

**PROJEKTİLLERLE ÇARPIŞMA DURUMUNDA
FONKSİYONEL OLARAK DEĞİŞEN PLAKALARIN
DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**THE INVESTIGATION OF THE DYNAMICAL BEHAVIOUR
OF FUNCTIONALLY GRADED PLATES IN COLLISION
WITH PROJECTILES**

ERALP FAHRİ ÖNOĞLU

PROF. DR. BORA YILDIRIM
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2018

ERALP FAHRİ ÖNOĞLU'nun hazırladığı “**Projektillerle Çarpışma Durumunda Fonksiyonel Olarak Değişen Plakaların Dinamik Davranışının İncelenmesi**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Osman Selim TÜRKBAS
Başkan



Prof. Dr. Bora YILDIRIM
Danışman



Doç. Dr. Benat KOÇKAR
Üye



Dr. Öğr. Üyesi Can Ulaş DOĞRUER
Üye



Dr. Öğr. Üyesi Okan GÖRTAN
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- ☐ **Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etseniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- ☒ **Tezimin/Raporumun 01.01.2021 tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- ☐ **Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

- ☐ **Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

08 / 06 / 2018



Eralp Fahri ÖNOĞLU

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel, ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

08/06/2018



ERALP FAHRİ ÖNOĞLU

ÖZET

PROJEKTİLLERLE ÇARPIŞMA DURUMUNDA FONKSİYONEL OLARAK DEĞİŞEN PLAKALARIN DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Eralp Fahri ÖNOĞLU

Yüksek Lisans, Makina Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bora YILDIRIM

Haziran 2018, 61 sayfa

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler (FDM), özellikleri malzeme içinde bir fonksiyona göre değişen özel kompozit malzemelerdir. Malzeme içinde farklı bölgelerde farklı özellikler elde edilebilmesi, malzemenin kullanım alanına göre istenen özellikleri elde edebilme imkanı vermektedir.

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler, üstün aşınma dayanımı, fiziksel darbelere dayanıklılık, yüksek termal stres dayanımı gibi özellikleri ile yeni nesil kompozit malzemeler olarak kendilerine git gide daha fazla kullanım alanı bulmakta ve kullanıldığı alanlarda yüksek performans sunmaktadır. Bununla birlikte, bu malzemelerin darbe dayanımının incelenmesine yönelik çalışmalar, termal stres dayanımına yönelik çalışmalar kadar geniş bir literatüre sahip değildir.

Dünyadaki zırh teknolojisi sürekli gelişmekte ve malzeme teknolojisindeki gelişmeleri yakından takip ederek, daha hafif ve daha dayanıklı zırha doğru yönelmektedir. Seramik, metal, polimer türü malzemelerin tümü zırh endüstrisinin ilgi alanındadır. Son dönemde, seramik ve metal malzemelerin bileşenlerini oluşturduğu fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler de zırh araştırmalarına konu olmuştur. Seramiğin ve metalin birbirlerine karşı sahip oldukları avantajları tek bir malzemede biraraya getirebilmek, zırh endüstrisi için en üstün yeteneklere sahip malzemeyi ortaya çıkarma fırsatını doğurabilecektir.

Bu çalışmada, 10 farklı FDM plakanın, 1m/s hızındaki projektile çarpışma anındaki dinamik davranışı analiz metoduyla incelenmiştir. Plakayı oluşturan malzeme çiftleri, FDM literatüründen seçilmiştir. Plakadaki malzeme özellikleri bir boyutta değişmektedir. Analizlerde LS-DYNA yazılımı kullanılmıştır. İncelenen malzemeler, temas kuvveti, enerji emilimi ve oluşan deplasman değerleri ele alınarak karşılaştırılmıştır. Üretimi çok zahmetli ve masraflı olan FDM plakaların, test gerektirmeden darbe dayanımını anlamaya yönelik bir çalışma yürütölmöş, ayrıca gelecekte zırh üzerine devam edilmesi planlanan çalışmalar için bir modelleme temeli oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: FDM, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler, darbe dayanımı, düşük hızlı darbe testi, FDM zırhlar



ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF THE DYNAMICAL BEHAVIOUR OF FUNCTIONALLY GRADED PLATES IN COLLISION WITH PROJECTILES

Eralp Fahri ÖNOĞLU

Master of Science, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Bora YILDIRIM

June 2018, 61 pages

Functionally graded materials (FGM) are a special kind of composite materials of which composition and properties vary within the material. As a result of this variation, desired properties can be obtained for a specific application.

With its high abrasion resistance, impact resistance capabilities and superior thermal stress resistance, FGM is used more and more in industry as new generation composite material and offers high performance. However, most of the literature is about thermal properties of FGMs and data related to impact resistance of FGMs is limited.

Armor technology is continuously developing and in the light of developments in material science, armors are becoming more lightweight and more efficient. Ceramics, metals and polymers are all used in different armor applications and closely monitored by industry. Recently, FGM plates consist of ceramic and metal materials have become an important topic in armor industry. The ability to bring the advantages of ceramics and metals together in one material represents an opportunity to develop a superior material for the industry.

In this work, dynamical behaviours of 10 different FGM plates in collision with a projectile with 1 m/s speed are investigated by analysis method. The materials are chosen from the FGM literature. Material properties of plates change with 1 dimension. LS-DYNA software is used for analysis. Resulting displacements, contact forces and energy absorptions are compared. A way to understand impact

resistance of FGMs without testing in the hope of eliminating very costly manufacturing and testing processes is studied. In addition, a modeling base is built for future armor studies.

Keywords: FGM, functionally graded materials, impact resistance, low velocity impact testing, FGM armors



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca değerli katkılarıyla bana yol gösteren, yoğun iş hayatım nedeniyle devam etmekte çok zorlandığım çalışmalarım sırasında bana büyük moral kaynağı olan, hep olumlu yaklaşan ve sabreden tez danışmanım Prof. Dr. Bora YILDIRIM'a,

Lisans öğrenimimden bu yana malzeme teknolojilerindeki gelişmelere merak ve heyecanla yaklaşmamda büyük payı olan Doç. Dr. Bora MAVİŞ'e,

Lisans ve yüksek lisans çalışmalarım boyunca ders alma şansı bulduğum hocalarıma,

Eğitim / öğretim hayatım boyunca bende emeği olan öğretmenlerime,

Yüksek lisans çalışmalarına verdiği destek için ASELSAN'a,

Çalışmalarımı bitirmem için beni sürekli teşvik eden iş arkadaşlarım Levend Mehmet MERT'e ve Ahmet TATAR'a,

Zamanını ve yardımını hiç geri tutmayan Hasan Göksenin ÇETİN'e,

Bu çalışmayı sonlandırabilmem için büyük destek veren, beni teşvik eden, zarif fedakarlıklarıyla sabreden hayat arkadaşım Meltem ÖZALP ÖNOĞLU'na bütün kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER.....	viii
ŞEKİLLER.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Problemin Tanımı.....	1
1.2. Tezin Amacı.....	2
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
3. SONLU ELEMANLAR METODU, MODELLEME ve ANALİZLER.....	9
3.1. Sonlu Elemanlar Metodu.....	9
3.2. Modelleme.....	11
3.3. Analizler.....	17
3.3.1. Doğrulama.....	17
3.3.2. Ni-Al ₂ O ₃	20
3.3.3. AISI 304 - Si ₃ N ₄	23
3.3.4. Ti-6Al-4V - ZrO ₂	25
3.3.5. Nikel - Bazalt.....	28
3.3.6. Paslanmaz Çelik - ZrO ₂	30
3.3.7. Ti - TiB ₂	34
3.3.8. SUS 316 – Al ₂ O ₃	36
3.3.9. AA 6061 – B ₄ C.....	39
3.3.10. Cu - B ₄ C.....	42
3.3.11. Inconel 625 – AISI 304L.....	45
3.3.12. Zırh Çeliği.....	47
3.4. Karşılaştırmalar.....	49
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	52
KAYNAKLAR.....	55

EKLER.....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	61



ÇİZELGELER

Çizelge 2.1: FD çekirdeğin, uniform çekirdeğe kıyasla normal ve kesme gerinimlerine etkisi [12].....	3
Çizelge 3.1. Vurucu parçanın malzeme özellikleri.....	11
Çizelge 3.2. Güneş ve Aydın'ın çalışmasındaki malzeme özellikleri.....	17
Çizelge 3.3. Ni-Al ₂ O ₃ malzeme özellikleri.....	20
Çizelge 3.4. Ni-Al ₂ O ₃ plakaların kütle katsayıları.....	21
Çizelge 3.5. AISI 304 - Si ₃ N ₄ malzeme özellikleri.....	23
Çizelge 3.6. AISI 304 - Si ₃ N ₄ plakaların kütle katsayıları.....	25
Çizelge 3.7. Ti-6Al-4V – ZrO ₂ malzeme özellikleri.....	25
Çizelge 3.8. Ti-6Al-4V – ZrO ₂ plakaların kütle katsayıları.....	27
Çizelge 3.9. Nikel – Bazalt malzeme özellikleri.....	28
Çizelge 3.10. Nikel – Bazalt plakaların kütle katsayıları.....	30
Çizelge 3.11. Paslanmaz çelik – ZrO ₂ malzeme özellikleri.....	31
Çizelge 3.12. Paslanmaz çelik – ZrO ₂ plakaların kütle katsayıları.....	33
Çizelge 3.13. Ti – TiB ₂ malzeme özellikleri.....	34
Çizelge 3.14. Ti – TiB ₂ plakaların kütle katsayıları.....	36
Çizelge 3.15. SUS 316 – Al ₂ O ₃ malzeme özellikleri.....	36
Çizelge 3.16. SUS 316 – Al ₂ O ₃ plakaların kütle katsayıları.....	38
Çizelge 3.17. AA6061 – B ₄ C malzeme özellikleri.....	39
Çizelge 3.18. AA6061 – B ₄ C plakaların kütle katsayıları.....	41
Çizelge 3.19. Cu – B ₄ C malzeme özellikleri.....	42
Çizelge 3.20. Cu – B ₄ C plakaların kütle katsayıları.....	44
Çizelge 3.21. Inconel 625 – AISI 304L malzeme özellikleri.....	45
Çizelge 3.22. Inconel 625 – AISI 304L plakaların kütle katsayıları.....	47
Çizelge 3.23. Zırh çeliği malzeme özellikleri.....	49

ŞEKİLLER

Şekil 2.1. Farklı çekirdek malzemeleriyle elde edilen en büyük normal gerinim değerlerinin karşılaştırması [12].....	4
Şekil 2.2. Farklı çekirdek malzemeleriyle elde edilen en büyük kesme gerinimi değerlerinin karşılaştırması [12].....	4
Şekil 2.3. Lineer ve bilineer gradyant bloklarda kuvvet-zaman eğrileri ($V=35\text{m/s}$) [16].....	5
Şekil 2.4. FD köpük malzeme optimum tasarımı [16].....	5
Şekil 2.5. Asimetrik FD çekirdek için en fazla normal ve kesme gerinimi değerleri [17].....	6
Şekil 2.6. Homojen çekirdek için en fazla normal ve kesme gerinimi değerleri [17].	7
Şekil 2.7. FDM hacim oranı parametresinin temas kuvvetine etkisi (Çarpma hızı 1 m/s) [20].....	8
Şekil 2.8. FDM hacim oranı parametresinin sehime etkisi (Çarpma hızı 1 m/s) [20]	8
Şekil 3.1. FDM plaka tabakaları [20].....	12
Şekil 3.2. A alanını çevreleyen S konturu [24].....	13
Şekil 3.3. Gerinim hızı eleman merkezliken, düğümsel kuvvetler düğüm merkezlidir. [24].....	14
Şekil 3.4. Element numaralandırma [24].....	15
Şekil 3.5. ANSYS arayüzünde oluşturulan geometrik model.....	18
Şekil 3.6. R.Güneş ve M.Aydın'ın çalışmasıyla yapılan karşılaştırma (sehim değerleri).....	19
Şekil 3.7. R.Güneş ve M.Aydın'ın çalışmasıyla yapılan karşılaştırma (temas kuvveti değerleri).....	19
Şekil 3.8. Ni-Al ₂ O ₃ sehim değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	20
Şekil 3.9. Ni-Al ₂ O ₃ temas kuvvetlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	21
Şekil 3.10. Ni-Al ₂ O ₃ enerji/kütle katsayısı değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	22

Şekil 3.11. FDM hacim oranı parametresine göre malzemenin kalınlığı boyunca değişen Young modülü (Ni-Al ₂ O ₃).....	22
Şekil 3.12. AISI 304 - Si ₃ N ₄ sehim değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	23
Şekil 3.13. AISI 304 - Si ₃ N ₄ temas kuvvetlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	24
Şekil 3.14. AISI 304 - Si ₃ N ₄ enerji/kütle katsayısı değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	24
Şekil 3.15. FDM hacim oranı parametresine göre malzemenin kalınlığı boyunca değişen Young modülü (AISI 304 - Si ₃ N ₄).....	25
Şekil 3.16. Ti-6Al-4V – ZrO ₂ sehim değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	26
Şekil 3.17. Ti-6Al-4V – ZrO ₂ temas kuvvetlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	26
Şekil 3.18. Ti-6Al-4V – ZrO ₂ enerji/kütle katsayısı değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	27
Şekil 3.19. FDM hacim oranı parametresine göre malzemenin kalınlığı boyunca değişen Young modülü (Ti-6Al-4V – ZrO ₂).....	28
Şekil 3.20. Nikel – Bazalt sehim değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	29
Şekil 3.21. Nikel – Bazalt temas kuvvetlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	29
Şekil 3.22. Nikel – Bazalt enerji/kütle katsayısı değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	30
Şekil 3.23. FDM hacim oranı parametresine göre malzemenin kalınlığı boyunca değişen Young modülü (Nikel – Bazalt).....	31
Şekil 3.24. Paslanmaz çelik – ZrO ₂ sehim değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	32
Şekil 3.25. Paslanmaz çelik – ZrO ₂ temas kuvvetlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	32
Şekil 3.26. Paslanmaz çelik – ZrO ₂ enerji/kütle katsayısı değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	33

Şekil 3.27. FDM hacim oranı parametresine göre malzemenin kalınlığı boyunca değişen Young modülü (Paslanmaz çelik – ZrO ₂).....	33
Şekil 3.28. Ti – TiB ₂ sehim değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	34
Şekil 3.29. Ti – TiB ₂ temas kuvvetlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	35
Şekil 3.30. Ti – TiB ₂ enerji/kütle katsayısı değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	35
Şekil 3.31. FDM hacim oranı parametresine göre malzemenin kalınlığı boyunca değişen Young modülü (Ti – TiB ₂).....	36
Şekil 3.32. SUS 316 – Al ₂ O ₃ sehim değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	37
Şekil 3.33. SUS 316 – Al ₂ O ₃ temas kuvvetlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	37
Şekil 3.34. SUS 316 – Al ₂ O ₃ enerji/kütle katsayısı değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	38
Şekil 3.35. FDM hacim oranı parametresine göre malzemenin kalınlığı boyunca değişen Young modülü (SUS 316 – Al ₂ O ₃).....	39
Şekil 3.36. AA6061 – B ₄ C sehim değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	40
Şekil 3.37. AA6061 – B ₄ C temas kuvvetlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	40
Şekil 3.38. AA6061 – B ₄ C enerji/kütle katsayısı değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	41
Şekil 3.39. FDM hacim oranı parametresine göre malzemenin kalınlığı boyunca değişen Young modülü (AA6061 – B ₄ C).....	42
Şekil 3.40. Cu – B ₄ C sehim değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	43
Şekil 3.41. Cu – B ₄ C temas kuvvetlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	43
Şekil 3.42. Enerji/kütle katsayısı değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	44

Şekil 3.43. FDM hacim oranı parametresine göre malzemenin kalınlığı boyunca değişen Young modülü (Cu – B4C).....	44
Şekil 3.44. Inconel 625 – AISI 304L sehim değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	45
Şekil 3.45. Inconel 625 – AISI 304L temas kuvvetlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	46
Şekil 3.46. Inconel 625 – AISI 304L enerji/kütle katsayısı değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi.....	46
Şekil 3.47. FDM hacim oranı parametresine göre malzemenin kalınlığı boyunca değişen Young modülü (Inconel 625 – AISI 304L).....	47
Şekil 3.48. Zırh çeliğinde oluşan sehim eğrisi.....	48
Şekil 3.49. Zırh çeliğinde oluşan temas kuvveti eğrisi.....	48
Şekil 3.50. Zırh çeliğinde oluşan enerji/kütle katsayısı eğrisi.....	49
Şekil 3.51. Sehim en az olan malzemelerin zırh çeliğiyle sehim değerlerinin karşılaştırması.....	50
Şekil 3.52. Sehim en az olan malzemelerin zırh çeliğiyle temas kuvvetlerinin karşılaştırması.....	50
Şekil 3.53. Sehim en az olan malzemelerin enerji/kütle katsayısı eğrilerinin zırh çeliğiyle karşılaştırması.....	51

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ρ	Yoğunluk
p	FDM hacim oranı parametresi
σ_{ij}	Cauchy gerilim tensörü bileşeni
ε	Gerinim
$\dot{\varepsilon}$	Gerinim hızı
ν	Poisson oranı
x	Pozisyon
$\dot{x}$	Hız
$\ddot{x}$	İvme
V	Hacim
V_s	Seramik hacim oranı
V_m	Metal hacim oranı
K	Esneklik modülü
K_m	Metalin esneklik modülü
K_s	Seramiğin esneklik modülü
G	Kesme modülü
G_m	Metalin kesme modülü
G_s	Seramiğin kesme modülü
E	Young modülü
T	Plaka kalınlığı
Y_{cel}	Sonlu elemanlar modelinin incelenen elemanının dahil olduğu plaka tabakasının, tabana olan uzaklığı

Kısaltmalar

FDM	Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzeme
-----	--

1. GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımı

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM), farklı noktalarında bir fonksiyona bağlı olarak farklı mekanik, optik, elektriksel ve ısı özellikler gösterebilen, birden çok türde malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan kompozit malzemelerdir.

FDM'yi oluşturan malzemeler ve bunların bileşim oranları, kullanım alanlarına göre değişen tasarım gerekleri doğrultusunda değiştirilebilir. Bugün yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerden farklı olarak üniform yapıda değildirler ve bu sayede FDM'nin belirli noktalarında bileşen malzemelerin karakteristik özellikleri aynen korunabilmektedir.

Sağladığı bu olanaklarla FDM, özellikle ısı dayanımı, aşınma dayanımı, darbe dayanımı ve korozyon dayanımı istenen uygulamalarda gitgide daha sık kullanılır hale gelmiştir.

FDM ilk olarak termal uygulamalarda, kompoziti oluşturan malzemeler arasındaki sınır bölgelerinde oluşan termal gerilimleri azaltmak amaçlı ortaya çıkmış olsa da, giderek artan kullanım alanlarıyla git gide daha fazla sayıda mühendislik uygulamasında mekanik darbelerle maruz kalabilmektedir. Bio-medikal uygulamalar, enerji dönüşüm cihazları, aşınmaya dirençli kaplamalar, zırh plakaları bu farklı uygulama alanlarından birkaçıdır [1], [2], [3], [4].

FDM'nin seramik ve metallerin üstün özelliklerine birlikte sahip olabilmesi, darbe dayanımı gerektiren yapılardaki kullanımını giderek artırmaktadır. Seramik-metal bir FDM plakanın, bu iki tip malzemenin de en iyi özelliklerini kendisinde bir araya getirebilme imkanı, zırh teknolojisinin de ilgisini çekmektedir. Zırh teknolojisinde çok geniş kullanım alanı bulan seramik malzemeler, tek vuruşa karşı koruma uygulamalarında verimli ve çok yaygın olarak kullanılırken, FD plakaların kullanımıyla bu verimliliğin artırılarak çoklu darbe uygulamalarına da yansıtılması çalışma konusudur.

Zırh sistemi oluşturulurken, delikli yapıda olma, tek parçalı/çok parçalılık, FDM hacim oranı katsayısı, çok parçalı zırh yapılarında parçalar arası geçişler gibi

parametreler değiştirilerek birçok farklı konfigürasyon elde edilebilir. En verimli konfigürasyonu en kısa sürede oluşturabilmek için doğru modellemenin önemi büyüktür.

FDM gitgide kendine daha fazla kullanım alanı bulmakla birlikte, literatür, geleneksel kompozit malzemelerde olduğu kadar geniş değildir. Çoğu araştırma, FDM malzemelerin termal özelliklerine yoğunlaşmıştır. Ayrıca FDM üretimi çok zor ve maliyetli bir süreçtir. Buna bağlı olarak da kolayca tedariği mümkün olmamaktadır. Bu nedenlerden ötürü, üretimi, kullanımı, bakımı vb. alanlarda düşük hızlı darbeye maruz kalacak FDM uygulamalarında, darbe dayanımını anlamak için doğru analiz sürecinin önemi büyüktür.

1.2. Tezin Amacı

Bu tezin temel amacı, 10 farklı FDM kullanılarak modellenmiş silindirik formlu plakaların darbe dayanımlarını incelemek, bu yolla düşük hızlı darbe dayanımı yüksek FDM yapısını tespit etmektir. Zırh teknolojisi alanında kullanılan seramik malzemelerin de analiz edilen FDM plakalardan birkaçında yer almasına önem verilerek, ilerideki çalışmalar için fikir edinilmesi hedeflenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Lamine kompozitlerin düşük hızlı darbelere karşı davranışıyla ilgili çeşitli çalışmalar mevcuttur [5], [6], [7], [8], [9].

Kubair ve Lakshmana, FD çekirdeğe sahip katmanlı kompozit bir kiriş yapısının düşük hızlı darbe altındaki hasarını nümerik olarak incelemiştir. Hasar başlangıcı ve ilerlemesini kohezif temelli sonlu elemanlar çerçevesinde incelemişler, ortaya çıkan enerjinin FD çekirdeğin varlığıyla değiştiğini göstermişlerdir [10].

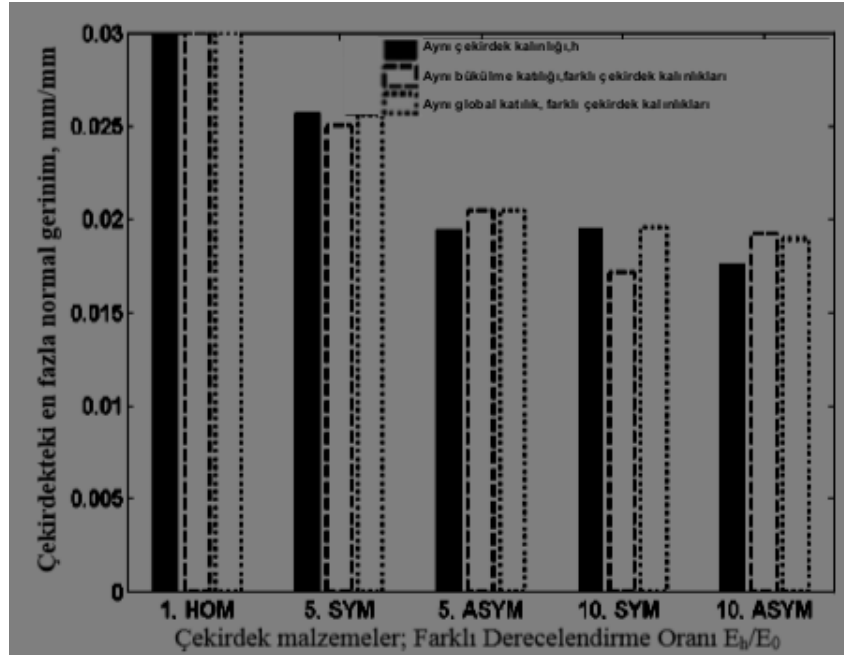
Gong ve arkadaşları, FDM bileşenlerinin hacim oranının ve FDM konfigürasyonunun, FDM silindirik kabuğunun darbe yüklemeleri altındaki tepkisine etkisini incelemişlerdir [11].

Apetre ve arkadaşları, fonksiyonel derecelendirilmiş çekirdeğe sahip bir sandviç yapı üzerinde çalışmış ve FD çekirdeğin kesme ve normal gerinimleri önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuştur [12]. 282 J vuruş enerjisiyle, simetrik FD çekirdekte üniform çekirdeğe göre, asimetrik FD çekirdekte de simetrik FD çekirdeğe göre daha az normal ve kesme gerinimi oluştuğunu gösteren sonuçları Çizelge 2.1'de görülmektedir. Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de ise farklı çekirdek malzemeleri için ortaya çıkan en büyük normal ve kesme gerinimi değerlerinin karşılaştırması verilmiştir.

