedir. Eğer arayüzeylerdeki gerilmenin eşit olduğu varsayılırsa, Denklem 6 şöyle düzenlenebilir:

$$\epsilon_n = -\frac{2C_{\zeta}}{U_n} \int_0^t \epsilon_g d\tau \quad (9)$$

Benzer olarak numunedeki gerilme,

$$\sigma_n = \frac{P_1}{A_n} = \frac{P_2}{A_n} = \frac{A_b}{A_n} E_\zeta \varepsilon_i \quad (10)$$

denklemleri ile hesaplanabilir. Mazlemelerde oluşan birim şekil değişimi hızı aşağıdaki denklemlerle hesaplanabilir.

$$\dot{\varepsilon}_n = -\frac{2C_\zeta \varepsilon_g}{U_n} \quad (11)$$

HBB'den elde edilen gerilme ve birim şekil değişim miktarlarının gerçek malzeme özelliklerini gösterebilmesi için aşağıdaki koşulların sağlanması gerekmektedir:

1. Nümunenin çubuklar arasında homojen deforme olması; nümune-çubuklar arayüzeyindeki gerilmelerin eşit olması.
2. Çubuklar üzerindeki gerilme dalgalarının elastik kalması; oluşan gerilmenin çubuk malzemesinin akma gerilmesinin altında olması.
3. Dalganın çubuklar üzerinde ihmal edilecek oranda bozunarak hareket etmesi.

Birinci koşulun oluşması için, dalganın numune içinde, 4-5 defa ileri-geri gidip gelmesi gerekmektedir (RAVICHANDRAN, 1994). Bu yüzden SHPB'dan elde edilen gerilme ve birim şekil değişim miktarları yaklaşık ilk 5-10 mikrosaniyede gerçek malzeme özelliklerini gösterememektedir. Yukarıda verilen denklemlerin geçerli olabilmesi için ikinci koşulun mutlaka sağlanması gerekmektedir. Dikkat edileceği üzere, çubuklar üzerinden yapılan birim şekil değişimi ölçümü nümune-çubuklar arayüzeylerinden uzak noktalardan (Şekil 7(a)) yapılmaktadır. Dalganın nümune-çubuklar arayüzeyinden ölçüm yapılan noktalara ulaşana kadar bozunmaması gerekmektedir. Eğer dalgalarındaki bozunmalar önemli miktarlarda ise, hesaplanan gerilme ve birim şekil değişim miktarlarının, dalgaları ölçüm yapılan noktalardan nümune-çubuk arayüzeylerine kaydırarak düzeltilmesi gerekmektedir (FOLLANSBEE, 1993). Basma deneylerinde kullanılan HPB'nın yukarıdaki koşullara uygunluğu ve özellikleri diğer bir çalışmada tartışılmıştır (GÜDEN, 1998).

### 3.2 Hopkinson Basınç Bar testi verilerinin işlenmesi

Birim şekil değişimi, birim şekil değişimi hızı ve gerilmenin hesaplaması için birim şekil değişimi geyçlerinden elde edilen verilerin kullanılan ölçüm sistemine bağlı olarak işlenmesi gerekmektedir. Alan ve iletilen çubuklardan ölçülen birim şekil değişimleri elde edildikten sonra bir veri işleme prosedürü uygulanmaktadır. Şekil 8’de 2024 Al numunesinin HBB testi sonucunda ölçülen alan, geri gelen ve ileten birim şekil değişimleri, tipik HBB test ölçümüne örnek olarak gösterilmektedir. Deneylede kullanılan birim şekil değişim geyç ölçüm sistemi ‘tam köprü’ olması nedeni ile aşağıda verilen denklemler sadece ‘tam köprü’ ölçümü için geçerlidir. Numunede oluşan birim şekil değişim miktarı aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır,

$$\varepsilon_n = -\frac{2C_\varphi}{U_n} \left( \frac{2 \int \varepsilon_g(V) dt}{G_g K_g V_\varphi (1 + \varphi)} \right) \quad (12)$$

Denklem 12’de  $G_g$ ,  $K_g$ ,  $V_e$  ve  $\varphi$  kullanılan birim şekil değişimi geyç düzeltici kazanımı, birim şekil değişimi geyç faktörü, birim şekil değişimi geyç köprüsü çalışma voltajı ve çubuk malzemesinin Poisson oranıdır. Benzer olarak nümunedeki gerilme,

$$\sigma_n = \frac{A_\varphi}{A_n} E_\varphi \left( \frac{2\varepsilon_i(V)}{G_g K_g V_\varphi (1 + \varphi)} \right) \quad (13)$$

denklemlerle, deformasyon hızı ise

$$\dot{\varepsilon}_n = -\frac{2C_\varphi}{U_n} \frac{2\varepsilon_g(V)}{G_g K_g V_\varphi (1 + \varphi)} \quad (14)$$

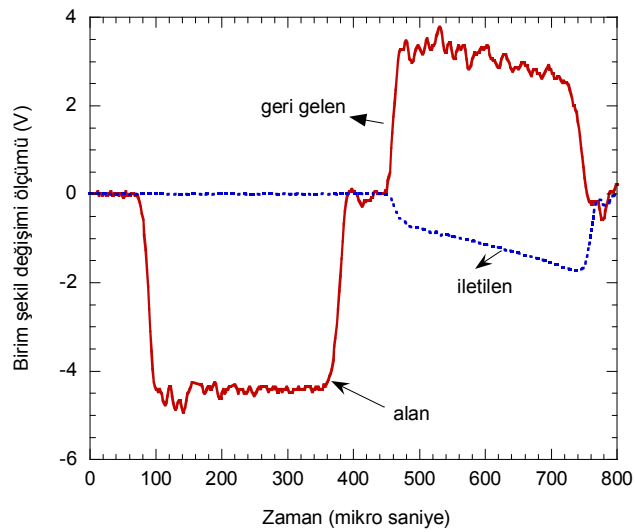
denklemlerle hesaplanabilir.

Deneylede kullanılan HBB test düzeneğinde 19 mm çapında INCONEL 718 çubuklar kullanılmıştır (Şekil 8). Alan ve ileten çubukların uzunlukları sırası ile, 3450 mm ve 1850 mm

dir. İki farklı çarpan çubuk uzunluğu kullanılmıştır; 356 mm ve 178 mm. Kısa çarpan çubuk kullanılması ile dalga kalma süresi azalmakta ancak nümunedeki daha yüksek deformasyon hızları oluşturmaktadır. Uzun çarpan çubukta ise nümunedeki daha fazla birim şekil değişimi oluşmakta ancak deformasyon hızı daha düşüktür. Kullanılan HBB test aparatı ve Inconel 718 çubuklar için  $C_{\phi}$ ,  $E_{\phi}$ ,  $G_g$ ,  $K_g$ ,  $V_{\phi}$  ve  $\phi$  değerleri sırası ile 4930 m/s, 200 GPa, 200, 2.09, 9.75 V ve 0.29'dir. Şekil 8'de gösterilen birim şekil değişimi ölçümleri için yukarıdaki denklemlerle hesaplanan gerilme-şekil değişim miktarı ve birim şekil değişimi hızı- birim şekil değişimi grafikleri sırası ile Şekil 9(a) ve (b)'de gösterilmektedir.

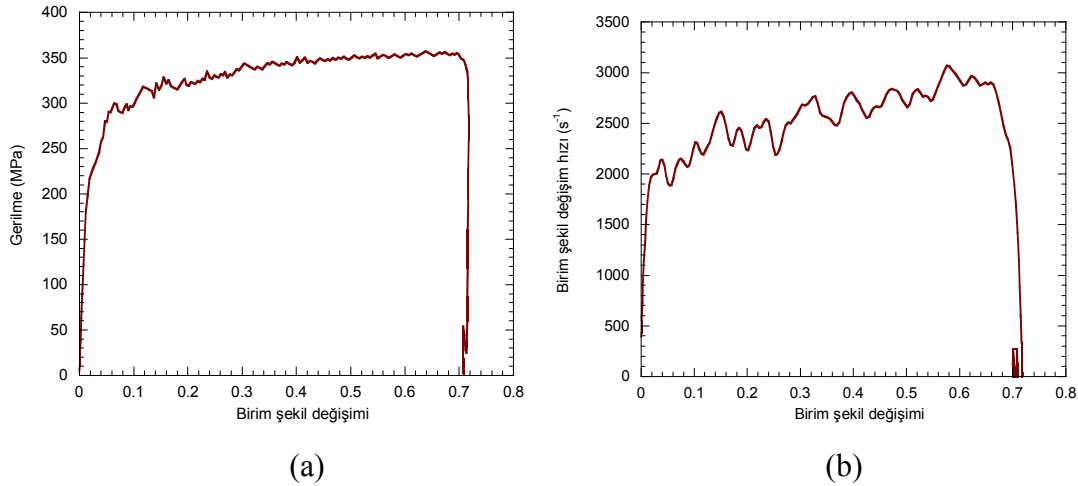


Şekil 8 University of Delaware HBB test düzeneği.



Şekil 9 HBB'dan elde edilen tipik birim şekil değişimi ölçümleri.

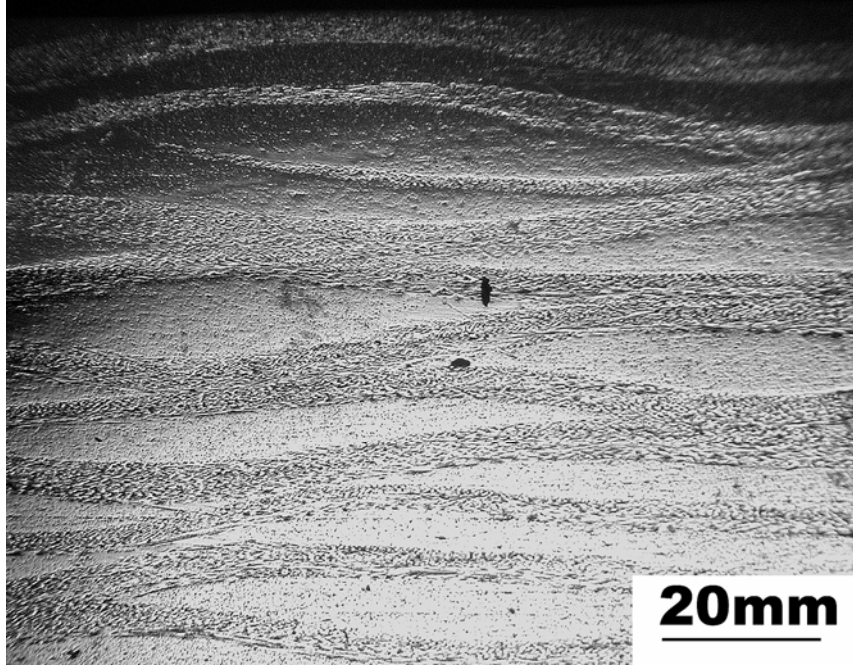




Şekil 10 Şekil 9'daki birim şekil değişimi ölçümünden hesaplanan (a) gerilme ve (b) birim şekil değişimi hızı grafikleri.

### 3.3 Tek, iki ve üç katmanlı seramik, kompozit ve lastik

Projede test edilen zırh malzeme sistemi mekanik empondansı oldukça farklı olan malzemelerden oluşmaktadır. Bunlar, seramik, kompozit ve lastiktir. Bu malzemeler başlangıçta tek olarak yüksek hızlarda test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar kullanılan nümerik modeli doğrulamak için kullanılmıştır. Test edilen çok katmanlı ilk malzeme grubu ise seramik ve kompozitten oluşan iki katmanlı malzemedir: 13,96 mm kalınlığındaki alümina seramik plaka (Coors, 99%) ve 11.3 mm kalınlığındaki S2 cam örgü fiber (alansal yoğunluk 0.81 kg/m<sup>2</sup>)/SC15 epoksi (lastik ile güçlendirilmiş) kompozit plakadır. Seramik malzeme, S2/SC15 kompozit malzemeye kompozit prosesi esnasında yapıştırılmıştır. Bu katmanlar Şekil 2'de, kompozit plakanın kalınlık yönündeki mikro yapısı ise Şekil 11'de gösterilmektedir. S2/SC15 kompozit malzeme vakum altında resin transfer kalıplama yöntemi ile University of Delaware'deki Center for Composite Materials'da hazırlanmıştır. Kompozit malzemenin statik ve dinamik özellikleri daha önce detaylı çalışılmıştır (GÜDEN, 2004). İkinci aşmada ise iki tabaka arasına 1.5 mm kalınlığında Ethylene-propylene-diene monomer (EPDM) lastik konularak 3 katmanlı malzemeler oluşturulmuş ve test edilmiştir.

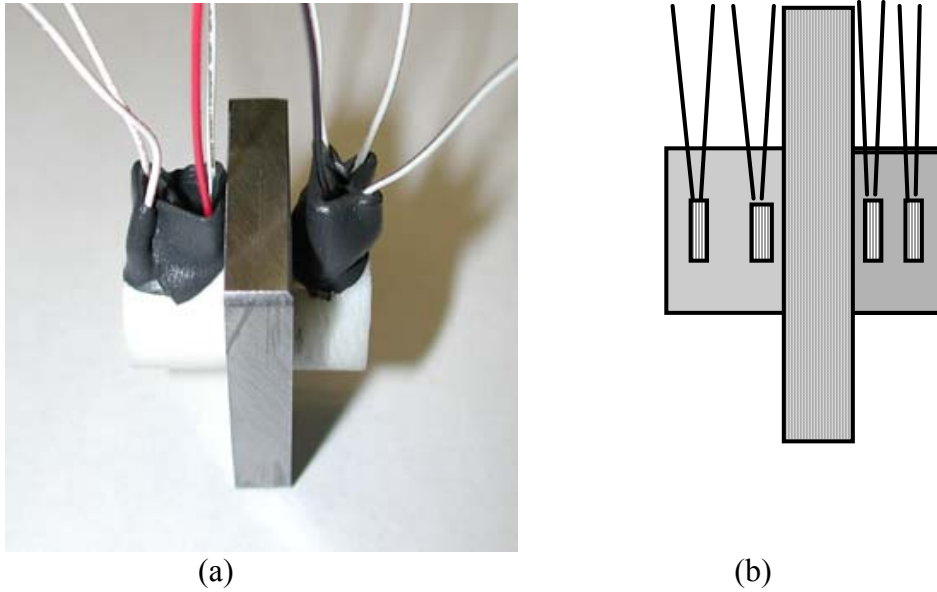


Şekil 11 Deneyleerde kullanılan S2 cam fiber/SC-15 kompozit plakasının kalınlık yönündeki mikro yapı

11,25 mm veya 15,71 mm veya 19 mm çapındaki silindirik numuneler plakalardan delme yönetemi (core-drill) ile kalınlık yönünde hazırlanmıştır. Şekil 2’de HBB test nümune örneği görülmektedir. Nümuneler statik ve yüksek hızlarda basma testine tabii tutulmuşlardır. Projenin kapsamı dalga geçişini ölçmek olduğu için raporda HBB test sonuçları verilmiştir. HBB testleri 400 ve 1200 s<sup>-1</sup> deformasyon hızlarında gerçekleştirilmiştir. Deformasyon hızı, çarpan çubuğun hızı ile ve dolayısı ile gaz tabancasının hızı ile değiştirilmektedir. Seramik tabaka tüm test ve nümerik modelde alan dalgayı ilk gören tabakadır. Seramik malzeme testinde oluşan birim şekil değişimi %1-2 civarlarında olmasından dolayı HBB testinde geri gelen dalgadan birim şekil değişimi hesaplanması doğru veriler sağlayamamaktadır. Nümuneye üzerinden geçen gerilme dalgasını ölçmek için birim şekil değişim geyçleri katmalar üzerine yapıştırılmıştır. Kullanılan birim şekil değişim geyç elementleri (plastik malzeme hariç) 0,76 mm uzunluğundadır. Bazı deneyleerde, geyçler nümunenin üzerinde seri olarak yerleştirilmiştir. Bu testler sonucunda nümuneye üzerinde oluşan birim şekil değişimi ölçülerek, malzeme üzerinde geçen gerilme miktarı zaman ve pozisyona bağlı olarak haritalandırılmıştır. Bu metot çok katmanlı mazlemelerin yüksek hızlardaki mekanik testine önemli bir katkıdır. Şekil 12(a)’da gösterdiği üzere bazı teslerde, arayüzey lastik mazlemesinin yatay yöndeki deformasyonunu sınırlamak için ortası delik bir

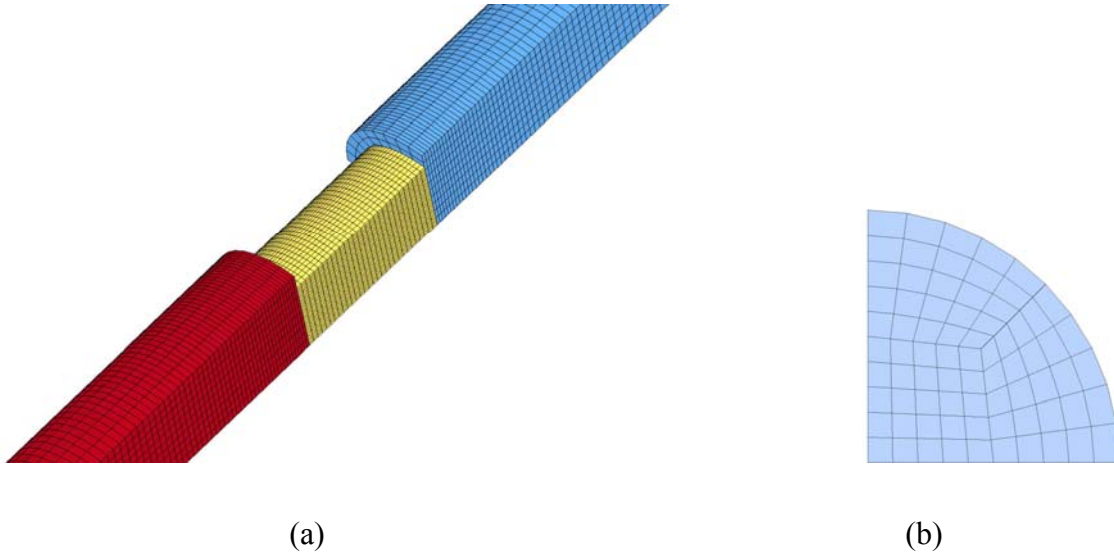
çelik plaka kullanılmıştır. Plaka ile lastik tabaka yüzeyi başlangıcında birbirleriyle sıkı temas halindedir. Aynı şekilde, Şekil 12(b), kullanılan geyçelerin pozisyonu şematik olarak gösterilmiştir.

Yüksek deformasyon hızlarında seramik malzeme Inconel çubuğu deforme etmektedir. Çubuk yüzey deformasyonunu engellemek için çubuk/nümuneye yüzeylerine Inconel plakalar yerleştirilmiştir. Bu plakaların çapı, çubuğun çapı ile aynıdır, dolayısı ile empadans farkı oluşturmamaktadır.



Şekil 12 (a) Sınırlandırılmış (lastik) 3 katmanlı test numunesi ve (a) birim şekil değişimi geyçelerin numune üzerinde yerleşimin şematik gösterimi.

3-boyutlu bir sonlu elemanlar modeli, seramik, kompozit ve lastikten oluşan çok ve tek katmanlı malzemelerde gerilme geçişini belirlemek için kullanılmıştır. Gerilme geçiş analizi ticari sonlu elemanlar LS-DYNA 970 kodu ile yapılmıştır. Model ve meş LS-INGRID'de oluşturulmuştur. Modelde iki eksenli simetri kabul edilmiş ve buyüzden HBB çubuğunun sadece  $\frac{1}{4}$ 'ü modellenmiştir (Şekil 13(a)). Her bir modelde, modelleme sonuçları nümune ve alan ve iletilen çubuklar üzerinde ve geyçelerin bulunduğu noktalarda gösterilmiştir. Modellemede arzulanan ideal sonuç model sonuçlarının geyç ölçüm sonuçlarına uymasındır. Bu ise kullanılan modelin nümune üzerinde herhangi bir noktada gerilme ve birim şekil değişimini doğru belirlediğini gösterecektir. Elde edilen sonuçlar lokal gerilme ölçümünde ve kırılmanın olduğu bölgeleri belirlemede kullanılabilir.



Şekil 13 (a) HBB sonlu elemanlar çubuk meş modeli ve (b) çubuk kesit alanında kullanılan meş modeli.

Çubuk çeyrek kesitinde toplam 75 element kullanılmış; bu ise çubuk çapında 10 elemente karşılık gelmektedir (Şekil 13(b)). Çubuk üzerinde ise 400 element kullanılmıştır. Kontak arayüzlerinde meş rafinasyonunu sağlamak için çubuk eksenı boyunca meş *biasing* kullanılmıştır. Kullanılan HBB modelinde meş duyarlılığı belirli bir gerilme dalgasında çubuklar ve nümune yüzeylerindeki element sayıları değiştirilerek belirlenmiştir. Hesaplamalar farklı meş yoğunluklarında yapılmıştır. Model sonuçları çubukta oluşan gerilme dalgalanmalarının frekansının deneysel olarak ölçülenlerle (Pochhammer mode) aynı olduğunu göstermiştir. Yapılan bu ilk meş duyarlılık analizleri sonucunda, kabul edilebilir asgari element sayısı modellemede kullanılmıştır.

Test edilen malzemeler 8-düğümlü katı element, arayüzler ise sürtünmesiz otomatik kontak kayma yüzeyi ile modellenmiştir. Çarpan çubuk hızı başlangıç durumu olarak belirlenmiş ve diğer tüm sınırlar serbest olarak herhangi bir yönde hareket edebilmektedir. Hesaplama zamanını azaltmak için, modellemede 1524 mm uzunluktaki çubuklar kullanılmıştır. Bu ise dalga transit geçiş zamanını kısaltmış; ancak dalga şeklini ve boyutunu etkilememiştir. Bir kaç nümerik modelleme de tam çubuk boyutlarında gerçekleştirilmiş ve sonuçlar kısa çubuk sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Her iki durum arasında önemli bir fark gözlenememiştir. Kullanılan modelin geçerliliği uzun çubuklarda (serbest ve sabit uç) tek-boyutlu dalga geçişini simüle ederek de kanıtlanmıştır.

Modellemede otomatik zaman aralığı (time step) opsiyonu seçilmiştir. Bu opsiyonda LS-DYNA başlangıç zaman basamak boyutunu belirlemektedir. Çözümleme esnasında LS-DYNA elemtleri sürekli kontrol ederek, yeni bir zaman aralığını aşağıdaki denkleme göre belirlemektedir,

$$\Delta t^{n+1} = \text{TSSFAC} * \min\{\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_N\} \quad (15)$$

Burada N ve  $\Delta t$  element sayısı ve zaman aralığıdır. Zaman aralığı kabaca akustik dalğanın bir elementi geçmesi için gereken en kısa karakteristik uzunluğa karşılık gelmektedir. Denklem 15’de TSSFAC skala faktörü olup stabilite nedeni ile 0,90 alınmıştır..

Modellemede kullanılan malzeme özellikleri Tablo 1’de listelenmiştir. Seramik malzeme izotropik elastik, kompozit ise ortotropik elastik malzeme olarak modellenmiştir. Lastik linear olmayan malzeme özelliği göstermektedir. Lastik dfeformasyonu deneysel malzeme verileri kullanılarak Ogden malzeme modeli (OGDEN, 1984) ile simüle edilmiştir. Bu model deneysel test sonuçları ile %700 bieim şekil değişimlerine kadar uyumluluk göstermektedir. Son olarak Inconel çubuklar izotropik elastik malzeme olarak modellenmiştir.

