



**YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLERİN YAPISAL
TESTİ VE NÜMERİK ANALİZİ**

Hasan HACIOSMANOĞLU



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLERİN YAPISAL TESTİ VE NÜMERİK
ANALİZİ**

Hasan HACIOSMANOĞLU
000-0002-5441-0537

Doç. Dr. Gökhan SEVİNGEN
0000-0002-7746-2014
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

TEZ ONAYI

Hasan HACIOSMANOĞLU tarafından hazırlanan “YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLERİN YAPISAL TESTİ VE NÜMERİK ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

- Danışman** : Doç. Dr. Gökhan SEVİLGEN
0000-0002-7746-2014
- Başkan** : Doç. Dr. Gökhan SEVİLGEN
0000-0002-7746-2014
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Taşıt Tasarımı Anabilim Dalı
- Üye** : Doç. Dr. Rukiye ERTAN
0000-0002-9631-4607
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa
Bilimleri Fakültesi,
Taşıt Transport Sistemleri Anabilim Dalı
- Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Erdem UZUNSOY
0000-0002-6449-552X
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa
Bilimleri Fakültesi,
Otomotiv Anabilim Dalı

İmza

İmza

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN

Enstitü Müdürü

21.08.2019

U.Ü. 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 üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

21/08/2019



Hasan HACIOSMANOĞLU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLERİN YAPISAL TESTİ VE NÜMERİK ANALİZİ

Hasan HACIOSMANOĞLU

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Gökhan SEVİLGİN

Yüksek mukavemetli çelikler, günümüzde bir çok alanda kullanılmaktadır. Zırh çelikleri olarak da bilinen bu malzemelerin davranışlarını incelemek için nümerik analizlere başvurulmaktadır. Bu çalışmada, yüksek mukavemetli çelik malzemenin, dinamik yükler altındaki davranışları nümerik analizler kullanılarak incelenmiştir. Nümerik analiz yaklaşımlarının doğrulanması için test çalışmaları yapılmıştır. Bunun için sürdürülebilir testler yapılabilecek bir test aparatı geliştirilmiş ve analiz çalışmaları ile aynı sınır şartlarına sahip olacak şekilde testler yapılmıştır. Son olarak nümerik analizlerin sonuçları ile test sonuçları karşılaştırılmış ve değerlendirmeler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Nümerik analizler, yüksek mukavemetli zırh çeliği, sonlu elemanlar analizi, LS-DYNA
2019, ix + 49 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

STRUCTURAL TESTS AND NUMERICAL ANALYSIS OF HIGH STRENGTH STEELS

Hasan HACIOSMANOĞLU

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Gökhan SEVİLGEN

High strength steels are used in many fields today. Numerical analyzes are used to examine the behavior of these materials. These materials also known as armor steels. In this study, the behavior of high strength steel material under dynamic loads was investigated using numerical analysis. Test studies were conducted to verify numerical analysis approaches. For this purpose, a test apparatus has been developed for sustainable tests and tests have been carried out with the same boundary conditions as the analysis studies. Finally, the results of numerical analyzes and test results were compared.

Key words: Numerical simulation, high strength armor steel, finite element analysis, LS-DYNA

2019, ix + 49 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitiminin boyunca yardımlarını, anlayışını ve değerli bilgilerini esirgemeyen değerli hocam ve danışmanım Doç. Dr. Gökhan SEVİLGEN'e, bilgi ve tecrübeleriyle bana destek olan Araş. Gör. Emre İsa ALBAK'a, bana bu çalışmayı yapma imkanı veren BMC Otomotiv San. Ve Tic. A.Ş. firmasına, doğrulama çalışmaları sırasında yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim. Bana bu zorlu dönemde manevi desteğini esirgemeyen, azim duygusu ve sabır aşıl原因an, aynı zamanda sabır gösteren kıymetli eşime teşekkür ederim.

Hasan HACIOSMANOĞLU
02/08/2019



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	8
3.1. Dinamik Basınç Dalgası	8
3.2. Nümerik Analiz.....	9
3.2.1. Analiz Yöntemleri	12
3.2.2. ConWep Modeli ile Oluşturulan Sonlu Elemanlar Çözümlemesi.....	12
3.2.3. ALE Metodu ve Sonlu Elemanlar Modeli	13
3.2.4. SPH Metodu ve Sonlu Elemanlar Modeli.....	15
3.2.5. Sonlu Elemanlar Malzeme Modelleri	18
3.2.6. Johnson-Cook Malzeme Modeli.....	20
3.2.7. Malzeme Karakterizasyonu	21
3.2.8. Yarı-Statik Testler	21
3.2.9. Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) Testi.....	26
3.3. Plaka Test Aparatı.....	28
3.3.1. Taşıyıcı Platform	30
3.3.2. Yükseklik Ayar Montajı.....	30
3.3.3. Plaka Baskı Yüğü	31
3.3.4. Ölçüm Aparatı ve Dinamik Deformasyon Ölçümü	32
3.3.5. Dinamik Deformasyon Ölçümü	32
3.3.6. Kalıcı Deformasyon Ölçümü.....	34
4. BULGULAR	36
4.1. Analiz Modelleri ve Analiz Sonuçları.....	36
4.1.1. ConWep Modeli Analiz Sonuçları.....	36
4.1.2. ALE Modeli Analiz Sonuçları.....	37
4.1.3. SPH Modeli Analiz Sonuçları	39
4.2. Analiz ve Test Sonuçlarının Karşılaştırılması	41
5. SONUÇ VE TARTIŞMA	45
KAYNAKLAR.....	46
ÖZGEÇMİŞ.....	49

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
P_A	Atmosferik basınç, Pa
σ_0	Akma gerilmesi değeri, MPa
A_i	Anlık değişen kesit alanı, mm^2
α	Azalım parametresi
P	Basınç, Pa
A_0	Başlangıçtaki kesit alanı, mm^2
L_0	Başlangıçtaki uzunluk, mm
P_{CJ}	Chapman-Jouguet basıncı, Pa
e	Doğal logaritma tabanı
E	Elastisite modülü, GPa
T_{Melt}	Ergime Sıcaklığı, $^{\circ}K$
P_{max}	En yüksek basınç, Pa
σ_{true}	Gerçek gerilme değeri, Mpa
ϵ_{true}	Gerçek gerinim değeri
σ	Gerilme değeri, Mpa
C	Gerinim oranı hassasiyet katsayısı
n	Gerinim sertleşme faktörü
B	Gerinim sertleşme katsayısı, Mpa
ϵ	Gerinme değeri
I	İmpuls, $Pa \ ms$
L_s	Kabuk eleman karakteristik uzunluğu, mm
Δt_e	Kritik zaman adımı, mm
T_r	Oda sıcaklığı, $^{\circ}K$
γ	Özgül ısı oranı
ρ_0	Malzeme ilk yoğunluğu, kg/mm^3
ρ	Malzeme yoğunluğu, kg/mm^3
c	Malzemeye ait ses hızı, mm/ms
σ_{eng}	Mühendislik gerilme değeri, MPa
ϵ_{eng}	Mühendislik gerinim değeri
T^*	Normalize sıcaklık, $^{\circ}K$
ν	Poisson oranı
P_O	Pozitif aşırı basınç (overpressure), Pa
t_d	Pozitif zaman periyodu, ms
$\dot{\epsilon}_0$	Referans gerinim oranı, s^{-1}
θ	Segment eleman normali
T	Sıcaklık, $^{\circ}K$
A_f	Sondaki kesit alanı, mm^2
L_f	Son uzunluk, mm
m	Termal yumuşama katsayısı
t	Zaman, ms

Kısaltmalar**Açıklama**

ALE	Arbitrary Lagrangian-Eulerian
ConWep	Conventional Weapons
EOS	Equation of State
FEM	Finite Element Method
FSI	Fluid Structure İnteraction
g	Gram
J-C	Johnson-Cook
kg	Kilogram
m	Metre
ms	Milisaniye
s	Saniye
SHPB	Split Hopkinson Pressure Bar
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics
UTS	Ultimate Tensile Strength

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Test düzeneği	2
Şekil 2.2. Test sistemi ve kesit gösterimi	3
Şekil 2.3. Hava ortamında dinamik yükleme için hazırlanmış test aparatı	4
Şekil 2.4. Çelik çanak içerisinde dinamik yükleme için hazırlanmış test aparatı	4
Şekil 2.5. Test ve deformasyon ölçüm düzeneği	5
Şekil 2.6. Test ve deformasyon ölçüm düzeneği	6
Şekil 2.7. Analiz modeli şematik gösterimi	7
Şekil 3.1. Basınç şok dalgasının basınç-zaman profili.....	9
Şekil 3.2. Plaka test aparatı sonlu elemanlar modeli	11
Şekil 3.3. ConWep şematik gösterimi ve segment eleman normali θ	13
Şekil 3.4. ConWep sonlu elemanlar modeli	13
Şekil 3.5. ALE çözüm metodu sonlu elemanlar modeli	15
Şekil 3.6. SPH metodunda elemanların diziliş örnekleri	16
Şekil 3.7. SPH metodu sonlu elemanlar modeli	17
Şekil 3.8. SPH elemanların dizilimi.....	17
Şekil 3.9. Üniversal malzeme test cihazı	22
Şekil 3.10. Tipik bir gerilme-gerinim eğrisi.....	23
Şekil 3.11. Bir malzemenin gerçek ve mühendislik gerilme-gerinim eğrisinin karşılaştırılması.....	25
Şekil 3.12. Akma gerilmesinin belirlenmesi	26
Şekil 3.13. Tipik bir SHPB test düzeneğinin şematik gösterimi	27
Şekil 3.14. Test numunesi ile giriş ve çıkış çubukları	28
Şekil 3.15. (a) zamana bağlı voltaj sinyali ile (b) gerinime bağlı gerilme ve gerinim oranı	28
Şekil 3.16. Test aparatının tasarlanan ve üretilen görselleri	29
Şekil 3.17. Test aparatının bölümleri	29
Şekil 3.18. Taşıyıcı platform	30
Şekil 3.19. Yükseklik ayar montajı.....	31
Şekil 3.20. Plaka baskı yükü	31
Şekil 3.21. Ölçüm aparatı.....	32
Şekil 3.22. Deformasyon konisi	33
Şekil 3.23. Dinamik deformasyon ölçümü.....	34
Şekil 3.24. Kalıcı deformasyon ölçümü.....	35
Şekil 4.1. ConWep metodu sonucunda test plakasında oluşan maksimum dinamik deformasyon.....	36
Şekil 4.2. ALE çözüm sonucunda test plakasında oluşan maksimum dinamik deformasyon	37
Şekil 4.3. Basıncının zamana bağlı ilerleyişi ve zırh plakası ile etkileşimi	38
Şekil 4.4. SPH çözüm metodu sonucunda test plakasında oluşan maksimum dinamik deformasyon	39
Şekil 4.5. SPH elemanların zamana bağlı ilerleyişi.....	40
Şekil 4.6. Kalıcı deformasyona sahip test numunelerinin köşegen üzerinde alınan kesit görselleri.....	41
Şekil 4.7. ConWep modeli – köşegen kesitteki kalıcı deformasyon ile test deformasyonunun karşılaştırılması	42

Şekil 4.8. ALE modeli – köşegen kesitteki kalıcı deformasyon ile test deformasyonunun karşılaştırılması.....	42
Şekil 4.9. SPH modeli – köşegen kesitteki kalıcı deformasyon ile test deformasyonunun karşılaştırılması.....	42
Şekil 4.10. Analiz çalışmaları sonucunda kalıcı deformasyonlar - görsel 1	43
Şekil 4.11. Analiz ve test çalışmaları sonucunda kalıcı deformasyonların karşılaştırmaları - görsel 2.....	43
Şekil 4.12. Analiz çalışmalarından elde edilen zamana bağlı maksimum deformasyon bilgisi ile test çalışmasından elde edilen maksimum deformasyon değeri	44



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Bilinen bazı malzeme denklemleri	19
Çizelge 4.1. Analiz sonuçlarının deformasyonlar açısından sapma yüzdeleri.....	44



1. GİRİŞ

Yüksek sertlik ve tokluk özelliklerine sahip olan yüksek mukavemetli çelikler, zırh çelikleri olarak da bilinmektedir. Bu çalışma, yüksek mukavemetli bir çelik malzemenin, sonlu elemanlar metodu (FEM - finite element method) kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analizleri ve analiz sonuçlarının test sonuçları ile karşılaştırılmasını içermektedir.

Yüksek mukavemetli çelik malzemenin, dinamik yükler altındaki davranışları nümerik analizlerle incelenmiştir. Çalışmalarda ConWep, ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) ve SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) metodu olmak üzere üç ayrı yöntem kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analiz modelinin oluşturulmasında, model parametrelerinin düzenlenmesinde ve malzeme modelinin tanımlanmasında HyperMesh ve Ls-PrePost yazılımları kullanılmıştır. Sonlu elemanlar çözücü kodu olarak LS-DYNA kullanılmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarının görselleştirilmesi için HyperView ve HyperGraph yazılımlarından faydalanılmıştır. (Mazurkievics ve ark. 2013)

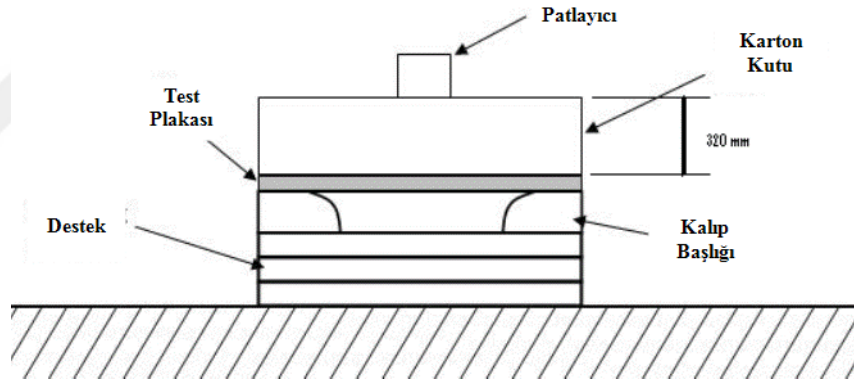
Analizlerde, yaklaşık sonuçlar elde edebilmek için yapılan çalışmaya uygun malzeme modeli seçilmesi ve malzeme parametrelerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple bu çalışmada, deformasyon hızı değişiminin etkilerini de içeren Johnson-Cook malzeme modeli kullanılmıştır. Mekanik laboratuvar testleri ile malzeme sabitleri çıkarılmıştır.

Testin sürdürülebilirliğinin ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılmasının yapılabilmesi amacıyla bir test düzeneği tasarlanmıştır. Analiz çalışmaları ile aynı sınır şartlarında olacak şekilde testler gerçekleştirilmiştir. Bu düzeneğin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve nümerik analizlerde kullanılmıştır. Çalışmaların sonucunda, elde edilen analiz ve test sonuçları, dinamik ve kalıcı deformasyonlar açısından kıyaslanarak hangi analiz yönteminin kullanımının daha uygun olduğu araştırılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Sayısal kodların oluşturulması ve bilgisayarın yeteneklerinin artması ile birlikte, yüksek mukavemetli çeliklerin maruz kaldığı yükler ve penetrasyon/deformasyon mekanizmaları incelenabilir duruma gelmiştir. Geliştirilen sayısal yöntemler ve test aparatları, çalışmaların doğrulanmasına katkı sağlamıştır.

Choi ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada dört farklı zırh malzemesinin dinamik yüklemelerine karşı performanslarını araştırmışlardır. Zırh malzemelerinin tokluk ölçümlerini özel bir test düzeneği ile yapmışlardır. Test düzeneğinin görseli Şekil 2.1’de yer almaktadır. Test numunelerine, belirlenen uzaklıktan dinamik yüklemeler uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda malzemelerin mekanik özellikleri hakkında değerlendirmeler yapılmış ve tavlama sıcaklığının etkileri yorumlanmıştır.

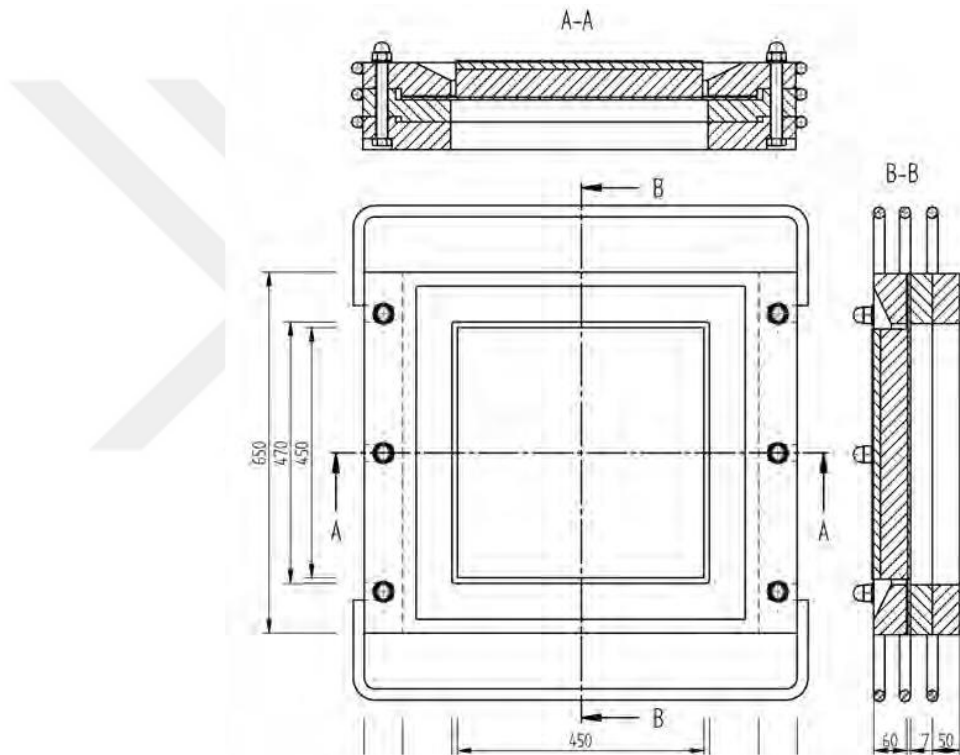


Şekil 2.1. Test düzeneği (Choi ve ark. 2013’den değiştirilerek alınmıştır)

Saleh ve Edwards (2015) simülasyon çalışmalarını LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Simülasyonlarda ALE ve ConWep yöntemleri kullanılmıştır. Toprağı farklı malzeme modelleri ile modellemiş (*MAT_FHWA*, *MAT_SOIL_AND_FOAM*, *MAT_PSEUDO_TENSOR*) ve bu malzeme modellerinin havada durduğu varsayılan bir plaka üzerindeki etkileri incelenmiştir. Aynı senaryo için ConWep yöntemi ile de çözümler yapılmış ve tüm sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar plakada oluşan deformasyon miktarları, plastik gerinimler, basınç değerleri ve impuls değerleri ile ALE yönteminde gözlemlenebilen, yüklemeler sırasında toprakta

oluşan krater ölçüleri açısından değerlendirilmiştir. Bunun yanında, plakanın dinamik yüklemeler sonucunda ulaştığı maksimum yükseklik test ölçümleri ile karşılaştırılmıştır.

