

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÜŞÜK HIZLI ÇARPMA YÜKLERİ ALTINDA
FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ DAİRESEL
PLAKALARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

**Tezi Hazırlayan
Murat AYDIN**

**Tezi Yöneten
Yrd. Doç. Dr. Recep GÜNEŞ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Temmuz 2009
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÜŞÜK HIZLI ÇARPMA YÜKLERİ ALTINDA
FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ DAİRESEL
PLAKALARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

**Tezi Hazırlayan
Murat AYDIN**

**Tezi Yöneten
Yrd. Doç. Dr. Recep GÜNEŞ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 107M142 numaralı araştırma projesi ve Erciyes
Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FBY-09-827 numaralı
proje ile desteklenmiştir**

**Temmuz 2009
KAYSERİ**

Yrd. Doç. Dr. Recep GÜNEŞ danışmanlığında Murat AYDIN tarafından hazırlanan “Düşük Hızlı Çarpma Yükleri Altında Fonksiyonel Kademelendirilmiş Dairesel Plakaların Mekanik Davranışlarının İncelenmesi” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

06/07/2009

JÜRİ :

Başkan : Prof. Dr. M. Kemal APALAK

Üye : Doç. Dr. Cem SİNANOĞLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Recep GÜNEŞ

(Handwritten signatures of the jury members: M. Kemal Apalak, Cem Sinanoğlu, and Recep Güneş)

ONAY :

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 21/07/2009 tarih ve 2009/21-20 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

21/07/2009



Prof. Dr. Nusret AYYILDIZ
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Araştırmamın her aşamasında akademik bilgi ve deneyimleriyle destek ve rehberliğini esirgemeyen danışmanım **Yrd. Doç Dr. Recep GÜNEŞ**'e, tez süresince çalışmalarımı izleyen ve yönlendiren her zaman yakın ilgi ve yardımlarını gördüğüm değerli hocam **Prof. Dr. M. Kemal APALAK**'a, deneysel çalışmalarında yakın ilgi ve önerileri ile beni yönlendiren **Yrd. Doç. Dr. Fehmi NAİR** ve **Arş. Grv. A. Alper CERİT**'e, çalışmalarım süresince eleştiri ve önerileri ile tezimin gelişimine katkı sağlayan ayrıca tezimi derlememdeki yardımlarından dolayı **Arş. Grv. Mustafa YILDIRIM**'a, çalışmalarında bana laboratuvar olanağı sağlayan ve FBY-09-827 numaralı araştırma projesi ile tezimi destekleyen **Erciyes Üniversitesi**'ne, 107M142 numaralı araştırma projesi ile desteklerinden dolayı **TÜBİTAK**'a, tez çalışmam boyunca maddi ve manevi desteklerini hep arkamda hissettiğim değerli anne ve babama ve benim ben oluşumda pay sahibi olan herkese teşekkürü bir borç bilirim.

DÜŞÜK HIZLI ÇARPMA YÜKLERİ ALTINDA FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ DAİRESEL PLAKALARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Murat AYDIN
Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2009
Tez Danışman : Yrd. Doç. Dr. Recep GÜNEŞ

ÖZET

Genel olarak malzemeler tek biçimlidirler, kendi içlerinde malzeme özelliği olarak değişim göstermezler. Buna karşın bir tarafının özellikleri diğer tarafınınkinden farklı olan ve bu farklı bölgeler arasında fonksiyonel bir geçişin olduğu malzemeler fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler (Functionally Graded Materials = FGMs) olarak adlandırılır. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler, seramik-metal bağlantıların arayüzeylerinde termo-mekanik uyumsuzlukların azaltıldığı en uygun yapılardır ve böylece yüksek sıcaklık ortamlarında çalışan yapılarda oluşan artık gerilmeleri de azaltabilirler. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin uygulama alanları uzay, nükleer ve otomobil endüstrileri gibi oldukça özellikli yerlerdir. Bu nedenle fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin mekanik özelliklerinin ve malzeme karakterizasyonunun belirlenmesi oldukça önem taşımaktadır. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler zor çalışma şartlarına sahip darbeli ortamlarda veya balistik amaçlı olarak da kullanılabilirler. Bu nedenle bu malzemelerin darbe dayanımlarının da belirlenmesi oldukça önemlidir.

Bu tez çalışmasında, fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların düşük hızlı darbe davranışları sayısal ve deneysel olarak incelendi. Yapılan sayısal analizler bir sonlu elemanlar paket programı olan LS-DYNA ile gerçekleştirildi. Analizler farklı katman sayısı, malzeme kompozisyonu, vurucu hızları ve farklı plaka çapları (R/h) için tekrarlandı. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka kenarlarından ankastre bağlanmış ve seramik zengin yüzeyden merkezi çarpmaya maruz bırakılmıştır. Kompozisyonu kalınlık boyunca değişen dairesel plaka, seramik (SiC) ve metal (Al) fazlardan oluşmuştur. Seramik ve metal katmanlar arasında kalan fonksiyonel kademelendirilmiş bölgenin mekanik özelliklerinin plaka kalınlığı boyunca sürekli olarak bileşenlerin hacimsel oranlarındaki değişime bağlı olarak

bir üstel kanuna göre değiştiği varsayılmıştır. Kademelendirilmiş bölgedeki lokal malzeme özelliklerinin hesaplanmasında mikromekanik model olarak Mori-Tanaka şeması kullanıldı. Elasto-plastik analizler için iki farklı bileşene sahip yapılarda bileşenlerin tek eksenli gerilme-şekil değiştirme değerlerini kullanarak kompozit malzemenin gerilme şekil değiştirme eğrisini veren TTO (Tamura-Tomota-Ozowa) model kullanıldı.

Deneyssel çalışmada kullanılan fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalar Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kompozit Malzemeler Laboratuvarında katmanlama yöntemi (powder stacking-hot pressing) ile beş farklı malzeme kompozisyonu için ($n=0.1$, $n=0.5$, $n=1$, $n=5$ ve $n=10$) üretildi. Numunelerin üretimi için seramik faz olarak 50 mikron boyutlarında Silisyum Karbür, metal faz olarakta 10 mikron boyutlarında Alüminyum tozlar kullanıldı. Üretilen numunelerin düşük hızlı çarpma testleri ise Mekanik Laboratuvarında bulunan CEAST marka düşük hızlı darbe test cihazında farklı malzeme kompozisyonları için üç farklı hızda ($v=1$, 1.5 ve 2 m/s) gerçekleştirildi. Elde edilen deneyssel ve sayısal veriler mukayese edilerek sayısal model iyileştirilmeye çalışıldı.

Anahtar Kelimeler: Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler (FGM); Düşük hızlı darbe, Elasto-plastik analiz; Sonlu elemanlar metodu.

**AN INVESTIGATION ON MECHANICAL BEHAVIOURS OF FUNCTIONALLY
GRADED CIRCULAR PLATES UNDER LOW VELOCITY IMPACT
LOADINGS**

Murat AYDIN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.Sc. Thesis, July 2009

Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. Recep GUNES

ABSTRACT

Generally materials become in a unique form, thus, the material properties don't change inside. On the other hand, the material properties of structures made of functionally graded material (FGM) vary continuously in the macroscopic sense from one surface to the other surface. Functionally graded materials are most suitable structures which reduce thermo-mechanical mismatches along the metal-ceramic interfaces. They can also reduce residual stresses in such structures in high temperature environments. FGMs have special applications such as aerospace, nuclear and automobile industries. Therefore, it is important to determine the mechanical properties and material characterization of the functionally graded materials. FGMs are also used for ballistic purposes or percussive applications where the operating conditions are severe. Therefore, it is necessary to know the behaviours of FGMs under impact loadings.

In this study, the low speed impact behaviors of functionally graded circular plates were investigated numerically and experimentally. A finite element program LS-DYNA was used for the numerical analysis. The effects of layer number, material composition, impactor velocity and plate radius on the impact behaviour of FGM plates were investigated. Functionally graded circular plate was subjected to a central impact load on its ceramic surface for the clamped boundary condition. The mechanical properties of the material are assumed to vary continuously through the plate thickness between the metal (Al) and ceramic (SiC) layers according to a power-law distribution of the volume fraction of the constituents. The locally effective material properties were evaluated using homogenization method based on the Mori-Tanaka scheme. The TTO (Tamura-Tomota-Ozawa) model which relates the uniaxial stress and strain of a two-phase composite to the corresponding average uniaxial stresses and strains of the two constituent materials were used for the

elasto-plastic analysis.

For the experimental studies, functionally graded circular plates with five different material compositions ($n=0.1, 0.5, 1, 5$ and 10) were manufactured with powder stacking-hot pressing method at the Composite Materials Laboratory in Erciyes University. SiC powder of 50 micron as ceramic phase and Al powder of 10 micron as metal phase were used in order to produce of FGM specimens. Low speed impact tests were carried out in the Mechanic Laboratory in Erciyes University by using CEAST drop-weight impact device. Experiments were carried out for three different impact velocities ($v=1, 1.5$ and 2 m/s). Experimental results were compared to numerical results in order to improve the numerical model.

Keywords Functionally graded materials (FGMs); Low velocity impact; Elasto-plastic analysis, Finite element method.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	i
TEŞEKKÜR	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
1. BÖLÜM	
GİRİŞ	1
1.1. Konu ve Önemi	1
1.2. Amaç	2
1.3. Kapsam	4
2. BÖLÜM	
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1. Giriş	5
2.2. Literatür Araştırması	5
3. BÖLÜM	
TEORİK ALTYAPI	12
3.1. Giriş	12
3.2. Bünye İlişkileri ve Karışım Teorisi	12
3.3. Tamura-Tomota-Ozowa (TTO) Model	14
3.4. Sonlu Elemanlar Formülasyonu	17
3.4.1. Yapısal Denklemler	18
3.4.2. Üç Boyutlu Sekiz Düğüm Noktalı Katı Sonlu Eleman	21
3.4.3. Hacim İntegrasyonu	23
4. BÖLÜM	

DÜŞÜK HIZLI ÇARPMA YÜKLERİ ALTINDA FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ DAİRESEL PLAKALARIN ELASTİK ANALİZİ .	25
4.1. Giriş	25
4.2. Çarpma Analizleri için Fonksiyonel Kademelendirilmiş Plakanın Modellenmesi	25
5. BÖLÜM	
DÜŞÜK HIZLI ÇARPMA YÜKLERİ ALTINDA FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ DAİRESEL PLAKALARIN ELASTO-PLASTİK ANALİZİ	38
5.1. Giriş	38
5.2. Elasto-plastik model	38
6. BÖLÜM	
FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ DAİRESEL PLAKALARIN DÜŞÜK HIZLI ÇARPMA DAVRANIŞLARININ DENEYSEL İNCELENMESİ	51
6.1. Giriş	51
6.2. Düşük hızlı çarpma test cihazı	51
6.3. Düşük hızlı darbe test sonuçları	51
6.4. Sayısal ve Deneysel Analiz Sonuçlarının Mukayesesi	61
7. BÖLÜM	
SONUÇ ve DEĞERLENDİRME	68
KAYNAKLAR	70
ÖZGEÇMİŞ	76

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1.	Fonksiyonel kademelendirilmiş plakayı oluşturan bileşenlerin mekanik özellikleri.	26
Tablo 5.1.	Al ve SiC'ün malzeme özellikleri.	39
Tablo 6.1.	CEAST Fractovis Plus Teknik Özellikler	52

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka	13
Şekil 3.2.	Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın kalınlığı boyunca farklı kompozisyonel gradyanlarda seramik fazın hacimsel oranı V_c	14
Şekil 3.3.	TTO Modelin şematik gerilme-şekil değiştirme eğrisi.	17
Şekil 3.4.	Notasyon [54]	19
Şekil 3.5.	8 düğüm noktalı altı yüzlü katı eleman [54]	23
Şekil 4.1.	Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın ve yarı küresel vurucunun sonlu eleman modeli.	27
Şekil 4.2.	Katman sayısının temas kuvvetine etkisi. ($n=1.0$, $v=0.5\text{m/s}$) . . .	28
Şekil 4.3.	Vurucu hızının zamana göre değişimi. ($n=1.0$)	28
Şekil 4.4.	Vurucu hızının temas kuvvetine etkisi ($n=1.0$)	29
Şekil 4.5.	Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka kalınlığı boyunca malzeme kompozisyonunun ve vurucu hızının temas kuvveti değişimine etkisi.	30
Şekil 4.6.	Kinetik enerji değişimi. ($n=1.0$)	31
Şekil 4.7.	Fonksiyonel kademelendirilmiş plakada kompozisyonel gradyanın ve vurucu hızının merkezi yerdeğiştirmeye etkisi.	32
Şekil 4.8.	Fonksiyonel kademelendirilmiş plakada kompozisyonel gradyanın ve vurucu hızının von Mises gerilme değişimine etkisi.	33
Şekil 4.9.	R/h oranının temas kuvvetine etkisi. ($n=1.0$, $v=1\text{m/s}$)	34
Şekil 4.10.	R/h oranının merkezi yerdeğiştirmeye etkisi. ($n=1.0$, $v=1\text{m/s}$) . .	34
Şekil 4.11.	Vurucu hızının fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca hasar bölgesi gelişimine etkisi ($n=0.1$)	35
Şekil 4.12.	Vurucu hızının fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca hasar bölgesi gelişimine etkisi ($n=1$)	36
Şekil 4.13.	Vurucu hızının fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca hasar bölgesi gelişimine etkisi ($n=10$)	37
Şekil 5.1.	Vurucu hızının zamana göre değişimi. ($n=1.0$)	39

Şekil 5.2.	Vurucu hızının temas kuvvetine etkisi. ($n=1.0$)	40
Şekil 5.3.	Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka kalınlığı boyunca malzeme kompozisyonunun ve vurucu hızının temas kuvveti değişimine etkisi.	41
Şekil 5.4.	Kinetik enerji değişimi. ($n=1.0$)	42
Şekil 5.5.	Vurucu hızı $v=0.5$ m/s iken fonksiyonel kademelendirilmiş plakada oluşan maksimum ve kalıcı von Mises şekil değişimleri	44
Şekil 5.6.	Vurucu hızı $v=1$ m/s iken fonksiyonel kademelendirilmiş plakada oluşan maksimum ve kalıcı von Mises şekil değişimleri	45
Şekil 5.7.	Vurucu hızı $v=2$ m/s iken fonksiyonel kademelendirilmiş plakada oluşan maksimum ve kalıcı von Mises şekil değişimleri	46
Şekil 5.8.	Vurucu hızı $v=0.5$ m/s iken fonksiyonel kademelendirilmiş plakada oluşan maksimum ve kalıcı von Mises şekil değişimleri	47
Şekil 5.9.	Vurucu hızı $v=1$ m/s iken fonksiyonel kademelendirilmiş plakada oluşan maksimum ve kalıcı von Mises şekil değişimleri	48
Şekil 5.10.	Vurucu hızı $v=2$ m/s iken fonksiyonel kademelendirilmiş plakada oluşan maksimum ve kalıcı von Mises şekil değişimleri	49
Şekil 5.11.	Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda vurucu hızının ve malzeme kompozisyonunun kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi üzerine etkisi.	50
Şekil 6.1.	CEAST marka çarpma test cihazı.	52
Şekil 6.2.	4m/s hız ile yapılan çarpma deneyi neticesinde fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalarda oluşan deformasyonun kesitten görünümü.	54
Şekil 6.3.	Toz karıştırma ünitesi	55
Şekil 6.4.	Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka üretimi için kullanılan sıcak pres ünitesi	56
Şekil 6.5.	Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka üretimi için sıcak iş çeliğinden AISI2344 imal edilmiş kalıplar	56
Şekil 6.6.	Farklı malzeme kompozisyonlarında ($n=0.1, 0.5, 1.0, 5.0$ ve 10.0) üretilmiş Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalar.	57

Şekil 6.7.	Çarpma deneylerinden sonra Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalar.	58
Şekil 6.8.	Vurucu hızının temas kuvvetine etkisi ($n=0.1$).	59
Şekil 6.9.	Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların kalınlıkları boyunca malzeme kompozisyonunun ve vurucu hızının temas kuvveti değişimine etkisi (vurucu kütlesi=5.045kg)	60
Şekil 6.10.	Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalarda sayısal ve deneysel temas kuvvetlerinin zamana göre değişimi. ($v=1 \text{ m/s}$) . .	62
Şekil 6.11.	Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalarda sayısal ve deneysel temas kuvvetlerinin zamana göre değişimi. ($v=1.5 \text{ m/s}$) .	63
Şekil 6.12.	Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalarda sayısal ve deneysel temas kuvvetlerinin zamana göre değişimi. ($v=2 \text{ m/s}$) . .	64
Şekil 6.13.	Kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi ve kinetik enerjinin zamana göre değişiminin sayısal ve deneysel mukayesesi ($v=1 \text{ m/s}$)	65
Şekil 6.14.	Kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi ve kinetik enerjinin zamana göre değişiminin sayısal ve deneysel mukayesesi ($v=1.5 \text{ m/s}$)	66
Şekil 6.15.	Kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi ve kinetik enerjinin zamana göre değişiminin sayısal ve deneysel mukayesesi ($v=2 \text{ m/s}$)	67

1. BÖLÜM

GİRİŞ

1.1. Konu ve Önemi

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler (Functionally Graded Materials=FGMs) belirli bir pozisyonda malzeme kompozisyonunun sürekli olarak değiştiği yapılar olarak tanımlanırlar. Genellikle seramik-metal bileşiminden oluşan bu malzemeler kötü çalışma şartlarına sahip uygulamalar için son derece uygundurlar. [1]. Örneğin malzemenin bir tarafı yüksek mekanik dayanıma sahip olabilirken diğer tarafı ise yüksek ısı dayanıma sahip olabilir bu durum söz konusu malzemenin, içerisinde iki ayrı özelliği barındırması demektir. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerde değişim sürekli ya da kademeli olarak gelişir ismini de bu değişimden ötürü almıştır. Doğada da fonksiyonel kademelendirilmiş yapılara rastlamak mümkündür, örneğin bitki ve hayvanların dokularında bu yapı vardır hatta insan vücudunda; kemik ve dişlerimizde fonksiyonel kademelendirilmiş yapı mevcuttur. Bu doğal yapılardan esinlenilerek fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin gelişimine katkıda bulunan çalışmalar mevcuttur [2].

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler ilk olarak 1984-85 yıllarında bir fikir olarak, biri havacılık diğeri ise ileri malzemeler üzerine çalışan iki bilim adamının tasarlamak istedikleri bir uzay aracı ile ortaya çıktı. Bu uzay aracının gövdesinin dış yüzeyi yüksek sıcaklığa maruz kalacaktı (yaklaşık $1700^{\circ}C$) bu sebeple uzay aracının gövdesinde kullanılacak malzeme dış yüzeyi ile iç yüzeyi arasındaki yüksek sıcaklık değişimine dayanım göstermesi gerekiyordu. Bilinen malzemeler arasında bu şartlara dayanım gösterebilecek bir malzeme mevcut değildi. Bu sebeple bilim adamları ısı dayanımı ve mekanik özellikleri kademeli olarak değişen, yüksek sıcaklığa maruz dış yüzey için seramik bir malzeme iç yüzey içinse yüksek ısı iletkenliğine sahip

metal bir malzeme tercih ederek ilk fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeyi tasarladılar [3]. O tarihten bugüne fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin üretim teknikleri, mekanik ve malzeme özellikleri üzerindeki çalışmalar hızla devam etti ve halen uluslararası platformda dikkatleri üzerine çekmeye devam etmektedir. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler üzerine ilki 1990 yılında Japonya'nın Sendai kentinde düzenlenen uluslararası konferanslardan onuncusu tekrar burada 2008 yılında düzenlenmiştir [4].

Malzeme özellikleri, yüksek sıcaklığa maruz kalan seramik yüzeyden metal yüzeye doğru oldukça yumuşak bir geçişe sahip olan fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler ileri malzemeler arasında oldukça ilgi çekicidir. Bu fonksiyonel geçiş sayesinde fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler yüksek sıcaklık gradyanına sahip ortamlara dayanım gösterdikleri gibi malzeme bütünlüğü de koruyabilmektedirler. Ayrıca fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler, seramik-metal bağlantıların arayüzeylerinde termo-mekanik uyumsuzlukların azaltıldığı ideal yapılardır ve böylece yüksek sıcaklık ortamlarında çalışan yapılarda oluşan artık gerilmeleri de azaltabilirler. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerdeki ısıl gerilmeler kompozisyonel ve mikro-yapısal dağılımın kontrol edilmesiyle azaltılabilir. Yine de fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin çoğu kompozisyonundaki sürekli makroskopik değişimler nedeniyle artık gerilmelere sahiptirler ve bu artık gerilmeler fonksiyonel kademelendirilmiş malzemenin mekanik özelliklerini de etkiler.

1.2. Amaç

Her ne kadar yeni ve gelişme aşamasında olan bir teknoloji olsa da fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin uygulama alanları uzay, nükleer ve otomobil endüstrileri gibi oldukça özellikli yerlerdir. Bu nedenle fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin mekanik özelliklerinin ve malzeme karakterizasyonunun belirlenmesi oldukça önem taşımaktadır. Bu alanda yapılan çalışmalar fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin ortaya atılmasından bu güne hızlı bir şekilde ilerlemektedir.

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler zor çalışma şartlarına sahip darbeli ortamlarda veya balistik amaçlı olarak da kullanılabilirler. Bu nedenle bu malzemelerin darbe dayanımlarının da belirlenmesi oldukça önemlidir. Mühendislik uygulamalarında dışarıdan gelebilecek darbelere karşı istenmeyen sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin gerekli en uygun cevabı veya davranışı göstermesi istenir. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler farklı şekillerde olabilir. Buna karşın darbeye karşı olan cevap da malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Şöyle ki, metal ve metal alaşımlarının darbeye karşı cevabı; elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelir ve darbe hasarı, çoğunlukla , çarpma yüzeyinde başladığı anda kolay bir şekilde tespit edilebilir. Darbe hasarı, metal malzemelerde genellikle bir tehlike işareti olarak kabul edilmez, çünkü; metaller plastik şekil değiştirebilme kabiliyetlerinden dolayı, büyük miktarda enerjiyi absorbe edebilirler. Metaller sabit bir gerilme durumunda yapı sertleşmeden önce çok büyük uzamalarda akabilirler, bu nedenle oluşacak kopmalar ani ve beklenmedik olmaz. Buna karşın kompozit malzemelerde bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir, iç yapıda oluşan delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde başlayabilir. Yukarıda da bahsedildiği gibi metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmez. Genellikle gözle görülmeyen veya çok zayıf bir şekilde görülebilen hasarlar meydana gelebilir. Darbe esnasında kompozit malzemeye aktarılabilecek enerjinin miktarı, malzemenin bu enerjiyi sönmüleyebilmesi için oluşacak hasar modlarını belirleyecektir. Bu nedenle kompozit malzemedeki darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek için darbe hızının belirlenmesi oldukça büyük bir öneme sahiptir. Yapılacak olan bu çalışmada, son derece kritik uygulamalara sahip olan fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların düşük hızlı çarpma yükleri altında lineer olmayan mekanik davranışlarının sayısal ve deneysel olarak belirlenmesi amaçlanmaktadır.

1.3. Kapsam

Bu tez çalışmasında, fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların düşük hızlı darbe davranışları sayısal ve deneysel olarak incelendi, yapılan sayısal analizler bir sonlu elamanlar paket programı olan LS-DYNA ile gerçekleştirildi. Analizler farklı katman sayısı, malzeme kompozisyonu, vurucu hızları için tekrarlanarak deneysel sonuçlarla doğrulanmaya çalışıldı. Deneysel çalışmalar Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Mekanik Laboratuvarında bulunan CEAST marka düşük hızlı darbe test düzeneğinde üç farklı hızda ($v=0.5, 1$ ve 2 m/s) ve beş farklı malzeme kompozisyonlarında ($n=0.1, 0.5, 1, 5$ ve 10) gerçekleştirildi. Bu çalışma yedi bölüm içermektedir. Bölüm 1'de çalışma konusu ve önemi izah edildikten sonra çalışmanın amacı ve kapsamı anlatılmıştır. Bölüm 2'de fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler ve düşük hızlı darbe analizleri hakkında literatür özetlenmiştir. Bölüm 3'de bünye ilişkileri ve karışım teorisi, TTO model ve sonlu eleman teorileri anlatılmıştır. Bölüm 4'de fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların düşük hızlı darbe analizleri elastik olarak ele alınmıştır. Bölüm 5'de fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların düşük hızlı darbe analizleri elasto-plastik olarak incelenmiştir. Bölüm 6'da fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların düşük hızlı çarpma davranışları deneysel olarak incelenmiş ve elasto-plastik analizler ile mukayesesi yapılmıştır. Sonuçlar ve değerlendirme kısmı ise son bölümü oluşturmaktadır.

2. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Giriş

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin mikro yapısındaki sürekli değişim, bu malzemeleri, ara yüzeyde mekanik özellikler bakımından uyumsuz olan fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerden ayırır. Isıl yüke maruz klasik kompozit malzemelerde, muhtemel çatlak ara yüzeylerde başlayacak ve zayıf olan malzeme kesiti içerisinde ilerleyecektir. İlave olarak, kompozit malzemeyi oluşturan fiber ve matris malzemenin farklı ısıl genişleme katsayıları nedeniyle ısıl artı gerilmelerde ortaya çıkacaktır.

Katmanlı kompozit plakalar yüksek mukavemetleri ve yüksek rijitlikleri nedeniyle birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılırlar. Ancak, katmanlardaki malzeme özelliklerinin ani olarak değişmesi nedeniyle ara yüzeylerde yüksek gerilmeler meydana gelir ve bu gerilmeler de katmanlar arasında ayrılmalara neden olur. Bu olumsuz etkiler fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler (FGM) kullanılarak azaltılabilir ya da ortadan kaldırılabilir. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler sahip oldukları üstün özellikler nedeniyle son yıllarda birçok araştırmacının çalışma konusu olmuştur.

2.2. Literatür Araştırması

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler yüksek sıcaklık değişimine dayanım gösterebilecek bir yapının ihtiyacı üzere tasarlanmıştır. Bu sebeple fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerle ilgili literatürdeki pek çok araştırma bu yapıların ısıl gerilme ve ısıl artı gerilme davranışlarıyla ilgilidir [5, 6]. Öte yandan

uzay, nükleer ve otomobil endüstrileri gibi oldukça özellikli alanlarda kullanılan fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin ısı ve mekanik yüklemeler altındaki yer değiştirme, gerilme ve gerilme dalgası yayılımını inceleyen çalışmalarda; fonksiyonel kademelendirilmiş bölge boyunca değişen malzeme kompozisyonunun malzemenin söz konusu yüklemeye cevabı üzerinde etkili olduğu gözlenmiş, ısı yüklemeler altında bu durumun daha belirgin olduğu saptanmıştır [7–11].

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin üretim teknikleri ve malzeme karakterizasyonu konuları bu yapının ortaya çıkışından günümüze kadar gelen süreçte temel araştırma konuları olmuştur. Bugün fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin üretiminde yaklaşık 15 farklı teknik kullanılmakla beraber gelişen teknoloji polimer esaslı malzemelerinde FGM üretiminde kullanılmasını mümkün kılmıştır [12–15].