Tablo 1 Modelde kullanılan malzeme özellikleri

Malzeme	Elastik modülü (GPa)	Poisson oranı	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Diğerleri
Seramik	370	0.22	3900	-
Lastik	-	0.4995	1200	-
Kompozit	E <sub>1</sub> : 24.1 E <sub>2</sub> : 24.1 E <sub>3</sub> : 8.0	v <sub>21</sub> : 0.12 v <sub>31</sub> : 0.173 v <sub>32</sub> : 0.173	1850	G <sub>1</sub> : 2.86 (GPa) G <sub>2</sub> : 2.86 (GPa) G <sub>3</sub> : 2.86 (GPa)
Inconel	207	0.3	7850	

E<sub>3</sub> :kalınlık yönü ve G: Kayma modülü

### 3.4 Fonksiyonel dereceli SiC/Al metal matris kompozit

FD metal matris kompozit yapılar toz metalürjisi yöntemi ile hazırlanmıştır. Al ve SiC tozlarının boyutları Micromeritics Particle Size Analyzer ile ölçülmüş olup Tablo 2’de listelenmiştir. Al ve SiC tozlarının ortalama boyutları sırası ile 37 ve 22  $\mu\text{m}$ ’dur. Alaşım tozu yerine yüksek saflıkta Al tozu seçilmesinin nedeni ise alaşım elementleri ile oluşacak reaksiyonlardan kaçınılmasıdır.

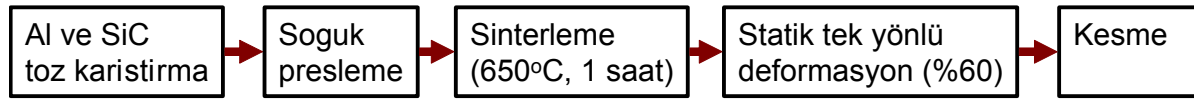
Tablo 2 FDM üretiminde kullanılan tozların özellikleri.

Toz	Boyut ( $\mu\text{m}$ )	Saflık	Ortalama boyut ( $\mu\text{m}$ )	D (%10) ( $\mu\text{m}$ )	D (%50) ( $\mu\text{m}$ )	D (%90) ( $\mu\text{m}$ )
Al (Aldrich)	< 74	99%	37.13	17.32	34.64	69.28
SiC <sub>p</sub> (Aldrich)	< 37		20.12	12.25	22.3	33.4

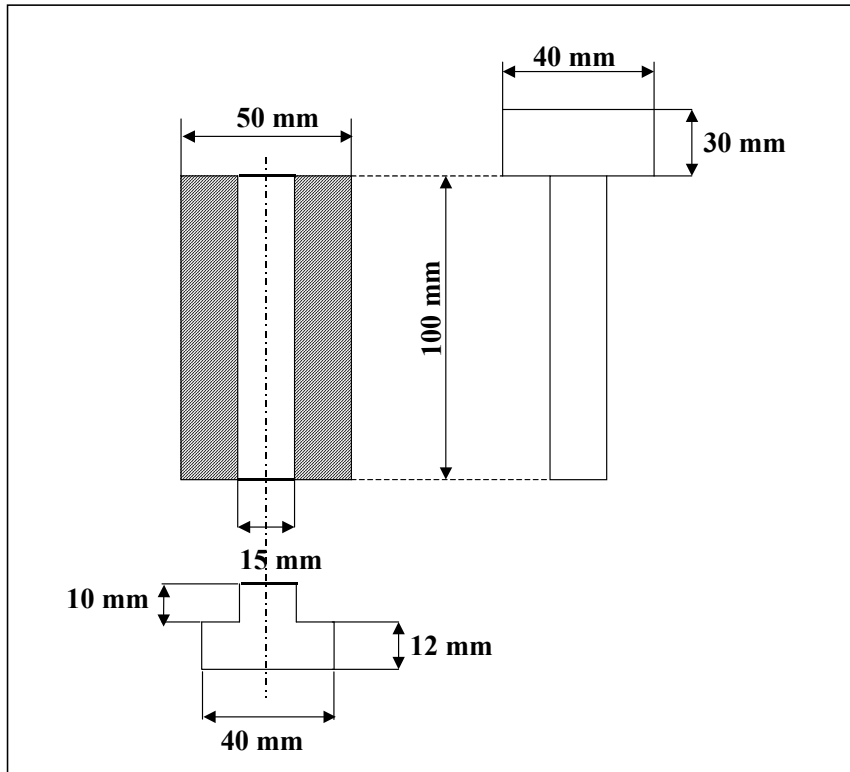
Tek ve çok katmanlı FD kompozit malzeme hazırlamada kullanılan toz metalürjisi metodu aşamaları Şekil 14’de gösterilmektedir. Metot Al ve SiC tozunun plastik bir kap içerisinde dönen mil üzerinde karıştırılması ile başlamaktadır. Toz karışım daha sonra 16 mm çapında bir çelik kalıp içinde (Şekil 15) 600 MPa basınçta tek yönde hidrolik pres ile basılmaktadır. Çok katmanlı malzemede her bir katmanın kalınlığının birbirine eşit olmasına dikkat edilmiştir. Katmanlı malzeme hazırlanırken her bir katman sırası ile 100 MPa basınç altında basılmaktadır. Daha sonra tüm malzeme 600 MPa basınç altında basılmıştır. Preslenen silindirik malzemeler 16 mm çapında ve 10 mm uzunluğundadır. Bir sonraki aşamada ise basılan numuneler 650  $^{\circ}\text{C}$ ’de 1 saat ısıtılma maruz kalmışlardır. Isıtılmanın amacı malzemede homojenlik sağlamak ve oluşan gerilmeleri azaltmaktır. Oksidasyonu önlemek için ısıtılma işlemi kapalı (kaynaklanmış) çelik bir kutu içerisinde yapılmıştır. Isıtılma işlemi sonrasında numuneler Shimadzu AG-I 250KN Test makinesinde  $1.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızında %60 birim şekil değişimine kadar kalınlık yönünde basılmıştır. Basma işleminin temel amacı oluşan boşlukları azaltarak malzemeyi yoğunlaştırmaktır. Basma testi esnasında katmanlar arasındaki Poisson oranı farklılığından dolayı ara yüzey sınırları eğilmektedir. Eğilen katmanlar arası sınır Şekil 16’da görülmektedir. Son olarak katmanlar arasında düz bir sınır oluşturmak için Şekil 16’da görüldüğü üzere malzeme kesikli çizgilerden 10 mm kare şeklinde kesilmiştir. Kesilen numuneler daha sonra statik ve yüksek hızlarda basma testine tabi tutularak,

deformasyon hızının mekanik özelliklere etkileri belirlenmiştir. Yukarıdaki metot kullanılarak 8 farklı tek ve çok katmanlı metal matris kompozitler hazırlanmıştır. Tablo 3'de hazırlanan numuneler listelenmiştir. Tek katmanlı malzemeler %0, %10 ve %20 SiC içermektedir. Diğer malzemeler ise 2, 3, 5 ve 6-katmanlı Al metal matris kompozitlerdir.

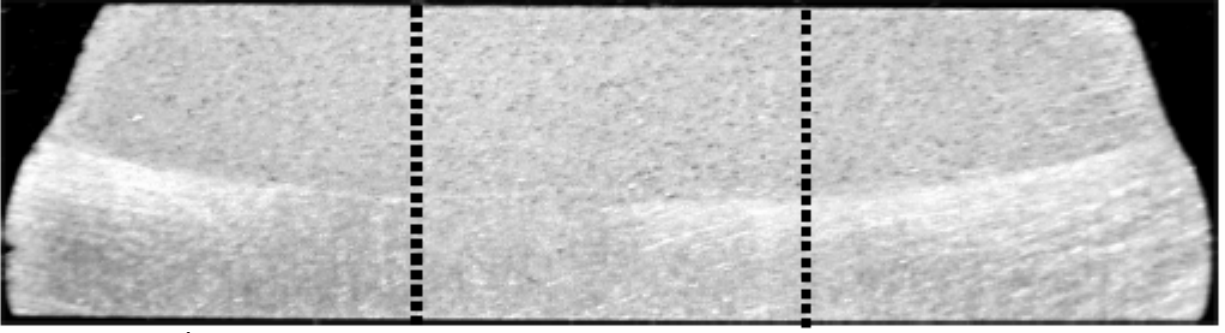
Hazırlanan kompozit numunelerin basma testi öncesi yoğunlukları Archimedes yoğunluk metodu ile Precisa XB 220A terazisinde ölçülmüştür. Statik basma testleri Shimadzu AG-I 250KN mekanik test cihazında  $1.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızına karşılık gelen  $1 \text{ mm min}^{-1}$  deplasman hızında yapılmıştır. Yüksek hız deformasyon testleri ise University of Delaware'deki HBB test düzeneğinde  $1000 \text{ s}^{-1}$  ve  $3500 \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızı aralığında yapılmıştır.



Şekil 14 FD kompozit hazırlama basamakları.



Şekil 15 Toz basmada kullanılan çelik kalıp.



Şekil 16 İki katmanlı bir numunenin deformasyon sonrası kesit görünüşü.

Tablo 3 FD kompozit numunelerin sınıflandırılması.

<b>Tek katmanlı</b>	<b>%SiC</b>
	0 (saf Al)
	10
<b>Çok katmanlı</b>	20
	0/10
	10/20
	0/10/20
	0/2/4/6/8/10
	0/5/10/15/20
	0

Basma veya çekme testi esnasında test makinesi ve ölçüm aparatları numune ile deplasmana uğramaktadır. Dolayısı ile test makinesinde ölçülen deplasman; makine ( $\delta_m$ ) ve numune ( $\delta$ ) deplasmanlarının toplamıdır. Eğer  $v_{CR}$  deplasman hızı ise herhangi bir zamanda (t) toplam deplasman ( $\delta_t$ )

$$\delta_t = \delta + \delta_m = v_{CR} t = e l + \frac{F}{K} \quad (16)$$

Burada e, l, F ve K sırası ile mühendislik birim şekil değişimi, nümunenin ilk yüksekliği, kuvvet ve makina sabitir. Denklem 16 şöyle düzenlenebilir,



$$e = \frac{(v_{CR} t - \frac{F}{K})}{1} \quad (17)$$

K'nın değeri basma testi aparatlarının nümune olmaksızın en yüksek yüke kadar basılması ile belirlenir. Mühendislik gerilmesi (S), gerçek stress ( $\sigma$ ) ve gerçek birim şekil değişimi aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır:

$$S = \frac{F}{A_0} \quad (18)$$

$$\sigma = S(1 - e) \quad (19)$$

$$\varepsilon = \ln(1 - e) \quad (20)$$

Burada  $A_0$  numunenin ilk kesit alanıdır.

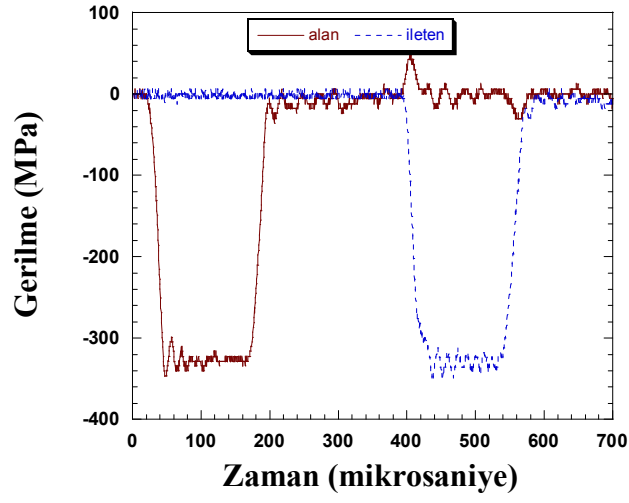
10/20 FD kompozit malzemede dalga geçişi LS-DYNA 960 solu elemanlar programı ile incelenmiştir. katmanların kalınları 2.5 mm'dir. Deneysel malzeme basma özellikleri programa direkt girilmiştir. Kullanılan model, seramik, kompozit ve lastikten oluşan çok katmanlı malzeme de dalga geçisi için kullanılan modelin aynısıdır.

## 4. BULGULAR

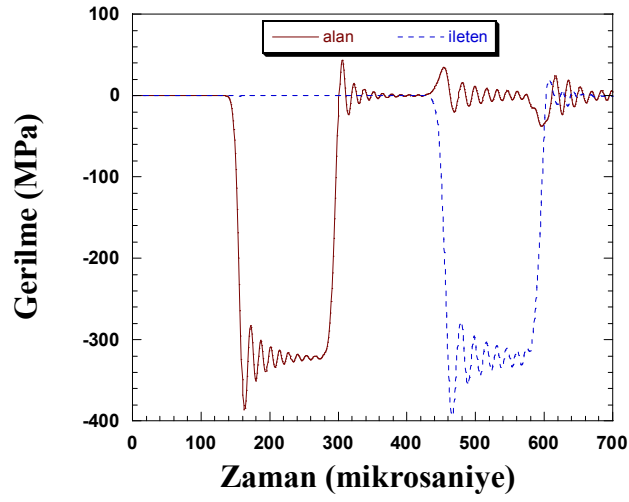
### 4.1 Tek katmanlı seramik, kompozit ve lastik testi

Tek katmanlı numunelerde ilk deneyler ve nümerik hesaplamalar seramik ve kompozit üzerine yapılmıştır. Şekil 17(a) ve (b) seramik malzemenin HBB testinde deneysel ölçülen ve nümerik hesaplanan alan ve iletilen çubuk gerilmelerini sırasıyla göstermektedir. Aynı veriler Şekil 18(a) ve (b)'de kompozit numune için gösterilmiştir. Model ve deneysel gerilmeler arasında uyumluluk bu şekillerde açıkça görülmektedir. Nümerik ve deneysel gerilmeler arasındaki temel farklılık çözünürlük farkıdır. Çubuklar üzerinde kullanılan geyçlerin uzunluğu 3,2 mm'dir; gerilmeler 3,2 mm'lik bölgede ortalama gerilme olarak ölçülmektedir. Numune üzerinden alınan ölçümlerde ise hassasiyeti artırmak için 0,76 mm uzunluğunda geyçler kullanılmıştır.

Şekil 19(a)'da seramik numune üzerinde 3 farklı yerde (A, C ve B) hesaplanan gerilmeler gösterilmektedir. Bu şekilde geyç yerlerinden A alan çubuğa, C ise ileten çubuğa yakındır; B ise numunenin ortasındadır. Şekil 19(a) görüleceği üzere seramik numune üzerindeki gerilmeler düzensizdir ve gerilmeler orta kısımda en küçük, kenar kısımlarda ise büyüktür. Benzer gerilme düzensizliği Şekil 19(b)'de tek katmanlı kompozit numune içinde gösterilmiştir. Bu sonuçlar açıkça seçilen ölçüm noktasının gerilme değerlerinin belirlenmesinde kritik olduğunu göstermektedir. Bahsedilen nümerik hesaplamalarda kullanılan ölçüm noktaları çubuklardan 2 mm uzaklıktadır. Orta kısımdan yapılan ölçümlerle karşılaştırıldığında uç kısımlarda gerilmede %10'luk artışlar hesaplanmıştır. Ölçüm yerleri çubuklardan 0,2 mm uzaklıkta alındığında, gerilmeler iki katına çıkmaktadır. Numuneden alınacak ölçüm yerlerinin ölçülen gerilmeyi oldukça fazla etkilediği görülmektedir. Şekil 19(c) ve (d) sırasıyla seramik ve kompozit malzemenin ortasında geyçlerle ölçülen deneysel gerilmeleri göstermektedir. Deneysel gerilmelerin şekli ve boyutu nümerik gerilmelerle uyumlu olduğu görülmektedir. Yine benzer şekilde, nümerik ölçümlerin çözünürlüğünün deneysel ölçümlerden daha yüksek olduğu bu şekillerde görülmektedir.

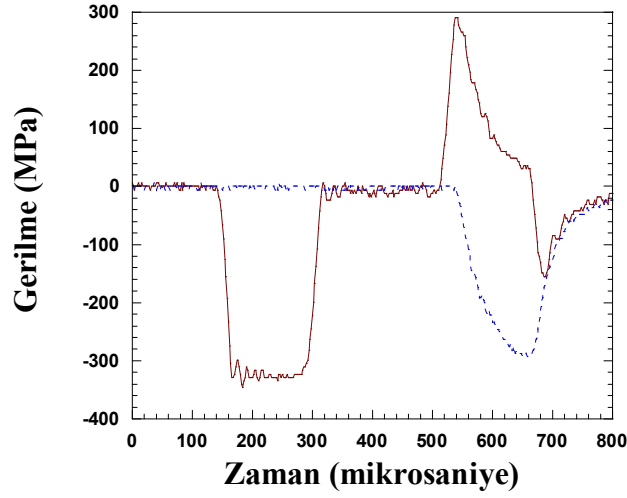


(a)

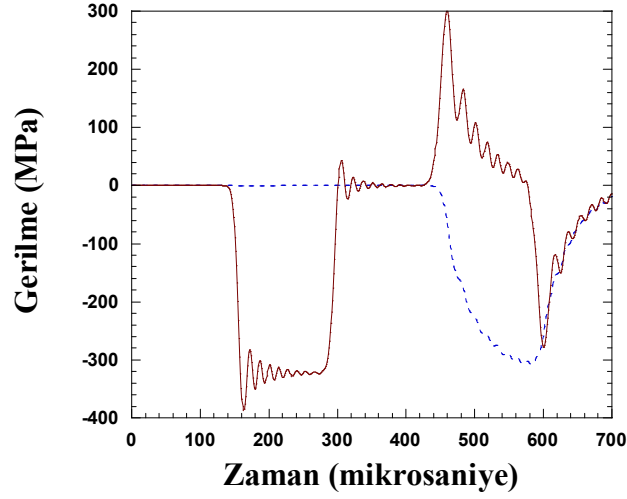


(b)

Şekil 17 Seramik numune HBB testinde alan ve ileten çubuklarda birim şekil değişimi geçiş değerleri: (a) deneysel ve (b) nümerik.

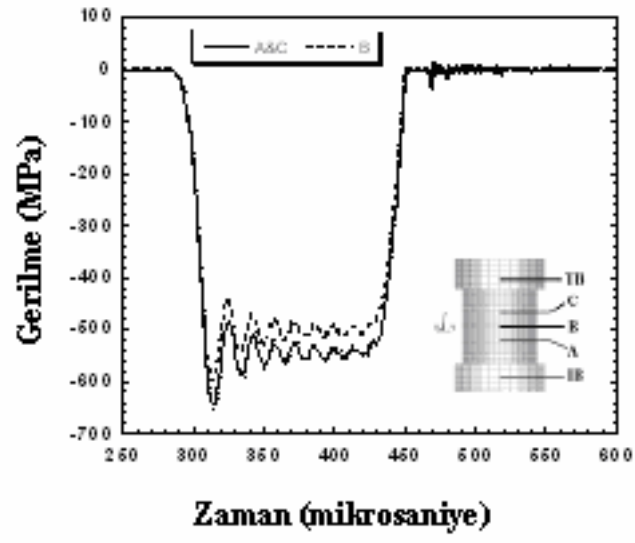


(a)

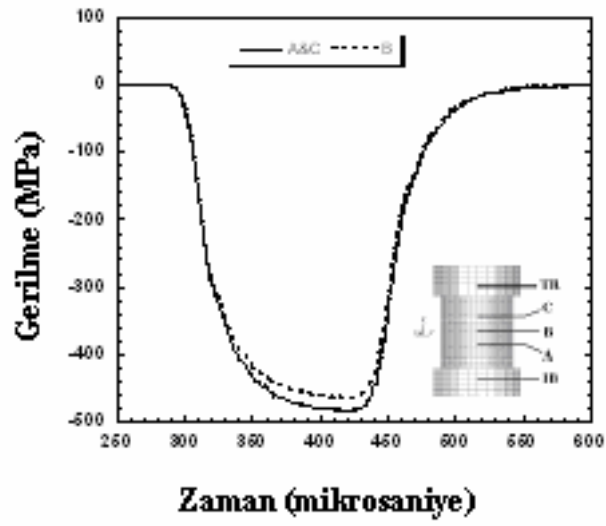


(b)

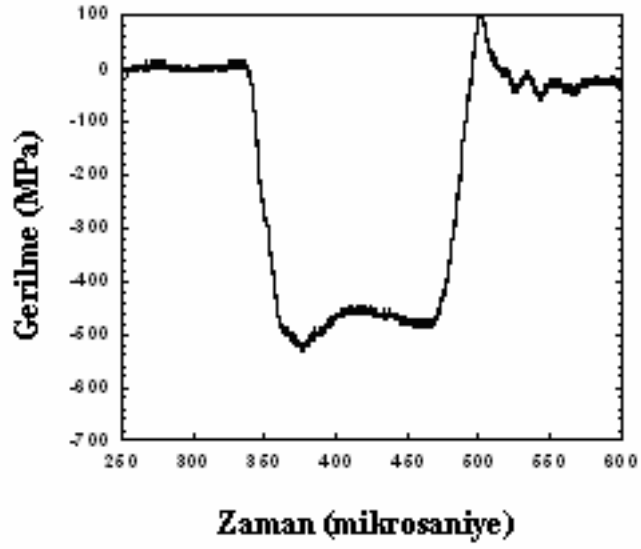
Şekil 18 Kompozit numune HBB testinde alan ve iletken çubuklarda birim şekil değişimi geyç değerleri: (a) deneysel ve (b) nümerik.



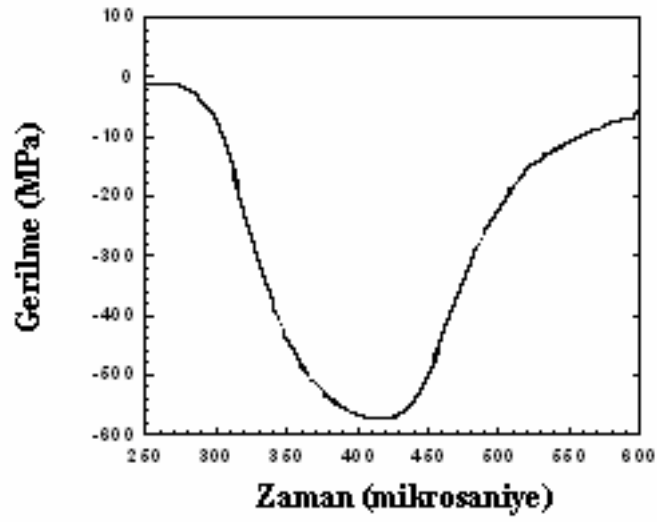
(a)



(b)



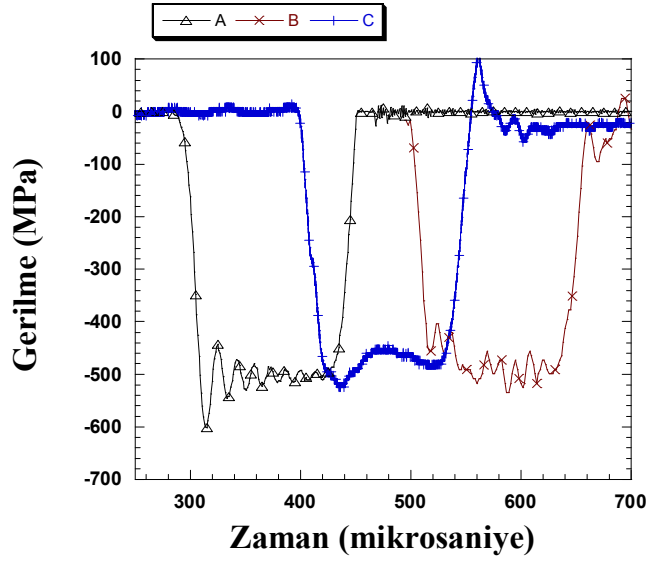
(c)



(d)

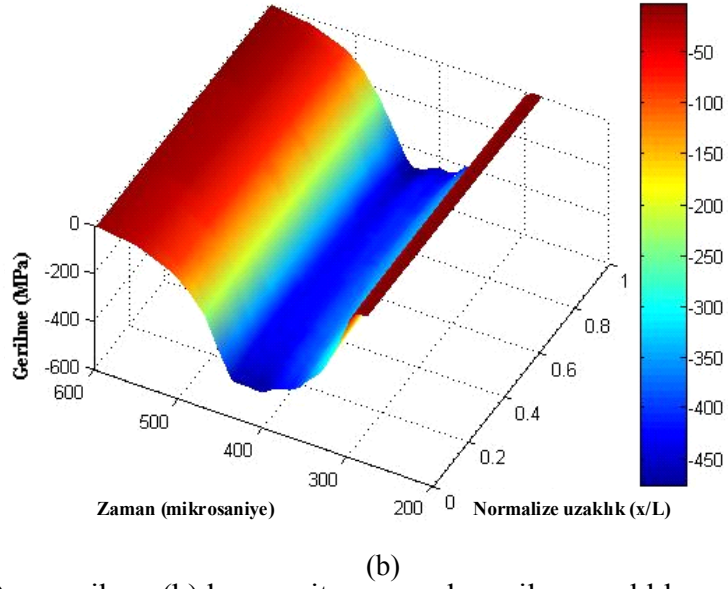
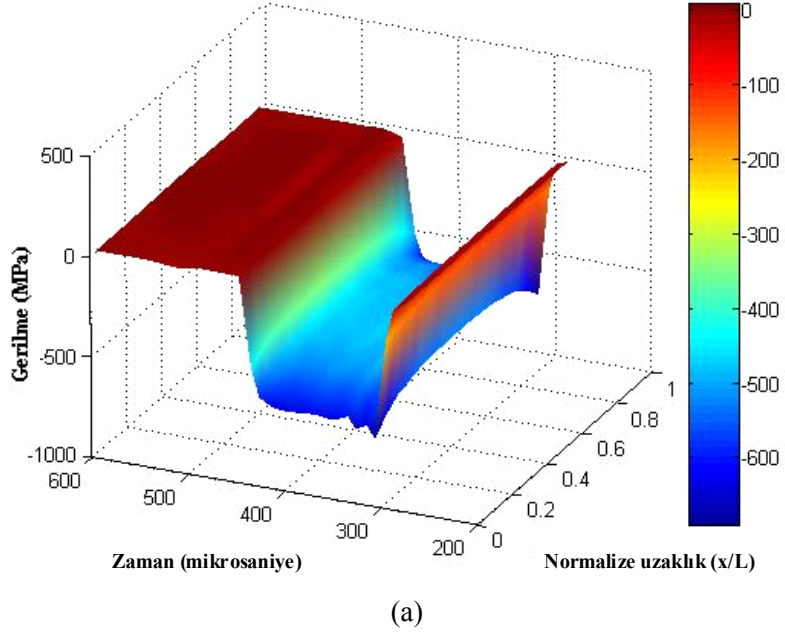
Şekil 19 (a) seramik numune üzerinden 3 farklı yerde hesaplanan Z-gerilmesi (numune boyunca), (b) kompozit numunede 3 yerden hesaplanan Z-gerilmesi ve numunenin ortasından deneysel ölçülen Z-gerilmesi, (c) seramik ve (d) kompozit.