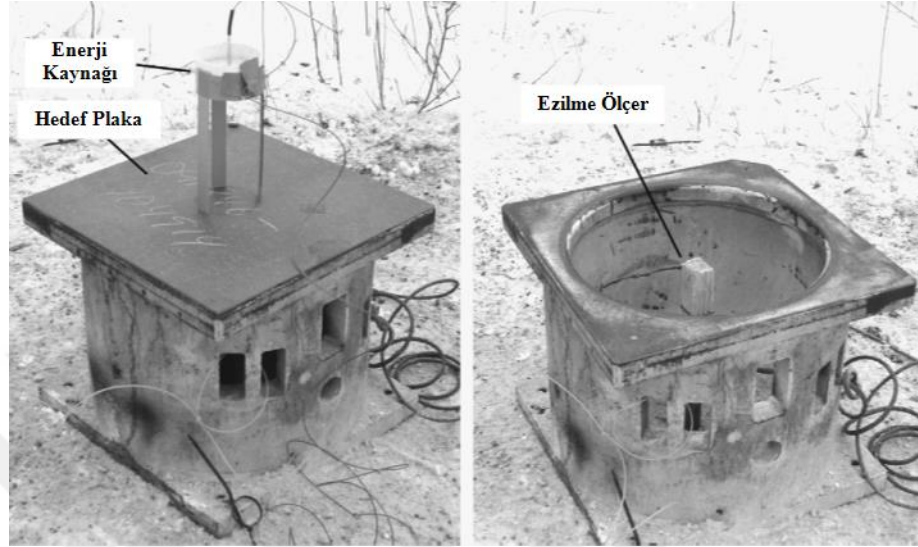
Klasztorny ve ark. (2010) çalışmalarında bir zırh sisteminin testlerini sunmaktadır. Bu sistemde sandviç şeklindeki kalkan yapı test edilmiştir. Dinamik yükler uygulanarak, kalkan yapının sisteme olan etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar deformasyonlar açısından birbiriyle ve başka bir çalışmadaki (Klasztorny ve ark. 2010) analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 2.2).



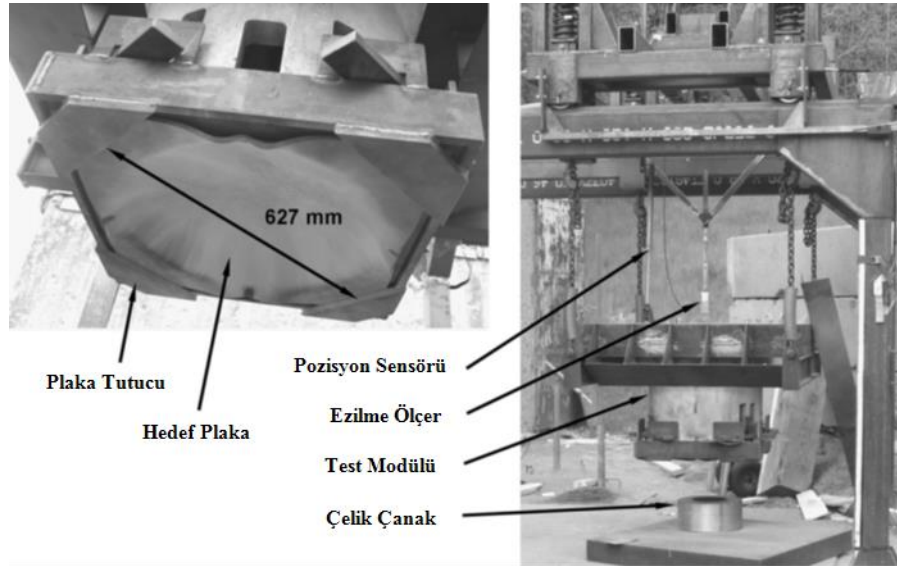
Şekil 2.2. Test sistemi ve kesit gösterimi (Klasztorny ve ark. 2010)

Zakrisson ve ark. (2011) çelik plakalar üzerine yakın mesafeden hava ortamında yapılan dinamik yüklemenin sayısal simülasyonlarını gerçekleştirmiş ve sonuçları deneylerle karşılaştırmışlardır. Nümerik analizlerde, hava ortamındaki test senaryosu için ConWep yöntemi, çelik çanakta yapılan test senaryosu için ise ALE yöntemi kullanılmıştır. Test numunesi olarak, malzeme sabitleri bilinen bir malzeme seçilmiştir. Test çalışmaları için, hava ortamında yapılan (Şekil 2.3) ve çelik çanak içerisinde yapılan (Şekil 2.4) iki farklı

test aparatı kullanılmıştır. Test çalışmalarında dinamik ve kalıcı deformasyon ölçümleri yapılmıştır. Test ve nümerik analiz sonuçları dinamik ve kalıcı deformasyonlar açısından karşılaştırılmıştır.



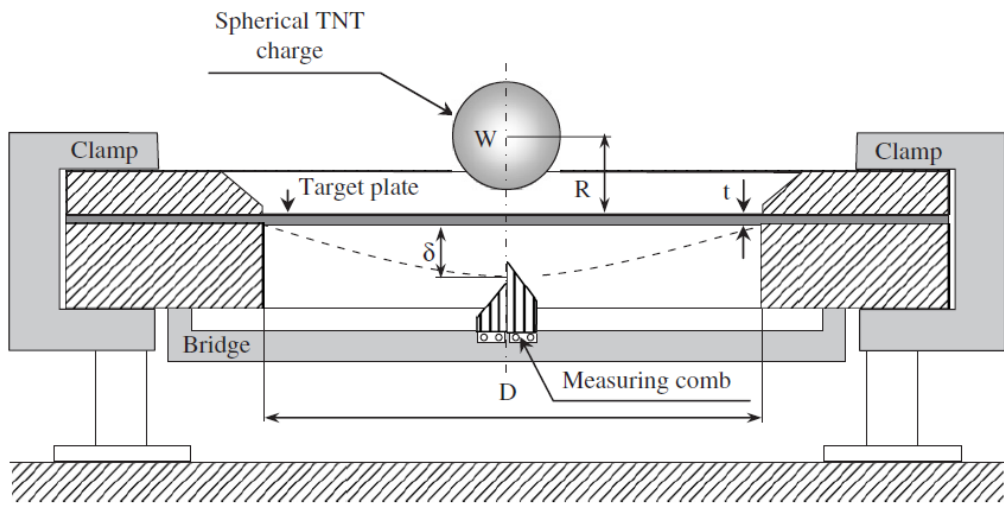
Şekil 2.3. Hava ortamında dinamik yükleme için hazırlanmış test aparatı (Zakrisson ve ark. 2011'den değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 2.4. Çelik çanak içerisinde dinamik yükleme için hazırlanmış test aparatı (Zakrisson ve ark. 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

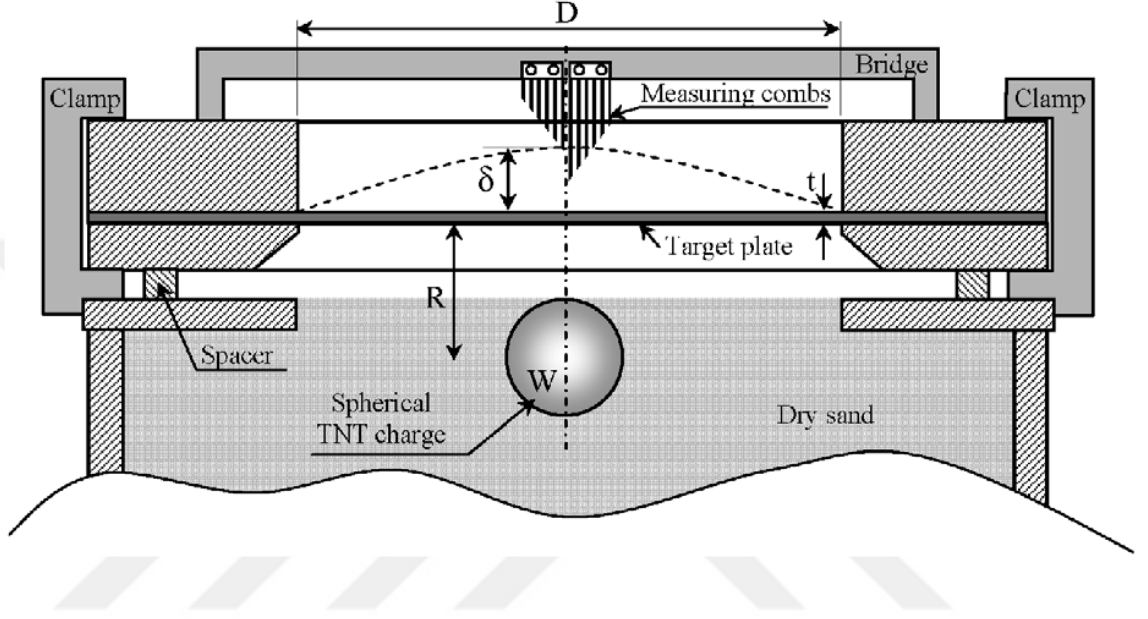
Chafi ve ark. (2009) çalışmalarında ALE formülasyonu kullanarak, dinamik yüklemeli simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Hava ortamındaki yükleme senaryosu için çoklu malzeme formülasyonu kullanılmıştır. Üç farklı senaryo için simülasyonlar yapılmıştır. Bunlardan ikisi, açık hava ortamındaki dinamik yüklemenin oluşturduğu basınç şok dalgasının gözlemlenmesidir. Üçüncü senaryoda, dinamik şok dalgalarının zırh sacına etki etmesi sonucunda zırh çeliğinin davranışı incelenmiştir. Simülasyonlar sonucunda elde edilen maksimum basınç, dinamik yükleme mesafesinin değişim etkisi, şok dalgasının varış zamanı ve test numunesi zırh malzemesinin deformasyon değerleri, literatürde yapılan test çalışmaları ile karşılaştırılmıştır. Sayısal analizde kullanılan malzeme sabitlerinin kullanımları değerlendirilmiştir.

Neuberger ve ark. (2007a) çalışmalarında, kontrollü yapılan dinamik yükleme testlerinin ve sayısal analizlerin sonuçlarını sunmuşlardır. Sayısal analizler LS-DYNA yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çözüm metodu olarak ConWep kullanılmıştır. Test edilen numune, iki farklı malzeme modeli ile modellenmiştir. Ardından yapılan test çalışmalarında, dinamik yükler altındaki numunenin deformasyon bilgileri elde edilmiştir. Çalışmalarda kullanılan test aparatı görseli Şekil 2.5'te verilmiştir. Sonuçlar, analiz modelinde değiştirilen bağlama şekilleri, farklı malzeme modellerinin sonuçlara etkisi ve deformasyonlar açısından değerlendirilmiş ve test sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



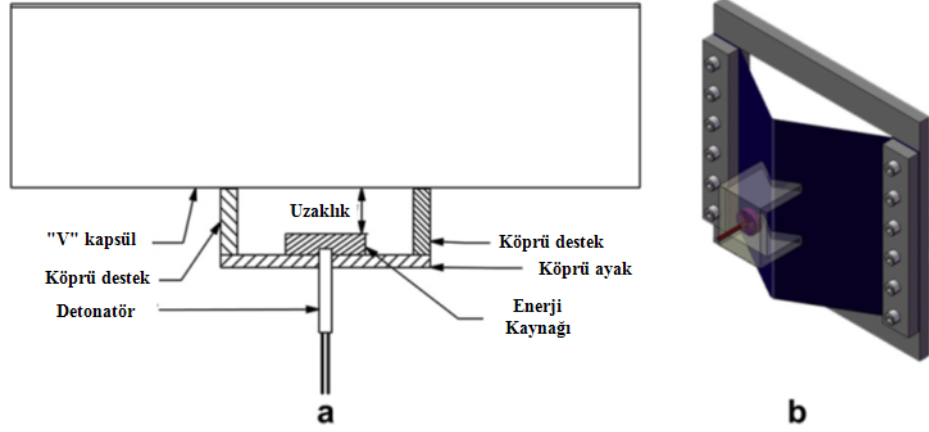
Şekil 2.5. Test ve deformasyon ölçüm düzeneği (Neuberger ve ark. 2007a)

Neuberger ve ark. (2007b) ALE çözüm metodu kullanarak test plakasına dinamik yükler uygulamışlardır. Geliştirilen test aparatıyla, numune test yüklerine maruz bırakılmıştır. Test aparatı görseli Şekil 2.6’da paylaşılmıştır. Sonuçlar, farklı bağlama şekillerinin ve farklı malzeme modellerinin sonuçlara etkisi ile numunedeki deformasyonlar açısından değerlendirilmiş ve test sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.6. Test ve deformasyon ölçüm düzeneği (Neuberger ve ark. 2007b)

Yuen ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada, farklı büküm açılarıyla üretilmiş olan “V” şeklindeki numunelerin farklı yüklemelere karşı davranışlarını sayısal analizlerle incelemiştir. Sayısal analiz çözümleri Ansys/AutoDYN sonlu elemanlar çözücüsünde gerçekleştirilmiştir. Çözümlerde ALE metodu kullanılmıştır. Analiz modeline ait şematik gösterim Şekil 2.7’de verilmiştir. Test numunesi malzemesi Johnson-Cook modeli ile modellenmiştir. Çalışmanın sonunda analiz sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Büküm açlarına göre sonuçlar değerlendirildiğinde, küçük büküm açısına sahip olan numunelerin dinamik enerjileri daha fazla saptırdıkları belirlenmiştir.



Şekil 2.7. Analiz modeli şematik gösterimi (Yuen ve ark. 2012'den değiştirilerek alınmıştır)

Alia ve Souli (2006) hava ortamındaki dinamik yüklemeleri nümerik analizlerle incelemiştir. Nümerik analizler LS-DYNA sonlu elemanlar çözücüsünde gerçekleştirilmiş, çözüm yöntemi olarak ALE seçilmiştir. Hava ortamını tanımlamak için ideal gaz denklemini kullanmışlardır. Küresel ve dikdörtgen prizma formunda hava ortamı seçerek, katı tip sonlu elemanlarla model ağ yapısını oluşturmuşlardır. Model üzerinde belirlenen noktalardan basınç değerleri okumuş ve bu değerleri saha testlerinden ölçülen değerler ile karşılaştırmışlardır.

Barsotti ve ark. (2012) bir test numunesini, SPH ve ALE yöntemleri kullanılan nümerik analizlerle incelemiştir. Bu çalışma, daha önce gerçekleştirilmiş olan ve Anderson ve ark.'nın (2010) çalışmasında sunulan test ve ALE metodu ile yapılan nümerik analiz çalışmalarının SPH metodu kullanılarak tekrarlanmasıdır. Çalışmada "V" şeklinde hazırlanan bir numune farklı açılarda bükülerek test edilmiştir. Sonuçlar büküm açılarının değişimine ve nümerik analiz yöntemlerinden elde edilen sonuçlara göre değerlendirilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

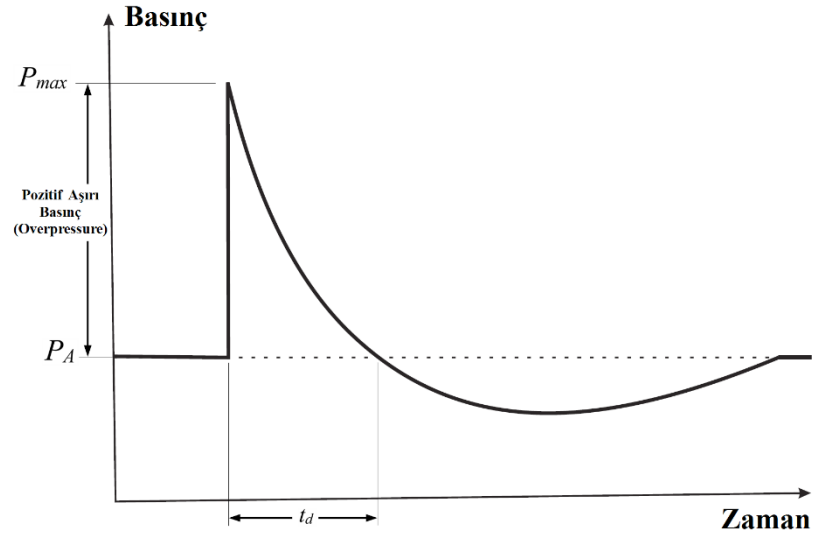
3.1. Dinamik Basınç Dalgası

Açık havada oluşturulan ve havanın ani şekilde sıkışmasına sebep olan bir dinamik şok dalgasının, bir noktadaki zamana bağlı basınç değeri incelendiğinde ani ve dik bir artış gösterdiği görülmektedir. Tipik olarak ön şok dalgasının geçişi sırasında en üst seviyeye çıkmaktadır. Ardından eksponansiyel eğri benzeri bir azalış göstermektedir. Dinamik yükleme koşullarına ve kaynakla olan mesafeye bağlı olarak basınç, kısa bir süre atmosferik basınç değerinin altında kaldıktan sonra (vakum etkisi), atmosferik basınç değerinde dengeye gelmektedir. Basınç şok dalgasının basınç-zaman profili Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Ölçülen en yüksek basınç P_{max} ile atmosferik basınç P_A arasındaki fark, pozitif aşırı basınç (overpressure) P_O olarak ifade edilmiştir. Ampirik düzeltme faktörünün eklendiği, zamana bağlı basınç değişimini ifade eden denklem (3.1)’de verilmiştir (Kinney ve Graham 1985).

$$P(t) = P_0 \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) e^{-\alpha\left(\frac{t}{t_d}\right)} \quad (3.1)$$

Burada α azalım parametresi, t zaman, P , t anındaki basınç değeri, P_0 maksimum aşırı basınç, t_d pozitif zaman periyodu, e doğal logaritma tabanıdır.