Kompozit malzemelerden yapılmış mühendislik yapı elemanları birçok endüstri alanında artarak kullanılmaktadır. Kompozitlerin kullanılmasının zorlayıcı nedeni metaller gibi klasik malzemelere göre sağladığı avantajlardır. Bu avantajlar kısaca şöyle sıralanabilir; yüksek mukavemet-ağırlık oranı, yüksek rijitlik-ağırlık oranı, korozyona karşı direnç, düşük ısı genleşme katsayısı, geniş sıcaklık aralığında kullanılabilirlik ve gereksinimlere göre istenilen toleranslarda üretilerek kullanılabilirlerdir. Bu çekici özelliklerine rağmen, kompozit malzemeler, özellikle fiber doğrultusu dışındaki yönlerde nispeten düşük çarpma direncine sahiptirler. Bu şekilde oluşabilecek bir hasar yapısal mukavemetin ciddi olarak azalmasına sebep olabilir. Bu durum düşük çarpma hızlarında, gözle görülemeyen ciddi iç hasarların oluşması nedeniyle daha da tehlikelidir. Bu anlamda kompozit malzemelerin çarpma yüklerine karşı cevapları metallerinkinden oldukça farklıdır.

Mannan ve arkadaşları [16] değişken vurucu hızı ve plaka kalınlıkları şartlarında alüminyum kirişlerin düşük hızlı darbe yükleri altındaki hasarını incelediler. Elde ettikleri deneysel sonuçlar ışığında uzama ve kesme yükü altındaki kirişlerde çatlak oluşumunun başladığı hızı ve kopmanın olduğu hızı ifade eden ampirik bir bağıntı geliştirdiler.

Bilindiği gibi metal yapıların çarpma hasarları genellikle yüzeyden başlar ve göz ile belirlenebilir. Fakat kompozitlerde karakteristik hasar mukavemetinde ciddi azalmalara sebep olan delaminasyon, matris çatlağı veya fiber kırılması şeklinde

olup gözle görülemeyecek şekilde yapının içinde oluşabilir. Ayrıca, çarpma esnasında ortaya çıkan düşük ve orta enerjiler metaller tarafından elastik ve plastik deformasyonlar tarzında absorbe edilebilir. Kompozitlerde ise absorbe edilen enerjinin neden olduğu plastik deformasyon kabiliyeti oldukça sınırlıdır ve bu enerji malzemenin mukavemeti ve rijitliğinde azalmaya sebep olan hasar bölgelerinin oluşmasına neden olur. Bununla beraber, kompozit yapılarda çarpma sonrası hasar bölgesinin davranışını tahmin etmek metallerinkinden daha zordur. Bu problemlere rağmen, kompozit yapıların çarpma davranışlarının belirlenmesi amacıyla yapılan birçok çalışma mevcuttur [17, 18].

Kompozit malzemeler üzerindeki düşük hızlı çarpma analizlerinin büyük bir kısmı katmanlı kompozitler üzerinedir, Lakshminarayana ve arkadaşları [19] katmanlı kompozit plakaların çarpma davranışlarını sonlu elemanlar metodunu kullanarak incelediler. Ganapathy ve Rao [20] düşük çarpma yükleri altındaki silindirik ve küresel katmanlı kompozit levhaların hasar analizini sonlu elemanlar metoduyla Kirchhoff-Love kabuk teorisini kullanarak yaptılar. Hasar modunu bulmak için maksimum gerilme kriterini, hasar tahmini için ise Tsai-Wu hasar kriterini kullandılar. Levhalardaki eğriliğin oluşan hasar üzerinde etkili olduğunu bu sebeple küresel kabuklardaki hasarın dairesel kabuklarınkinden daha fazla olduğunu tespit ettiler.

Collombet ve arkadaşları [21] kompozit yapılarda çarpma nedeniyle oluşan hasarı sayısal ve deneysel olarak incelediler. Meydana gelen hasarın modellenmesinde iki yaklaşım sundular: 1) hasar modelleri ve temas tekniği ve 2) hasarın başlamasını ve ilerlemesini belirlemek için basit kriter. Oguibe ve Webb [22] fiber takviyeli kompozit plakaların düşük hızlı çarpma altındaki davranışlarını sonlu elemanlar metodunu kullanarak incelediler. Yaptıkları modellemeye bir başarısızlık algoritması ilave ettiler ve elde ettikleri sonuçları önceden yapılmış deneysel çalışmalar ile doğruladılar. Donadon ve arkadaşları [23] çarpma yükleri altındaki katmanlı kompozitlerin, sürekli hasar mekaniği (CDM) yaklaşımını kullanarak üç boyutlu hasar modelini geliştirdiler. Değişken statik ve dinamik yükler altındaki deneysel sonuçlarla geliştirdikleri hasar modelini doğruladılar.

Schoeppner ve Abrate [24] düşük çarpma yükleri altındaki katmanlı kompozitlerde delaminasyon başlama değeri (Delamination threshold load, DTL) üzerine çalıştılar.

Guinard ve arkadaşları [25] düşük hızlı çarpma neticesinde katmanlı kompozitlerin üç boyutlu hasar analizini yaptılar. Düşük hızlı darbe ile oluşmuş hasarın başlangıcı ve gelişimini hasar mekaniğini kullanarak incelediler. Mili ve Necib [26] E-glass/epoxy katmanlı kompozit plakaların düşük hızlar altındaki çarpma davranışlarını deneysel ve teorik olarak incelediler. İnce dairesel kompozit plakalar ve yarı küresel uçlu silindirik alüminyum vurucu kullandıkları çalışmalarında, artan çarpma hızlarında deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki farkın arttığını tespit ettiler bunun nedeni olarak ise çarpma cihazının raylarında oluşan sürtünme kayıplarını gösterdiler.

Krishnamurthy ve arkadaşları [27] katmanlı kompozit silindirik kabukların çarpma tepkilerini hem klasik Fourier serilerini hem de sonlu elemanlar metodunu kullanarak belirlediler. Aslan ve arkadaşları [28] E-glass/epoxy katmanlı kompozit plakaların düşük hızlı darbelerini deneysel ve teorik olarak çalıştılar. Kompozit yapıların düşük hızlı çarpma yükleri altındaki mekanik davranışlarının plakaların düzlem içi boyutlarına ve çarpma kütesine bağlı olarak değiştiğini gösterdiler. Jiang ve Shu [29] merkezi normal çarpmaya maruz kompozit katmanların hasarını üç boyutlu sonlu elemanlar analiziyle incelediler. Katmanlardaki gerilme dağılımları üzerinde hasarın etkilerini ayrıntılı incelediler ve hasarlı katmanda oluşan hasarın şekil değiştirme enerjisini serbest bırakarak gerilme yığılmalarını azalttığını tespit ettiler. Bir diğer çalışmalarında [30] iki tabakalı sandviç yapıların düşük hızlı noktasal çarpma yükü altındaki deformasyonlarını çalıştılar. Ara tabakanın yerleşiminin bölgesel yerdeğiştirmeler üzerine etkisini incelediler.

Zhang ve arkadaşları [31] katmanlı kompozit plakaların düşük hızlı çarpma testlerinde hasarın başlangıcı ve ilerlemesini tahmin eden bir nümerik model geliştirdiler. Bunun için sonlu elemanlar metodunu kullandılar ve bu modelin deneysel çalışmalar ile uyumlu olduğunu gösterdiler. Ibekwe ve arkadaşları [32] düşük sıcaklıklarda katmanlı kompozitlerin düşük hızlı çarpma tepkilerini ve çarpma sonrası basma burkulma mukavemetlerini deneysel olarak incelediler. Ortam sıcaklığının çarpma hasarı, artık basma burkulma mukavemeti ve elastiklik modülü üzerindeki etkisini değerlendirdiler.

Saez ve arkadaşları [33] karbon fiber takviyeli katmanlı kompozitlerin düşük sıcaklıklardaki çarpma testi sonrası basma davranışlarını incelemiş ve test sonuçlarını çarpmaya maruz kalmamış plakaların davranışları ile karşılaştırdılar. Minak ve

Ghelli [34] karbon fiber takviyeli dairesel katmanlı kompozit plakalarda düşük hızlı ve düşük enerjili çarpma testleri yaptılar. Numune boyutları ve sınır şartlarının dinamik davranış ve malzeme hasarı üzerindeki etkilerini araştırdılar ve netice olarak her ikisinin de oldukça etkili olduklarını tespit ettiler. Tita ve arkadaşları [35] katmanlı kompozit ince disklerde düşük hızlı çarpmayı deneysel ve nümerik olarak çalıştılar. Katman dizilimi ve çarpma enerjisinin kompozit plakaların dinamik davranışı üzerindeki etkilerini incelediler.

Cui ve arkadaşları [36] üç boyutlu ileri hasar teorisini kullanarak çarpma ve çarpmadan sonra çekme yüküne maruz bırakılan katmanlı kompozitlerde hasar oluşumu ve gelişimini analiz etmek için bir yaklaşım geliştirdiler. Chun ve Lam [37] düşük çarpma yükleri altında katmanlı kompozitlerin dinamik davranışlarını hesaplamak için nümerik bir metot geliştirdiler ve elde ettikleri sonuçların literatürdeki mevcut sonuçlarla uyumlu olduğunu gösterdiler. Kim ve Chung [38] demiryolu araçlarında kullanılan katmanlı kompozitlerin düşük çarpma yükleri altındaki davranışını incelediler. Farklı enerji seviyeleri için yapmış oldukları testlerde temas kuvveti, kompozit plakaların absorbe ettiği enerji ve hasar bölgelerini incelediler. Yüksek enerji absorbe eden plakalardaki katmanlar arası delaminasyonların daha fazla olduğunu tespit ettiler.

Choi [39] analitik olarak katmanlı kompozitlerin düşük çarpma yükleri altındaki davranışlarını sonlu elemanlar yöntemini kullanarak inceledi ve sonuçları mevcut literatürdeki sonuçlarla karşılaştırdı. Setoodeh ve arkadaşları [40] "IMPLW3D" adını verdikleri bir sonlu elemanlar kodu ile üç boyutlu katmanlama metodunu geliştirdiler. Bu model ile temas kuvveti, yerdeğiştirme ve istenilen katman kalınlığı ve sınır şartlarında gerilme-zaman değişimini modellemeyi başarmışlardır. Chui ve arkadaşları [41] düzlem içi ön gerilme altındaki grafit fiber takviyeli epoksi kompozitlerin düşük hızlı çarpma yükleri altındaki davranışlarını deneysel olarak incelediler.

Kistler ve Waas [42] fiber takviyeli ince silindirik plakaların düşük çarpma yükleri altındaki davranışlarını analitik olarak Hertz temas kuralını kullanarak inceleyip bu çalışmalarını düşük hızlı çarpma testi ile deneysel olarak doğrulamayı amaçladılar. Yaptıkları analizlerde vurucu hızı, plaka kalınlığı, plaka eğrilikleri ve sınır şartlarının etkilerini ayrı ayrı incelediler. Sonuç olarak plaka kalınlığının artmasıyla temas

kuvvetinin arttığını buna karşın merkezi yer değiştirme ve temas süresinin azaldığını gösterdiler bununla birlikte değişen plaka eğriligi ve sınır şartlarının da temas kuvveti üzerinde etkili olduğunu gösterdiler.

Foo ve arkadaşları [43] düşük hızlı çarpma yükü altındaki alüminyum petek levhaların (honeycomb) hasar analizini yaptılar. Analizlerinde yaprak kalınlığı ve hücre boyutlarının düşük hızlı çarpma analizi üzerindeki etkilerini incelediler. Sonuç olarak çarpma esnasında absorbe edilen enerjinin hücre yoğunluğundan bağımsız olduğunu buna karşın artan hücre yoğunluğu ile temas kuvvetinin arttığı ve hasar profilinin daha küçük olduğunu gösterdiler. Dheyhan [44] SiC/Al₂O₃ seramik takviyeli kompozitlerin düşük hızlı çarpma yükleri altındaki davranışlarını teorik ve deneysel olarak çalıştı. Nam ve arkadaşları [45] düşük hızlı çarpma yükleri altında metal matrisli kompozit malzemelerin dinamik davranışlarını incelediler. Matris elemanı olarak alüminyum alaşımı takviye elemanı olarak Al₂O₃ ve karbon fiber kullanarak ürettikleri numunelerin üzerinde yapılan çarpma testinde; çarpma hızının artmasıyla numunelerin absorbe ettiği enerji miktarının artmasına karşın kırılma tokluğu değerinin önemli ölçüde değişmediği sonucuna varmışlardır.

Yapılan literatür çalışmasında yukarıda da detaylı olarak bahsedildiği gibi katmanlı kompozit yapıların düşük hızlı çarpma davranışları konusunda pek çok çalışma varken fonksiyonel kademelendirilmiş yapıların düşük hızlı darbe davranışları konusunda oldukça sınırlı sayıda çalışmanın olduğu görülmektedir. Gong ve arkadaşları [46] düşük hızlı çarpma nedeniyle fonksiyonel kademelendirilmiş silindirik kabukların dinamik tepkilerinin analitik çözümünü sundular. Apetre ve arkadaşları [47] ortası fonksiyonel kademelendirilmiş bir sandviç yapının düşük hızlı çarpma problemini çözdüler. Neticede verilen bir çarpma enerjisi için sandviç yapının orta kısmındaki maksimum şekil değiştirmenin önemli derecede azaltılabileceğini gösterdiler. Böylece, orta kısmı fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç yapılarda çarpma hasarının minimize edilebileceği sonucuna vardılar. Kubair ve Lakshmana [48] merkezde fonksiyonel kademelendirilmiş katmanlı kompozit kirişlerin düşük hızlı çarpma hasarını nümerik olarak incelediler. Hasarın başlaması ve ilerlemesini simüle etmek için karışık mod yapıştırıcı bölgesi modeli kullandılar. Yaptıkları parametrik simülasyonlar ile giriş merkezinde fonksiyonel kademelendirilmiş yapının kullanılmasıyla hasar enerjisinin değiştirilebileceği sonucuna vardılar. Etemadi

ve arkadaşları [49] ortası fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç levhaların düşük hızlı çarpma yükleri altındaki üç boyutlu sonlu eleman simülasyonunu yaptılar. Çalışmalarında vurucu hızı, kinetik enerji ve levha boyutlarının etkilerini ayrı ayrı incelediler. Çarpma yükü altında ortası fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç levhalar ile ortası homojen olan sandviç levhaların düşük hızlı darbe davranışlarını kıyasladılar ve sonuç olarak ortası fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç levhalarda temas kuvvetinin daha yüksek olduğunu, buna karşın yerdeğiştirmenin daha düşük olduğunu gösterdiler.

Yapılan literatür çalışmasında, fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların düşük hızlı çarpma yükleri altındaki elasto-plastik davranışlarının sayısal ve deneysel olarak incelendiğı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, bu tez çalışmasında bu konular ayrıntılı olarak incelenmiştir.

3. BÖLÜM

TEORİK ALTYAPI

3.1. Giriş

Bu bölümde metal-seramik esaslı fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların bünye denklemleri, karışım teorisi, elasto-plastik malzeme davranışı için Tamura ve arkadaşları tarafından ortaya atılan TTO model ve sayısal analizlerde kullanılan sonlu eleman teorisi verilmiştir.

3.2. Bünye İlişkileri ve Karışım Teorisi

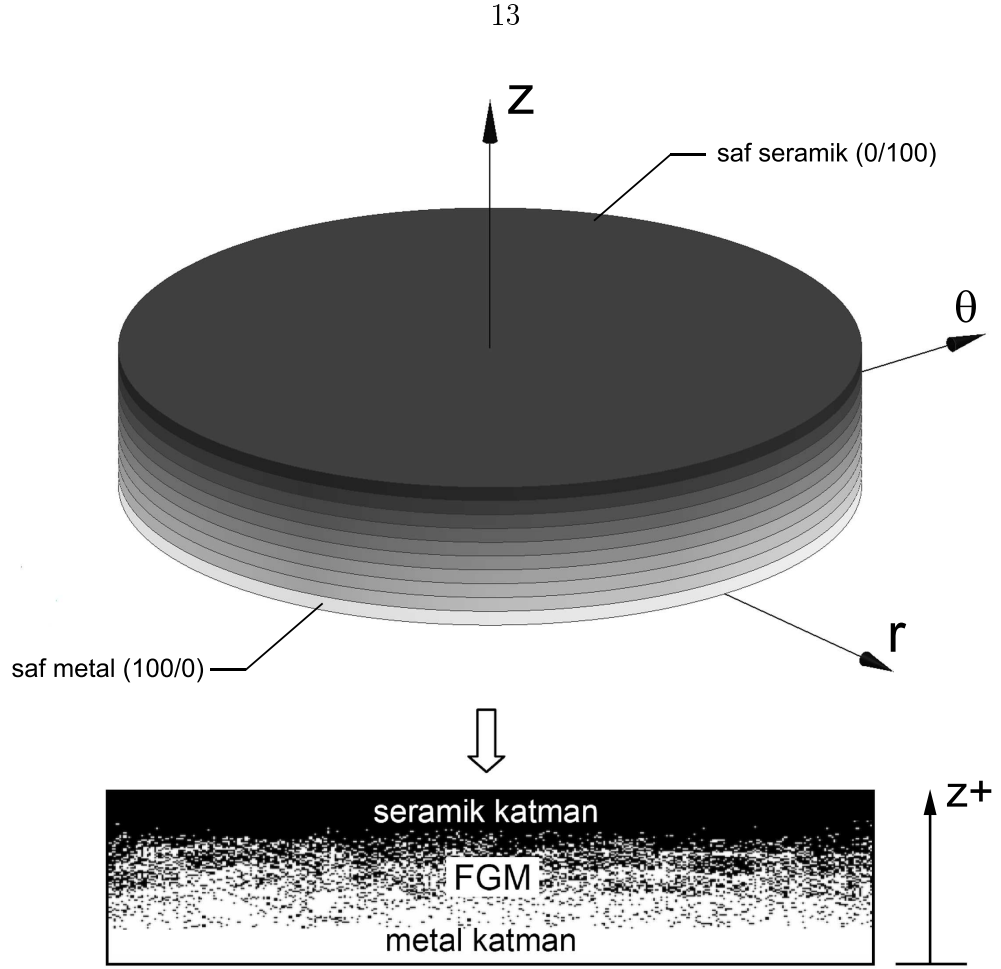
İki ayrı malzemeden (seramik-metal) oluşan plakanın en alt yüzeyinin metal, en üst yüzeyinin (çarpma yüzeyi) ise seramik olduğu ve her iki yüzey arasındaki hacimsel oranların kademeli olarak değiştiği kabul edilmiştir (Şekil 3.1). Seramik (c) ve metal (m) fazların hacimsel oranları arasındaki ilişki;

$$V_c + V_m = 1 \quad (3.1)$$

eşitliği ile ifade edilir. Bileşimin oranı plaka kalınlığı (h) boyunca konumun fonksiyonu olarak

$$V_c(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^n \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilir, burada $V_c(z)$ plakanın herhangi bir z mesafesindeki seramik bileşenin hacimsel oranı, h plakanın kalınlığı, n bileşimin değişimini lineer veya non-lineer olarak kontrol eden keyfi bir üstür. Çeşitli n değerleri için bileşimin hacimsel oranları Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Kademelendirilmiş bölgedeki lokal



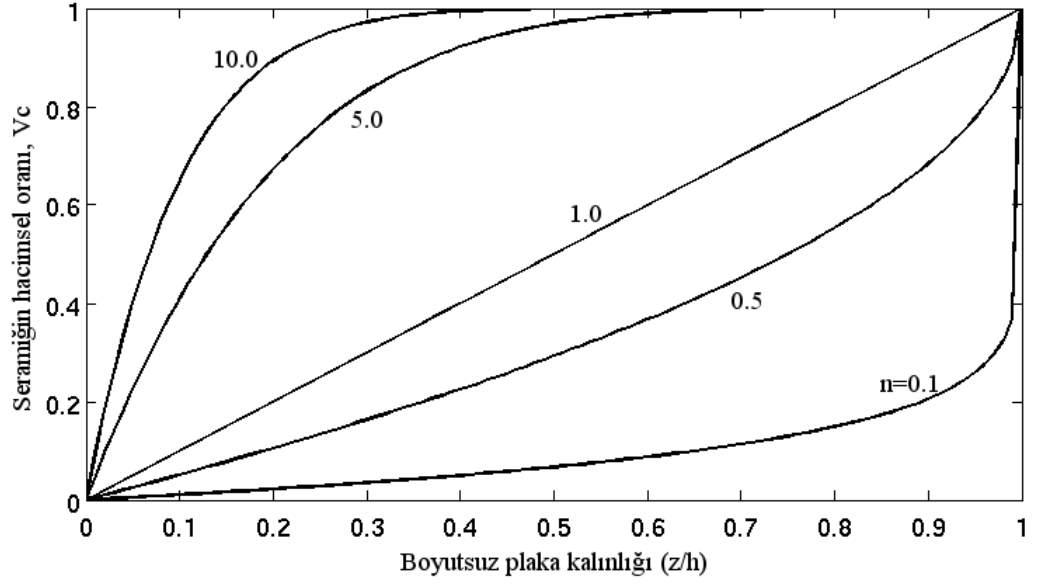
Şekil 3.1. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka

malzeme özelliklerinin hesaplanmasında mikromekanik model olarak Mori-Tanaka şeması kullanılmıştır [50, 51]. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemenin etkili hacim modülü K ve kayma modülü G Mori-Tanaka şemasına göre şu şekilde ifade edilir;

$$\frac{K - K_m}{K_c - K_m} = \frac{V_c}{\left[1 + (1 - V_c) \frac{3(K_c - K_m)}{3K_m + 4G_m} \right]} \quad (3.3)$$

$$\frac{G - G_m}{G_c - G_m} = \frac{V_c}{\left[1 + (1 - V_c) \frac{(G_c - G_m)}{G_m + f_1} \right]} \quad (3.4)$$

$$f_1 = \frac{G_m(9K_m + 8G_m)}{6(K_m + 2G_m)} \quad (3.5)$$



Şekil 3.2. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın kalınlığı boyunca farklı kompozisyonel gradyanlarda seramik fazın hacimsel oranı V_c

Elastisite modülü E ve Poisson oranı ν 'yü hesaplamak için;

$$E = \frac{9KG}{3K + G} \quad (3.6)$$

ve

$$\nu = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)} \quad (3.7)$$

3.3. Tamura-Tomota-Ozawa (TTO) Model

Konvansiyonel kompozitlerin mikromekanik modelleri kullanılarak elastik özelliklerin yaklaşık olarak belirlendiği fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin lineer-elastik davranışları klasik Hooke kanunu ile tariflenirken, elasto-plastik davranışlarını modellemek için Tamura ve arkadaşları [52] tarafından ortaya atılan ve metal-seramik esaslı fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin hacimsel oranlarını temel alan TTO model kullanılabilir.

TTO model iki fazlı kompozitlerde iki bileşenin ortalama tek eksenli gerilme ve şekil değiştirme değerleri kullanılarak elde edilen tek eksenli gerilme (σ) ve şekil

değiştirme (ε) değerleriyle ilişkilidir:

$$\sigma = V_1\sigma_1 + V_2\sigma_2, \quad \varepsilon = V_1\varepsilon_1 + V_2\varepsilon_2 \quad (3.8)$$

Burada σ_i ve ε_i ($i = 1, 2$) sırasıyla bileşen fazların ortalama gerilme ve şekil değiştirme değerleri ve V_i ($i = 1, 2$) ise hacimsel oranları ifade etmektedir. TTO model ilave bir parametre olan q 'yu şu şekilde tanımlar:

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|}, \quad 0 < q < \infty \quad (3.9)$$

q parametresi gerilme-şekil değiştirme transfer oranı olarak isimlendirilir, ve değeri bileşenlerin malzeme özelliklerine ve kompozit yapı içerisindeki mikroyapısal etkileşimlerine bağlıdır. Örneğin, $q = \infty$ iken bileşen elemanların yükleme doğrultusundaki deformasyonları özdeştir, halbuki $q = 0$ iken bileşen elemanlar aynı gerilme seviyelerine sahiptirler. Genellikle, kompozit yapı içerisindeki bileşen elemanlar karmaşık mikroyapıları (tane şekillerindeki fark, doğrultu, hacimsel oran vb.) nedeniyle farklı gerilme ve şekil değiştirme değerlerine sahiptirler. q 'nın sıfırdan farklı sonlu bir değeri yaklaşık olarak bileşenlerin etkilerini yansıtabilir.

$$\sigma_i = E_i\varepsilon_i, \quad (i = 1, 2) \quad (3.10)$$

burada E_i ($i = 1, 2$) bileşen fazların elastisite modülüdür. Kompozitin elastisite modülü E ise şu şekilde hesaplanabilir:

$$E = \frac{V_2E_2\frac{q+E_1}{q+E_2} + (1-V_2)E_1}{V_2\frac{q+E_1}{q+E_2} + (1-V_2)} \quad (3.11)$$

Kompozitin Poisson Oranı v :

$$v = V_1v_1 + V_2v_2 \quad (3.12)$$

burada v_i ($i = 1, 2$) bileşen fazların Poisson Oranlarıdır. Seramik-metal kompozitlerin plastik deformasyonu uygulamalarında TTO model, metal bileşen akmaya başlayınca kompozitin aktığını varsayar. Kompozitin akma gerilmesi σ_Y şu şekilde tariflenir

$$\sigma_Y = \sigma_0 \left[V_2 + \frac{q + E_2 E_1}{q + E_1 E_2} (1 - V_2) \right] \quad (3.13)$$

Burada σ_0 , metalin akma gerilmesidir. Yukarıdaki denklem göstermektedir ki kompozitin akma gerilmesi; metalin akma gerilmesi, metalin hacimsel oranı, bileşen fazların elastisite modülleri ve q parametresine bağlıdır. Şimdi burada kompozitin gerilme-şekil değiştirme eğrisini yaklaşık olarak tarif edecek bir kuvvet-kanunu modelini kullanacağız. Sırasıyla metal ve kompozitin akma noktasından sonraki gerilme-şekil değiştirme eğrileri için

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_0 \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_0} \right)^{n_0}, \quad \sigma_2 \geq \sigma_0 \quad (3.14)$$

ve

$$\varepsilon = \varepsilon_Y \left(\frac{\sigma}{\sigma_Y} \right)^n, \quad \sigma \geq \sigma_Y \quad (3.15)$$

burada

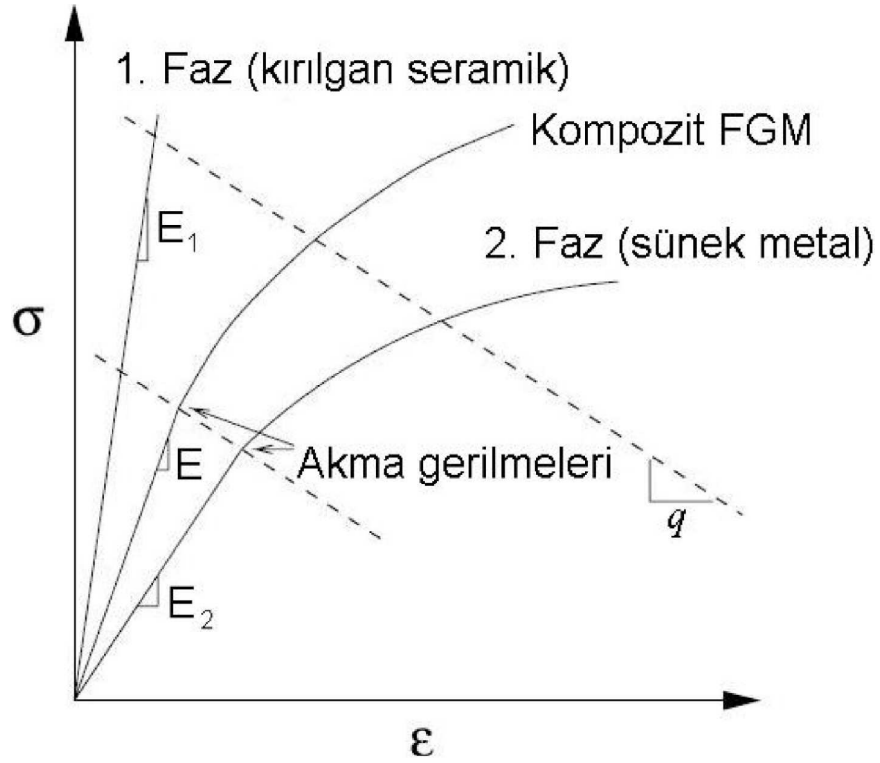
$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E_2} \quad \varepsilon_Y = \frac{\sigma_Y}{E} \quad (3.16)$$

sırasıyla metalin ve kompozitin akma şekil değiştirme değerleri, n_0 ve n ise metal ve kompozitin sertleşme katsayılarıdır. Kompozit için gerilme-şekil değiştirme ($\sigma - \varepsilon$) eğrisini veren parametrik denklem şu şekilde tarif edilebilir:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_Y} = \frac{V_1 E}{q + E_1} \frac{\sigma_2}{\sigma_Y} + \frac{(q + V_2 E_1) E}{(q + E_1) E_2} \frac{\sigma_0}{\sigma_Y} \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_0} \right)^{n_0} \quad (3.17)$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_Y} = \frac{V_2 q + E_1}{q + E_1} \frac{\sigma_2}{\sigma_Y} + \frac{(V_1 q E_1)}{(q + E_1) E_2} \frac{\sigma_0}{\sigma_Y} \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_0} \right)^{n_0} \quad (3.18)$$

Şekil 3.3 TTO Model ile tariflenen kompozitin gerilme-şekil değiştirme eğrisini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 3.3. TTO Modelin şematik gerilme-şekil değiştirme eğrisi.