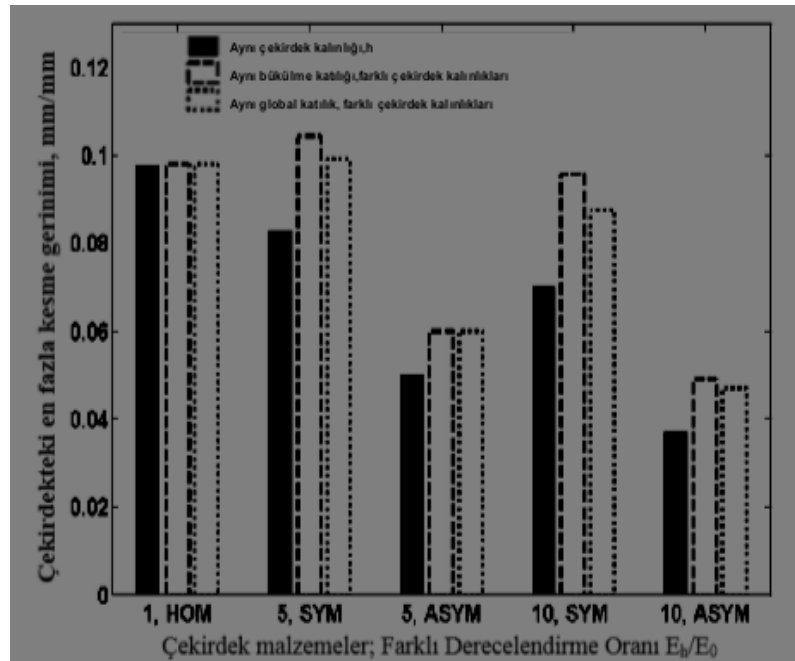
Güneş ve arkadaşları ekplisit sonlu elemanlar metodu kullanarak FD çembersel plakaların düşük hızlı darbe yükü altındaki elasto-plastik davranışını göstermişlerdir [13].

Çizelge 2.1: FD çekirdeğin, üniform çekirdeğe kıyasla normal ve kesme gerinimlerine etkisi [12]

282 J vuruş enerjisi için en fazla normal gerinim ve kesme gerinimi değerleri						
Çekirdek tipi	E_M/E_0	F_{max} (N)	ϵ_x		γ_{xz}	
			En fazla	% Değişim	En fazla	% Değişim
Uniform	1	5.45×10^4	0.0300	–	0.0978	–
FG ₁ simetrik	5	7.03×10^4	0.0257	14.3	0.0830	15.1
FG ₂ simetrik	10	7.89×10^4	0.0194	35.3	0.0700	28.4
FG ₁ asimetrik	5	7.39×10^4	0.0195	35.0	0.0500	48.9
FG ₂ asimetrik	10	8.31×10^4	0.0176	41.3	0.0368	62.3

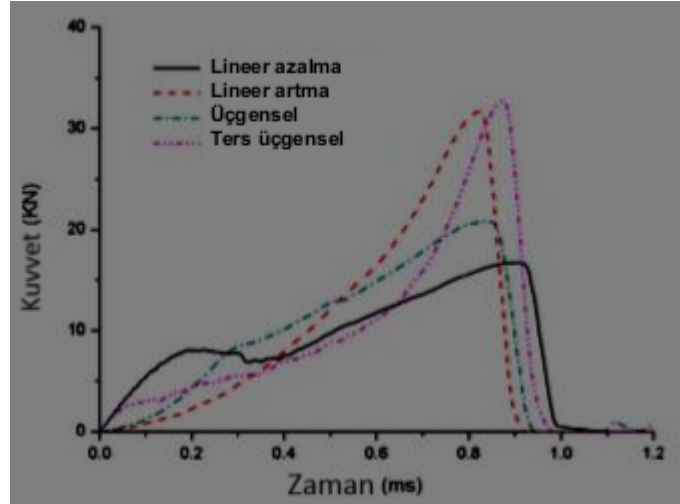


Şekil 2.1. Farklı çekirdek malzemeleriyle elde edilen en büyük normal gerinim değerlerinin karşılaştırması [12]

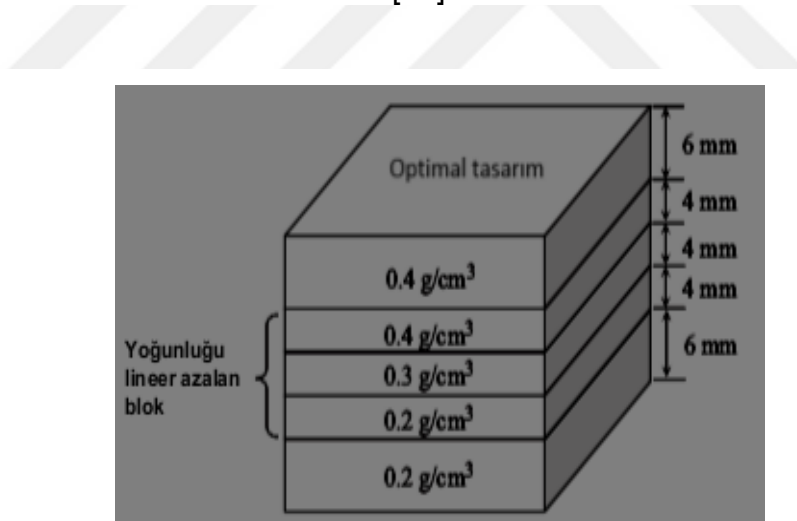


Şekil 2.2. Farklı çekirdek malzemeleriyle elde edilen en büyük kesme gerinimi değerlerinin karşılaştırması [12]

Larson ve arkadaşları, mühendislik uygulamaları için kullanılabilecek bir FDM modeli elde etmek için nümerik simülasyonlar ve deneysel çalışmalar yapmışlar, bu metodlarla elde edilen sonuçların birbiriyle uyumlu olduğunu göstermişlerdir [14] .

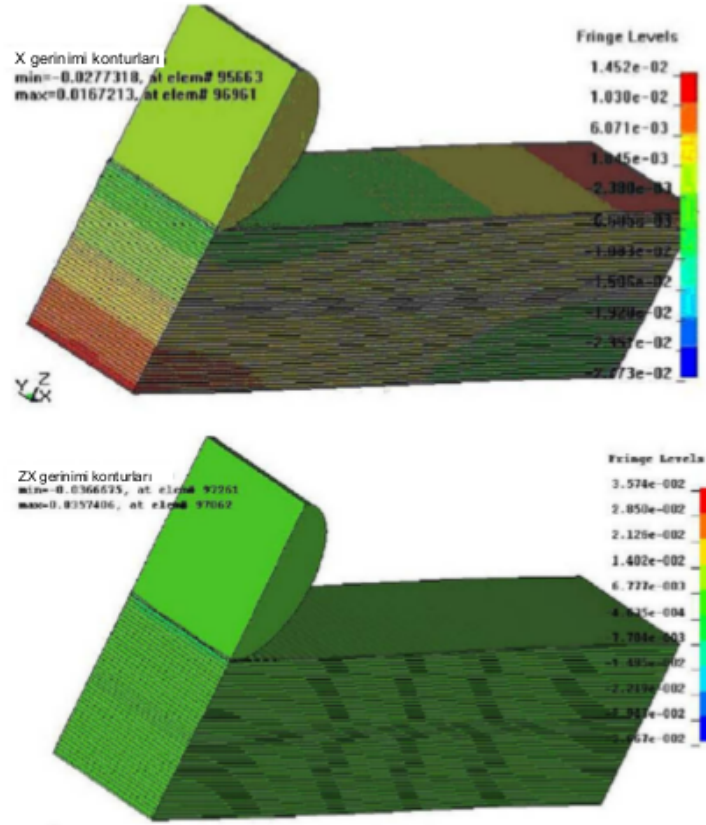


Şekil 2.3. Lineer ve bilineer gradyant bloklarda kuvvet-zaman eğrileri (V=35m/s)
[16]



Şekil 2.4. FD köpük malzeme optimum tasarımı [16]

Kiani ve arkadaşları, ısıtıl alandaki bir FDM kirişin düşük hızlı darbe tepkisini inceledikleri çalışmalarında, analitik bir çözümü araştırmışlar, çevresel ısıtıl etkileri de çözüme dahil etmişlerdir [15].



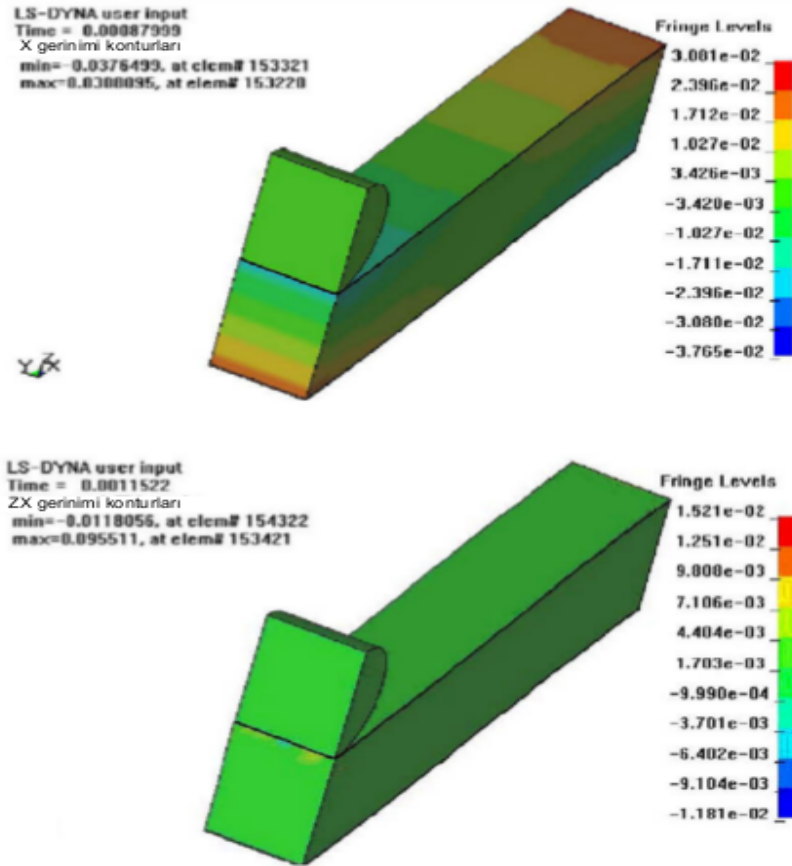
Şekil 2.5. Asimetrik FD çekirdek için en fazla normal ve kesme gerinimi değerleri [17]

Zhang ve Zhang, küresel vurucuyla vurulan FD köpük malzemelerin optimum tasarımını incelemişler, optimum tasarımda yoğunluğun en üstten en alta doğru dereceli olarak azaldığını göstermişlerdir [16]. Şekil 2.3'te, yoğunluğun lineer azaldığı durumda en az temas kuvvetlerinin gözlemlendiği görülmektedir. İnceledikleri problem için en iyi darbe dayanımını sağlayacak tasarımı Şekil 2.4'teki gibi göstermişlerdir. Bu tasarımda, en üst ve en alttaki iki tabaka arasında kalan bloktaki yoğunluk değişiminin lineer olduğu görülmektedir.

Etemadi ve arkadaşları, FD çekirdeğe sahip sandviç yapıda bir kirişin düşük hızlı darbeye karşı davranışını 3 boyutlu sonlu elemanlar metodu kullanarak incelemişler ve FD çekirdeğe sahip sandviç yapılar homojen çekirdeğe sahip sandviç yapılarla karşılaştırıldığında en yüksek temas kuvvetlerinin daha büyük, en yüksek gerinim değerlerinin daha küçük olduğunu göstermişlerdir [17]. Şekil 2.5'te asimetrik FD çekirdek için elde ettikleri normal ve kesme gerinimi değerleri,

Şekil 2.6'da homojen çekirdek için elde ettikleri normal ve kesme gerinimi değerleri verilmiştir.

Kashtalyan and Menshykova FD çekirdeğe sahip, enine yükleme altındaki bir sandviç paneli üç boyutlu elastisite teorisine göre incelemiştir. FD çekirdeğin, yüzey plakası/çekirdek arayüzü boyunca oluşan düzlem içi normal ve kesme gerilmelerinin süreksizliğini ortadan kaldırdığını, yüzey plakasındaki gerilmeleri ve sandviç panelin deplasmanını azalttığını ortaya koymuşlardır [18].

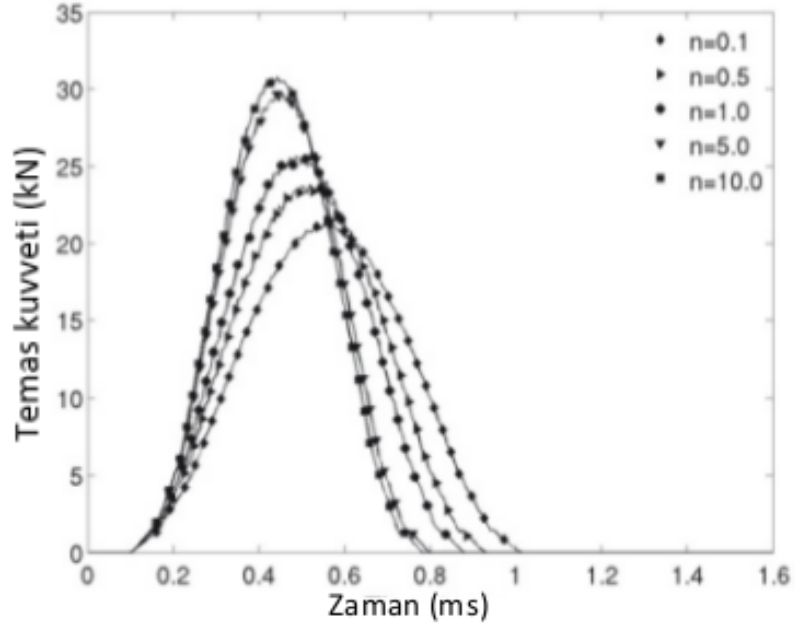


Şekil 2.6. Homojen çekirdek için en fazla normal ve kesme gerinimi değerleri [17]

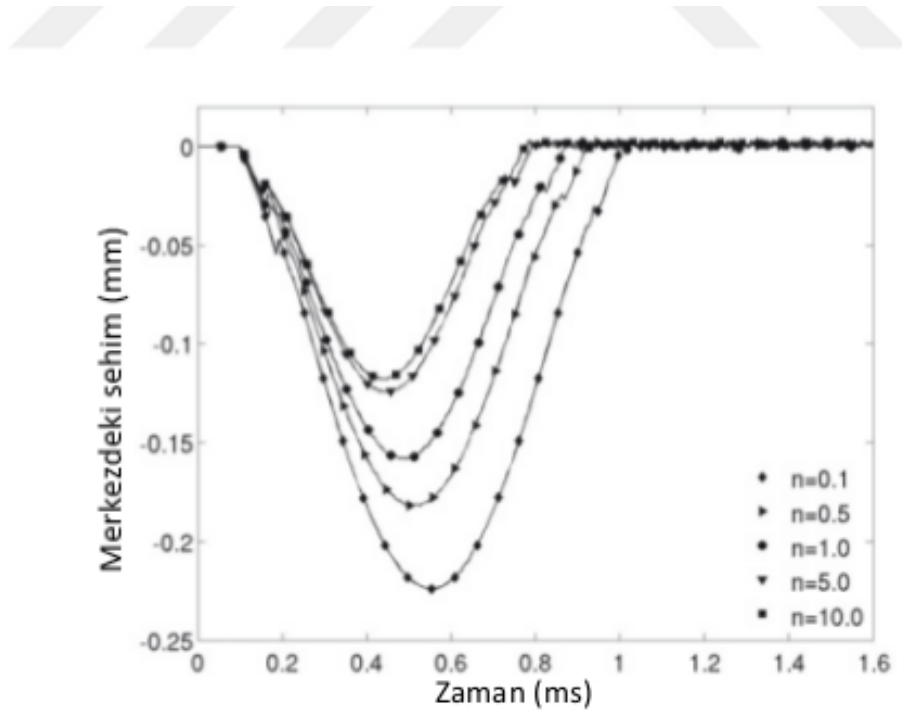
Khalili ve arkadaşları, sıcaklığa bağlı değişen özellikleri olan FD plakaların düşük hızlı darbeye karşı tepkisiyle ilgili çalışmışlardır. Bu çalışmada, vurucu ve plaka arasındaki temas davranışıyla ilgili yay-kütle modeli oluşturmuşlardır. Vurucu hızının, FD fonksiyonunun ve sıcaklığın vurucu ve plaka üzerindeki etkisini incelemişlerdir [19].

Güneş ve Aydın, FD çembersel plakaların düşük hızlı darbe yükü altındaki elastik davranışını sonlu elemanlar metodu kullanarak incelemişlerdir [20]. Şekil 2.7 ve

Şekil 2.8'de 1m/s çarpışma hızıyla elde ettikleri temas kuvvetleri ve sehim değerleri verilmiştir. Bölüm 3.3.1'de bu çalışmaya ilişkin kapsamlı bilgi sunulmuştur.



Şekil 2.7. FDM hacim oranı parametresinin temas kuvvetine etkisi
(Çarpma hızı 1 m/s) [20]



Şekil 2.8. FDM hacim oranı parametresinin sehim etkisi (Çarpma hızı 1 m/s)
[20]

3. SONLU ELEMENLAR METODU, MODELLEME ve ANALİZLER

3.1. Sonlu Elemanlar Metodu

Mühendislik uygulamalarında sıklıkla kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilen problemlerle karşılaşılır. Bu kısmi diferansiyel denklemler analitik olarak çözülemediğinde, farklı ayrıştırma metodları kullanılarak bir yaklaşım modeli kurulur. Ayrıştırma metodlarıyla, nümerik denklemler kullanılarak kısmi diferansiyel denklemler modellenir ve bu nümerik denklemlerin sonucuyla, kısmi diferansiyel denklemin gerçek sonucunun yaklaşığı hesaplanır.

Sonlu elemanlar metodunda, yukarıda tariflenen yaklaşımı sağlamak için, problem konusu yapı, elemanlara bölünür. Bu elemanlar, düğümlerde birleşirler. Düğümlerde, elemanların birbirlerine olan etkileriyle ilgili cebirsel denklemler oluşturulur. Bir “eleman” için hesaplanmak istenen değerler, elemana komşu düğümlerdeki denklemler çözülerek elde edilir.

Bu tezde, otomotiv, askeri, havacılık alanlarında en çok kullanılan sonlu elemanlar metodu yazılımlarından biri olan LS-DYNA kullanılmıştır. Milisaniyeler mertebesinde süren çarpışmalarda özellikle kullanışlı olan eksplisit analizler koşturulmuştur. Çalışmaların ileride yüksek hızlı çarpışmalar için tekrarlanabileceğinin düşünülmesi de eksplisit analiz metodunun seçilmesinde bir diğer etkindir.

Eksplisit dinamik analizde kullanılan temel denklemler, Lagrange koordinatlarında kütle, momentumun ve enerjinin korunumunu ifade eder. Bunlara, bir malzeme modeli, başlangıç koşulları ve sınır koşulları da eklenerek problemin çözümü tanımlanır.

Lagrange formülasyonunda, ağ, modellediğı malzeme ile birlikte hareket eder ve çarpılır. Bu şekilde kütle, momentumun korunumu sağlanmış olur.

Momentumun korunumunu ifade eden kısmi diferansiyel denklemlerde, ivme gerilim tensörüne bağılı olarak şöyle ifade edilir:

$$\rho \ddot{x} = b_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \quad (3.1)$$

$$\rho \ddot{y} = b_y + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \quad (3.2)$$

$$\rho \ddot{z} = b_z + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (3.3)$$

Enerjinin korunumu ise şu denklemle ifade edilir:

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} + 2 \sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} + 2 \sigma_{yz} \dot{\epsilon}_{yz} + 2 \sigma_{zx} \dot{\epsilon}_{zx}) \quad (3.4)$$

Her bir zaman adımındaki çözüm, bu denklemlerin, bir önceki zaman adımından gelen girdilerle modeldeki her bir eleman için çözülmesiyle elde edilir.

Yalnızca kütle ve momentum korunumları zorunludur. İyi tanımlanmış benzetimlerde kütle ve momentumun yanı sıra enerji korunumu da sağlanmalıdır.

Bir n anında yarı ayrık hareket denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$M \ddot{x}^n = P^n - F^n + H^n \quad (3.5)$$

Burada;

M kütle matrisi,

$\ddot{x}^n$ düğümsel ivme bileşenleri,

P^n dış kuvvetler ve gövde kuvvetleri,

F^n gerilim ıraksama vektörü,

H^n hourglass direncidir.

$n-1/2$ 'deki ivmeler belirlenmiş haldeyken, i yönündeki ve $n+1/2$ zamanındaki hızlar şu denklemle ifade edilir:

$$(\dot{x}_i)^{n+1/2} = (\dot{x}_i)^{n-1/2} + (\ddot{x}_i)^n \Delta t^n \quad (3.6)$$

$n+1$ zamanındaki konumlar ise hızların integrali ile elde edilir.

$$x_i^{n+1} = x_i^n + (\dot{x}_i)^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (3.6)$$

Doğrusal olmayan problemlerin çözümünde bu metodu kullanmanın getirdiği avantajlar;

Denklemlerin ayrık hale gelmesi ve iterasyon gerektirmeden, eksplisit olarak çözülebilmesi,

Denklemler ayrık olduğu için, yakınsama kontrolü gerekmemesi,

Katılık matrisinin tersini almanın gerekmemesi, temas da dahil olmak üzere doğrusal olmayan etkenlerin dahili güç vektöründe kapsanmış olmasıdır.

3.2. Modelleme

Bu tezde FDM plakalara küresel uçlu vurucularla darbe analizi yapılmıştır.

Vurucu, rijit olarak modellenmiştir. Çizelge 3.1'de vurucunun malzeme özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Vurucu parçanın malzeme özellikleri

Young modülü, E (GPa)	200
Poisson oranı, ν	0.32

Vurucu malzemesinin yoğunluğu, vurucu kütlesini 5,045 kg yapacak şekilde girilmiştir.

FDM malzeme kalınlığı boyunca, malzemenin mekanik özellikleri metal ve seramik bileşenlerin hacim oranına göre değişmektedir. Bu değişimi gösteren bir örnek görsel Şekil 3.1'de sunulmuştur.

FDM'in herhangi bir noktasındaki metal hacim oranı, y koordinatına bağlı olarak aşağıdaki formülle ifade edilmektedir.

$$V_m = (1 - Y_{cel}/T)^p \quad (3.7)$$

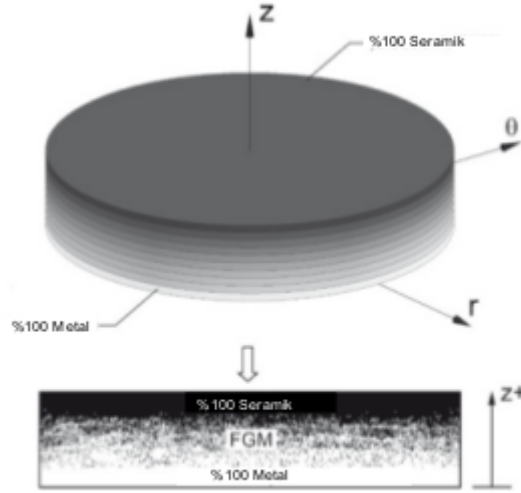
Bu denklemde p parametresindeki artış, FDM'deki seramik hacmi oranını artırmaktadır.

Seramik hacim oranını şu denklem belirlemektedir:

$$V_s = 1 - V_m \quad (3.8)$$

Bölgesel malzeme özelliklerinin hesaplanmasında Mori-Tanaka metodu kullanılmıştır [20], [21], [22]. Bu yaklaşıma göre FDM plakanın tabakalarının esneklik modülü ve kesme modülü

$$\frac{K - K_m}{K_s - K_m} = \frac{V_s}{1 + (1 - V_s) \frac{3(K_s - K_m)}{3K_m + 4G_m}} \quad (3.9)$$



Şekil 3.1. FDM plaka tabakaları [20]

$$\frac{G - G_m}{G_s - G_m} = \frac{V_s}{1 + (1 - V_s) \frac{(G_s - G_m)}{G_m + f_1}} \quad (3.10)$$

$$f_1 = \frac{G_m(9Km + 8G_m)}{6(Km - 2G_m)} \quad \text{formüllerile hesaplanmıştır.} \quad (3.11)$$

FDM tabakalarındaki yoğunluk ise $d = V_s \times d_s + V_m \times d_m$ (3.12)
formülüyle ifade edilmiştir.

Malzeme özellikleriyle ilgili formüller özel kod yazılarak LS-DYNA programına girilmiştir.

