



**PATLATMA KAYNAKLI YER
SARSINTISININ SONLU ELEMAN
YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ**

Mehmet ÖZEL

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalı
Doç. Dr. İlker KAZAZ
2016
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**PATLATMA KAYNAKLI YER SARSINTISININ SONLU ELEMAN
YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ**

Mehmet ÖZEL

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Yapı Bilim Dalı**

**ERZURUM
2016**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

PATLATMA KAYNAKLI YER SARSINTISININ SONLU ELEMAN
YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ

Doç. Dr. İlker KAZAZ danışmanlığında, Mehmet ÖZEL tarafından hazırlanan bu çalışma 11/07/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı – Yapı Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu~~ (3./3.) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. O. Akın DÜZGÜN

İmza : 

Üye : Doç. Dr. İlker KAZAZ

İmza : 

Üye : Yrd. Doç. Dr. Dilek OKUYUCU

İmza : 

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 21.../07.../2016 tarih ve 29.../.../16... nolu kararı ile onaylanmıştır.


Prof. Dr. Ertan YILDIRIM
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PATLATMA KAYNAKLI YER SARSINTISININ SONLU ELEMAN YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ

Mehmet ÖZEL

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İlker KAZAZ

Delme ve patlatma yöntemi taş ve kum ocakları ile tünel kazıları başta olmak üzere birçok farklı alanda, büyük çaplı kazı faaliyetlerinde etkin olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemin kullanılmasında en önemli husus istenmeyen hasarların oluşmasını engellemek ve çevresel rahatsızlıkların önüne geçmektir.

Bu çalışmada, delme ve patlatma yöntemleri incelenerek uygun bir tünel modeli üzerinde patlatma simülasyonları sonucunda ortaya çıkan titreşimler ile bunların yapılara etkisi ele alınmıştır. Patlama yükünün tasarımında yeni bir yaklaşım olan Eşdeğer Elastik Sınır Yöntemi kullanılarak belirlenen patlama yükü sonlu eleman yöntemini kullanan ANSYS Workbench üzerindeki kazı modeline uygulanarak etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır. Üretilen model üzerindeki farklı noktalardan Workbench yazılımı ile yapılan hesaplarla maksimum parçacık hızı (PPV) tespit edilmiş, geleneksel bir kontrol yöntemi olan Ölçekli Mesafe bağıntısı kullanılarak ulaşılan sonuçların doğruluğu teyit edilmiştir. Son olarak elde edilen titreşim değerleri, ANSYS APDL programı ile tarihi yapı örneklerinden Erzurum Lalapaşa Camisi modeline uygulanmış ve patlayıcı kaynaklı sarsıntıların tarihi yapı modeline etkisi incelenmiştir.

2016, 103 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kaya patlatmaları, patlama yükü, detonasyon, infilak, delme patlatma, patlayıcı kaynaklı yer sarsıntısı, Eşdeğer Elastik Sınır, maksimum parçacık hızı, sarsıntının tarihi yapıya etkisi

ABSTRACT

Master Thesis

THE MODELING OF BLAST INDUCED GROUND VIBRATION WITH THE FINITE ELEMENT METHOD

Mehmet ÖZEL

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Department of Building

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İlker KAZAZ

Drill and blast method is used effectively in many large-scaled excavation operations especially in quarries, sand-pits and tunnel excavations. The most important aspect of using drill and blast method is to prevent the formation of undesired damage and forestall environmental disturbance.

In this study; by analyzing drill and blast method and depending on the result of explosion simulations on an appropriate tunnel model, the vibration characteristics on the ground surface and its effect on a historical structure is evaluated. Equivalent Elastic Boundary method that is a new modelling approach resulting from design of explosive charges is applied to excavation models generated in finite element package ANSYS Workbench and tried to determine the effects. By taking calculated values with Workbench software from different points of model the peak particle velocity (PPV) is determined and by using Scaled Distance formula which is common control method, the accuracy of results are confirmed. Finally, the obtained results is applied to historical Erzurum Lalapaşa Mosque's model by using ANSYS APDL and the effect of explosive induced vibrations on the historical structure are examined.

2016, 103 pages

Keywords: rock blasting, blasting load, detonation, explosion, drill and blast, blast induced ground vibration, equivalent elastic boundry, peak partical velocity, vibration effects to historical structure

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezinin her aşamasında alıŐmalarına yön veren, bilgisini, ilgi ve desteğini esirgemeyen, fikirlerinden ve dokümanlarından yararlandığım danışman hocam Sayın Doç. Dr. İlker KAZAZ'a teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde yanımda olan, destek ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen biricik eŐim ve ailemin bütün bireyelerine minnet ve Őukranlarımı sunarım.

Mehmet ÖZEL

Temmuz, 2016

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Yanma, Patlama ve İnfilak	4
1.2. Tünel Patlatma Yöntemleri	5
1.2.1. Açılı kesme yöntemi.....	6
1.2.2. Paralel delik yöntemi.....	8
1.2.3. Tünel patlatmalarında özel uygulamalar	10
2. KURAMSAL TEMELLER	11
2.1. Patlama Olayının Aşamaları:.....	11
2.1.1. Başlangıç aşaması(infilak)	12
2.1.2. Genişleme - çatlama aşaması	13
2.1.2. Tahliye aşaması	14
2.2. Patlama Yükünün Tanımlanması	16
2.2.1. Başlangıç aşaması(infilak)	16
2.2.2. Genişleme-çatlama aşaması	18
2.2.3. Tahliye aşaması	18
2.3. Elastik Sınırın Belirlenmesi.....	21
2.3.1. Elastik sınırın hesaplanması	22
2.3.2. Elastik sınıra etki eden yükün tespit edilmesi	25
2.4. Ölçekli Mesafe Yöntemi	27
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	32
3.1. Materyal.....	32
3.1.1. Patlama yükünün tespit edilmesi.....	32
3.1.2. Modellerin oluşturulması	38

3.1.2.a. Zemin Modellerin oluşturulması	38
3.1.2.b. Tarihi yapı modelinin oluşturulması	41
3.1.3. Kullanılacak zemin tiplerinin tespiti	46
3.2. Yöntem	50
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	53
4.1. Patlama Kaynağının 10 m Derinlikte Olduğu Modelde Yapılan Patlatma Uygulamalarının Değerlendirilmesi	54
4.2. Patlama Kaynağının 20 m Derinlikte Olduğu Modelde Yapılan Patlatma Uygulamalarının Değerlendirilmesi	57
4.3. Patlama Kaynağının 50 m Derinlikte Olduğu Modelde Yapılan Patlatma Uygulamalarının Değerlendirilmesi	60
4.4. Patlama Kaynağının Tünel Tasarımına Göre Yerleştirilmesinden Kaynaklanan Etkilerin İncelenmesi	63
4.5. Kaya Zemin Üzerinde Toprak Örtü Bulunması	65
4.6. Patlayıcı Miktarındaki Değişimin Parçacık Hızına Etkisi.....	68
4.7. Eşdeğer Elastik Sınır Yönteminin Zemin Özelliklerine Göre İrdelenmesi	70
4.8. Simülasyon Sonucunda Elde Edilen Verilerin Ölçekli Mesafe Yöntemi ile İrdelemesi	73
4.9. Simülasyonda Patlatma Kaynaklı Sarsıntıya Maruz Bırakılacak Tarihi Yapı Örneğinin İncelenmesi.....	79
4.10. Lalapaşa Camisinin Patlatma Kaynaklı Yer Sarsıntısı Etkisinde Dinamik Analizi.....	84
4.10.1. Hasar kriteri üzerinde PPV ile Lalapaşa Camisinin incelenmesi	84
4.10.2. Hasar kriteri altında PPV ile Lalapaşa Camisinin incelenmesi	92
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	98
KAYNAKLAR	102
ÖZGEÇMİŞ	104