Şekil 3.1. Basınç şok dalgasının basınç-zaman profili

Pozitif basıncın zaman periyodu, pozitif impuls süresi olarak tanımlanır. İmpuls I , pozitif basınç süresi boyunca basınç eğrisinin altındaki alan olarak tanımlanır. Negatif impuls süresi ve negatif impuls tipik olarak pozitif impuls etkisinden çok daha uzun ve daha küçüktür. Negatif impuls etkilerinin, dayanıklı yapı tasarımları için genellikle önemsiz olduğu kabul edilmektedir (Shukla ve ark. 2014). Havada oluşturulan dinamik basınç dalgaları ile ilgili teorik çalışmalardan elde edilen ortak bulgulara göre, basınç kaynağından uzaklaştıkça pozitif aşırı basınç ve impuls değerlerinin güçlü bir düşüş gösterdiği bilinmektedir.

3.2. Nümerik Analiz

Bu tez çalışmasında, dinamik analizler sonlu elemanlar analizi (FEM) yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Çözümler LS-DYNA sonlu elemanlar çözücüsünde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada $10^4 - 10^6 \text{ s}^{-1}$ mertebelerinde yüksek deformasyon hızlarında yüklemeler kullanılmıştır. Buna benzer senaryolar, zamana bağlı, doğrusal olmayan, dinamik ve çok fizikli çözümler gerektirmektedir. Tüm bu gereklilikleri karşılayan yöntem olarak bilinen explicit çözüm, LS-DYNA yazılımının temelini oluşturmaktadır. Bu yüzden çözümlerde LS-DYNA yazılımı tercih edilmiştir.

Herhangi bir sonlu elemanlar analizinde, “implicit” ve “explicit” olmak üzere iki farklı çözüm yaklaşımı izlenmektedir. Hangi yaklaşımın izleneceği, sistemin/sonlu elemanlar modelinin malzemelerine, geometrisine, kontak türüne ve problemin statik veya dinamik olma durumuna göre seçilmektedir. Statik analizlerde atalet etkisi dikkate alınmazken, dinamik analizlerde atalet ve sönüme bağlı düğüm noktalarında oluşan kuvvetler hesaplamalara dahil edilmektedir.

Implicit sonlu elemanlar analizlerinde, her bir artımlı adımın sonunda (yükün veya yer değiştirmenin artmasına dayanarak) katılık matrisi güncellenmektedir. Her bir artımlı adımdan sonra, iç yapı kuvvetlerini ve dışarıdan uygulanan kuvvetleri, kullanıcı tarafından belirlenmiş olan toleranslar dahilinde eşitlemek için Newton-Raphson yinelemesi gibi bir dizi deneme çözümü uygulanmaktadır. Bu yöntem, çok fazla adım gerektirdiğinde yakınsama problemleriyle karşılaştığından uygulanamaz hale gelmektedir. Bu durumda katılık matrisi güncellenmekte ve yeniden yapılandırılmaktadır.

Explicit sonlu elemanlar analizlerinde, her bir artımlı adımın sonunda geometrik ve malzeme değişikliklerine bağlı olarak katılık matrisi güncellenmektedir. Bir sonraki adımda sisteme güncel yük ve yerdeğiştirmeler uygulanmaktadır. Adım aralıkları, yeterli sayılabilecek küçük zaman adımları olarak seçildiğinde çözümler doğru sonuçlara yaklaşmaktadır, ancak küçük zaman adımları seçilmesi çözüm sürelerini artırmaktadır. Bu nedenle, explicit analiz, çok kısa süreli durumdan kaynaklanan doğrusal olmayan dinamik problemlerin çözümleri için daha uygun bir yöntemdir (Tüzgel 2017).

Explicit çözümlerde, uygun çözümler elde edebilmek için kullanıcı tarafından seçilen zaman adımları, *kritik* zaman adımlarına eşit veya daha küçük seçilmesi gerekmektedir. Her bir eleman tipi (bir boyutlu kiriş, iki boyutlu kabuk, üç boyutlu katı) ve kontaklar için kritik zaman adımı değerinin hesaplama formülü farklıdır. Örnek olarak kabuk elemanlara ait kritik zaman adımı Δt_e (3.2)'de verilmiştir (LSTC 2019).

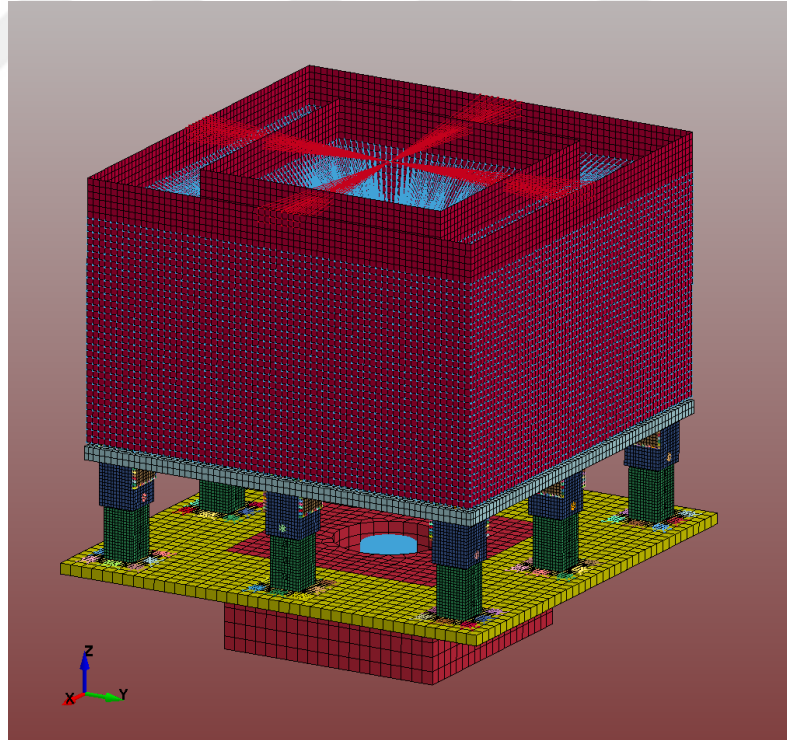
$$\Delta t_e = \frac{L_s}{c} \quad (3.2)$$

Burada L_s kabuk elemana ait karakteristik uzunluk, c ise malzemeye ait ses hızıdır. Karakteristik uzunluk kabuk elemanın şekline ve düğüm noktalarının birbirine göre konumlarına bağlı iken, ses hızı ise ilgili kabuk elemana atanmış olan malzeme parametreleri ile alakalıdır. Ses hızının hesaplanmasını gösteren formül (3.3)'de belirtilmiştir (LSTC 2019).

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (3.3)$$

Burada E elastisite modülü, ρ malzeme yoğunluğu ve ν poisson oranıdır.

Bölüm 3.3'de paylaşılan plaka test aparatının sonlu elemanlar modeli HyperMesh yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Analiz tanımlamaları ise LS-PrePost yazılımında yapılmıştır. Sonlu elemanlar modeli görseli Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Plaka test aparatı sonlu elemanlar modeli

Test aparatının bazı bölümleri, çözüm sürelerinden kazanç sağlamak ve dosya boyutlarını gereksiz büyütmemek için sonlu elemanlar modeline eklenmemiştir. Taşıyıcı platform bölümünün üst yüzeyi ve çelik çanak modele dahil edilmiş olup, beton doldurulan hacmi rijit kabul edilerek modele dahil edilmemiştir. Plaka baskı yükünün beton dolu hacmi de benzer şekilde rijit kabul edilmiştir. Ölçüm aparatı bölümü ve plaka baskı yükü noktasal kütle olarak bulunmaktadır.

Test plakası dışında kalan parçaların malzemeleri, bu parçaların deformasyonları/hasar durumları incelenmemiş olup test plakasının davranışını etkilemediğinden doğrusal kabul edilmiştir.

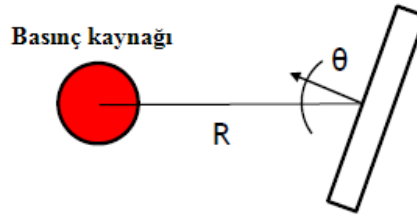
3.2.1. Analiz Yöntemleri

Bilgisayar ortamında gerçekleştirilen analizler, içerisinde çözüm metodları barındıran sonlu elemanlar kodları ile yapılmaktadır. Dinamik yüklemeler için en bilinen çözüm metodları ConWep basınç dalgası modeli, Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) metodu ve Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) metodudur (Mazurkievics ve ark. 2013).

Bu çalışmada ConWep modeli, ALE metodu ve SPH metodu ile çözümler gerçekleştirilmiştir.

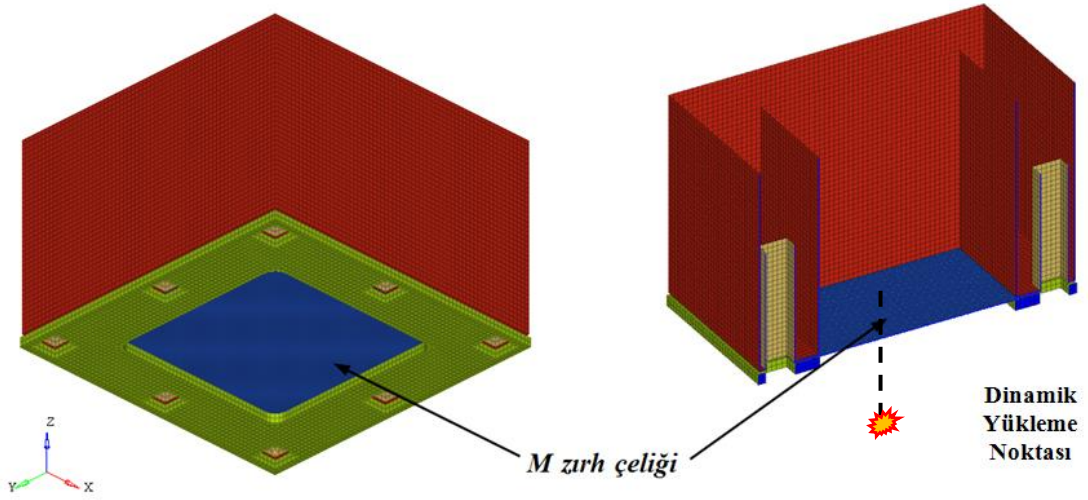
3.2.2. ConWep Modeli ile Oluşturulan Sonlu Elemanlar Çözümlemesi

ConWep yöntemi kullanıldığında, herhangi bir Euler elemana ihtiyaç duymadan yapı üzerine basınç yükleri uygulanabilmektedir (Şekil 3.3). LS-DYNA kodunda ConWep yöntemini çağırmak için **LOAD_BLAST_ENHENCED* kartı kullanılmaktadır (Dobrociński ve Flis 2015, LSTC 2016a).



Şekil 3.3. ConWep şematik gösterimi ve segment eleman normali θ (Hilding 2016'dan değiştirilerek alınmıştır)

Bu çalışmada ConWep modeli hazırlanırken, test aparatının taşıyıcı platform, yükseklik ayar montajı ve ölçüm aparatı bölümleri modele dahil edilmemiştir. Ayrıca yönlendirme etkileri, ConWep ile modellenemediğinden çelik çanak da modele dahil edilmemiştir (Şekil 3.4).



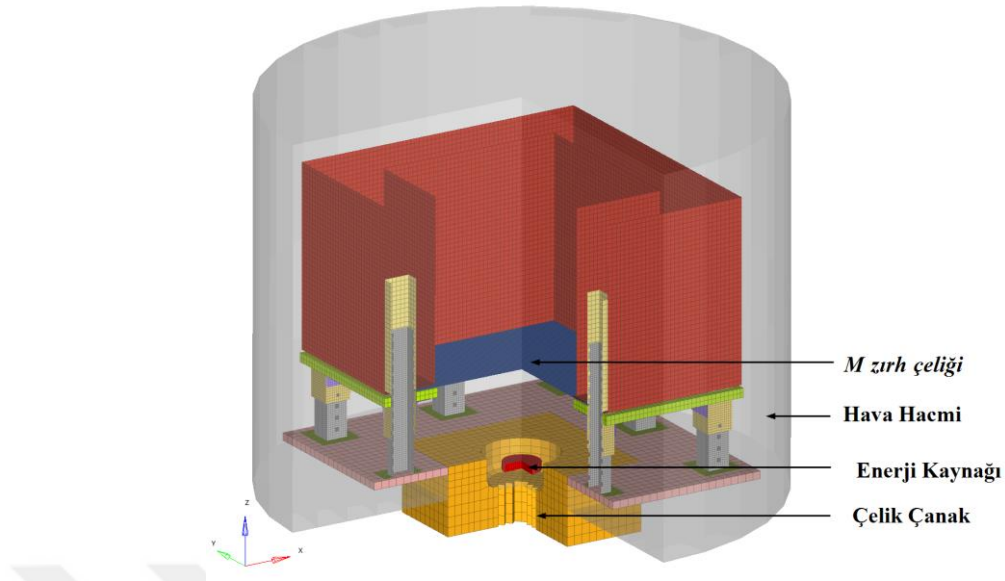
Şekil 3.4. ConWep sonlu elemanlar modeli

3.2.3. ALE Metodu ve Sonlu Elemanlar Modeli

LS-DYNA sonlu elemanlar kodunda bulunan ALE metodu, dinamik yükleme analizlerinin modellenmesinde kullanılan bir diğer metottür. Enerji kaynağı ve hava komponentleri, üç boyutlu katı elemanlarla Euler formülasyonunda modellenmektedir.

Komponentler ortak düğüm noktaları ile birbirlerine bağlıdır. Euler formülasyonuna sahip elemanlar akışkan özelliğine sahiptir. ALE metodunda akışkan-katı etkileşimleri (FSI – Fluid Structure Interaction) gözlemlenebilmektedir (LSTC 2019, Noh 1963, Benson 1997). Yapısal komponentler Lagrange formülasyonuna sahip elemanlarla modellenirler ve akışkan özellikteki (hava, su, toprak vb.) euler hacimlerin içerisinde herhangi bir ortak düğüm noktası bulunmadan konumlandırılmaktadır. Akışkan hacminde gerçekleşen yüksek enerjili yüklemeler, akıntı hareketi, çalkalanma gibi olayların yarattığı etkiler FSI kontak tanımlamaları ile yapısal komponentlere iletilir (Aquelet ve ark. 2003, Souli ve ark. 2003). Euler tipi yapıların birbiriyle olan etkileşimleri *ALE_MULTI_MATERIAL_GROUP kartı ile sağlanmaktadır (Alia ve Souli 2006). Akışkan-katı etkileşimi “penalty” formülasyonu temeline dayanmaktadır (Benson 1997, LSTC 2016a).

Bu çalışmada ALE modeli hazırlanırken, test aparatının taşıyıcı platformun yüzey plakası dışında kalan hacim ile ölçüm aparatı bölümleri haricindeki tüm komponentler modele dahil edilmiştir. Basınç yüklerini oluşturacak enerji kaynağı çelik çanak içerisine yerleştirilmiştir. Böylece yönlendirme etkilerinin test plakasına gelecek yükleri artırması hedeflenmiştir. ALE metodu için hazırlanan sonlu elemanlar modeli, Şekil 3.5. ALE çözüm metodu sonlu elemanlar modeli 'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.5. ALE çözüm metodu sonlu elemanlar modeli

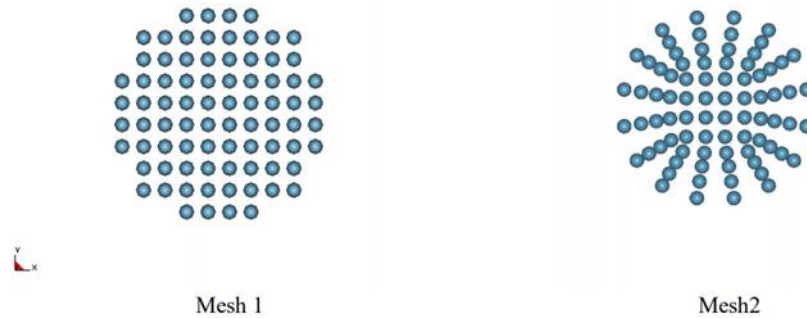
3.2.4. SPH Metodu ve Sonlu Elemanlar Modeli

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) bir ağ örgüsüz (meshfree) çözüm metodudur. SPH metodu ilk olarak Lucy (1977) tarafından geliştirilmiştir. Daha sonra Gingold ve Managhan (1977) tarafından astrofizik problemlerinin çözümünde kullanılmıştır. Metot, katı mekaniği, Navier-Stokes denklemlerinin yönettiği Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) uygulamaları ve akışkan etkileşimli problemlerde $10^2 - 10^6 \text{ s}^{-1}$ mertebelerindeki yüksek darbe hızını çözmek için genişletilmiştir. Lacomme (2000), büyük ağ yapısı deformasyonları ve yüksek hızlı darbe problemlerinde meydana gelen iç içe geçme ile ilgili problemleri önlemek için LS-DYNA kodunda bu yöntemi uygulamıştır. LS-DYNA çözücü kodundaki SPH yöntemi, akışkan gibi hareket eden bir dizi parçacık ile temsil edilmektedir. Her bir SPH parçacığı, üzerine atanan malzeme özelliklerini taşır ve bir hesaplama noktası olarak kabul edilir. Arka plandaki matematiksel çözüme bakıldığında, tüm problemin çözümünü sağlamak için, her bir parçacık için denklem çözümleri yapılmaktadır (Lacomme 2000, LSTC 2019).