3.4. Sonlu Elemanlar Formülasyonu

Kartezyen koordinat sisteminde bir cismin hareketi Lagrangian formülasyonuna göre zamana bağlı olarak şu şekilde ifade edilir (Şekil 3.4)

$$x_i = x_i(X_a, t) \quad (3.19)$$

$t = 0$ 'da başlangıç şartları

$$x_i(X_a, 0) = X_a \quad (3.20)$$

$$\dot{x}_i(X_a, 0) = V_i(X_a) \quad (3.21)$$

burada V_i başlangıç hızını tanımlar

3.4.1. Yapısal Denklemler

Momentum denkleminde;

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{x}_i \quad (3.22)$$

∂b_1 sınırında çekme sınır şartları;

$$\sigma_{ij} n_j = t_i(t) \quad (3.23)$$

∂b_2 sınırında yer değiştirme sınır şartları

$$x_i(X_a, t) = D_i(t) \quad (3.24)$$

$x_i^+ = x_i^-$ iken iç sınır ∂b_3 boyunca süreksizlik şartı

$$(\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_j = 0 \quad (3.25)$$

yerine konularak çözüm aranır. Burada σ_{ij} Cauchy gerilmesi, ρ yoğunluk, f cisim kuvvetleri, $\ddot{x}$ ivme, n_j sınır elemanı ∂b 'den dışa doğru birim normalidir. Kütlenin korunumu

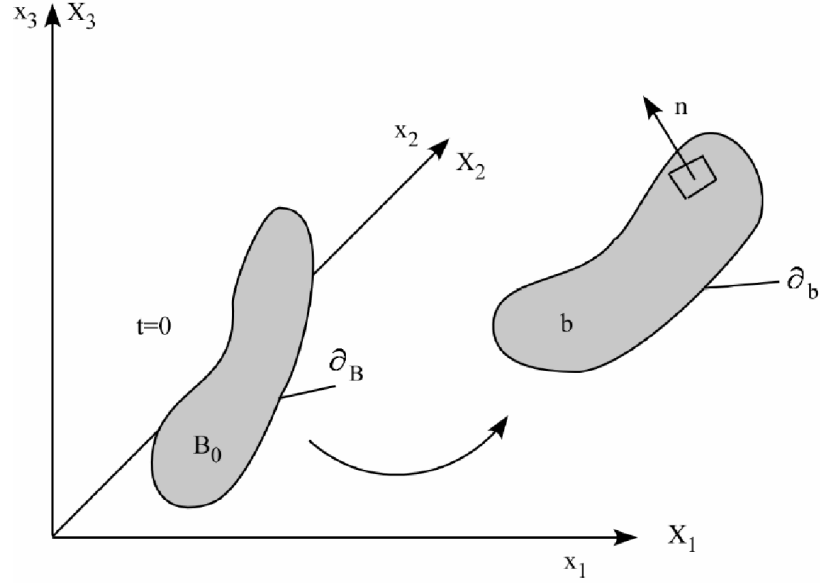
$$\rho V = \rho_0 \quad (3.26)$$

burada; V bağıl hacim yani deformasyon gradyant matrisinin determinantı F_{ij} ;

$$F_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial X_j} \quad (3.27)$$

ve ρ_0 referans yoğunluktur. Enerji denklemi

$$\dot{E} = V s_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - (p + q) \dot{V} \quad (3.28)$$



Şekil 3.4. Notasyon [54]

zamana göre integre edildiğinde enerji dengesi için kullanılır. Denklem 3.28'de s_{ij} ve p sırasıyla deviatorik gerilmeler ve basınctır.

$$s_{ij} = \sigma_{ij} + (p + q)\delta_{ij} \quad (3.29)$$

$$p = -\frac{1}{3}\sigma_{ij}\delta_{ij} - q = \frac{1}{3}\sigma_{kk} - q \quad (3.30)$$

eşitlik 3.30'da q bulk viskozitesi, δ_{ij} Kronecker delta ($i=j$ ise $\delta_{ij} = 1$ aksi halde $\delta_{ij} = 0$ 'dır) ve $\dot{\epsilon}_{ij}$ şekil değiştirme tensörüdür.

Bu durumda,

$$\int_v (p\ddot{x}_i - \sigma_{ij,j} - pf)\delta x_i dv + \int_{\partial b_1} (\sigma_{ij}n_j - t_i)\delta x_i ds + \int_{\partial b_3} (\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-)n_j\delta x_i ds = 0 \quad (3.31)$$

eşitliği yazılabilir. Burada δx_i ∂b_2 deki tüm sınır şartlarını sağlar. Diverjans teoremi uygulanırsa;

$$\int_v (\sigma_{ij}\delta x_i)_{,j} dv = \int_{\partial b_1} \sigma_{ij}n_j\delta x_i ds + \int_{\partial b_3} (\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-)n_j\delta x_i ds \quad (3.32)$$

veya

$$(\sigma_{ij}\delta x_i)_{,j}\sigma_{ij,j}\delta x_i = \sigma_{ij}\delta x_{i,j} \quad (3.33)$$

denge denklemlerinin zayıf formundan

$$\delta\pi = \int_v p\ddot{x}_i\delta x_i dv + \int_v \sigma_{ij}\delta x_i dv - \int_v pf_i\delta x_i dv - \int_{\partial b_1} t_i\delta x_i ds = 0 \quad (3.34)$$

sanal iş denklemi elde edilir.

Sonlu elemanlar ağı tatbik edildikten sonra referans konfigürasyon üzerindeki düğüm noktalarının zamana göre yer değiştirmesi

$$x_i(X_a, t) = x_i(X_a(\xi, \eta, \zeta), t) = \sum_{j=1}^k \phi_j(\xi, \eta, \zeta)x_i^j(t) \quad (3.35)$$

Burada ϕ_j lokal koordinatlardaki (ξ, η, ζ) şekil fonksiyonları, k eleman üzerinde tanımlı düğüm noktalarının sayısı ve x_i^j i'inci doğrultudaki j 'inci düğüm noktasının düğüm koordinatı.

Toplam n eleman üzerinden $\delta\pi$ yaklaşık olarak yazılırsa;

$$\delta\pi = \sum_{m=1}^n \delta\pi_m = 0 \quad (3.36)$$

$$\sum_{m=1}^n \left[\int_{v_m} p\ddot{x}_i\Phi_i^m dv + \int_{v_m} \sigma_{ij}^m p\Phi_{i,j}^m dv - \int_{v_m} pf_i\Phi_i^m dv - \int_{\partial b_1} t_i\Phi_i^m ds \right] = 0 \quad (3.37)$$

ve

$$\Phi_i^m = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_k)_i^m \quad (3.38)$$

Matris notasyonunda denklem 3.37;

$$\sum_{m=1}^n \left[\int_{v_m} p \mathbf{N}^t \mathbf{N} a dv + \int_{v_m} \mathbf{B}^t \sigma dv - \int_{v_m} p \mathbf{N}^t b dv - \int_{\partial b_1} \mathbf{N}^t t ds \right]^m = 0 \quad (3.39)$$

burada $\mathbf{N}$ interpolasyon matrisi, $\mathbf{B}$ şekil değiştirme-yerdeğiştirme matrisi, σ ise gerilme vektörüdür.

$$\sigma^t = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}) \quad (3.40)$$

a düğüm ivme vektörü

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} = \mathbf{N} \begin{bmatrix} a_{x_1} \\ a_{y_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_{y_k} \\ a_{z_k} \end{bmatrix} = \mathbf{N} a \quad (3.41)$$

b cisim kuvvet vektörü ve t 'ler ise yüzeyde uygulanan çekme yükleridir.

$$b = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix}, t = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

3.4.2. Üç Boyutlu Sekiz Düğüm Noktalı Katı Sonlu Eleman

8 düğüm noktalı 6 yüzlü katı bir eleman için denklem 3.35

$$x_i(X_a, t) = x_i(X_a(\xi, \eta, \zeta), t) = \sum_{j=1}^8 \phi_j(\xi, \eta, \zeta) x_i^j(t) \quad (3.43)$$

8 düğüm noktalı 6 yüzlü katı eleman için şekil fonksiyonu ϕ_j

$$\phi_j = \frac{1}{8}(1 + \xi \xi_j)(1 + \eta \eta_j)(1 + \zeta \zeta_j) \quad (3.44)$$

şeklinde tanımlanır. Burada ξ_j, η_j ve ζ_j lokal koordinatlardır ve $(\pm 1, \pm 1, \pm 1)$ değerlerini alırlar, x_i^j ise i 'inci doğrultudaki j 'inci düğüm noktasının düğüm koordinatıdır (bak Şekil 3.5)

Katı elaman için N, 3x24'lük interpolasyon matrisidir ve şu şekilde ifade edilir [54]

$$\mathbf{N}(\xi, \eta, \zeta) = \begin{bmatrix} \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & 0 & . & . & . & 0 & 0 \\ 0 & \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & . & . & . & \phi_8 & 0 \\ 0 & 0 & \phi_1 & 0 & 0 & . & . & . & 0 & \phi_8 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

σ gerilme vektörü

$$\sigma^t = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx},) \quad (3.46)$$

B, 6x24'lük şekil değiştirme–yerdeğiştirme matrisi

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \mathbf{N} \quad (3.47)$$

Diagonal kütle matrisi

$$m_{kk} = \int_v p \phi_k \sum_{i=1}^8 \phi_i dv = \int_v p \phi_k dv \quad (3.48)$$

Şekil değiştirme–yerdeğiştirme matrisindeki terimler şu şekilde hesaplanır

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} &= \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \xi} + \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \eta} &= \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} &= \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \zeta} + \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \zeta} + \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{aligned} \quad (3.49)$$

Matris notasyonunda

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

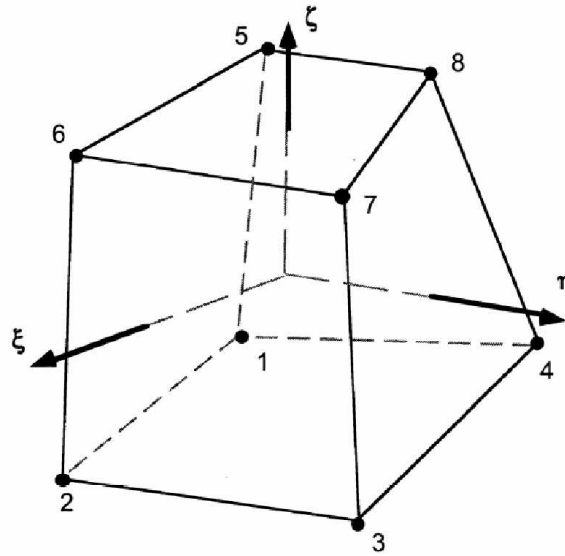
Jakobyien matrisinin tersi alınırsa istenilen terimler bulunabilir.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

3.4.3. Hacim İntegrasyonu

Hacim integrali Gauss yaklaşımı ile bulunur. Eğer $g(x, y, z)$ hacim üzerinden tarif edilen bir fonksiyon ve n ise integrasyon noktalarının sayısı ise, yerel koordinatlarda

$$\int_v g dv = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} g |J| d\xi d\eta d\zeta \quad (3.52)$$



Node	ξ	η	ζ
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	1	1	-1
4	-1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	1	1	1
8	-1	1	1

Şekil 3.5. 8 düğüm noktalı altı yüzlü katı eleman [54]

yaklaşık olarak

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n g_{jkl} |J_{jkl}| w_j w_k w_l \quad (3.53)$$

burada w_j, w_k, w_l ağırlık faktörleridir [54]

$$g_{jkl} = g(\xi_j, \eta_k, \zeta_l) \quad (3.54)$$

ve $|J|$ ise Jacobian matrisinin determinantıdır. Bir noktalı Gauss yaklaşımı için;

$$\begin{aligned} n &= 1 \\ w_i &= w_j = w_k = 2 \\ \xi_l &= \eta_l = \zeta_l = 0 \end{aligned} \quad (3.55)$$

bu durumda

$$\int g dv = 8g(0, 0, 0) |J(0, 0, 0)| \quad (3.56)$$

ifadesi yazılabilir. $8|J(0, 0, 0)|$ yaklaşık olarak eleman hacmine eşittir. Bir noktada integrasyonun en büyük avantajı hesaplama zamanını önemli ölçüde azaltmasıdır [54].

4. BÖLÜM

DÜŞÜK HIZLI ÇARPMA YÜKLERİ ALTINDA FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ DAİRESEL PLAKALARIN ELASTİK ANALİZİ

4.1. Giriş

Bu bölümde düşük hızlı darbe yükleri altında fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların elastik davranışları sonlu elemanlar metodu kullanılarak incelendi. Kenarlarından ankastre mesnetlenmiş dairesel plaka merkezi düşük hızlı çarpma yüküne maruz bırakılarak yapılan analizlerde; vurucunun rijit olduğu kabul edilirken, fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka; kompozisyonu kalınlık boyunca değişen seramik (Silisyum Karbür-SiC) ve metal bileşenlerden (Alüminyum-Al) oluştuğu kabul edilmiştir. Seramik ve metal katmanlar arasında kalan fonksiyonel kademelendirilmiş bölgenin mekanik özelliklerinin plaka kalınlığı boyunca sürekli olarak bileşenlerin hacimsel oranlarındaki değişime bağlı olarak bir kuvvet kanununa göre değiştiği varsayılmıştır. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların düşük hızlı darbe davranışları üzerinde katman sayısı, malzeme kompozisyonu, vurucu hızı ve R/h oranının etkileri araştırılmıştır.

4.2. Çarpma Analizleri için Fonksiyonel Kademelendirilmiş Plakanın Modellenmesi

Analizler için yarıçapı $R = 20mm$ ve kalınlığı $h = 6mm$ olan metal-seramik fonksiyonel kademelendirilmiş plaka kullanıldı. Kullanılan yarı küresel rijit vurucu ise $5.045kg$ ağırlığında ve $10mm$ yarıçapındadır. Plakayı oluşturan metal-seramik malzemelere ait mekanik özellikler Tablo 4.1’de verilmiştir.

Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın düşük hızlı çarpma analizleri 107M142 nolu TÜBİTAK araştırma projesi kapsamında kiralanmış olan explicit

Tablo 4.1. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakayı oluşturan bileşenlerin mekanik özellikleri.

Özellikler	Bileşenler	
	Alüminyum (Al)	Silisyum Karbür (SiC)
Elastiklik Modülü, (GPa)	67	302
Poisson Oranı(ν)	0.33	0.17
Yoğunluk (ρ , kg/m^3)	2702	3100

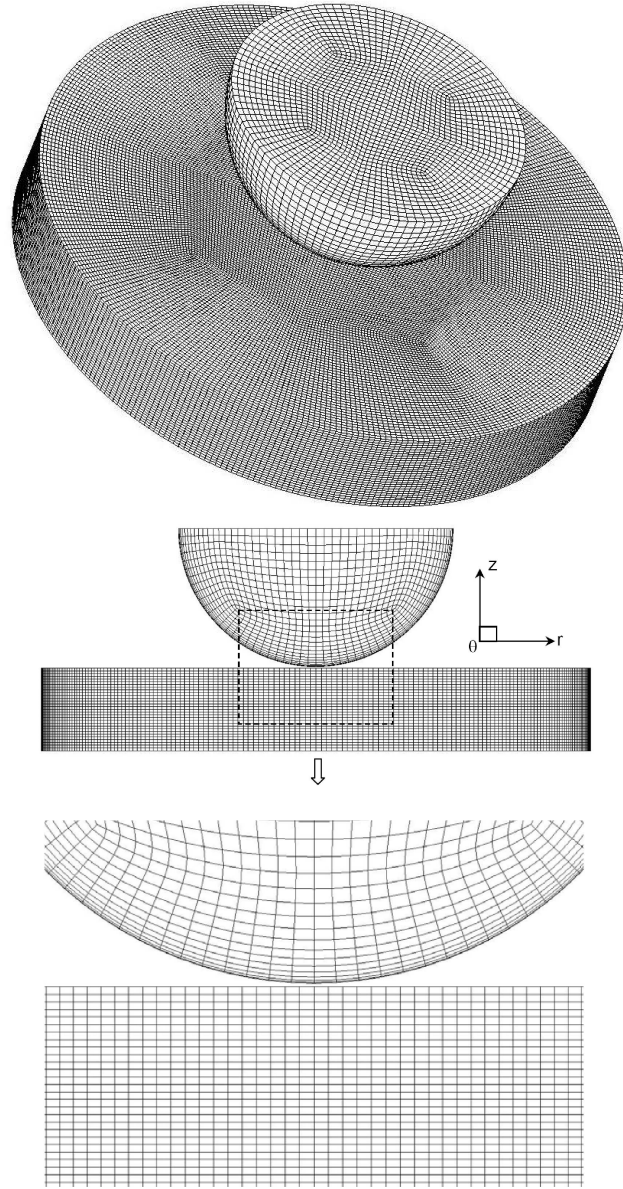
dinamik analiz yapabilen LS-DYNA FEA yazılımı ile yapılmıştır. Plaka ve vurucu 8 düğüm noktalı, herbir düğümde 9 serbestlik dereceli SOLID eleman ile modellendi. Plaka kalınlığı boyunca 30 katman kullanıldı (Şekil 4.1). Vurucu ile fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka arasında sürtünmenin olmadığı, fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın sönümleme etkisinin ihmal edildiği, çarpma boyunca yerçekimi ivmesinin olmadığı ve vurucunun rijit olduğu kabulleri yapılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Çarpma analizlerinde temas modelinin oluşturulması oldukça kritik bir adımdır. Sayısal analizlerde vurucu ile fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın en üst katmanı arasında CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE temas özelliği tanımlanmıştır.

Analizlerde 5.045 kg ağırlığındaki vurucu sabit $v=0.5$, 1 ve 2m/s'lik hızlarda $n=0.1$, 0.5, 1.0, 5.0 ve 10.0 ile tariflenen metal zengin yapıdan seramik zengin yapıya değişen malzeme kompozisyonlarına sahip fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların üzerine düşürülmüştür.

Öncelikle plaka kalınlığı boyunca kullanılan katman sayısının darbe davranışı üzerindeki etkisi araştırıldı. Bu amaçla kalınlığı boyunca lineer malzeme kompozisyonuna sahip Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaya farklı katman sayıları (10, 20, 30, 40 ve 50) için 0.5m/s'lik vurucu hızı ile çarpma analizleri yapıldı. 30 katmandan sonraki temas kuvveti değerlerinin yakın olduğu görüldü (Şekil 4.2). Bu nedenle bundan sonraki tüm analizlerde katman sayısı olarak 30 seçildi.

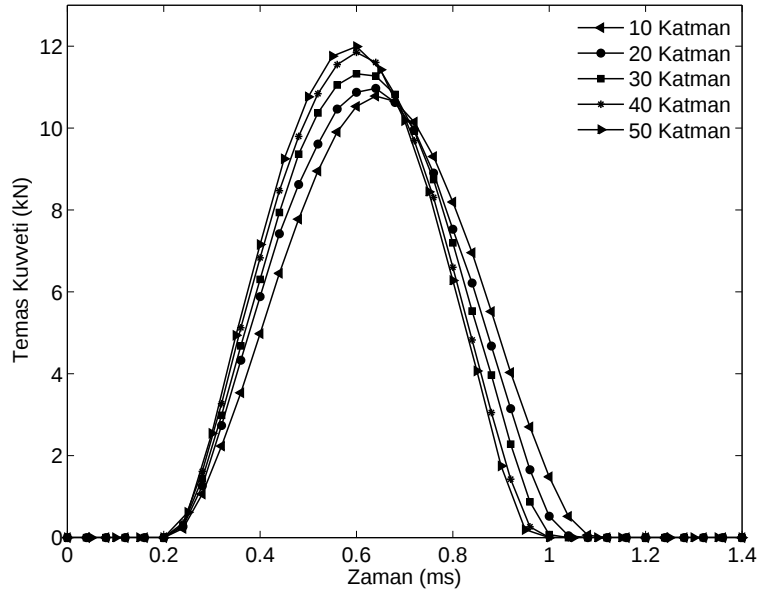
Şekil 4.3'de gösterilen üç farklı vurucu hızı altında yapılan analizlerde; artan vurucu hızı ile temas kuvveti değerinin de arttığı görülmüştür. Şekil 4.4 vurucu hızı $v=0.5$, 1 ve 2m/s ve malzeme kompozisyonu $n=1.0$ için fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel



Şekil 4.1. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın ve yarı küresel vurucunun sonlu eleman modeli.

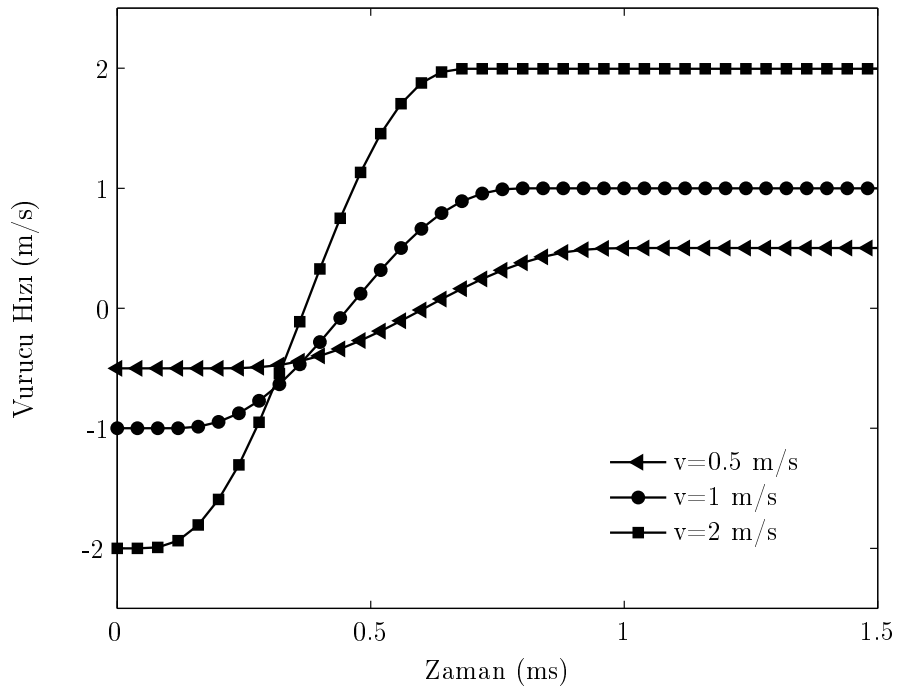
plakalarda, temas kuvvetinin zamana göre değişimini göstermektedir.

Şekil 4.5’de farklı vurucu hızlarında ($v=0.5$, 1, ve 2) fonksiyonel kademelendirilmiş plaka kalınlığı boyunca değişik malzeme kompozisyonlarının temas kuvvetine etkisi görülmektedir. Malzeme kompozisyonu metal yoğun ($n=0.1$) bir yapıdan seramik yoğun ($n=10.0$) bir yapıya doğru gittikçe temas kuvvetinin arttığı, buna karşın plaka ve vurucu arasındaki temas süresinin ise azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni artan kompozisyonel gradyant ile plaka rijitliğinin artmasıdır.

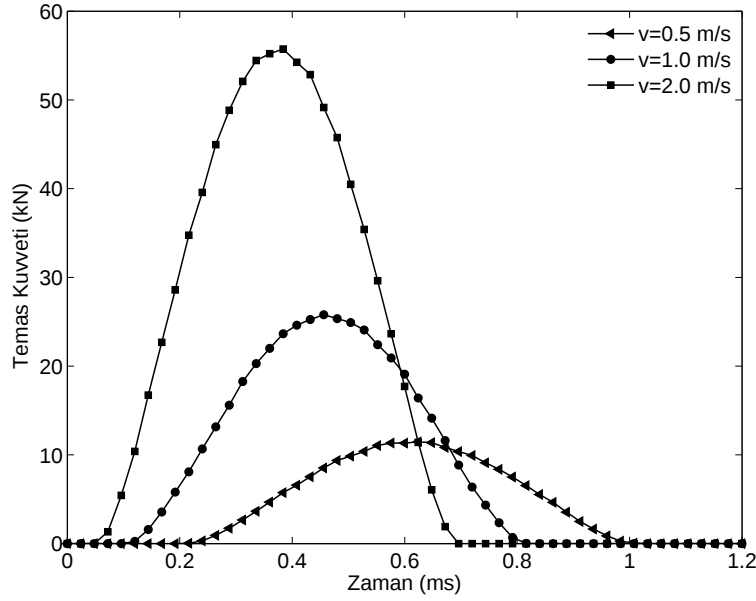


Şekil 4.2. Katman sayısının temas kuvvetine etkisi. ($n=1.0$, $v=0.5\text{m/s}$)

Malzeme kompozisyonu $n=1.0$ iken vurucu hızı $v=0.5$, 1 ve 2m/s için fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakada, kinetik enerjinin zamana göre değişimi Şekil 4.6'da görülmektedir. Vurucu hızı arttıkça kinetik enerji değerinin sıfır olduğu süre kısalmıştır.