SİMGELER DİZİNİ

σ_t	Serbest (Sınırlanmamış) Çekme Dayanımı	MPa
a	Patlayıcı Şarj Çapı	mm
b	İmla Haznesi Çapı	mm
C_1	Şok Dalgası Yayılma Hızı	m/sn
C_D	Şok Dalgası Akustik Hızı	m/sn
C_f	Çatlak Yayılma Hızı	m/sn
C_p	Kayanın Akustik Hızı	m/sn
D	İnfilak (Detonasyon) Hızı	m/sn
E	Elastisite Modülü	MPa
$e^{-\alpha(R/W)}$	İnelastik Sönme Faktörü	
$e^{-\alpha R}$	İnelastik Seyreltme Faktörü	
K, β , a, n	Saha sabitleri	m
L1	Patlayıcı Şarj Boyu	m
L2	Sıkılama/Dolgu Malzemesi Boyu	m
Ls	Yanyana İki Hazne Arası Mesafe	m
P_0	Başlangıç Evresi Gaz Basıncı	MPa
P_1	Genişleme Evresi Gaz Basıncı	MPa
P_2	Yük Azalım Evresi Gaz Basıncı	MPa
P_D	Patlama Gaz Basıncı	MPa
PPV	Maksimum parçacık hızı	mm/sn
R	Patlatma noktasından uzaklık	m
r_0	İmla Haznesi Yarıçapı	mm
r_1	Ezilmiş Bölge Yarıçapı	mm
r_2	Çatlamış Bölge Yarıçapı	mm
t_C	Genişleme(Çatlama) Süresi	ms
t_r	Başlangıç Evresi Yanma Süresi	ms
t_{U1}	Yük Boşaltma Dalgası İlerleme Süresi	ms
t_{U2}	Yansıyan Yük Boşaltma Dalgası İlerleme Süresi	ms
V	İmla Haznesinin Başlangıçtaki Hacmi	mm ³

W	Gecikme başına maksimum patlayıcı madde miktarı	Kg
α	Gerilme Dalgasının Azalma Katsayısı	
γ	Patlama Gazları Özgül Isı Oranı	
ΔV	İmla Haznesinin Hacim Değişimi	mm ³
μ	Ortam Kaya Kütlesine ait Poisson oranı	
σ^*	Çok Eksenli Gerilme Altındaki Basınç Dayanımı	MPa
σ_c	Serbest (Sınırlanmamış) Basınç Dayanımı	MPa



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Açılı kesme yöntemi delik tasarımı	6
Şekil 1.2. Ani kesme yöntemi delik tasarımı	7
Şekil 1.3. Yelpaze kesme yöntemi delik tasarımı	7
Şekil 1.4. Paralel delik yöntemi ayna tasarımı.....	8
Şekil 1.5. Kesme, tarama (patlatma) ve sınır delikleri.....	9
Şekil 2.1. Patlama olayının aşamaları	12
Şekil 2.2. Genişleme–çatlama aşaması	14
Şekil 2.3. Tahliye aşamasında patlama gazlarının durumu.....	15
Şekil 2.4. Tahliye aşamasında basınç dalgasının ilerlemesi	19
Şekil 2.5. Patlama aşamalarına göre basınç–zaman grafiği.....	20
Şekil 2.6. Kesme delikleri için elastik sınır	22
Şekil 2.7. Tarama ve sınır delikleri için elastik sınır	23
Şekil 2.8. Patlatma sonucunda oluşan ezilmiş ve çatlamış bölgeler	25
Şekil 3.1. Paralel delik yöntemine göre örnek tünel ayna tasarımı.....	32
Şekil 3.2. Örnek kesme delik tasarımı (normal şarj)	33
Şekil 3.3. Normal şarjlı patlatmada imla hazne duvarına uygulanan basınç	34
Şekil 3.4. Örnek kesme delik tasarımı (fazla şarjlı).....	35
Şekil 3.5. Fazla şarjlı patlatmada imla hazne duvarına uygulanan basınç.....	35
Şekil 3.6. Model üzerinde Eşdeğer Elastik Sınıra yükün uygulanması	36
Şekil 3.7. Sert malzemeli zemin tipine göre Eşdeğer Elastik Sınır yükü	37
Şekil 3.8. Orta sert malzemeli zemin tipine göre Eşdeğer Elastik Sınır yükü.....	37
Şekil 3.9. Yumuşak malzemeli zemin tipine göre Eşdeğer Elastik Sınır yükü.....	38
Şekil 3.10. Patlama kaynağı yüzeyden 10m derinlikte tasarlanan model.....	39
Şekil 3.11. Patlama kaynağı yüzeyden 20m derinlikte tasarlanan model.....	40
Şekil 3.12. Patlama kaynağı yüzeyden 50m derinlikte tasarlanan model.....	41
Şekil 3.13. Üç katmanlı kesme taş duvar kesiti	42
Şekil 3.14. Lalapaşa Camisi plan çizimleri.....	43
Şekil 3.15. Lalapaşa Camisi ön cephe çizimleri	43
Şekil 3.16. Lalapaşa Camisi ANSYS sonlu eleman modeli	44