SPH metodu ile yapılan bazı uygulamalar:

- Dövme ve ekstrüzyon, metal kesme
- Yüksek hızlı çarpışma
- Katı-akışkan etkileşim problemleri
- Çalkalanma ve akışkan sıçraması
- Sıkıştırılmaz sıvılar
- Katıların parçalanması ve parçacık etkileri

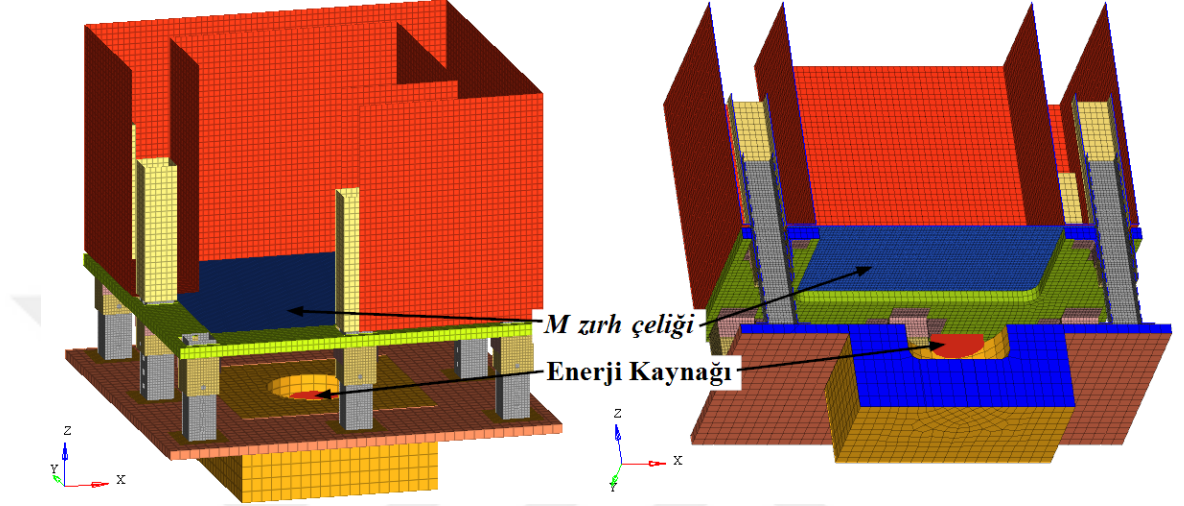
LS-DYNA kodunda bulunan SPH işlemcisi için, parçacıkların kütleleri ve konumları ile ilgili bazı gereklilikler bulunmaktadır. Parçacık ağ yapısı yeterli düzene sahip olması gerekmektedir. İlgili parçacık kümesindeki tüm parçacıkların kütlelerinin aynı olması gerekmektedir. Dolayısıyla, aynı başlangıç yoğunluğuna sahip olan aynı malzemeden parçacıkların, aynı başlangıç hacmine sahip olmaları gerekmektedir. Yöntemin isminde geçen “Smoothed” yani yumuşatılmış/eş dağılıma sahip anlamına gelen ifadenin geçmesinin sebebi budur. Bunu sağlayabilmek için olabildiğince düzenli bir şekilde ağ yapısına yayılmış olmalıdırlar. Örnek olarak, Şekil 3.6’da parçacıkların ağ yapısı “Mesh 1” ve “Mesh 2” olarak iki farklı şekilde dağılımları verilmiştir. Çözümlerde kararlılık ve yakınsamanın sağlanabilmesi için, oluşturulan parçacık ağ yapısı, “Mesh 1” dağılımında veya buna en yakın düzende olmasına özen gösterilmelidir (Lacome 2000).



Şekil 3.6. SPH metodunda elemanların diziliş örnekleri (Lacome 2000)

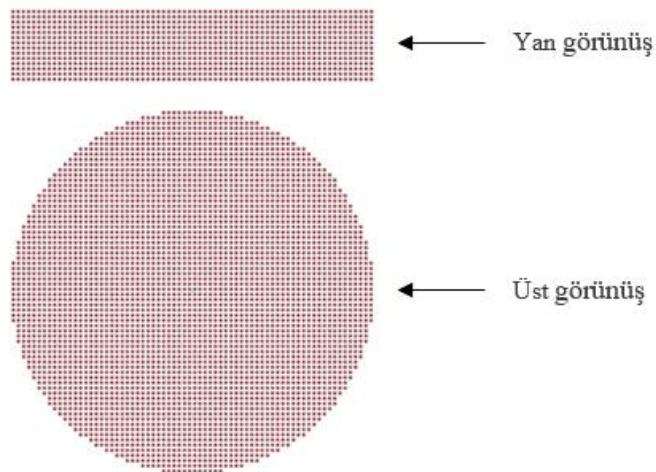
SPH metodu ile yapılacak çözüm için gerekli model hazırlanırken, ALE motodunda kullanıldığı hali ile, test aparatının taşıyıcı platformun yüzey plakası dışında kalan hacim

ile ölçüm aparatı bölümleri haricindeki tüm komponentler modele dahil edilmiştir. SPH metodu için hazırlanmış olan sonlu elemanlar modeli Şekil 3.7’de paylaşılmıştır. SPH çözümü için, sadece enerji kaynağının SPH parçacıkları ile modellenmesi yeterlidir. Hava hacmi için herhangi bir tanımlama yapılmamıştır.



Şekil 3.7. SPH metodu sonlu elemanlar modeli

Modelde SPH elemanların dizilimi yan ve üst görünüşten olmak üzere Şekil 3.10’da verilmektedir.



Şekil 3.8. SPH elemanların dizilimi

3.2.5. Sonulu Elemanlar Malzeme Modelleri

Mühendislik çalışmalarında kullanılan birçok malzeme, üzerlerine gelen yüklemelerin gerinim oranları ve sıcaklıklar değiştiğinde farklı tepkiler vermekte, farklı gerilme değerleri üretmektedirler. Bu çalışma ve uygulamalara örnek olarak araba kazaları ve enerji sönmüleme mekanizmaları, üzerine kuş çarpma etkileri gelen uçak gövdeleri ve aşırı yüksek sıcaklıklara maruz kalan motor malzemeleri verilebilir. Bu nedenle malzemelerin mekanik davranışlarını tahmin etmek için farklı gerinim hızlarında ve sıcaklıklarında test edilmeleri gerekmektedir. Bununla birlikte, her farklı gerinim hızında ve her sıcaklıkta malzemeleri test etmek yüksek maliyetler gerektirir ve zaman alıcıdır; bu nedenle, malzemelere yük uygulanması, yüklenme hızı ve sıcaklığın fonksiyonu olarak davranışını ilişkilendirmek için malzeme davranışını temsil eden denklemler geliştirilmiştir. Bu denklemler “malzeme modelleri” ismiyle de anılmaktadır.

İdeal bir malzeme denklemi, normal ve yüksek sıcaklıklarda yarı-statik (quasi-static) ($1 \times 10^{-3} - 1 \text{ s}^{-1}$) malzeme davranışını ve dinamik gerinim hızlarındaki ($> 100 \text{ s}^{-1}$) malzeme davranışlarını tahmin etmelidir.

Çizelge 3.1’de yaygın olarak kullanılan malzeme denklemleri, bu denklemlerde kullanılan parametreleri ile birlikte verilmiştir. Bu denklemlerden en yaygın kullanıma sahip olan denklem, Johnson ve Cook tarafından geliştirilmiş olan ve Johnson-Cook (J-C) olarak da bilinen denklemdir.

Çizelge 3.1. Bilinen bazı malzeme denklemleri (Bustchow 2008)

Yazar(lar)	Malzeme Denklemi	Parametreler
Ludwik (1990)	$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n$	$\sigma_0, K, n = \text{sabitler}$
Holloman (1945)	$\sigma = K\varepsilon^n$	$K, n = \text{sabitler}$
Swift (1952)	$\sigma = K(\varepsilon_1 + \varepsilon)^n$	$K, n = \text{sabitler}$ $\varepsilon_1 = \text{ön deformasyon}$
Voce (1948)	$\sigma = \sigma_0 - (\sigma_1 - \sigma_0) \exp(-n\varepsilon)$	$\sigma_0, \sigma_1, n = \text{sabitler}$
Tome ve ark. (1984)	$\sigma = \sigma_0 + (\sigma_1 + \theta_1\varepsilon) \left(1 - \exp\left(\frac{\theta_0\varepsilon}{\sigma_1}\right)\right)$	$\sigma_0 = \text{akma gerilmesi}$ $\sigma_1 = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \text{sabit}$ θ_1 ve $\theta_1 = \text{deformasyon sertleşmesi faktörü}$
Ludwingson (1971)	$\sigma = K_2\varepsilon^{n_1} + \exp(K_2 + n_2\varepsilon)$	$K_1, K_2, n_1, n_2 = \text{sabitler}$
Gladman ve ark. (1970)	$\sigma = \sigma_0 + K_1 \ln \varepsilon + K_2\varepsilon$	$\sigma_0, K_1, K_2 = \text{sabitler}$
El-Magd ve Troost (1997)	$\sigma = K\varepsilon^n \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^m$	$K, n, m, \dot{\varepsilon}_0 = \text{sabitler}$
El-Magd (1997)	$\sigma = [K_1 (K_2 + \varepsilon)^n + \eta\dot{\varepsilon}] \exp\left(-\frac{\beta(T - T_0)}{T_m}\right)$	$K_1, K_2, n, \eta, \beta = \text{sabitler}$
Reiff ve ark. (1986)	$\sigma = \left[K_1 + K_2 \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{m}} + K_3\sqrt{\varepsilon} \right]$	$K_1, K_2, K_3, m = \text{sabitler}$
Johnson ve Cook (1983)	$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right] [1 - (T^*)^m]$	$A, B, n, C, m = \text{sabitler}$
Cowper Symond	$\sigma_y = [\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_{eff}^p] \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{D}\right)^{1/p}\right]$	$D, P = \text{sabitler}$ $\sigma_y = \text{ilk akma gerinimi}$ $E_p = \text{plastik sertleşme modülü}$
Zerilli ve Armstrong (1987)	$\sigma = \sigma_0 + K_1 \left(\frac{\dot{\varepsilon}_0}{\dot{\varepsilon}}\right)^{-K_3 T} + \frac{K_2}{e^{-K_4 T}} \varepsilon^n + K_5 d^{-\frac{1}{2}}$	$\sigma_0, K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, n, \dot{\varepsilon}_0 = \text{sabitler}$

3.2.6. Johnson-Cook Malzeme Modeli

Johnson-Cook malzeme modeli, birçok kaynakta Johnson ve Cook'un (1983) yaptıkları çalışmaya dayandırılmaktadır. J-C malzeme modeli, yüksek deformasyon hızlarının etkilerini ve sıcaklık etkilerini içerisinde barındırmaktadır. Malzemeye ait gerilme-gerinim eğrisinde, akma gerilmesinden sonraki plastik bölgeyi ifade etmektedir. Sonlu elemanlar yazılımları için, ampirik bir formül olduğundan dolayı hesaplama kolaylığı sağlar ve çözümlere hız kazandırmaktadır.

J-C malzeme modeli (3.4)'de paylaşılmıştır.

$$\sigma = [\sigma_0 + B\varepsilon^n] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] [1 - (T^*)^m] \quad (3.4)$$

Burada;

- σ = Gerilme değeri
- σ_0 = Akma gerilmesi
- B = Gerinim sertleşme katsayısı
- C = Gerinim oranı hassasiyet katsayısı
- n = Gerinim sertleşme faktörü
- m = Termal yumuşama katsayısı
- $\dot{\varepsilon}_0$ = Referans gerinim oranı
- T^* = normalize sıcaklıktır.

T^* , (3.5) denklemleri ile açıklanmaktadır.

$$T^* = \frac{(T - T_r)}{(T_{Melt} - T_r)} \quad (3.5)$$

Bu denklemde T sıcaklık, T_r oda sıcaklığı ve T_{Melt} ergime sıcaklığı olarak verilmektedir.

Denklem (3.7)'nin ilk bölümü, izotermal plastik gerinim etkisini içermekte olup $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ (kolaylık olması için) olarak seçilmektedir. İkinci bölümü, gerinim hızı etkilerini içermekte olup, üçüncü bölümü de sıcaklık etkilerini içermektedir. σ_0 , B ve n sabitleri, referans gerinim hızında (genellikle $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ olarak verilmektedir) yarı-statik gerinim hızında elde edilen gerilme-gerinim eğrisinden elde edilebilmektedir. Sabitlerin belirlenmesi, belirli şartlarda verilerin kombinasyonuna ve uygun grafiklerde işlenmesine bağlıdır. Modeli şekillendirmek için izotermal yarı-statik gerilme-gerinim, farklı gerinim hızlarında elde edilmiş gerilme-gerinim ve farklı sıcaklıklarda elde edilmiş gerilme-gerinim eğrilerinin elde edilmesi gerekmektedir (Jutras 2008).

3.2.7. Malzeme Karakterizasyonu

Malzeme karakterizasyonu, bir malzemeyi temsil edecek malzeme modeli için gerekli olan sabitlerin belirlenmesi işlemidir. Bu çalışmada, testlerde kullanılan yüksek mukavemetli zırh çeliğinin malzeme karakterizasyonu yapılmıştır.

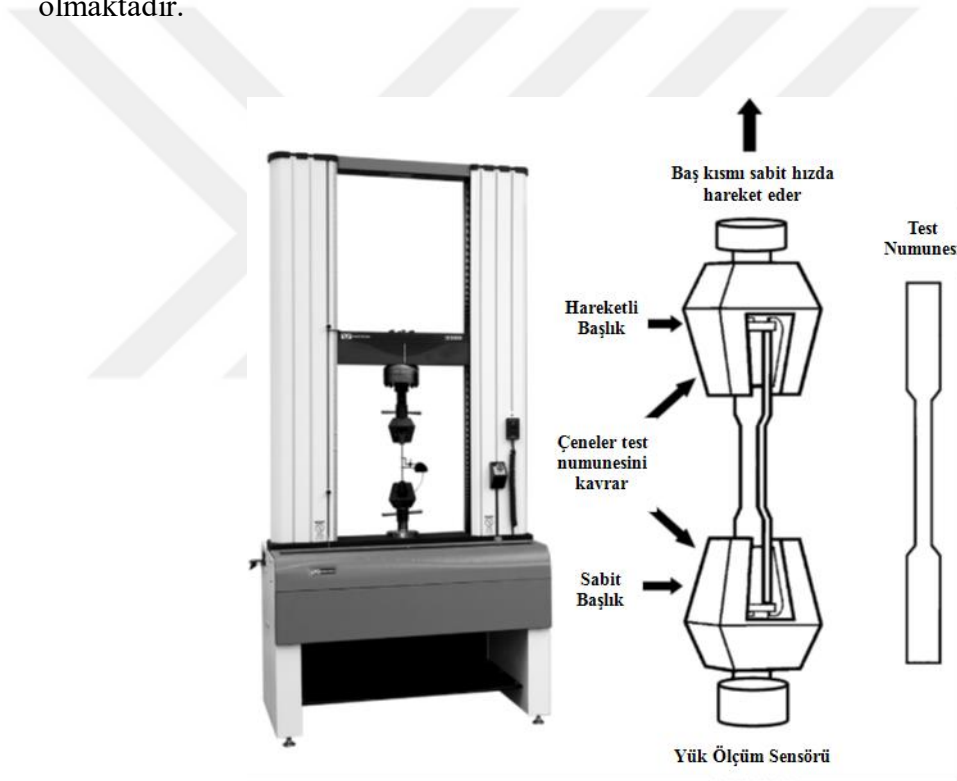
Malzeme karakterizasyonu mekanik testler yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Gerekli olan mekanik testlerin seçimi, test edilecek malzemedan istenen gerekli cevaba bağlıdır. Bu durum, doğrudan test edilecek malzemenin yükleme şartları ile alakalıdır. En basit yükleme şartı statik yükleme olarak değerlendirilecek olursa, malzeme karakterizasyonu için statik veya yarı-statik olarak isimlendirilen statığe çok yakın hızlardaki mekanik testlerin yapılması yeterli olabilmektedir. Ancak malzeme eğer kullanılacağı yapıda/mekanizmada farklı hızlarda yüklemelere maruz kalacak ve farklı şekil değiştirme hızlarına ulaşacak ise, yüksek şekil değiştirme hız etkilerini içeren mekanik test yöntemleri de kullanılmalıdır.

3.2.8. Yarı-Statik Testler

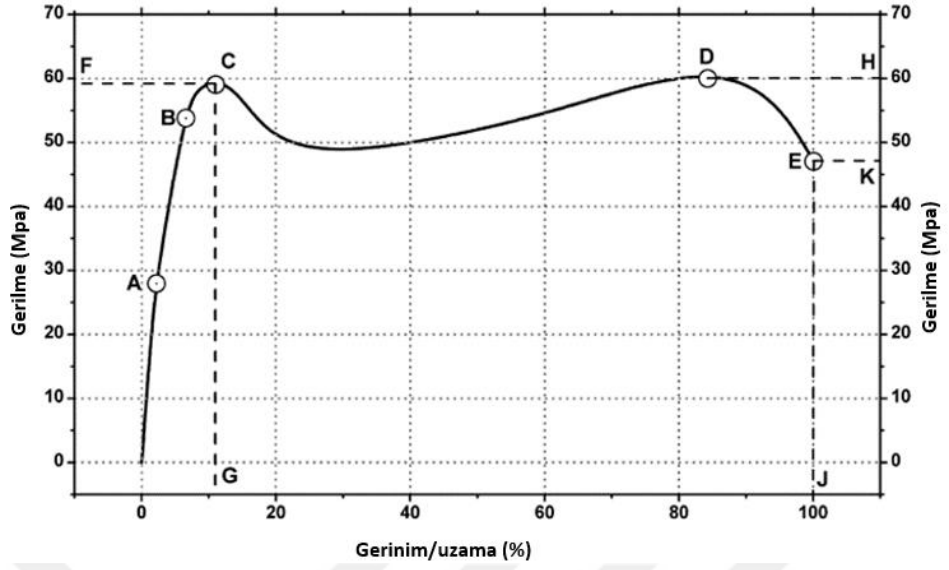
Sürünme ve yarı-statik testler, genellikle 10^{-5} s^{-1} gerinim hızında sabit çapraz kafa hız test makinelerinde yapılmaktadır. Yarı-statik testler arasında, düşük deformasyon hızlarında yapılan en bilinen test yöntemi çekme testidir. Örnek bir universal test cihazı görseli, Şekil 3.9'de paylaşılmıştır. Basit bir testtir ve test edilen malzemenin mekanik özellikleri

hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Şekil 3.10'de örnek olarak verildiği gibi, test edilen malzemenin önemli bazı ölçüm noktalarını içeren gerilme-gerinim eğrisi elde edilmektedir. Test numunesinin şekli ve boyutları ASTM (American Society for Testing and Materials) standartları tarafından belirlenmiştir. Çekme testinde, numune çekme testi cihazının çenelerine sıkılarak monte edilmektedir. Çenelerin bir tanesi sabit ve bir tanesi hareketlidir. Hareketli olan çene sabit bir hızda çekilmektedir. Test sırasında uygulanan yük ve numunenin uzaması eş zamanlı olarak kaydedilmektedir.