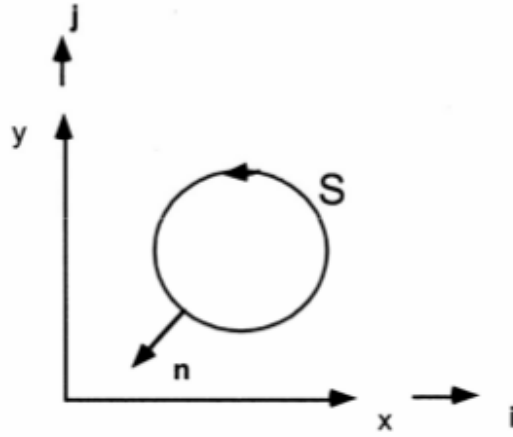
FD plakalar, 40mm çapta, 6mm kalınlıktadır ve çevre yüzeyinden sabitlenmiştir. Plakalar 60 tabaka, 12000 elemandan meydana gelmektedir. Aynı tabakadaki malzeme özellikleri aynıdır. Şekil 3.5'te, kullanılan modelin geometrisi sunulmuştur. Programa girilen kodla, 12000 elemanın her biri için esneklik modülü, kesme modülü, poisson oranı ve yoğunluk hesaplanmıştır. Bu da her bir elemanın izotropik lineer elastik malzeme modelinin oluşturulmasında kullanılmıştır.

FD plakaların oluşturulmasında kullanılan eleman sayısının artırılmasının analiz sonuçlarını değiştirmedeği kontrol edilmiştir.

Analizler aksi-simetrik olarak koşturulmuştur. LS-DYNA yazılımında, aksisimetrik geometriler xy düzleminde tanımlanır. x eksenı radyal yöne karşılık gelmekteyken, y eksenı simetri eksenıdır.

Analizlerde, aksisimetrik 2D Petrov-Galerkin alan ağırlıklı eleman tipi kullanılmıştır. Bu eleman tipinin kökeni Noh'un integral fark metoduna uzanmaktadır [23].

İntegral fark metodu, bir F fonksiyonunun gradyanlarını, A alanını çevreleyen S konturunun çizgi integrali olarak ifade eder.



Şekil 3.2. A alanını çevreleyen S konturu [24]

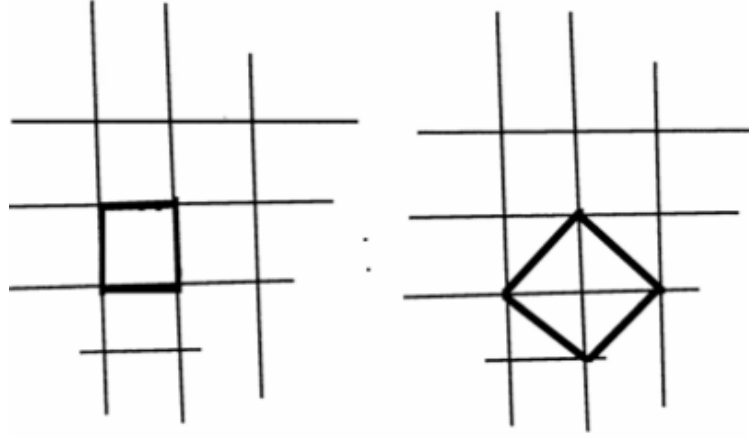
$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\int_c F(n \cdot i) dS}{\lim_{A \rightarrow 0} A} \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} = \frac{\int_c F(n \cdot j) dS}{\lim_{A \rightarrow 0} A} \quad (3.14)$$

Yukarıdaki denklemlerde n , S konturuna göre normal vektörken, i ve j , x ve y yönlerindeki birim vektörlerdir. (Bkz. Şekil 3.2)

Şekil 3.3'te gösterildiğı gibi, gerinim hızını belirleyen hız gradyanları eleman merkezliyken, hızlar ve düğümsel kuvvetler ise düğüm merkezlidir.

Şekil 3.4'te numaralandırılmış bir eleman gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Gerinim hızı eleman merkezli, düğümsel kuvvetler düğüm merkezlidir. [24]

n vektörü, $n = \frac{\partial y}{\partial S} i + \frac{\partial x}{\partial S} j$ ile ifade edilebilir. Bu durumda 3.13 nolu denklemde yer alan $\int_c F(n \cdot i) dS$ şu şekilde ifade edilebilir:

$$\int_c F(n \cdot i) dS = \int F \frac{\partial y}{\partial S} dS = F_{23}(y_3 - y_2) + F_{34}(y_4 - y_3) + F_{41}(y_1 - y_4) + F_{12}(y_2 - y_1) \quad (3.15)$$

Bu ifadede $F_{ij} = (F_i + F_j)/2$ 'dir. A 'nın çevrelenen alan olduğunu düşünürsek, x ve y yönlerindeki gerinim hızları artık şöyle ifade edilebilir:

$$\frac{\partial F}{\partial y} = \frac{F_{23}(y_3 - y_2) + F_{34}(y_4 - y_3) + F_{41}(y_1 - y_4) + F_{12}(y_2 - y_1)}{A} \quad (3.16)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial \dot{y}}{\partial y} = \frac{(\dot{y}_2 - \dot{y}_4)(x_3 - x_1) + (x_2 - x_4)(\dot{y}_3 - \dot{y}_1)}{2A} \quad (3.17)$$

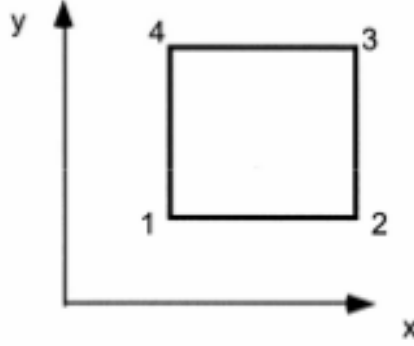
Kesme gerinimi ise

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{y}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{x}}{\partial y} \right) \text{ olarak ifade edilir.} \quad (3.18)$$

Bu ifadede

$$\frac{\partial \dot{y}}{\partial x} = \frac{(\dot{y}_2 - \dot{y}_4)(y_3 - y_1) + (y_2 - y_4)(\dot{y}_3 - \dot{y}_1)}{2A} \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial \dot{x}}{\partial y} = \frac{(\dot{x}_2 - \dot{x}_4)(x_3 - x_1) + (\dot{x}_2 - \dot{x}_4)(\dot{x}_3 - \dot{x}_1)}{2A} \text{ 'dır.} \quad (3.20)$$



Şekil 3.4. Element numaralandırma [24]

$\dot{x}_3 = \dot{x}_1, \dot{x}_2 = \dot{x}_4, \dot{y}_3 = \dot{y}_1, \dot{y}_2 = \dot{y}_4$ koşullarının gözlemlendiği durumlarda $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{xy} = 0$ olur ve sıfır enerji ("Hourglass") modları meydana gelir.

Düzlemsel problemlerde momentum denklemleri şu şekildedir:

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} \right) = \ddot{x} \quad (3.21)$$

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} \right) = \ddot{y} \quad (3.22)$$

Aksisimetrik geometrilerde, düzlemsel problemlerde olmayan yeni terimlerle birlikte:

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{\theta\theta})}{x} \right) = \ddot{x} \quad (3.23)$$

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\sigma_{x\theta}}{x} \right) = \ddot{y} \text{ haline gelir.} \quad (3.24)$$

Radyal ivme denklemi şu şekilde oluşturulur:

$$T_1 = \frac{\sigma_{xx_1}(y_I - y_{IV}) + \sigma_{xx_2}(y_{II} - y_I) + \sigma_{xx_3}(y_{III} - y_{II}) + \sigma_{xx_4}(y_{IV} - y_{III})}{\rho_1 A_1 + \rho_2 A_2 + \rho_3 A_3 + \rho_4 A_4}$$

$$T_2 = \frac{\sigma_{xy_1}(x_I - x_{IV}) + \sigma_{xy_2}(x_{II} - x_I) + \sigma_{xy_3}(x_{III} - x_{II}) + \sigma_{xy_4}(x_{IV} - x_{III})}{\rho_1 A_1 + \rho_2 A_2 + \rho_3 A_3 + \rho_4 A_4}$$

$$\ddot{x} = \frac{1}{2}(T_1 - T_2) + \beta \quad (3.25)$$

$$\beta = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \left[\frac{(\sigma_{xx_i} - \sigma_{\theta\theta_i})}{(\rho x)_i} \right]_i \quad (3.26)$$

x_i , i . elemanın kütle merkezidir.

$$x_i = \frac{V_i}{A_i} \quad (3.27)$$

Analizlerde Auto 2-D kontak tipi kullanılmıştır.

Analizlerde, yer çekiminin çarpmaya etkisi ve FDM plakaların sönümlleme etkisi ihmal edilmiş, vurucu ve plaka arasında sürtünmesiz kontak olduğu kabul edilmiştir.

Vurucunun kütlesi 5,045 kg'dır ve 1 m/s hızla fırlatılmaktadır. Vurucu, rijit modellenmiştir, 8917 elemanla oluşturulmuştur ve çembersel FD plakanın tam ortasına düşmektedir. (Bkz. Şekil 3.5)

Analizler aksisimetrik olarak koşturulmuştur.

Analizler sonucunda şu 3 parametre incelenmiştir:

- Plakanın, vurucunun çarptığı ilk noktasındaki deplasman değerleri,
- Darbe ile ortaya çıkan temas kuvvetindeki değişiklik,
- Vurucu enerjisindeki değişimin, plaka kütle katsayısına oranı.

Testlerle doğrulama imkanı olmadığı ve bütün malzemeler için geçerli olabilecek bir parçalanma modeli bulunmadığı için plastisite analizlere dahil edilmemiştir.

Plastisite hesaplama dışında tutulduğu için, vurucunun darbe sonrası enerjisi ile darbe öncesi ilk hızıyla sahip olduğu enerjisi aynı kalmaktadır. Enerji değişimi, plaka kütlesine bağlı olarak değerlendirilerek, enerji emilimini en az kütle ile başaran malzeme tespit edilmeye çalışılmıştır.

Sonuçlar, LS Prepost uygulaması ile incelenmiştir.

Plaka kütle katsayısı şu integrale hesaplanmıştır:

$$K\ddot{u}t\ddot{u}l\ddot{e} \text{ katsayısı} = \int_0^{0,006} (\rho_1(1-x/0,006)^p + \rho_2(1-(1-x/0,006)^p)) dx \quad (3.28)$$

3.3. Analizler

Bu bölümde ilk olarak, bu tez kapsamında yürütölen analiz çalışmalarının doğrulamasına yönelik çalışmalar anlatılacaktır.

Doğrulama kısmının ardından, incelenen 10 FDM türüne ilişkin analizler sunulacaktır. Ele alınan FDM'lerin literatürde konu edildiği en az bir kaynak, ilgili FDM başlığı altında yer alacaktır.

3.3.1. Doğrulama

Koşturulan analizlerin isabetli sonuç verdiğini anlamak için öncelikle Güneş ve Aydın'ın makalelerinde konu aldıkları durum incelenmiş, sonuçların tutarlılığına bakılmıştır.

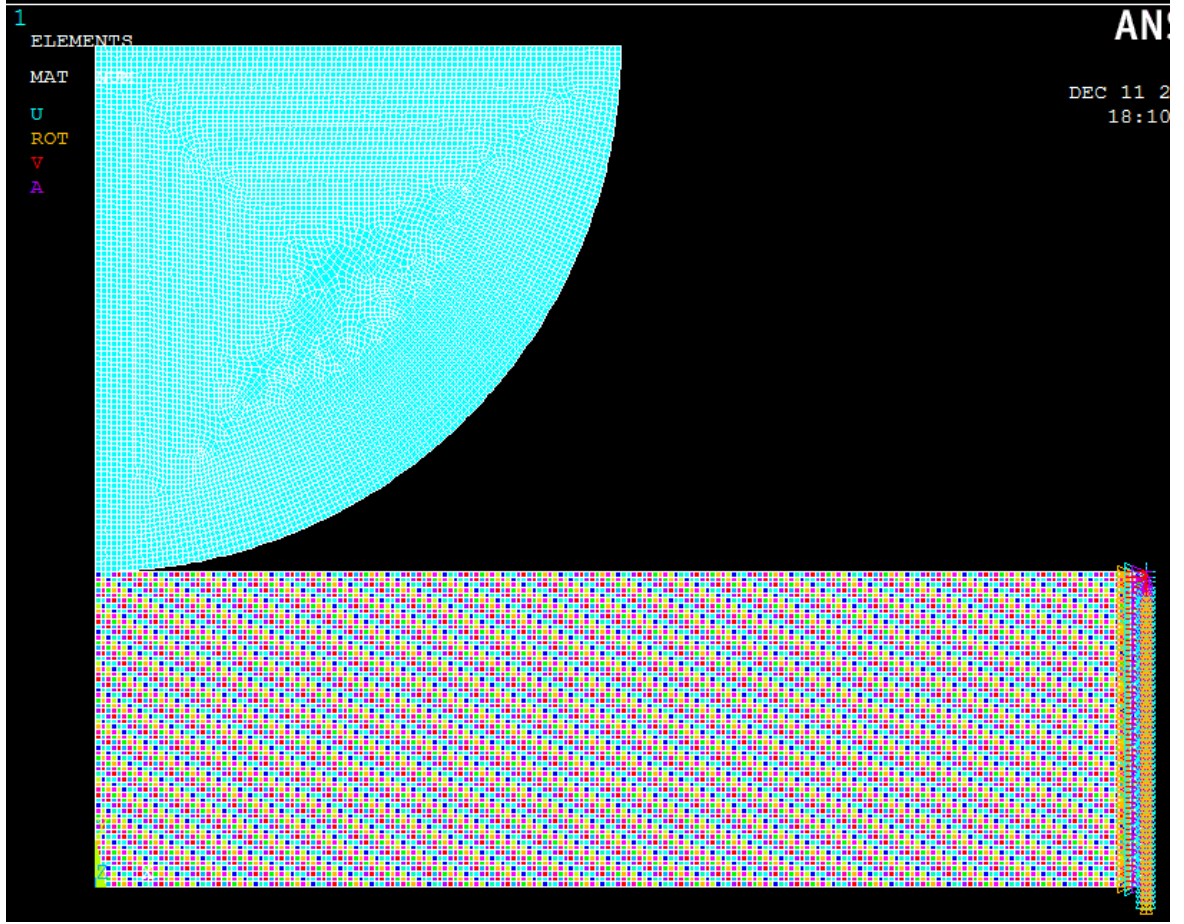
Güneş ve Aydın, alüminyum ve silisyum karbürden oluşan FDM ile yaptıkları düşük hızlı darbe testinde Çizelge 3.2'deki malzeme özelliklerini kullanmışlardır.

Çizelge 3.2. Güneş ve Aydın'ın çalışmasındaki malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri	Bileşenler		Çelik vurucu
	Alüminyum	Silisyum Karbür	
Young modöülü, E (GPa)	67	302	200
Poisson oranı, ν	0,33	0,17	0,32
Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	2702	3100	8160

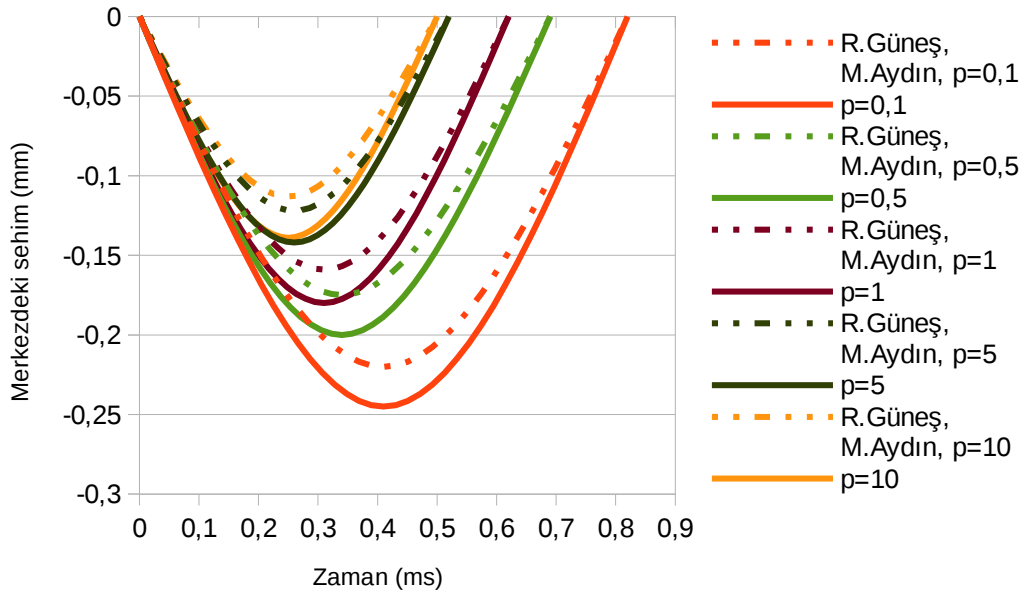
40 mm çapında ve 6 mm kalınlığındaki FD plakaya, 5,045 kg ağırlığında küresel uçlu vurucu ile 1 m/s hızında darbeler uygulamışlardır.

şekil 3.6 ve 3.7'de, doğrulama için koşturulan analizlerin sonuçları ile Güneş ve Aydın'ın sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmanın daha kolay yapılabilmesi adına, Güneş ve Aydın'ın çalışmasında oluşan temas süreleri, bu tezde kullanılan yöntemle koşturulan analiz sonuğlarına göre oluşan temas süreleriyle eşit gibi gösterilmiştir.

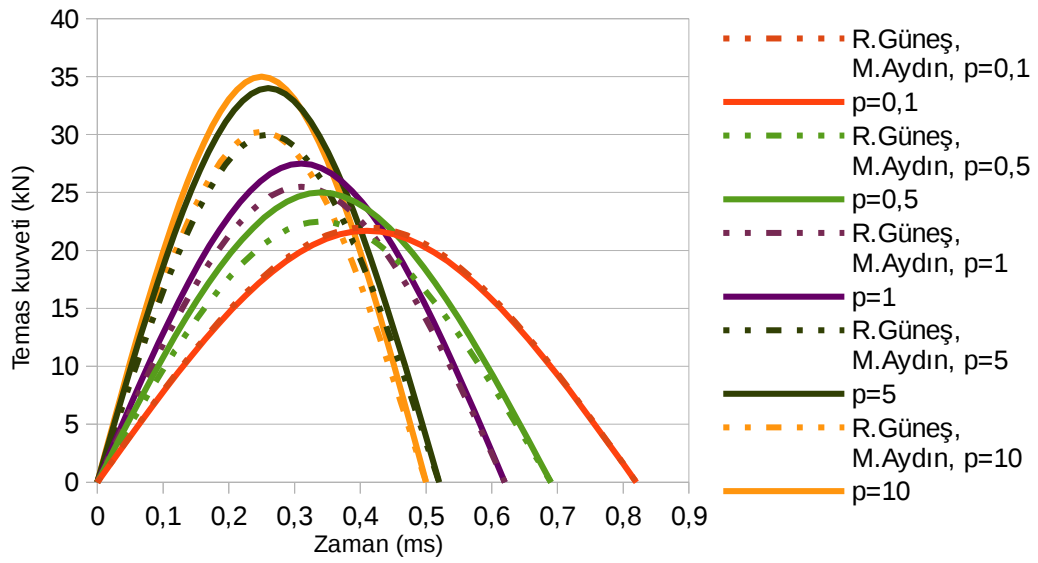


Şekil 3.5. ANSYS arayüzünde oluşturulan geometrik model

Karşılaştırmada genel tutarlılık görülmektedir. Bununla birlikte Güneş ve Aydın'ın çalışmasına göre sehim değerleri ve temas kuvveti daha fazla hesaplanmıştır. Bunun olası nedenleri, Güneş ve Aydın'ın çalışmasının 3 boyutlu olması ve bunun da etkisiyle eleman ve mesh yapısındaki farklılıktır.



Şekil 3.6. R.Güneş ve M.Aydın'ın çalışmasıyla yapılan karşılaştırma (sehim değerleri)



Şekil 3.7. R.Güneş ve M.Aydın'ın çalışmasıyla yapılan karşılaştırma (temas kuvveti değerleri)

3.3.2. Ni-Al₂O₃

Ni-Al₂O₃ FDM ikilisinin analiz sonuçları bu bölümde verilmiştir. Wang ve Zu bu malzeme ikilisini, aksenal hıza sahip dikdörtgen biçimli FDM plakaların dinamik termo-elastik davranışını inceledikleri çalışmalarında kullanmışlardır [25].

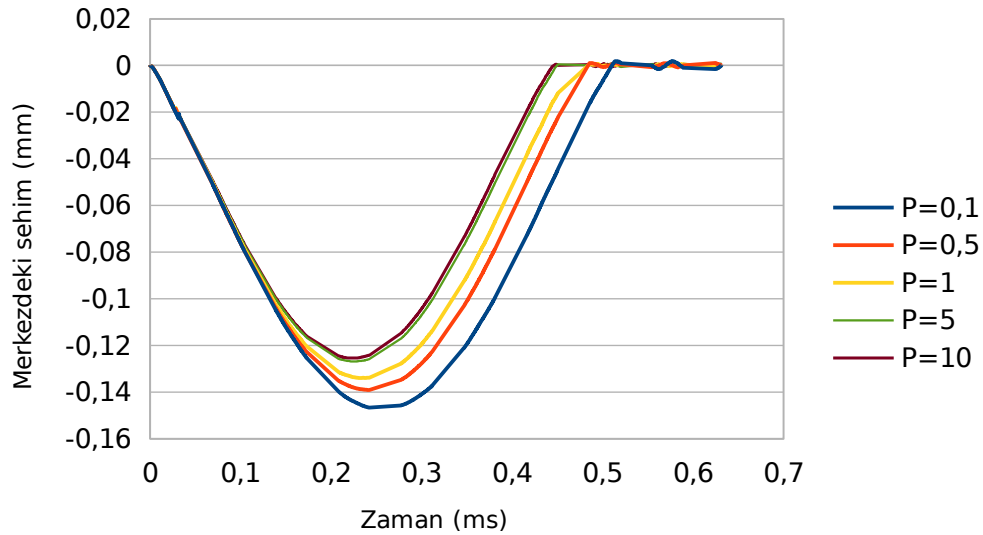
Çizelge 3.3'te malzeme özellikleri yer almaktadır.

Çizelge 3.3. Ni-Al₂O₃ malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri	Bileşenler	
	Nikel	Alumina
Young modülü, E (GPa)	224	349
Poisson oranı, ν	0,31	0,26
Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	8900	3950

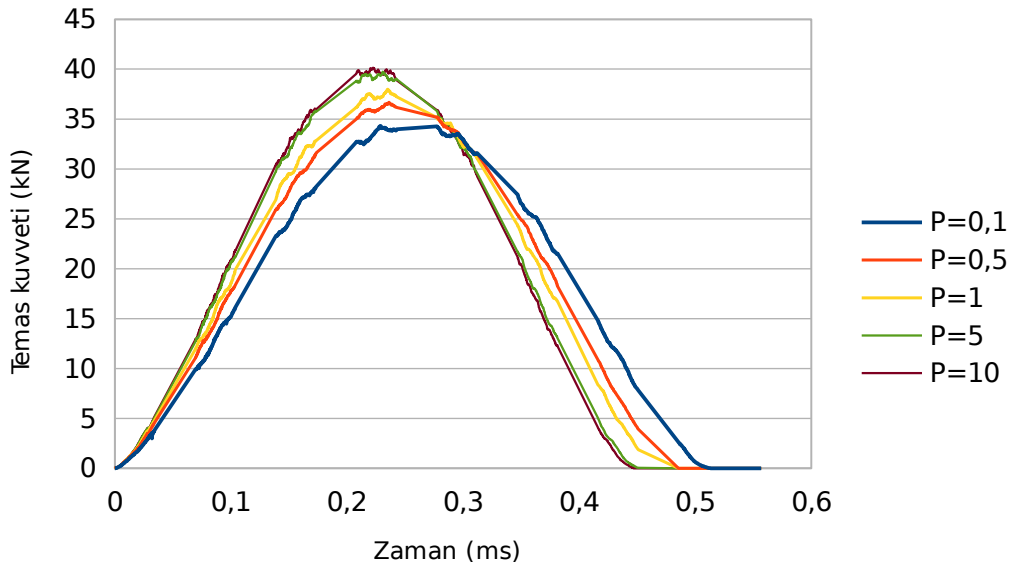
Şekil 3.8'de, elde edilen sehim eğrileri sunulmaktadır. FDM'deki seramik oran arttıkça sehim azalmaktadır. Seramik oranı en yüksek olan plakada en düşük sehim değeri olarak 0,125mm görülmüştür.

En yüksek sehim, metal oranı en yüksek olan malzemede 0,148mm olarak görülmüştür.



Şekil 3.8. Ni-Al₂O₃ sehim değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Plakalarda oluşan temas kuvvetleri Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Ni-Al₂O₃ temas kuvvetlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Seramik oran arttıkça temas kuvveti artmaktadır. Seramik oranı en yüksek malzemede, en yüksek 40 kN'luk kuvvet görülmüştür.

En düşük temas kuvveti ise, metal oranı en yüksek plakada 34,7 kN olarak hesaplanmıştır.