Şekil 4.3. Vurucu hızının zamana göre değişimi. ($n=1.0$)



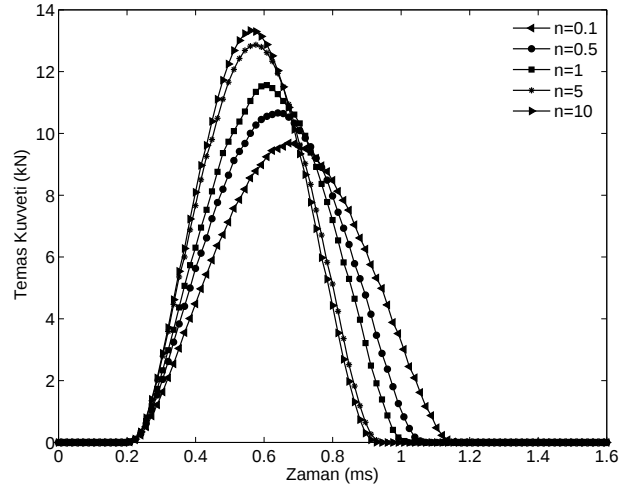
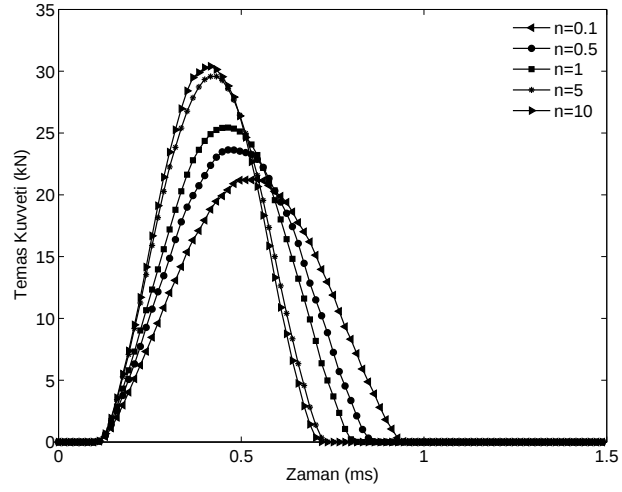
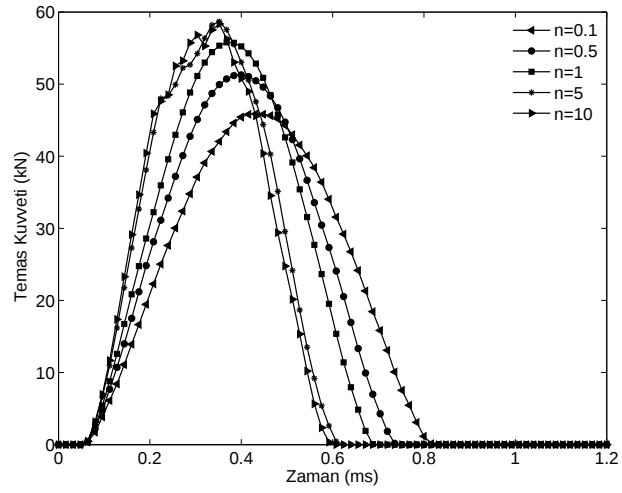
Şekil 4.4. Vurucu hızının temas kuvvetine etkisi ($n=1.0$)

Şekil 4.7 farklı vurucu hızları için fonksiyonel kademelendirilmiş plakada artan kompozisyonel gradyantin merkezi yer değiştirmeye etkisini göstermektedir. Artan kompozisyonel gradyant ile plaka rijitliği arttığından merkezi yer değiştirme miktarı azalırken temas süreside azalmaktadır.

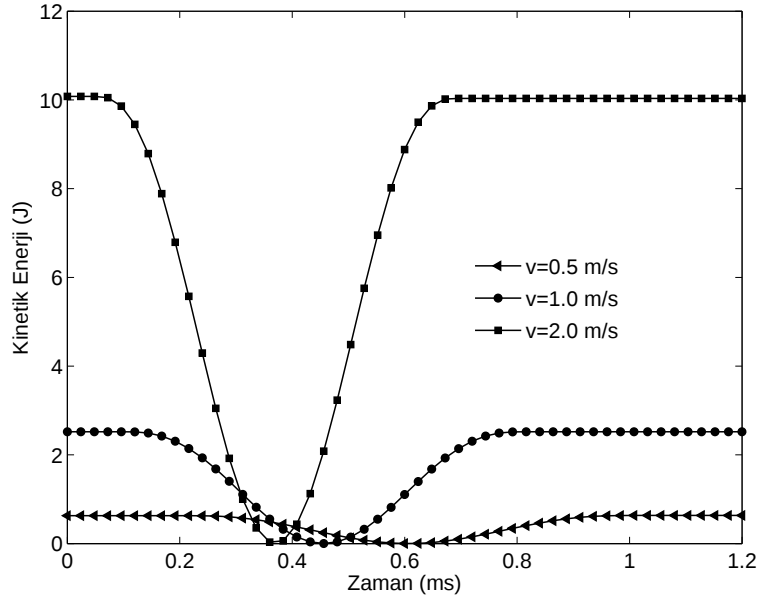
Şekil 4.8 vurucu hızı $v=0.5$, 1 , ve 2 m/s iken fonksiyonel kademelendirilmiş plaka kalınlığı boyunca malzeme kompozisyonları $n=0.1$, 0.5 , 1.0 , 5.0 ve 10.0 için çarpma yüzeyindeki von Mises gerilmesinin zamana göre değişimini göstermektedir. Artan kompozisyonel gradyant değeri ile (metal zengin durumdan seramik zengin duruma giderken) von Mises gerilmesinin arttığı gözlenmiştir.

Sabit plaka kalınlığında ($h=6\text{ mm}$), artan plaka yarıçapının temas kuvvetlerine etkisi Şekil 4.9'da görülmektedir. Buna göre plaka yarıçapı (R) büyüdükçe temas kuvvetinin azaldığı ve temas süresinin ise arttığı görülmüştür. Şekil 4.10, R/h oranına göre fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın merkezi yerdeğiştirme değişimlerini göstermektedir. Artan R/h oranıyla plakanın merkezi yerdeğiştirme değeri ve temas süresi artmaktadır.

Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13'te sırasıyla $n=0.1$, 1 ve 10 iken vurucu hızı $v=0.5$, 1 ve 2 m/s için fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın kalınlığı boyunca oluşabilecek hasar bölgeleri görülmektedir. Burada TTO model kullanılarak hesaplanmış kopma

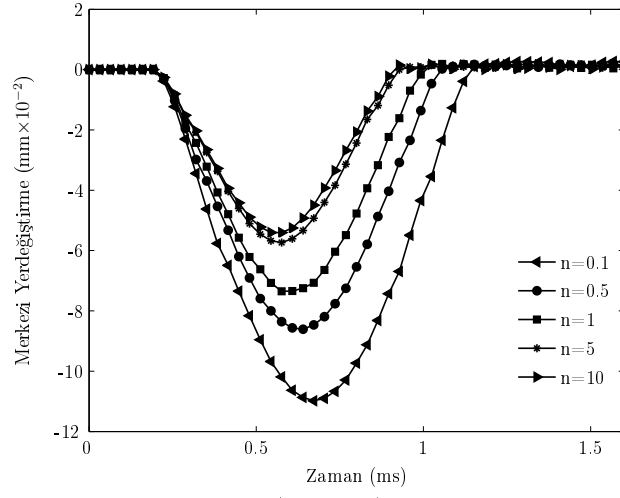
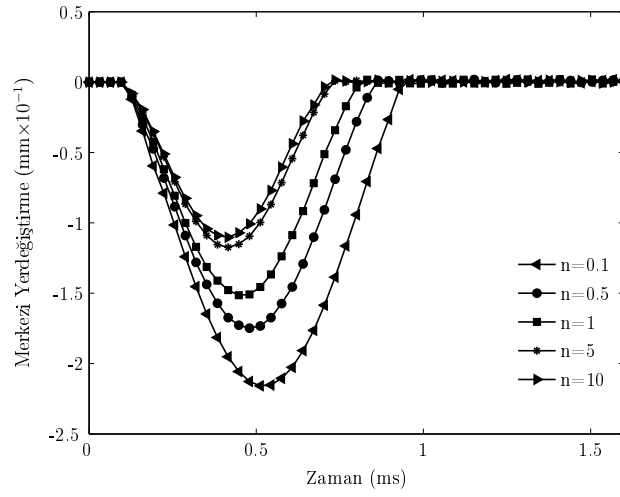
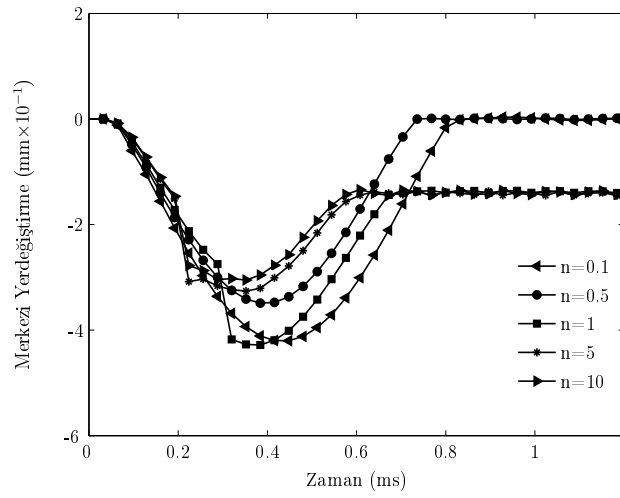
a) $v=0.5\text{m/s}$ b) $v=1\text{m/s}$ c) $v=2\text{m/s}$

Şekil 4.5. Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka kalınlığı boyunca malzeme kompozisyonunun ve vurucu hızının temas kuvveti değişimine etkisi.

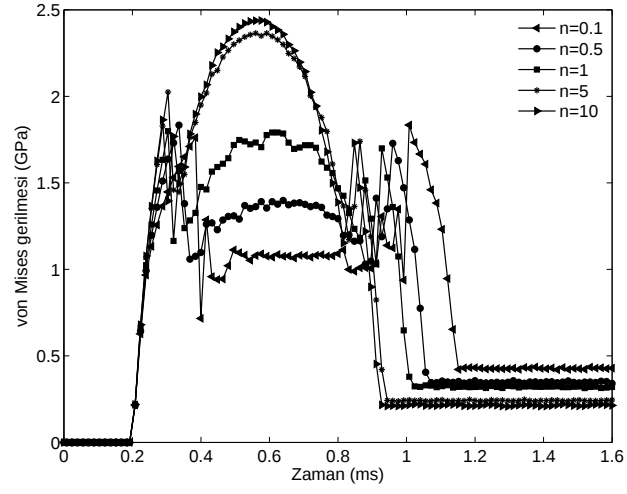
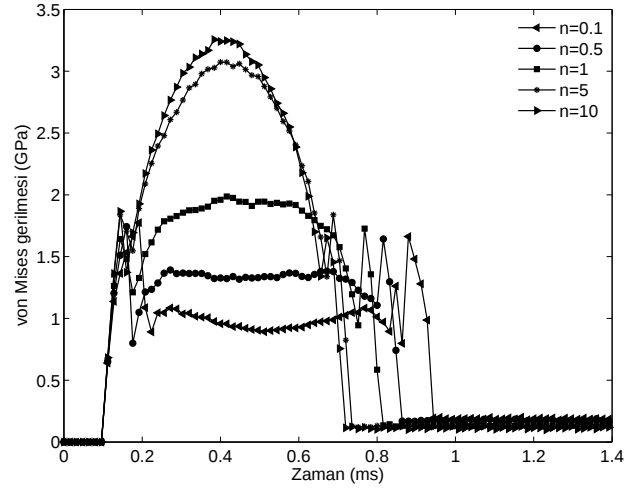
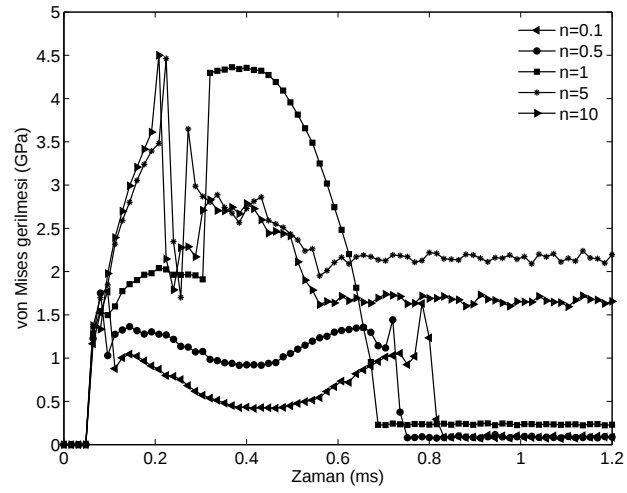


Şekil 4.6. Kinetik enerji değişimi. ($n=1.0$)

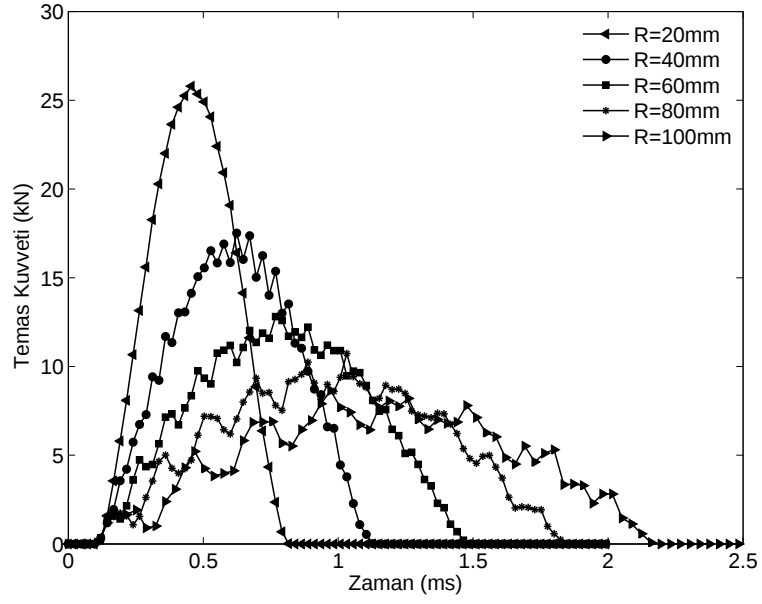
şekil değiştirme değerleri dikkate alınmıştır Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13'te gösterilen alanlardan açık gri renkteki bölge kopma şekil değiştirme sınırının altındaki koyu gri ile gösterilen bölge ise kopma şekil değiştirme değerinin üzerindeki alanı göstermektedir. Tüm malzeme kompozisyonlarında artan vurucu hızı ile hasar bölgesinin büyüdüğü görülmüştür. Buna karşın artan malzeme kompozisyonu ile hasar bölgesinin küçüldüğü gözlenmiştir. Metal yoğun ($n=0.1$) ve lineer ($n=1$) malzeme kompozisyonuna sahip plakalarda hasar bölgesinin çarpma yüzeyi olan seramik üst yüzeyden nötr düzleme doğru gidildikçe küçüldüğü, nötr düzlemde metal alt yüzeye gidildikçe büyüdüğü görülmüştür (Şekil 4.11 ve 4.12). Seramik yoğun ($n=10$) malzeme kompozisyonuna sahip plakada hasar bölgesinin çarpma yüzeyi olan seramik üst yüzeyden metal alt yüzeye doğru gidildikçe küçüldüğü görülmüştür (Şekil 4.13). Bunun nedeni olarak $n=10$ malzeme kompozisyonu için plakanın kalınlığı boyunca neredeyse seramik zengin bir yapıya sahip olması gösterilebilir.

a) $v=0.5\text{m/s}$ b) $v=1\text{m/s}$ c) $v=2\text{m/s}$

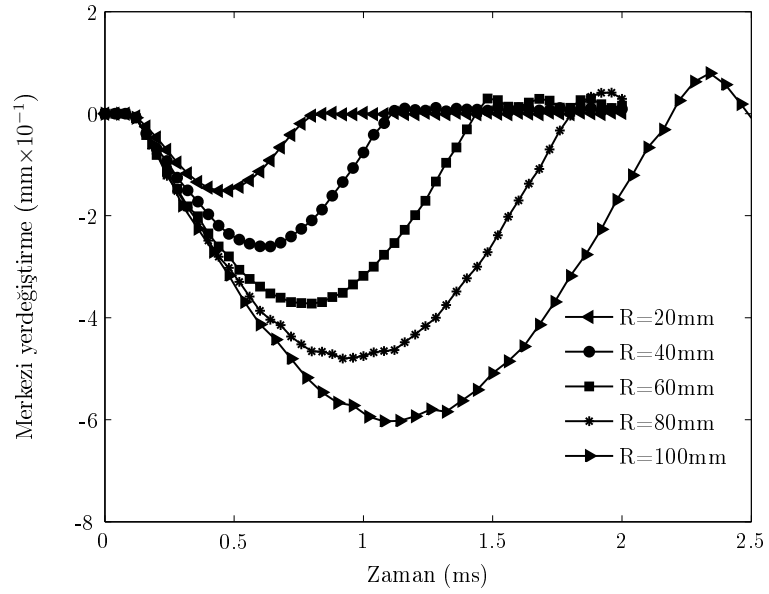
Şekil 4.7. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakada kompozisyonel gradyantın ve vurucu hızının merkezi yerdeğiştirmeye etkisi.

a) $v=0.5\text{m/s}$ b) $v=1\text{m/s}$ c) $v=2\text{m/s}$

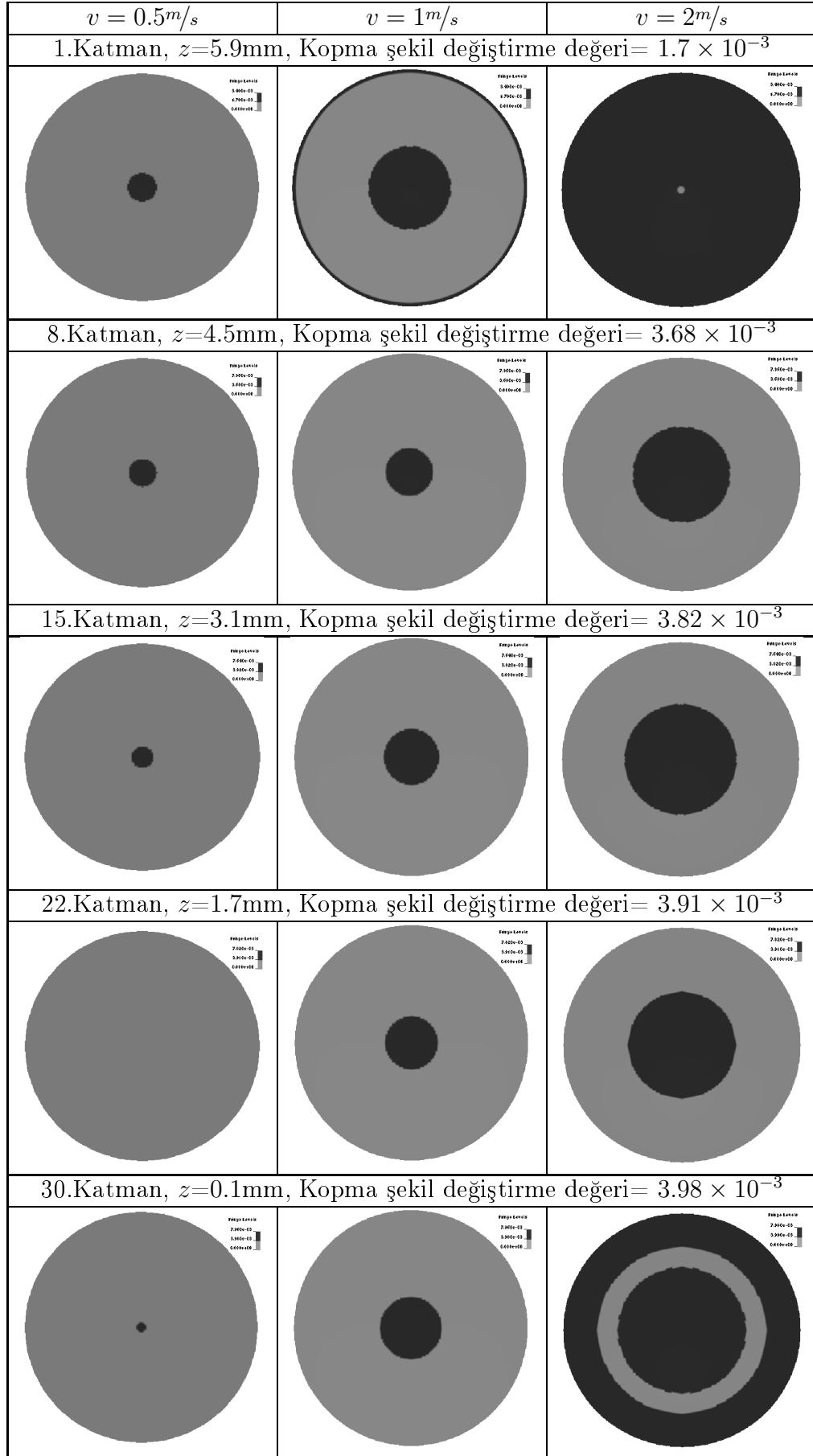
Şekil 4.8. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakada kompozisyonel gradyantin ve vurucu hızının von Mises gerilme değişimine etkisi.



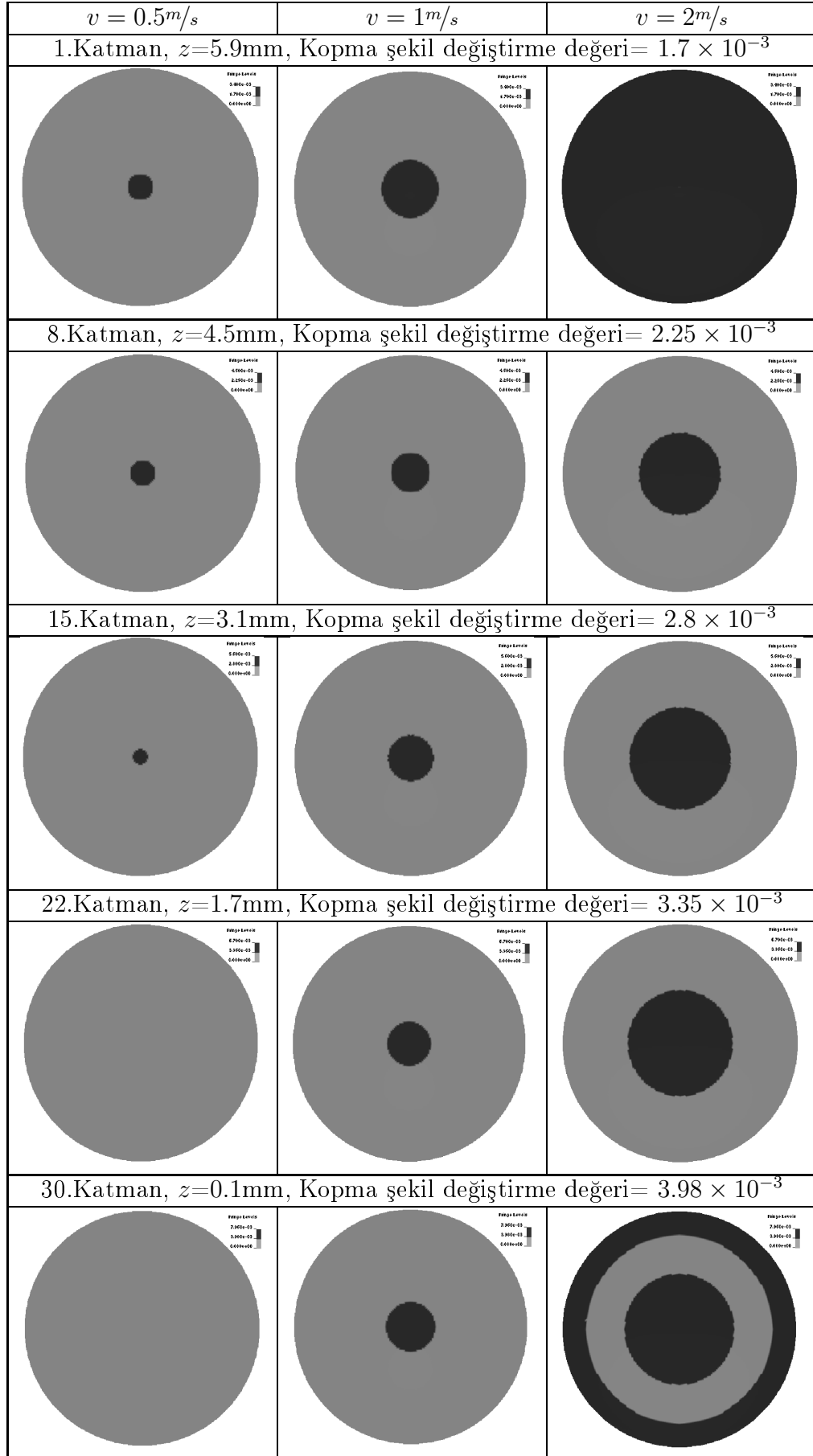
Şekil 4.9. R/h oranının temas kuvvetine etkisi. ($n=1.0$, $v=1\text{m/s}$)



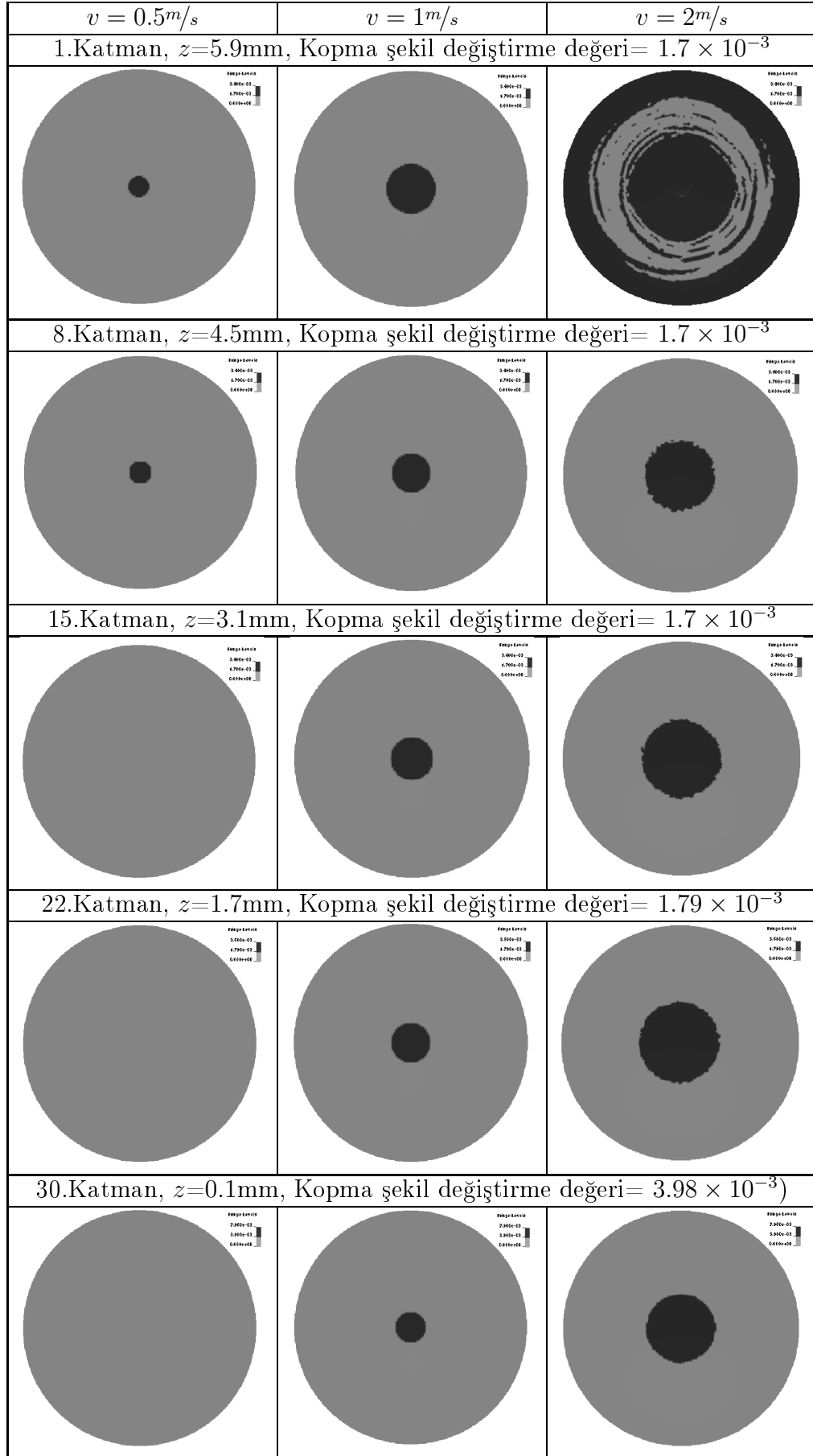
Şekil 4.10. R/h oranının merkezi yerdeğiştirmeye etkisi. ($n=1.0$, $v=1\text{m/s}$)



Şekil 4.11. Vurucu hızının fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca hasar bölgesi gelişimine etkisi ($n=0.1$)



Şekil 4.12. Vurucu hızının fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca hasar bölgesi gelişimine etkisi ($n=1$)



Şekil 4.13. Vurucu hızının fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca hasar bölgesi gelişimine etkisi ($n=10$)

5. BÖLÜM

DÜŞÜK HIZLI ÇARPMA YÜKLERİ ALTINDA FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ DAİRESEL PLAKALARIN ELASTO-PLASTİK ANALİZİ

5.1. Giriş

Bu bölümde elastik ve elasto-plastik analizlerin mukayese edilebilmesi amacıyla bir önceki bölümde elastik analizlerde kullanılan modelin aynısı elasto-plastik analizler için de kullanılmıştır (Şekil 4.1). Elastik çarpma analizleri için LS-DYNA'da yazılan makroya fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin elasto-plastik davranışlarını modelleyebilen TTO modeli [52] uygulandı. Elasto-plastik analizler üç farklı vurucu hızı ($v=0.5, 1$ ve 2m/s) ve beş farklı malzeme kompozisyonları ($n=0.1, 0.5, 1, 5$ ve 10) için tekrarlandı.