Uzama ölçümleri ayrıca video veya mekanik ekstansometreler kullanılarak da yapılabilmektedir. Uzama verisine karşı reaksiyon kuvveti test sonrasında elde edilmiş olmaktadır.



Şekil 3.9. Üniversal malzeme test cihazı (McKeen 2014'den değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 3.10. Tipik bir gerilme-gerinim eğrisi (McKeen 2014'den değiştirilerek alınmıştır)

Aşağıdaki formülasyonlar kullanılarak, malzemenin mühendislik gerilme-gerinim tepkisi hesaplanabilmektedir.

$$\sigma_{eng} = \frac{F}{A_0} \quad (3.6)$$

ve

$$\varepsilon_{eng} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (3.7)$$

Burada, F yük, A_0 başlangıçtaki kesit alan, L_f son uzunluk ve L_0 ilk uzunluk değerlerini ifade etmektedir. Aşağıdaki eşitliklerle gerçek gerilme ve gerçek gerinim değerleri hesaplanabilmektedir.

$$\sigma_{true} = \frac{F}{A_i} \quad (3.8)$$

ve

$$\varepsilon_{eng} = \ln \frac{L_f}{L_0} \quad (3.9)$$

Burada A_i anlık kesit alanı değeridir. Plastik deformasyonun sabit hacimde gerçekleştiği varsayımı ile birlikte, gerçek gerilme-gerinim ve mühendislik gerilme-gerinim değerleri arasında aşağıdaki ilişki tanımlanabilmektedir.

$$A_0 L_0 = A_f L_f = \text{sabit} \quad (3.10)$$

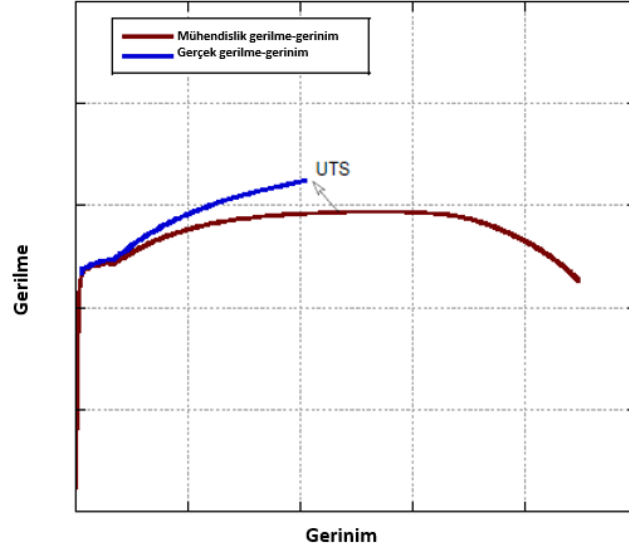
Burada A_0 ve A_f sırasıyla başlangıç ve son kesit alanları, L_0 ve L_f sırasıyla başlangıç ve son boylardır. Sabit hacim ilişkisi kullanılarak aşağıdaki gerçek gerilme-gerinim ilişkileri ortaya konabilmektedir.

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng} (1 + \varepsilon_{eng}) \quad (3.11)$$

ve

$$\varepsilon_{true} = \ln(\varepsilon_{eng} + 1) \quad (3.12)$$

Yukarıdaki denklemler, numunenin homojen olmayan deformasyonunun başladığı nihai gerilme dayanımına (UTS) kadar geçerlidir (boyun verme)(Şekil 3.11).

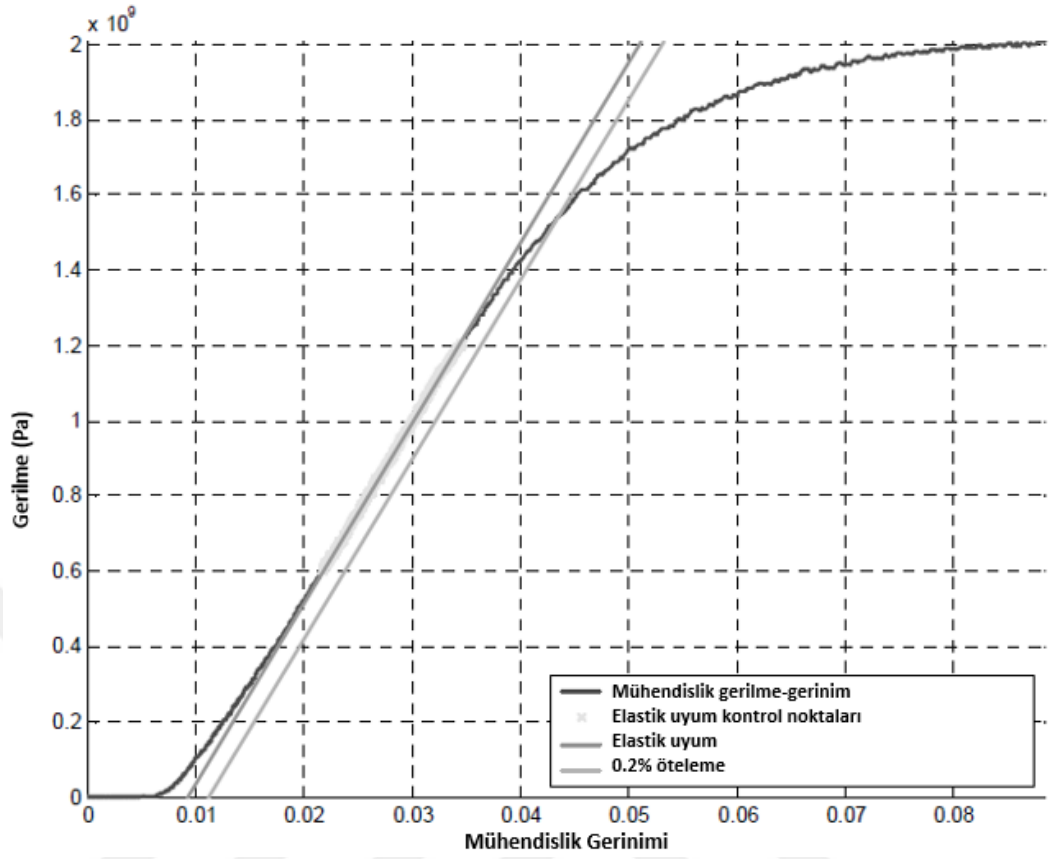


Şekil 3.11. Bir malzemenin gerçek ve mühendislik gerilme-gerinim eğrisinin karşılaştırılması (Kıranlı 2009'dan değiştirilerek alınmıştır)

Mühendislik gerilme-gerinim eğrileri, elastik bölge ve plastik bölge olarak ikiye ayrılır. Elastik bölgede, gerilme ve gerinim birbiriyle doğru orantılıdır. Bu aralıkta yapılan yüklemdeki yük kaldırıldığında, numune başlangıç boyuna geri dönebilmektedir. Malzemenin elastik modülü (Young's modulus: E) elastik bölgedeki gerilme-gerinim eğrisinin eğiminden belirlenmektedir.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3.13)$$

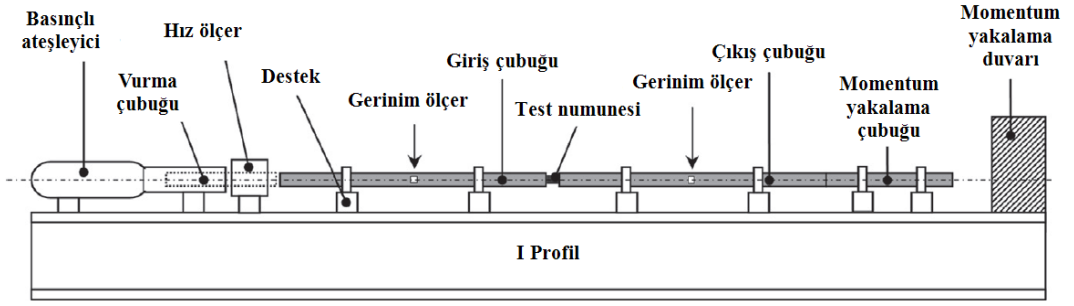
Plastik deformasyonun başladığı nokta ve bu noktaya karşılık gelen gerilme değeri, akma dayanımı olarak adlandırılır. Akma dayanımını belirlemenin alternatif yolu, % 0,2'lik bir gerinimden başlayan elastik bölgedeki eğriye paralel düz bir çizgi çekmektir (Şekil 3.12). Düz çizginin gerilme-gerinim eğrisini kestiği nokta akma dayanımına karşılık geldiği varsayılmaktadır. Eğri üzerinde belirlenen bu noktanın gerinim eğrisini kestiği nokta ise akma gerinimine karşılık gelmektedir. Maksimum çekme dayanımı (UTS), mühendislik gerilme-gerinim eğrisinin ulaştığı maksimum gerilme değeridir.



Şekil 3.12. Akma gerilmesinin belirlenmesi (Nilsson 2003'den değiştirilerek alınmıştır)

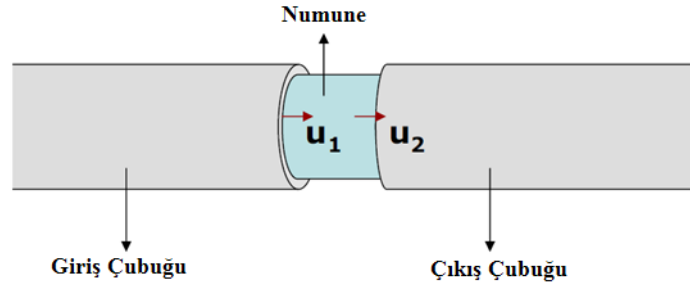
3.2.9.Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) Testi

Yüksek deformasyon hızı ile yapılan testler, yüksek hızlı deformasyon hızlarında çalışan malzemelerin davranışını anlayabilmek ve analiz çalışmalarında doğru kullanabilmek için gereklidir. Yüksek deformasyon hızları, yarı-statik testlerdeki deformasyon hızlarından oldukça fazladır. SHPB testi, $10^2 - 10^4 \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızlarında malzeme testleri gerçekleştirmek için uygun bir test sistemidir. Malzemelerin dinamik karakterizasyonu için kullanılmaktadır. SHPB test düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3.13'da verilmektedir.

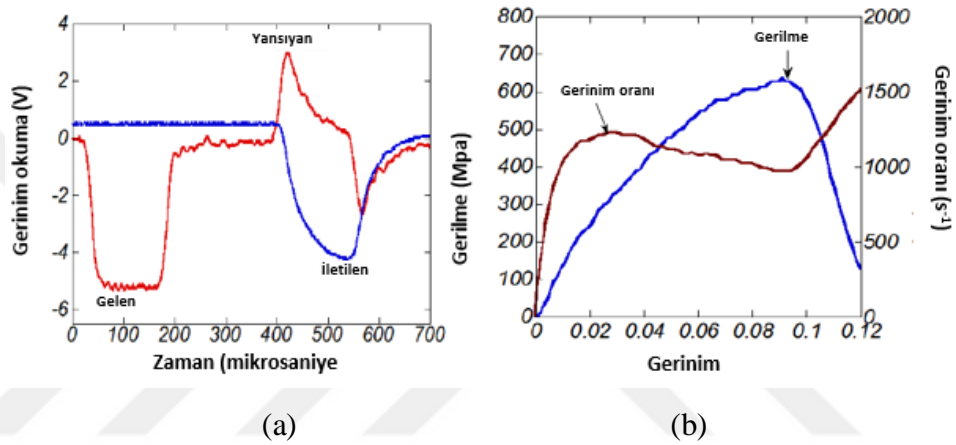


Şekil 3.13. Tipik bir SHPB test düzeneğinin şematik gösterimi (Ruan ve ark. 2017'den değiştirilerek alınmıştır)

1913 yılında Bertram Hopkinson, yüksek hızlı deformasyon olayı sırasında ortaya çıkan tepe basıncını ölçmek için bir teknik tanıtmıştır. Bu teknik kısaca, bir çelik çubuk üzerinde gerilim dalgası geçişi sırasında bir numune tarafından yakalanan momentumu ölçmeye dayanmaktadır. Test sistemi uzun iki çelik çubuk, bir çelik numune ve bir sarkaçtan/basınçlı ateşleyiciden oluşmaktadır. Basınçlı ateşleyici, vurma çubuğunu başlangıç hızı V_0 ile giriş çubuğuna (incident bar) ateşleyen kısımdır. Vurma çubuğunun giriş çubuğuna vurması ile birlikte uzun çubuğun bir tarafında bası gerilme şok dalgası oluşmaktadır. Oluşturulan dalganın genliği, vurma çubuğunun hızı ile doğrudan ilgilidir. Basınç dalgası çubuk üzerinden akarak numunenin bulunduğu uca gelmektedir. Daha sonra çubuğa birleşik haldeki numune üzerinden geçmekte ve ikinci çubuğa iletilmektedir. Çeki gerilimi dalgasının bir kısmı numunenin ucundan geri yansırken bir kısmı ise numunenin ucundan diğer çubuğa geçmektedir. Çubuklar üzerindeki gerilme dalgaları, gerilim ölçerler yardımıyla ölçülmektedir. Bağlantılar kullanılarak, numune üzerinden akan farklı hızlardaki gerilme dalgalarından, numuneye ait gerilme-gerinim eğrileri elde edilmektedir. Bu ölçümler, voltaj sinyalinin yükseltildiği gerinim ölçer şartlandırıcısına bağlanır. Ölçüm sistemindeki osiloskop yardımıyla elde edilen veriler incelenmekte ve saklanmaktadır. Test numunesi ile giriş ve çıkış çubuklarının gösterimi Şekil 3.14'de, örnek bir çalışmadan elde edilmiş, zamana bağlı voltaj sinyali ile gerilme-gerinim ve gerilme hızı-gerinim eğrileri Şekil 3.15'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.14. Test numunesi ile giriş ve çıkış çubukları (Kıranlı 2009)



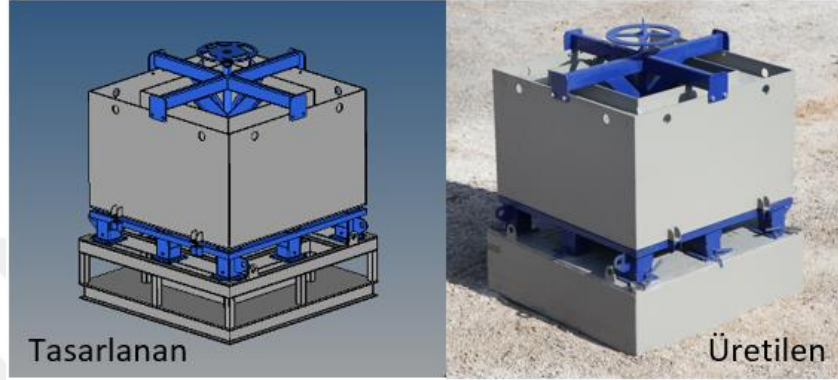
Şekil 3.15. (a) zamana bağlı voltaj sinyali ile (b) gerinime bağlı gerilme ve gerinim oranı (Kıranlı 2009'dan değiştirilerek alınmıştır)

3.3. Plaka Test Aparatı

Bu tez çalışmasında, zırh sacı olarak bilinen yüksek mukavemetli bir çelik plakanın dinamik yüklerle testleri ve nümerik analizleri gerçekleştirilmiştir. Test çalışmaları, analiz sonuçlarının validasyonu için gerekli olan verilerin toplanması amacıyla yapılmıştır.

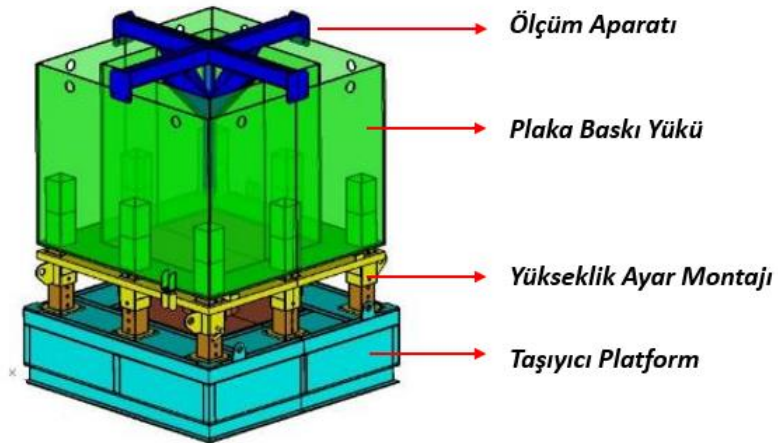
Plaka test aparatı seri şekilde birden fazla dinamik test yapılabilme özelliğine ve dayanıklılığa sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca yapılacak testlerin sürdürülebilir olması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, hava sıcaklığı, nem, tane boyutunun kontrolünün zorluğu ve malzeme modeli için değişkenlerin belirlenme zorluğundan dolayı toprak kullanılmamış, çelik çanak içerisine konumlandırılarak testler yapılmıştır. Test

numunesini sabitlemek için herhangi bir civata vb. bağlama şekli kullanılmamıştır. Test numunesi baskılama yöntemiyle ağırlık ve sürtünme yardımıyla sabitlenmiştir. Çeşitli kalınlıklarda ve yaklaşık olarak 1m x 1m boyutlarında plakaların testleri yapılabilmektedir. Test aparatının tasarlanan 3D tasarım modeli ve üretim sonrasında montajlanmış hali Şekil 3.16’da paylaşılmıştır.