Plakaların kütle katsayıları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

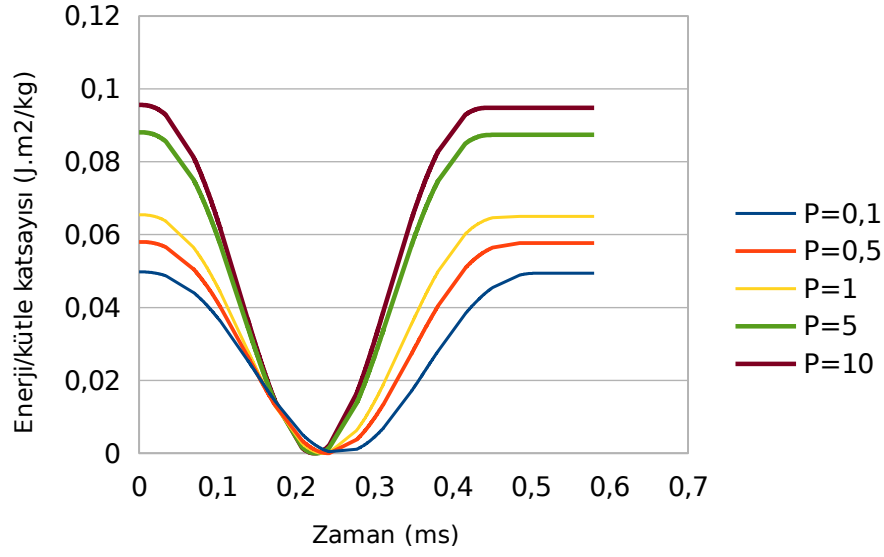
Vurucu enerjisinin, FDM plaka kütle katsayısına oranlı değişimi Şekil 3.10'da verilmiştir. Seramik zengin plakanın enerji/kütle katsayısı oranı en yüksektir.

Şekil 3.10'da, eğrilerin enerji/kütle ekseninde 0'ı gösterdiği noktalar, vurucunun durdurulduğu anı göstermektedir. Buna göre grafik aynı zamanda, seramik zengin plakanın vurucuyu en kısa sürede durduran plaka olduğunu da göstermektedir.

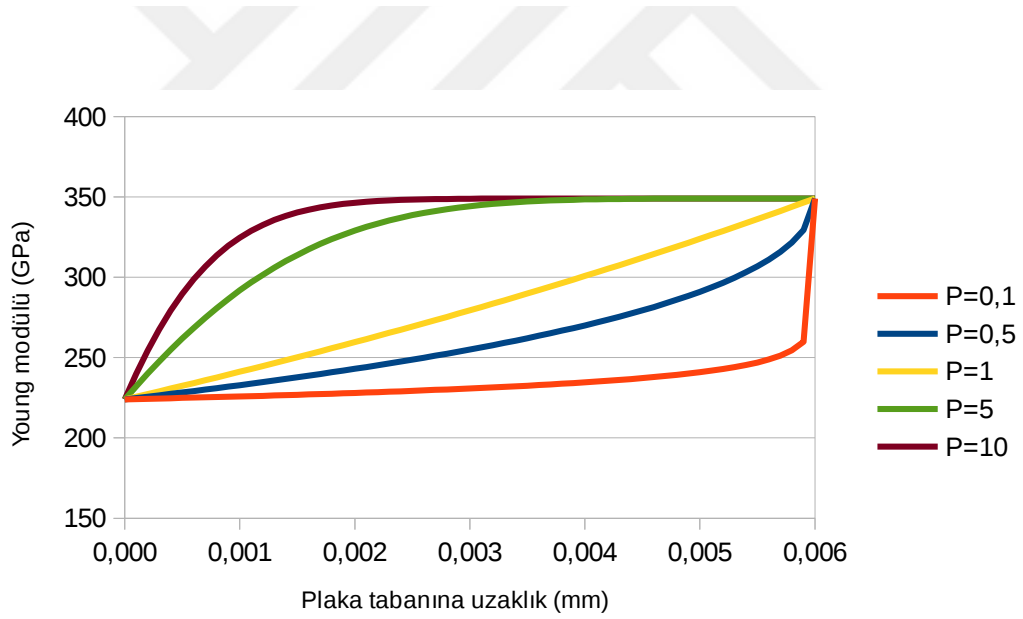
Çizelge 3.4. Ni-Al₂O₃ plakaların kütle katsayıları

	P=0,1	P=0,5	P=1	P=5	P=10
Kütle katsayısı (kg/m ²)	50,7	43,5	38,55	28,65	26,4

FDM plakada Young modülünün tabakalara göre değişimi Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.10. Ni-Al₂O₃ enerji/kütle katsayısı değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi



Şekil 3.11. FDM hacim oranı parametresine göre malzemenin kalınlığı boyunca değişen Young modülü (Ni-Al₂O₃)

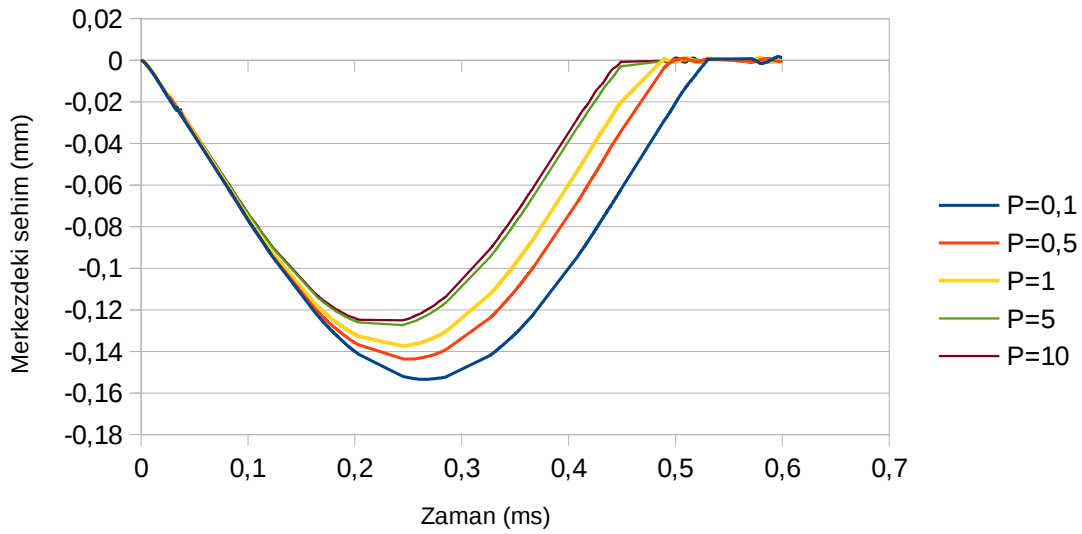
3.3.3. AISI 304 - Si₃N₄

Dai ve arkadaşlarının, FDM literatürünü derledikleri çalışmalarında, AISI 304 – Si₃N₄ malzeme ikilisine yer verilmiştir [26]. Bu FDM ikilisinin analiz sonuçları Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te sunulmuştur. Malzeme özellikleri Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. AISI 304 - Si₃N₄ malzeme özellikleri

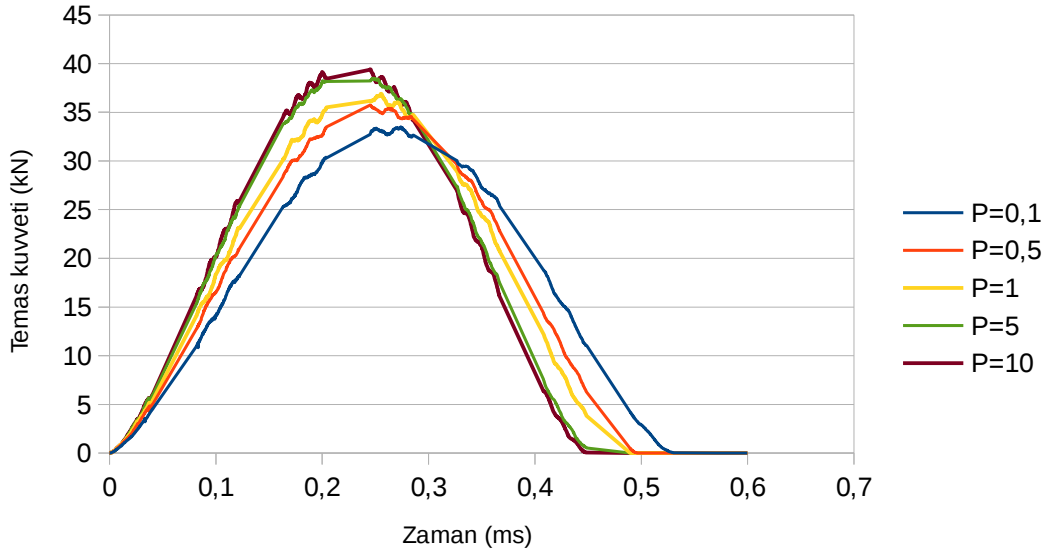
Malzeme Özellikleri	Bileşenler	
	AISI 304	Silisyum Nitrür
Young modülü, E (GPa)	201	348
Poisson oranı, ν	0,33	0,24
Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	8166	2370

Şekil 3.12'de, en az deplasmanın seramik zengin plakada olduğu görülmektedir. Bu plakada görülen en yüksek sehım değeri 0.125 mm'dir.

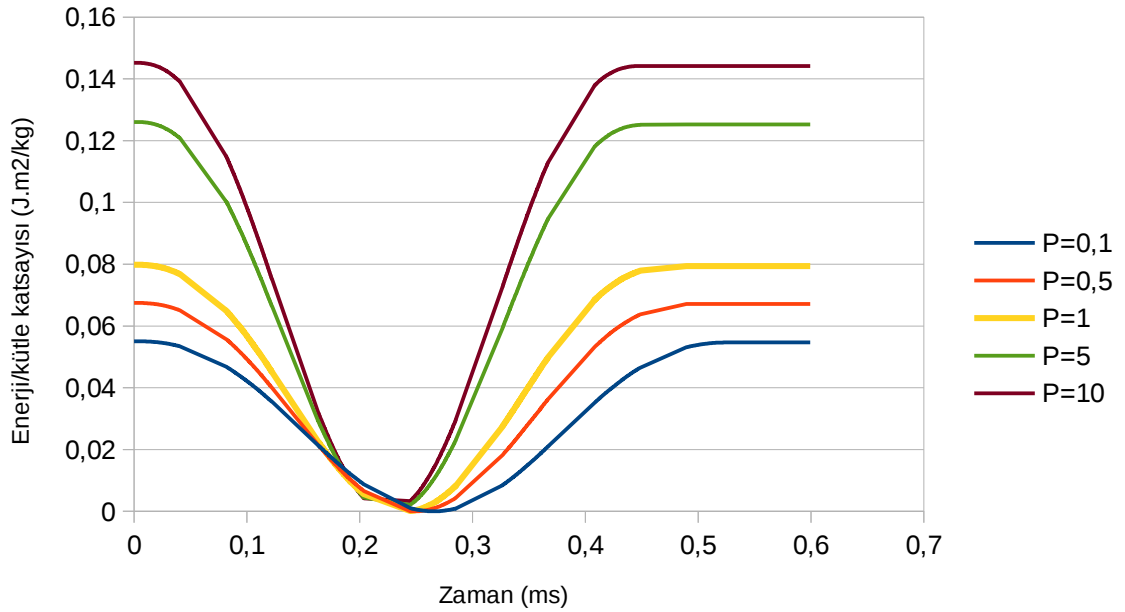


Şekil 3.12. AISI 304 - Si₃N₄ sehım değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Şekil 3.13'te, en yüksek temas kuvvetinin seramik zengin malzemede olduğu görülmektedir. En yüksek değeri 39,4 kN'dur. Metal zengin malzemede ise daha düşük temas kuvvetleri görülmektedir. Metal zengin FDM plakada en yüksek temas kuvveti 33,5 kN'dur.



Şekil 3.13. AISI 304 - Si_3N_4 temas kuvvetlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi



Şekil 3.14. AISI 304 - Si_3N_4 enerji/kütle katsayısı değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

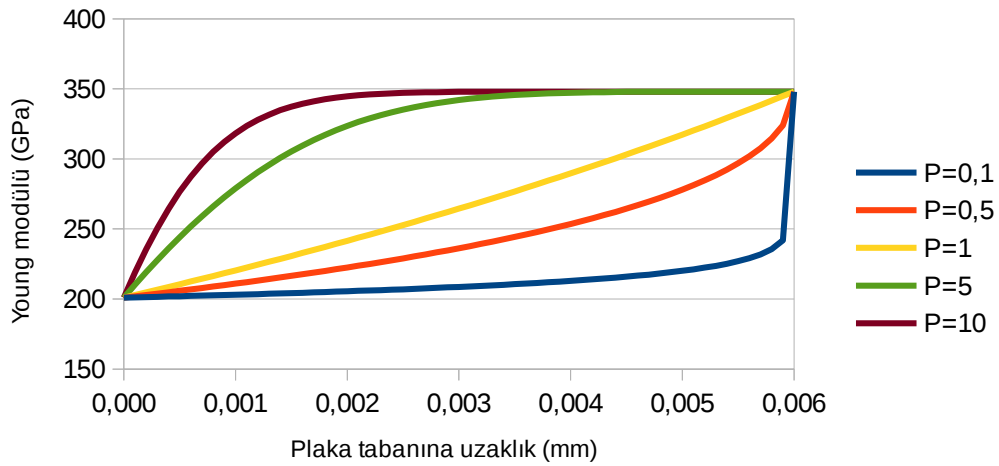
Şekil 3.14, vurucu enerjisinin plaka kütle katsayısına oranlı değişimini göstermektedir. En yüksek enerji/kütle katsayısı oranına sahip plakanın seramik zengin plaka olduğu görülmektedir. Vurucuyu en hızlı durduran plaka da yine seramik zengin plakadır.

Plakaların kütle katsayıları Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. AISI 304 - Si_3N_4 plakaların kütle katsayıları

	P=0,1	P=0,5	P=1	P=5	P=10
Kütle katsayısı (kg/m^2)	45,83	37,4	31,61	20,02	17,38

Şekil 3.15'te, plakalardaki, tabakalara göre değişen Young modülü eğrileri verilmiştir.



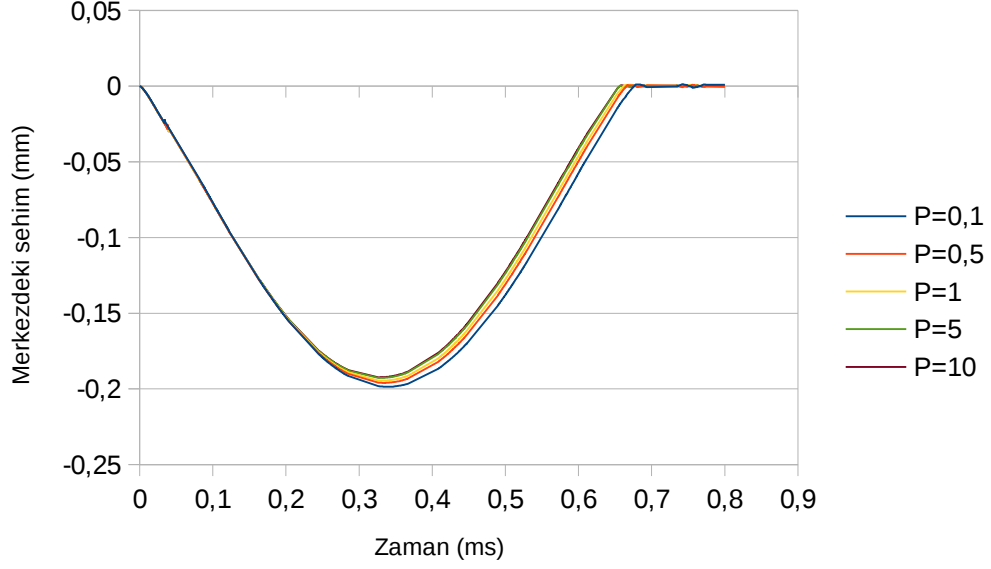
Şekil 3.15. FDM hacim oranı parametresine göre malzemenin kalınlığı boyunca değişen Young modülü (AISI 304 - Si_3N_4)

3.3.4. Ti-6Al-4V - ZrO_2

Ti-6Al-4V – ZrO_2 FDM çifti de yine Dai ve arkadaşlarının çalışmasında yer alan bir diğer malzemedir [26]. Bu malzemeye ilişkin analiz sonuçları Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de sunulmuştur. Malzeme özellikleri Çizelge 3.7'de verilmiştir.

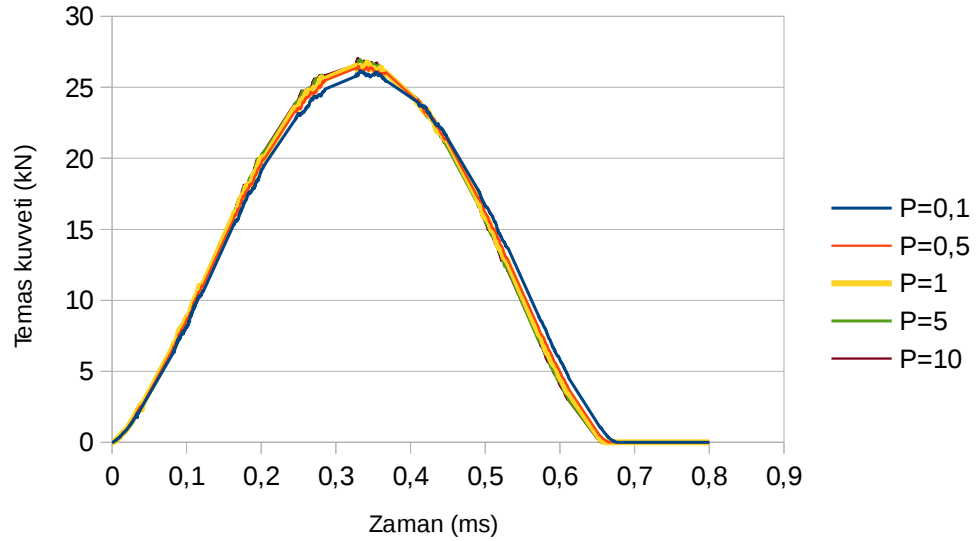
Çizelge 3.7. Ti-6Al-4V – ZrO_2 malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri	Bileşenler	
	Ti-6Al-4V	Zirkonyum
Young modülü, E (GPa)	123	132
Poisson oranı, ν	0,29	0.33
Yoğunluk, ρ (kg/m^3)	4420	3657



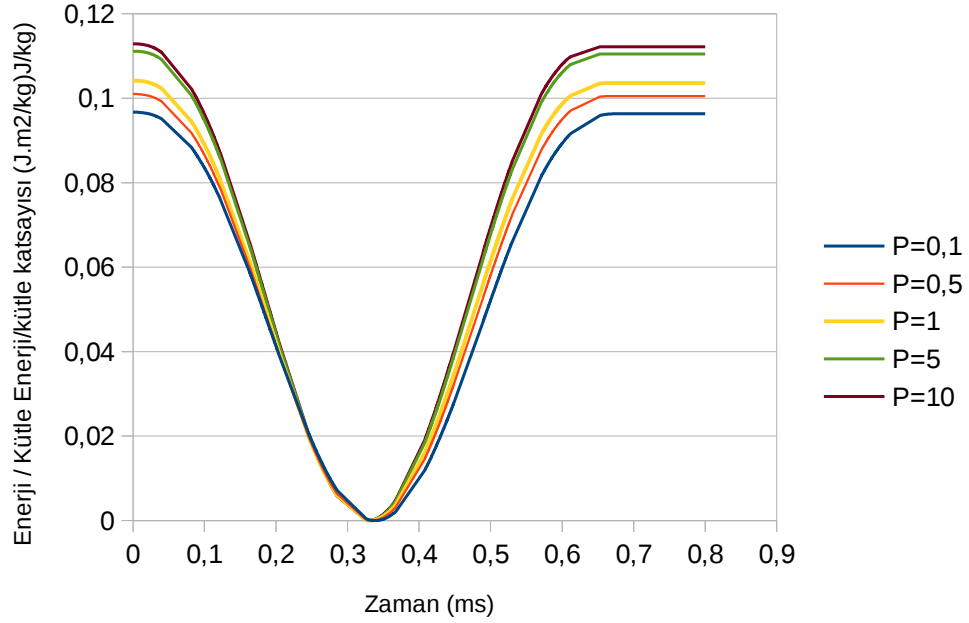
Şekil 3.16. Ti-6Al-4V – ZrO₂ sehim değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Şekil 3.16’da, seramik zengin plakanın en yüksek deplasman değeri 0,192 mm olarak görülürken, metal zengin plakanın en yüksek deplasmanı ise 0,199 mm’dir. Şekil 3.17’de, en yüksek temas kuvvetinin seramik zengin malzemede olduğu görülmektedir. Bu plakada en yüksek temas kuvveti 27,05 kN iken, en düşük temas kuvvetlerinin görüldüğü metal zengin plakadaki en yüksek temas kuvveti 26,17 kN’dur.



Şekil 3.17. Ti-6Al-4V – ZrO₂ temas kuvvetlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Şekil 3.18’de FDM plakaların enerji/kütle katsayısı eğrileri görülmektedir. En yüksek oran seramik zengin malzemededir ve vurucuyu en kısa sürede durduran yine seramik zengin malzemedir.



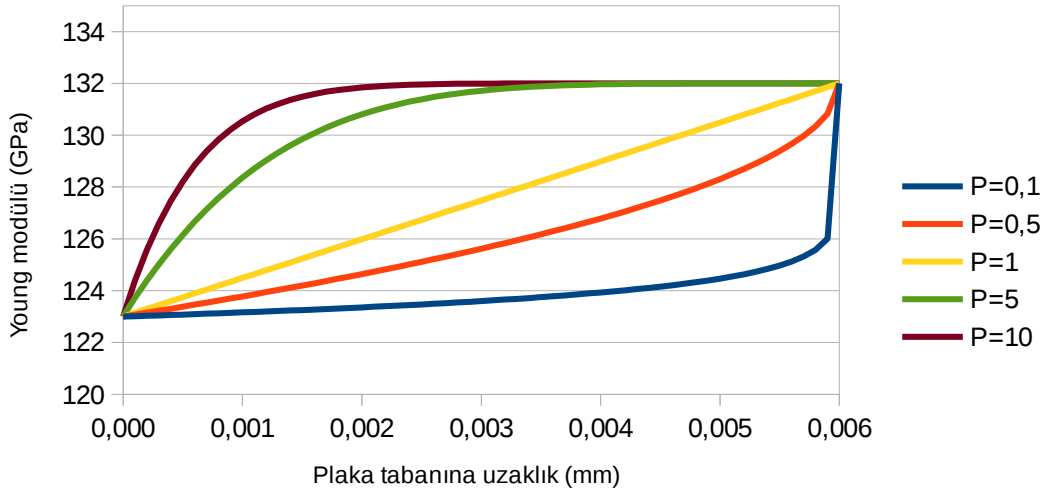
Şekil 3.18. Ti-6Al-4V – ZrO₂ enerji/kütle katsayısı değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Plakaların kütle katsayıları Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Ti-6Al-4V – ZrO₂ plakaların kütle katsayıları

	P=0,1	P=0,5	P=1	P=5	P=10
Kütle katsayısı (kg/m ²)	26,10	24,99	24,23	22,71	22,36

Plakalarda, tabakalara göre Young modülü değişimi Şekil 3.19’da verilmiştir.



Şekil 3.19. FDM hacim oranı parametresine göre malzemenin kalınlığı boyunca değişen Young modülü (Ti-6Al-4V – ZrO₂)

3.3.5. Nikel - Bazalt

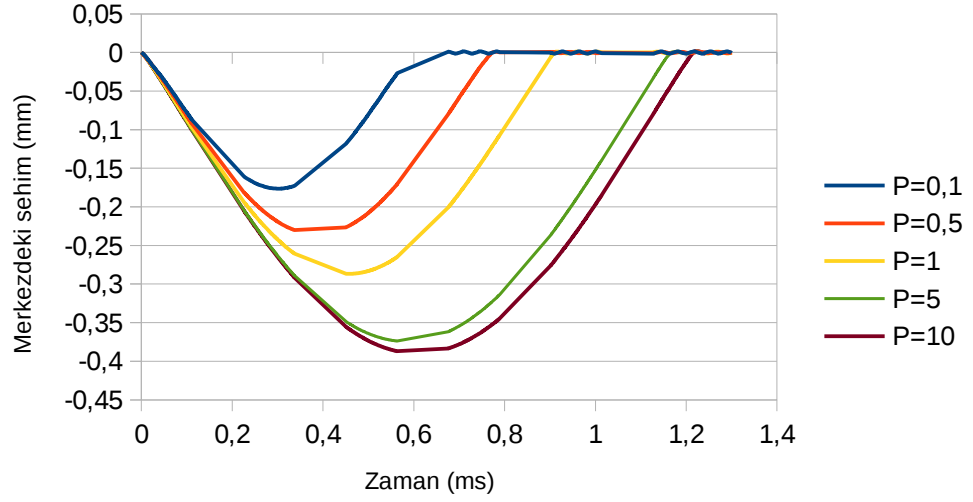
Nikel – Bazalt FDM, Baştürk ve arkadaşlarının patlama yükü altında inceledikleri bir malzemedir [27]. Bu malzemeyle elde edilen darbe analizi sonuçları Şekil 3.20, Şekil 3.21, Şekil 3.22 ile sunulmuştur.