Şekil 20’de üç farklı yöntemle ölçülen seramik numune gerilmesi karşılaştırma amacı ile gösterilmektedir. Bunlar yöntemler sırası ile nümerik, numune üzerine yerleştirilen geyç ve klasik HBB gerilme hesaplama yöntemleridir. Nümerik hesaplama ve geyç ölçümü numunenin orta noktasında yapılmıştır. Nümerik ve numune üzerinden ölçülen gerilmeler Şekil 20’de görüldüğü üzere HBB gerilme hesaplama yönteminden daha hassastır ve birbirlerinin benzeridir.



Şekil 20 Seramik numunenin ortasındaki gerilmeler: (A)nümerik, (B) numune üzerindeki geyç ve (C) HBB’den hesaplanan. (Grafikler zaman ekseninde kaydırılmıştır).

Şekil 21(a) ve (b)’de sırasıyla HBB testi esnasında seramik ve kompozit numunede oluşan nümerik gerilme-uzaklık-zaman grafikleri gösterilmektedir. Burada kullanılan uzaklık normalize uzaklıktır. Normalize uzaklık 0, alan çubuk/seramik numune ara yüzeyine, normalize uzaklık 1 ise seramik/iletken çubuk ara yüzeyine karşılık gelmektedir. Bu şekiller oluşan gerilme dalgasının numune içindeki geçişinin anlaşılmasına olanak sağlamaktadır. Şekil 21(a) ’da görüleceği üzere seramik numune boyuca gerilme düzensiz dağılmaktadır. numune uçlarında gerilmeler daha yüksek, numune ortasında ise daha düşüktür. Ancak kompozit numunede gerilmeler daha homojendir (Şekil 21(b)). Bu bulgular akustik olarak yumuşak olan malzemelerde, sert olan malzemelere göre gerilmelerin daha homojen olduğunu göstermektedir.

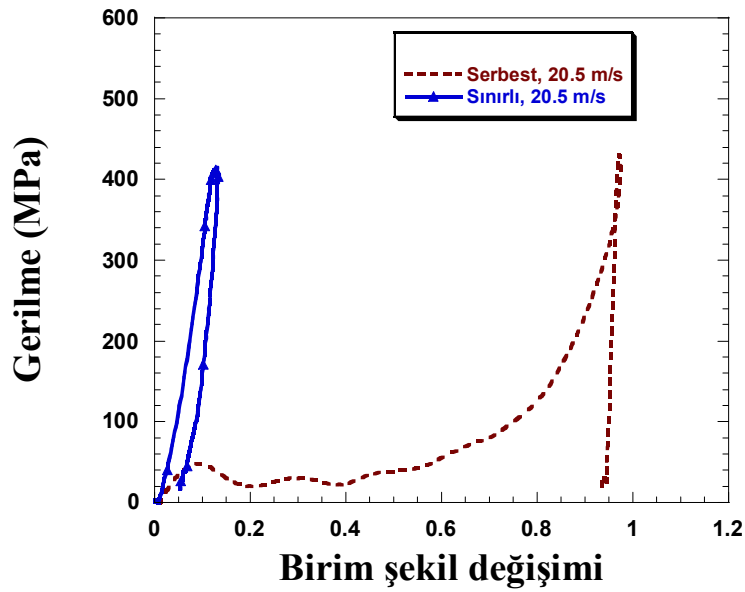


Şekil 21

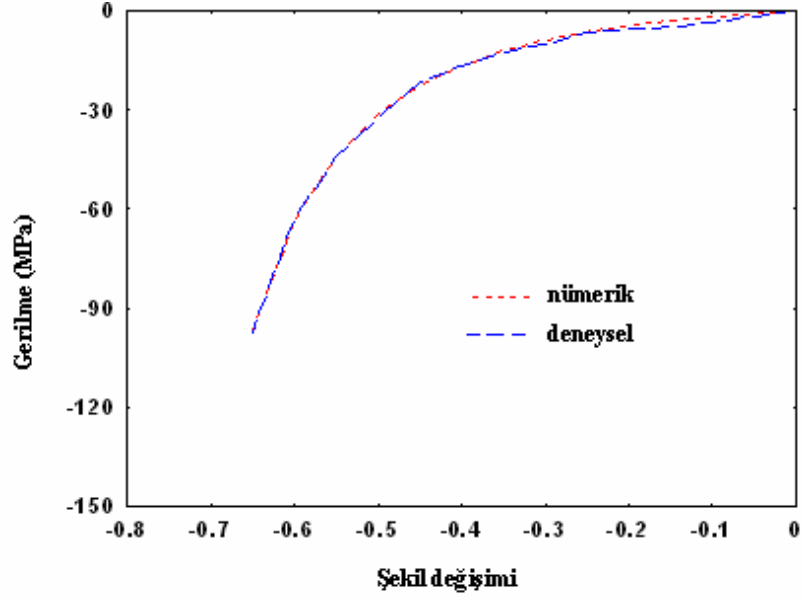
(a) seramik ve (b) kompozit numunede gerilme-uzaklık-zaman grafikleri.



EPDM lastik genel olarak iyi bir şok emici malzeme olarak bilinmektedir. Çekme ve basma yükleri altında oldukça fazla lineer olmayan davranış gösterir. Daha önce bahsedildiği üzere lastiğin ara yüzey malzemesi olarak kullanımı zırh yapıların ‘çoklu çarpma’ kapasitesini artırdığı ileri sürülmektedir. Şekil 22’de EPDM lastiğin serbest ve sınırlı durumunda HBB testi gerilme-birim şekil değişimi grafikleri gösterilmektedir. Lastik serbest durumda plato gerilmesi sonrasında artan gerilmeler göstermektedir. Sınırlı durumda ise çok düşük birim şekil değişim miktarlarında gerilmeler aşırı yükselmektedir. Şekil 22 yanal sınırlamanın lastik deformasyonunu tamamen değiştirdiğini göstermektedir. Zırh malzeme sisteminde ara yüzey malzemesinden beklenen temel özellikler düşük gerilmelerde deformasyon ve arka kompozit tabakaya düşük yüklerin iletilmesidir. Lastik, sınırlı durumda bu görevi yerine getirememektedir. Şekil 23’de EPDM lastik Ogden modeli, deneysel basma gerilme-birim şekil değişimi grafiği ile karşılaştırılmaktadır. Nümerik ve deneysel sonuçlar oldukça iyi uyum göstermektedir.

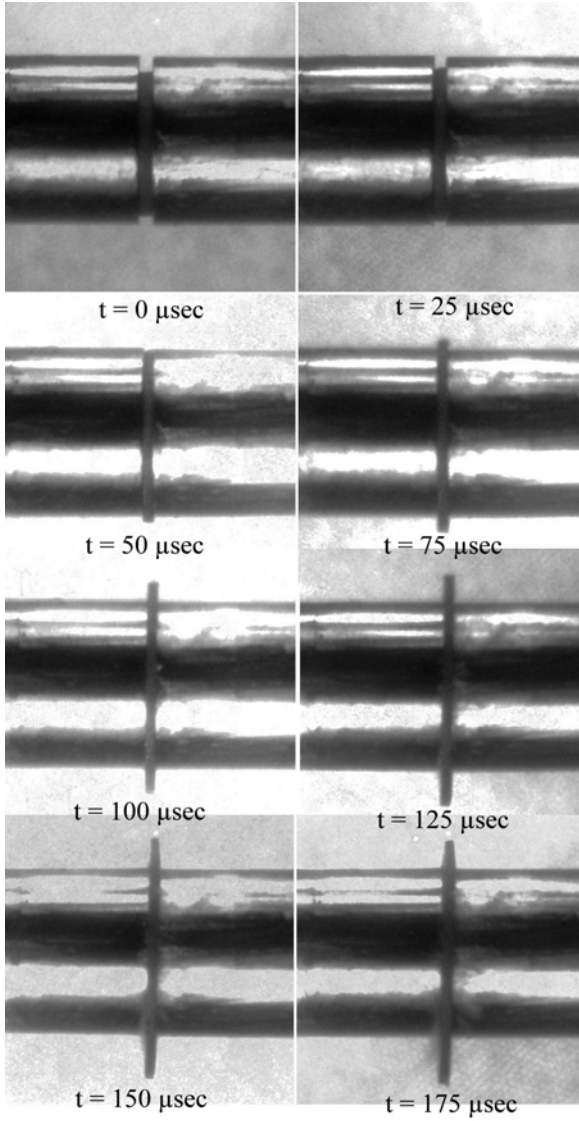


Şekil 22 EPDM lastik numunenin serbest ve sınırlı durumda HBB testi sonucunda ölçülen gerilme-birim şekil değişimi grafikleri .

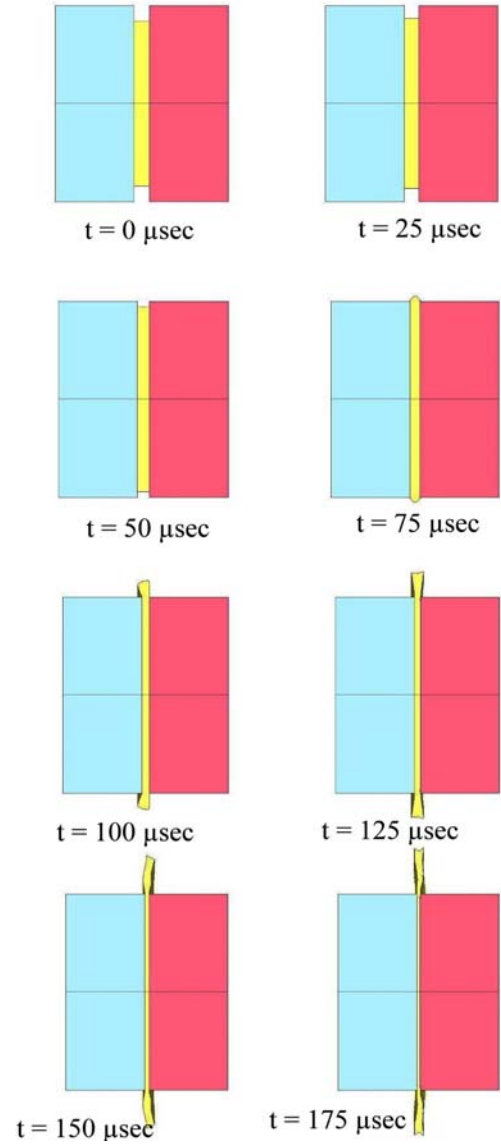


Şekil 23 EPDM lastik numunenin Ogden modeli (nümerik) ve deneysel gerilme-şekil değişimi grafikleri.

Lastiğin HBB testindeki deformasyonu yüksek hız kamera (Ultra 8) ile farklı deformasyon zamanlarında gözlenmiştir. Buna paralel olarak lastik HBB deformasyonu modellenmiştir. Şekil 24(a) alan ve iletilen barlar arasındaki lastiğin farklı zamanlardaki deformasyonunu göstermektedir. Aynı zamanlardaki nümerik lastik deformasyonu ise Şekil 24(b)'de gösterilmektedir. Bu şekillerde sol taraftaki çubuk alan çubuk, sağdaki ise ileten çubuktur. Deneysel ve nümerik deformasyon şekil sonuçları lastiğin çubuklar arasında homojen deformasyona uğradığını göstermektedir. Deneysel ve nümerik deformasyon şekillerindeki uyumluluk ise kullanılan lastik modelinin gerçek malzeme davranışına çok yakın olduğunu ispatlamaktadır.



(a)



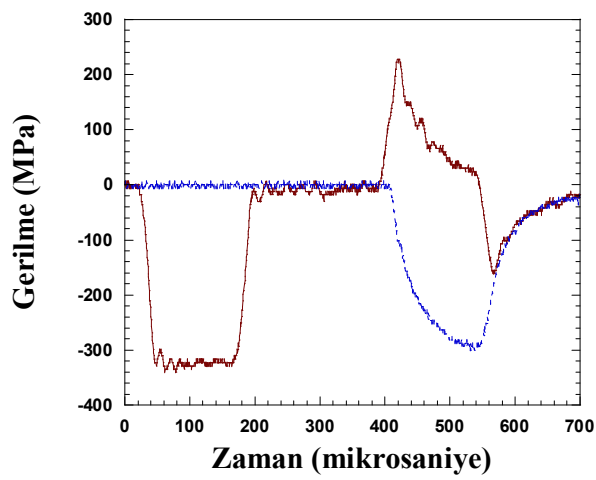
(b)

Şekil 24 EPDM lastik malzemenin farklı zamanlarda HBB çubukları arasındaki deformasyonu: (a) deneysel ve (b) nümerik.

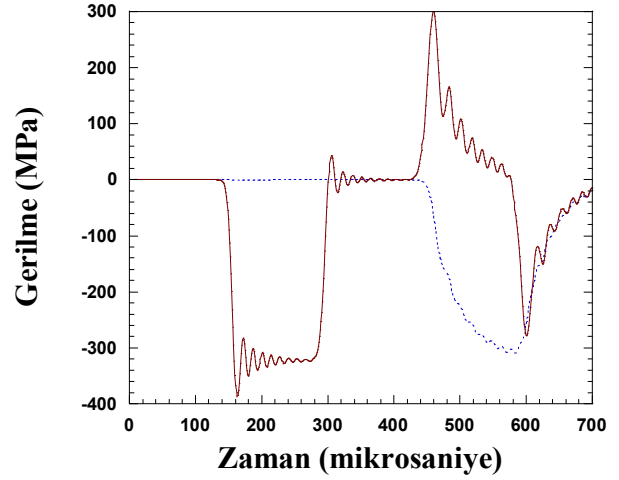
## 4.2 İki katmanlı seramik ve kompozit testi

İki katmanlı seramik/kompozit malzemeler HBB'ında test edilerek, deformasyonları modellenmiştir. Şekil 25(a) ve (b) sırası ile iki katmanlı malzemenin HBB testinde oluşan deneysel ve nümerik alan, geri gelen ve iletilen gerilmeleri göstermektedir. Deneysel ve nümerik sonuçlar tek katmanlı malzemelerde olduğu gibi oldukça benzerdir. Bu malzemelerde iletilen gerilmeler tek katmanlı kompozitin HBB testindeki iletilen gerilmelerle benzerlik göstermektedir. Bu ise iki katmanlı malzemede kompozite seramik katmanı eklenmesinin gerilme geçişini etkilemediğini göstermektedir. Esasen seramik katman kompozit için sadece sert bir kaplama oluşturmaktadır. Şekil 25(c)'de ise gerilme-uzaklık-zaman grafiği gösterilmektedir. Tek katmanlı malzemelerde gözlemlendiği gibi, seramik malzemede gerilmelerin numune boyunca düzensiz olduğu bu şekilde görülmektedir. Şekil 25(c)'den görüleceği üzere ara yüzeyde basma gerilmeleri daha düşüktür ve maksimum gerilmeler seramik/alan bar ara yüzeyine yakın bölgede oluşmaktadır.

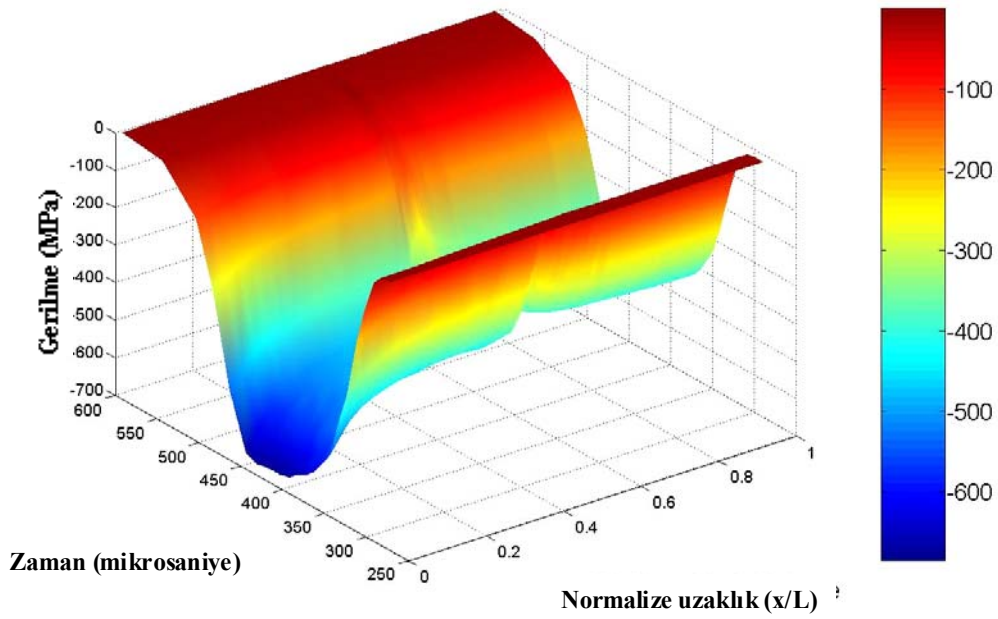
Şekil 26(a) ve (b)'de sırasıyla seramik numune üzerinde 3 farklı noktada hesaplanan gerilmeler ve yine seramik numunenin ortasından geyç ile ölçülen deneysel gerilme gösterilmektedir. Benzer grafikler kompozit numune için Şekil 26(c) ve (d)'de gösterilmektedir. Tek katmanlı seramik numune ile karşılaştırıldığında, iki katmanlı malzemede seramik katmanındaki gerilmeler daha fazla dalgalanmalar göstermektedir. Ayrıca, iki katmanlı numunede seramik katmanındaki gerilme profili kompozit katmanındaki gerilme profiline benzemektedir. Bu ise iki katmanlı malzemede kompozit tabakasının seramik tabakası üzerinde oluşan gerilmelerde etkin olduğunu göstermektedir.



(a)

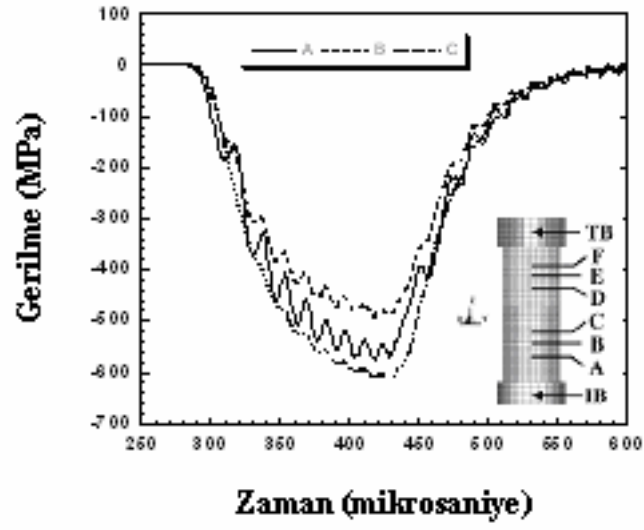


(b)

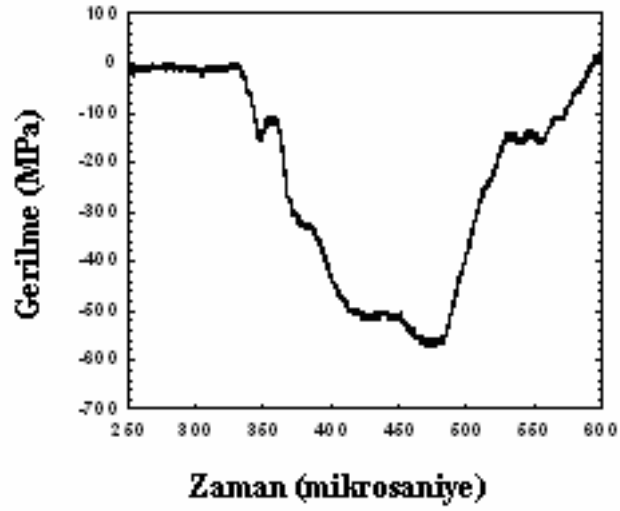


(c)

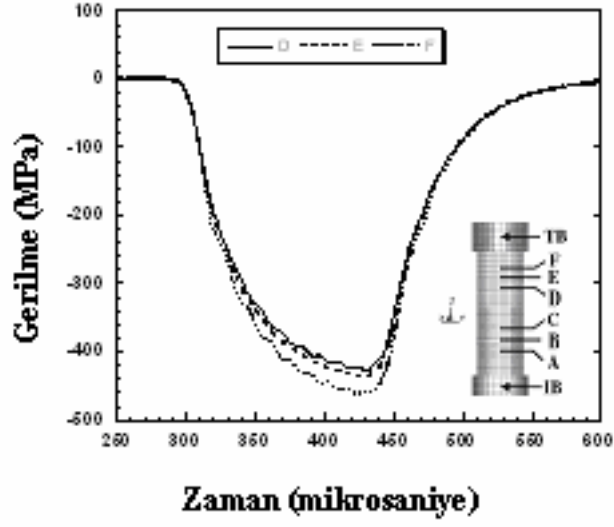
Şekil 25 İki katmanlı seramik/kompozit malzemede (a)deneySEL ve (b)nümerik alan, geri gelen ve iletilen gerilmeler ve (c)nümerik gerilme-zaman-uzaklık grafiği.