Şekil 3.16. Test aparatının tasarlanan ve üretilen görselleri

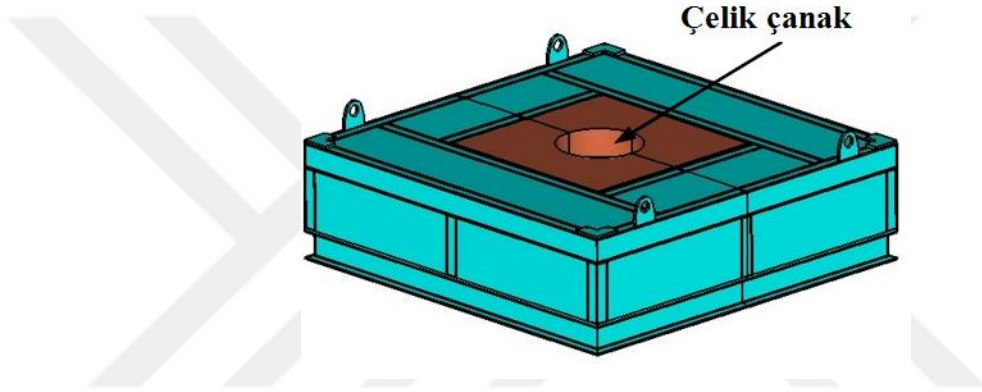
Test aparatı dört bölümden oluşmaktadır. Bunlar; taşıyıcı platform, yükseklik ayar montajı, plaka baskı yükü ve ölçüm aparatıdır. Test numunesi plaka baskı yükü ve yükseklik ayar montajı arasına sıkıştırılarak sabitlenmektedir. Test aparatının bölümleri Şekil 3.17’de paylaşılmıştır.



Şekil 3.17. Test aparatının bölümleri

3.3.1. Taşıyıcı Platform

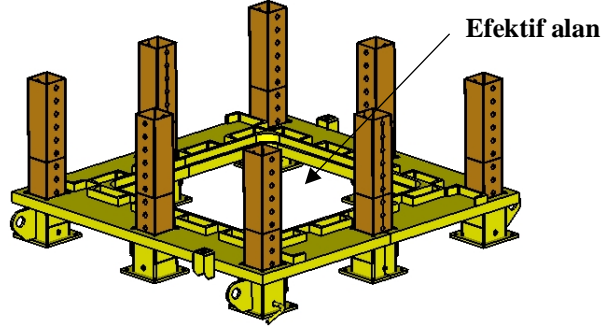
Taşıyıcı platform, test aparatının tabanını oluşturur. Çeşitli profillerden oluşturulan karkas yapıdadır. Merkezine, çelik çanağın yerleştirileceği bir boşluk bırakılmıştır. Bu boşluk, çelik çanağın üst yüzeyi ile taşıyıcı platformun üst yüzeyi hizalanacak şekilde ayarlanmıştır. Çanak, test hazırlıkları sırasında bu boşluğa yerleştirilir. Taşıyıcı platformunun karkas yapısı ve çanak boşluğu dışında kalan hacmi, beton doldurularak dayanıklı ve ağır olması amaçlanmıştır. Taşıyıcı platform görseli Şekil 3.18’de paylaşılmıştır.



Şekil 3.18. Taşıyıcı platform

3.3.2. Yükseklik Ayar Montajı

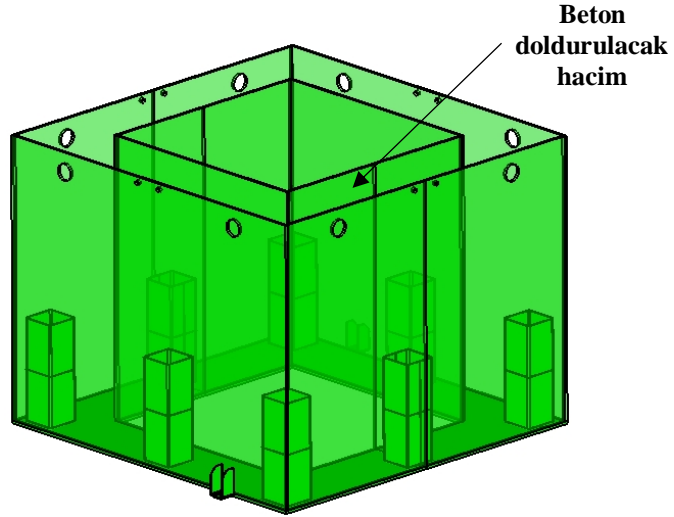
Test aparatı ile yapılacak olan testler sırasında, mesafenin ayarlanması için yükseklik ayar montajı kullanılır. Farklı büyüklükteki iki profilin birbiri içerisine girebilmesi sayesinde, yükseklik ayarı yapılabilmektedir. Mesafenin sabitlenmesi için, profiller üzerine açılmış eşit büyüklükteki deliklerden çelik pim geçirilmektedir. Test plakası, yükseklik ayar montajı üzerine yerleştirilir. Test plakasının üzerine yerleştirildiği plakanın ortası açılarak, yüklemenin test plakasına etki edeceği bir efektif alan yaratılmıştır. Efektif alan ölçüleri 0,8m x 0,8m boyutlarındadır. Yükseklik ayar montajına ait görsel Şekil 3.19’de paylaşılmıştır.



Şekil 3.19. Yükseklik ayar montajı

3.3.3. Plaka Baskı Yüğü

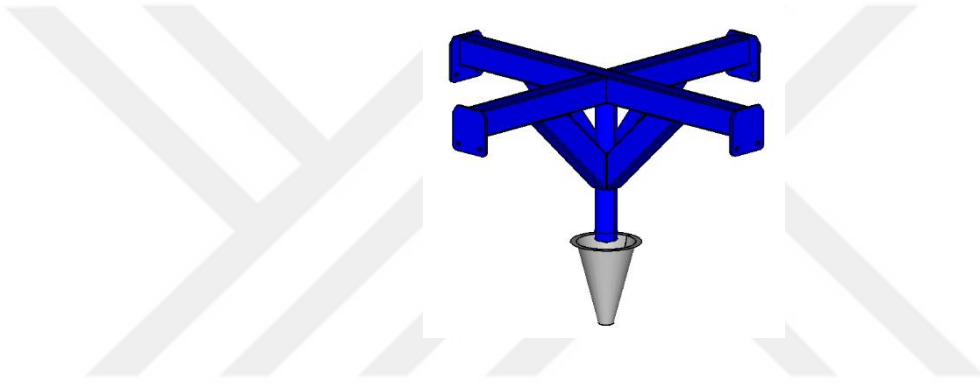
Plaka baskı yüğü, test plakasını ağırlığı yardımıyla baskılamayı ve test plakasının testler sırasında sabitlenmesini sağlamaktadır. Düşeyde üzerinde, yüklerin test plakasına etki edeceği efektif alan ölçülerinde bir tünel bulunmaktadır. Çelik saclardan kabuk şeklinde kaynaklanarak montajlanmış ve bir havuz şekli verilmiştir. Havuz şeklindeki hacmi beton doldurularak, test plakasını yerinde tutacak ağırlığa sahip olması hedeflenmiştir. Plaka baskı yüğü görseli Şekil 3.20’de paylaşılmıştır.



Şekil 3.20. Plaka baskı yüğü

3.3.4. Ölçüm Aparatı ve Dinamik Deformasyon Ölçümü

Plaka baskı yükünün üzerine civatalar yardımıyla montajlanan ölçüm aparatı bulunmaktadır. Ölçüm aparatı, test plakasının dinamik deformasyonunu ölçmek amacıyla tasarlanmıştır. Ölçüm aparatında, plaka baskı yükünde bulunan tünel boyunca uzanan vidalı mil kullanılmıştır. Deformasyon konisi vidalı milin ucuna, flanş yardımıyla sıkıştırılarak montajlanmaktadır. Test hazırlıkları sırasında, deformasyon hunisinin uç kısmı test plakasına temas edene kadar vidalı mil döndürülmektedir. Ölçüm aparatının görseli Şekil 3.21’de paylaşılmıştır.



Şekil 3.21. Ölçüm aparatı

3.3.5. Dinamik Deformasyon Ölçümü

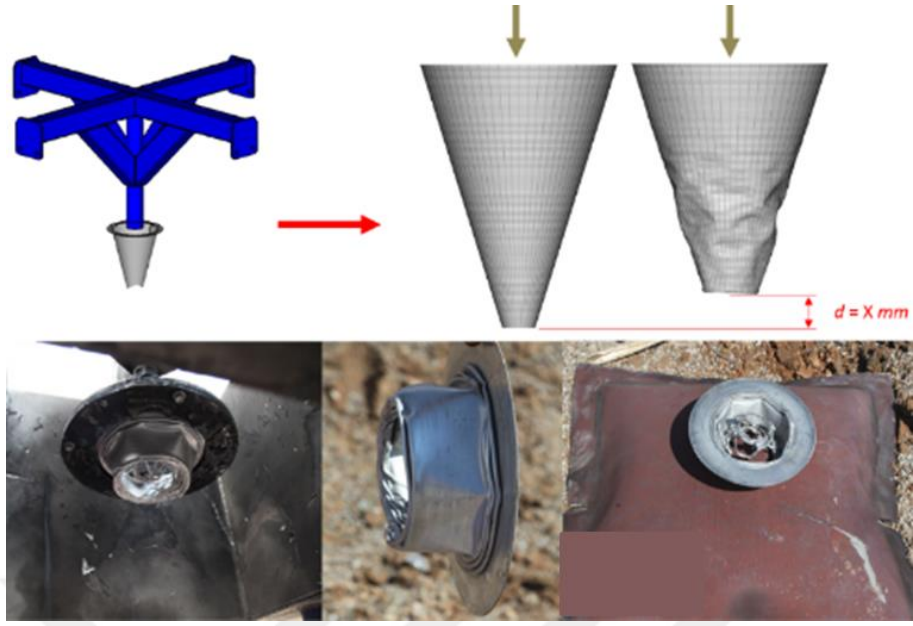
Deformasyon konisi, literatürde daha önce Kurtoğlu (2015) tarafından hazırlanan çalışmada sunulmuştur. Bu tez çalışmasında, dinamik deformasyon ölçümü için bu kaynaktan faydalanılmıştır (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. Deformasyon konisi (Kurtoğlu 2015)

Koni malzemesinin alüminyum alaşımdan üretilmesinin sebebi, bu alaşımların deformasyon direncinin ve akma mukavemetinin düşük olmasıdır. Huni şeklinde olmasının sebebi ise, tek taraftan düzgün deformasyon şeklinin elde edilmesinin amaçlanmasıdır.

Ölçümler sırasında deformasyon konisinin ilk boyunun uzunluğu kayıt altına alınmaktadır. Test aparatına montajlanarak testler sırasında kullanılan koni, plakanın esnemesi sırasında deforme olmaktadır. Test sonrasında demontajlanarak son boyu ölçülür ve ilk boy ve son boyun farkı alınarak, plakanın merkez noktasının dinamik (elastik + plastik) deformasyon miktarı ölçülmüş olmaktadır (Şekil 3.23).



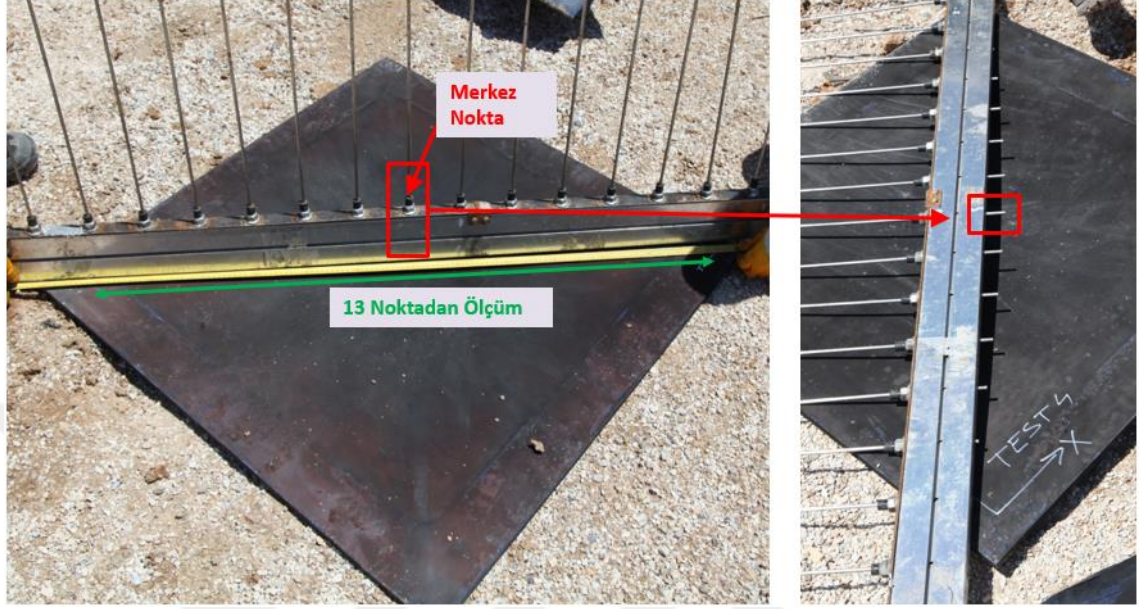
Şekil 3.23. Dinamik deformasyon ölçümü

3.3.6. Kalıcı Deformasyon Ölçümü

Test plakası üzerinde kalıcı deformasyon bilgisi, yüksek deformasyon hızlarına ulaşıldığından testler sırasında ölçülebilmesi oldukça zordur. Bu yüzden kalıcı deformasyon ölçümü, testler sonrasında yapılmaktadır. Test aparatı demontajlanarak, test plakası ölçüm yapılacak yere ayrılır. Plaka üzerinden kalıcı deformasyon bilgisinin elde edilmesi için bir aparat geliştirilmiştir. Bu aparat, düz yüzeyi bulunan mastar şeklinde, üzerine delikler açılarak deliklerden geçirilen metal çubuklardan oluşmaktadır. Metal çubuklar, arzu edildiğinde sıkıştırılarak sabit buldukları konuma sabitlenebilmektedir.

Testi tamamlanmış olan numunenin deformasyon ölçümü yapılırken, aparat köşegen boyunca uzatılmıştır. Üzerindeki çubuklar serbest bırakılarak, deforme olan test plakası yüzeyine temas etmeleri sağlanmıştır. Ardından çubuklar sıkıştırılarak sabitlenmiş ve aparat kaldırılarak çubukların ne kadar derinliğe indiği ölçülmüştür. Test plakasının köşe noktaları, baskı yükü dolayısıyla deforme olmadığından, ölçüm için referans kabul edilmiştir. İşlemler her köşegen için yapılmıştır. Her ölçümde, 13 farklı noktadan ölçüm alınmış ve köşegenler boyunca belirli aralıklarla kalıcı deformasyon bilgisi elde

edilmiştir. Kalıcı deformasyon ölçüm aparatının ölçüm aşamasında elde edilen görsel Şekil 3.24’de paylaşılmıştır.



Şekil 3.24. Kalıcı deformasyon ölçümü

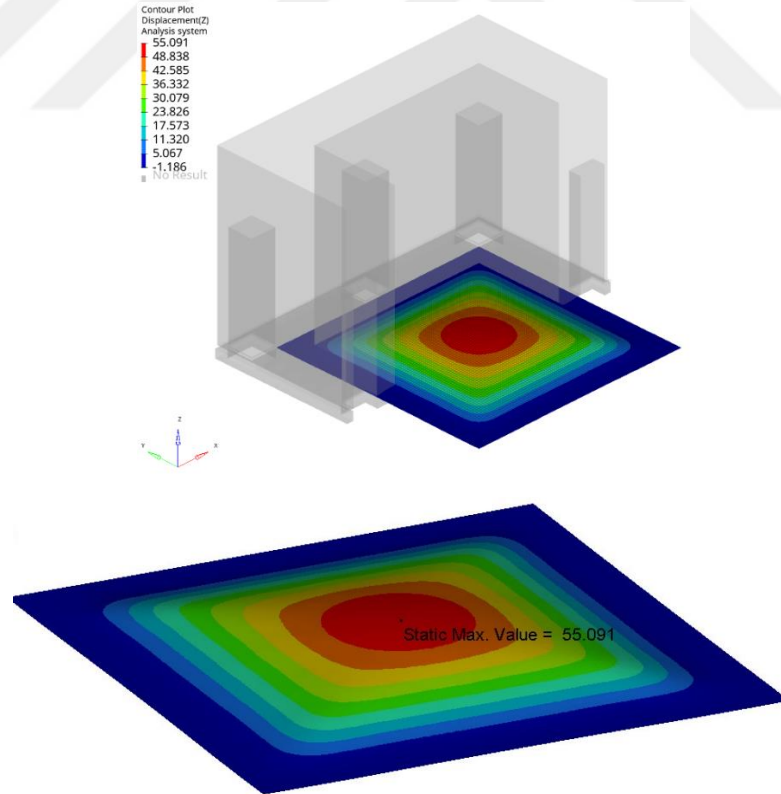
4. BULGULAR

4.1. Analiz Modelleri ve Analiz Sonuçları

Bu bölümde, ConWep, ALE ve SPH metotları kullanılarak yapılan analiz çözümlerinin sonuçları paylaşılmıştır. Her bir metot ile yapılan analizler sonucunda, zırh sacında meydana gelen dinamik deformasyon bilgisi kontur görselleri olarak verilmiştir. Daha sonra analiz sonuçları ile saha test sonuçları karşılaştırılmıştır.