Çizelge 3.9. Nikel – Bazalt malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri	Bileşenler	
	Nikel	Bazalt
Young modülü, E (GPa)	200	25
Poisson oranı, ν	0,32	0,09
Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	8900	2800

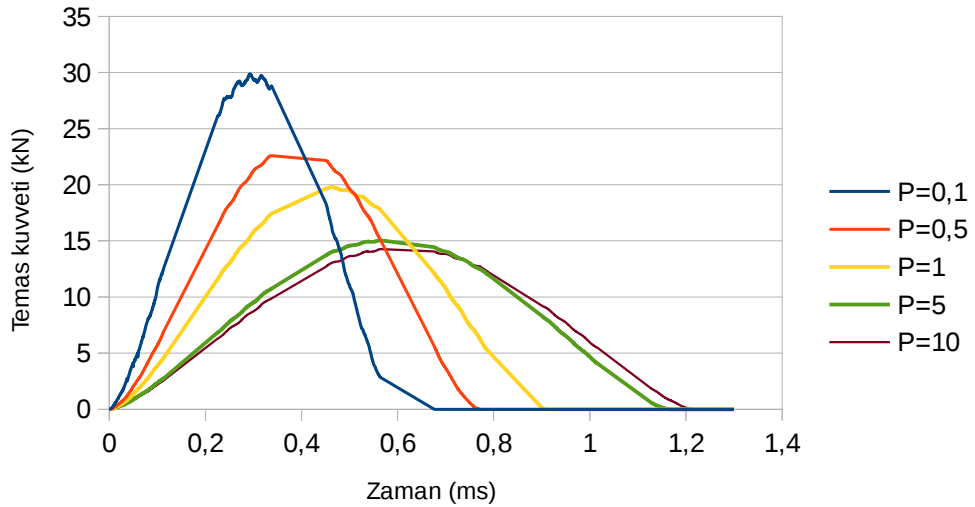
Nikel ve bazaltla ilgili analizler, koşturulan analizler içinde çözüm en zor elde edilen olmuştur. 1.3 ms'lik süre 10000 adımda çözülerek aşağıda sunulan eğriler elde edilmiştir. Malzemelerin LS-DYNA ortamındaki karakteristiğini belirleyen, Çizelge 3.9'da verilen değerlerin mertebe bakımından birbirlerinden çok farklı olmasının, modellemedeki bu zorluğa neden olduğu değerlendirilmiştir.

Şekil 3.20'de bazalt zengin FDM plakada en büyük sehim 0,385mm iken, nikel zengin malzemede en büyük sehim 0,176mm olmuştur.



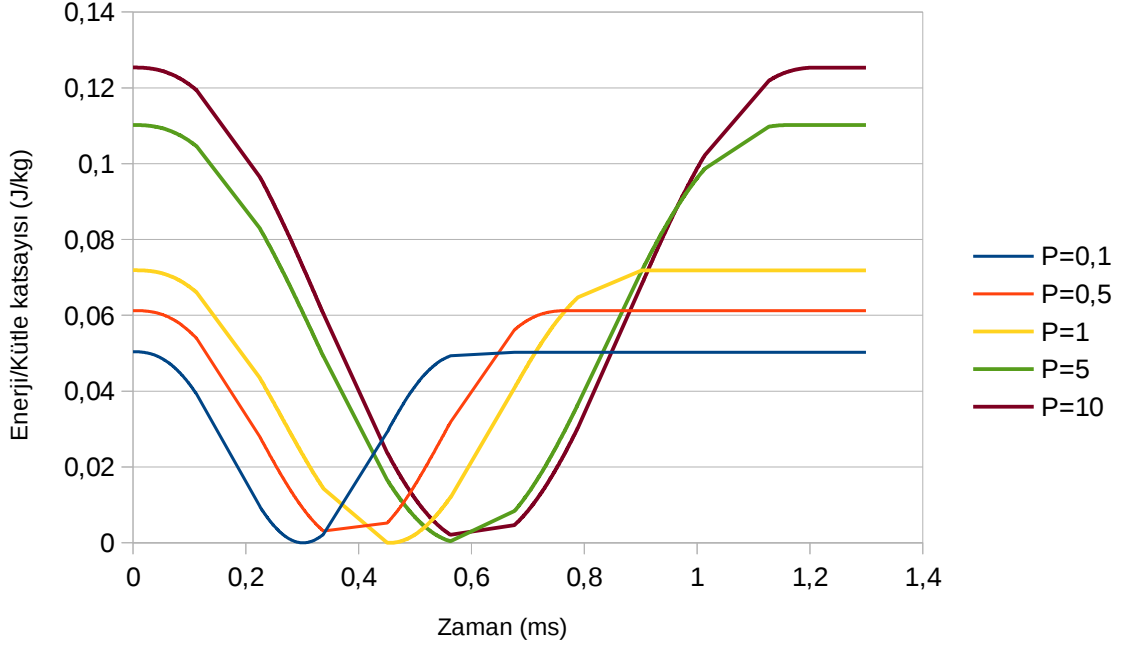
Şekil 3.20. Nikel – Bazalt sehim değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Şekil 3.21’de verilen eğrilerde, en yüksek temas kuvveti nikel zengin malzemede 29,87 kN olarak görülürken, bazalt zengin plakanın en yüksek temas kuvveti 14,27 kN olmuştur.



Şekil 3.21. Nikel – Bazalt temas kuvvetlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Şekil 3.22, 5 FDM plakanın enerji/kütle katsayısı eğrilerini göstermektedir. Bazalt zengin malzemenin enerji/kütle katsayısı oranının yüksek çıkması, bazaltın düşük özkütlesi göz önüne alındığında tahmin edilebilir. Öte yandan, vurucuyu nikel zengin plaka daha kısa sürede durdurmaktadır.



Şekil 3.22. Nikel – Bazalt enerji/kütle katsayısı değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Plakaların kütle katsayıları Çizelge 3.10’da verilmiştir.

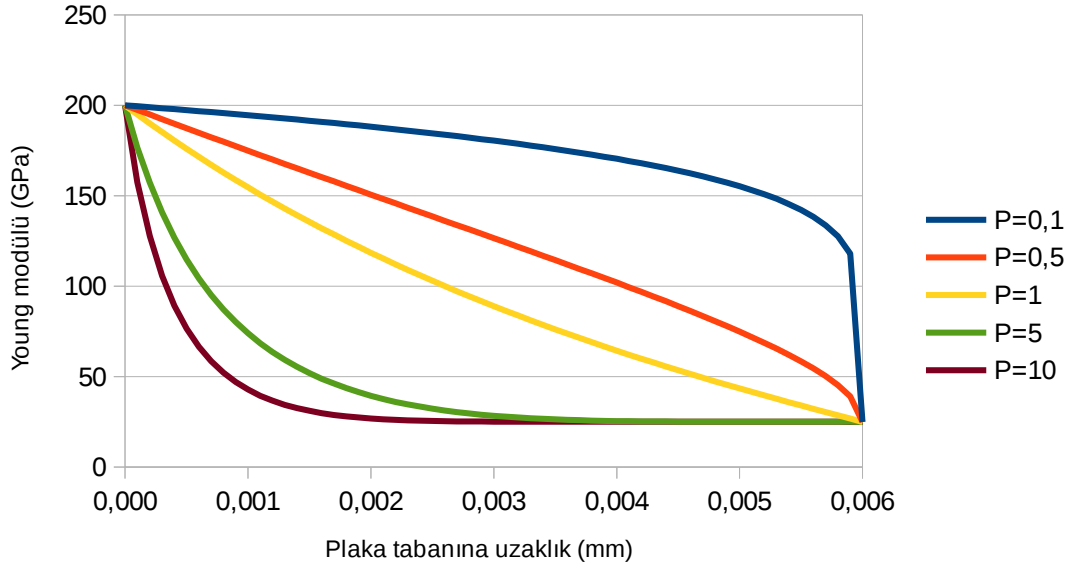
Çizelge 3.10. Nikel – Bazalt plakaların kütle katsayıları

	P=0,1	P=0,5	P=1	P=5	P=10
Kütle katsayısı (kg/m ²)	50,07	41,20	35,10	22,90	20,13

Plakalarda, tabakaya göre değişen Young modülü değerleri Şekil 3.23’te verilmiştir.

3.3.6. Paslanmaz Çelik - ZrO₂

Lopez-Esteban ve arkadaşları ile Ge ve arkadaşlarının, paslanmaz çelik ve ZrO₂ ikilisinin oluşturduğu FDM ile çalışmaları bulunmaktadır [28], [29]. Bu FDM ile ilgili analiz sonuçları Şekil 3.24, Şekil 3.25, Şekil 3.26’da sunulmuştur. Malzeme özellikleri Çizelge 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.23. FDM hacim oranı parametresine göre malzemenin kalınlığı boyunca değişen Young modülü (Nikel – Bazalt)

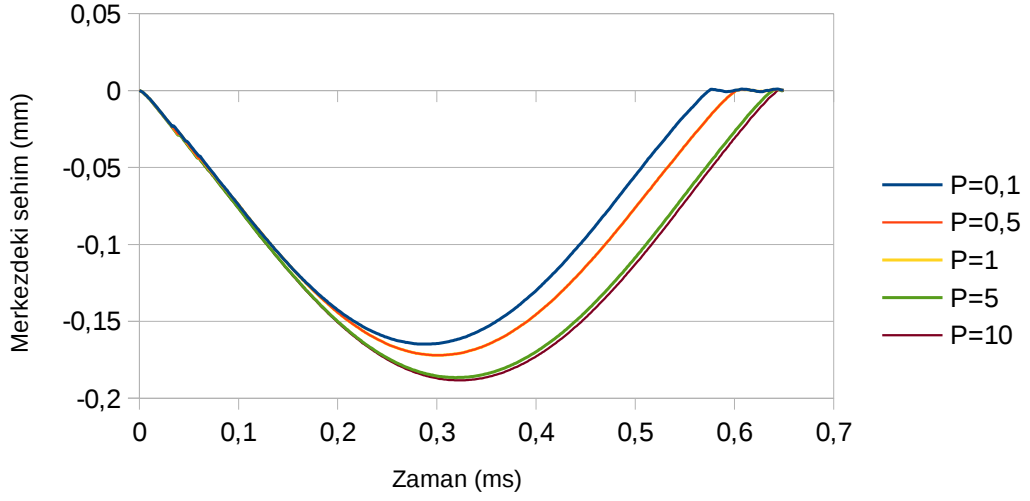
Çizelge 3.11. Paslanmaz çelik – ZrO_2 malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri	Bileşenler	
	Paslanmaz Çelik	ZrO_2
Young modülü, E (GPa)	193	132
Poisson oranı, ν	0,27	0.33
Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	8000	3657

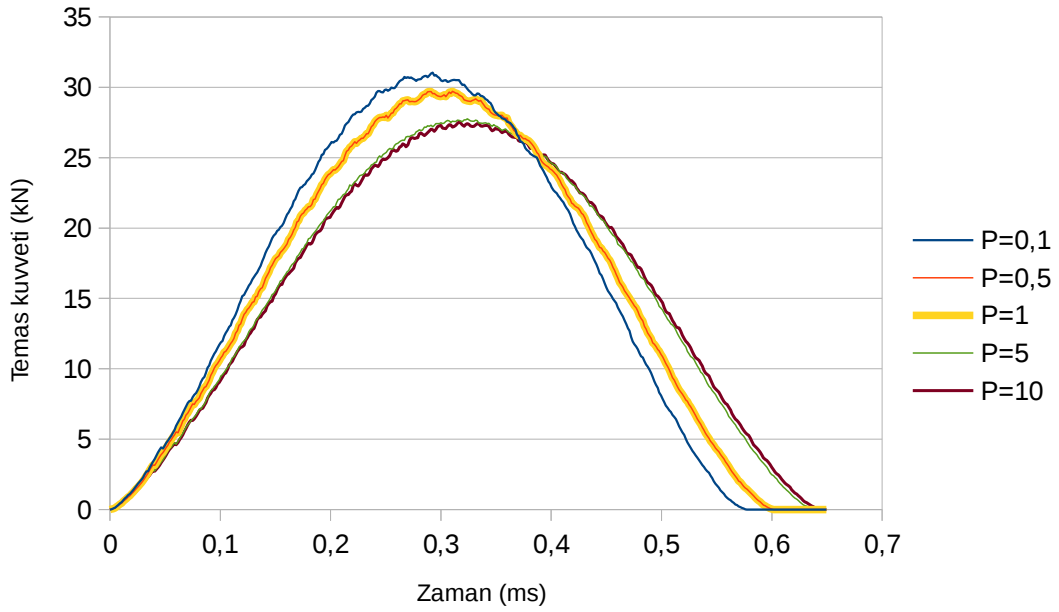
Şekil 3.24'te paslanmaz çelik ve zirkonyumdan oluşan 5 farklı FDM'in sehim değerleri verilmiştir. Seramik zengin malzemede görülen en yüksek sehim 0,188mm olurken, metal zengin malzemedeki en yüksek sehim 0,165mm olmuştur.

Şekil 3.25'te, metal zengin FD plakanın en yüksek temas kuvvetinin 31,04 kN olduğu görülürken, seramik zengin FD plakadaki en yüksek temas kuvveti 27,53 kN'dur.

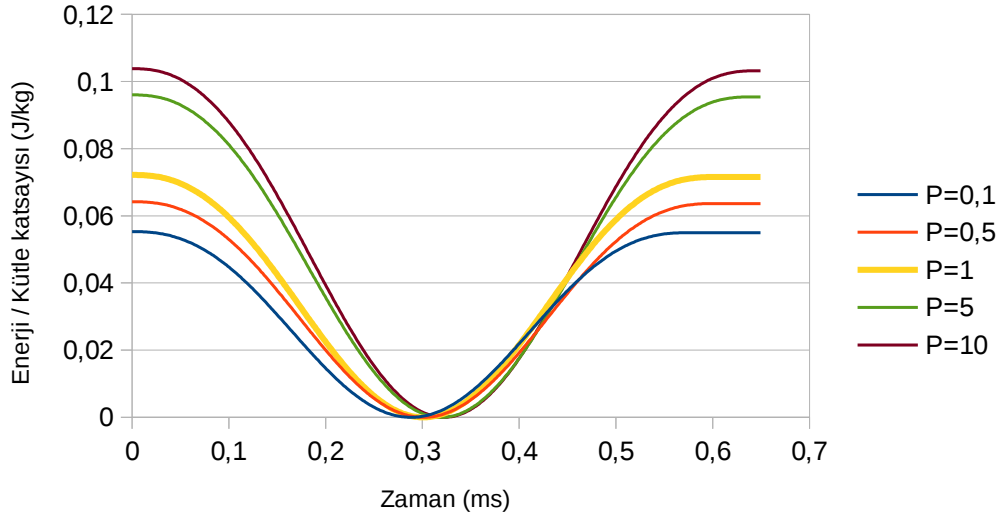
Şekil 3.26'da görüldüğü gibi, seramik zengin plaka için enerji/kütle oranı en yüksektir. Vurucuyu en hızlı durduran plaka ise metal zengin plakadır.



Şekil 3.24. Paslanmaz çelik – ZrO_2 sehim değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi



Şekil 3.25. Paslanmaz çelik – ZrO_2 temas kuvvetlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi



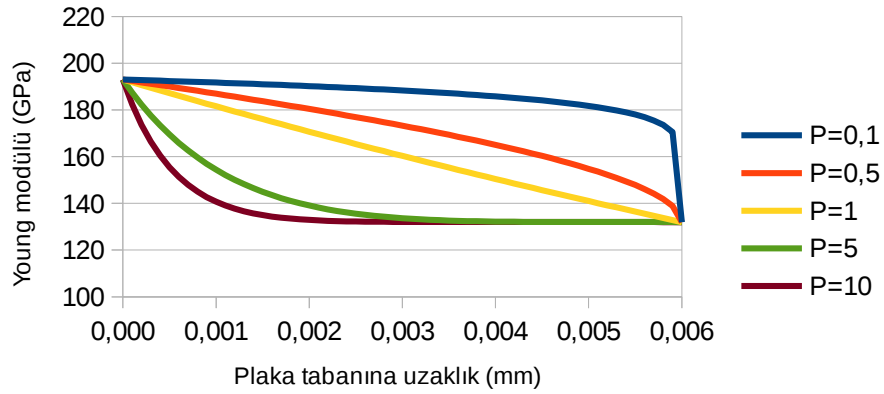
Şekil 3.26. Paslanmaz çelik – ZrO_2 enerji/kütle katsayısı değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Plakaların kütle katsayıları Çizelge 3.12’de verilmiştir.

Çizelge 3.12. Paslanmaz çelik – ZrO_2 plakaların kütle katsayıları

	P=0,1	P=0,5	P=1	P=5	P=10
Kütle katsayısı (kg/m^2)	45,63	39,31	34,97	26,29	24,31

Plakalardaki Young modülü değişimi Şekil 3.27’de verilmiştir.



Şekil 3.27. FDM hacim oranı parametresine göre malzemenin kalınlığı boyunca değişen Young modülü (Paslanmaz çelik – ZrO_2)

3.3.7. Ti - TiB₂

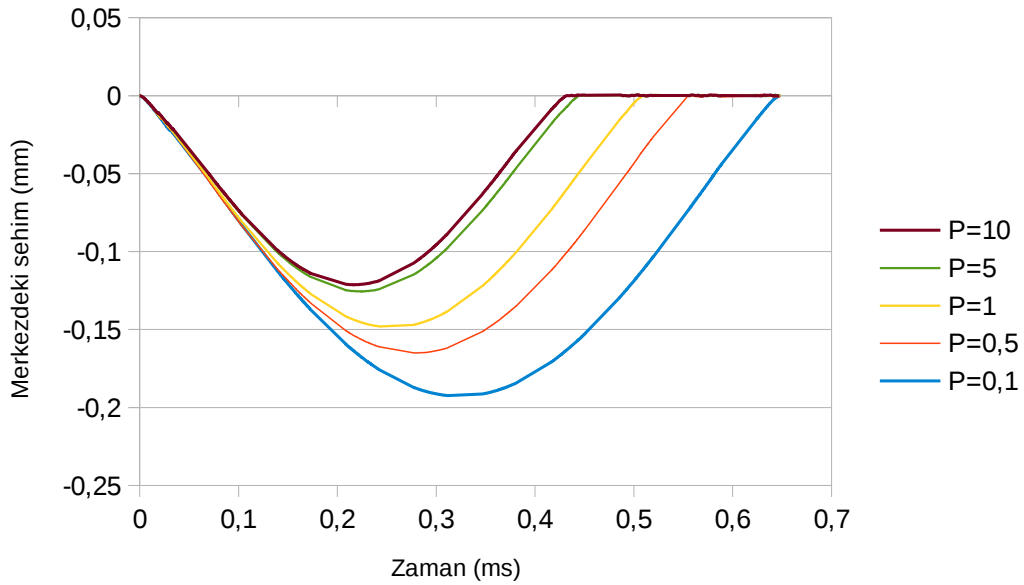
Titanyum ve titanyum diborür malzemelerinin kullanıldığı FDM örnekler, balistik alanındaki çalışmalar kapsamında incelenmiştir [4]. Malzeme özellikleri Çizelge 3.13'te verilmiştir.

Titanyum ve titanyum diborür malzemeleriyle oluşturulan 5 farklı FD plakadan elde edilen sonuçlar Şekil 3.28, Şekil 3.29 ve Şekil 3.30'da verilmiştir.

Sehim değerleri Şekil 3.28'de sunulmuştur. Seramik zengin malzemenin en yüksek sehim 0,121mm olurken, metal zengin malzemedeki en yüksek sehim 0,192mm'dir.

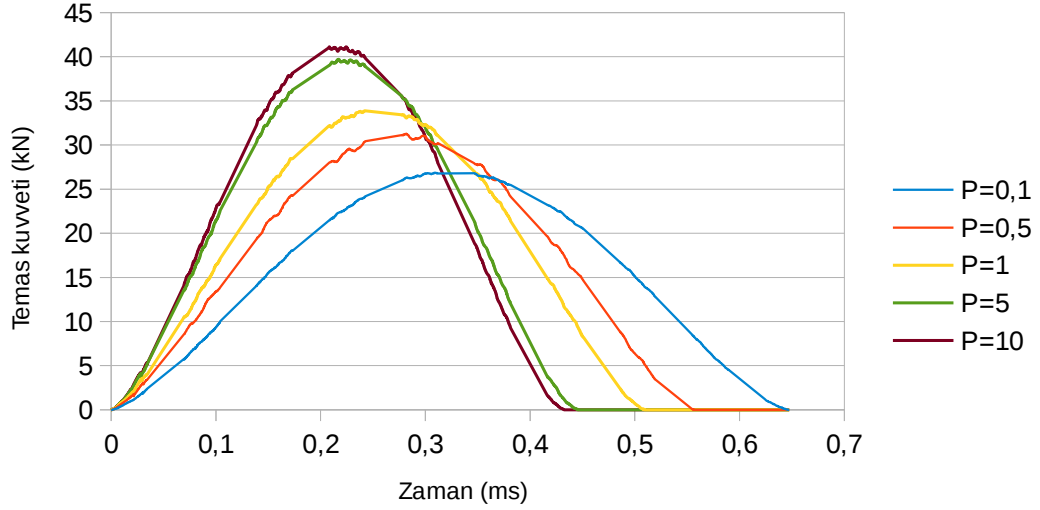
Çizelge 3.13. Ti – TiB₂ malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri	Bileşenler	
	Ti	TiB ₂
Young modülü, E (GPa)	116	420
Poisson oranı, ν	0,34	0,13
Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	4500	4520



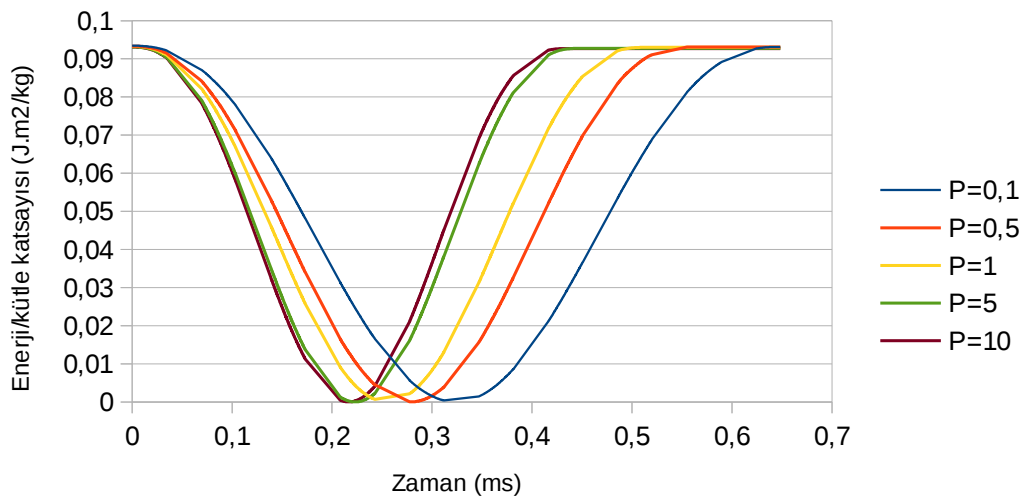
Şekil 3.28. Ti – TiB₂ sehim değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Plakalarda oluşan temas kuvvetleri Şekil 3.29'da verilmiştir. Buna göre, en yüksek temas kuvveti 41,1 kN olarak seramik zengin plakada görülürken, metal zengin plakada görülen en yüksek temas kuvveti 26,9 kN'dur.



Şekil 3.29. Ti – TiB₂ temas kuvvetlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Şekil 3.30'da, tüm plakaların enerji/kütle katsayısı değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. FDM'yi meydana getiren malzemelerin özkütlelerinin birbirlerine çok yakın olduğu düşünüldüğünde bu beklenen bir durumdur. Bununla birlikte, seramik zengin plakanın, vurucuyu en kısa sürede durduran malzeme olduğu görülmektedir.