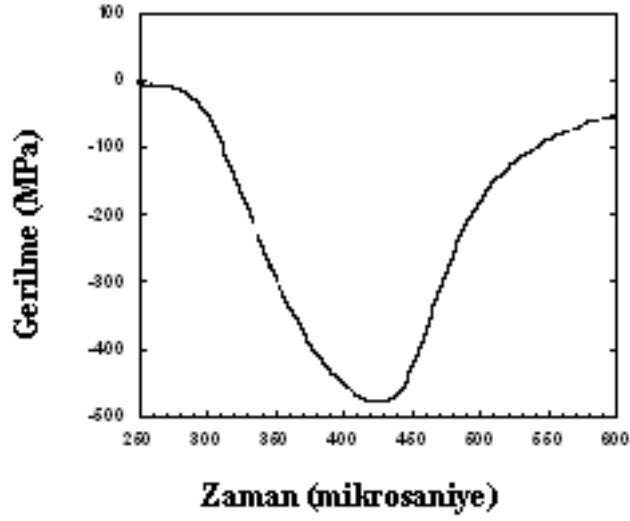
(a)



(b)



(c)



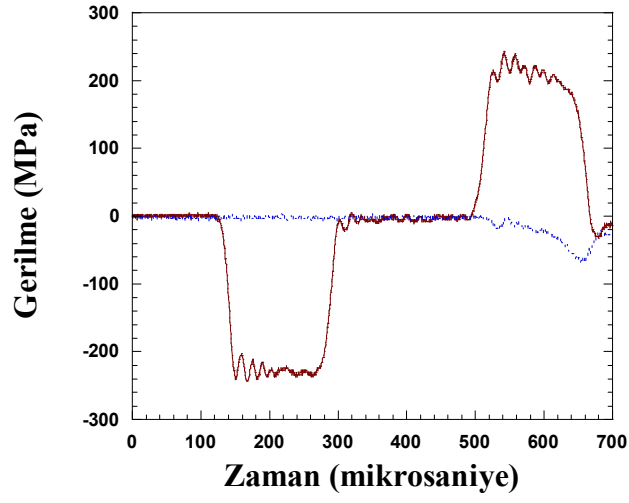
(d)

Şekil 26 İki katmanlı malzemede gerilme hesaplamaları: (a)seramik numunede 3 farklı noktadan hesaplanan Z-gerilmesi ve (b)ortadan deneysel ölçülen gerilme, (c) kompozit numunede 3 farklı noktadan hesaplanan Z-gerilmesi ve (d)ortadan deneysel ölçülen gerilme.

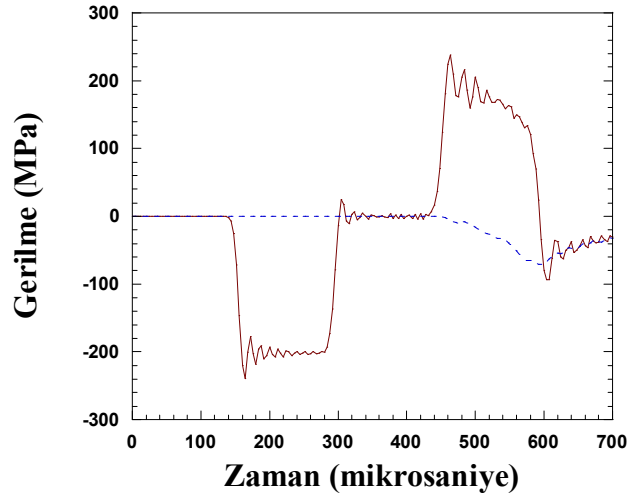
### 4.3 Üç katmanlı seramik, lastik ve kompozit testi

Şekil 27(a) ve (b)'de sırası ile serbest lastik durumu için üç katmanlı malzemede HBB deneysel ve nümerik test sonuçları, Şekil 27(c) ve (d)'ise sınırlı lastik durumu için üç katmanlı malzemede HBB deneysel ve nümerik test sonuçları gösterilmektedir. Serbest lastik durumunda iletilen gerilme deformasyon zamanında yavaşça 60 MPa'la kadar yükselmektedir (Şekil 27(b)). Sınırlı lastik durumunda ise geri gelen ve iletilen gerilmeler serbest durumdan oldukça farklıdır. Sınırlı durumda iletilen gerilme 200 MPa'a kadar yükselmektedir. HBB serbest lastik testi esansında seramik katmanda deneysel ölçülen ve hesaplanan gerilmeler sırasıyla Şekil 28(a) ve (b)'de, kompozit katmanda ise Şekil 28(c) ve (d)'de gösterilmektedir. Şekil 28(a) ve (b)'de görüldüğü üzere seramikteki gerilmeler zamanla önemli değişimler göstermektedir. Alan çubuk/seramik ara yüzeyindeki gerilmeler seramik/lastik ara yüzeyindeki gerilmelerden daha yüksektir. Benzer şekilde kompozit malzemede oluşan gerilmeler zamanla değişimler göstermektedir. Ayrıca Şekil 28'de gösterilen nümerik gerilme değerleri deneysel ölçülen gerilmelerle uyumluluk göstermektedir. Şekil 29(a) ve (b)'de sınırlı lastik durumunda seramik ve kompozit numunede ölçülen ve hesaplanan gerilmeler sırasıyla gösterilmiştir. Aralarındaki çok az farklılıklara rağmen, nümerik ve deneysel veriler oldukça benzerdir. Bu şekillerde dikkat çeken önemli bir nokta ise, sınırlı durumda seramik ve kompozit katmalından benzer boyutta gerilmelerin geçişidir. Şekil 30(a) ve (b)'de ise sınırlı ve serbest lastik durumlarında seramik ve kompozit numunelerde ölçülen deneysel gerilmeler gösterilmektedir. Sınırlı lastik durumunda hem seramik ve hem de kompozitten daha yüksek gerilmeler geçmektedir. Şekil 30'a karşılık gelen nümerik veriler Şekil 31'de gösterilmektedir. Nümerik sonuçlar yine deneysel gerilme sonuçları ile paralellik göstermektedir.

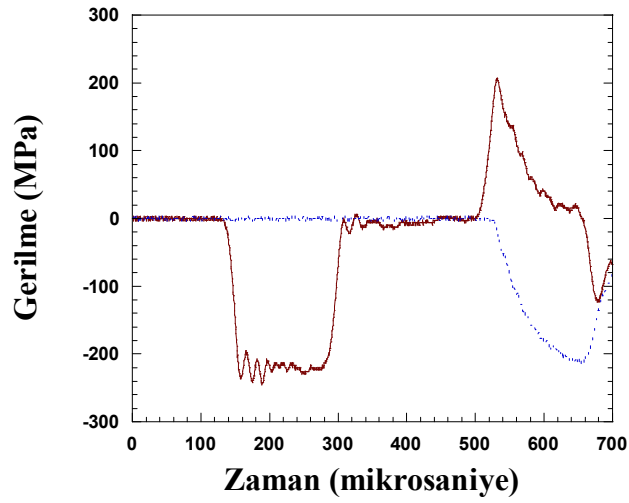




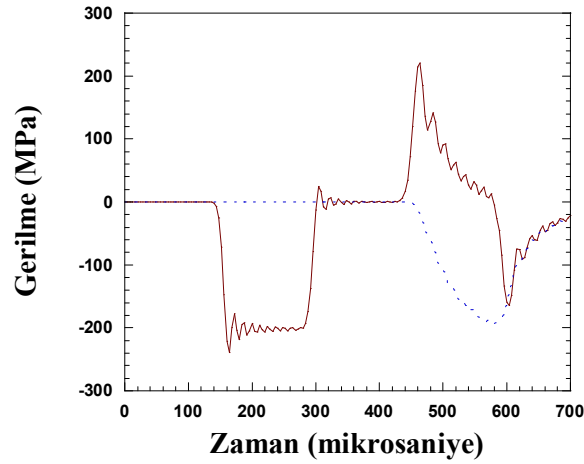
(a)



(b)

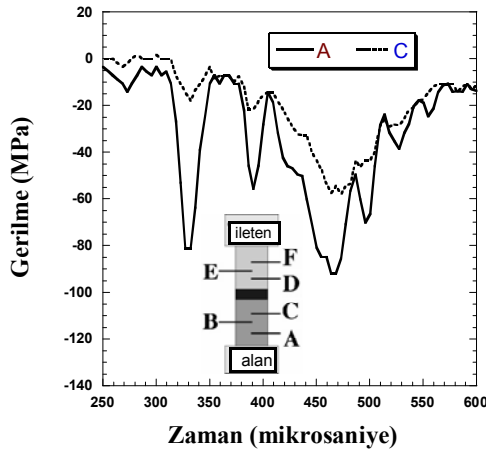


(c)

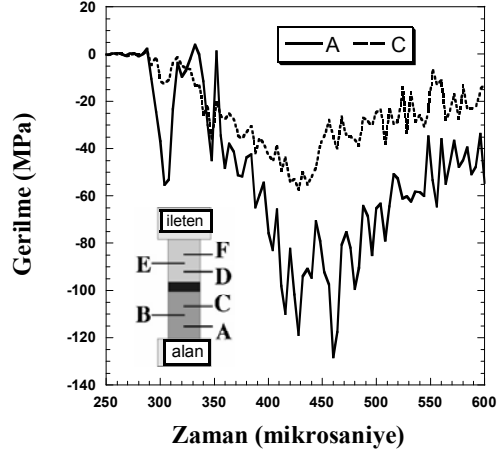


(d)

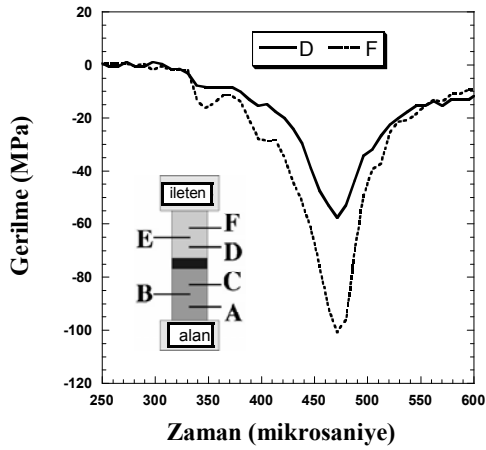
Şekil 27 Üç katmanlı malzeme 10 m/s çarpan çubuk hızı HBB testinde alan, geri gelen ve iletilen gerilmeler: serbest lastik durumu: (a) deneysel ve (b) nümerik ve sınırlı lastik durumu:(c) deneysel ve (d) nümerik sonuçlar.



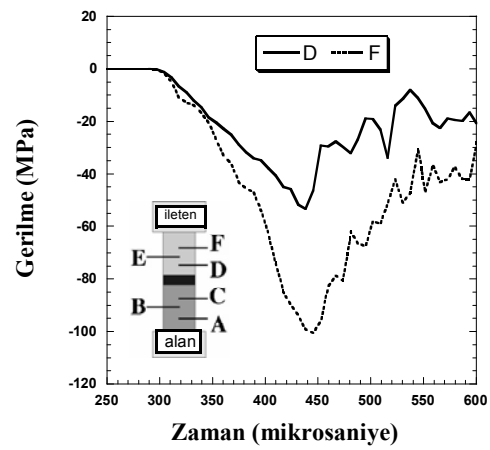
(a)



(b)

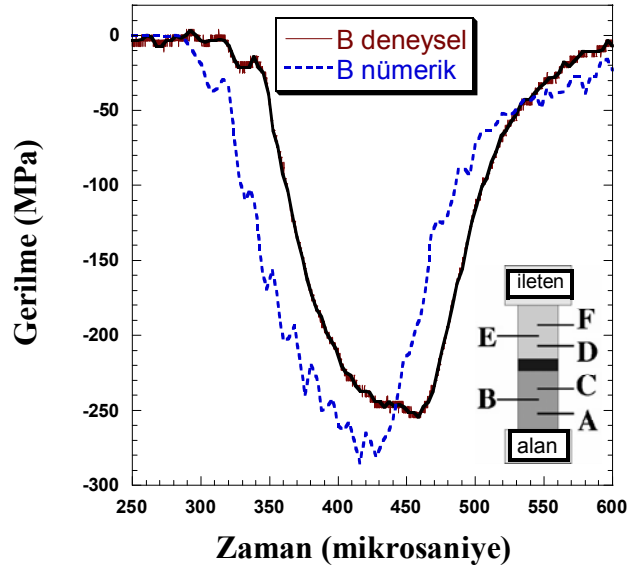


(c)

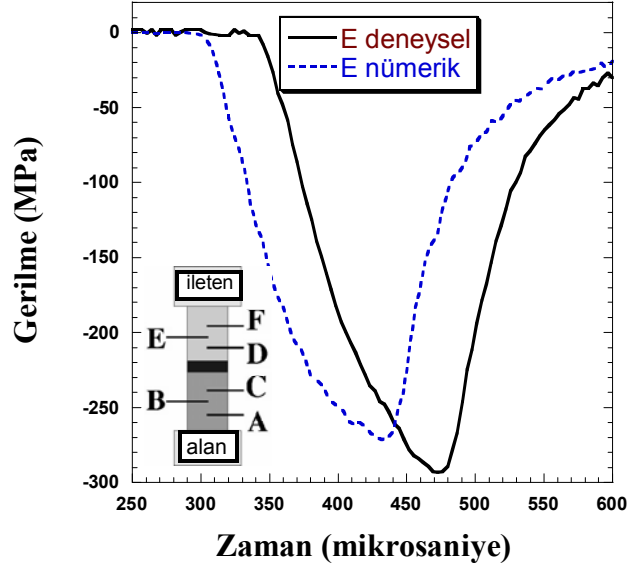


(d)

Şekil 28 Üç tabakalı serbest lastik malzeme HBB testinde ( $V = 10$  m/s) seramikteki (a)deneysel ve (b)nümerik gerilmeler ve kompozitteki (c) deneysel ve (d) nümerik gerilmeler.

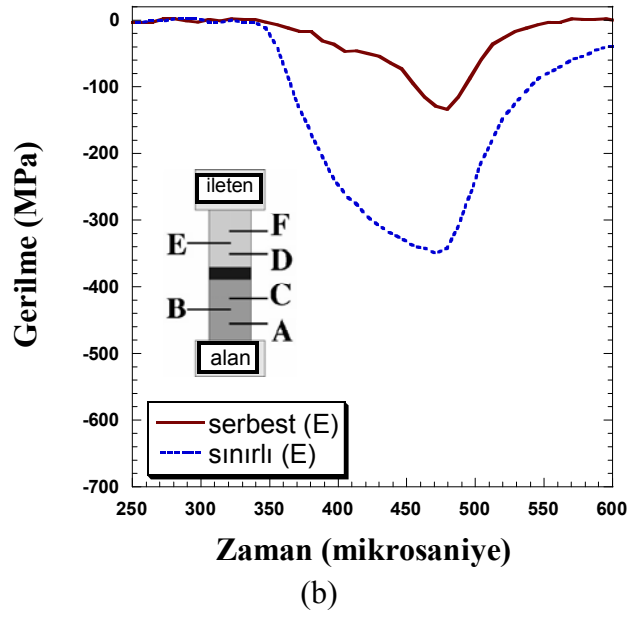
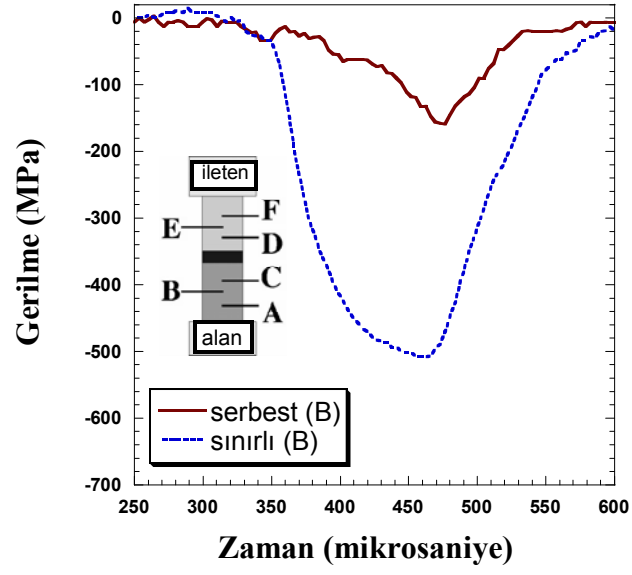


(a)

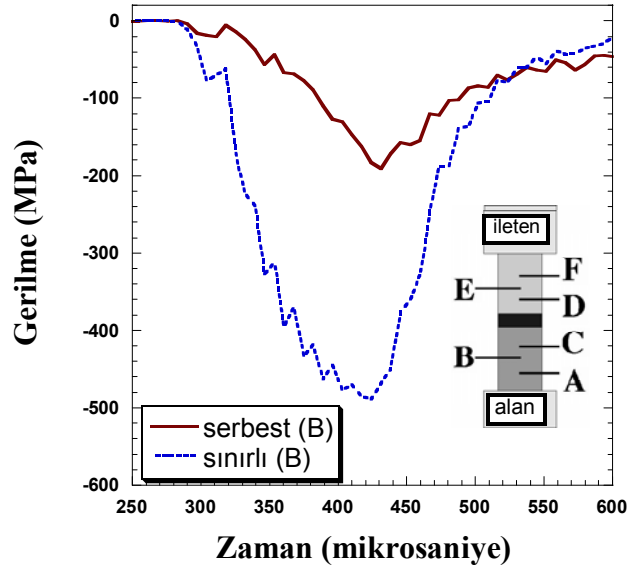


(b)

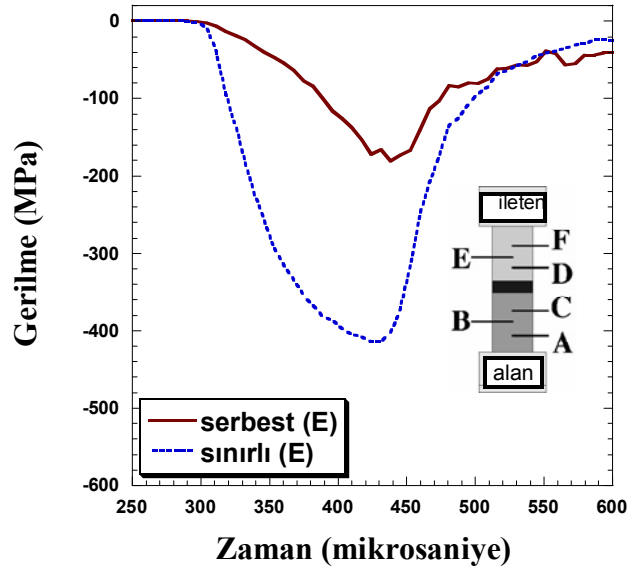
Şekil 29 Sınırlı lastik durumu için üç katmanlı malzemenin HBB testinde ( $V = 10$  m/s) (a) seramik malzemede oluşan deneysel ve nümerik gerilmeler ve (b) kompozit malzemede oluşan deneysel ve nümerik gerilmeler.



Şekil 30 Üç katmanlı malzeme HBB testinde ( $V = 16$  m/s) serbest ve sınırlı lastik durumunda (a) seramik malzemedeki deneysel gerilmeler ve (b) kompozit malzemedeki deneysel gerilmeler.



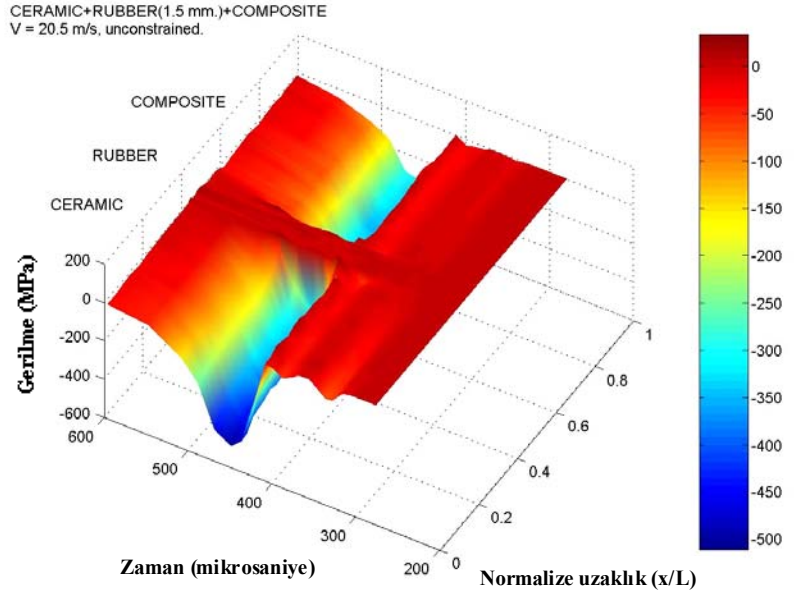
(a)



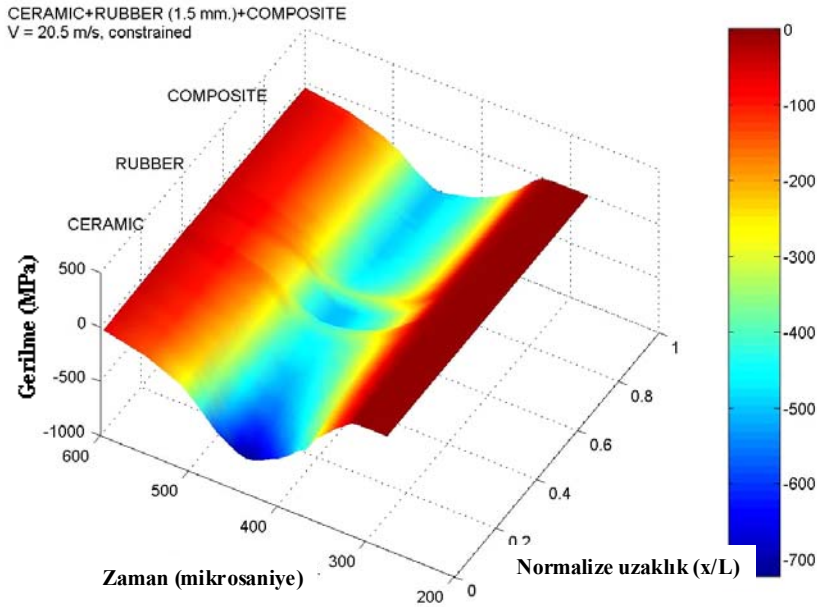
(b)

Şekil 31 Üç katmanlı malzeme HBB testinde ( $V = 16$  m/s) serbest ve sınırlı lastik durumunda (a) seramik malzemedeki nümerik gerilmeler ve (b) kompozit malzemedeki nümerik gerilmeler.

Şekil 32(a) ve (b) serbest ve sınırlı lastik durumları için üç katmanlı malzemede gerilme-uzaklık-zaman grafiklerini sırasıyla göstermektedir. Lastik deformasyonu sınırlama etkisi seramik/kompozit ara yüzeyinde görülmektedir. Sınırlama ile ara yüzey, seramik ve kompozitteki gerilmeler önemli derecede yükselmiştir.



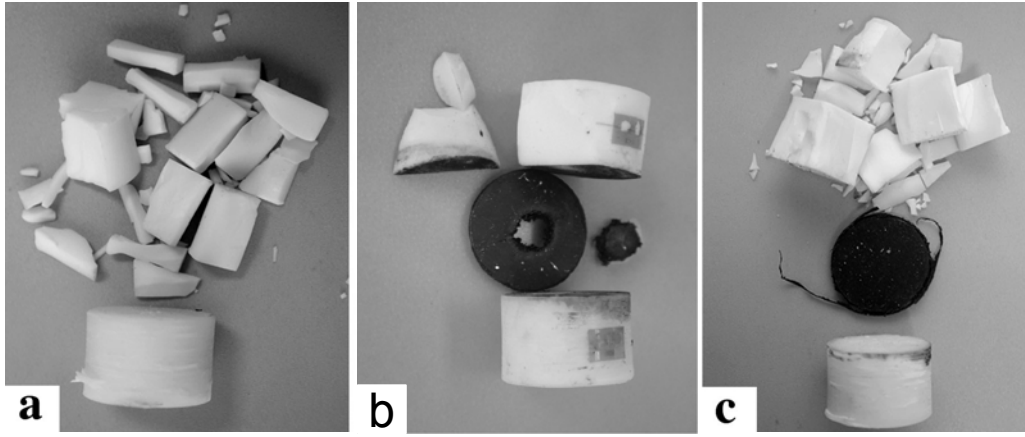
(a)



(b)

Şekil 32 Üç katmanlı seramik/lastik/kompozit malzemede nümerik gerilme-zaman-uzaklık grafiği (a) serbest lastik ve (b) sınırlı lastik durumları.