Şekil 3.17. SOLID65 elemanı gösterimi (ANSYS kullanım kılavuzu).....	45
Şekil 3.18. Patlatma modeli yüzey kontrol noktaları gösterimi.....	47
Şekil 3.19. Parçacık hızına göre hasar kriterleri	51
Şekil 4.1. Patlatma kaynağı 10 m derinlikte sert malzemeli model için parçacık hızı	54
Şekil 4.2. Patlatma kaynağı 10 m derinlikte orta sert malzemeli model için parçacık hızı.....	55
Şekil 4.3. Patlatma kaynağı 10 m derinlikte yumuşak malzemeli model için parçacık hızı.....	56
Şekil 4.4. Patlatma kaynağı 10 m derinlikte modelde toplam hız	57
Şekil 4.5. Patlatma kaynağı 20 m derinlikte sert malzemeli model için parçacık hızı	58
Şekil 4.6. Patlatma kaynağı 20 m derinlikte orta sert malzemeli model için parçacık hızı.....	58
Şekil 4.7. Patlatma kaynağı 20 m derinlikte yumuşak malzemeli model için parçacık hızı.....	59
Şekil 4.8. Patlatma kaynağı 20 m derinlikte modelde toplam hız	59
Şekil 4.9. Patlatma kaynağı 50 m derinlikte sert malzemeli model için parçacık hızı	60
Şekil 4.10. Patlatma kaynağı 50 m derinlikte orta sert malzemeli model için parçacık hızı	61
Şekil 4.11. Patlatma kaynağı 50 m derinlikte yumuşak malzemeli model için parçacık hızı	61
Şekil 4.12. Patlatma kaynağı 50 m derinlikte modelde toplam hız	62
Şekil 4.13. X yönünde 25m mesafeli kontrol noktası için parçacık hızı	64
Şekil 4.14. Z yönünde 25m mesafeli kontrol noktası için parçacık hızı.....	64
Şekil 4.15. Toprak örtülü modelde elde edilen parçacık hızı	65
Şekil 4.16. Toprak örtüsü olmayan modelde elde edilen parçacık hızı	66
Şekil 4.17. Sert zemin malzemeli model için şarj miktarına göre PPV.....	69
Şekil 4.18. Orta sert zemin malzemeli model için şarj miktarına göre PPV	69
Şekil 4.19. Yumuşak zemin malzemeli model için şarj miktarına göre PPV	70
Şekil 4.20. Ölçekli Mesafe eşitliklerine göre ölçülen PPV - $R\sqrt{W}$ grafiği.....	73

Şekil 4.21. Sert zemin malzemeli modelde okunan PPV - $R\sqrt{W}$ grafiği.....	75
Şekil 4.22. Orta sert zemin malzemeli modelde okunan PPV - $R\sqrt{W}$ grafiği	76
Şekil 4.23. Yumuşak zemin malzemeli modelde okunan PPV - $R\sqrt{W}$ grafiği	77
Şekil 4.24. Analiz sonuçlarından elde edilen $K-E$ ilişkisi.....	78
Şekil 4.25. Lalapaşa Camisi yandan görünüm fotoğrafı.....	79
Şekil 4.26. Lalapaşa Camisi genel görünüm fotoğrafı.....	80
Şekil 4.27. Lalapaşa Camisi mimari detaylar ve iç görünüm	81
Şekil 4.28. Lalapaşa Camisi minareye ait modal analizi	82
Şekil 4.29. Lalapaşa Camisi Y yönünde modal analizi	82
Şekil 4.30. Lalapaşa Camisi X yönünde modal analizi	83
Şekil 4.31. Lalapaşa Camisi Z yönünde modal analizi.....	83
Şekil 4.32. Lalapaşa Camisi XZ bileşke yönünde modal analizi.....	84
Şekil 4.33. Cami modeline birinci senaryoda uygulanan parçacık hızı.....	85
Şekil 4.34. Cami modeline birinci senaryoda uygulanan X yönündeki ivme.....	85
Şekil 4.35. Cami modeline birinci senaryoda uygulanan Y yönündeki ivme.....	86
Şekil 4.36. Cami modeline birinci senaryoda uygulanan Z yönündeki ivme	86
Şekil 4.37. Cami modeli birinci senaryoda şekil değişikliği	87
Şekil 4.38. Cami modeli birinci senaryoda kritik noktaların deplasmanları.....	87
Şekil 4.39. Cami modeli birinci senaryoda aynı istikametteki iki noktanın deplasmanları	88
Şekil 4.40. X Yönünde deplasmanlar	88
Şekil 4.41. Z Yönünde deplasmanlar.....	89
Şekil 4.42. Cami modeli birinci senaryoda meydana gelen birim şekil değiştirmeleri ..	89
Şekil 4.43. Cami modeli birinci senaryoda meydana gelen birim şekil değiştirmeleri alttan görünüm.....	90
Şekil 4.44. Cami modeli birinci senaryoda meydana çatlak gösterimi.....	91
Şekil 4.45. Cami modeline ikinci senaryoda uygulanan parçacık hızı	92
Şekil 4.46. Cami modeline ikinci senaryoda uygulanan X yönündeki ivme	93
Şekil 4.47. Cami modeline ikinci senaryoda uygulanan Y yönündeki ivme	93
Şekil 4.48. Cami modeline ikinci senaryoda uygulanan Z yönündeki ivme	93
Şekil 4.49. Cami modeli ikinci senaryoda şekil değişikliği.....	94

Şekil 4.50. Cami modeli ikinci senaryoda kritik noktaların deplasmanları.....	94
Şekil 4.51. X Yönünde deplasmanlar	95
Şekil 4.52. Z Yönünde deplasmanlar	95
Şekil 4.53. Cami modeli ikinci senaryoda meydana gelen birim şekil değiştirmeleri.....	96
Şekil 4.54. Cami modeli ikinci senaryoda meydana gelen birim şekil değiştirmeleri alttan görünüm.....	96
Şekil 4.55. Cami modeli ikinci senaryoda meydana çatlak gösterimi	97



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Lalapaşa Camisi için modellemede kullanılan materyaller	44
Çizelge 3.2. Genel kaya çeşitlerine ait tipik elastisite modülleri (GPa)	46
Çizelge 3.3. Genel kaya çeşitlerine ait tipik Poisson oranları.....	46
Çizelge 3.4. Elastisite modülü ve Poisson oranına göre PPV değerleri.....	48
Çizelge 3.5. Yükseklik farkına oranla PPV değişimi	49
Çizelge 4.1. Kaya zemin ile toprak örtülü zeminlere ait PPV değerleri	67
Çizelge 4.2. Toprak örtülü modelde kontrol noktalarından alınan PPV değerleri.....	67
Çizelge 4.3. K faktörünün simülasyon sonucuna ve önerilen denkleme göre değerleri	79

1. GİRİŞ

Açık ocak ve tünel kazıları gibi geniş çaplı kazı faaliyetleri çok fazla uğraş ve işçilik gerektiren bununla birlikte özellikle sert kayaç tiplerinde hedeflenen üretime ulaşmanın çok zor olduğu çalışmalardır. İstenen hedeflerin gerçekleştirilebilmesi için mekanik yöntemler çoğu zaman yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple işletmelerde patlayıcı maddelerin kırıcı ve itici-sürücü etkilerinden faydalanılmaktadır. Burada önemli hususlardan birisi istenilen kazı alanının istenilen miktarda parçalanmasını buna karşın hasar almaması gereken bölgelerin sağlam kalabilmesini sağlamaktır. Diğer bir deyişle aşırı kazı, ilave maliyet ve işçilik ihtiyacı ortaya çıkaracak, boşa malzeme ve zaman kaybı yaratacak bir olay olması sebebiyle işletmeler tarafından istenmeyen bir husustur.