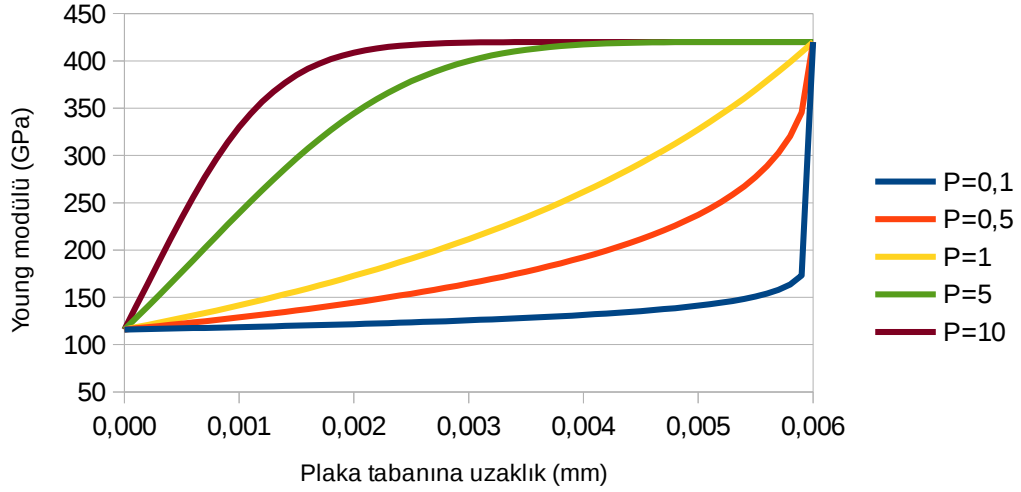
Şekil 3.30. Ti – TiB₂ enerji/kütle katsayısı değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Plakaların kütle katsayıları Çizelge 3.14'te verilmiştir.

Çizelge 3.14. Ti – TiB₂ plakaların kütle katsayıları

	P=0,1	P=0,5	P=1	P=5	P=10
Kütle katsayısı (kg/m ²)	27,01	27,04	27,06	27,10	27,11

Tabakalara göre Young modülündeki değişim Şekil 3.31'de verilmiştir.



Şekil 3.31. FDM hacim oranı parametresine göre malzemenin kalınlığı boyunca değişen Young modülü (Ti – TiB₂)

3.3.8. SUS 316 – Al₂O₃

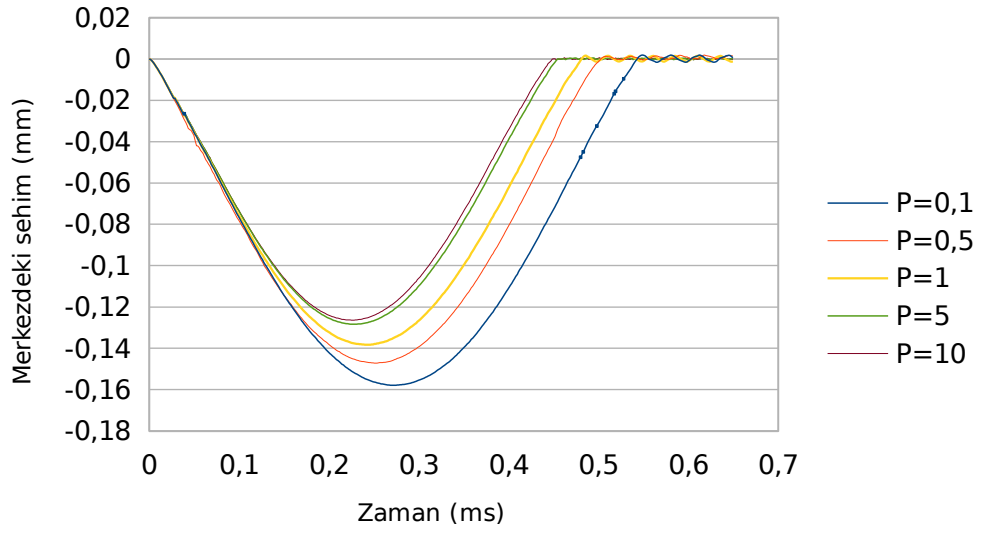
Radwan ve arkadaşları, SUS 316 – Al₂O₃ malzeme ikilisiyle çalışmışlardır [30]. Bu malzemeyele koşturulan analizlerin sonuçları Şekil 3.32, Şekil 3.33 ve Şekil 3.34'te verilmiştir. Malzeme özellikleri Çizelge 3.15'te yer almaktadır.

Çizelge 3.15. SUS 316 – Al₂O₃ malzeme özellikleri

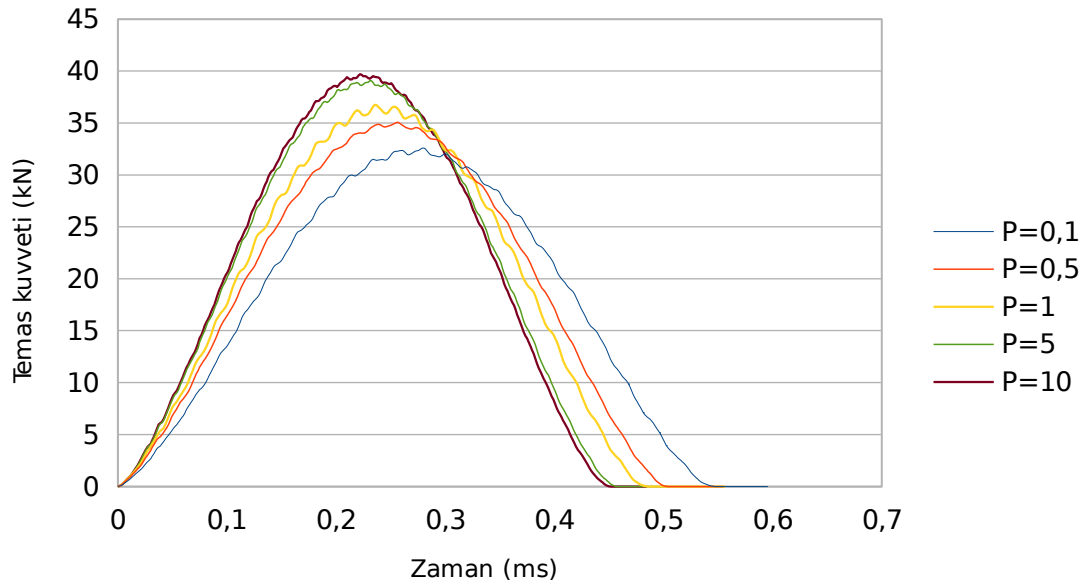
Malzeme Özellikleri	Bileşenler	
	SUS 316	Al ₂ O ₃
Young modülü, E (GPa)	193	349
Poisson oranı, ν	0,27	0,26
Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	8000	3950

SUS 316 sınıfı paslanmaz çelik ve aluminadan oluşan 5 farklı FDM plakada görülen sehim değerlerine ilişkin eğriler Şekil 3.32'de verilmiştir. Seramik zengin

plakada görülen en yüksek sehim değeri 0,126 mm iken, metal zengin plakadaki en yüksek sehim 0,158 mm olmuştur.



Şekil 3.32. SUS 316 – Al_2O_3 sehim değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

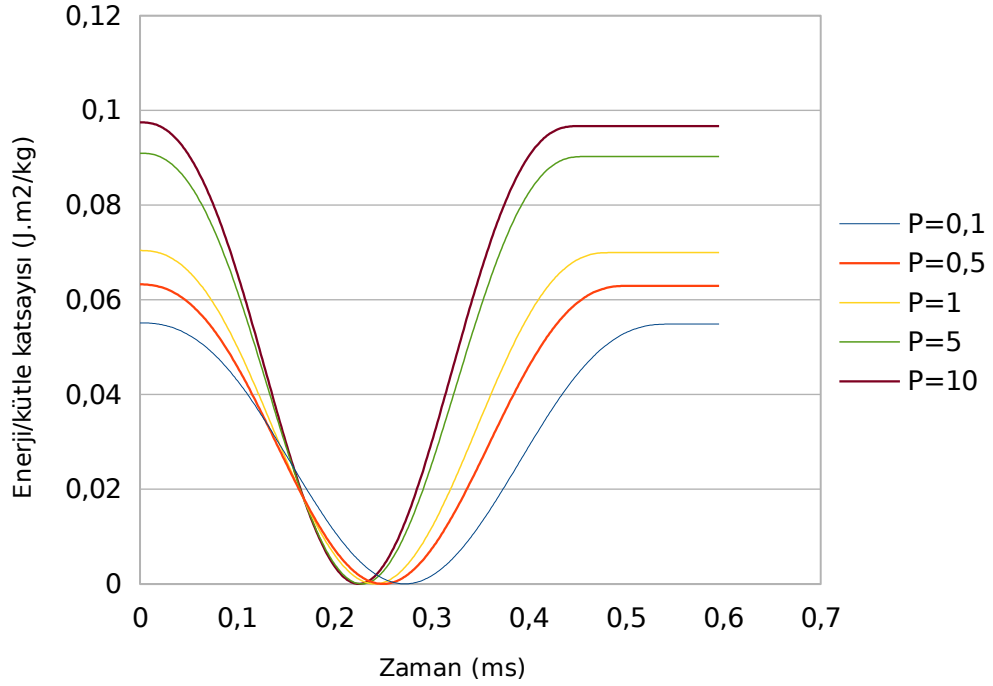


Şekil 3.33. SUS 316 – Al_2O_3 temas kuvvetlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Plakalarda oluşan temas kuvvetleri şekil 3.33'te verilmiştir. Metal zengin plakada görülen en yüksek temas kuvveti 32,6 kN, seramik zengin plakada görülen en yüksek temas kuvveti 39,7 kN'dur.

Vurucu enerjisinin FDM plakaların kütle katsayısıyla orantılı değişimi şekil 3.34'te verilmiştir. Seramik zengin plakada enerji/kütle oranının en yüksek olduğu ve yine seramik zengin plakanın vurucuyu en kısa sürede durdurduğu görülmektedir.

FDM plakaların kütle katsayıları ise Çizelge 3.16'da verilmiştir.

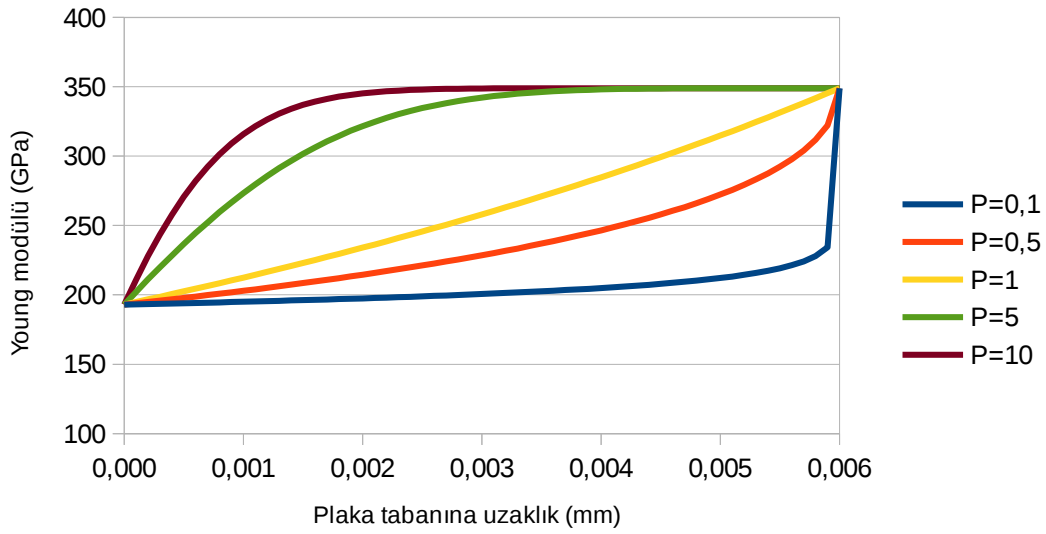


Şekil 3.34. SUS 316 – Al_2O_3 enerji/kütle katsayısı değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Çizelge 3.16. SUS 316 – Al_2O_3 plakaların kütle katsayıları

	P=0,1	P=0,5	P=1	P=5	P=10
Kütle katsayısı (kg/m^2)	45,79	39,90	35,85	27,75	25,91

Young modülünün plakalardaki değişimi Şekil 3.35'te verilmiştir.



Şekil 3.35. FDM hacim oranı parametresine göre malzemenin kalınlığı boyunca değişen Young modülü (SUS 316 – Al_2O_3)

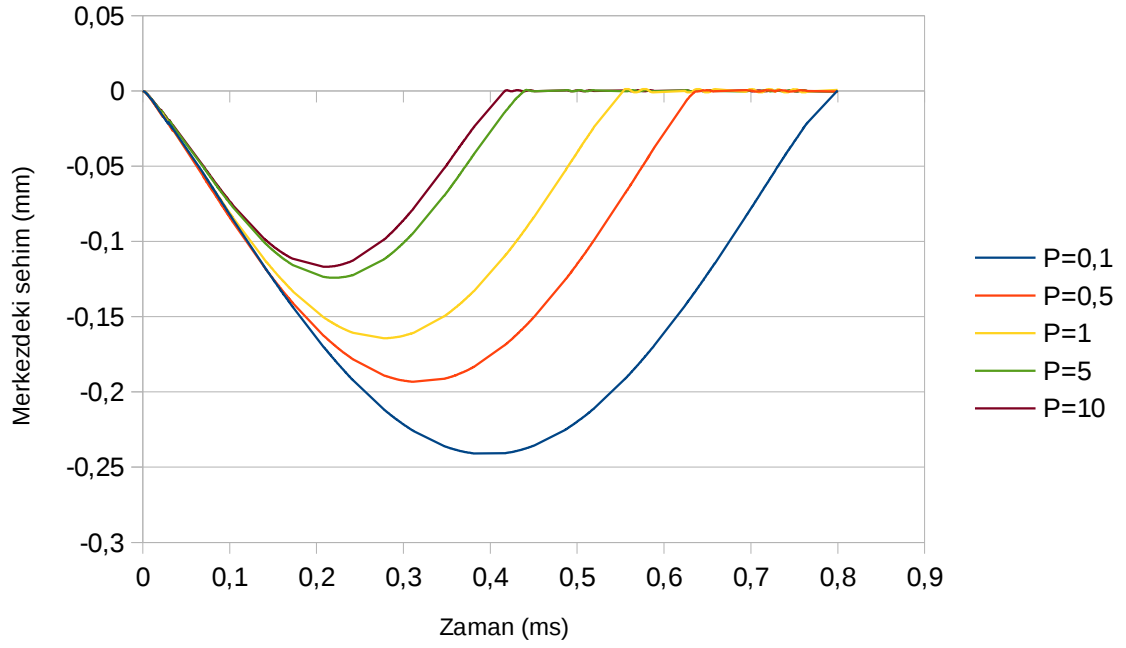
3.3.9. AA 6061 – B_4C

Rao ve arkadaşlarının, AA6061 – B_4C ikilisinin oluşturduğu FDM üzerine çalışmaları bulunmaktadır [31]. Bu malzemeyle oluşturulan analiz sonuçları Şekil 3.36, Şekil 3.37 ve Şekil 3.38’de sunulmuştur. Malzeme özellikleri Çizelge 3.17’de verilmiştir.

6061 sınıfı alüminyum ve bor karbürden oluşan 5 FDM plakada oluşan sehim değerleri Şekil 3.36’da verilmiştir. Metal zengin malzemedeki en yüksek sehim değeri 0,241 mm’dir. Seramik zengin malzemedeki en yüksek sehim değeri 0,117 mm’dir.

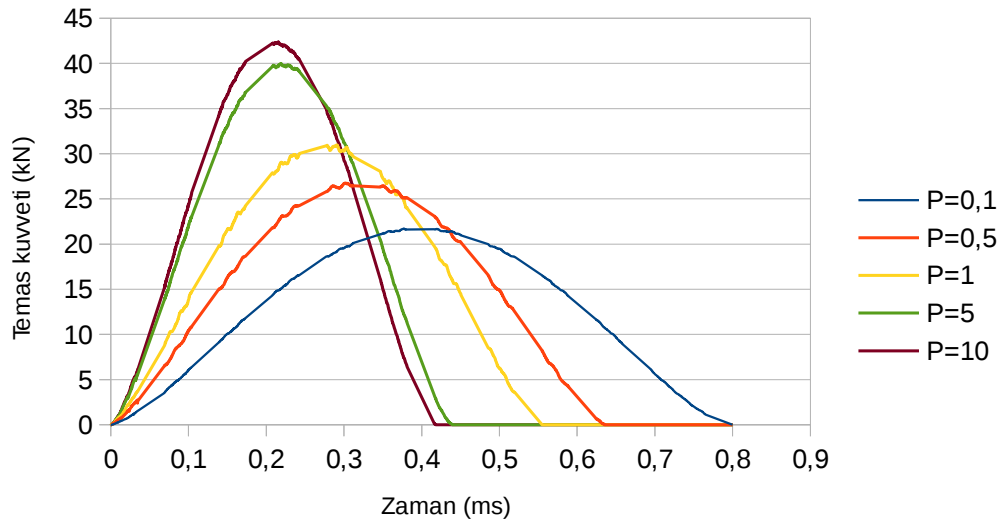
Çizelge 3.17. AA6061 – B_4C malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri	Bileşenler	
	Al 6061	B_4C
Young modülü, E (GPa)	69	480
Poisson oranı, ν	0,33	0,17
Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	2700	2520



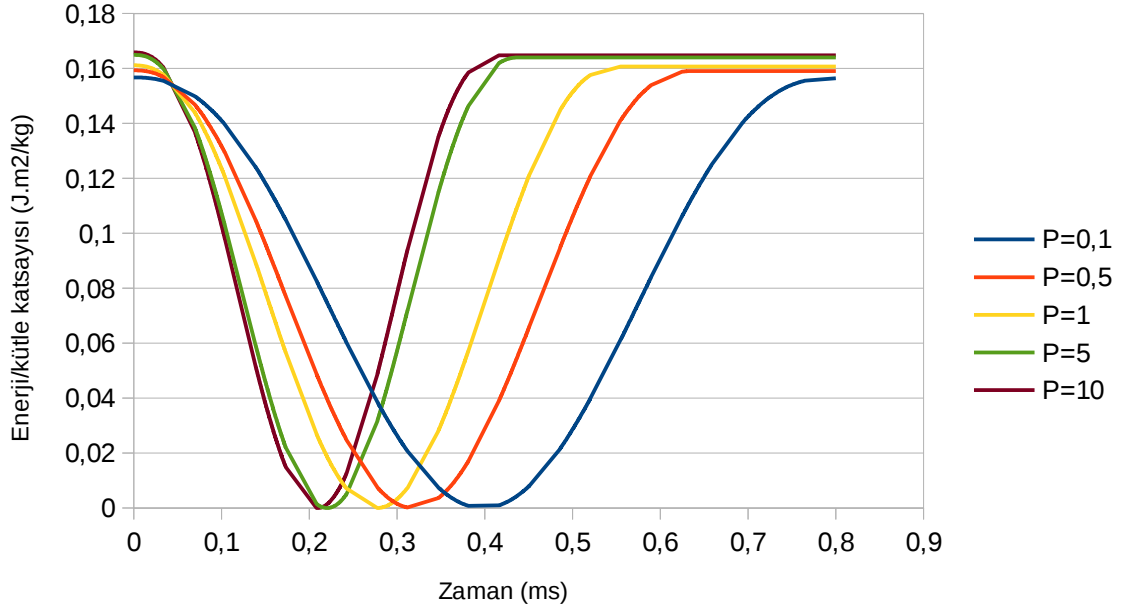
Şekil 3.36. AA6061 – B₄C sehim değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Şekil 3.37’de, FDM plakalarda oluşan temas kuvvetleri verilmiştir. Seramik zengin plakada oluşan en yüksek temas kuvveti 42,4 kN’dur. Metal zengin plakada oluşan en yüksek temas kuvveti 21,7 kN’dur.



Şekil 3.37. AA6061 – B₄C temas kuvvetlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Şekil 3.38’de, plaka kütle katsayısıyla oranlanmış vurucu enerjisinin değişimi verilmiştir. Seramik zengin plaka vurucuyu en kısa sürede durduran plaka olurken, en yüksek enerji/kütle oranları tüm plakalarda birbirine yakındır.



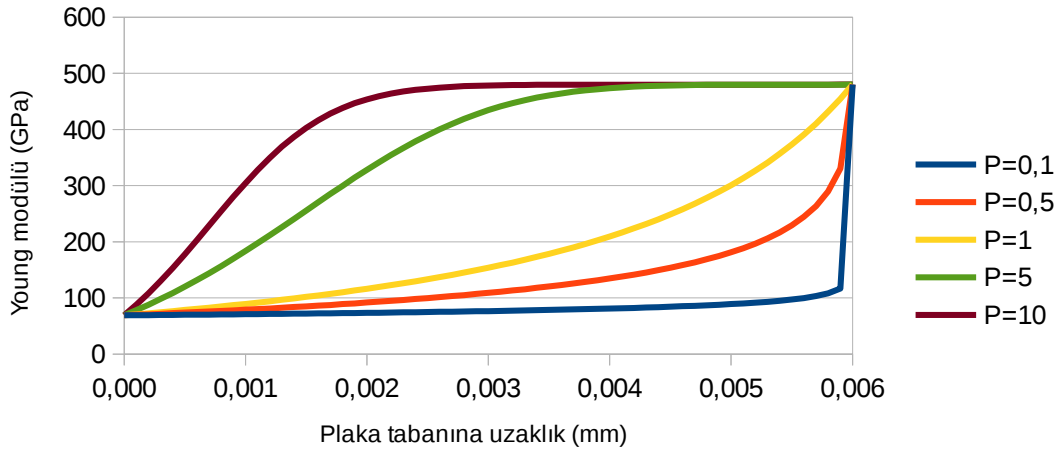
Şekil 3.38. AA6061 – B₄C enerji/kütle katsayısı değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Plakaların kütle katsayıları Çizelge 3.18’de verilmiştir.

Çizelge 3.18. AA6061 – B₄C plakaların kütle katsayıları

	P=0,1	P=0,5	P=1	P=5	P=10
Kütle katsayısı (kg/m ²)	16,10	15,84	15,66	15,30	15,22

FDM plakalarda tabakalara göre değişen Young modülü eğrileri Şekil 3.39’da verilmiştir.



Şekil 3.39. FDM hacim oranı parametresine göre malzemenin kalınlığı boyunca değişen Young modülü (AA6061 – B₄C)

3.3.10. Cu - B₄C

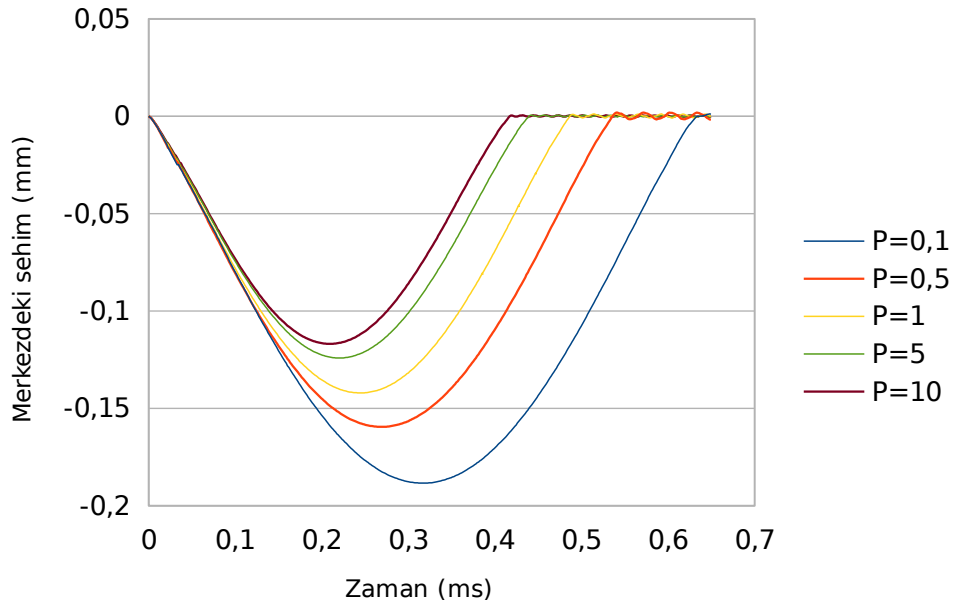
Chun Ge ve arkadaşları Cu – B₄C FDM ile ilgili çalışmışlardır [32]. FDM malzeme özellikleri Çizelge 3.19’da verilmiştir.

Bakır ve bor karbürden oluşan 5 FDM plakada meydana gelen sehim değerlerine ilişkin eğriler Şekil 3.40’ta verilmiştir. Metal zengin plakada oluşan en yüksek sehim değeri 0,188 mm, seramik zengin plakada oluşan en yüksek sehim değeri 0,117 mm’dir.