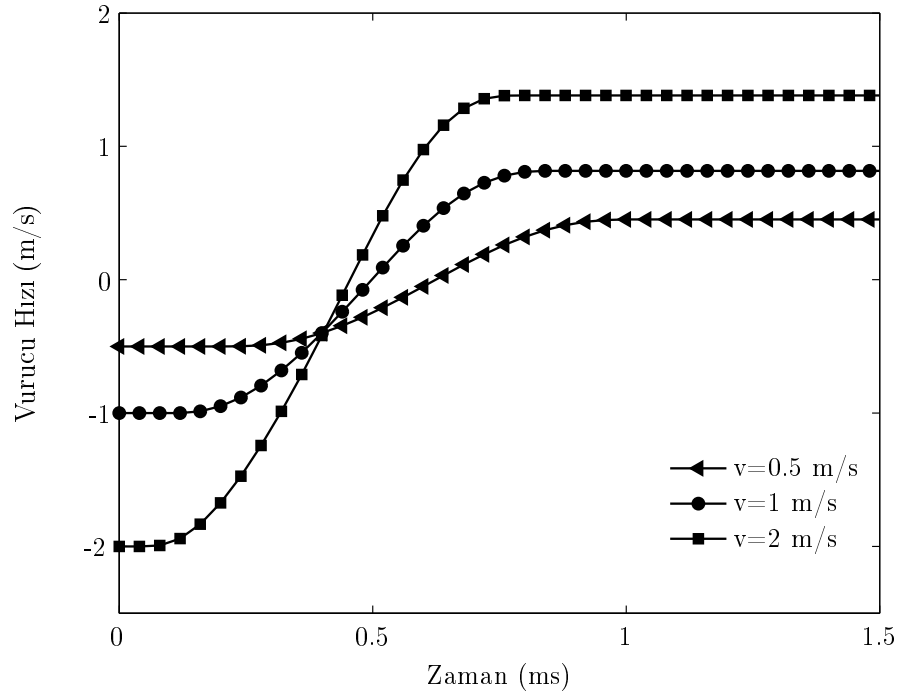
5.2. Elasto-plastik model

Plaka kalınlığı boyunca 30 katmandan oluşan Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın herbir katmanı için gerilme-şekil değiştirme eğrileri TTO model kullanılarak yazılan makro ile hesaplanmakta ve veri olarak elasto-plastik analizlerde kullanılmaktadır. Al ve SiC için malzeme özellikleri Tablo 5.1'de verilmiş olup gerilme şekil değiştirme transfer oranı olan $q=91.6$ GPa olarak alınmıştır [53]. Alüminyum malzeme için sertleşme katsayısı n_0 ise en küçük kareler metodu kullanılarak hesaplanmıştır.

Vurucu hızları $v=0.5, 1$ ve $v=2\text{m/s}$ için (Şekil 5.1) yapılan analizlerde elastik analiz sonuçlarına paralel olarak artan vurucu hızı ile vurucunun sahip olduğu kinetik enerji değeri artmakta bu sebeple temas kuvveti değerinin de arttığı gözlenmektedir. Elasto-plastik analizlerde fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın çarpma

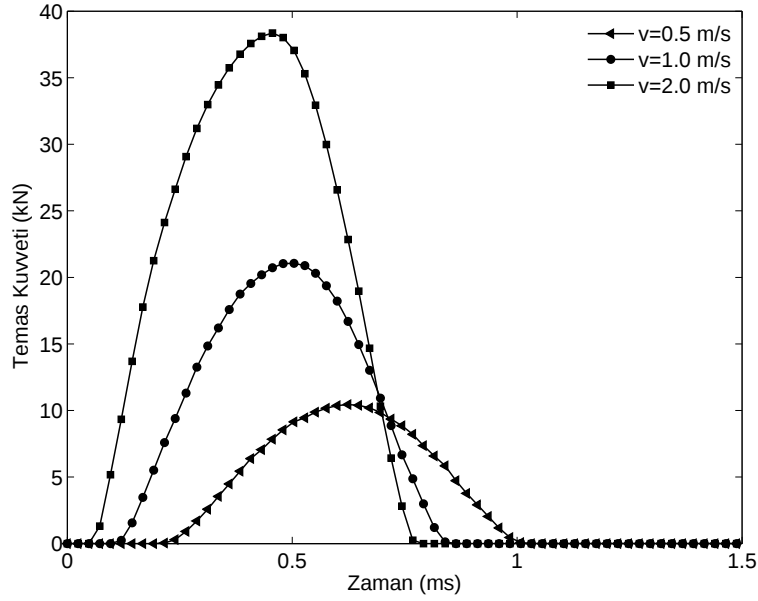
Tablo 5.1. Al ve SiC'ün malzeme özellikleri.

Malzele	Young Modülü (<i>GPa</i>)	Poisson Oranı	Akma Gerilmesi (<i>MPa</i>)	Sertleşme Katsayısı n_0
Al	67	0.33	24	2
SiC	302	0.17		

Şekil 5.1. Vurucu hızının zamana göre değişimi. ($n=1.0$)

sonrası maksimum temas kuvveti değerleri elastik analizlere kıyasla daha düşük seviyede gözlenmiştir, bunun sebebi elasto-plastik analizlerde vurma enerjisinin bir kısmının plastik deformasyon olarak plaka tarafından absorbe edilmesidir. Şekil 5.2 vurucu hızı $v=0.5$, 1 ve 2 m/s ve malzeme kompozisyonu $n=1.0$ için fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalarda, temas kuvvetinin zamana göre değişimini göstermektedir.

Şekil 5.3'de farklı vurucu hızlarında ($v=0.5$, 1, ve 2 m/s) fonksiyonel kademelendirilmiş plaka kalınlığı boyunca değişik malzeme kompozisyonlarının temas kuvvetine etkisi görülmektedir. Malzeme kompozisyonu metal yoğun ($n=0.1$) bir yapıdan seramik yoğun ($n=10.0$) bir yapıya doğru gittikçe temas kuvvetinin arttığı, buna karşın plaka ve vurucu arasındaki temas süresinin ise azaldığı

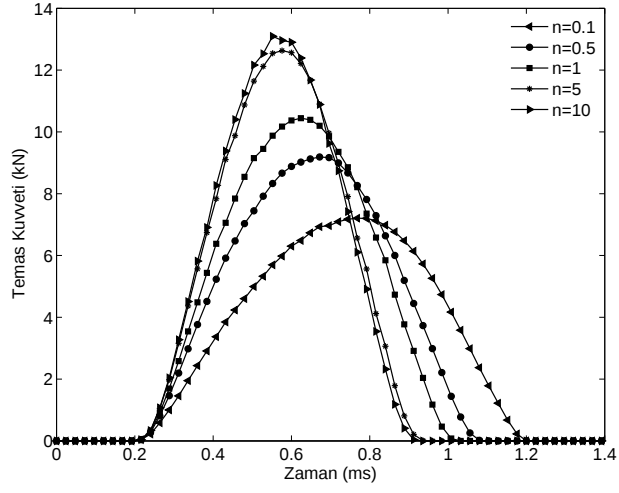
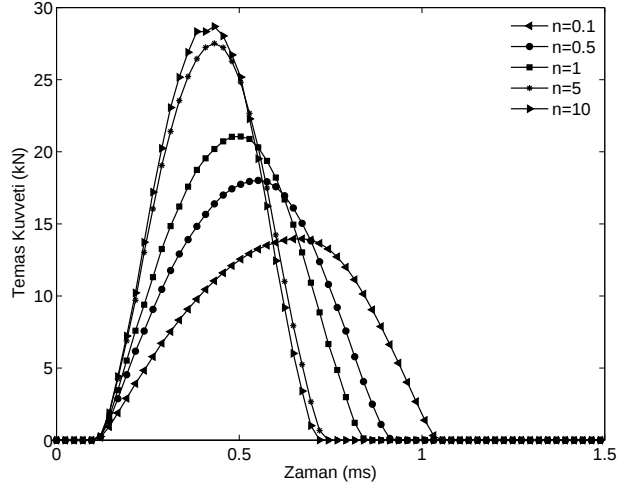
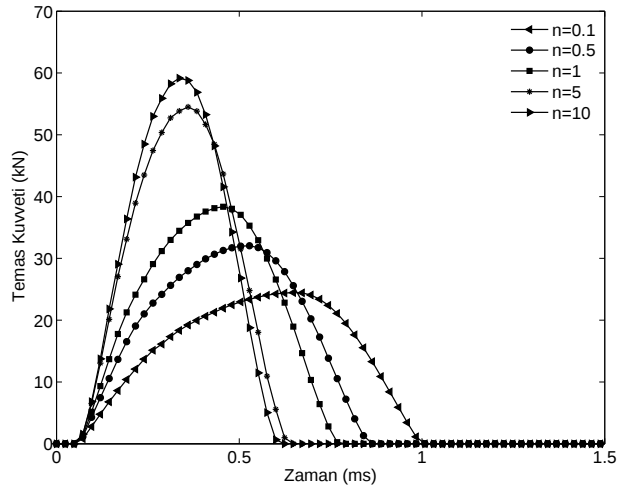


Şekil 5.2. Vurucu hızının temas kuvvetine etkisi. ($n=1.0$)

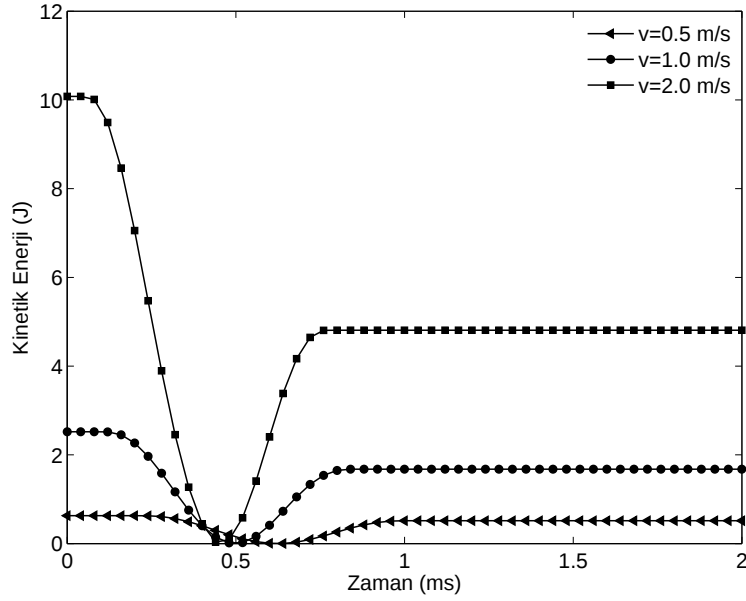
görülmektedir. Bunun nedeni artan kompozisyonel gradyant ile plaka rijitliğinin artmasıdır.

Şekil 5.4'de üç farklı vurucu hızı için ($v=0.5, 1$ ve 2 m/s) malzeme kompozisyonu $n=1$ (lineer durum) iken kinetik enerji değişimi görülmektedir, Elastik analizlere kıyasla elasto-plastik analizlerde çarpma sonrası kinetik enerji değerleri başlangıç seviyesinin altında gözlenmiştir. Başlangıç ile çarpma sonrası arasındaki sözkonusu enerji farkı fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın plastik deformasyonuna harcanmıştır.

Şekil 5.5-7'de vurucu enerjisinin sıfır olduğu (maksimum temas kuvveti değerinde) ve çarpma sonrası plakada oluşan von Mises şekil değiştirme değerleri aynı kontur aralıklarında gösterilmektedir. Malzeme kompozisyonu metal yoğun ($n=0.1$) yapıdan seramik yoğun yapıya ($n=10$) doğru gittikçe fonksiyonel kademelendirilmiş plakalardaki maksimum ve kalıcı von Mises şekil değişimi değerleri azalmaktadır. Buna karşın, vurucu hızı arttıkça von Mises şekil değiştirme değerlerinin ise arttığı görülmektedir. Her üç vurucu hızında da ($v=0.5, 1$ ve 2 m/s) artan malzeme kompozisyonu ile maksimum temas kuvveti değerlerinin artmasına rağmen plakadaki von Mises şekil değiştirme değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni ise artan malzeme kompozisyonu ile plakanın seramik yoğun bir yapıya kavuşması ve

a) $v=0.5$ m/sb) $v=1$ m/sc) $v=2$ m/s

Şekil 5.3. Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka kalınlığı boyunca malzeme kompozisyonunun ve vurucu hızının temas kuvveti değişimine etkisi.



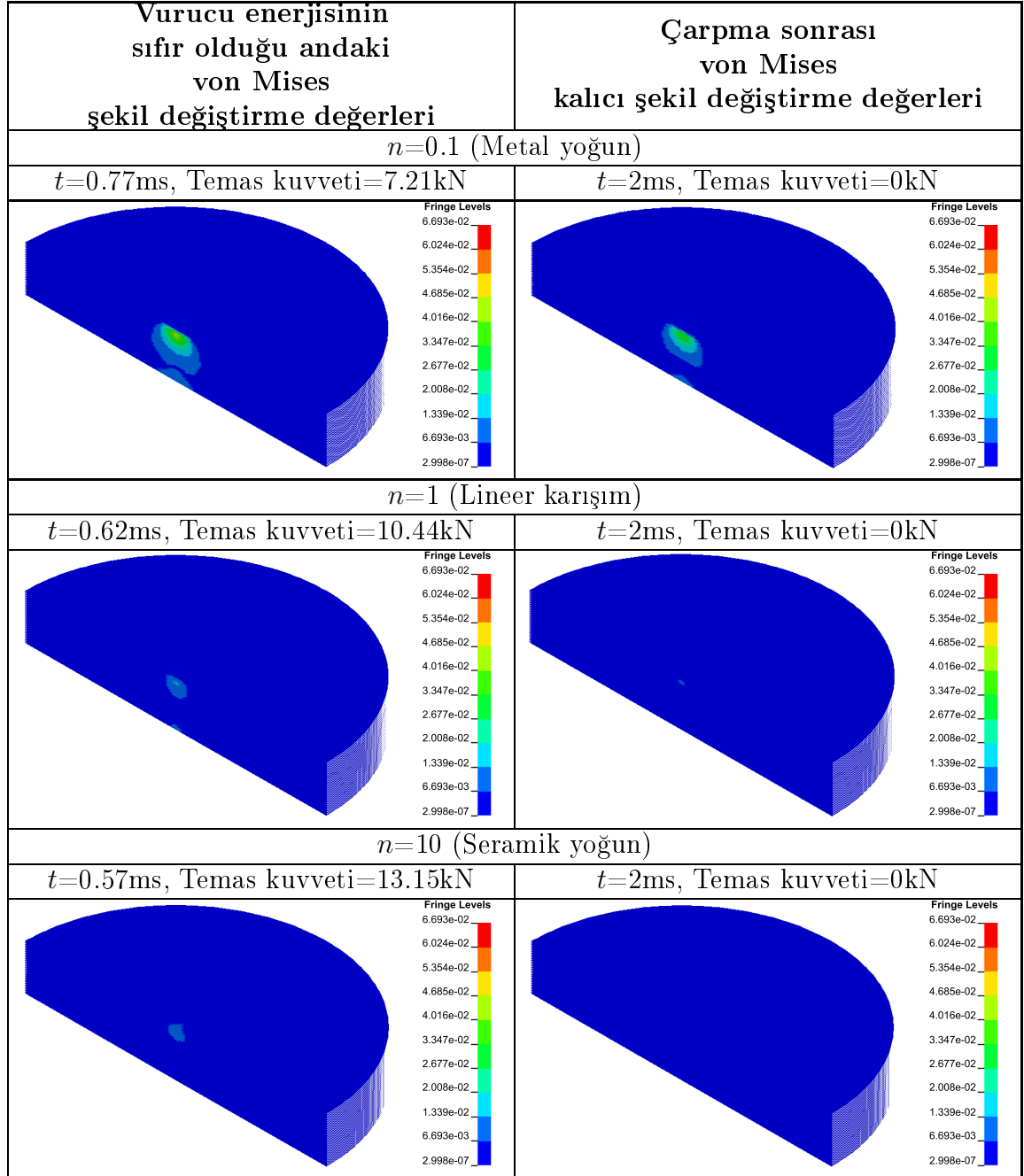
Şekil 5.4. Kinetik enerji değişimi. ($n=1.0$)

TTO malzeme modelini bu yapılar da daha elastik bir çözüm sunmasıdır.

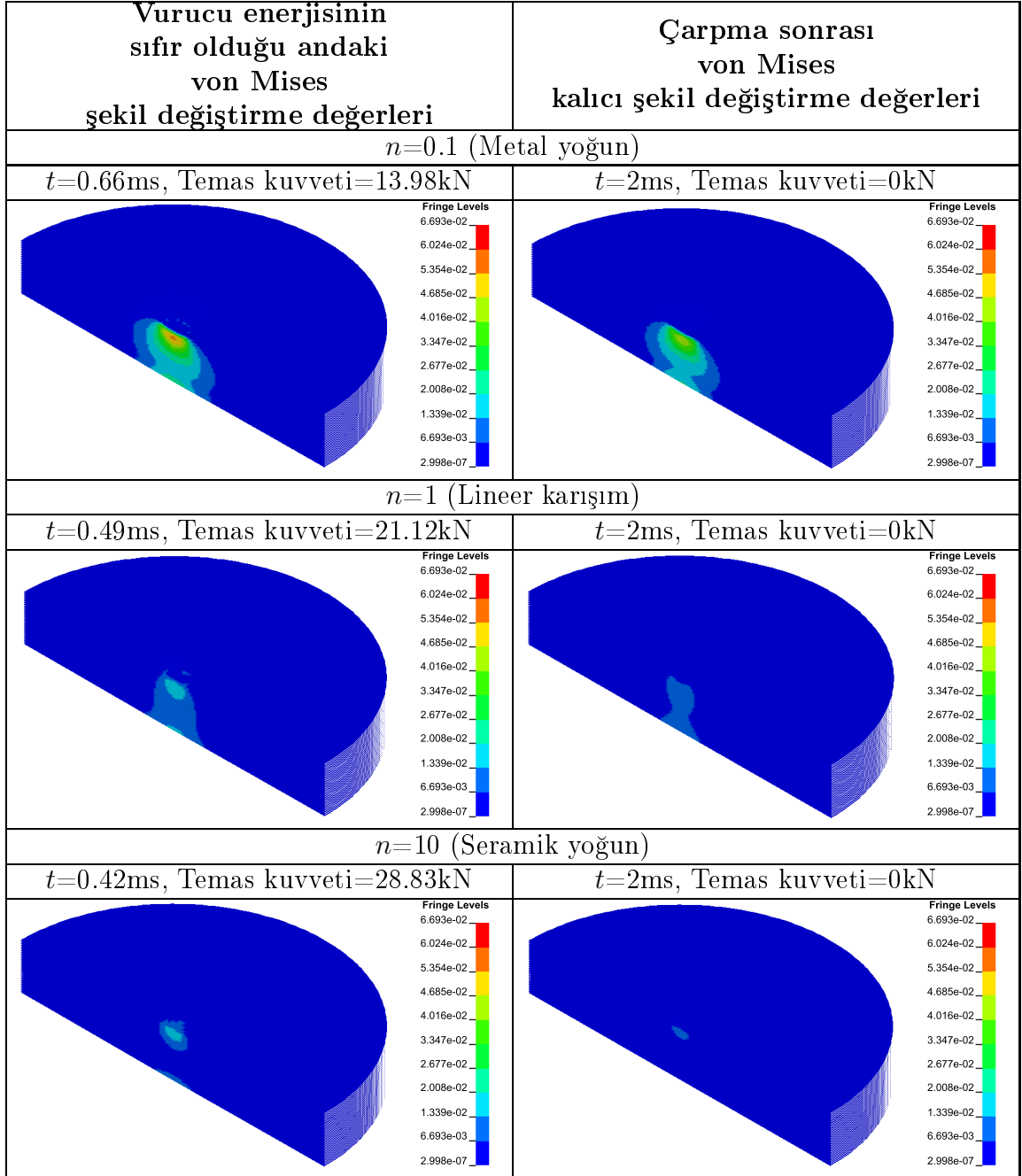
Vurucu hızı $v=0.5$ m/s iken metal yoğun ($n=0.1$) malzeme kompozisyonuna sahip plakada oluşan maksimum von Mises şekil değişiminin %79'luk kısmı çarpma sonrası plaka üzerinde kalmaktadır, lineer ($n=1$) malzeme kompozisyonu için bu değer %51 ve seramik yoğun ($n=10$) malzeme kompozisyonu için de %47 olarak bulunmuştur (Şekil 5.8). Vurucu hızının $v=1$ m/s olduğu durumda, metal yoğun ($n=0.1$) malzeme kompozisyonuna sahip plakada oluşan maksimum von Mises şekil değişiminin %82'lik kısmı çarpma sonrası plaka üzerinde kalırken, lineer ($n=1$) malzeme kompozisyonu için bu değer %58 ve seramik yoğun ($n=10$) malzeme kompozisyonu için ise %48'dir (Şekil 5.9). Son olarak vurucu hızı $v=2$ m/s iken metal yoğun ($n=0.1$) malzeme kompozisyonuna sahip plakada oluşan maksimum von Mises şekil değişiminin %83'lük kısmı çarpma sonrası plaka üzerinde kaldığı görülmüştür, lineer ($n=1$) malzeme kompozisyonu için bu değer %77 ve seramik yoğun ($n=10$) malzeme kompozisyonu için de %49 olarak bulunmuştur (Şekil 5.10). Buna göre plakanın rijitliği arttıkça plaka üzerindeki plastik deformasyonun TTO malzeme modeli gereğince azaldığı söylenebilir.

Şekil 5.11'de $n=0.1$ (metal yoğun), $n=1$ (lineer karışım) ve $n=10$ (seramik yoğun) malzeme kompozisyonlarına sahip plakalar için üç farklı vurucu hızında ($v=0.5$, 1 ve 2 m/s) kuvvet-yer değiştirme ilişkileri görülmektedir. Burada malzeme

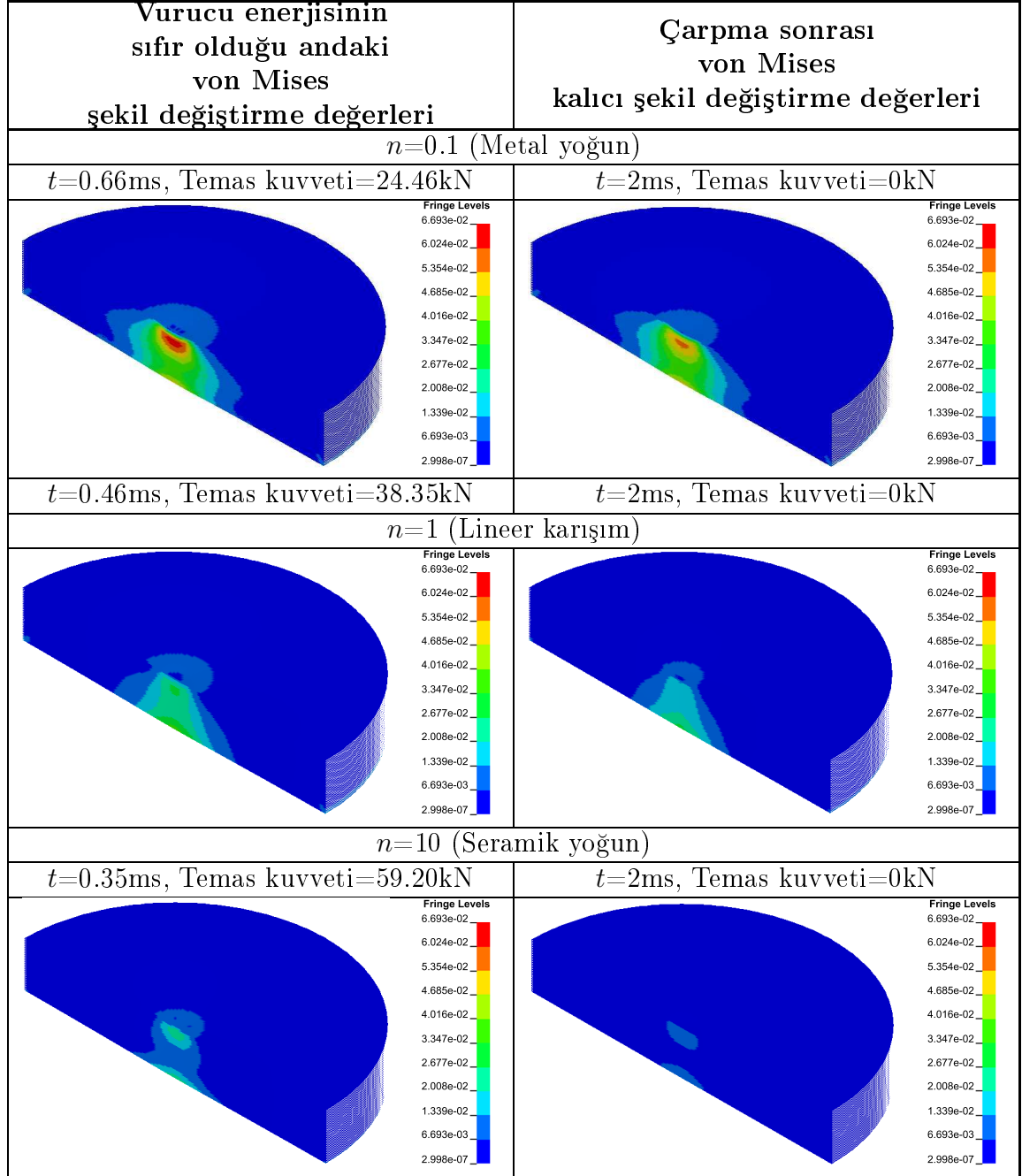
kompozisyonun seramik zengin durumdan metal zengin duruma değişmesiyle fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın rijitliği azalmakta bu durum plakada oluşan kalıcı deformasyon değerinin artmasıyla sonuçlanmaktadır. Artan vurucu hızı ile de hem kuvvet değerleri hemde kalıcı deformasyon miktarlarının arttığı gözlenmiştir.