Baraj, tünel, otoyol, bina temeli ve maden ocağı gibi projelerde kazı kesiti dışındaki kayacın doğal direncini korumak ve aşırı kazıyı en aza indirmek amacıyla kontrollü patlatma yöntemleri uygulanmaktadır. Günümüzde çevre bilincinin de gittikçe önem kazanması yalnızca maliyet sebepli endişelerin yanında, patlatma kaynaklı olumsuz çevresel etkilerin minimize edilmesi zorunluluğunu beraberinde getirmektedir. Delme ve patlatma uygulanan çalışma alanı çevresinde ikamet eden insanlardan, yakındaki yapı ve tesislere, tarihi ve doğal kalıntılara hasar ya da rahatsızlık verecek herhangi bir etkinin oluşmaması dikkat edilmesi gereken bir konudur. Tünel ve açık ocak kazılarında uygulanan delme ve patlama yöntemi incelendiğinde ise, çevresel etkiler taş savrulması, hava şoku ve yer sarsıntısı olarak üç ana başlık altında toplanabilir. Bu tez çalışmasında özellikle yer sarsıntısı ve yer sarsıntısının sebep olduğu olumsuz etkiler ele alınmıştır.

Farklı jeolojik şartlara uygunluğu yüzünden delme-patlatma yöntemi hala hidroenerji, taşıma ve madencilikte; kaya temeli ve galeri açma kazılarında yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bunun yanı sıra yukarıda belirtilen olumsuz etkiler delme-patlatma yöntemleri kullanılmaya başladığından beri tasarımcı ve işletme sahiplerinin aklında bir sorun olmaya devam etmiş, çevreye verilen rahatsızlık düzeyinin asgari seviyede tutulması için çaba gösterilmiştir. Her ne kadar farklı bölgelerde farklı araştırmacıların elde ettikleri kendilerine özgü bağıntılar ve yöntemler kullanılsa da öngörü ve patlatma

sarsıntısının kontrolü uzun zamandır patlatma tasarımlarında önemli bir çıkarım olarak değerlendirilmiştir. Yani genel olarak çevresel etkilerin minimize edilmesi geleneksel olarak en az miktardaki patlayıcı kullanımına başlanarak etkilerin gözlemlenmesi ve miktarın buna bağlı olarak artırılmasına bağlanmıştır. Günümüzde açık işletmelerde patlatma sonrası oluşan yer titreşimlerinin ölçülüp değerlendirilmesiyle kontrollü patlatma tasarımları halen yapılmaktadır.

Patlatma yöntemlerinin en çok kullanılan çeşitleri açık ocak kazılarında kullanılan basamak patlatmaları ile tünel kazılarında kullanılan tünel patlatma yöntemleridir. Bu çalışmada tünel patlatma yöntemi üzerinde çalışılmıştır. Sonlu eleman yöntemi kullanılarak inşa edilen bilgisayar yazılım ve programlarından yararlanılmıştır. Bu yöntemin kullanılmasındaki fayda bilindiği gibi üretilen modelin sonlu sayıda elemana ayrılması ve bu elemanların düğüm noktalarındaki gerilme, birim şekil değiştirme dengesi ile deplasman ve deformasyon sürekliliğinin sağlanması ilkesidir.

Bu çalışmadaki amaç delme ve patlatma kaynaklı sarsıntıların sahaya gitmeden önce nasıl etkiler yaratabileceğini tahmin edebilmek ve sahada yapılan ölçümlerle sonraki aşamalara yönelik daha gerçekçi bilgiler elde edebilmektir. Bu veriler ışığında özellikle tünel kazılarında delme ve patlatma yönteminin en uygun mesafenin tespiti ve kullanılacak patlayıcı ile atım sayısının tasarlanabilmesi için bilgiler toplanması bu şekilde çevreye en az hasarın verilerek en yüksek verimde çalışmanın sağlanabilmesidir.

Patlayıcı maddelerin kullanılmaya başlandığı andan itibaren çevreye verdikleri hasarın kontrol altına alınması ve kontrol altında tutulabilmesi maksadıyla çeşitli tahmin yöntemleri kullanılmıştır. Başlarda çoğunlukla sezgisel temellere dayanarak kullanılan patlayıcı maddeler bir süre sonra değişik bağıntılar yardımıyla daha kontrollü ve tahmin edilebilir etkiler oluşturacak şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Patlatma sahasında değişik mesafelerdeki sarsıntı şiddetini belirlemek için ölçeklendirme ilişkilerini kullanmak günümüzde standart bir uygulama olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yer sarsıntısı tahminlerinde ise birçok ampirik bağıntıdan yararlanılmaktadır. Bu bağıntıların en çok güvenilir olanları Ölçekli Mesafe ve parçacık hızını kavramlarına

dayananlardır. Ölçekli Mesafe bağıntısı kavram olarak bir defada patlatılan azami miktar ile etkilenen mesafe arasındaki ilişkidir. Yani patlayıcı madde miktarına ve patlatma noktasına olan uzaklığın takip edilebildiği durumlarda saha faktörlerinin de dikkate alınarak bir sonraki patlayıcı atımının oluşturacağı titreşimin tahmin edilebilmesidir. Bu yaklaşımda patlayıcı sarsıntısını simgeleyen maksimum parçacık hızının (peak particle velocity) ilişkilendirilmesinde kullanılan saha sabitleri bizzat sahada yapılan kontrol atımlarının sonucunda toplanan verilerdir. Bu verilerin sağlıklı bir şekilde elde edilebilmesi için en az 30 atım yapılması gerekmekte ve değişen zemin özelliklerine göre tekrarlanmasına ihtiyaç duyulabilmektedir (Kahriman vd 2000)

Sahada yapılan ölçüm ve kontrollerin geçerliliğini inkar etmemek gerekir. Yapılan deneysel çalışmalardan daha da gerçekçi sonuçlar elde edilmesine ve öngörülemeyen durumların tespit edilebilmesine imkan tanır. Ancak özellikle korunması gereken tarihi ve doğal değerlerin yakınlarında yapılacak uygulamalarda hem kontrol atımlarında bile hasar oluşmasının önüne geçmek hem de uygulamaya başlamadan önce çok düşük maliyetlerle ve risk almadan oluşabilecek etkilerin önceden tahmininde bulunarak optimal etki sağlayan tasarımları yapabilmek maksadıyla bilinen veriler ile deneysel yöntemleri ve simülasyonları kullanmak çok önemlidir. Çünkü tecrübe ve kontrollü patlatma yöntemleri için yeterli bilgi toplanana kadar yapılan atımlar güvenli olarak değerlendirilemeyeceklerdir. Başlangıç için yapılacak uygulamaya fikir verebilmesi açısından heoristik yöntemlerden farklı olarak kullanılacak verilere ihtiyaç duyulmuştur.