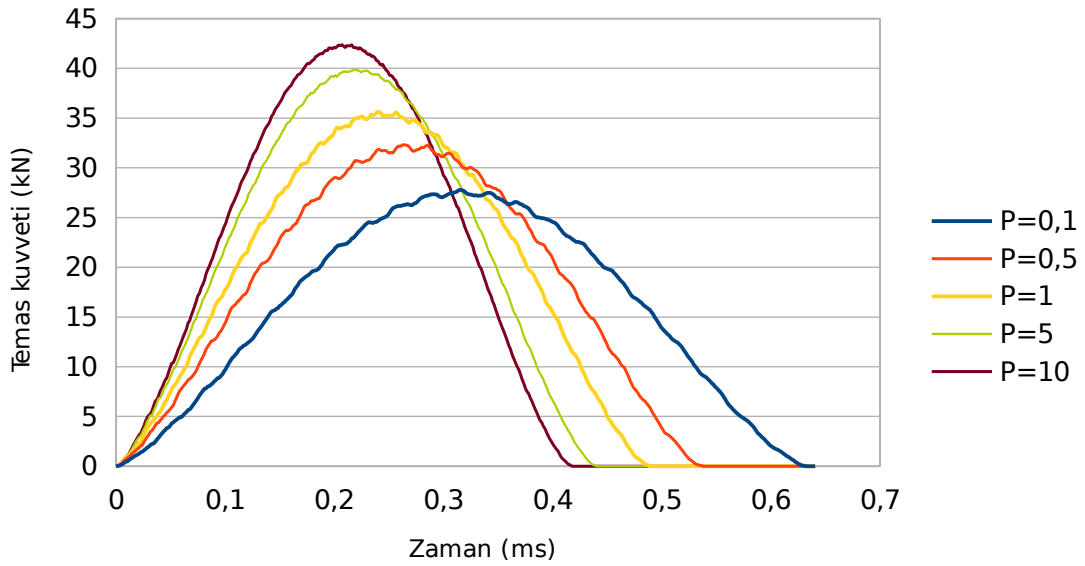
Şekil 3.41’de, 5 plakada oluşan temas kuvvetleri verilmiştir. Seramik zengin plakada oluşan en yüksek temas kuvveti 42,4 kN, metal zengin plakada oluşan en yüksek temas kuvveti 27,8 kN’dur.

Çizelge 3.19. Cu – B₄C malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri	Bileşenler	
	Cu	B ₄ C
Young modülü, E (GPa)	120	480
Poisson oranı, ν	0,34	0,17
Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	8960	2520

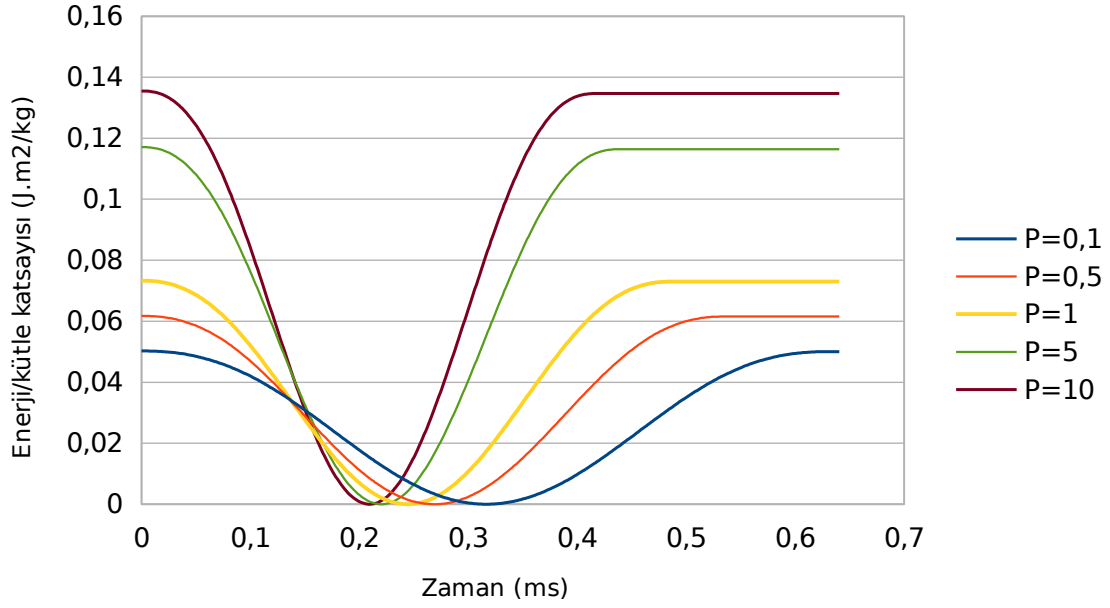


Şekil 3.40. Cu – B₄C sehim değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi



Şekil 3.41. Cu – B₄C temas kuvvetlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Vurucu enerjisinin, plaka kütle katsayısına oranlı değişimi Şekil 3.42’de verilmiştir. En yüksek enerji/kütle katsayısı oranına sahip olan seramik zengin plaka, aynı zamanda vurucuyu en kısa sürede durduran plakadır.



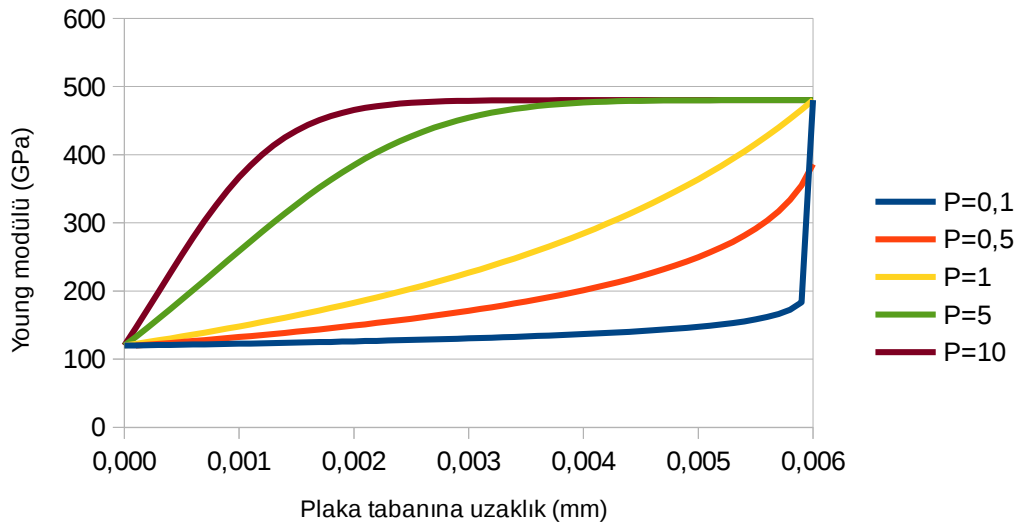
Şekil 3.42. Enerji/kütle katsayısı değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Plakaların kütle katsayıları Çizelge 3.20'de verilmiştir.

Çizelge 3.20. Cu – B₄C plakaların kütle katsayıları

	P=0,1	P=0,5	P=1	P=5	P=10
Kütle katsayısı (kg/m ²)	50,25	40,88	34,44	21,56	18,63

Plakalarda, Young modülünün tabakalara göre değişimi Şekil 3.43'te verilmiştir.



Şekil 3.43. FDM hacim oranı parametresine göre malzemenin kalınlığı boyunca değişen Young modülü (Cu – B₄C)

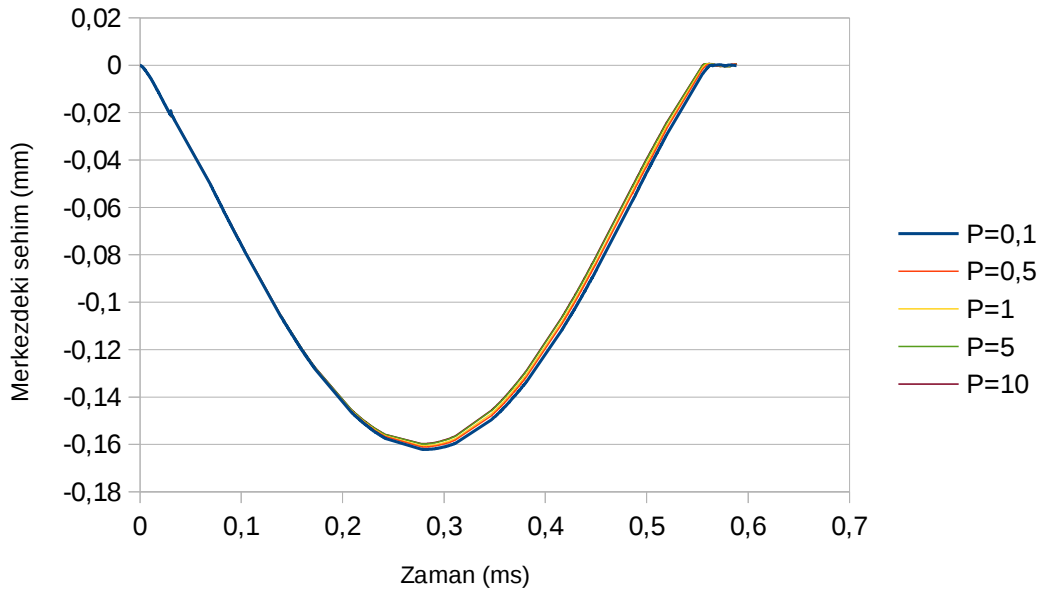
3.3.11. Inconel 625 – AISI 304L

Carroll ve arkadaşları, Inconel 625 – AISI 304L FDM üretimini incelemişlerdir [33]. Inconel 625 – AISI 304L FDM malzemenin analiz sonuçları Şekil 3.44, Şekil 3.45 ve Şekil 3.46'da verilmiştir. Malzeme özellikleri Çizelge 3.21'de yer almaktadır.

Çizelge 3.21. Inconel 625 – AISI 304L malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri	Bileşenler	
	AISI 304L	Inconel 625
Young modülü, E (GPa)	193	200
Poisson oranı, ν	0,27	0,28
Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	8030	8440

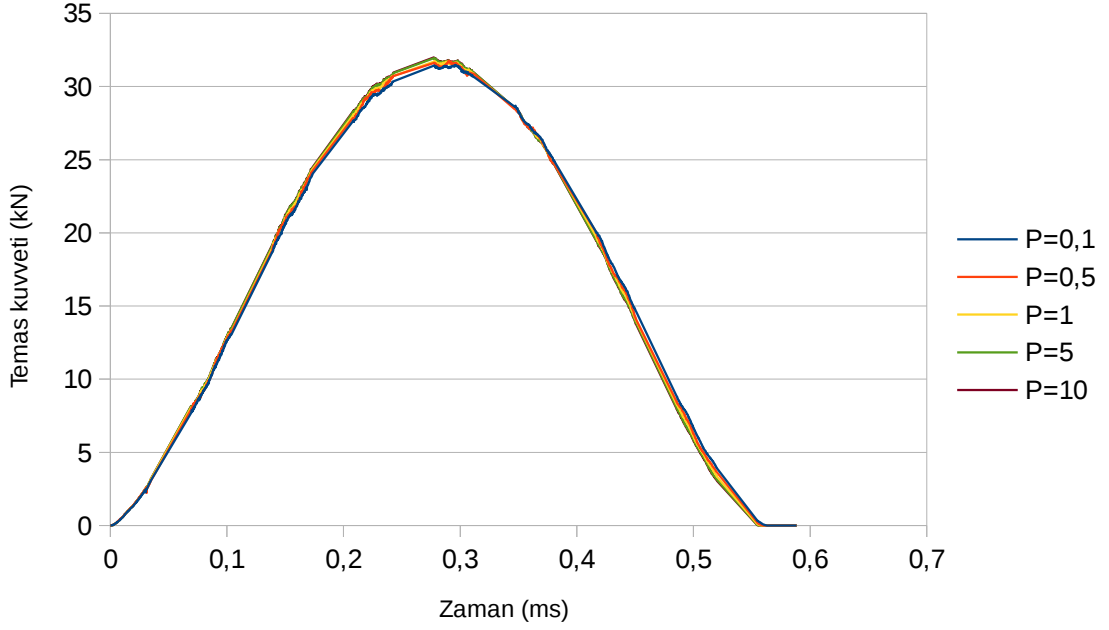
Inconel 625 ve AISI 304'ten oluşan 5 FDM plakada oluşan sehim değerleri Şekil 3.44'te verilmiştir. En yüksek sehim, AISI 304L zengin malzemede 0,162mm olarak ölçülürken, Inconel 625 zengin malzemede görülen en yüksek sehim 0,160mm olmuştur.



Şekil 3.44. Inconel 625 – AISI 304L sehim değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

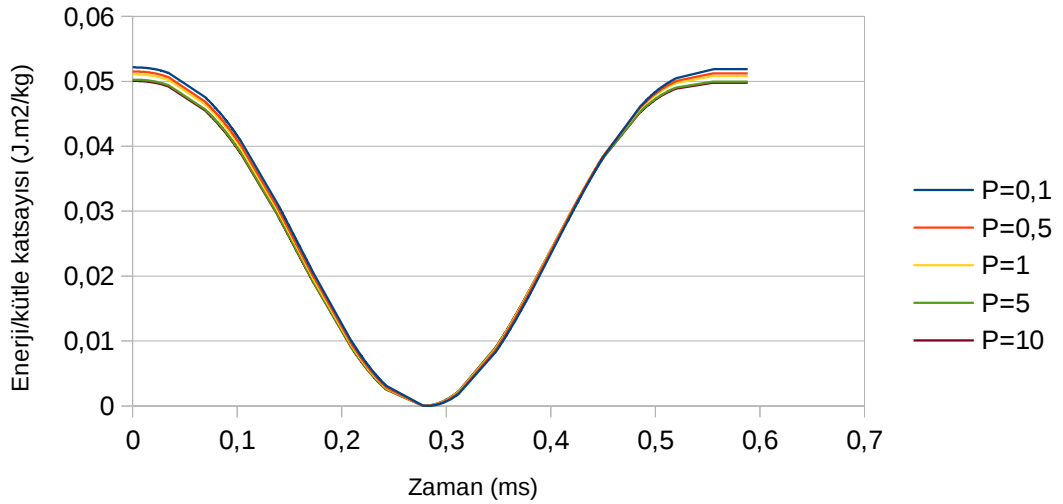
Analizlerde elde edilen temas kuvvetleri Şekil 3.45'te verilmiştir. 5 plakada görülen temas kuvvetleri karşılaştırıldığında, seramik zengin plakada görülen en yüksek

temas kuvvetinin 32,0 kN olduğu, metal zengin plakada görülen en yüksek temas kuvvetinin ise 31,5 kN olduğu görülmüştür.



Şekil 3.45. Inconel 625 – AISI 304L temas kuvvetlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Vurucu enerjisinin, plaka kütle katsayısına oranlı değişimi Şekil 3.46'da verilmiştir. Plaka kütle katsayıları birbirine çok yakın olduğundan, eğriler çok yakın oluşmuştur.



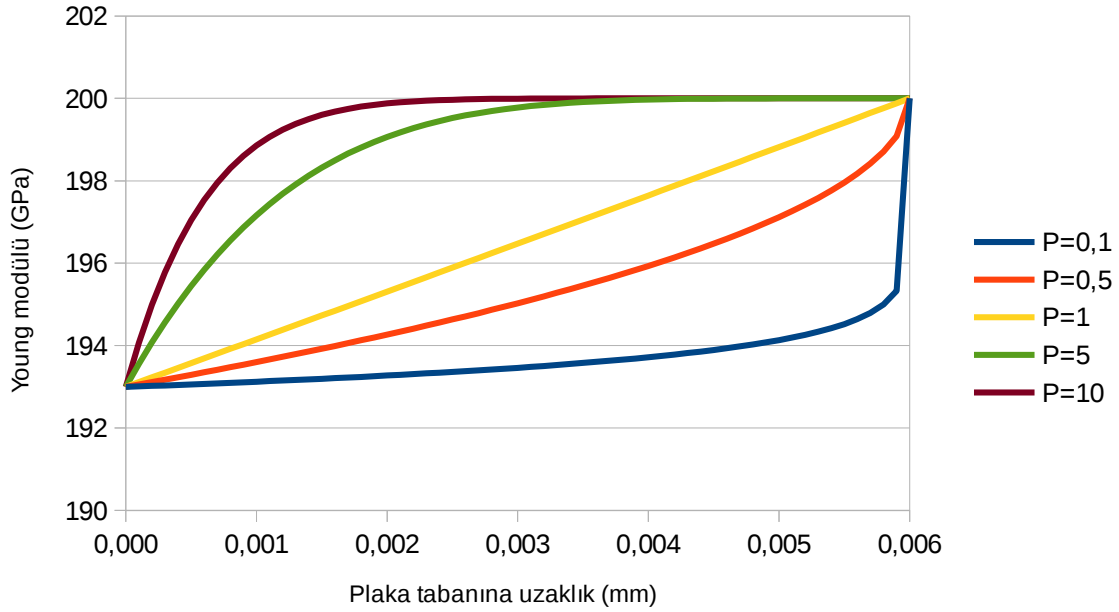
Şekil 3.46. Inconel 625 – AISI 304L enerji/kütle katsayısı değerlerinin FDM hacim oranı parametresine göre değişimi

Plakaların kütle katsayıları Çizelge 3.22’de verilmiştir.

Çizelge 3.22. Inconel 625 – AISI 304L plakaların kütle katsayıları

	P=0,1	P=0,5	P=1	P=5	P=10
Kütle katsayısı (kg/m ²)	48,40	49,00	49,41	50,23	50,42

Plakalardaki Young modülü değişimi Şekil 3.47’de verilmiştir.



Şekil 3.47. FDM hacim oranı parametresine göre malzemenin kalınlığı boyunca değişen Young modülü (Inconel 625 – AISI 304L)

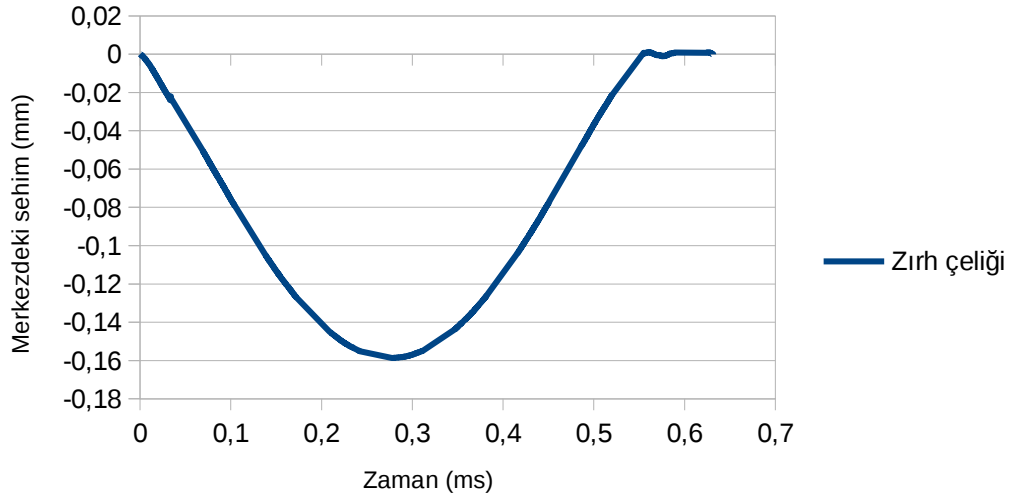
3.3.12. Zırh Çeliği

FDM plakaların vurucuya verdikleri tepkiyi karşılaştırmak için, vurucu, aynı kalınlık ve çaptaki zırh çeliği plakaya atılmıştır. Çizelge 3.23’te malzeme özellikleri verilmiştir.

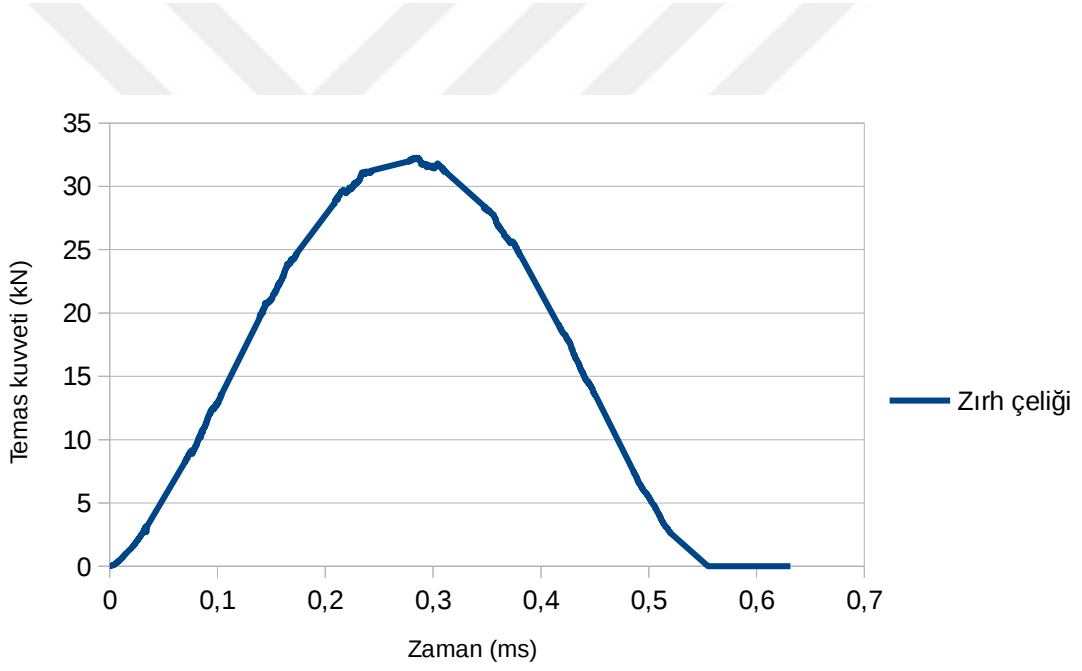
Vurucunun temas ettiği ilk noktada oluşan deplasman değerleri Şekil 3.48’de verilmiştir. En yüksek deplasman 0,159 mm’dir.

Plakada oluşan temas kuvveti Şekil 3.49’da verilmiştir. En yüksek kuvvet 32,27 kN olmuştur.

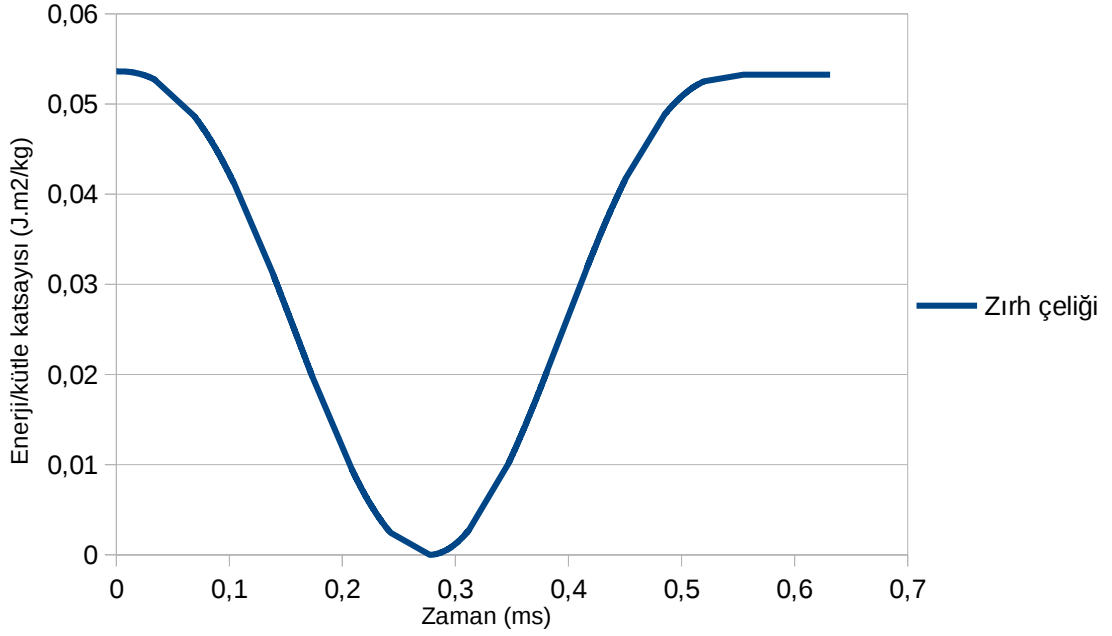
Vurucu enerjisinin plaka kütle katsayısıyla orantılı değişimi Şekil 3.50’de verilmiştir.