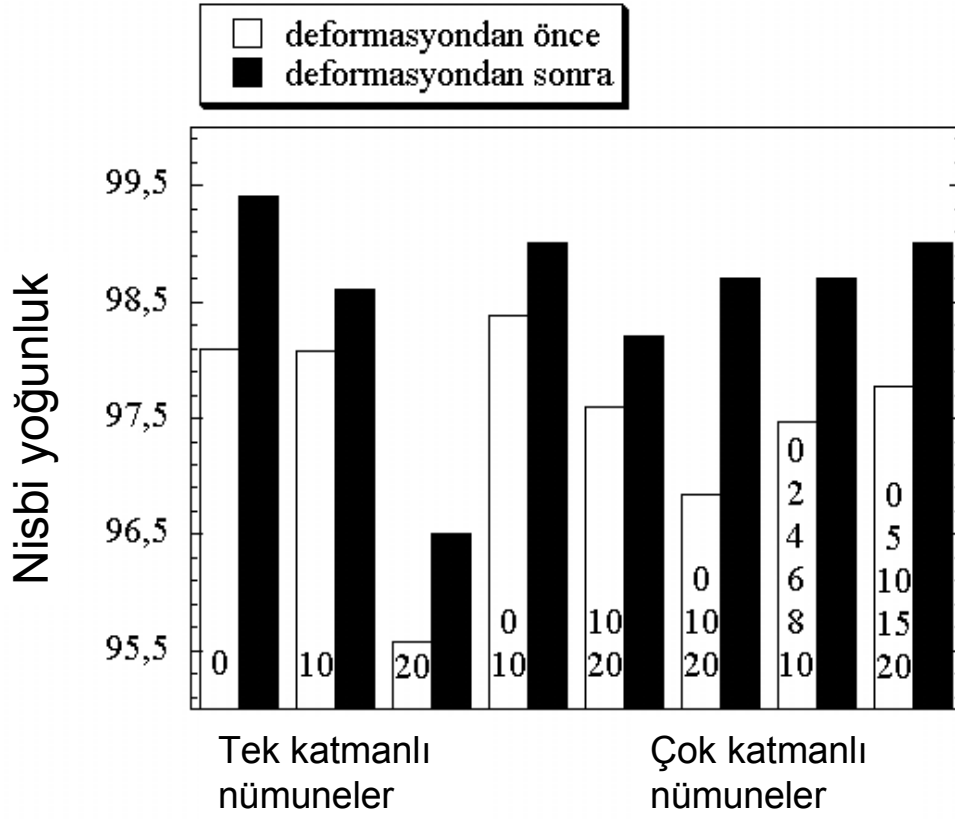
Şekil 33’de aynı HBB hızlarında deforme olan iki katmanlı, üç katmanlı serbest lastikli ve üç katmanlı sınırlı lastikli numunelerin deformasyon sonrası resimleri gösterilmektedir. İki katmanlı numunede seramik birden fazla parçacığa ayrılmıştır (Şekil 33(a)). Benzer şekilde sınırlı lastik durumunda üç katmanlı numunede seramik parçacıklara ayrılmıştır (Şekil 33(c)). Ancak serbest lastik üç katmanlı malzemede seramik bir kaç parçaya ayrılmıştır (Şekil 33(b)). Bu şekiller ölçülen seramik gerilmeleri ile örtüşmektedir. Şekil 33(a) ve (c), sınırlı lastik durumunda seramiğin iki katmanlı malzemeye benzer şekilde kırıldığını göstermektedir. Burada dikkat edilecek önemli nokta ise gerçek zırh sistemlerinin sınır lastik durumuna karşılık geldiğidir.



Şekil 33 23,5 m/s HBB testine tabi tutulmuş (a) seramik/kompozit (b) serbest lastikli üç katmanlı ve (c) sınırlı lastikli üç katmanlı malzemelerin deformasyon sonrası n resimleri.

#### 4.4 Fonksiyonel dereceli SiC/Al metal matris kompozit testi

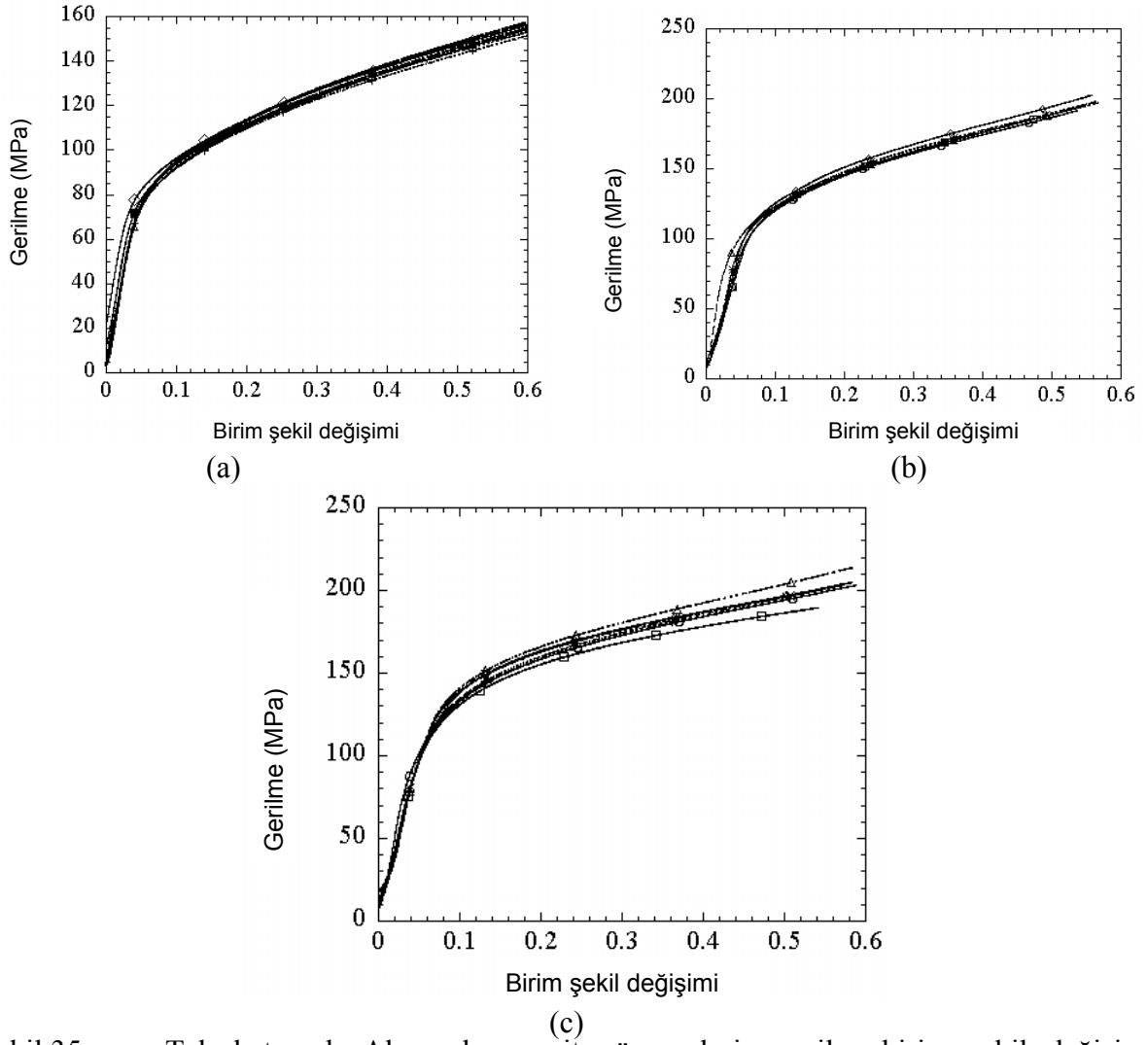
Statik ve yüksek deformasyon testi öncesinde hesaplanan nispi yoğunluk değerleri Şekil 34’de gösterilmektedir. %20 SiC içeren kompozit numuneler dışında tüm tek ve çok katmanlı numunelerin deformasyon sonrasındaki nispi yoğunlukları %98’in üstündedir. %20 SiC içeren kompozitlerin nispi yoğunluklarının düşük olması muhtemelen bu kompozitlerin plastik deformasyon kapasitelerinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Yetersiz plastik deformasyon matris-parçacık ara yüzeyinde bulunan gözeneklerin kapanmasını sağlayamamıştır. Plastik deformasyon aynı zamanda matris ve matris parçacık ara yüzeyinde çatlak ve benzeri hasarlara neden olabilir. Bir kaç numune kesilerek metalografik inceleme yapılmıştır. Bu incelemelerde makro çatlaklara rastlanmamıştır.



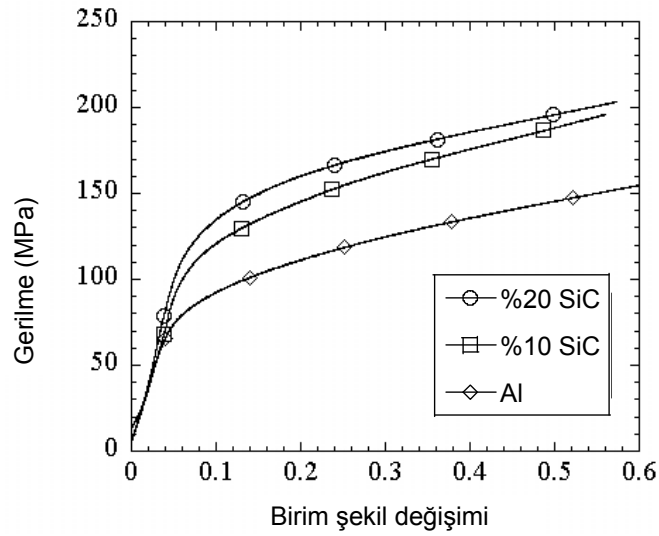
Şekil 34 Statik deformasyon sonucunda Al ve FD SiC/Al kompozit numunelerde nisbi yoğunluk değişimi.

Tek katmanlı numunelerin her birine 5 adet statik basma testi yapılmıştır. Elde edilen gerçek gerilme-birim şekil değişimi grafikleri sırasıyla Al, %10 SiC ve %20 SiC için Şekil 35(a), (b) ve (c)'de gösterilmektedir. Ayrıca tek katmanlı numunelerin statik davranışlarını karşılaştırma amacı ile, seçilen Al, %10 SiC ve %20 SiC numunelerin gerilme-birim şekil değişim grafikleri Şekil 36'da birlikte gösterilmiştir. Şekil 35 ve 36'daki tek katmanlı malzeme statik gerilme-birim şekil değişimi grafiklerinden görüleceği üzere bu malzemeler elastik-plastik davranış göstermektedirler. Lineer elastik bölgeden sonra lineer olmayan elastik deformasyon bölgesinde gerilme sertleşme hızı, birim şekil değişiminin artması ile birlikte azalmaktadır. SiC-parçacık takviyesi ise akma gerilmesini ve birim şekil değişimi sertleşme miktarını artırmaktadır.



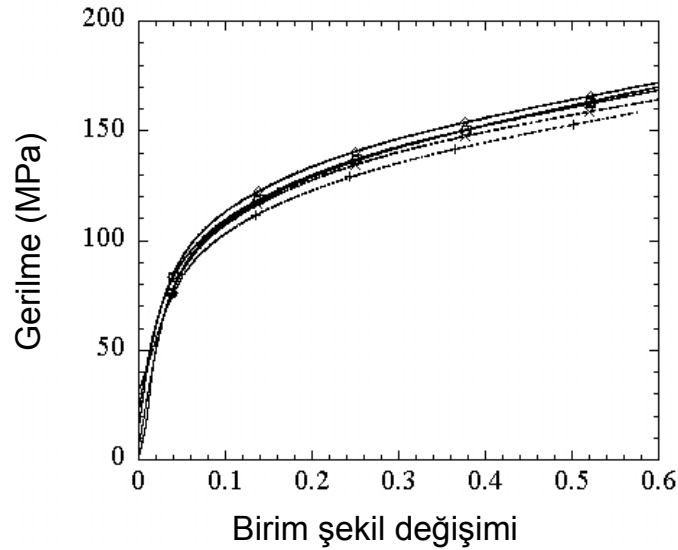


Şekil 35 Tek katmanlı Al ve kompozit nünunelerin gerilme-birim şekil değışimi grafikleri (a)saf Al, (b) %10SiC/Al ve (c)%20 SiC/Al.

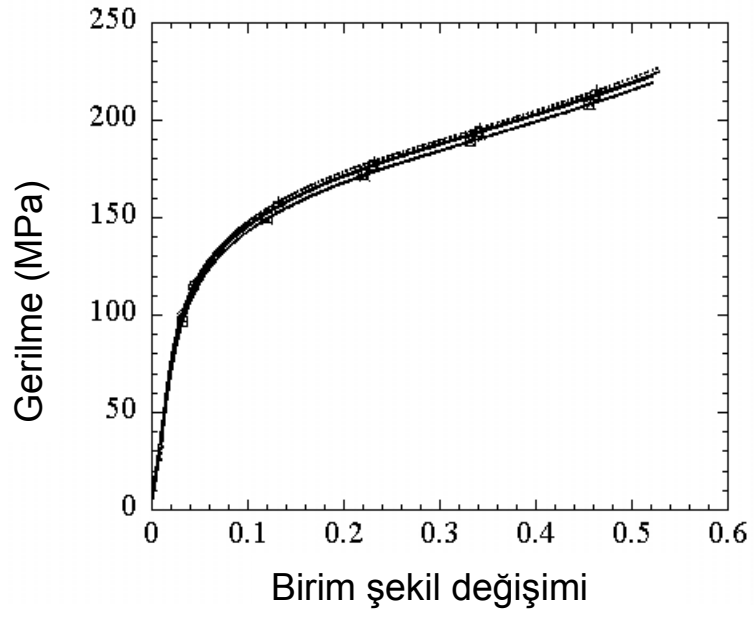


Şekil 36 Tek katmanlı nünunelerin gerilme-birim şekil değışimi grafikleri.

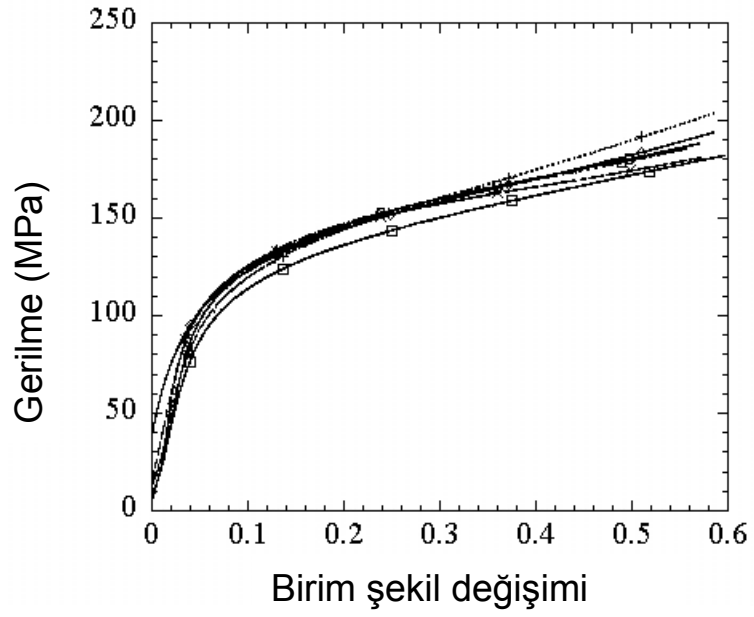
Hazırlanan çok katmanlı 0/10, 10/20, 0/10/20, 0/5/10/15/20 ve 0/2/4/6/8/10 numunelerin statik gerçek gerilme-birim şekil değişimi grafikleri sırasıyla Şekil 37-41'de verilmiştir. 2 katmanlı 0/10 numunelerin gerilme-birim şekil değişimi grafikleri Al ile %10 SiC arasındadır (Şekil 42). 10/20 numunelerin gerilme değerleri ise %10 ve %20 SiC numunelerinkinden daha yüksektir (Şekil 43). 3 katmanlı 0/10/20 numuneler için ortalama SiC hacim oranı %10'dur. Bu numunelerin gerilme-birim şekil değişimi grafikleri %10 SiC içeren tek katmanlı kompozitle örtüşmektedir (Şekil 44). 2 ve 3 katmanlı numuneler arasında en yüksek gerilme değerine sahip numuneler 2 katmanlı 10/20 kompozitlerdir (Şekil 45). Bunun sebebi kısmen 10/20 kompozitlerin ortalama SiC oranınının yüksek olmasıdır. 6 katmanlı numunelerle karşılaştırıldıklarında 5 katmanlı numuneler daha yüksek gerilme değerlerine sahiptirler (Şekil 46). 0/5/10/15/20 kompozitlerde ortalama SiC hacim oranı %10 iken bu oran 0/2/4/6/8/10 kompozitlerde %5'dir. Şekil 47 çok katmanlı numuneleri tipik gerilme-birim şekil değişimi grafiklerini göstermektedir.



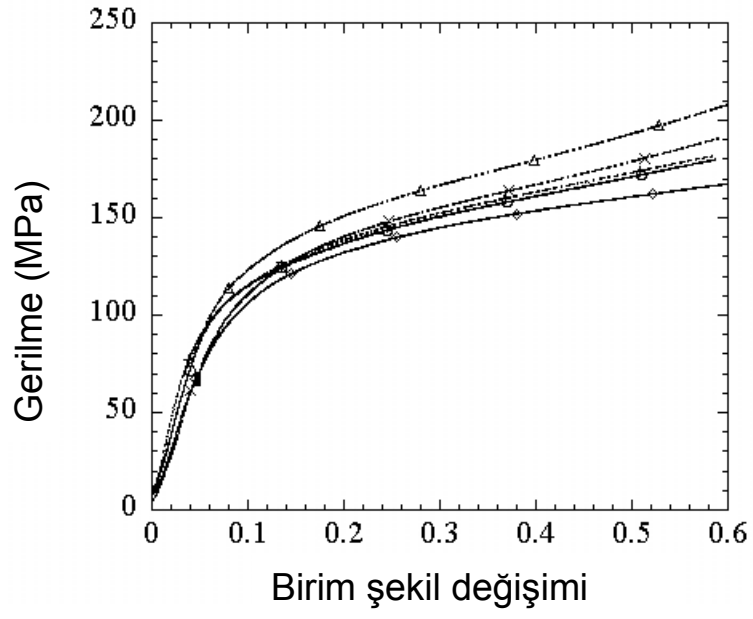
Şekil 37 (0/10) 2 katmanlı numunelerin gerilme-birim şekil değişimi grafikleri.



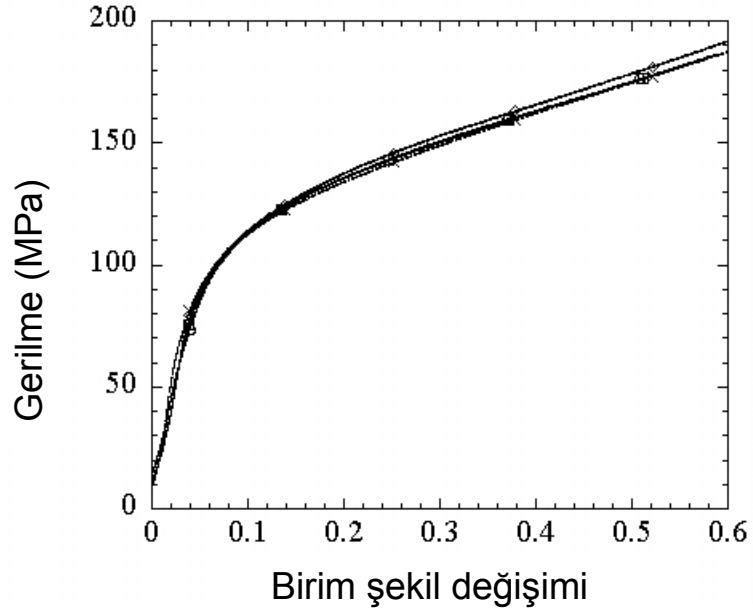
Şekil 38 (10/20) 2 katmanlı numunelerin gerilme-birim şekil değişimi grafikleri.



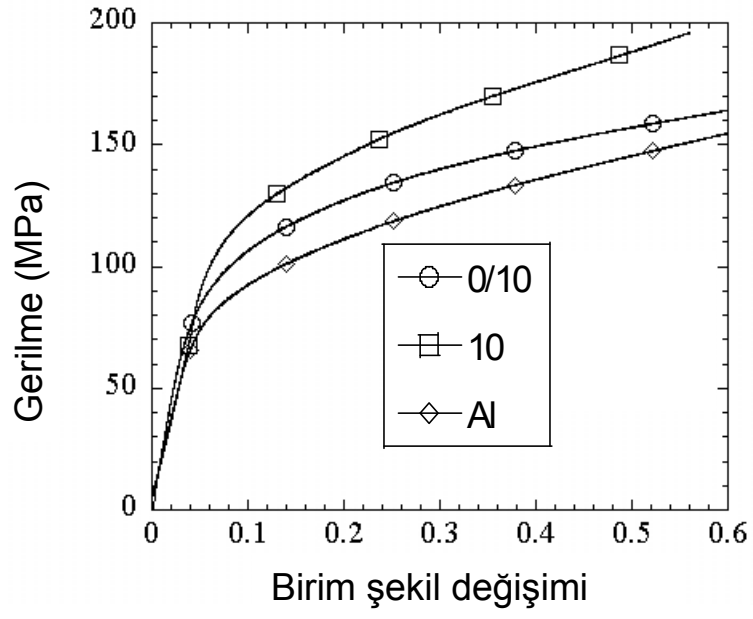
Şekil 39 (0/10/20) 3 katmanlı numunelerin gerilme-birim şekil değişimi grafikleri.



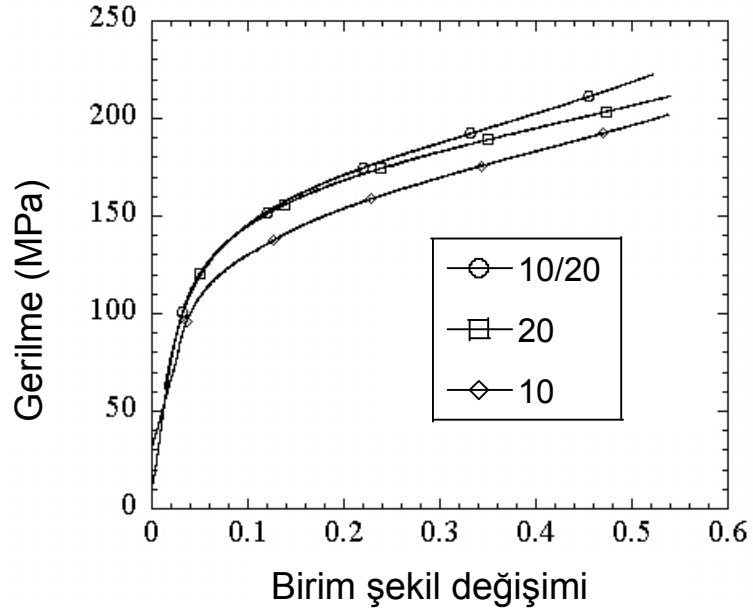
Şekil 40 (0/5/10/15/20) 5 katmanlı numunelerin gerilme-birim şekil değişimi grafikleri.



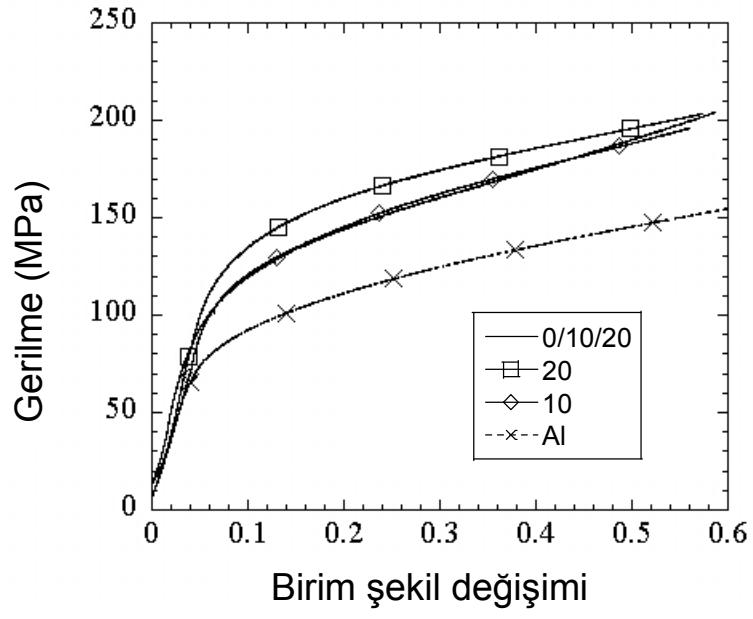
Şekil 41 (0/2/4/6/8/10) 6 katmanlı numunelerin gerilme-birim şekil değişimi grafikleri.