Bu sebeple dünya çapında araştırmacılar şok dalgasının yayılmasını farklı nümerik yöntemlerle hesaplamaya çalışmışlar ve birçok başarı elde etmişlerdir. Rockwell'in enerji bağıntısı (1934), USBM (Birleşik Devletler Maden Araştırma Bürosu 1942) Crandell'in Enerji oranı bağıntısı (1949) bu çalışmalara ilk örneklerdir (Arpaz vd 2001).

Yapılan çalışmalarda yer sarsıntısı genliği, frekansı, şarj miktarı, çevre yoğunluk özellikleri, parçacık hızı gibi faktörler üzerinde çalışılmış ve USBM RI 8507(1980)

raporlarına göre parçacık hızı dikkate alınarak yapılan çalışmaların en iyi yer titreşimi hesaplama ve kontrol aracı olduğu belirtilmiştir (Arpaz vd 2001).

Son zamanlarda birkaç yeni kontrol teorisi ile yeni ağ teknolojisi, bu tarz problemlerde kullanılmıştır. Bu yöntemler ne kadar geniş test detaylarına bağlı olsa da titreşim frekansı ve süresi hesaba katılmamış böylece bazı limitlerle sınırlı kalmıştır. Son yıllarda bilgisayar teknolojisindeki ve patlatma teorilerinin hızlı gelişimiyle nümerik simülasyon, patlama dalgasının yayılımında ümit verici bir yaklaşım olmuştur.

Bu çalışma beş ana başlık altında toplanmıştır. Giriş bölümünde konuyla ilgili alt yapıyı hazırlamak maksadıyla genel bilgiler verilmiş, çalışmanın kapsamı, amaçları verilmiş kullanılmakta olan yöntem ve genel uygulamalar özetlenmiştir. Kuramsal temeller bölümünde, çalışmada kullanılan yöntemlerden bahsedilmiş, teorik olarak uygulanacak yöntemler anlatılmıştır. Simülasyonu oluşturacak teknik ve bilgilerin elde edilmesi, simülasyonla ilgili ön verilerin temini anlatılmıştır. Bu kapsamda daha önce yapılan çalışmalara değinilmiştir. Üçüncü bölüm Materyal ve Yöntem kısımlarından oluşmaktadır. Materyal kısmında çalışmada kullanılan malzeme modelleri, Yöntem kısmında ise çalışmada izlenecek yöntemlerin uygulanması anlatılmıştır. Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde ANSYS programında elde edilen analiz sonuçları, Ölçekli Mesafe bağıntılarıyla irdelenmiş farklı senaryolar üzerinde çalışmalar yapılarak gerçekçi durumlarda meydana gelebilecek olaylar anlaşılmaya çalışılmıştır. Sonuçlar ve Öneriler bölümü ise çalışmadan çıkarılan belli başlı sonuçları ve daha sonra yapılacak olan çalışmalara yol göstermesi açısından önerileri kapsamaktadır.

1.1. Yanma, Patlama ve İnfilak

Bilindiği üzere yanma yanıcı maddenin ısı ve oksijenle birleşmesi sonucu oluşan kimyasal bir olaydır. Patlama aslında kendisini çevreleyen her türlü ortam/kabın basınç sebebiyle delinmesi ya da parçalanması olayıdır. Bizim kullandığımız anlamda patlama olayı detonasyon ya da infilak olarak tabir edilen olaydır. Yine bilindiği üzere patlayıcı maddeler de yanıcı özelliğe sahiptir. Açık havada yeterli basınç oluşturulmadan

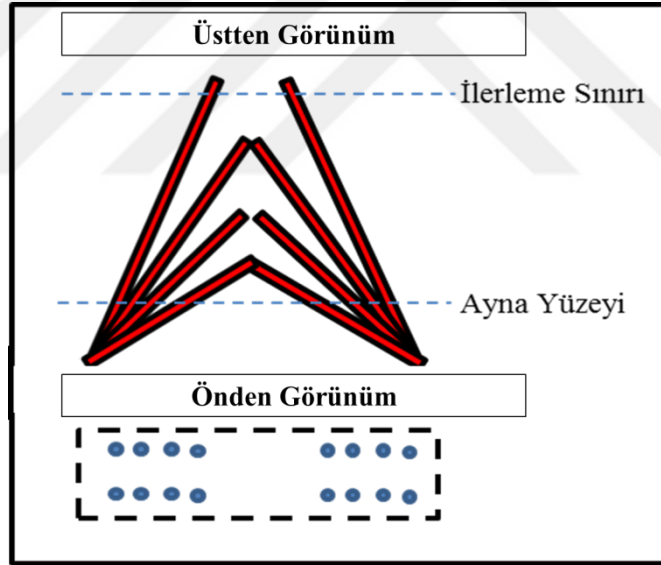
yakılması durumunda patlayıcı maddeler de normal yanma faaliyetini gösterebilirler. Ancak infilak patlayıcı maddenin kendi kimyasal yapısında bulunan oksijen moleküllerinin serbest kalmasıyla meydana gelen bir yanma olması sebebiyle oksijenin yanıcı maddeyle birleşmesi için geçecek zamana ihtiyaç duymaz. Dolayısıyla çok hızlı bir şekilde (400 m/sn - 9000 m/sn) katı formdan yanma reaksiyonu ile gaz hale geçer. Ancak infilâkın oluşabilmesi için patlayıcı maddenin bünyesindeki oksijeni reaksiyona sokacak yüksek ısı ve basınca ulaşması gerekir. Kısaca infilak için başlangıç enerjisi sağlandığı takdirde yine maddenin kendi oluşturduğu yüksek basınç ve sıcaklık yardımıyla geride kalan kütle miktarı da aynı şekilde bünyesindeki oksijeni kullanarak yanma faaliyetini tamamlar. Bu sebeple patlayıcı maddeler oksijen gerektirmeden infilak edebilirler. Bu kadar kısa süreli bir yanma olayının tamamlanmasından sonra ortaya çıkan yüksek miktarda gaz ise kendisini çevreleyen kütle ya da hava katmanını geri çekilmesine imkân vermeyecek kadar hızlı bir şekilde parçalar.

1.2. Tünel Patlatma Yöntemleri

Dünya genelinde tünel patlatmalarında birçok farklı yöntem uygulanmaktadır. Tünel içerisinde kazının uygulanacağı, deliklerin açılarak patlatılacak olan yüzey ayna olarak anılacaktır. İlk başlarda kazı için ayna yüzeyine rastgele hazneler açılmış patlatılmıştır. Ancak kayaların hemen her eksenden aynı anda basınca maruz kalması, kütlelerin olduğu yerde kilitlendiği ve istenen etkinin elde edilemediği görülmüştür. Bu sebeple ana mantık olarak patlatılan kütlelerin ana kütlelerden koparılması için bir boşluğa ihtiyaç duyulmuş ve malzemenin ötelenmesine izin veren serbest bir yüzey oluşturan tasarımlar geliştirilmiştir. Böylece daha az patlayıcı ile daha fazla malzemenin parçalanması ve ötelenmesi konusunda başarılı olunmuştur. Bu esaslarda son zamanlarda uygulanan delme ve patlatma usulleri açılı kesme ve paralel delik yöntemleri olmak üzere iki ana başlıkta toplanabilir. Tünel boyutları, kayaç özellikler, maliyet ve benzer faktörlere bağlı olarak projenin gereksinimlerine göre bu yöntemlerden uyarlamalar yapılmaktadır.