Şekil 3.48. Zırh çeliğinde oluşan sehim eğrisi



Şekil 3.49. Zırh çeliğinde oluşan temas kuvveti eğrisi



Şekil 3.50. Zırh çeliğinde oluşan enerji/kütle katsayısı eğrisi

Çizelge 3.23. Zırh çeliği malzeme özellikleri

Young modülü, E (GPa)	201
Poisson oranı, ν	0,33
Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	7850

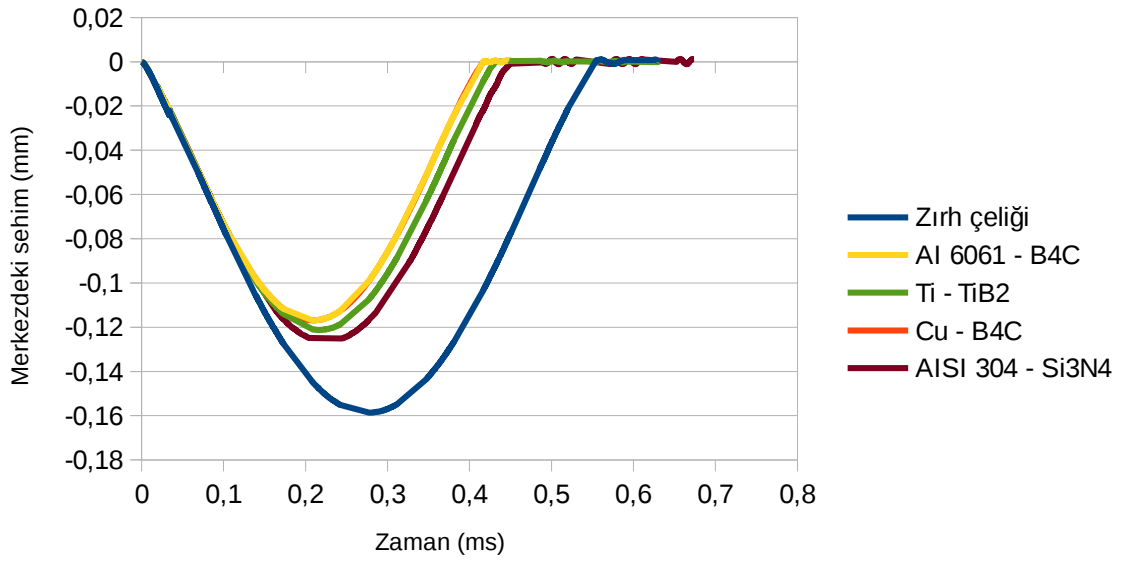
Plaka kütle katsayısı 47,07 olarak hesaplanmıştır.

3.4. Karşılaştırmalar

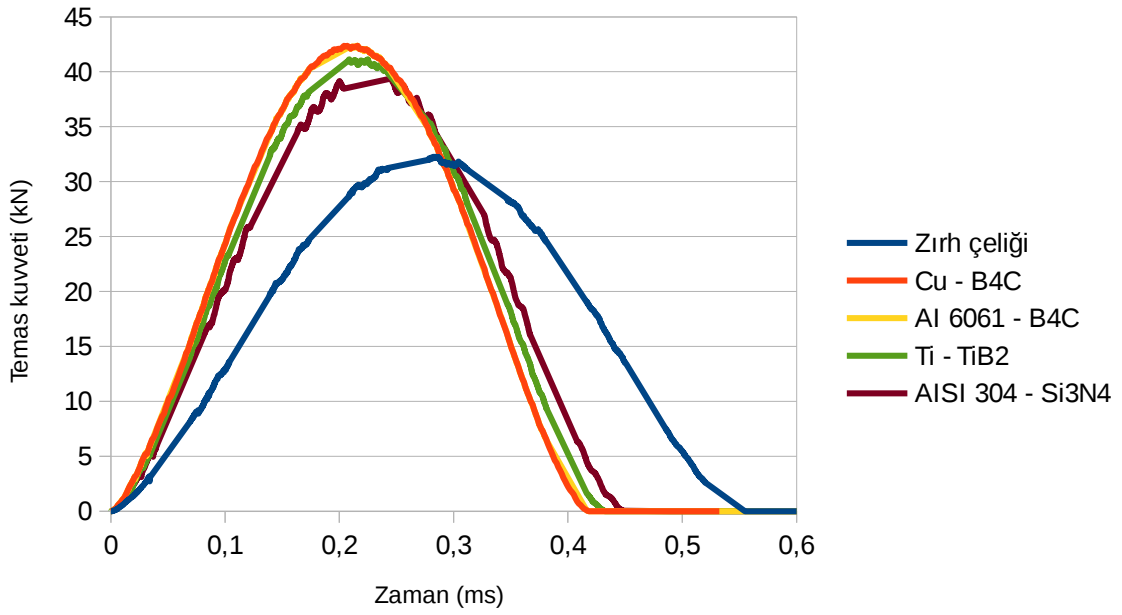
Analiz edilen FDM plakalar arasında, en az sehim oluşan 4 malzeme ve ilave olarak zırh çeliğinin sehim, temas kuvveti ve enerji/kütle katsayısı değerlerinin karşılaştırması Şekil 3.51, Şekil 3.52 ve Şekil 3.53'te verilmiştir.

Al 6061-B₄C ve Cu-B₄C çiftlerinden oluşan FDM plakalarda oluşan sehim (0,117mm) ve temas kuvveti (42,4 kN) değerleri birbirleriyle aynıdır. Bu malzemeler, karşılaştırılan malzemeler arasında sehimin en az görüldüğü 2 malzemedir. Vurucuyu en hızlı durduran da yine bu iki plakadır.

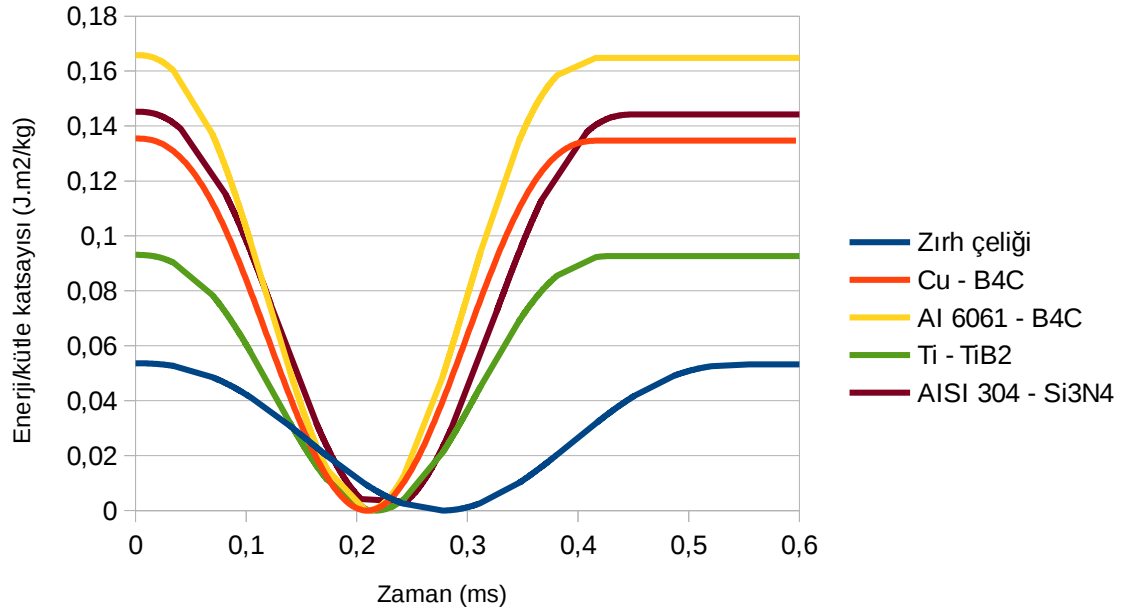
Al 6061-B₄C ikilisinin vurucuyu en hızlı durdurması ve en az sehim göstermesinin yanında, enerji/kütle katsayısı eğrileri, bu malzemenin en az kütleli FDM ikilisi olduğunu göstermektedir. Daha kapsamlı değerlendirme Bölüm 4'te sunulmuştur.



Şekil 3.51. Sehim en az olan malzemelerin zırh çeliğiyle sehim değerlerinin karşılaştırması



Şekil 3.52. Sehim en az olan malzemelerin zırh çeliğiyle temas kuvvetlerinin karşılaştırması



Şekil 3.53. Sehim en az olan malzemelerin enerji/kütle katsayısı eğrilerinin zırh çeliğiyle karşılaştırması

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, endüstrinin farklı alanlarında kullanılan 10 adet FDM malzemenin düşük hızlı çarpışmalardaki tepkisi ele alınmıştır. Analiz edilen FDM plakalar, çoğunlukla metal-seramik yapıdadır.

LS-DYNA yazılımı kullanılarak, bütün malzemeler için sağlıklı ve tutarlı analizler koşturulabilmiştir. Bu yolla, ele alınan malzemelerin düşük hızlı darbe dayanımları ortaya konmuştur.

Yürütülen çalışmalar kapsamında seramik, FDM içinde incelenmiş ve zırh teknolojisi için görece yeni bir malzemenin (FDM) ele alınacağı analizlerle ilgili sonlu elemanlar modelleme çalışmaları buna göre yapılmıştır. Bu kapsamda, LS-DYNA yazılımına FDM özelliklerini girmek için özel kod kullanılmıştır. Bu kodun gelecekte, malzeme özellikleri 2 boyutta değişen FDM örnekler için uyarlanması da mümkündür.

Analiz sonuçları, FDM plakayı oluşturan malzeme çiftinden, Young modülü yüksek olan malzemenin hacim oranı arttıkça, FDM plakada çarpışma sonrası oluşan sehim değerinin düştüğünü, oluşan temas kuvvetinin ise arttığını göstermektedir. Bu türlü bir davranış, metal malzemelere kıyasla seramik malzemelerin davranışdır. Seramikler karakteristik olarak yüksek sertlikte ve kırılgan özellik gösterirken, metaller daha yumuşaktır ve sünek özellik göstermektedir.

Seramik hacim oranı yüksek FDM plakalarda görülen düşük sehim değerleri, plakanın projekte ilk karşılaşılan yüzeyi bölgesinde seramik hacim oranını artırmanın projeksiyonu durdurmak için avantaj yarattığını göstermektedir. Öte yandan seramik zengin plakalarda görülen yüksek temas kuvvetleri, kırılma riskinin yüksekliğine işaret etmektedir. Kırılmayı incelemek için, plastik deformasyon hesaplarını da içeren bir gelecek çalışma değerli bilgiler verebilir.

Projektilden korunma açısından ele alındığında kırılma, vurucunun yönünü değiştirmesi bakımından koruyucu olabilmekle birlikte, malzemenin yeni bir darbeye karşı dayanımını düşürür. Gelecek çalışmalarda FDM plakanın birden fazla darbeye karşı tepkisi analiz edilip, buradan elde edilen verilerle optimizasyon çalışması yapılmalıdır.

Metallerin sünek karakteristiği ve seramiklere göre daha az sehim oluşturmaları göz önüne alındığında, metal zengin FDM plakaların, yapısal bütünlüğünü koruma konusunda seramik zengin FDM plakalara göre daha başarılı olacağı değerlendirilmiştir. Bununla birlikte malzemede metal oranı arttıkça kütle de artmaktadır. Bu kütle artışı, uygulama özelinde sorun oluşturmazabilir ancak zırh teknolojisi için istenmeyen bir durumdur.

Analiz edilen FDM plakalardan, zırh teknolojisinde kullanılan seramikleri bünyesinde bulunduranların, vurucuya karşı gösterdikleri durdurma performansının diğerlerinden üstün olduğu görülmüştür. Al 6061-B₄C ve Cu-B₄C çiftlerinden oluşan FDM plakalarda görülen 0,117mm sehim, bu çalışma kapsamında incelenen malzemeler arasında görülen en düşük değerdir. B₄C, zırh endüstrisinde seramik plaka olarak geniş kullanım alanı bulan bir malzemedir. Al 6061-B₄C çifti, incelenen diğer malzemelere kıyasla düşük kütleli olarak da öne çıkmaktadır. Bununla birlikte 42,4 kN olarak elde edilen temas kuvveti karşılaştırmaya dahil edilen diğer plakalar arasındaki en yüksek değerdir ve plastik deformasyon oluşacağına dair ön bilgi vermektedir.

Bölüm 3.4'te ele alınan FDM plakalar, balistik performanslarını ortaya koyabilmek adına yüksek hızlı darbe analizleri içeren bir çalışma kapsamında incelenmeye uygundur. Bunu yapabilmek için, malzemelerin kırılma modellerinin oluşturulması, malzemelerin üretimi ve koşturulacak analizlerin testlerle de doğrulanması gerekecektir. Üretim çıktısı olarak elde edilecek bir FDM ürünün mekanik özelliklerinin, teoriye göre hesaplanan değerlerle uyumlu olduğunu tespit etmek de böyle bir çalışma için kritik önem oluşturacaktır. Ayrıca, literatürdeki farklı FDM üretim yöntemlerinin de elde edilecek malzeme özellikleri üzerinde önemli etkisi olabileceği değerlendirilmektedir.

Vurucunun, plaka üzerinde harcayacağı zamanı artırmak da vurucuyu etkisiz hale getirmek için önemli bir diğer parametredir. Şekil 3.53'te de görüldüğü gibi, zırh çeliğinin vurucuyu durdurması, karşılaştırmada ele alınan diğer malzemelere göre daha uzun sürmektedir. Bu davranış, incelenen diğer FDM plakalarda da, metal hacim oranının artmasıyla birlikte görülmektedir.

Karşılaştırma bölümünde incelenen malzemelerden, Al 6061-B₄C ve Cu-B₄C çiftlerinin oluşturduğu FDM plakalarda sehim ve temas kuvveti değerleri aynı çıkmıştır. Bunun nedeni, her iki plakada da çarpışmanın gerçekleştiği yüzeylerin malzemesinin B₄C olmasıdır. Bu çalışmada koşturulan analizlerde olduğu gibi düşük hızlı (1 m/s) bir çarpışmada, çarpışma gerçekleşen yüzeyinde aynı malzeme kullanılan iki FDM plakanın tepkisinin aynı olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, malzemenin daha fazla sehim yapmasına neden olacak yüksek hızlı çarpışmalarda ya da girişim olan durumlarda, alt yüzeydeki malzemenin analiz çıktılarını daha fazla etkilemesi, bu etkinin, darbeye maruz kalan FDM plakanın yapısal bütünlüğünü muhafaza becerisini ve plakanın birden fazla darbeye karşı etkinliğini değiştiren nitelikte olması beklenmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Watari, F., Yokoyama, A., Saso, F., Uo, M., Kawasaki, T., Fabrication and properties of functionally graded dental implant, *Composites Part B: Engineering*, Volume 28, Issues 1–2, Pages 5-11, **1997**.
- [2] Kohri, H., Shiota I., Development of Thermoelectric Cooling Devices with Graded Structure, *Materials Science Forum* 492-493:151-156, **2006**.
- [3] Dahan, I., Admon U., Frage N., Sariel J., Dariel M. P., Moore J. J., The Development of a Functionally Graded TiC-Ti Multilayer Hard Coating, *Surface and Coatings Technology* 137:111-115, **2001**.
- [4] W McCauley, J., D'Andrea, G., Cho, K., Burkins, M., Dowding, R., Gooch, W., *Status report on SPS TiB₂-TiB-Ti functionally graded materials (FGMs) for armor*, **2006**.
- [5] Lakshminarayana, H.V., Boukhili, R., Gauvin, R., Impact response of laminated composite plates: prediction and verification, *Composite Structures*, 28:61–72, **1994**.
- [6] Collombet, F., Lalbin, X., Lataillade, J.L., Impact behavior of laminated composites: Physical basis for finite element analysis, *Composite Science and Technology*, 58:463–78, **1998**.
- [7] Zhang, Y., Zhu, P., Lai, X., Finite element analysis of low-velocity impact damage in composite laminated plates, *Materials&Design*, 27:513–9, **2006**.
- [8] Minak, G., Ghelli, D., Influence of diameter and boundary conditions on low velocity impact response of CFRP circular laminated plates, *Composites Part B*, 39:962–72, **2008**.
- [9] Aslan, Z., Karakuzu, R., Okutan, B., The response of laminated composite plates under low-velocity impact loading, *Composite Structures*, 59:119–27, **2003**.
- [10] Kubair, D.V., Lakshmana, B.K., Cohesive modeling of low-velocity impact damage in layered functionally graded beams, *Mechanics Research Communications*, 35:104–14, **2008**.
- [11] Gong, S.W., Lam, K.Y., Reddy, J.N., The elastic response of functionally graded cylindrical shells to low-velocity impact, *International Journal of Impact Engineering*, 22:397–417, **1999**.
- [12] Apetre, N.A., Sankar, B.V., Ambur, D.R., Low-velocity impact response of sandwich beams with functionally graded core, *International Journal of Solids and Structures*, 43:2479–96, **2006**.
- [13] Gunes, R., Aydin, M., Apalak, M.K., Reddy, J.N., The elasto-plastic impact analysis of functionally graded circular plates under low-velocities, *Composite Structures*, Volume 93, Issue 2, Pages 860-869, **2011**.

- [14] Larson, R.A., Palazotto, A.N., Gardenier, H.E., Impact response of titanium and titanium boride monolithic and functionally graded composite plates, *AIAA Journal*, 47(3):676–91, **2009**.
- [15] Kiani, Y., Sadighi, M., Salami, S., Eslami, M.R., Low velocity impact response of thick FGM beams with general boundary conditions in thermal field, *Composite Structures*, 104: 293–303, **2013**.
- [16] Zhang, X., Zhang, H., Optimal design of functionally graded foam material under impact loading, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 68, Pages 199-211, **2013**.
- [17] Etemadi, E., Afaghi Khatibi, 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**.
- [18] Kashtalyan, M., Menshykova, M., Three-dimensional elasticity solution for sandwich panels with a functionally graded core, *Composite Structures*, 87:36–43, **2009**.
- [19] Khalili, S.M.R., Malekzadeh, K., Veysi Gorgabad, A., Low velocity transverse impact response of functionally graded plates with temperature dependent properties, *Composite Structures*, 96:64–74, **2013**.
- [20] Gunes, R., Aydin, M., Elastic response of functionally graded circular plates under a drop-weight, *Composite Structures*, Volume 92, Issue 10, Pages 2445-2456, **2010**.
- [21] Mori, T., Tanaka, K., Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions, *Acta Metall*, 21(5):571–4, **1973**.
- [22] Benveniste, Y., A new approach to the application of Mori–Tanaka’s theory in composite materials, *Mechanics of Materials*, 6:147–57, **1987**.
- [23] Noh, W.F., *Methods in Computational Physics 3*, (Academic Press), **1964**.
- [24] Hallquist, J.O., *LS-DYNA Theory Manual*, **2006**.
- [25] Wang, Y.Q., Zu, J.W., Nonlinear dynamic thermoelastic response of rectangular FGM plates with longitudinal velocity, *Composites Part B: Engineering*, Volume 117, Pages 74-88, **2017**.
- [26] Dai, Hong-Liang, Rao, Yan-Ni, Dai, Ting, A review of recent researches on FGM cylindrical structures under coupled physical interactions, 2000-2015, *Composite Structures*, Volume 152, Pages 199-225, **2016**.
- [27] Baştürk S., Uyanık H., Kazancı Z., Nonlinear Transient Response of Basalt/Nickel FGM Composite Plates under Blast Load, *Procedia Engineering*, Volume 167, Pages 30-38, **2016**.
- [28] López-Esteban, S., Bartolomé, J., Pecharromán, C., Moya, J., Zirconia/Stainless-Steel Continuous Functionally Graded Material, *Journal of the European Ceramic Society*, Volume 22, Pages 2799-2804, **2002**.

- [29] Ge, CC, Cao, W., Zhou, ZJ, Chen, ZH, Design and fabrication of ZrO_2 /stainless steel thermal barrier coating FGM, *Materials Science Forum*, Volumes 492-493, Pages 15-20, **2005**.
- [30] Radwan, M., Nygren, M., Flodström, K., Esmaelzadeh, S., Fabrication of crack-free SUS316L/ Al_2O_3 functionally graded materials by spark plasma sintering, *Journal of Materials Science*, 46(17), 5807–5814 , **2011**.
- [31] Rao, A.G., Mohape, M., Katkar, V.A., Gowtam, D.S., Deshmukh, V.P., Shah, A.K., Fabrication and Characterization of Aluminum (6061)-Boron-Carbide Functionally Gradient Material, *Materials and Manufacturing Processes*, Volume 25, Pages 572-576, **2010**.
- [32] Chun Ge, C., Wu, A., Han Ling, Y., Cao, W., Tao Li, J., Ping Shen, W., New Progress of Ceramic-Based Functionally Graded Plasma-Facing Materials in China, *Key Engineering Materials* - KEY ENG MAT. 224-226. 459-464, **2002**.
- [33] E. Carroll, B., A. Otis, R., Borgonia, J.P., Suh, J., Dillon, R., Shapiro, A., C. Hofmann, D., Liu, ZK, M. Beese, A., Functionally graded material of 304L stainless steel and inconel 625 fabricated by directed energy deposition: Characterization and thermodynamic modeling, *Acta Materialia*, Volume 108, Pages 46-54, **2016**.

EKLER

LS-DYNA yazılımına elle girilen kod bu bölümde verilmiştir.

“NUMCMP,ELEMENT

!RESET MATERIAL NUMBER COUNTER

NMAT=1

CSYS,0

WPCSYS,-1,0

CSYS,0

WPAVE,0,0,0

!Get maximum(N2EL) and minumum(N1EL) element number

*GET,N1EL,ELEM,0,NUM,MIND

*GET,N2EL,ELEM,0,NUM,MAXD

! PROPERTY CHANGE BETWEEN 300 - 1300 K IS ASSUMED

ES=3.48E11

AVS=0.24

KS=ES/(3*(1-2*AVS))

!KSeski=2.28E11

SMS=ES/(2*(1+AVS))

!AKC=0.96 !conductivity

!ACC=1 !spec.heat

!AAC=11.01E-6 !thermal exp coeff.

ADS=2370

EM=2.01E11

AVM=0.33

$KM=EM/(3*(1-2*AVM))$

!KMeski=1.4E11

$SMM=EM/(2*(1+AVM))$

!AKB=50

!ACB=1

!AAB=15.37E-6

ADM=8166

*DO,IKP,N1EL,N2EL

!GET THE CENTROIDAL COORDINATES OF EACH ELEMENT

*GET,XCEL,ELEM,IKP,CENT,X

*GET,YCEL,ELEM,IKP,CENT,Y

*GET,ZCEL,ELEM,IKP,CENT,z

NMAT=NMAT+1

P=10

T1=0.006

$V2=(1-YCEL/T1)**P$

!v2 metal

$V1=1-V2$

$ARA1=KS-KM$

$ARA2=SMS-SMM$

$ARA3=3*ARA1/(3*KM+4*SMM)$

$ARA4=V1/(1+V2*ARA3)$

$ARA5=(SMM*(9*KM+8*SMM))/(6*(KM+2*SMM))$

$ARA6=ARA2/(SMM+ARA5)$

$$K=ARA4*(KS-KM)+KM$$

$$G=((V1*(SMS-SMM))/(1+(V2*ARA6)))+SMM$$

$$AE=(9*K*G)/(3*K+G)$$

$$AV=(3*K-2*G)/(2*(3*K+G))$$

$$AG=(V1/(1+V2*ARA6))*(SMS-SMM)+SMM$$

$$!AA=AAC+(AAB-AAC)*(YCEL/T1)**P$$

$$!AK1=AKC+(AKB-AKC)*(YCEL/T1)**P$$

$$AD=V1*ADS+V2*ADM$$

$$!AC=ACC+(ACB-ACC)*(YCEL/T1)**P$$

!p artarsa seramik oran artar

MP,EX,NMAT,AE

MP,PRXY,NMAT,AV

!MP,ALPX,NMAT,AA

MP,KXX,NMAT,AK1

MP,DENS,NMAT,AD

!MP,C,NMAT,AC

MPCHG,NMAT,IKP,

*ENDDO

FINISH

/SOL”

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Eralp Fahri ÖNOĞLU
Doğum Yeri : KONYA
Medeni Hali : Evli
E-Posta : eralponoglu@hotmail.com
Adresi : ASELSAN Macunköy Tesisleri, Yenimahalle/ANKARA

Eğitim

Lise : Süleyman Demirel Fen Lisesi, Isparta (2002-2006)
Lisans : Hacettepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği
Bölümü, Otomotiv Mühendisliği Programı, Ankara (2006-2011)
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı,
Ankara (2012-2018)

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce - Çok iyi; Almanca - Orta

İş Deneyimi

ASELSAN A.Ş. Mekanik Tasarım Mühendisi Mayıs 2012 – Devam ediyor.

Deneyim Alanları

Mekanik Tasarım, Uzaktan Komutalı Silah Sistemleri

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

Yıldırım B., Önoğlu E.F., *Projektilerle Çarpışma Durumunda Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerden Yapılmış Plakaların Dinamik Davranışının İncelenmesi*, Hacettepe Üniversitesi BAP Projesi, **2017**, 13000 TL.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 06/06/2018

Tez Başlığı / Konusu: Projektillerle Çarpışma Durumunda Fonksiyonel Olarak Değişen Plakaların Dinamik Davranışının İncelenmesi

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 61 sayfalık kısmına ilişkin, 05/06/2018 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 5 'tir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Eralp Fahri ÖNOĞLU

Öğrenci No: N12128138

Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği

Programı: Yüksek Lisans

Statüsü: ☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

06.06.2018

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Bora YILDIRIM