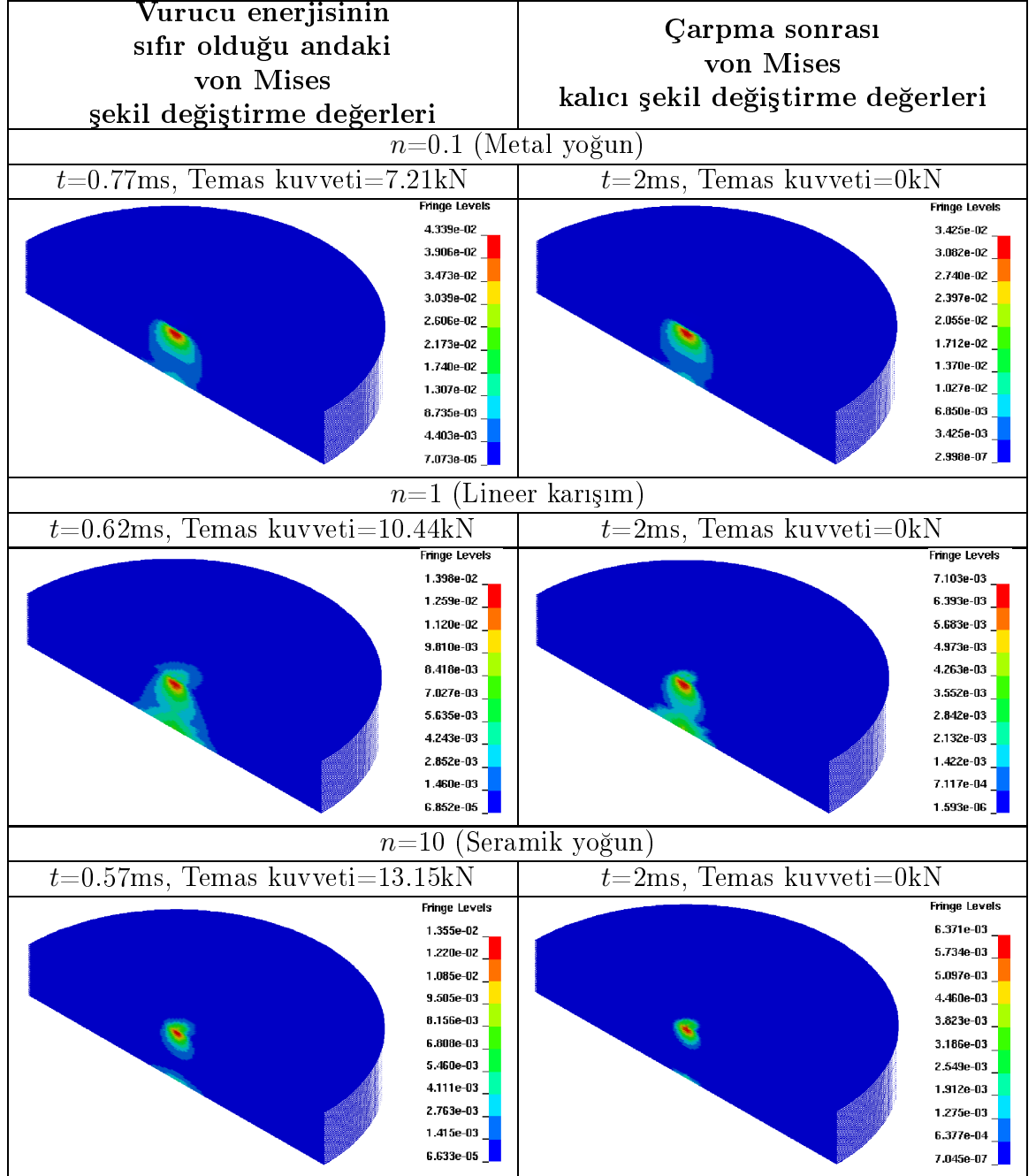
Şekil 5.5. Vurucu hızı $v=0.5 \text{ m/s}$ iken fonksiyonel kademelendirilmiş plakada oluşan maksimum ve kalıcı von Mises şekil değişimleri



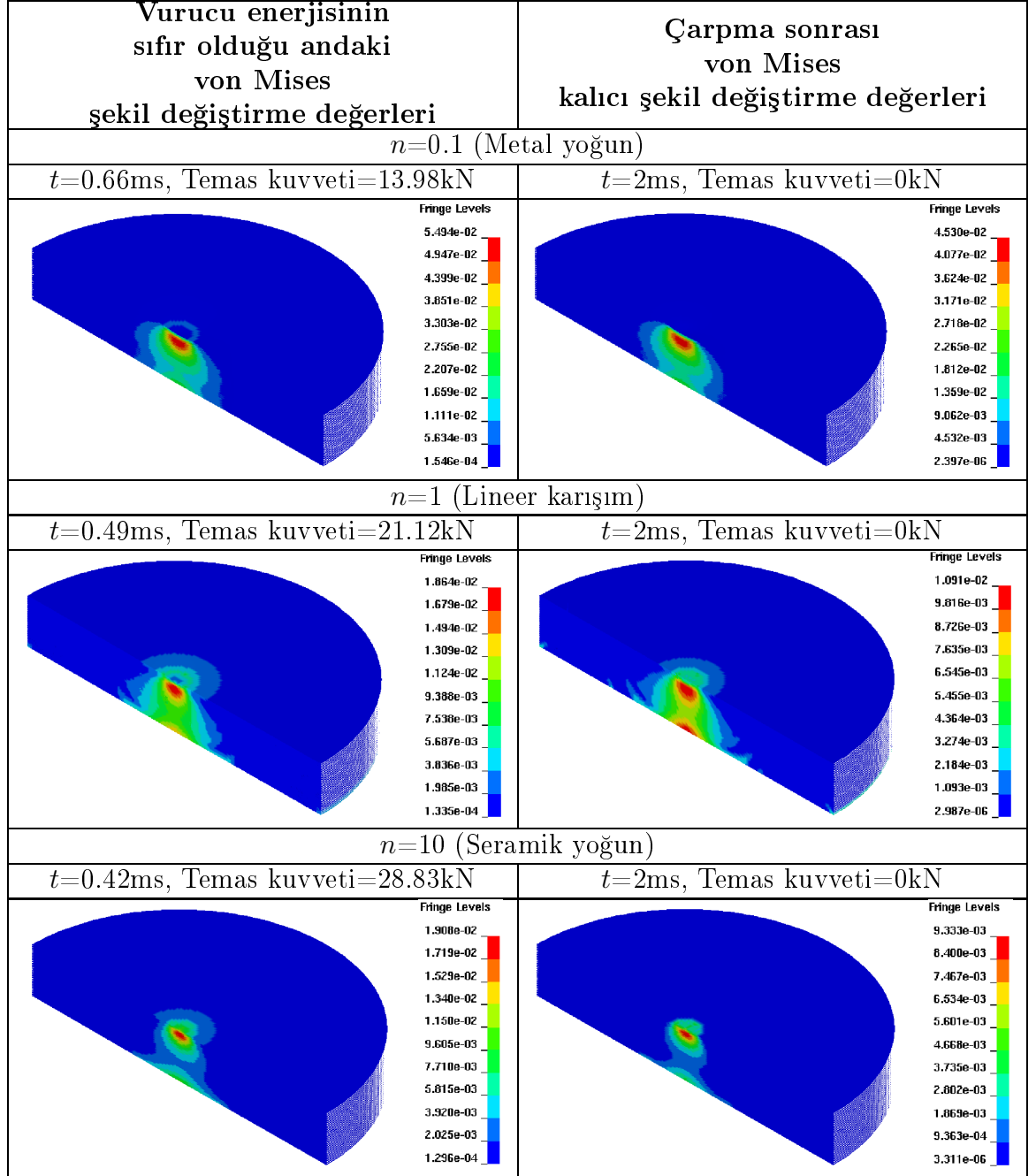
Şekil 5.6. Vurucu hızı $v=1 \text{ m/s}$ iken fonksiyonel kademelendirilmiş plakada oluşan maksimum ve kalıcı von Mises şekil değişimleri



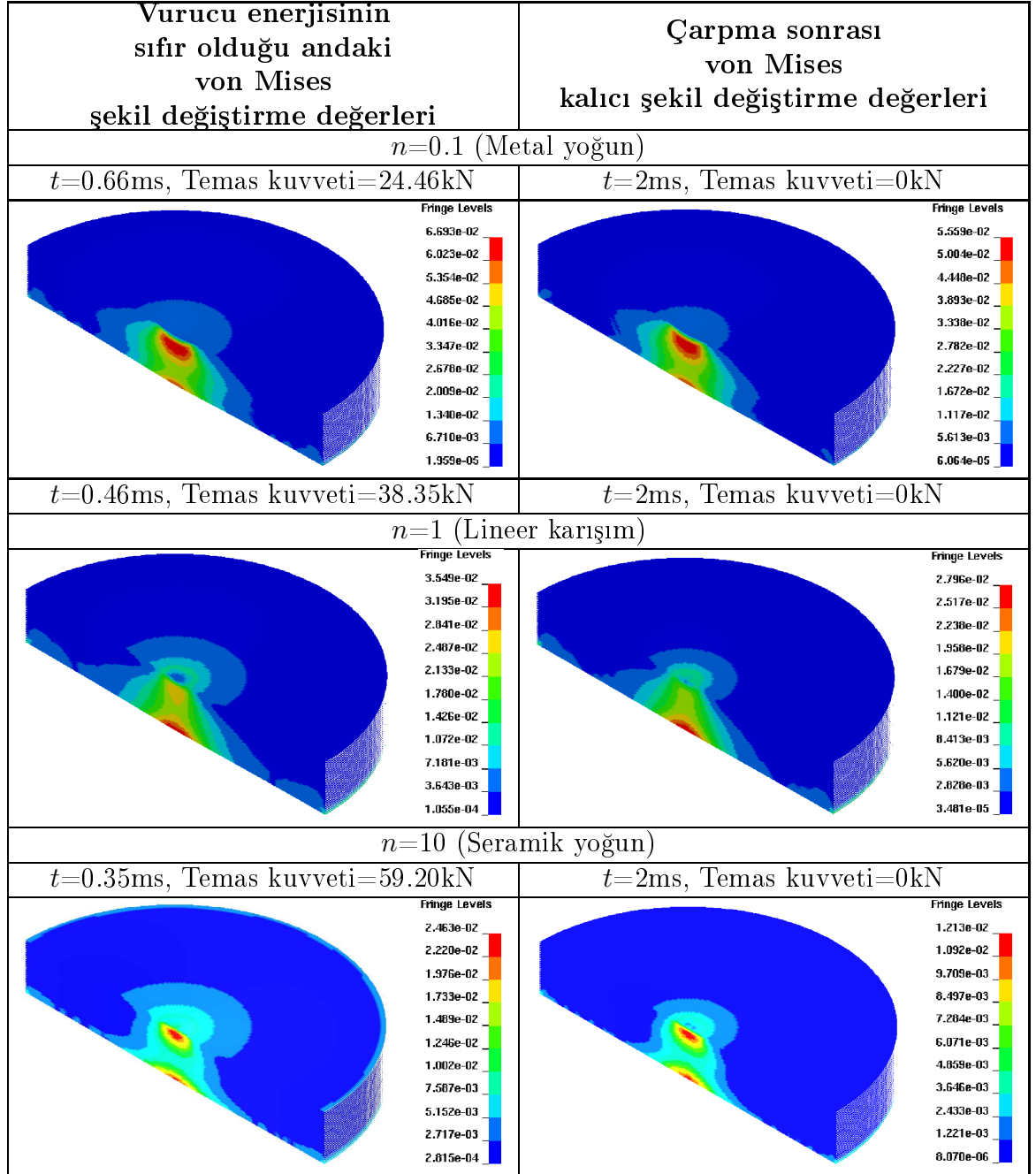
Şekil 5.7. Vurucu hızı $v=2 \text{ m/s}$ iken fonksiyonel kademelendirilmiş plakada oluşan maksimum ve kalıcı von Mises şekil değişimleri



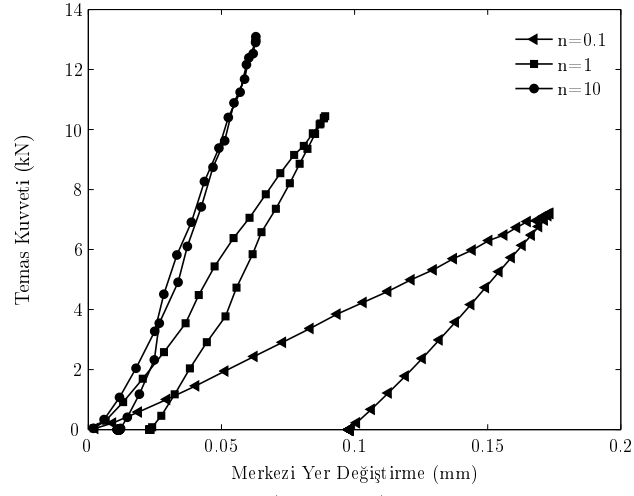
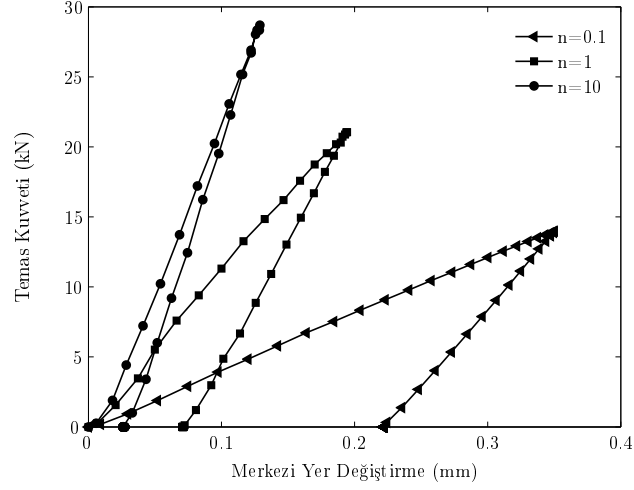
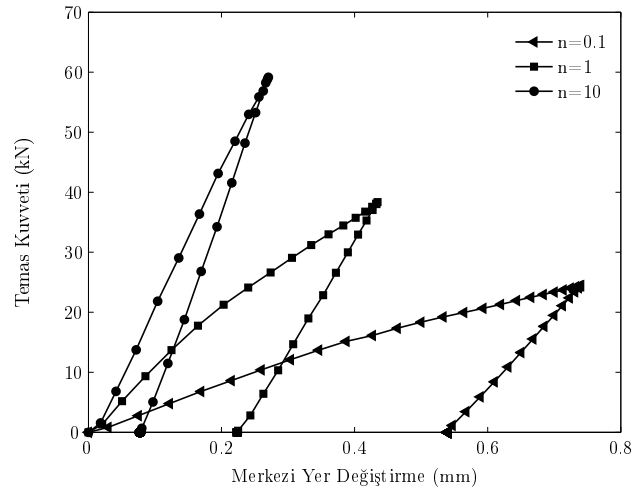
Şekil 5.8. Vurucu hızı $v=0.5 \text{ m/s}$ iken fonksiyonel kademelendirilmiş plakada oluşan maksimum ve kalıcı von Mises şekil değişimleri



Şekil 5.9. Vurucu hızı $v=1 \text{ m/s}$ iken fonksiyonel kademelendirilmiş plakada oluşan maksimum ve kalıcı von Mises şekil değişimleri



Şekil 5.10. Vurucu hızı $v=2\text{ m/s}$ iken fonksiyonel kademelendirilmiş plakada oluşan maksimum ve kalıcı von Mises şekil değişimleri

a) $v=0.5$ m/sb) $v=1$ m/sc) $v=2$ m/s

Şekil 5.11. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda vurucu hızının ve malzeme kompozisyonunun kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi üzerine etkisi.

6. BÖLÜM

FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ DAİRESEL PLAKALARIN DÜŞÜK HIZLI ÇARPMA DAVRANIŞLARININ DENEYSEL İNCELENMESİ

6.1. Giriş

Bu bölümde fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların düşük hızlı darbe davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Deney test numunelerinin üretim aşamaları ayrıntılı bir şekilde anlatıldıktan sonra beş farklı malzeme kompozisyonunda üretilen fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların düşük hızlı darbe testleri yapılmış sonuçlar elasto-plastik analizler ile mukayese edilmiştir.

6.2. Düşük hızlı çarpma test cihazı

Bu tezde yapılan deneysel çalışmalar Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Mekanik Laboratuvarında bulunan, TÜBİTAK desteğiyle 107M142 numaralı “Statik ve Düşük Hızlı Çarpma Yükleri Altında Fonksiyonel Kademelendirilmiş Plakaların ve Silindirik Kabukların Lineer Olmayan Termo-Mekanik Analizleri” isimli araştırma projesiyle alınan CEAST marka darbe test cihazıyla yapılmıştır (Şekil 6.1). Tablo 6.1’de CEAST marka Fractovis Plus model düşük hızlı darbe test cihazının teknik özellikleri verilmektedir.

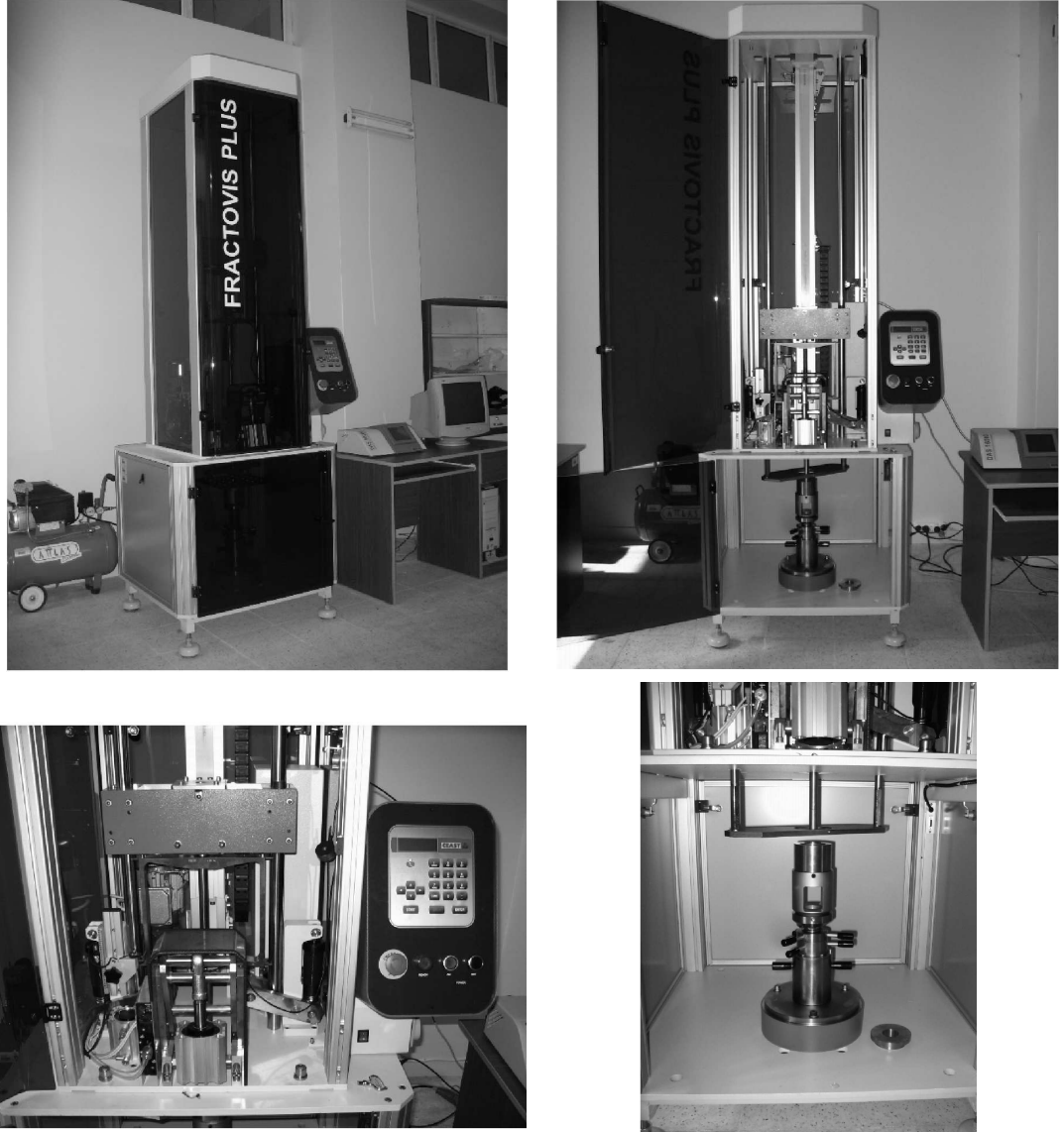
6.3. Düşük hızlı darbe test sonuçları

Başlangıçta $Ni - Al_2O_3$ karışımından üretilmesi düşünülen fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda, Nikelin yüksek sinterleme sıcaklığı nedeniyle ($1300^{\circ}C$) ve de elimizdeki mevcut sıcak presleme ünitesinin kapasitesinin ($800^{\circ}C$) bu sıcaklıklara erişememesi sebebiyle metalik faz olarak Alüminyum kullanıldı.

Tablo 6.1. CEAST Fractovis Plus Teknik Özellikler

Serbest düşme aralığı	30-1100mm
Çarpma hızı	0.75-4.6 m/s (ilave enerji sistemi ile 24 m/s)
Maksimum ağırlık	70kg
Maksimum potansiyes enerji	755J (ilave enerji sistemi ile 1800J)
Vurucu çapı	20mm (max=52mm)
Numune çapı	40mm
Çarpma kuvveti aralığı	0-40kN
Data okuma	1000 $data/ms$ (2 MHZ)

$Al - Al_2O_3$ fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların üretiminde ise özellikle seramik fazın hacimsel oranının yüksek olduğu tabakaların birbirine bağlanamadığı



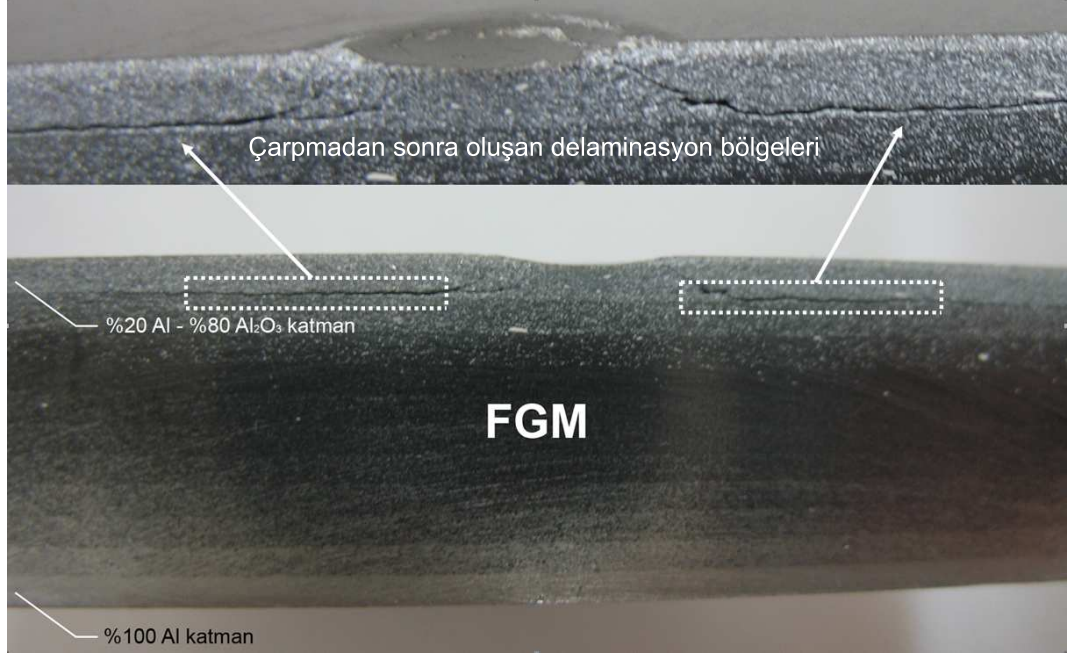
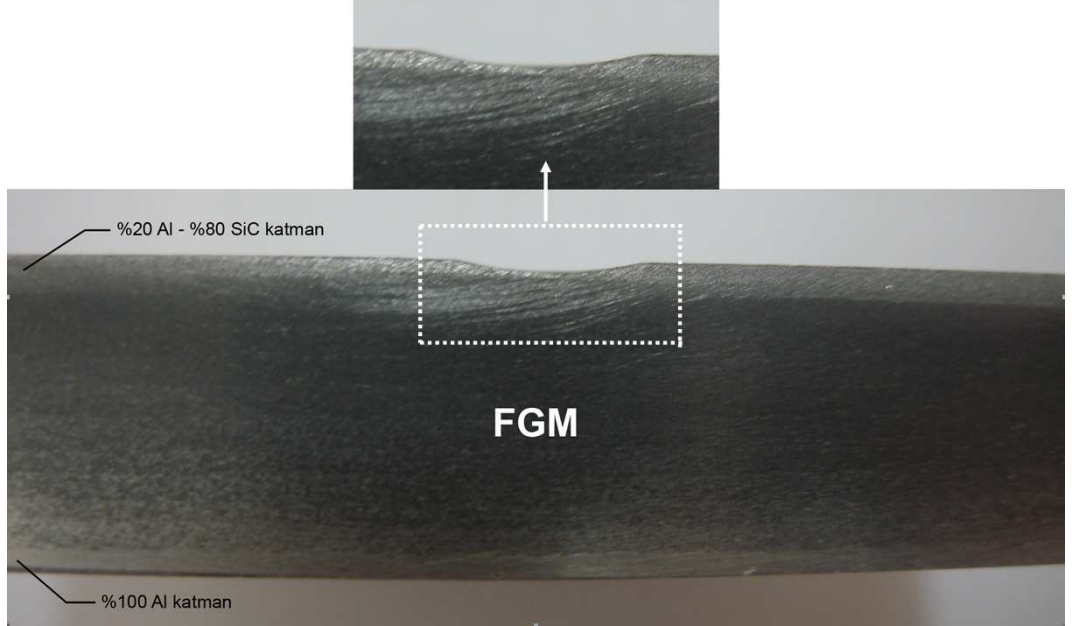
Şekil 6.1. CEAST marka çarpma test cihazı.

ve arayüzeyden ayrıldığı gözlemlendi. Yapılan literatür araştırmalarında bizim kullandığımız katmanlama yöntemiyle fonksiyonel kademelendirilmiş plaka üretimlerinde %100 seramik katmana kadar üretimin yapılamadığı, seramik zengin tabakada seramiğin hacimsel oranının %60 – 70 lerde olduğu tespit edildi [55]. Bu nedenle yaptığımız çalışmalarda toplam 10 katmandan oluşan ve seramik zengin yüzeyde seramiğin hacimsel oranının %80 olduğu katmana kadar başarılı üretim yapılabilmektedir. Deneme üretimlerinde seramik faz olarak hem Al_2O_3 hem de SiC kullanıldı. Bunlardan SiC ile yapılan plakaların daha başarılı olduğu belirlendi. Aynı şartlarda üretilen Al- Al_2O_3 ve Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş plakalara 4m/s hızla yapılan çarpma deneyleri neticesinde $Al - Al_2O_3$ numunenin çarpma yüzeyinin katmanları arasında ayrılma gözlenirken Al-SiC numunenin son derece başarılı olduğu gözlemlendi (Şekil 6.2). Yapılan bu ayrıntılı çalışmalar neticesinde deneylerde kullanılacak olan fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların metal faz olarak Alüminyum (Al), seramik faz olarak ise Silisyum Karbür (SiC) den üretilmesine karar verildi.

Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka üretiminde metal faz olarak 10 mikron Alüminyum (Al), seramik faz olarak ise 50 mikron Silisyum Karbür (SiC) tozları kullanılmıdır. Herbir katmanda belirli hacimsel oranlarda birleştirilen tozların homojen olarak karışabilmeleri için Şekil 6.3’de gösterilen karıştırma ünitesi imal edildi. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar üretilmeden önce metal-seramik tozları burada yaklaşık 5 saat süreyle karıştırıldı.

Numuneler 50 mm çapındaki kalıp içerisinde düşük basınç altında soğuk presleme ile belirli hacimsel oranlardaki toz karışımlarından katman katman hazırlandı. Ardından kalıp içerisinde katmanlanmış malzeme fırın içerisine yerleştirilerek 650°C sıcaklığa çıkarıldı (Şekil 6.4), bu sıcaklıkta 1 saat düşük basınç altında (100MPa) preslendi. Kalıp içinde kontrollü olarak basınç altında soğutulan numune, kalıplar (Şekil 6.5) birbirinden ayrılarak çıkarıldı. Ayrıca, numunelerin kalıplara yapışmaması için kalıp yan duvarı ile numune arasına ince bir alüminyum film tabaka yerleştirildi.