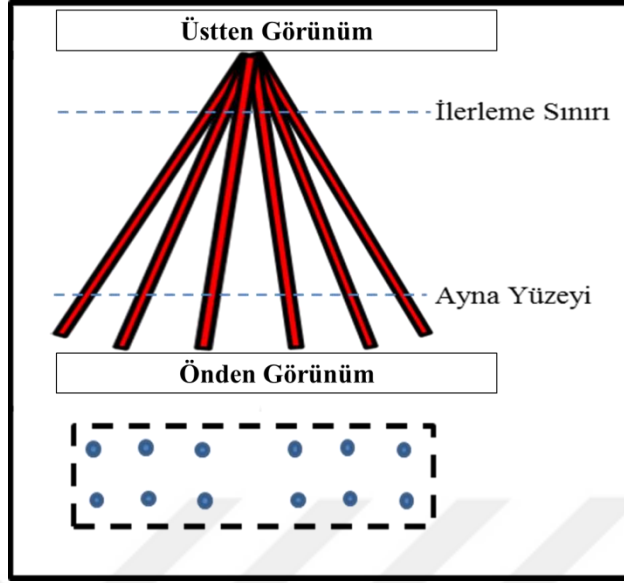
1.2.1. Açılı kesme yöntemi

Ülkemizde çok yakın bir zamana kadar yaygın olarak kullanılmıştır. Açılı kesme uygulamasının en çok bilinen versiyonu orta kesme olarak da tabir edilen yöntemdir. Bu yöntemde Şekil 1.1’de gösterildiği gibi aynadan biraz mesafeli bir kenar noktasından orta iç açısı 60° olacak şekilde başlamak üzere simetrik delikler delinmeye başlanır. İlerleme sınırına kadar aynı noktadan farklı açılarla delinen delikler orta başlatılarak en az 50 ms gecikmeli şekilde patlatılır (Kahraman 2000). Bu şekilde mevcut olmayan serbest yüzey orta kısmın tünel ağzına doğru ötelenmesi suretiyle açılmış olur. İlerleme sınırına doğru sırayla patlatılan her dilim kendinden öncekinin açmış olduğu serbest yüzeye doğru malzemeyi parçalamış olur.



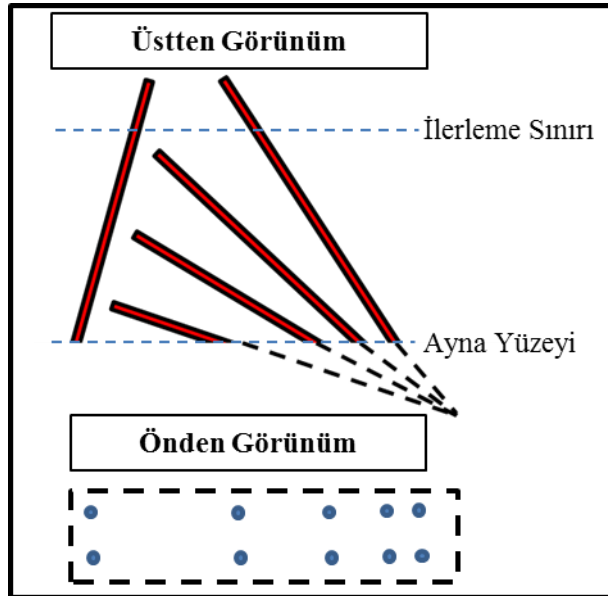
Şekil 1.1. Açılı kesme yöntemi delik tasarımı

Açılı Kesme Yöntemi; tünel genişliğinin durumuna, kazıcı alet ve makinelerin yeteneklerine göre farklılaşarak Ani Kesme ve Yelpaze Kesme yöntemi adı altında çeşitlendirilebilir.



Şekil 1.2. Ani kesme yöntemi delik tasarımı

Açılı kesme yöntemlerinden ani kesme tasarımında gecikme uygulamadan tüm aynada aynı anda patlatma yapılır. Şekil 1.2’de gösterilen delik tasarımı sayesinde tüm yüzeyden aynı anda kaya malzemelerin ötelenmesi beklenir. Nispeten daha kısa ilerleme mesafeleri için uygundur.



Şekil 1.3. Yelpaze kesme yöntemi delik tasarımı

Delik tasarımının tünel kısıtlamaları sebebiyle simetrik olarak açılmadığı yerlerde kullanılır. Şekil 1.3'de ayna yüzeyine yakın olan taraftan patlatma gerçekleştirilerek tünel istikametinin ilerleme sınırına doğru farklı bir açıya gelmesi sağlanır.

Açılı kesme yönteminde genellikle ilerleme tünel genişliğinin %40-60'ı kadardır, kazılan malzeme cinsine ve diğer değişkenlere göre nadiren %80 civarlarına ulaşır. Makinelerin istenilen açılarda delik açabilmesi için nispeten geniş bir tünel alanına ihtiyaç vardır. Klasik yöntemlere göre daha az patlayıcı ile daha fazla ilerleme sağlar. Patlayan kayalar tünel istikametinde ilerler, böylece taşıma için daha iyi yayılmış bir kütle olmasına karşın tünelde daha yüksek bir mesafe tedbir için boş bırakılmalıdır. Açılı hatası olması durumunda istenilenden önemli derecede farklı sonuçlar alınır (Erkoç 1990).

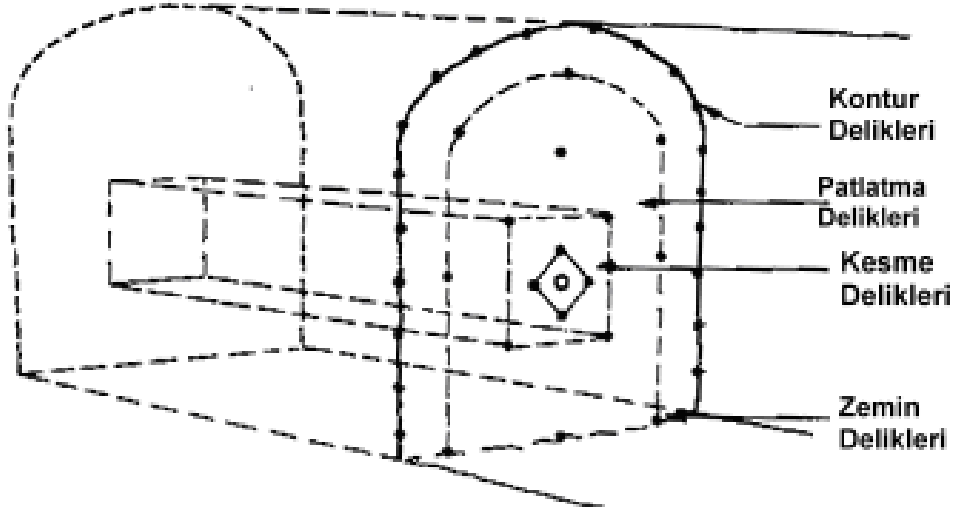
1.2.2. Paralel delik yöntemi



Şekil 1.4. Paralel delik yöntemi ayna tasarımı (www.delmeplatlatma.org)