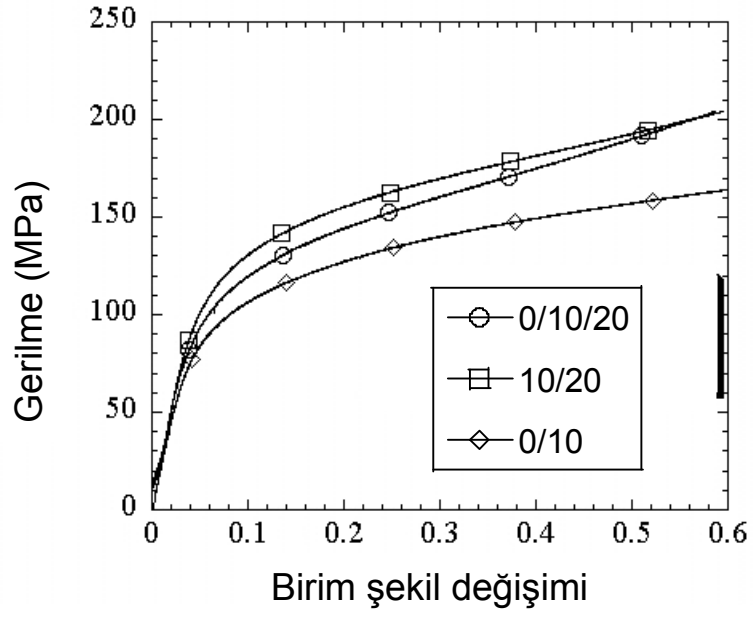
Şekil 42 (0/10) 2 katmanlı numunenin tek katmanlı numunelerle karşılaştırılması.



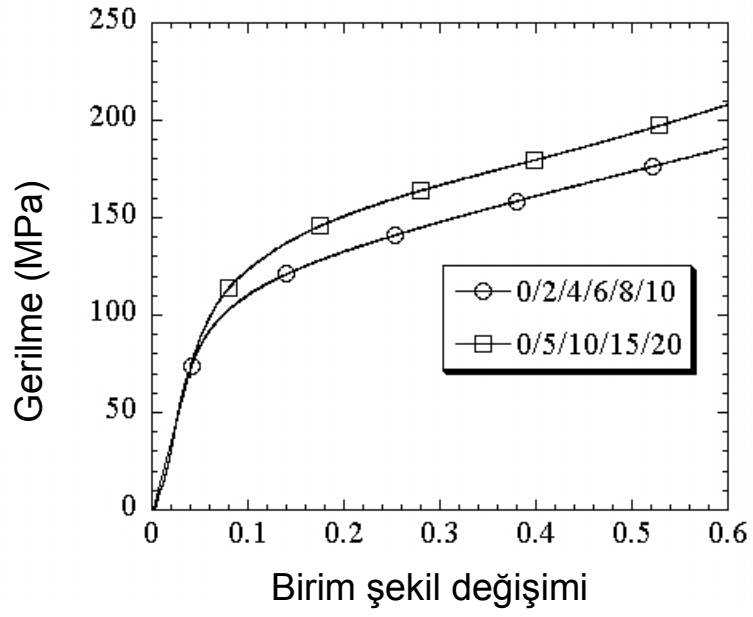
Şekil 43 (10/20) 2 katmanlı numunenin tek katmanlı numunelerle karşılaştırılması.



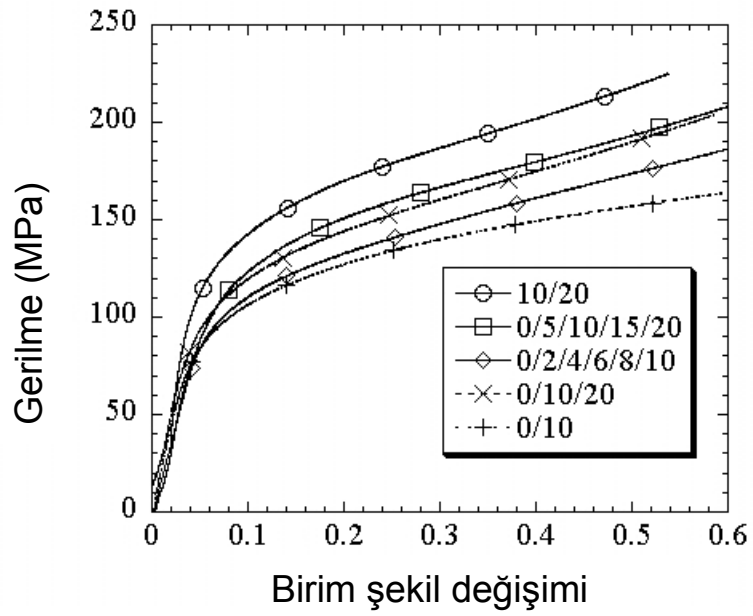
Şekil 44 (0/10/20) 3 katmanlı numunenin tek katmanlı numunelerle karşılaştırılması.



Şekil 45 2 ve 3 katmanlı numunelerin karşılaştırılması.

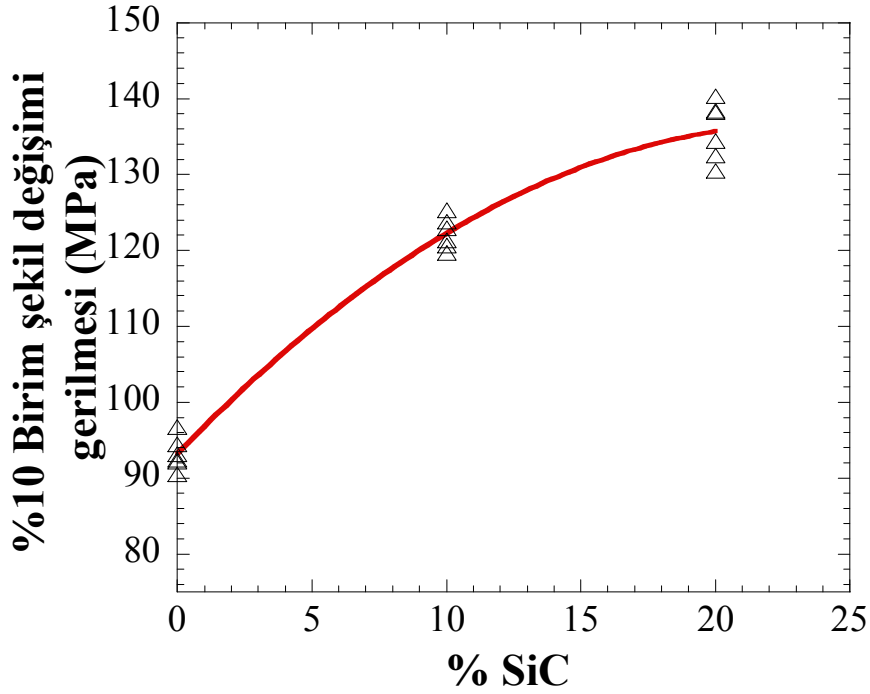


Şekil 46 5 ve 6 katmanlı numunelerin karşılaştırılması.



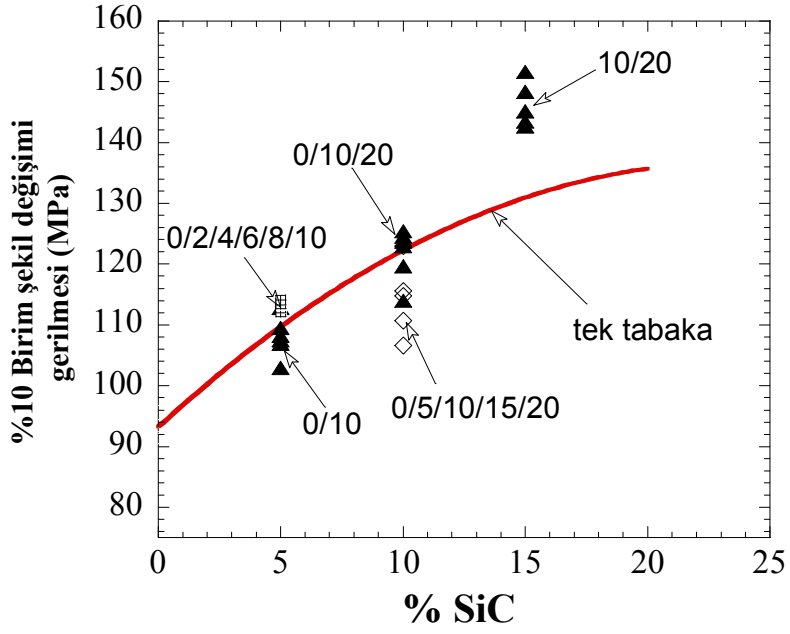
Şekil 47 Çok katmanlı numunelerin karşılaştırılması.

Şekil 48 tek katmanlı numunelerde SiC hacim oranının %10 birim şekil değişiminde gerilme değerine etkisini göstermektedir. SiC hacim oranı 0 dan %20'ye çıkarken, gerilme değeri yaklaşık 90 MPa'dan 135 MPa'a yükselmektedir. SiC oranının 0 dan %20 ye çıkmasıyla gerilme değerindeki artış yaklaşık %40'dır. Şekil 49 ise çok katmanlı numunelerdeki %10 birim şekil değişimine karşılık gelen gerilme miktarını, ortalama SiC hacim oranının fonksiyonu olarak göstermektedir. Aynı şekil üzerinde karşılaştırma amacıyla, tek katmanlı numunelerin gerilme değerleri de verilmiştir.



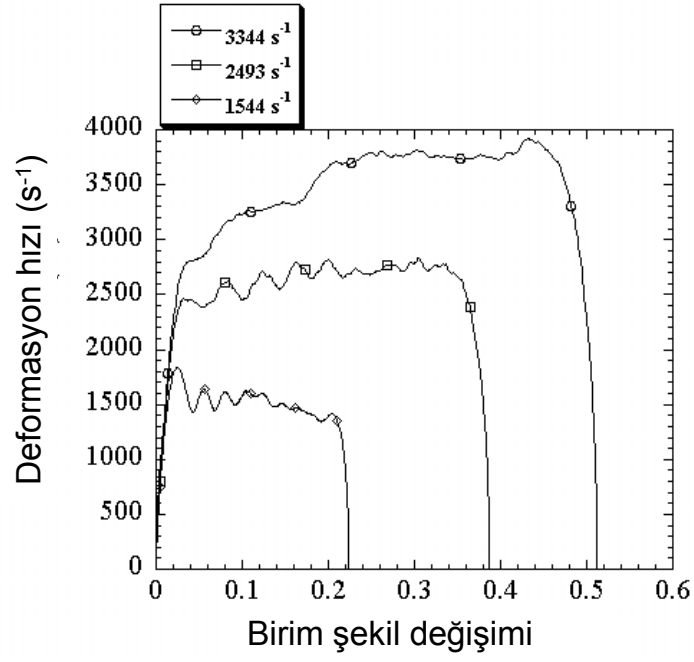
Şekil 48 Tek katmanlı numunelerde %10 birim şekil değişimindeki gerilme miktarının %SiC miktarına göre değişimi.



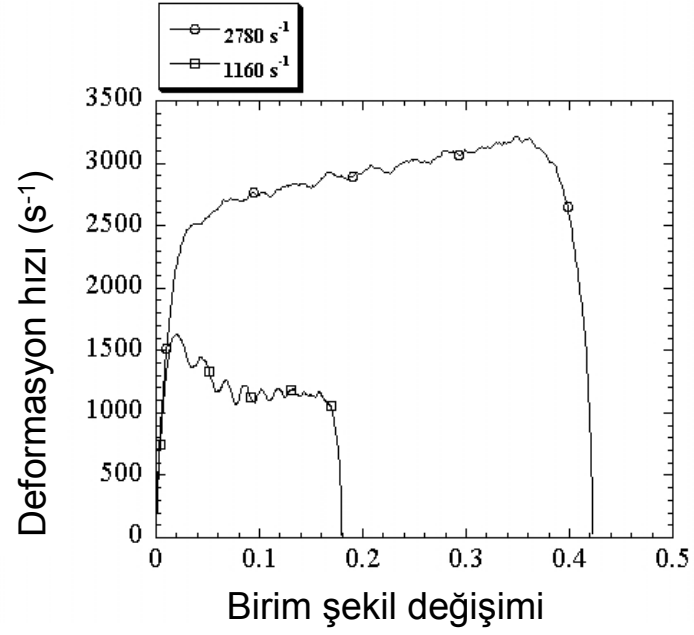


Şekil 49 Çok katmanlı numunelerde %10 birim şekil değişimindeki gerilme miktarının ortalama %SiC oranına göre değişimi.

Tek katmanlı numuneler 3 değişik HBB dış çember basıncında; 30,60 ve 90 psi da test edilmiştir. Bu basınç değerleri 1000, 2000 ve 3000 s<sup>-1</sup> deformasyon hızlarına tekabül etmektedir (Şekil 50). Çok katmanlı numuneler ise 2 farklı basınç değerinde, 30 ve 90 psi'da, 1000 ve 3000 s<sup>-1</sup> deformasyon hızlarında test edilmiştir (Şekil 51). Deformasyon hızı her bir test esnasında değiştiği için ortalama alınarak hesaplanmıştır.

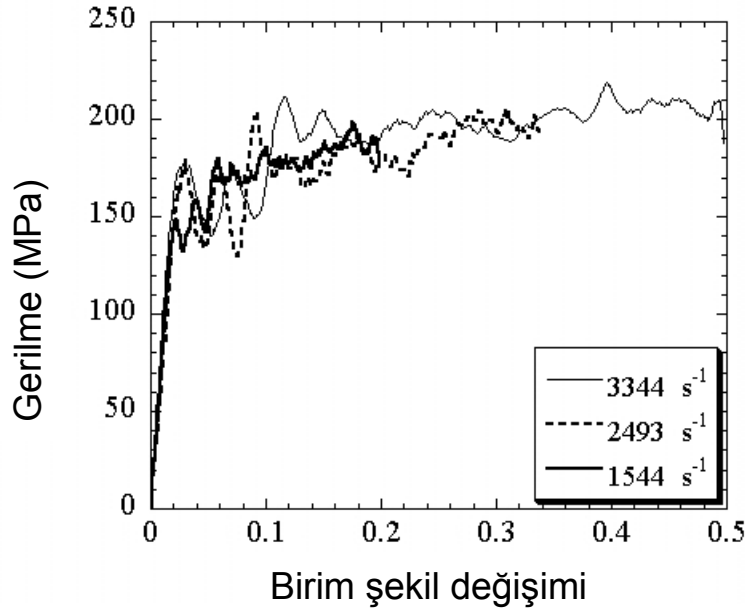


Şekil 50 Al numunelerde deformasyon hızının birim şekil değişimi ile değişimi.

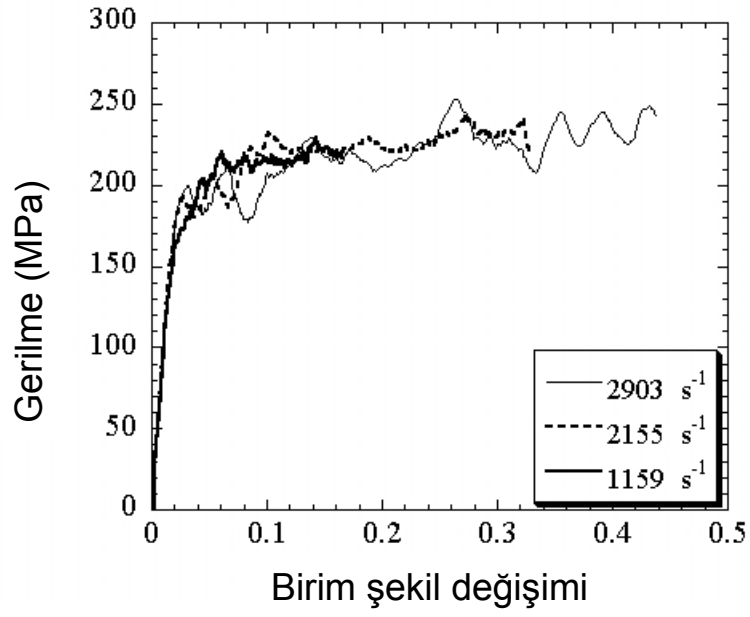


Şekil 51 0/2/4/6/8/10 numunelerde deformasyon hızının birim şekil değişimi ile değişimi.

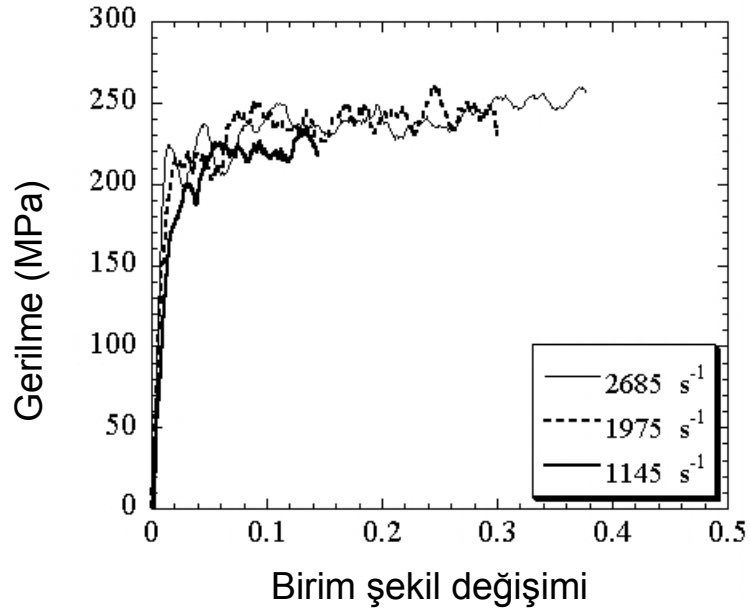
Şekil 52, 53 ve 54, tek katmanlı numuneler (Al, %10 SiC ve %20 SiC) için 3 değişik gerilme hızındaki tipik gerilme-birim şekil değişimi eğrilerini göstermektedir. Şekillerde görüldüğü üzere deformasyon hızı arttıkça maksimum gerilme de artmaktadır. Statik testlere benzer şekilde tek katmanlı kompozitler, tek katmanlı Al numunelerden daha yüksek gerilme değerlerine sahiptir (Şekil 55). 0/10 numunelerdeki gerilme değerleri, statik testlerindeki benzer şekilde Al ve %10 SiC tek katmanlı numunelerin gerilme değerlerinin arasındadır (Şekil 56). Statik testlerden farklı olarak 10/20 numunelerin yüksek deformasyon hızı testleri daha düşük gerilme değerleri göstererek %10 ve %20 SiC içeren tek katmanlı numunelerin gerilme değerlerinin arasında yer almaktadır (Şekil 57).



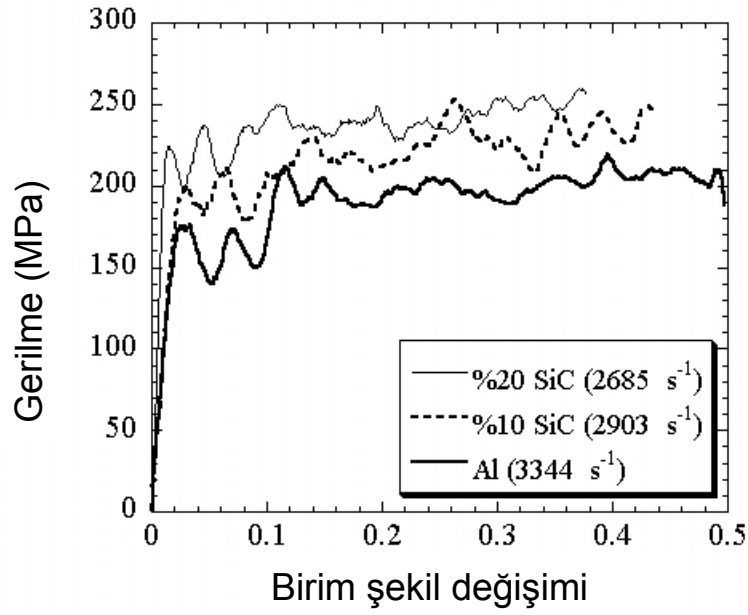
Şekil 52 Al numunelerin değişik deformasyon hızlarındaki gerilme-birim şekil değişimi grafikleri.



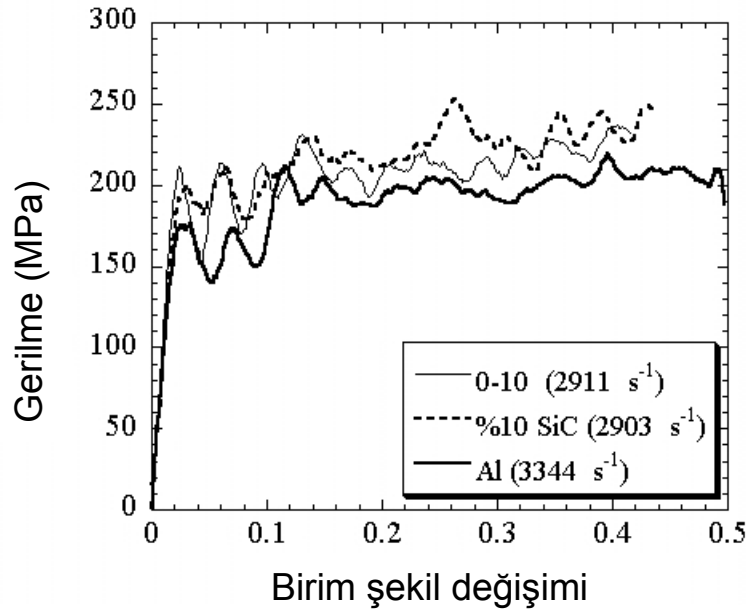
Şekil 53 %10 SiC numunelerin değişik deformasyon hızlarındaki gerilme-birim şekil değişimi grafikleri.



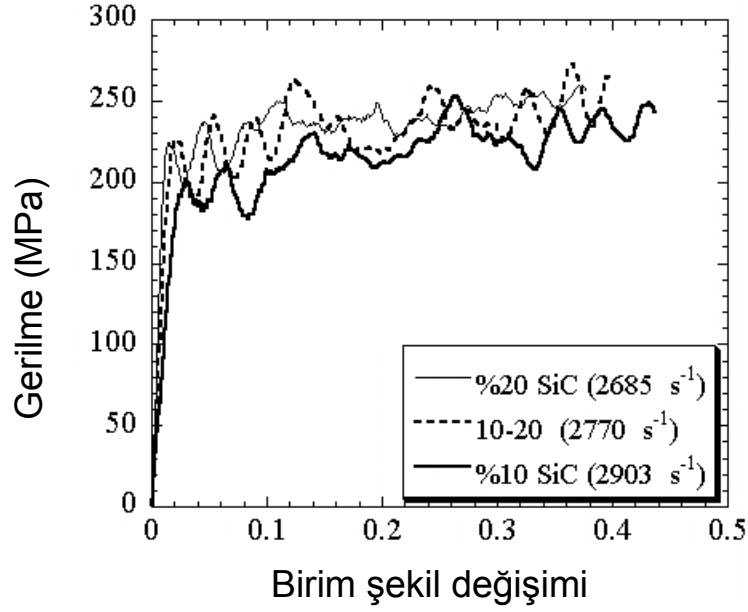
Şekil 54 %20 SiC numunelerin değişik deformasyon hızlarındaki gerilme-birim şekil değişimi grafikleri.



Şekil 55 Tek katmanlı numunelerin benzer deformasyon hızlarında gerilme-birim şekil değişimi grafiklerinin karşılaştırılması.