4.1.1. ConWep Modeli Analiz Sonuçları

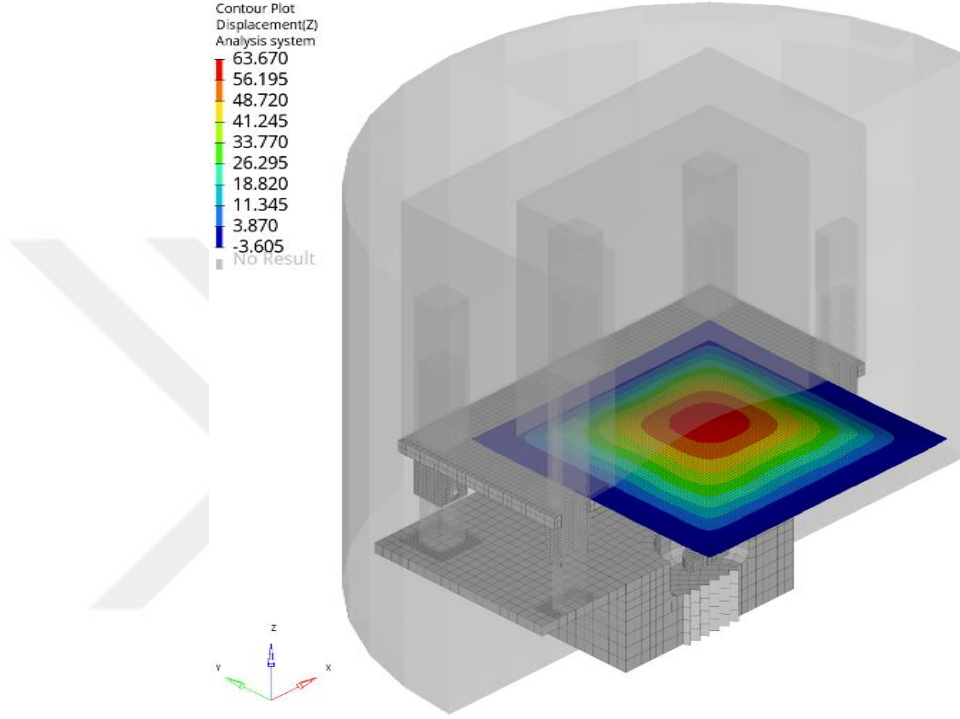
ConWep çözümlerinin sonucunda, plakada oluşan yerdeğiştirme bilgisinin görselleştirilmiş hali aşağıda verilmektedir (Şekil 4.1). Yerdeğiştirme değerleri mm cinsinden verilmiştir. Ölçümler global koordinat sistemine göre yapılmıştır.



Şekil 4.1. ConWep metodu sonucunda test plakasında oluşan maksimum dinamik deformasyon

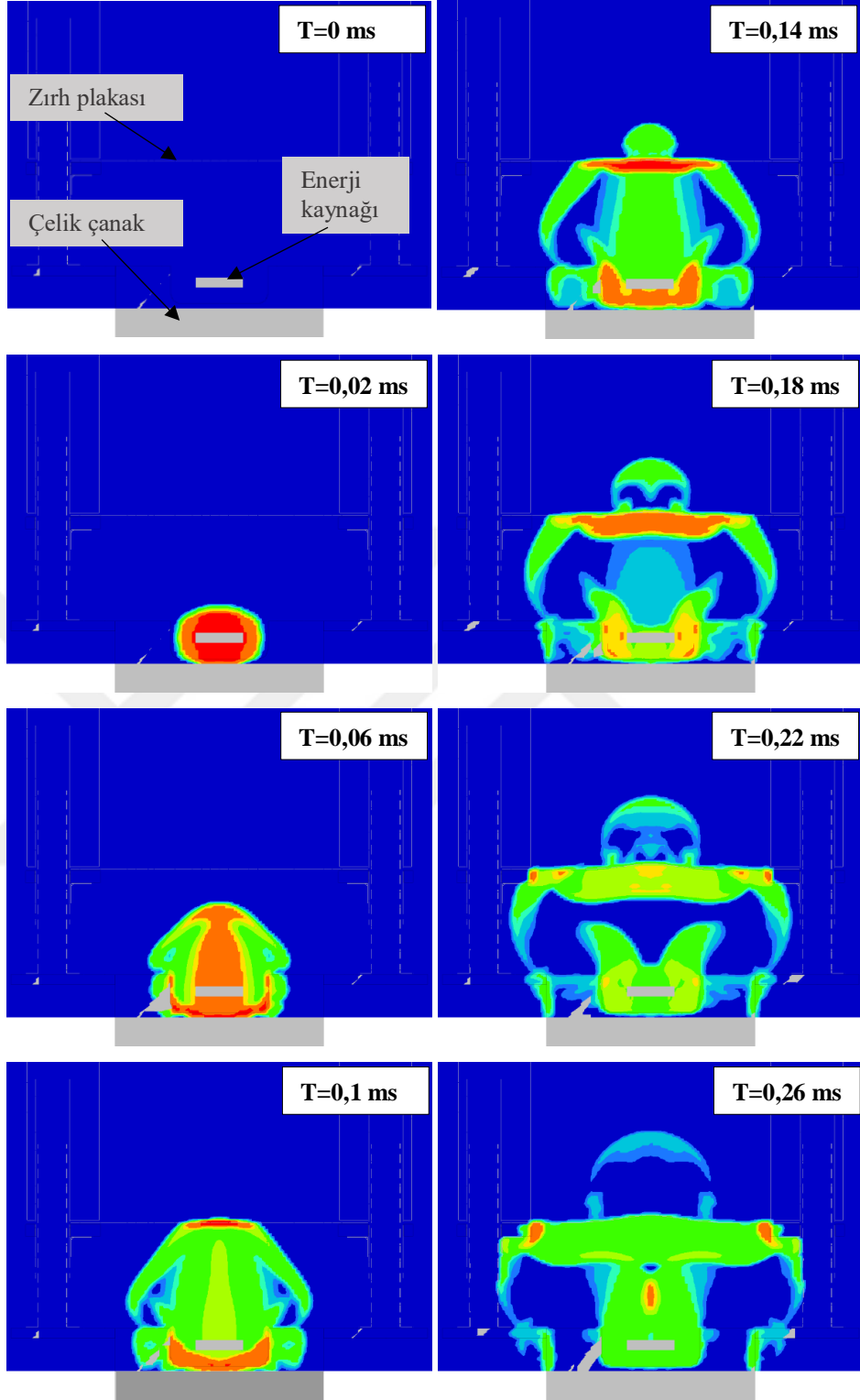
4.1.2. ALE Modeli Analiz Sonuçları

ALE çözümlerin sonucunda, plakada oluşan yerdeğiştirme bilgisinin görselleştirilmiş hali aşağıda verilmektedir. Yerdeğiştirme değerleri mm cinsinden verilmiş olup ölçümler global koordinat sistemine göre yapılmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. ALE çözüm sonucunda test plakasında oluşan maksimum dinamik deformasyon

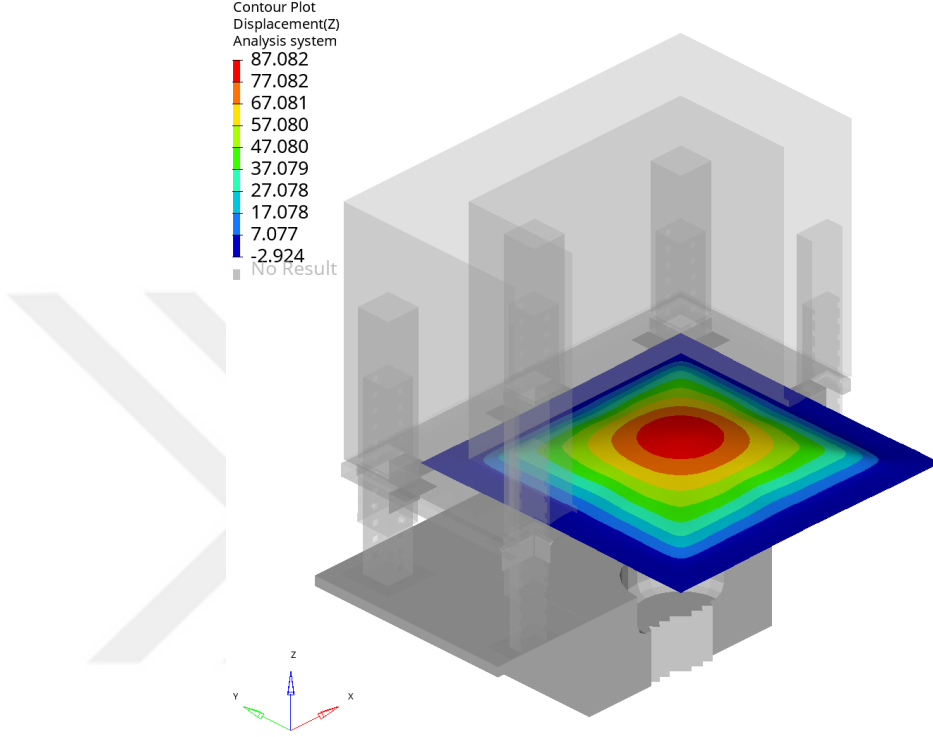
ALE çözümler sonucunda, basınç dalgasının ilerleyişi gözlemlenebilmektedir. Aşağıdaki şekilde, çelik çanakta gerçekleşen dinamik yüklemeler sırasında, basınç dalgasının zamana bağlı olarak ilerleyişi verilmektedir (Şekil 4.3). $t=0$ ms inflak anında meydana gelen basınç, çelik çanak sayesinde yönlendirilmektedir. Yönlünen basınç doğrudan zırh plakasıyla etkileşime girmekte ve yansiyarak dağılmaktadır.



Şekil 4.3. Basıncının zamana bağlı ilerleyişi ve zırh plakası ile etkileşimi

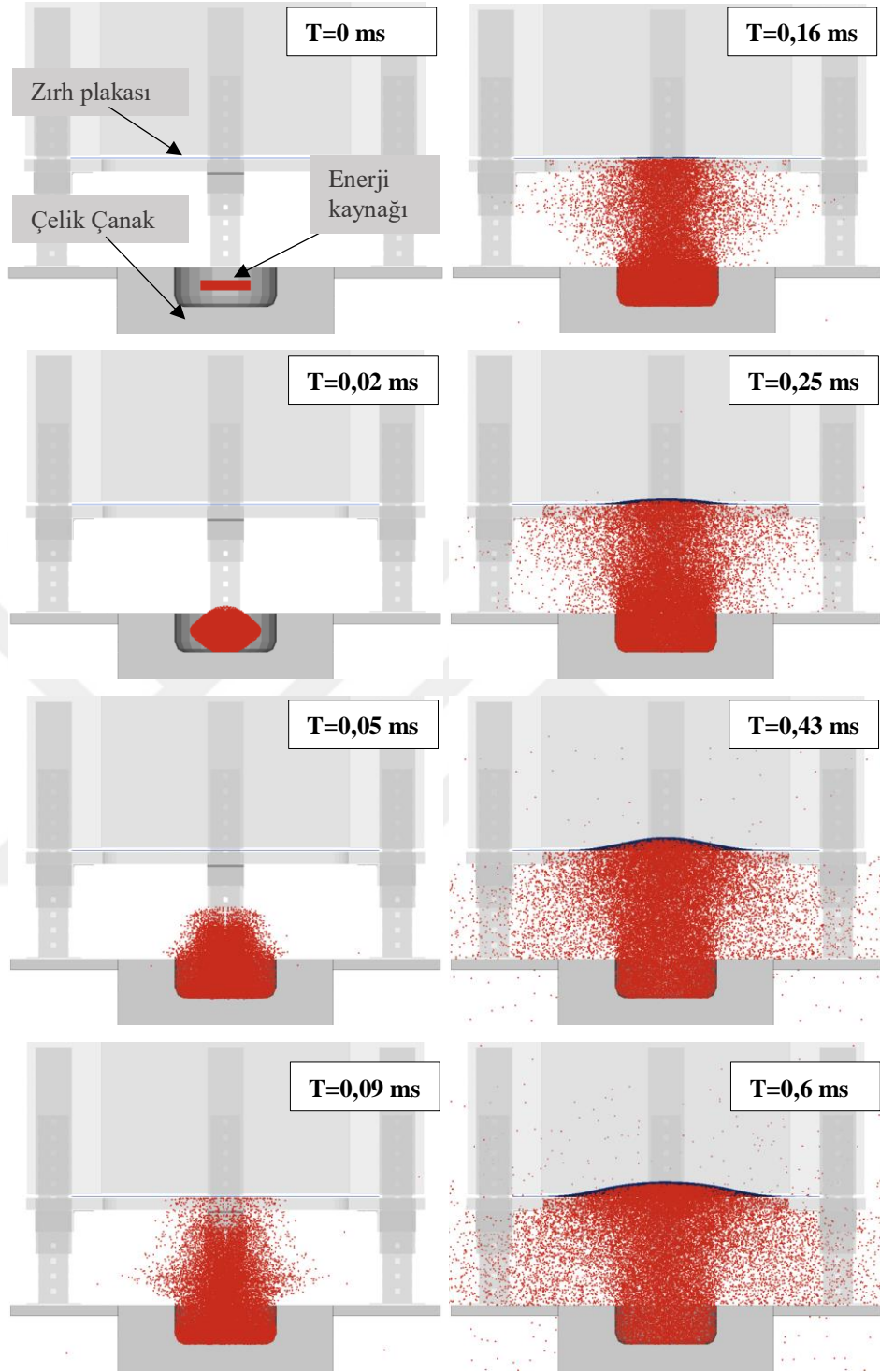
4.1.3. SPH Modeli Analiz Sonuçları

Şekil 4.4'de SPH çözüm metodu ile yapılan sayısal analiz sonucunda test plakasında oluşan maksimum dinamik deformasyon bilgisi paylaşılmıştır.



Şekil 4.4. SPH çözüm metodu sonucunda test plakasında oluşan maksimum dinamik deformasyon

Şekil 4.5'de enerjinin salınımı ile SPH elemanların diziliminde meydana gelen değişim görülmektedir. Test plakası ile etkileşim sonrasında geri yansiyarak dağılmaktadır.



Şekil 4.5. SPH elemanların zamana bağlı ilerleyişi

4.2. Analiz ve Test Sonuçlarının Karşılaştırılması

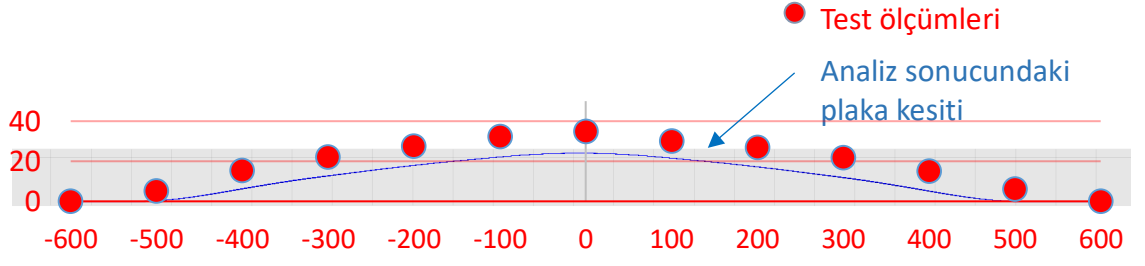
Sahada yapılan dinamik yükleme testleri sırasında, yüksek mukavemetli çelik malzeme test numunesinden dinamik ve kalıcı deformasyon bilgileri elde edilmiştir. Dinamik deformasyon bilgisi, uygulama ve ölçüm zorluğundan dolayı zamana bağlı olarak elde edilememiş olup, maksimum uzama bilgisi olarak elde edilmiştir. Kalıcı deformasyonlar ise test sonrasında köşegenler üzerinden elde edilmiş ve kaydedilmiştir.

Analizler sonucunda, test numunesinde oluşan kalıcı deformasyonların görsel karşılaştırmasının yapılabilmesi için, köşegen üzerinden kesitler alınmıştır. Her bir model için alınan kesitlerin görselleri aşağıda verilmiştir (Şekil 4.6).

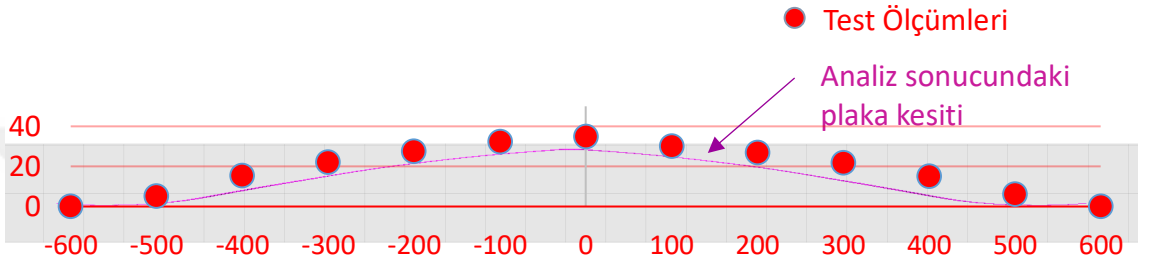


Şekil 4.6. Kalıcı deformasyona sahip test numunelerinin köşegen üzerinde alınan kesit görselleri

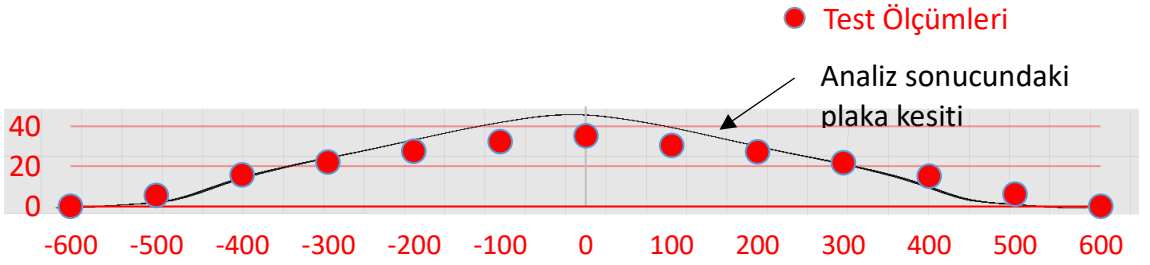
Saha testleri sonrasında test numunesinde meydana gelen kalıcı deformasyonlar, köşegenler üzerinden toplam 13 noktadan ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Bu noktalar ile Şekil 4.6'de verilen ve analizler sonucunda oluşan kalıcı deformasyonlar, mm cinsinden Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'de görsel kıyaslama için paylaşılmıştır.