Paralel delik yöntemi, Şekil 1.4'deki gibi ayna yüzeyine birbirine paralel olarak açılmış birçok deliğin patlayıcı madde ile şarj edilerek orta kısımda bulunan daha büyük çaplı boş deliklere doğru patlatılması esasına dayanır. Dünyada, delici makinelerin gelişmesinin etkisiyle otomatik olarak delik delinmesine dolayısıyla açılı hataları minimize edilerek, paralel delik yönteminin yaygın olarak kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Son yıllarda, ülkemizde de paralel delik yöntemine rağbet artmıştır. Delme hatasının ortadan kalkmasından sonra verimli sonuçlar alınmış ve paralel delik yöntemi ülkemizdeki tünel projelerinde başarılı bir şekilde uygulanmaya başlanılmıştır.

Paralel Kesme Yönteminde, normal çaplı delikler kendilerinden daha büyük çaplı bir ya da birden fazla boş deliğin etrafına paralel olarak delinip şarj edilir. Bu delikler boş delik veya deliklerin sağladığı ilk serbest yüzeye doğru patlar. Büyük çaplı delikler patlayıcı ile şarj edilmezler ve ateşleme yönü için ilk serbest yüzeyi oluştururlar. Kesme bölgesinde, patlatılan deliğin, ortadaki boş deliğe ya da deliklere doğru ötelenmesinin gerçekleşmesi için yeterli sürenin verilmesi gerekir (Evergen 1985).



Şekil 1.5. Kesme, tarama (patlatma) ve sınır delikleri

Paralel delik yöntemin ayna yüzeyinin istenilen kısmında uygulanabilir. Öncelikle Şekil 1.5'de gösterilen kesme delikleri, sonra patlatma (tarama) delikleri, en son kontur

(sınır) delikleri patlatılır. Kesme bölgesi çevreye çok yakın yerlere yerleştirilmez böylece istenmeyen çatlak ve hasarların önüne geçilmiş olur. Açılı kesme yöntemine göre daha fazla delik, daha fazla patlayıcıya ihtiyaç duymasına rağmen bir seferde daha fazla ilerleme kaydedilir. Deliklerin paralel olmaması ya da ayna da istenilen yerde olmaması tüm verimi kaybettirebilir. Ancak yeni delme makineleri bilgisayarda hesaplanan tasarımları ayna yüzeyine hatasız olarak uygulayabilecek kabiliyete sahiptir. Ayrıca patlama sonucunda hep boş delik istikametinde taşınma istenildiğinden fırlayan parçalar fazla mesafe kat etmez böylece her patlamada tünel içindeki tüm ekipmanın dışarıya nakledilmesi gerekmez.

1.2.3. Tünel patlatmalarında özel uygulamalar

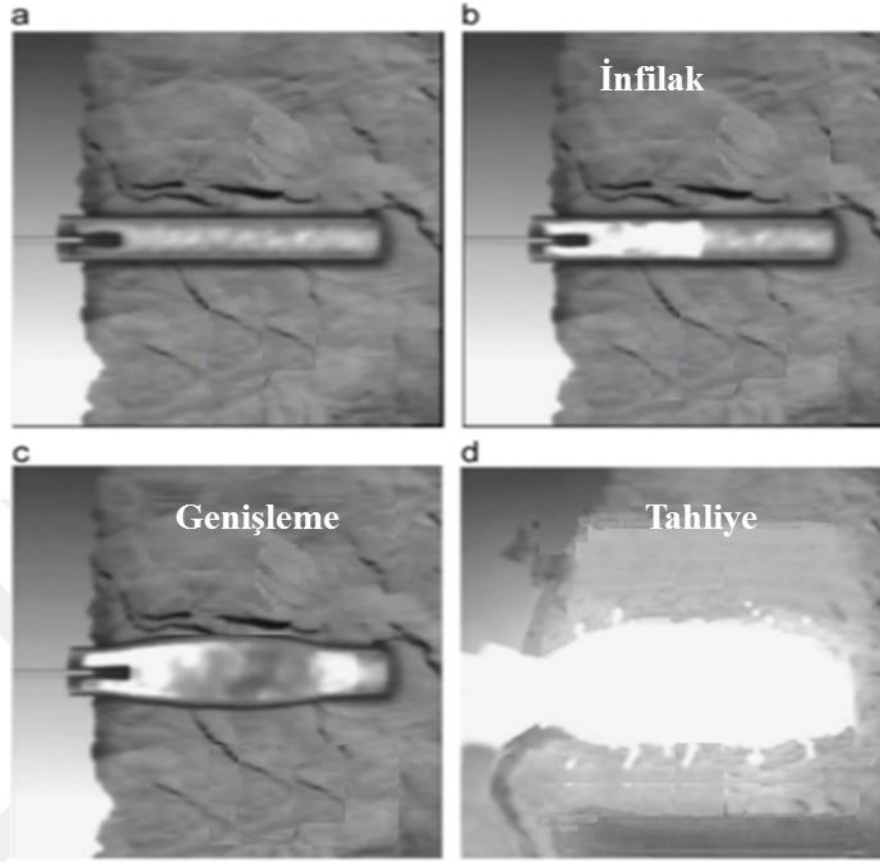
Yerüstü patlatmalarında olduğu gibi, tünel patlatmalarında infilaklı fitil ile kesme, ön kesme, son kesme gibi yöntemler uygulanmaktadır. Bu tür uygulamalar genelde yüzeyin düzgünlüğü için yapılan ve aşırı maliyeti önlemeye yönelik çalışmalardır. Bu uygulamalarda, doğru patlayıcı seçimi ve delik delmelerinde daha titiz davranılması düzgün ve az zedelenmiş yüzeyler elde edilmesini sağlayacaktır (Johansen 1990).

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Patlama Olayının Aşamaları:

Delme ve patlatma yönteminde öncelikle çalışılacak alana belirli bir tasarıma göre içine patlayıcı yerleştirmek amacıyla delikler delinir. Terminolojide açılan bu delikler imla haznesi, içerisine yerleştirilen patlayıcı madde de şarj olarak adlandırılır. İmla haznelerindeki şarjın patlaması esnasında ortaya çıkan ani yüksek gaz basıncının etkisiyle kazılacak alanda çatlaklar oluşturmak ve azami miktarda kütleyi ötelemek amaçlanmaktadır. Burada kazılması istenen bölge sınırlarının dışındaki kaya kütlelerinin veya kazı alanı yakınındaki bina ve tesislerin zarar görmemesi önemli bir husustur. Amaçlanan hedefe ulaşılması için patlama süreci iyi bir şekilde bilinmeli ve iyi bir patlatma tasarımı yapılmalıdır.