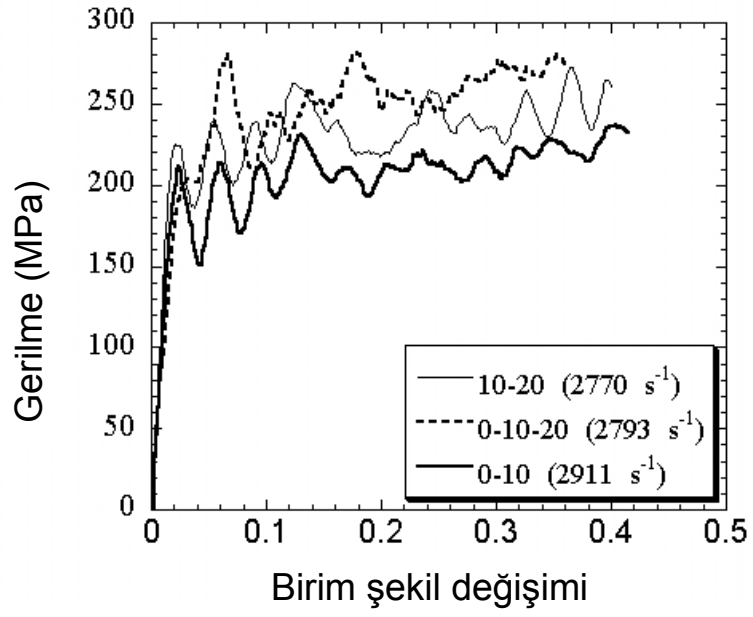


Şekil 56 0/10 numunenin benzer deformasyon hızlarında tek katmanlı malzemelerin gerilme-birim şekil değişimi grafikleri ile karşılaştırılması.

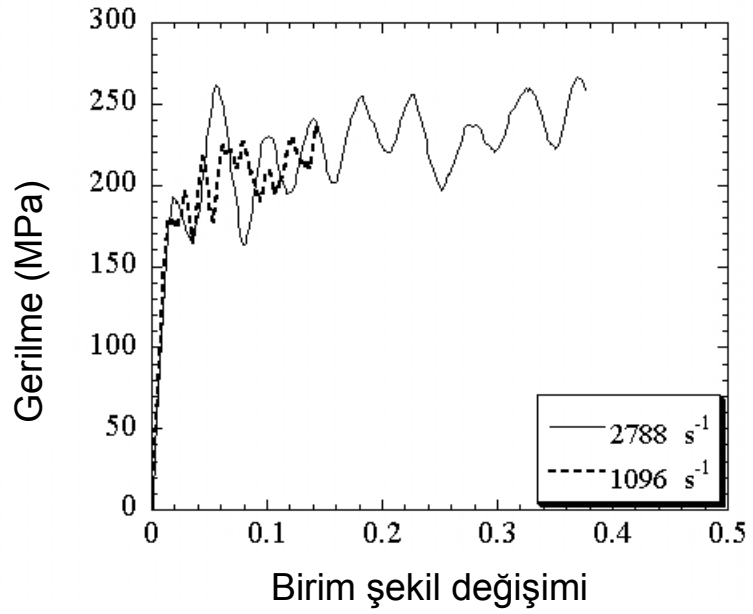


Şekil 57 10/20 malzemenin benzer deformasyon hızlarında tek katmanlı malzemelerin gerilme-birim şekil değişimi grafikleri ile karşılaştırılması.

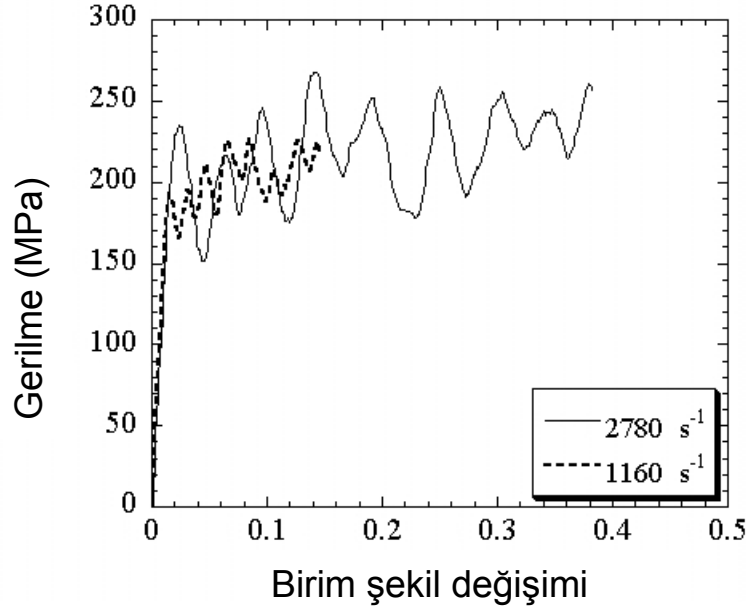
Şekil 58 , 2 ve 3 katmanlı numunelerin en yüksek deformasyon hızlarındaki gerilme-birim şekil değişimi eğrilerini göstermektedir. Şekilde görüldüğü üzere 0/10/20 numunelerin gerilme değerleri, statik testlerin aksine 10/20 numunelerden daha yüksektir. 5 ve 6 katmanlı numunelerin testlerinde, gerilme değerlerinde büyük salınımlar gözlenmektedir (Şekil 59 ve 60). Gerilme değerlerinde gözlenen bu salınımlar kısmen ara yüzeylerdeki dalga yansımalarından kaynaklanmaktadır. Yüksek birim şekil değişim miktarlarında 5 ve 6 katmanlı numunelerin gerilme değerleri (Şekil 61) benzerdir, düşük birim şekil değişim miktarlarında ise 5 katmanlı numuneler bir parça yüksek gerilme değerlerine sahiptir.



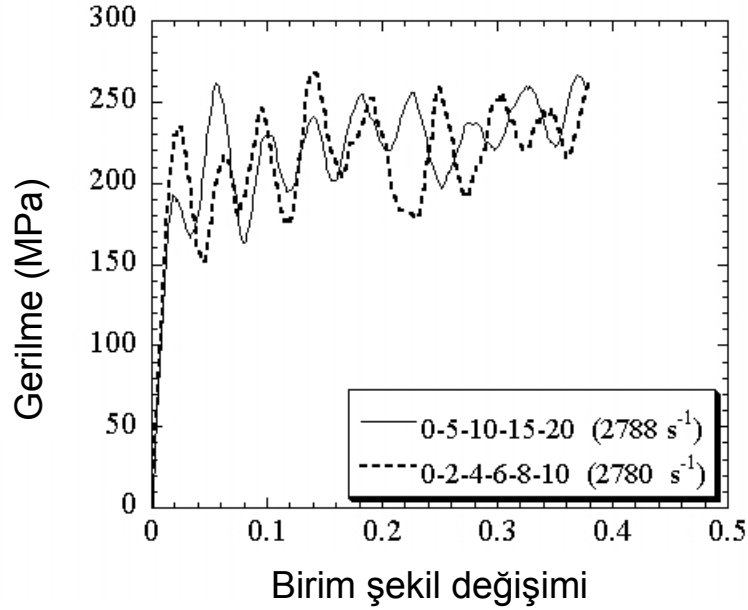
Şekil 58 2 ve 3 katmanlı numunelerin gerilme- birim şekil değişim eğrilerinin karşılaştırılması.



Şekil 59 0/5/10/15/20 numunelerin değişik deformasyon hızlardaki gerilme- birim şekil değişimi eğrileri.



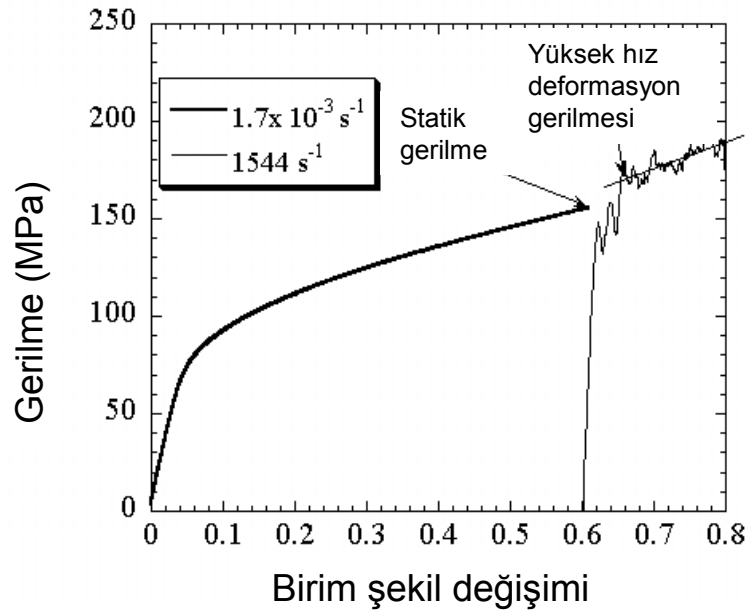
Şekil 60 0/2/4/6/8/10 numunelerin değişik deformasyon hızlardaki gerilme- birim şekil değişimi eğrileri.



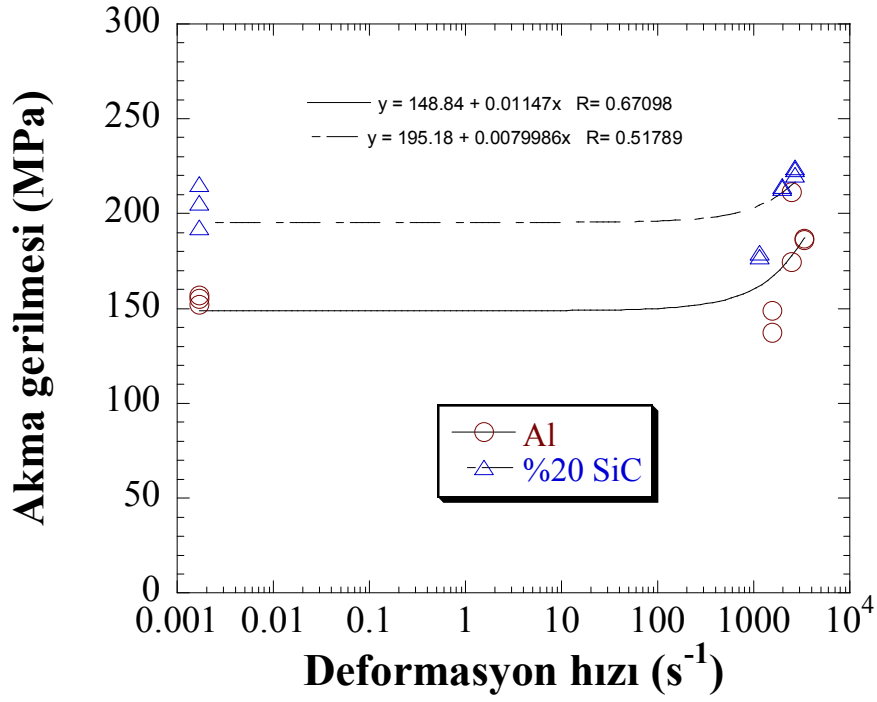
Şekil 61 5 ve 6 katmanlı numunelerin gerilme- birim şekil değişimi eğrilerinin karşılaştırılması.

FD malzemelere deformasyon hızı etkisi şu yöntemle belirlenmiştir. Statik test sonucunda oluşan son gerilme, dinamik testteki akma gerilmesi ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada kullanılan statik ve yüksek hız deformasyon akma gerilmeleri Şekil 62’de gösterilmektedir. Şekil 63’ tek katmanlı Al ve %20SiC/Al kompozitin akma gerilme

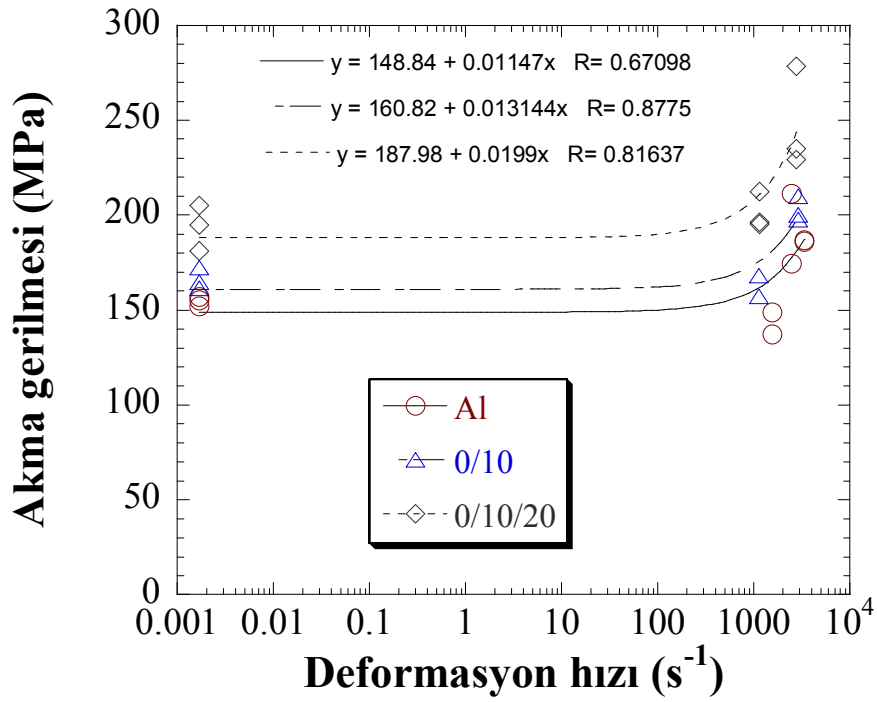




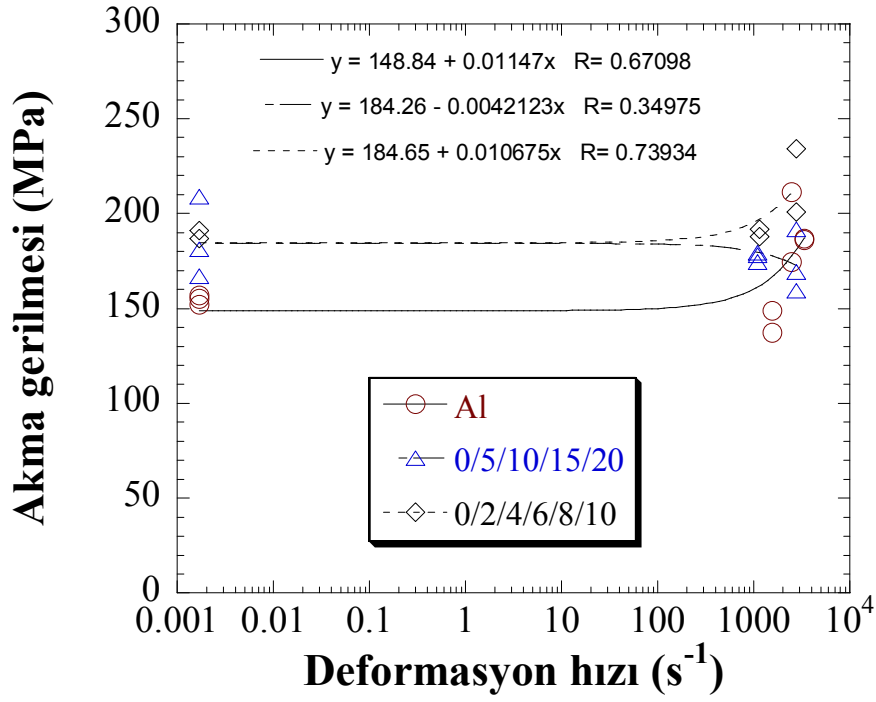
Şekil 62 Statik ve yüksek hız deformasyon akma gerilmeleri.



Şekil 63 Tek katmanlı Al ve %20 SiC/Al malzemelerde akma gerilmesinin deformasyon hızı ile değişimi.



Şekil 64 Al, 0/10 ve 0/10/20 malzemelerde akma gerilmesinin deformasyon hızı ile değişimi.



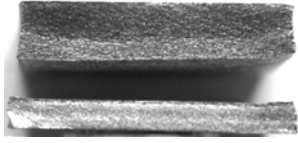
Şekil 65 Al, 5 ve 6 tabakalı malzemelerde akma gerilmesinin deformasyon hızı ile değişimi.

Tablo 4’de yüksek deformasyon hızlarında yapılan testler ve bu testler sonucunda kırılan numuneler listelenmiştir. Tek katmanlı numuneler arasında Al ve %20 SiC’de kırılma gözlenmezken, %10 SiC numunelerden 2 tanesinde kırılma gözlenmiştir. 3, 5 ve 6 katmanlı numunelerde kırılma ilk katmanda ve en yüksek deformasyon hızlarında ( $\sim 3000 \text{ s}^{-1}$ ) gözlenmiştir (Şekil 63). Taramalı elektron mikroskobu (TEM) çalışmaları, ara yüzeyin ayrılması sırasında SiC parçacıklarının kırıldığını göstermektedir (Şekil 67). Ayrıca metal matris kompozit katmanlarının prosesi esnasında, katmanların arasında ince bir oksit tabakasının oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 68).

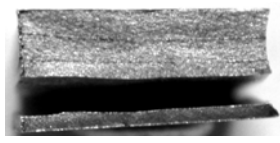
Tablo 4

Yüksek deformasyon testleri ve kırılan numuneler.

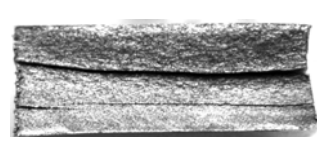
	Tür	Numune Adedi	Test	Kırılan Numune Adedi
			Basınçlar 1	
Tek Katmanlı Numuneler	Al	6	30,60,90	-
	%10 SiC	6	30,60,90	2
	% 20SiC	7	30,60,90	-
Çok Katmanlı Numuneler	0/10	5	30,90	-
	10/20	5	30,90	-
	0/10/20	6	30,90	4, (90 psi) Al tabakası
	0/2/4/6/8/10	4	30,90	2, (90 psi)
	0/5/10/15/20	6	30,90	2, (90 psi) (Al tabakası)



(a)

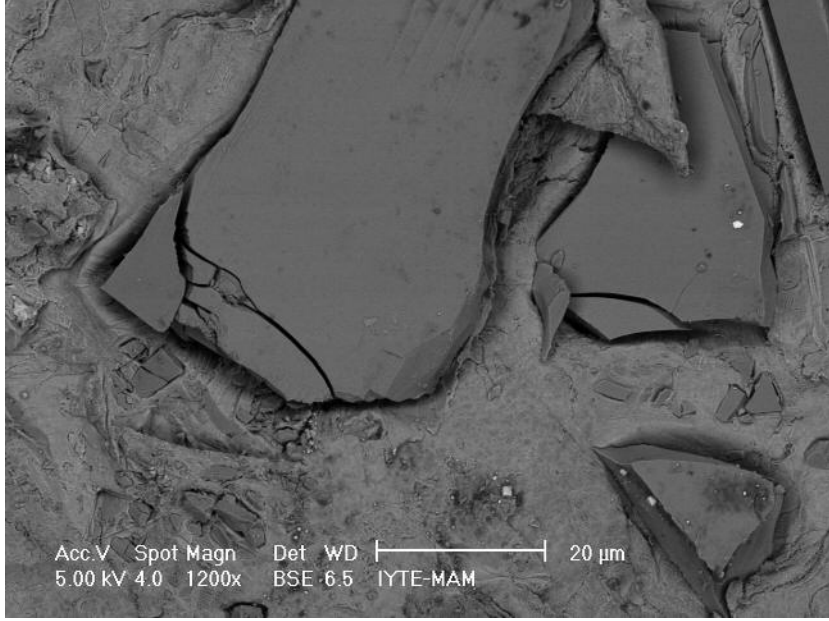


(b)

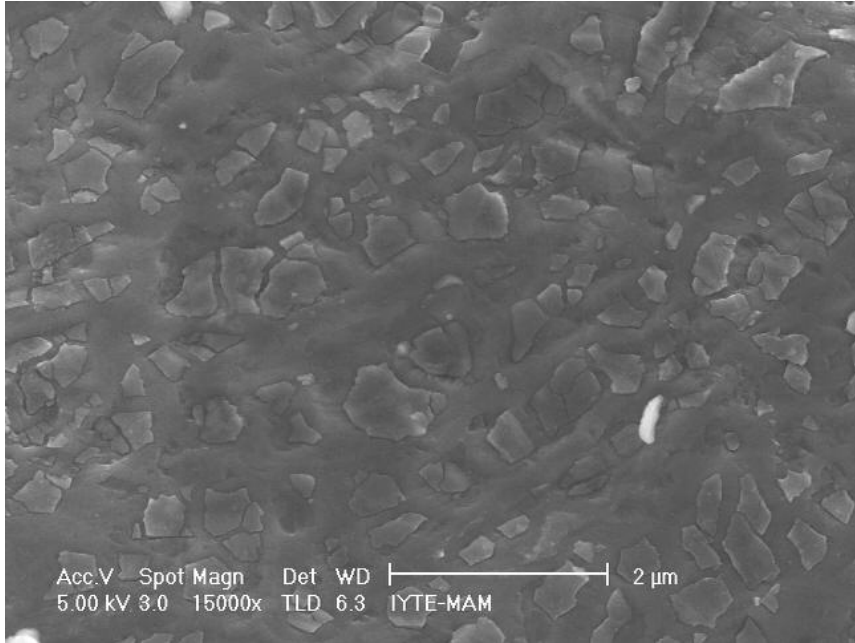


(c)

Şekil 66 Yüksek deformasyon sonucu kırılan numuneler; (a) 0/10/20 numunelerde ara yüzeyin ayrılması (0/10 ara yüzeyi), (b) 0/2/4/6/8/10 numunelerde ara yüzeyin ayrılması (0/2 ara yüzeyi) ve (c) 0/5/10/15/20 numunelerde ara yüzeylerin ayrılması.



Şekil 67 0/10/20 numunenin ayrılan 0/10 ara yüzeyinin TEM fotoğrafı.

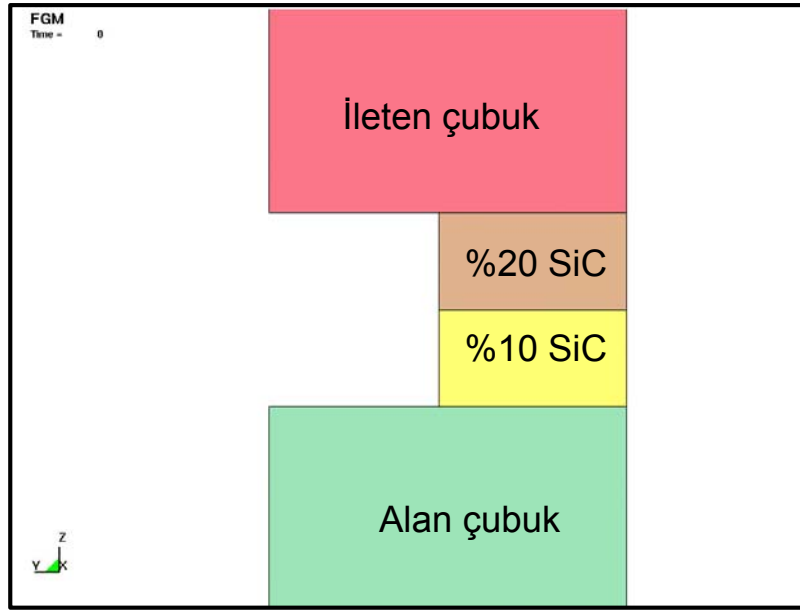


Şekil 68 0/10/20 numunenin ayrılan 0/10 ara yüzeyinin TEM fotoğrafı.

2 katmanlı numunenin (10/20), yüksek deformasyon hızındaki deformasyon profili ve gerilme-birim şekil değişimi davranışı LSDYNA 3 programı kullanılarak modellenmiştir. Şekil 69, 10/20 numunenin test başlamadan önceki profilini göstermektedir.( $t=0$  mikrosaniye). Şekil 70(a) numunenin test sonrasındaki deformasyon profilini, Şekil 70(b) ise numunenin deformasyon sonrasındaki fotoğrafını göstermektedir. Şekil 71’de, 10/20 numune

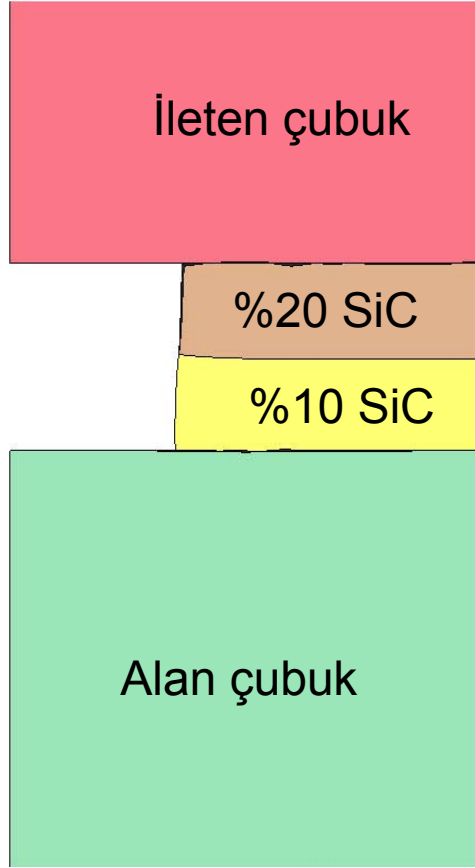
için modelleme sonucunda öngörülen gerilme-birim şekil değişimi davranışıyla deneysel sonuçları karşılaştırılmaktadır. Model ve deney sonuçları düşük gerilme değerlerinde benzerdir, artan gerilme değerlerinde ise modelleme sonucu daha yüksek gerilme değerlerine erişmektedir. Bu farklılık katmanlı numunelerde oluşan mikro kırılmalardan kaynaklanıyor olduğu varsayılmaktadır.