Şekil 4.7. ConWep modeli – köşegen kesitteki kalıcı deformasyon ile test deformasyonunun karşılaştırılması

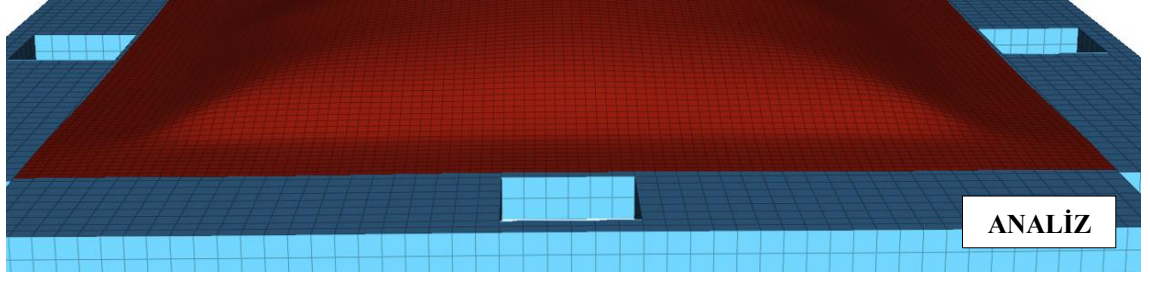


Şekil 4.8. ALE modeli – köşegen kesitteki kalıcı deformasyon ile test deformasyonunun karşılaştırılması

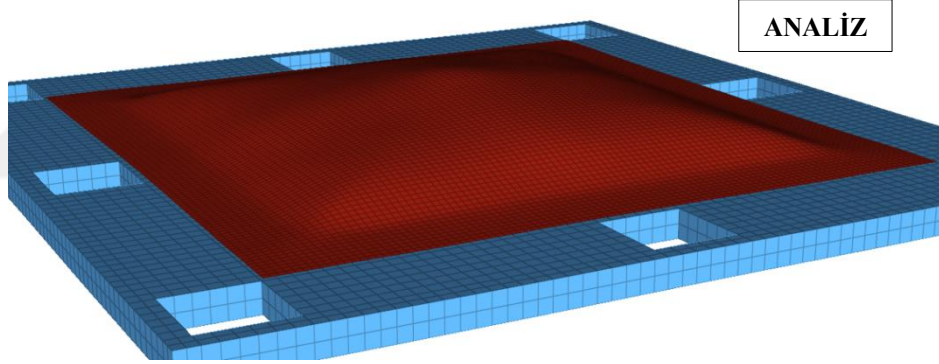


Şekil 4.9. SPH modeli – köşegen kesitteki kalıcı deformasyon ile test deformasyonunun karşılaştırılması

SPH modeliyle yapılan analiz sonucu ile test çalışmaları sonucunda test plakasında oluşan kalıcı deformasyonun, görseller üzerinden karşılaştırmaları Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de verilmektedir.

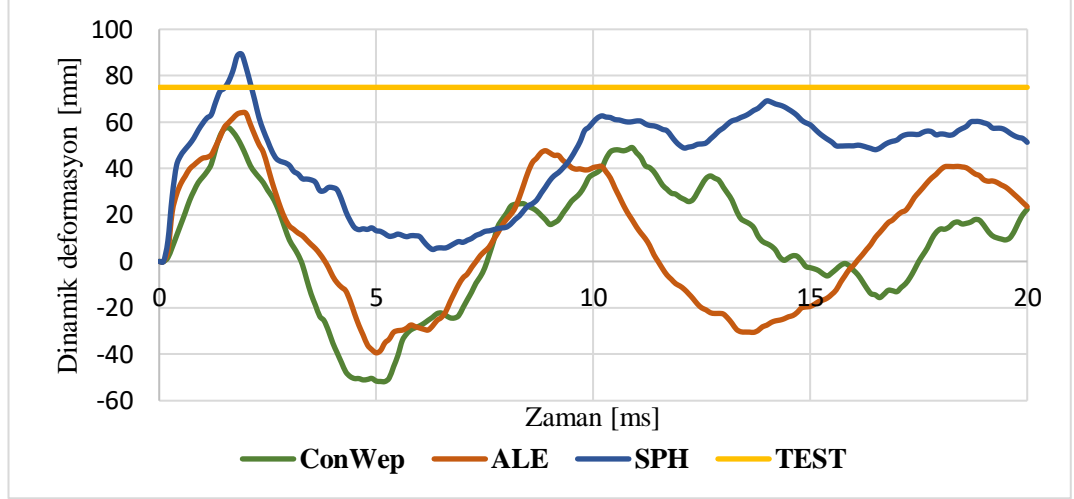


Şekil 4.10. Analiz çalışmaları sonucunda kalıcı deformasyonlar - görsel 1



Şekil 4.11. Analiz ve test çalışmaları sonucunda kalıcı deformasyonların karşılaştırmaları - görsel 2

Analiz sonuçlarından elde edilen deformasyon bilgisinin zamana bağlı değişimi ile test çalışmalarında ölçülen dinamik deformasyon değeri Şekil 4.12’ da paylaşılmıştır.



Şekil 4.12. Analiz çalışmalarından elde edilen zamana bağlı maksimum deformasyon bilgisi ile test çalışmasından elde edilen maksimum deformasyon değeri

Çizelge 4.1’de test ve analiz çalışmalarının sonuçları listelenmiş ve analiz sonuçlarının test ölçümlerine göre % sapmaları hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1. Analiz sonuçlarının deformasyonlar açısından sapma yüzdeleri

	Dinamik Deformasyon (Maksimum)	Kalıcı Deformasyon
	% Sapma	% Sapma
ConWep	-22,67	-18,67
ALE	-18,67	-14,67
SPH	17,33	8,00
TEST	-	-

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Yüksek enerjili dinamik analiz yöntemleri incelendiğinde, aynı yükleme koşulları altında SPH yönteminin diğer iki yönteme ve test ölçümlerine göre, test numunesini daha fazla dinamik ve kalıcı deformasyona uğrattığı görülmüştür. Hata oranı en yüksek olan yöntem ConWep olarak tespit edilmiş ve buna benzer çalışmalarda diğer yöntemlere göre en düşük yakınsamaya sahip olduğu gözlemlenmiştir. ConWep modeli ile düşük doğruluk yakalanmasının sebebi, bu yöntemin basıncı yönlendirme yeteneğinin olmaması olarak değerlendirilmiştir. ALE metodu ile SPH metodu maksimum dinamik deformasyonlar açısından karşılaştırıldığında, benzer mutlak sapma değerine sahip oldukları görülmektedir. ALE metodu, test ölçüm değerinin altında kalırken, SPH metodu bu değer üzerine çıkmıştır. Kalıcı deformasyonlar açısından değerlendirildiğinde ise, en az mutlak % sapmanın SPH yönteminde olduğu hesaplanmıştır. Test ölçümlerinin üzerinde değerler elde edilmesi, analiz çalışmalarında dayanım açısından güvenli bölgede çalışılacağına bir göstergesidir.

Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, bu çalışmadakine benzer test aparatları ile yapılan yüksek enerjili dinamik simülasyonlarda, ConWep modelinin kullanımının uygun olmadığı görülmüştür. İncelenen üç yöntem arasında, modelleme kolaylığı ve test çalışmasında elde edilen sonuçlara yakınlığı açısından değerlendirildiğinde, SPH metodunun en uygun yöntem olduğu belirlenmiştir. SPH metodu bu çalışmada yapılanlara benzer çalışmalarda kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- AEP-55 Volume 2 2011.** Procedures for evaluating the protection level of armored vehicles (1st ed.). vol. 2, NATO.
- Alia, A., Souli, M. 2006.** High explosive simulation using multi-material formulations. *Applied Thermal Engineering*,26(10): 1032-1042.
- Aquelet, N., Souli, M., Gabrys, J., Olovson, L. 2003.** A new ALE formulation for sloshing analysis. *Structural Engineering and Mechanics*, 16(4): 423–440.
- Baker, W. E., Cox, P. A., Westine, P. S., Kulesz, J. J., Strehlow, R. A 1983.** Explosion hazards and evaluation Vol. 5. Elsevier Science, USA, 840 pp.
- Barsotti, M. A., Puryear, J. M. H., Stevens, D. J., Alberson, R. M., McMahan, P. 2012.** Modeling Mine Blast with SPH. 12th International LS-DYNA Users Conference, <https://www.dynamore.de/de/download/papers/2012-internationale-ls-dyna-users-conference/documents/blast-impact06-a.pdf>-(Erişim Tarihi: 03.02.2019).
- Benson, D. J. 1997.** A mixture theory for contact in multi-material Eulerian formulations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 140(1-2):59-86.
- Bertholf, L., Karnes, C. 1975.** Two-dimensional analysis of the split hopkinson pressure bar system. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*,23(1): 1-19.
- Buschow, K. H. 2008.** Encyclopedia of materials: Science and technology. Elsevier, Amsterdam, 9913 pp.
- Chafi, M. S., Karami, G., Ziejewski, M. 2009.** Numerical analysis of blast-induced wave propagation using FSI and ALE multi-material formulations. *International Journal of Impact Engineering*,36(10-11): 1269-1275.
- Choi, J. 2013.** Blast Performance of Four Armour Materials. Defence Science and Technology Organisation, <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a601455.pdf>-(Erişim Tarihi: 03.02.2019)
- Dobratz, B., 1972.** Properties of chemical explosives and explosive simulants. Livermore, CA, Lawrence Livermore Laboratory, University of California, USA, 333 pp.
- Dobrociński, S., Flis, L. 2015.** Numerical Simulations of Blast Loads from Near-Field Ground Explosions in Air. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 37(4): 11–18.
- Draganić, H., Sigmund, V. 2012.** Blast loading on structures. *Tehnički Vjesnik*, 19(3): 643–652.
- Erdik, A., Kilic, S. A., Kilic, N., Bedir, S. 2016.** Erratum to: Numerical simulation of armored vehicles subjected to undercarriage landmine blasts. *Shock Waves*, 26(4): 531–531.
- Gingold, R. A., Monaghan, J. J. 1977.** Smoothed particle hydrodynamics: Theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*,181(3):375-389.
- Gorham, D. A., Wu, X. J. 1996.** An Empirical Method For Correction Dispersion in Pressure Bar Measurement of Impact Stresses. *Measurement Science and Technology*, 7(9):1227-1232.
- Johnson, G. R., Cook, W. H. 1983.** Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures. *Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics*, 7: 541-547.
- Jutras, M. 2008.** Improvement of the characterisation method of the Johnson-Cook Model. *MSc Thesis*, Laval University, College of Science, Québec, Canada.

- Kıranlı, E. 2009.** Determination of Material Constitutive Equation of a Biomediacal Grade Ti6Al4V Alloy for Cross-Wedge Rolling. *MSc Thesis*, IYTE. Materila Science and Engineering, Izmir, Turkey.
- Kinney G. F., Graham K. J. 1985.** Explosive Shocks in Air. Springer, Berlin, Germany, 269 pp.
- Klasztorny, M., Dziewulsky, P., Niezgod, T., Morka, A. 2010.** Modelling and numerical simulation of the protected shield – protected plate – test stand system under blast shock wave. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 17(3):198-204
- Kurtoğlu, İ. 2015.** An Assessment of ALE Mapping Technique for Buried Charge Simulations. 10th European LS-DYNA Conference, Würzburg, Germany, https://www.researchgate.net/publication/281551302_An_Assessment_of_ALE_Mapping_Technique_for_Buried_Charge_Simulations-(Erişim Tarihi: 20.03.2019)
- Lacome, J. L. (2000).** Smooth Particle Hydrodynamics (SPH): A New Feature in LS-DYNA. 6th International LS-DYNA Users Conference, <https://www.dynalook.com/conferences/international-conf-2000/session7-3.pdf>-(Erişim Tarihi: 25.03.2019)
- Lindholm, U. S., Yeakley, L. M. 1968.** High Strain Rate Testing: Tension and Compression. *Experimental Mechanics*, 8:1-4.
- LSTC 2016a.** LS-DYNA Keyword User's Manual Volume I. Livermore, California, http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/LS-DYNA_Manual_Volume_I_R9.0.pdf -(Erişim Tarihi: 15.03.2019)
- LSTC 2016b.** LS-DYNA Keyword User's Manual Volume II Material Models. Livermore, California, http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/LS-DYNA_Manual_Volume_II_R9.0.pdf-(Erişim Tarihi: 15.03.2019)
- LSTC 2019.** LS-DYNA Theory Manual. Livermore, California. http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/DRAFT_Theory.pdf-(Erişim Tarihi: 15.03.2019)
- Lucy, L. B. 1977.** A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *The Astronomical Journal*,82: 1013.
- Mazurkiewicz, L., Malachowski, J., Baranowski, P., Damaziak, K. 2013.** Comparison of Numerical Testing Methods in Terms Of Impulse Loading Applied To Structural Elements. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 51(3): 615-625.
- McKee, L. W. 2014.** The effect of temperature and other factors on plastics and elastomers: Introduction to Plastics, Polymers, and Their Properties, Ed.: Andrew, W., pp: 1-45.
- National Research Council 1995.** Transfer of blasteffects mitigation technologies from military to civilian applications. The National Academies Press, Washington, DC, 112 pp.
- Neuberger, A., Peles, S., Rittel, D. 2007a.** Scaling the response of circular plates subjected to large and close-range spherical explosions. Part I: Air-blast loading. *International Journal of Impact Engineering*,34(5): 859-873.
- Neuberger, A., Peles, S., Rittel, D. 2007b.** Scaling the response of circular plates subjected to large and close-range spherical explosions. Part II: Buried charges. *International Journal of Impact Engineering*,34(5): 874-882.
- Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A. 2007.** Blast loading and blast effects on structures - an Overview. *EJSE Special Issue*, 7:76-91.
- Nilsson, M. 2003.** Constitutive model for Armox 500T and Armox 600T at low and medium strain rates. Technical Report F01-R-1068-SE, Swedish Defence Research

- Agency, <https://www.foi.se/rest-api/report/FOI-R--1068--SE>-(Erişim Tarihi: 15.04.2019)
- Noh, W. F. 1963.** Cel: A Time-Dependent, Two-Space-Dimensional, Coupled Eulerian-Lagrange Code. Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, California, USA, 72 pp.
- Randers-Pehrson, G., Bannister, K. A. 1997.** Airblast Loading Model for DYNA2D and DYNA3D. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a322344.pdf>-(Erişim Tarihi: 10.06.2019).
- Ruan, D., Kariem, M., Crouch, I. 2017.** High strain rate and specialised testing: The Science of Armour Materials, Ed.:Crouch, I., G., Elsevier, Woodhead Publishing, pp: 581-637.
- Sahu, R. R., Gupta, P. K. 2013.** Blast Diffusion by Different Shapes of Vehicle Hull. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 2(4):130-139.
- Saleh, M., Edwards, L. 2015.** Evaluation of soil and fluid structure interaction in blast modelling of the flying plate test. *Computers & Structures*, 151: 96-114.
- Saleh, M., Edwards, L., Crouch, I. 2017.** Numerical modelling and computer simulations: The Science of Armour Materials, Ed.:Crouch, I., G., Elsevier, Woodhead Publishing, pp: 483-579.
- Sedov, L. I. 2018.** Similarity and dimensional methods in mechanics. Mir Publishers, Moskow, 424 pp.
- Shukla, A., Rajapakse, Y. D., Hynes, M. E. 2014.** Blast Mitigation Experimental and Numerical Studies. Springer New York, New York, US, 364 pp.
- Slavik T. P. 2009.** A Coupling of Empirical Explosive Blast Loads to ALE Air Domains in LSDYNA. LSTC, <https://www.dynamore.it/en/downloads/papers/09-conference/papers/J-I-03.pdf>-(Erişim Tarihi: 15.06.2019)
- Souli, M., Sofiane, A., Olovson, L. 2003.** Fluid-Structure Interaction in LS-DYNA: Industrial Applications. *Emerging Technology in Fluids, Structures, and Fluid Structure Interactions*, 1:65-71.
- Tabatabaei, Z. S., Volz, J. S., Baird, J., Gliha, B. P., Keener, D. I. 2013.** Experimental and numerical analyses of long carbon fiber reinforced concrete panels exposed to blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 57:70–80.
- Taylor A. 1945a.** The formation of a blast wave by a very intense explosion I. Theoretical discussion. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*,201(1065): 159-174.
- Taylor A. 1945b.** The formation of a blast wave by a very intense explosion. - II. The atomic explosion of 1945. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*,201(1065): 175-186.
- Tüzgel, F. 2017.** The investigation of blast response of Sandwich panels with bio-inspired Cores. *Y.Lisans Tezi*, İYTE Department of Mechanical Engineering, İzmir.
- Williams K., McClennan S., Durocher R., St-Jean B. and Tremblay J. 2002.** Validation of a Loading Model for Simulating Blast Mine Effects on Armoured Vehicles. 7th International LS-DYNA Users Conference, Detroit, USA.
- Yuen, S. C., Langdon, G., Nurick, G., Pickering, E., & Balden, V. 2012.** Response of V-shape plates to localised blast load: Experiments and numerical simulation. *International Journal of Impact Engineering*,46: 97-109.
- Zakrisson, B., Wikman, B., Häggblad, H. 2011.** Numerical simulations of blast loads and structural deformation from near-field explosions in air. *International Journal of Impact Engineering*,38(7): 597-612.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hasan Haciosmanođlu
Dođum Yeri ve Tarihi : KRUMOVGRAD-(BG)/16.08.1988
Yabancı Dil : İngilizce

Eđitim Durumu

Lise : Suphi Koyuncuođlu Lisesi 2004-2008
Lisans : Dokuz Eylöl Üniversitesi Makine Müh. 2008-2013
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği 2013-...

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : DTA Mühendislik 2013-2015
: BMC Otomotiv Sanayi ve Tic. A.ř 2016-...

İletişim (e-posta) : haciosmanoglu.hasan@gmail.com