Çarpma deneyleri üç farklı hızda ($v=1, 1.5, \text{ ve } 2 \text{ m/s}$) ve 5 farklı malzeme

a) $Al - Al_2O_3$ b) $Al - SiC$

Şekil 6.2. 4m/s hız ile yapılan çarpma deneyi neticesinde fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalarda oluşan deformasyonun kesitten görünümü.

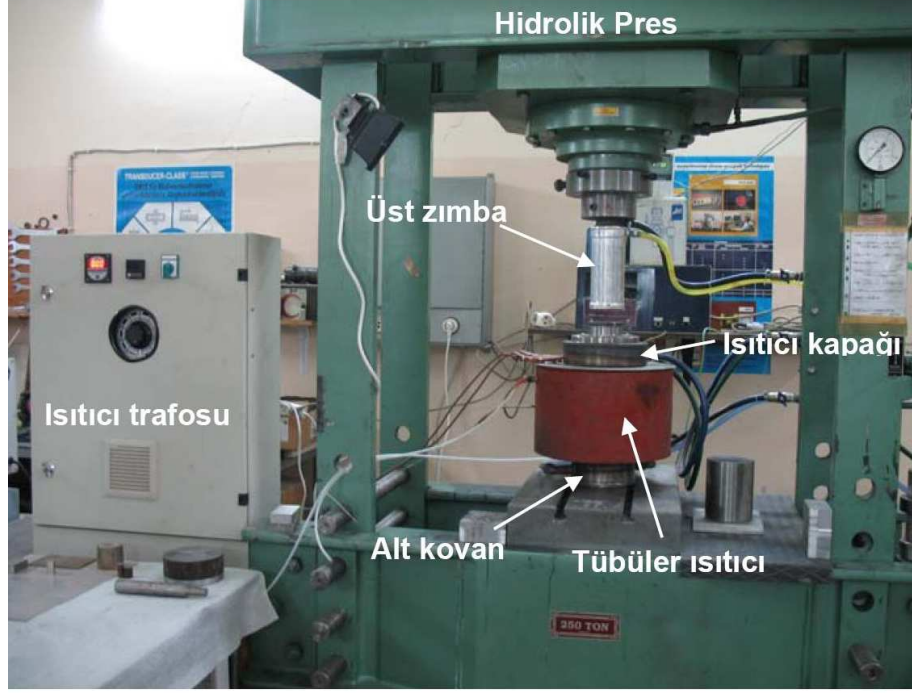
kompozisyonu ($n=0.1, 0.5, 1.0, 5.0$ ve 10.0) için yapıldı. Bu nedenle 50mm çapında ve 6mm kalınlığında toplam 15 adet numune üretildi (Şekil 6.6).

Üretimi yapılan numunelere CEAST marka çarpma cihazı ile 5.045 kg kütleyle sahip vurucu ile $v=1$ m/s, 1.5 m/s ve 2 m/s hızlarda çarpma deneyleri yapıldı (Şekil 6.7). Deneysel veriler grafik ortama aktarıldı. Şekil 6.8'de metal zengin malzeme kompozisyonuna ($n=0.1$) sahip Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakada vurucu hızının temas kuvvetine etkisi görülmektedir. Vurucu hızı arttıkça temas kuvvetinin arttığı ve buna bağlı olarak fonksiyonel kademelendirilmiş plakada oluşan vurucu izinin büyüdüğü görülmektedir.

Şekil 6.9'de farklı vurucu hızlarında ($v=0.5$ m/s, 1 m/s, ve 2 m/s) fonksiyonel kademelendirilmiş plaka kalınlığı boyunca kompozisyonel gradyanın ($n=0.1, 0.5, 1.0, 5.0$ ve 10.0) temas kuvvetine etkisi görülmektedir. Tüm hızlarda malzeme kompozisyonu metal yoğun ($n=0.1$) bir yapıdan lineer ($n=1.0$) bir yapıya doğru gittikçe temas kuvvetinin arttığı, buna karşın lineer ($n=1.0$) bir yapıdan seramik yoğun ($n=10.0$) bir yapıya doğru değişen malzeme kompozisyonlarında ise meydana gelen hasar nedeniyle temas kuvvetlerinin azaldığı görülmektedir. Kompozisyonel gradyan değeri arttıkça ($n>1.0$) daha kırılgan bir yapıya kavuşan plakaların çarpma yükleri altında hasara uğradıkları görülmüştür. Hasarın oluşmadığı plakalarda, artan kompozisyonel gradyan değeri ile daha rijit yapıya kavuşan plakalar ve vurucu arasındaki temas süresinin ise azaldığı da görülmektedir.



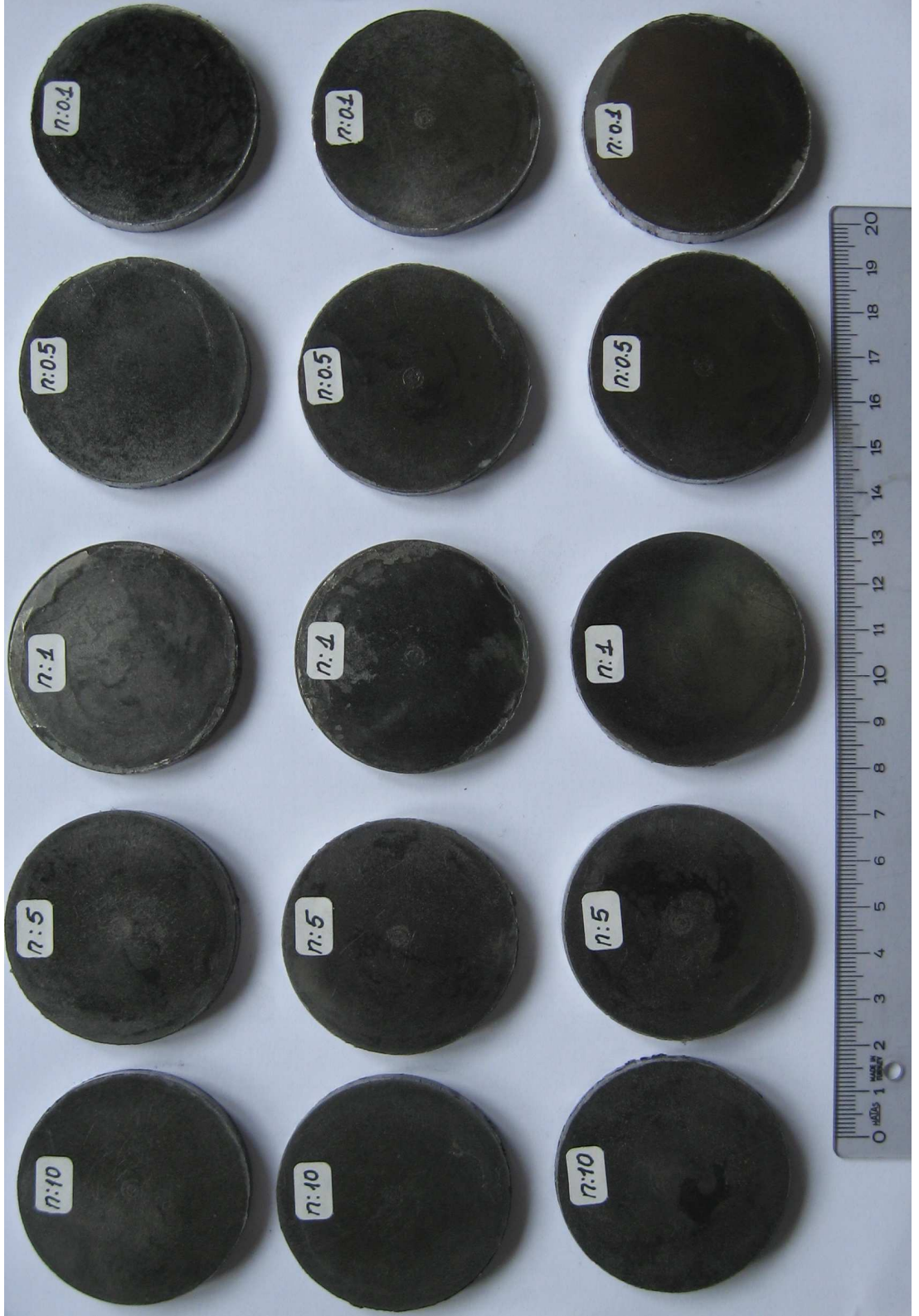
Şekil 6.3. Toz karıştırma ünitesi



Şekil 6.4. Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka üretimi için kullanılan sıcak pres ünitesi



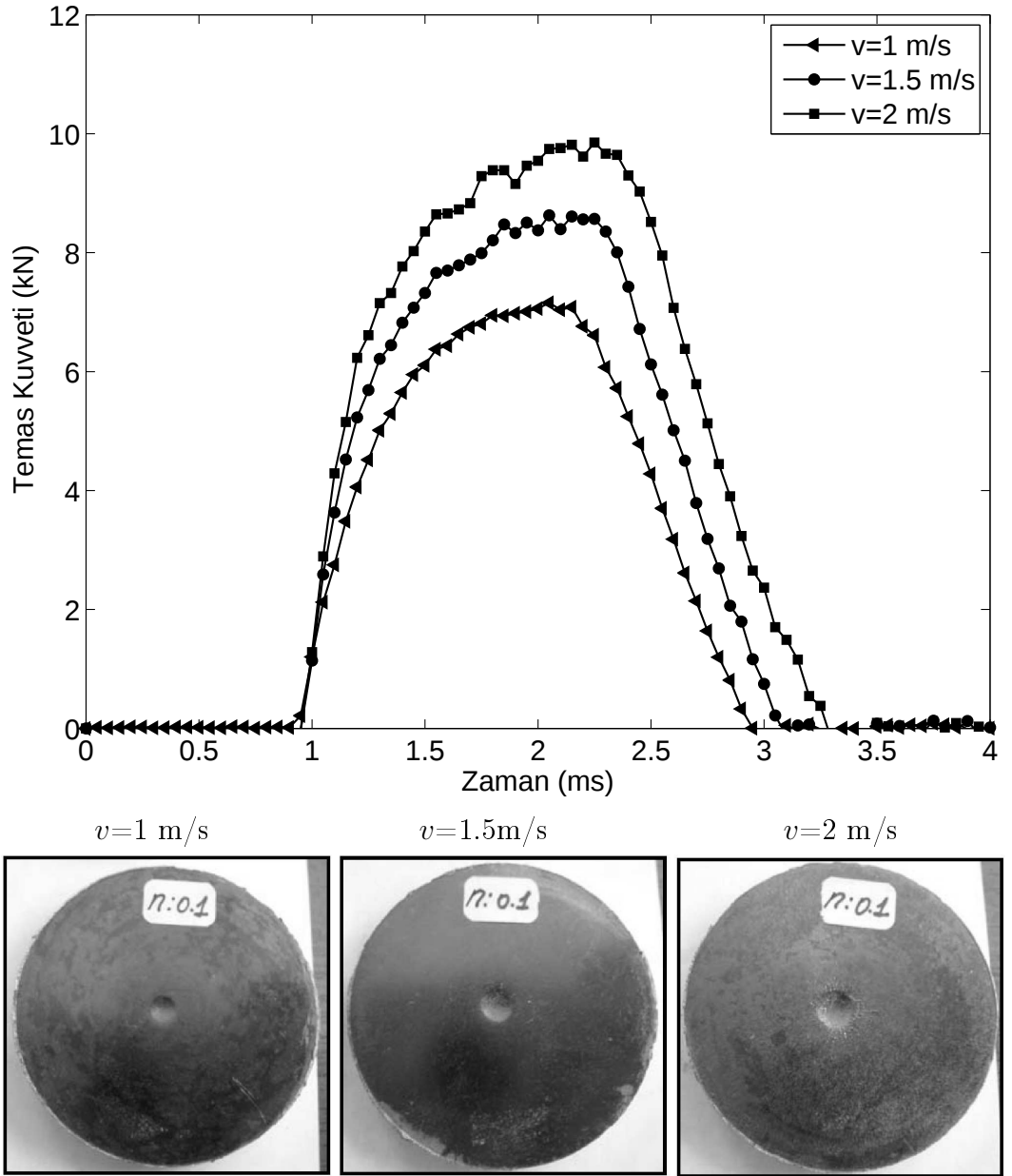
Şekil 6.5. Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka üretimi için sıcak iş çeliğinden AISI2344 imal edilmiş kalıplar



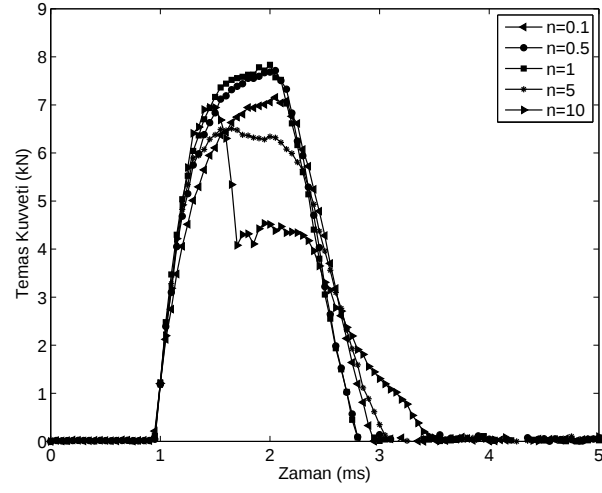
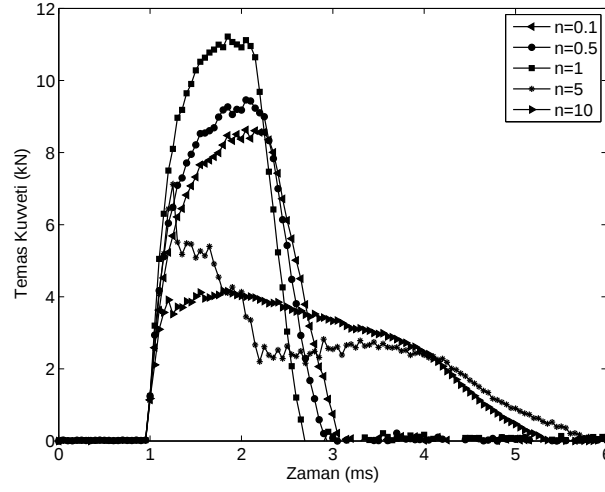
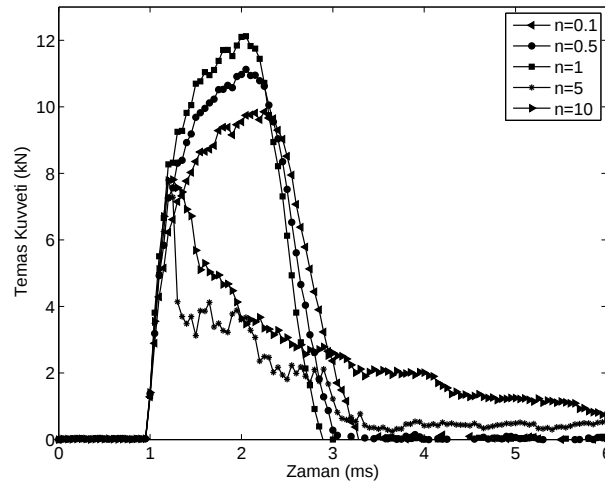
Şekil 6.6. Farklı malzeme kompozisyonlarında ($n=0.1, 0.5, 1.0, 5.0$ ve 10.0) üretilmiş Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalar.



Şekil 6.7. Çarpma deneylerinden sonra Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalar.



Şekil 6.8. Vurucu hızının temas kuvvetine etkisi ($n=0.1$).

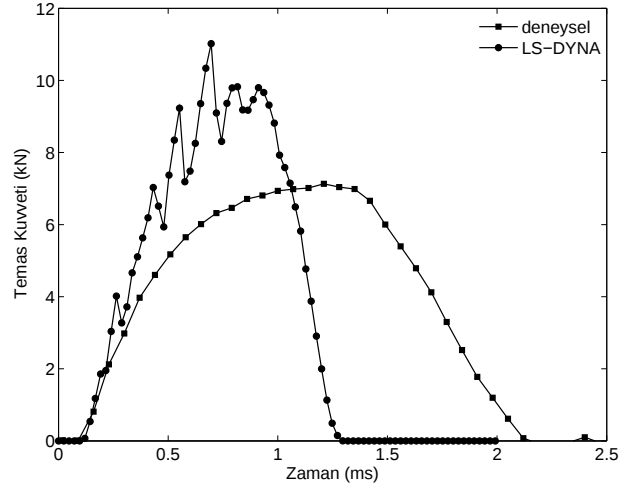
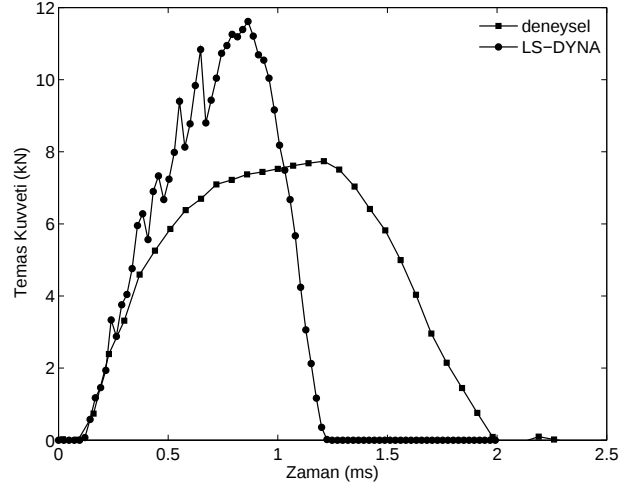
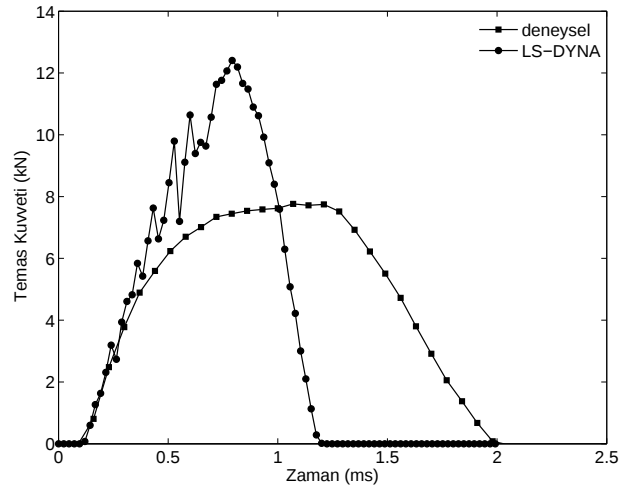
a) $v=1$ m/sb) $v=1.5$ m/sc) $v=2$ m/s

Şekil 6.9. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların kalınlıkları boyunca malzeme kompozisyonunun ve vurucu hızının temas kuvveti değişimine etkisi (vurucu kütlesi=5.045kg)

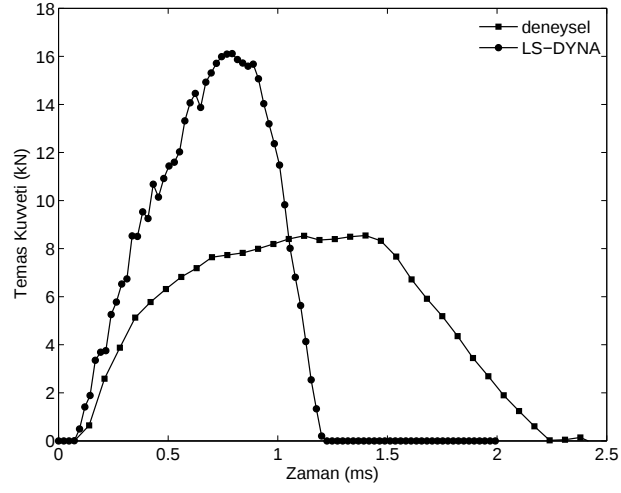
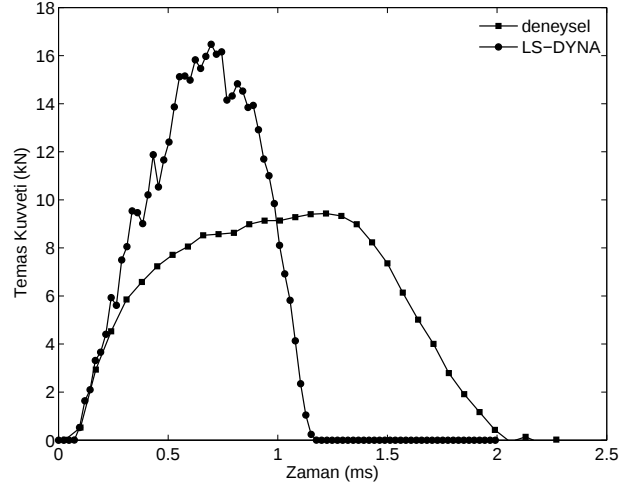
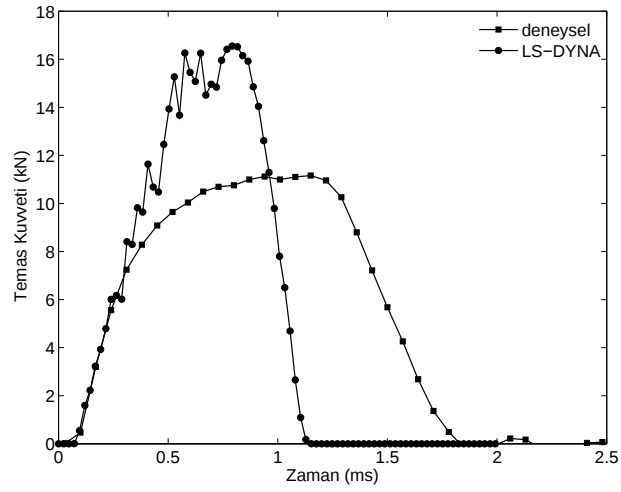
6.4. Sayısal ve Deneysel Analiz Sonuçlarının Mukayesesi

Şekil 6.10-12'de hasarın oluşmadığı malzeme kompozisyonları için ($n=0.1, 0.5$ ve 1) üç farklı vurucu hızında ($v=1, 1.5$ ve 2 m/s) gerçekleştirilen deneysel çarpma testleri ile aynı şartlardaki sayısal analizlerden elde edilmiş temas kuvvetinin zamana göre değişimleri görülmektedir. Sayısal analizlerde alt yüzeyi %100 Al üst yüzeyi ise %20 Al-%80 SiC olacak şekilde toplam 10 katman olarak modellenen Al-SiC faksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka 6mm kalınlığa sahiptir ve vurucu ise çelik kabul edilmiştir. Deneysel çalışmalardaki sınır şartlarına uygun olarak sayısal analizlerde de 50 mm çapındaki dairesel plakanın kenarından 5 mm mesafeden alt ve üst yüzeyler her yönde sabitlenmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki, yapılan elasto-plastik analizlerde toplam çarpma süresi deneysel sonuçlara kıyasla daha kısa buna karşın temas kuvveti değerleri ise daha yüksektir. Söz konusu bu farkın temel nedeni sayısal analizler için metal fazın (Al) yüksek hızlardaki gerilme-şekil değiştirme eğrisi yerine çekme deneyinden elde edilmiş olan düşük hızlı gerilme-şekil değiştirme eğrisinin kullanılmış olmasıdır.

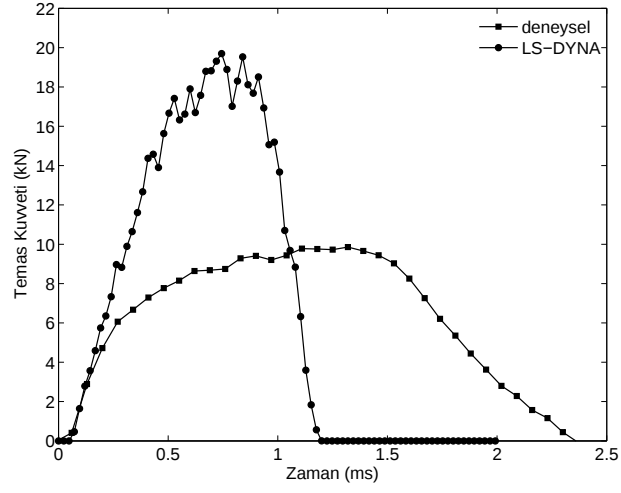
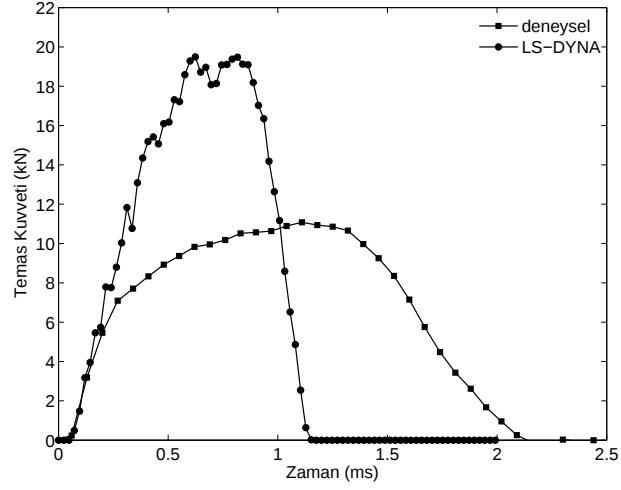
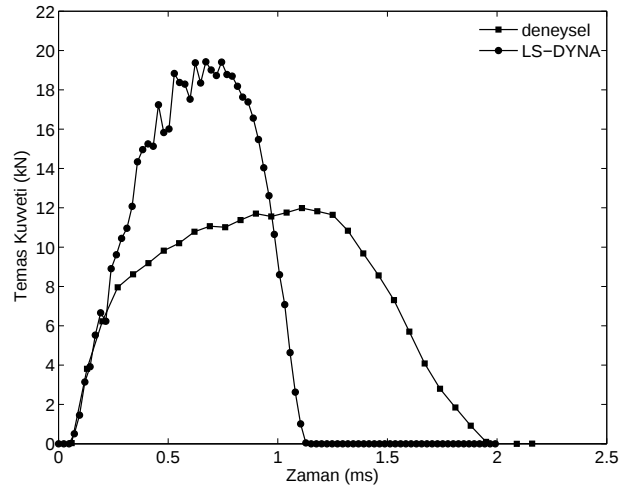
Şekil 6.13-15'de sayısal ve deneysel olarak elde edilmiş kuvvet-yerdeğiştirme ilişkileri ve kinetik enerjinin zamana göre değişimleri görülmektedir. Artan vurucu hızı ile temas kuvveti ve yer değiştirme değerleri artmaktadır. Tüm vurucu hızlarında ($v=1, 1.5$ ve 2 m/s) malzeme kompozisyonu değeri arttıkça merkezi yer değiştirme değeri azalırken temas kuvveti değerlerinin ise bir miktar arttığı görülmektedir. Sayısal ve deneysel olarak elde edilmiş temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri arasındaki farkın sebebi de yukarıda bahsedildiği gibi kullanılan gerilme-şekil değiştirme eğrisidir. Temas kuvveti-yer değiştirme grafikleri ile ilişkili kinetik enerji değişimleri incelendiğinde sayısal ve deneysel analizler sonucunda plaka tarafından absorbe edilen enerji miktarlarının oldukça yakın oldukları görülmektedir.