Her bir katmandaki gerilme değerleri de aynı model kullanılarak hesaplanmıştır. Her bir katmanın orta noktasındaki elementler için gerilme değerleri hesaplanılarak, zamana bağlı olarak Şekil 72’de gösterilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi, yüksek gerime değerleri düşük empedanslı katmanda gözlenmektedir, %10 SiC.

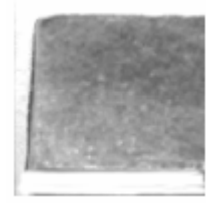


Şekil 69 2 katmanlı numunenin profili (10/20), t = 0 mikrosaniye.

FGM  
Time = 700.03

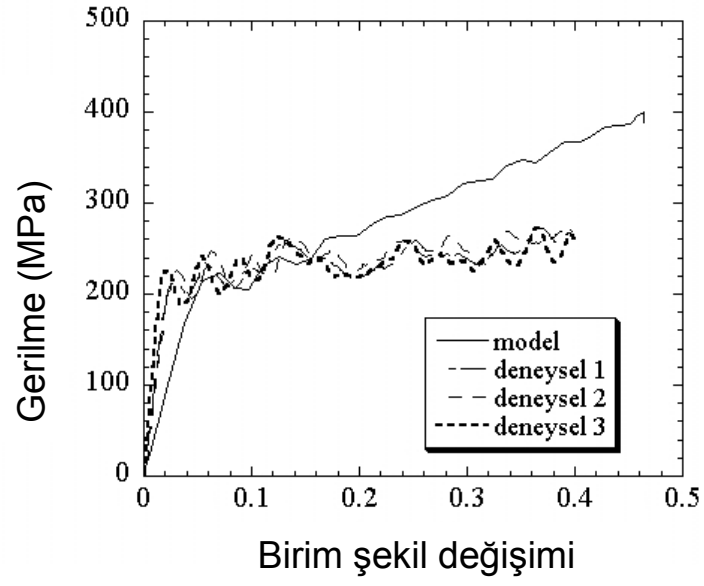


(a)

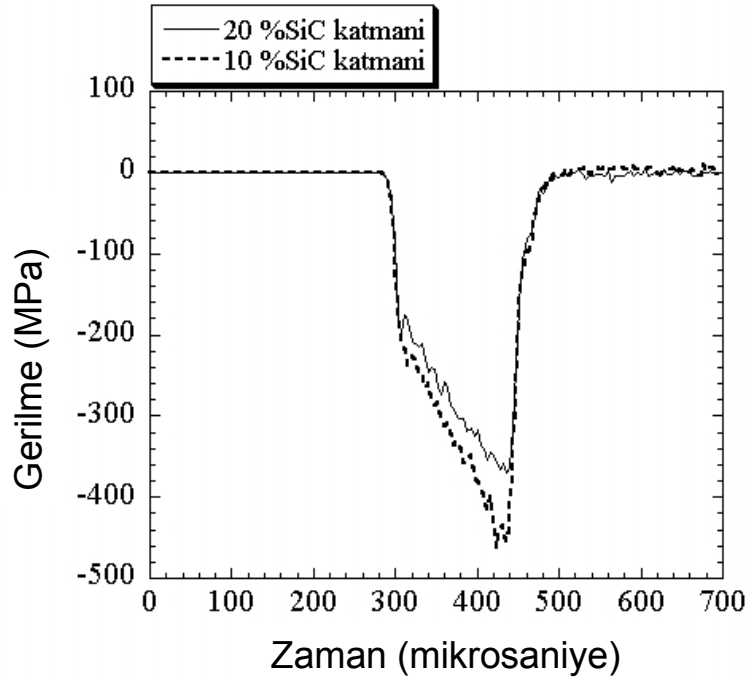


(b)

Şekil 70 a) Modelleme sonucunda elde edilen deformasyon profili, b) 2 katmanlı numunenin test sonrasındaki fotoğrafı (t = 700 mikrosaniye).



Şekil 71 10/20 numunenin gerilme-birim şekil değişimi davranışı.



Şekil 72 %10 ve %20 SiC içeren katmanlardaki gerilme değerleri.



## 5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

### 5.1 Katmanlı seramik, lastik ve kompozit zırh yapıları

Çok katmanlı malzemelerde gerilme geçişi bir çok parametrenin kompleks fonksiyonu olup deneysel ve 3-boyutlu modellerle birlikte incelendiğinde daha iyi anlaşılacaktır. Doğrulanmış malzeme model kullanımı Şekil 32'deki benzeri gerileme-uzaklık-zaman grafikleri ile dalga geçişinin detaylı incelenmesine olanak sağlayacaktır. Örneğin boyutu bilenen bir dalga için, hasara uğramayacak minimum malzeme kalınlığı bu yöntemle kolaylıkla hesaplanabilir kolaylıkla hesaplanabilir.

HBB tekniği malzemeleri yüksek deformasyon hızlarında test etmek için yaygın kullanılan önemli test tekniğidir. HBB test tekniğinin modelleme ile birleştirildiğinde katmanlı malzemelerdeki dalga geçişini incelemek için kullanılabilceği bu proje gösterilmiştir. Nümerik modeller numune üzerine yerleştirilen geyçlerle ölçülen deneysel verilerle doğrulanmıştır. geyç verilerinden ölçülen birim şekil değişimi miktarları sabit elastik modülü varsayımı ile gerilme verilerine dönüştürülmüştür. Dolayısı ile deneysel ve nümerik verilerde gözlenen sapmaların bir kısmı bu varsayımdan kaynaklanabilir. Bu özelliklerde test edilen kompozit malzeme için oldukça önemlidir.

Test edilen katmanlı numunelerde yüksek empedanslı malzemenin öne veya arkaya konulmasının gerilme geçişine etkisi yoktur. Ancak, lastiğin serbest durumunda katmanlardaki maksimum gerilmeler azalmakta ve gerilme dağılımı heterojen olmaktadır. Genel olarak lastiğe yakın yerlerde gerilmeler düşük, uzak yerlerde ise gerilmeler yüksektir. Modelleme sonuçları yüksek hızlarda gerilmenin numunede homojen dağılmadığını açıkça göstermiştir. Özellikle katmanlı malzemelerde aşırı gerilme dalgalanmalarının oluştuğu belirlenmiş olup, bu dalgalanmaların malzemeler üzerinde önemli hasarlar oluşturabileceği düşünülmektedir.

Bu projenin en önemli sonucu konvansiyonel zırhlarda ara yüzey malzemesi olarak kullanılan lastiğin serbest durumunun kompozit ve seramik tabakalarındaki gerilmeleri azalttığıdır. Ancak gerçek uygulamalar lastiğin sınırlı durumuna tekabül etmektedir. Sınırlı lastik durumunda ise oluşan maksimum gerilmeler artmaktadır. Bu projenin diğer önemli sonucu ise model ve deneysel gerilme ölçümlerinde ki sapmaların hasarların başladığı noktaları belirleme de kullanılabilceğidir.

## 5.2 FD katmanlı SiC/Al kompozit yapılar

Toz metalürjisi yöntemi ile hazırlanan SiC/Al FD kompozit yapılar statik ve yüksek deformasyon hızlarında test edilmiştir.

Metalik malzemelerde akma gerilmesinin (sabit birim şekil değişim miktarında) deformasyon hızı ile genellikle arttığı bilinmektedir. Metallerde akma gerilmesinin deformasyon hızıyla olan ilişkisi aşağıdaki yapısal denklemle ifade edilebilir (CHIDDISTER, 1963) :

$$\sigma_{\epsilon,T} = \sigma_0 + k \log \dot{\epsilon}$$

(21)

burada  $\sigma_0$  1 /s'deki (birim deformasyon hızı) akma gerilmesi,  $k$  deformasyon hızı duyarlılığını gösteren bir parametre ve  $T$  ise sıcaklıktır. Deformasyon hızı duyarlılığı ( $k$ ):

$$k = \left( \frac{\partial \sigma}{\partial \log \dot{\epsilon}} \right)_{\epsilon,T} \quad (22)$$

denklemiyle gösterilebilir. Metalik malzemelerde, 1000 /s'ye kadar  $k$ 'nın sabit olduğu ve 1000 /s'nin üzerinde ise arttığı bulunmuştur (LINDHOLM, 1964). Bahsedilen deformasyon hızı rejimlerindeki,  $k$ 'nın sabit olduğu (statik - ~1000 /s) ve arttığı (~1000 /s'den sonra) malzeme davranışları iki farklı mekanizma ile açıklanmıştır. Birinci mekanizma, dislokasyonların dislokasyon şebekesi, kafes atomu ve katı eriyik gibi küçük boyutlu engelleri termal enerji yardımıyla aşmasına dayandırılmıştır (DORN, 1965). Dislokasyonların bu engelleri aşması istatistiksel bir mekanizma olmasından dolayı, yüksek deformasyon hızlarında dislokasyonların bu engelleri aşma olasılığı azalır. İkinci mekanizma ise, dislokasyonların bahsedilen engeller önünde beklemeden aşması (~1000 /s'den sonra) ve dislokasyon hareketine fonon viskozitesi ve saçılmasının engel teşkil etmesine dayandırılmıştır (Dislocation Drag Mechanism) (FERGUSON, 1967). Follansbee ve diğerleri, ikinci mekanizmanın bahsedilen deformasyon hızlarında oluşmayacağını, saf bakır üzerine yapılan çalışmaların sonucunda ileriye sürmüşlerdir (FOLLANSBEE, 1988).

Yukarıda bahsedilen mekanizmaların, metal matris kompozitler için geçerliliği tartışılmazdır. Metal matris kompozitlerin deformasyon hızı duyarlılığına matris alaşımının etkisi dışında başka faktörlerde etkili olacaktır. Bu faktörler şöyle sıranalabilir: 1. deformasyon hızının kuvvetlendirici-matris arayüzeyindeki dağılımı, 2. kuvvetlendiricinin kırılma gerilmesinin deformasyon hızı ile değişimi, 3. dislokasyonların kuvvetlendirici ile etkileşimi 4. metal matris kompozitlerde oluşan hasarların, örneğin kuvvetlendiricinin kırılması ve arayüzeylerin ayrılması, deformasyon hızı ile değişimi. Sonlu eleman yöntemiyle yapılan bir çalışmada, parçacık-matris arayüzeyinde bölgesel deformasyon hızının, global deformasyon hızından daha yüksek olduğu bulunmuştur (BAO, 1996) Eğer, matris alaşımı deformasyon hızına duyarlı ise, metal matris kompozitlerin deformasyon hızı duyarlılığının kuvvetlendirilmemiş matris alaşımının duyarlılığından daha yüksek olması beklenir. Bu faktörün özellikle çok yüksek ( $>10^4$  /s) deformasyon hızlarında etkili olduğu,  $Al_2O_3$ /6061-T6 Al MMK ve matris alaşımı 6061-T6 Al'a yapılan testler sonucunda bulunmuştur (YADAV,1995)

Seramik malzemelere yapılan yüksek hızlardaki basma deneyleri sonucunda bu malzemelerde kırılma gerilmesinin deformasyon hızıyla yükseldiği bulunmuştur (LANKFORD, 19981). Fakat fiber ve parçacık halindeki seramikler, bütün haldeki seramiklerden daha farklı mekanik özellikler gösterebilirler. Dolayısıyla bu faktörün etkisi bilinmemektedir.

Dislokasyon hareketinin kuvvetlendirici tarafından engellenmesi ve engelleme miktarının deformasyon hızı ile değişmeside, MMK'lerin deformasyon hızı duyarlılığını arttıracığı ileri sürülmüştür (PERNG, 1993) Bu faktörün etkisi, test edilen metal matris kompozitlerin kuvvetlendiricilerinin boyutları itibarıyla şüphelidir. Son faktör, hasarların deformasyon hızı ile artması, metal matris kompozitlerin deformasyon duyarlılığını azaltacaktır.

Yukarıda bahsedilen faktörler ışığında, test edilen FD metal matris kompozitlerin deformasyon hızı duyarlılığını belirleyecek iki faktörün burada önemli olacağı düşünülmektedir. Bunlar matris alaşımının deformasyon hızı duyarlılığı ve yine matris alaşımının deformasyon hızı duyarlılığına bağlı olarak, bölgesel deformasyon hızı değişimidir. FD katmanlı metal bazlı kompozitlerin deformasyonu katmanlar arasındaki Poisson oranı farklılığı nedeni ile oldukça komplekstir ve katmanlar heterojen deformasyona uğramaktadır. Katmanlar arasında gerilme dalgası geçişi nedeniyle bu malzemelerin yüksek deformasyonları oldukça karmaşık hale gelmektedir. İki katmanlı malzeme modellenmesi akustik empedansı büyük katmada gerilme dalgasının daha yüksek olduğunu göstermiştir. Katmanlı malzemede oluşan hasarlar göz önüne alınırsa modelleme sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu düşünülebilir. Mikroskobik incelemeler katmanlar arasında ince bir

oksit tabakasının oluştuğunu göstermiştir. Bu tabaka katmanlar arasındaki bağlanmayı azaltarak, HBB testi esnasında numune ara yüzeylerinde ayrılmalara neden olmuştur. Oksit tabakasını oluşumunu önlemek için FD kompozit üretiminde toz metalürji yöntemi yerine slip veya sentüfuj döküm veya infiltrasyon yöntemlerine benzer yöntemlerin kullanılması önerilmektedir. Bu yöntemler ileriki çalışmalarda kullanılacaktır.

## Yararlanılan kaynaklar;

- BAO G., Lin Z., Acta Metall. Mater., 44, 1011-1019, (1996).
- BRUCK H. A., International Journal of Solids and Structures, 37, 6383-6395, (2000).
- BUTCHER R. J., Rousseau C.E., Tippur H. V., Acta mater., 47, 259-268, (1999).
- CHIDDISTER J. L., Malvern L. E., Exp. Mech., 3, 81-90, (1963)CHIN E.S.C., Materials Science and Engineering , A259,155-161, (1999).
- DORN J. E., Mitchel J. I, Hauser F., Exp. Mech., 353-364 (1965).
- FERGUSON W. G., Kumar A., Dorn J. E., J. Appl. Phys., 38,1836, (1967).
- FINK B.K., J. of Thermoplast. Compos. Mater. **13**, 417-431, (2000).
- FOLLANSBEE P. S., Kocks U. F., Acta Metall., 36,81-93, (1988).
- FOLLANSBEE P. S., Frantz C., J. Eng. Mater. Techn., 105, 61–66, (1983).
- GAMA B. A, Gillespie Jr. JW, Bogetti T. A, Fink B.K., Innovative design and ballistic performance of lightweight composite integral armors. Technology for the army's transformation, SAE World Congress and Exposition, Detroit (2001), paper No. 2001-01-0888.
- GÜDEN M., *High strain rate behavior of metal matrix composites*, (Doktora Tezi), University of Delaware, (1998)
- GÜDEN M., Yıldıırım U., Hall I. W., Polymer Testing 23,719-725, (2004).
- IWASAKI K., Mat.Res.Innovat., 1(1997) 180-187. VIECHNICKI D.J, Anctil A.A, Papetti D. J, Prifty J. J., *Lightweight armor – a progress report*. US Army MTL TR 89-8 (1989).
- KAWASAKI A., Watanabe R., Ceramics International, 23, 73-83, (1997).
- KOLSKY H., Proc. Phys. Soc. Lond. B, 62, 676-700, (1949)
- KRUMOVA M., Klingshirn C., Hauptert F., Friedrich K., Composites Science and Technology, 61,557-563, (2001).
- KUMAR R. R., Wang M., Materials Letters, 55, 133-137, (2002).
- LANKFORD J., J. Am. Ceram. Soc., 64, C33-34, (1981).
- LI Y. , Ramesh K.T., Chin E.S.C., International Journal of Solids and Structures, 38, 6045-6061,(2001).
- LINDHOLM U. S., J. Mech. Phys. Solids, 12, 317-335, (1964).
- MORTENSON A., S. Suresh, International Materials Reviews, 40, 239-265 (1995).
- OGDEN R.W., *Non-linear elastic deformations*. New York: Halsted Press. 532 (1984) .
- RAVICHANDRAN G., Subbash G., J. Am. Ceram. Soc., 77, 263-267 (1994).
- PERNG C. C., Hwang J. R., J. L. Doong, Mater. Sci. Eng., A171,213-221,(1993).
- SURESH S., Mortenson A., International Materials Reviews, 42, 85-116, (1997).
- TAŞDEMİRCİ A., Hall I. W, Gama B. A, Güden M., J. Comp. Mater. 38, 995-1009, (2004a).

TAŞDEMİRÇİ A., Hall I. W, Gama B. A, Güden M, *The Effects of layer constraint on stress wave propagation in multilayer composite materials*, Army Research Laboratory ARL, Teknik Rapor, CR-550 (2004b).

TAŞDEMİRÇİ A., *Experimental and modelling studying of stress wave propagation in multilayer composite materials*, (Doktora Tezi), University of Delaware (2005a).

TAŞDEMİRÇİ A, Hall IW. *Journal of Composite Materials*, 39, 981- 1005, (2005b).

YADAV S., Chichili D. R., Ramesh K. T., *Acta Metall. Mater.*, 43,4453-4464,(1995).

ZHANG J., Wang Y-Q., Zhou B-L., Wu X-Q., *Journal of Materials Science Letters*, 17, 1677-1679, (1998).

**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

<b>Proje No:102M106</b>
<b>Proje Başlığı:</b> Çok katmanlı malzemelerde gerilme dalga geçişi
<b>Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar:</b> Prof. Dr. Mustafa Güden, Yard. Doç. Dr. Alper Taşdemirci.
<b>Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:</b> İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Gülbahçe, Urla, İzmir
<b>Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:</b> 01/05/2003-01/05/2007
<b>Öz (en çok 70 kelime)</b> <p>Bir çok mühendislik alanında kullanımı oluşan çok katmanlı ve fonksiyonel dereceli malzeme yapılarındaki gerilme dalga geçişine ilgi artmaktadır. Sonsuz ve yarı sonsuz homojen malzemelerde dalga geçişi üzerine analitik çözümler geliştirilmesine karşın, çok katmanlı malzemeler incelendiğinde çözüm oldukça kompleks bir hale gelmektedir. Çok katmanlı malzemelerde gerilme geçişi bir çok parametrenin kompleks fonksiyonu olup deneysel ve 3-boyutlu modellerle birlikte incelendiğinde daha iyi anlaşılacaktır. Bu uluslararası projede klasik yüksek hız test ve nümerik simülasyon metotları kullanılarak çok katmanlı malzemelerde dalga geçişini anlamaya yönelik yeni bir yaklaşım, University of Delaware'den Prof. Dr. I. W. Hall'un yöneticisi olduğu NSF projesi kapsamında çalışılmıştır.</p>
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Çok katmanlı malzeme sistemleri, zırh malzeme sistemi, fonksiyonel dereceli kompozitler; gerilme dalga geçişi.
<b>Projeden Yapılan Yayınlar:</b> <p>Ö. Akil, U. Yıldırım, M.Güden, I. W. Hall, Effect of strain rate on the compression behavior of a woven fabric S2-glass fiber reinforced vinyl ester composite. <i>Polymer Testing</i> 22(2003)883-887.</p> <p>A. Tasdemirci, I. W. Hall, B. A. Gama, M. Guden Stress Wave Propagation Effects in two- and three-Layered Composite Materials, <i>J. Comp. Mater.</i> 38(2004)995-1009.</p> <p>M.Güden, U. Yıldırım, I. W. Hall Effect of strain rate on the compression behavior of a woven glass fiber/SC-15 composite <i>Polymer Testing</i> 23(2004)719-725.</p> <p>Alper Tasdemirci, Ian W.Hall, Bazle A.Gama, ve M.Güden, "The Effects of layer constraint on stress wave propagation in multilayer composite materials", Army Research Laboratory ARL, Teknik Rapor, CR-550, Eylül, 2004.</p> <p>M. Güden, Katmanlı malzemelerde gerilme dalgası geçişinin deneysel ve nümerik yöntemlerle belirlenmesi: hopkinson basınç bar deneyleri, Zırh Teknolojileri Semineri, 10-11 Mart 2005, MSB Ankara.</p> <p>Yıldırım, U., "Fonksiyonel Dereceli SiC-Parçacık Takviyeli Alüminyum Matris Kompozitlerin Statik ve Dinamik Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi," Makina Mühendisliği Yüksek Lisans Master Tezi, İYTE, 2004.</p>

**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

<b>Proje No:102M106</b>
<b>Proje Başlığı:</b> Çok katmanlı malzemelerde gerilme dalga geçişi
<b>Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar:</b> Prof. Dr. Mustafa Güden, Yard. Doç. Dr. Alper Taşdemirci.
<b>Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:</b> İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Gülbahçe, Urla, İzmir
<b>Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:</b> 01/05/2003-01/05/2007
<b>Öz (en çok 70 kelime)</b> <p>Bir çok mühendislik alanında kullanımı oluşan çok katmanlı ve fonksiyonel dereceli malzeme yapılarındaki gerilme dalga geçişine ilgi artmaktadır. Sonsuz ve yarı sonsuz homojen malzemelerde dalga geçişi üzerine analitik çözümler geliştirilmesine karşın, çok katmanlı malzemeler incelendiğinde çözüm oldukça kompleks bir hale gelmektedir. Çok katmanlı malzemelerde gerilme geçişi bir çok parametrenin kompleks fonksiyonu olup deneysel ve 3-boyutlu modellerle birlikte incelendiğinde daha iyi anlaşılacaktır. Bu uluslararası projede klasik yüksek hız test ve nümerik simülasyon metotları kullanılarak çok katmanlı malzemelerde dalga geçişini anlamaya yönelik yeni bir yaklaşım, University of Delaware'den Prof. Dr. I. W. Hall'un yöneticisi olduğu NSF projesi kapsamında çalışılmıştır.</p>
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Çok katmanlı malzeme sistemleri, zırh malzeme sistemi, fonksiyonel dereceli kompozitler; gerilme dalga geçişi.
<b>Projeden Yapılan Yayınlar:</b> <p>Ö. Akil, U. Yıldırım, M.Güden, I. W. Hall, Effect of strain rate on the compression behavior of a woven fabric S2-glass fiber reinforced vinyl ester composite. <i>Polymer Testing</i> 22(2003)883-887.</p> <p>A. Tasdemirci, I. W. Hall, B. A. Gama, M. Guden Stress Wave Propagation Effects in two- and three-Layered Composite Materials, <i>J. Comp. Mater.</i> 38(2004)995-1009.</p> <p>M.Güden, U. Yıldırım, I. W. Hall Effect of strain rate on the compression behavior of a woven glass fiber/SC-15 composite <i>Polymer Testing</i> 23(2004)719-725.</p> <p>Alper Tasdemirci, Ian W.Hall, Bazle A.Gama, ve M.Güden, "The Effects of layer constraint on stress wave propagation in multilayer composite materials", Army Research Laboratory ARL, Teknik Rapor, CR-550, Eylül, 2004.</p> <p>M. Güden, Katmanlı malzemelerde gerilme dalgası geçişinin deneysel ve nümerik yöntemlerle belirlenmesi: hopkinson basınç bar deneyleri, Zırh Teknolojileri Semineri, 10-11 Mart 2005, MSB Ankara.</p> <p>Yıldırım, U., "Fonksiyonel Dereceli SiC-Parçacık Takviyeli Alüminyum Matris Kompozitlerin Statik ve Dinamik Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi," Makina Mühendisliği Yüksek Lisans Master Tezi, İYTE, 2004.</p>