a) $n=0.1$ b) $n=0.5$ c) $n=1$

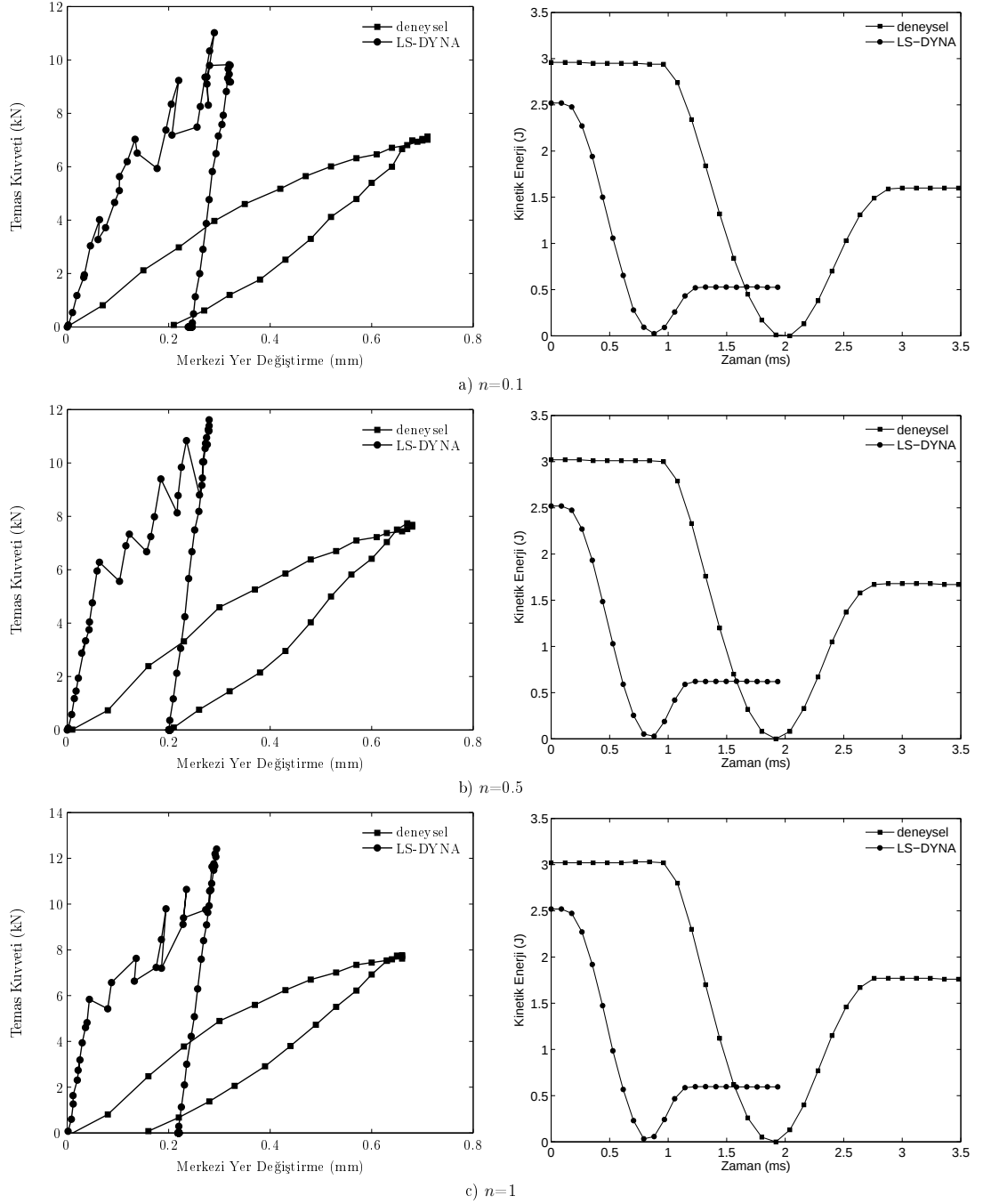
Şekil 6.10. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalarda sayısal ve deneysel temas kuvvetlerinin zamana göre değişimi. ($v=1 \text{ m/s}$)

a) $n=0.1$ b) $n=0.5$ c) $n=1$

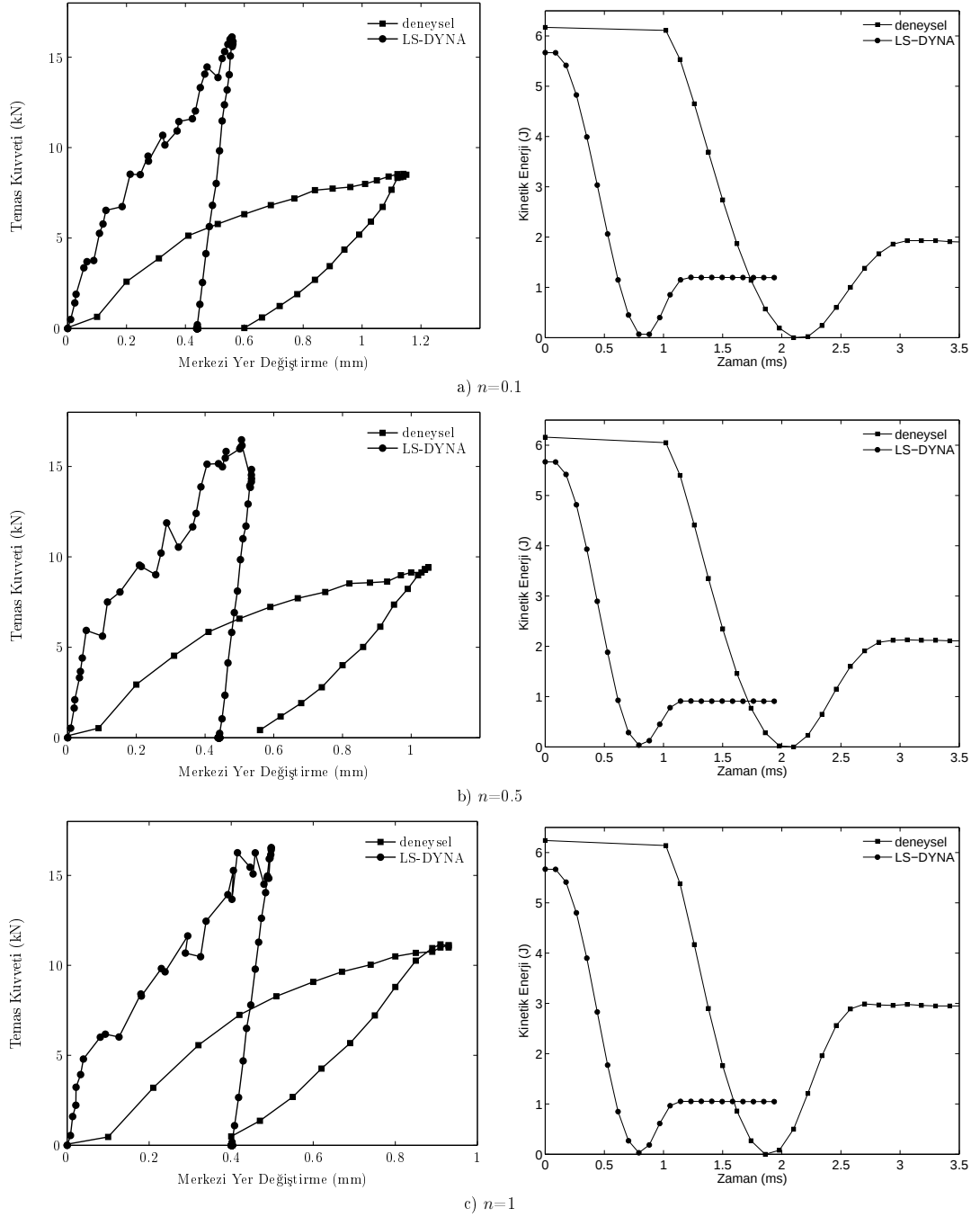
Şekil 6.11. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalarda sayısal ve deneysel temas kuvvetlerinin zamana göre değişimi. ($v=1.5 \text{ m/s}$)

a) $n=0.1$ b) $n=0.5$ c) $n=1$

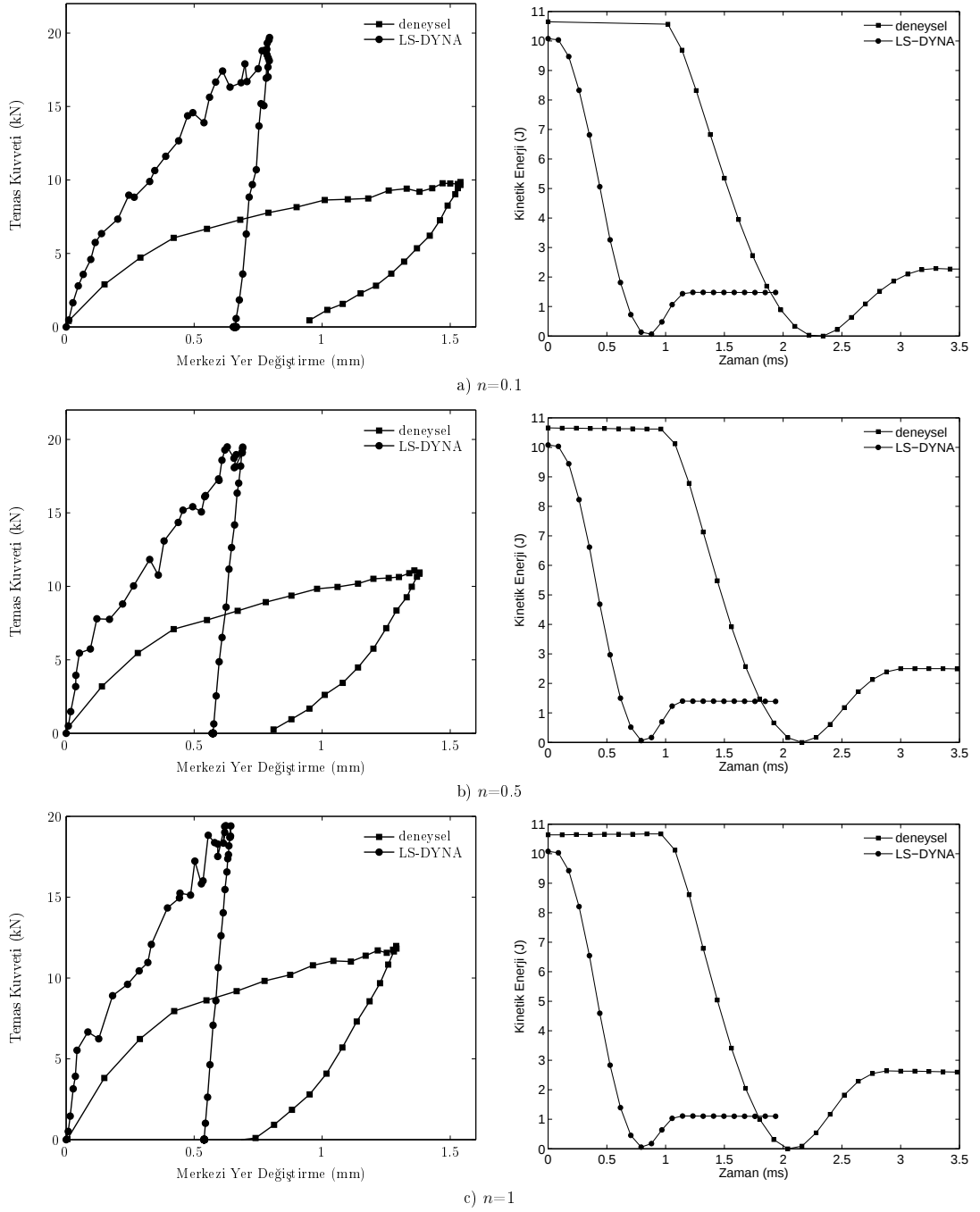
Şekil 6.12. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalarda sayısal ve deneysel temas kuvvetlerinin zamana göre değişimi. ($v=2 \text{ m/s}$)



Şekil 6.13. Kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi ve kinetik enerjinin zamana göre değişiminin sayısal ve deneysel mukayesesi ($v=1$ m/s)



Şekil 6.14. Kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi ve kinetik enerjinin zamana göre değişiminin sayısal ve deneysel mukayesesi ($v=1.5$ m/s)



Şekil 6.15. Kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi ve kinetik enerjinin zamana göre değişiminin sayısal ve deneysel mukayesesi ($v=2$ m/s)

7. BÖLÜM

SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

“Düşük Hızlı Çarpma Yükleri Altında Fonksiyonel Kademelendirilmiş Dairesel Plakaların Mekanik Davranışlarının İncelenmesi” isimli bu tez çalışmasında fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların sayısal olarak elastik ve elasto-plastik analizleri yapılmış ve sonuçların deneysel olarak doğrulanması amaçlanmıştır. Elastik ve elasto-plastik analizler $v=0.5$, 1m/s ve 2m/s olmak üzere üç farklı vurucu hızında, deneysel analizler ise $v=1$, 1.5 ve 2m/s olmak üzere yine üç farklı vurucu hızında gerçekleştirilmiş, gerek sayısal gerekse deneysel analizler beş farklı malzeme kompozisyonu için ($n=0.1$, 0.5 , 1 , 5 ve 10) tekrarlanmıştır. Sayısal analizler için bir sonlu elemanlar paket programı olan LS-DYNA kullanılmıştır. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka kenarlarından ankastre bağlanmış ve seramik yüzeyden merkezi çarpmaya maruz bırakılmıştır. Kompozisyonu kalınlık boyunca değişen dairesel plaka, seramik (SiC) ve metal (Al) fazlardan oluşmuştur. Seramik ve metal katmanlar arasında kalan fonksiyonel kademelendirilmiş bölgenin mekanik özelliklerinin plaka kalınlığı boyunca sürekli olarak bileşenlerin hacimsel oranlarındaki değişime bağlı olarak bir kuvvet kanununa göre değiştiği varsayılmıştır. Elasto-plastik analizler için iki farklı bileşene sahip yapılarda bileşenlerin tek eksenli gerilme-şekil değiştirme değerlerini kullanarak nihai malzenin gerilme şekil değiştirme eğrisinin oluşturulması için geliştirilmiş TTO model kullanılmıştır.

İlk olarak gerçekleştirilen elastik analizlerde fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın kalınlığı boyunca katman sayısının etkisi incelenmiş ve 10 katman ile 50 katman arasında gerçekleştirilen analizler sonucu 30 katmandan daha fazla katmanın sonuçları belirgin etkilemediği tespit edilmiş ve bundan sonraki analizler için bu değer kullanılmıştır. Vurucu hızı ve malzeme kompozisyonunun temas

kuvveti üzerine etkileri incelendiğinde artan vurucu hızı ile temas kuvveti değerinin arttığı ve yine $n=0.1$ (metal yoğun) ile $n=10$ (seramik yoğun) arasında artan malzeme kompozisyonu ile fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın rijitliği artmış bu sebeple temas kuvveti değeri de artmıştır. Bu durum elasto-plastik analizler ve deneysel analizlerde de benzer şekilde gözlemlenmiştir. Artan malzeme kompozisyonu değeri ile fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakadaki merkezi yer değiştirme değeri azalmış ve temas süreside kısalmıştır. Plaka çapının temas kuvveti üzerine etkisinin incelendiği çalışmada plaka yarıçapı (R) büyüdükçe temas kuvvetinin azaldığı ve temas süresinin ise arttığı görülmüştür.

Aynı model kullanılarak gerçekleştirilen elasto-plastik analizlerde fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın çarpma sonrası maksimum temas kuvveti değerleri elastik analizlere kıyasla daha düşük seviyede gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak elasto-plastik analizlerde çarpma enerjisinin bir kısmı plastik deformasyon olarak plaka tarafından absorbe edilmesinin bir sonucu şeklinde açıklanmıştır.

TTO model kullanılarak yapılan elasto-plastik sayısal analiz ile deneysel sonuca %76 oranında yaklaşılmıştır bu oranın dahada geliştirilmesi için gerek sayısal modelin gerekse deneysel şartların iyileştirilmesi çalışmaları TÜBİTAK projesi kapsamında devam etmektedir.

Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kompozit Malzemeler Laboratuvarında beş farklı malzeme kompozisyonlarında üretilen fonksiyonel kademelendirilmiş numunelere farklı vurucu hızlarında ($v=1, 1.5$ ve 2m/s) gerçekleştirilen deneysel çarpma testleri sonucunda malzeme kompozisyonunun $n>1$ olduğu durumlarda numunelerde hasar meydana gelmiştir. Yapılan sayısal analizler elasto-plastik sınırlar içerisinde olduğundan hasarın olduğu durum için deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması mümkün olmamaktadır. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar için geçerli bir hasar modeli mevcut değildir. Bir hasar modelinin geliştirilmesi gerekmektedir ki, bu sebeple ileriki çalışmalar için bir hasar modelinin geliştirilmesi düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Suresh S., Mortensen, A., Fundamentals of Functionally Graded Materials, The University Press Cambridge, 1997.
2. Nogata F., Learning About Design of FGMs from Intelligent Modeling System in Natural Composites, FGM'96, Proceedings of the 4th international symposium on Functionally Graded Materials AIST Tsukuba Research Center, Japan, 737-743, October 21-24, 1996
3. Koizumi, M., The Concept of FGM, Ceramic Transaction: Functionally Gradient Materials, 34, 3-10, 1993.
4. Functionally Graded Material Forum of Japan, <http://www.fgms.net/en-index.html>
5. Noda, N., Thermal Stresses in Functionally Graded Materials, Journal of Thermal Stresses, 22, 477-512, 1999.
6. Shabana, Y.M. ve Noda, N., Thermo-elasto-plastic Stresses in Functionally Graded Materials Subjected to Thermal Loading Taking Residual Stresses of the Fabrication Process into Consideration, Composites Part B: Engineering, 32, 111-121, 2001.
7. Yang Y. Y., Time Dependent Stress Analysis in Functionally Graded Materials, International Journal of Solids and Structures, 37, 7593-7608, 2000.
8. Matsunaga H., Stress Analysis of Functionally Graded Plates Subjected to Thermal and Mechanical Loadings, Composite Structures, 87, 344-357, 2009.
9. Han X., Xu D., Liu G.R., Transient Responses in a Functionally Graded Cylindrical Shell to Point Load, Journal of Sound and Vibration, 251(5), 783-805, 2002.
10. Mishnaevsky L. L., Functionally Gradient Metal Matrix Composites: Numerical Analysis of the Microstructure-Strength Relationships, Composite Science and Technology, 66, 1873-1887, 2006
11. Bruck, H.A., A One-dimensional Model for Designing Functionally Graded Materials to Manage Stress Waves, Int. Jour. of Solids and Structures, 37, 6383-6395, 2000.

12. Kieback B., Neubrand A., Riedel H., Processing Techniques for Functionally Graded Materials, Material Science and Engineering, A362, 81-105, 2003
13. Wu A. H., Cao W. B., Ge C. C., Li J. F., Kawasaki A., Fabrication and Characteristics of Plasma Facing SiC/C Functionally Graded Composite Material, Material Chemistry and Physics, 91, 545-550, 2005
14. Zhou M. Y., Xi J. T., Yan J. Q., Modeling and Processing of Functionally Graded Materials for Rapid Prototyping, Journal of Materials Processing Technology, 146, 396-402, 2004
15. Bhattacharyya M., Kumar A. N., Kapuria S., Synthesis and Characterization of Al/SiC and Ni/Al₂O₃ Functionally Graded Materials, Materials Science and Engineering, A487, 524-535, 2008
16. Mannan M. N., Ansari R., Abbas H., Failure of Aluminum Beams under Low Velocity Impact, International Journal of Impact Engineering, 35, 1201-1212, 2008.
17. Lam K. Y., Sathiyamoorthy T. S., Response of Composite Beam under Low Velocity Impact of Multiple Masses, Composite Structures, 44, 205-220, 1999.
18. Tiberkak R., Bachene M, Rechak S., Necib B., Damage Prediction in Composite Plates Subjected to Low Velocity Impact, Composite Structures, 83, 73-82, 2008.
19. Lakshminarayana, H.V., Boukhili, R. ve Gauvin, R., Impact Response of Laminated Composite Plates: Prediction and Verification, Composite Structures, 28, 61-72, 1994.
20. Ganapathy S., Rao K. P., Failure Analysis of Laminated Composite Cylindrical/Spherical Shell Panels Subjected to Low Velocity Impact, Computers and Structures, 68, 627-641, 1998.
21. Collombet F., Lalbin X., Lataillade J. L., Impact Behavior of Laminated Composites: Physical Basis for Finite Element Analysis, Composites Science and Technology, 58, 463-478, 1998.

22. Oguiibe C. N., Webb D.C., Finite Element Modeling of The Impact Response of a Laminated Composite Plate, *Composites Science and Technology*, 59, 1913-1922, 1999.
23. Donadon M. V., Iannucci L., Falzon B. G., Hodgkinson J. M., Almeida S. F. M., A Prograssive Failure Model for Composite Laminates Subjected to Low Velocity Impact Damage, *Computers and Structure*, 86, 1232-1252, 2008.
24. Schoeppner G. A., Abrate S., Delamination Threshold Loads for Low Velocity Impact on Composite Laminates, *Composites, Part A* 31, 9003-915, 2000.
25. Guinard S., Allix O., Degeorges D. G., Vinet A., A 3D Damage Analysis of Low-Velocity Impacts on Laminated Composites, *Composites Science and Technology*, 62, 585-589, 2002.
26. Mili, F. ve Necib, B., Impact Behavior of Cross-Ply Laminated Composite Plates Under Low Velocities, *Composite Structures*, 51, 237-244, 2001.
27. Krishnamurthy, K.S., Mahajan, P. ve Mittal, R.K., Impact Response and Damage in Laminated Composite Cylindrical Shells, *Composite Structures*, 59, 15-36, 2003.
28. Aslan, Z., Karakuzu, R. ve Okutan, B., The Response of Laminated Composite Plates under Low-Velocity Impact Loading, *Composite Structures*, 59, 119-127, 2003.
29. Jiang, D. ve Shu, D., Stress Distribution in Damaged Composite Laminates Under Transverse Impact, *Composite Structures*, 63, 407-415, 2004.
30. Jiang, D. ve Shu, D., Local Displacement of Core in Two-Layer Sandwich Composite Structures Subjected to Low Velocity Impact, *Composite Structures*, 71, 53-60, 2005.
31. Zhang, Y., Zhu, P. ve Lai, X., Finite Element Analysis of Low-Velocity Impact Damage in Composite Laminated Plates, *Materials and Design*, 27, 513-519, 2006.
32. Ibekwe S. I., Mensah P. F., Li G., Pang S. S., Stubblefield M. A., Impact and Post Impact Response of Laminated Beams at Low Temperatures, *Composite Structures*, 79, 12-17, 2007.

33. Saez S. S., Barbero E., Navarro C., Compressive Residual Strength at Low Temperatures of Composite Laminates Subjected to Low Velocity Impacts, *Composite Structures*, 85, 226-232, 2008.
34. Minak G., Ghelli D., Influence of Diameter and Boundary Conditions on Low Velocity Impact Response of CFRP Circular Laminated Plates, *Composites, Part B* 39, 962-972, 2008.
35. Tita V., Carvalho J., Vandepitte D., Failure Analysis of Low Velocity Impact on Thin Composite Laminates: Experimental and Numerical Approaches, *Composite Structures*, 83, 413-428, 2008.
36. Cui H. P., Wen W. D., Cui H. T., An Integrated Method Predicting Damage and Tensile Strength of Composite Laminates Under Low Velocity Impact, *Computers and Structures*, basimda , 2009.
37. Chun L. Lam K. Y., Dynamic Response of Full Clamped Laminated Composites Plates Subjected to Low Velocity Impact of a Mass, *Int. J. Solids Structures*, 35/11, 963-979, 1998.
38. Kim J. S., Chung S. K., A Study on the Low Velocity Impact Response of Laminates for Composite Railway Bodysheells, *Composite Structures*, 77, 484-492, 2007.
39. Choi H. I., Low Velocity Impact Analysis of Composite Laminates under Initial In-Plane Load, *Composite Structures*, 86, 251-257, 2008.
40. Setoodeh A. R., Malekzadeh P., Nikbin K., Low Velocity Impact Analysis of Laminated Composite Plates Using a 3D Elasticity Based Layerwise FEM, *Materials and Design*, basimda, 2009.
41. Chui S. T., Liou Y. Y., Chang Y. C., Ong C L., Low Velocity Impact Behavior of Prestressed Composite Laminates, *Material Chemistry and Physics*, 47, 268-272, 1997.
42. Kistler L. S., Wass A. M., Experiment and Analysis on the Response of Curved Laminated Composites Panels Subjected to Low Velocity Impact, *Int. J. Impact Engng*, 21/9, 711-736, 1998.

43. Foo C. C., Seah L. K., Chai G. B., Low Velocity Impact Failure of Aluminum Honeycomb Sandwich Panels, *Composite Structures*, 85, 20-28, 2008.
44. Dheyilan K. A. A., The Low Velocity Impact Loading of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ Whisker Reinforced Ceramic Composite, *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156, 1986-1994, 2004.
45. Nam H. W., Aggag G. A., Takahashi K., Han K. S., The Dynamics Behavior of Metal Matrix Composites Under Low Velocity Impact, *Composite Science and Technology*, 60, 817-823, 2000.
46. Gong, S.W., Lam, K.Y. ve Reddy, J.N., The Elastic Response of Functionally Graded Cylindrical Shells to Low-Velocity Impact, *International Journal of Impact Engineering*, 22, 397-417, 1999.
47. Apetre, N.A., Sankar, B.V. ve Ambur, D.R., Low-Velocity Impact Response of Sandwich Beams With Functionally Graded Core, *International Journal of Solids and Structures*, 43, 2479-2496, 2006.
48. Kubair D. V., Lakshmana B. K., Cohesive Modeling of Low Velocity Impact Damage in Layered Functionally Graded Beams, *Mechanics Research Communications*, 35, 104-114, 2008.
49. Etemadi E., Khatibi A. A., Takaffoli M., 3D Finite Element Simulation of Sandwich Panels with a Functionally Graded Core Subjected to Low Velocity Impact, *Composite Structures*, 89, 28-34, 2009.
50. Mori, T. ve Tanaka, K., Average Stress in Matrix and Average Elastic Energy of Materials with Misfitting Inclusions, *Acta Metallurgica*, 21, 571-574, 1973.
51. Benveniste, Y., A New Approach to the Application of Mori-Tanaka's Theory in Composite Materials, *Mech. Mater.*, 6, 147-157, 1987.
52. Tamura, I., Tomato, Y. ve Ozawa H., Strength and Ductility of Fe-Ni-C Alloys Composed of Austenite and Martensite with Various Strength. In: *Proceedings of the Third Conference on Strength of Metals and Alloys*, vol. 1, Cambridge: Institute of Metals; 611-615, 1973.

53. Bhattacharyya, M., Kapuria, S. ve Kumar, A.N., On the Stress to Strain Transfer Ratio and Elastic Deflection Behavior for Al/SiC Functionally Graded Material, Mech. Adv. Mater. Struct.,14, 295-302, 2007.
54. Hallquist J. O., LS-DYNA Theory Manual, California, 2006
55. Tao H., Deng C., Zhang L.ve Yuan R., Fabrication of Al/Al_2O_3 Composites and FGM, Journal of Material Science and Technology, 17, 646-648, 2001

ÖZGEÇMİŞ

Murat AYDIN 20 Mart 1984 tarihinde Kırşehir’de doğdu. İlk orta ve lise eğitimini Kırşehir’de tamamladıktan sonra 2002 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı, 2007 yılında bu bölümden mezun olduktan sonra aynı yıl Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisansa başladı. 2009 yılında halen görevine devam etmekte olduğu Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Uçak Gövde Motor Bölümüne araştırma görevlisi olarak atandı.

Adres : Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu
Uçak Gövde Motor Bölümü
38039 - KAYSERİ
Telefon : 0 352 437 49 01 - 41103
Belgegeçer : 0 352 437 57 44
e-posta : aydin@erciyes.edu.tr