İnfilakın, çok yüksek hız ve basınç altında çok kısa bir sürede patlayıcı maddenin yanarak kendisinin yüksek katlarındaki hacimlerde gaz çıkışı sağlaması süreci olduğundan giriş bölümünde bahsedilmiştir. Aslında imla haznesi içerisindeki patlayıcı maddenin infilaka başlaması ile ortamdaki kaya kütlelerine etkisi çok karmaşık bir dinamik problemdir. Patlayıcının ateşlenmesiyle yayılma, mümkün olan kaya kütlelerinden geçiş, şok dalgası, kayaların kırılması, parçalanan malzemenin yığılması ve son olarak sismik dalgaların oluşması şeklinde ilerler. Bunları tamamı anlık denebilecek kadar kısa bir zamanda oluşur, fiziksel ve mekanik birçok karışık etkiye silsile ve refakat eder. Patlama titreşimini halen kayalar kırılmaya devam ederken simüle edebilmek çok zordur. Bu sebeple patlama olayını Şekil 2.1’de gösterilen üç ana aşamada oluştuğu varsayımı ile ele almak doğru olacaktır.



Şekil 2.1. Patlama olayının aşamaları (Lu *et al.* 2012)

2.1.1. Başlangıç aşaması (infilak)

İmla haznesindeki patlayıcı maddenin infilaka başlayarak şarj boyunca yandığı süreç olarak ele alınmıştır. Bu süreçte imla haznesinin hacminin, infilak sonrası ortaya çıkan gazlar ile dolduğu ancak genişlemeyecek kadar kısa sürdüğü varsayılmaktadır. Yani basınç ne kadar artarsa artsın hacminin sabit kaldığı ve hacim içindeki basınç artışının infilak dalgasına bağlı olarak ilerlediği kabul edilir. İmla haznesindeki basıncın yükselme için gereken zaman t_r olarak tanımlanabilir. Bu süreç;

$$t_r = \frac{L-x}{D} \quad (\text{yükselme zamanı}) \quad (2.1)$$

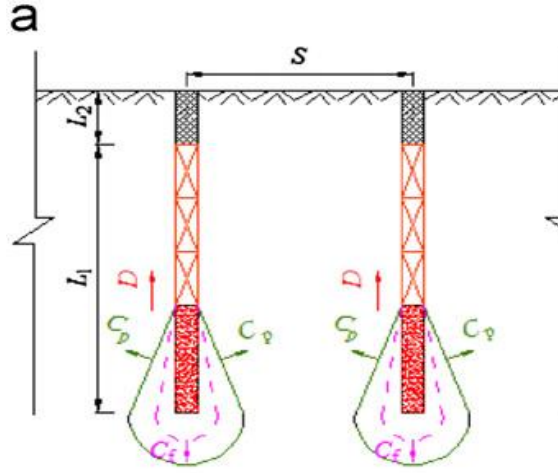
zamanı kadar olacaktır. Burada L imla haznesinin boyu, x infilak eden yerin imla haznesindeki ilk ateşleme noktasından uzaklığı, D ise infilak hızıdır. İmla haznesine silindirik olarak yerleştirilen şarj, ateşleme noktasından, tasarıma bağlı olarak delik ağzına ya da tabanına doğru patlayıcı maddeye özgü infilak hızı ile yanar (infilak eder). Normal olarak patlayıcıların infilak hızları 400 m/sn ile 9000 m/sn arasında değişiklik göstermekte olup tünel kazılarında sıklıkla kullanılan Amonyum Nitrat Fuel Oil (ANFO) için infilak hızı $D=3600-4000$ m/sn'dir (Lu *et al.* 2011).

2.1.2. Genişleme - çatlama aşaması

İkinci olarak kaya kütlesi içindeki patlama, hazne duvarlarında şok dalgaları ve yanmış gazların basıncını oluşturur, ezilmiş bölge, çatlamış bölge ve elastik sismik bölgeler hazneye olan mesafeye göre ortaya çıkar. Haznenin duvarlarındaki basınç, kayanın basınç dayanımından çok yüksektir, böylece ezilmiş bölge içerisinde kalan kaya kütlesi sıvı gibi davranır ve itici bir etkiye maruz kalarak taşınır. Çatlamış bölgede gerilme dalgası ve yüksek basınçtaki gazların yayılmasını, radyal çatlakların gelişmesini ve teğet çatlakların oluşmasına neden olur.

Böylece üç farklı ortam modeli ortaya çıkar. Ezilmiş bölgenin değerlendirilmesi plastik, çatlamış bölgenin değerlendirilmesi elasto-plastik, sismik bölgenin değerlendirilmesi ise elastik olarak dikkate alınması gerekir. Kazı sınırı dışında kalan elastik sismik bölgede gerilme dalgası genel olarak hasara sebep olmayan sismik bir dalga olarak yayılır. Simülasyon için her haznede oluşacak etkinin tek tek takip edilebilmesi için farklı ortam modellerinin tanımlanması gerektiği açıktır.

Şekil 2.2'de genişleme çatlama evresindeki basınç dalgası hareketi gösterilmekte olup, şekle göre L_1 şarj boyu, L_2 sıkılama boyu L_s (S) yan yana iki hazne arası mesafe D infilak hızı, C_p kayalardaki basınç dalgası hızı (akustik hızı), C_f infilak gazları tarafından oluşturulan çatlakların ortalama yayılma hızıdır.



Şekil 2.2. Genişleme-çatlama aşaması

Yapılan ölçümlerde C_f 'nin yaklaşık olarak $0,20 \times C_p$ olduğu görülmüştür. Bu parametrelerden yola çıkarak genişleme evresinin süresi:

$$t_c = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{4L_s^2} + L_2^2\right)}}{C_f} \quad (2.2)$$

olarak hesaplanabilir. Aslında burada ifade edilmek istenen yan yana iki imla haznesi arasındaki çatlakların birleşmesi için geçen zamandır. Diğer bir deyişle çatlakların (dolayısıyla hacim değişiminin) büyüme sınırına ulaşması için geçen süre t_c olarak ifade edilir.

2.1.2. Tahliye aşaması

İmla haznesi içerisine yerleştirilmiş patlayıcı madde infilak sonrası oluşan gazlar öncelikle içinde bulunduğu hazne çeperlerine yüksek bir basınç uygulayarak genişlemesini ve çatlaklar oluşmasını sağlar. Sonrasında ise bu çatlaklardan ve genişlemiş haznenin ağız kısmından püskürerek dışarı doğru hızlı bir akış gerçekleşir. Bu süreçte ezilmiş bölgede bulunan malzeme de dışarı taşınmış olur. Kapalı bir hazne

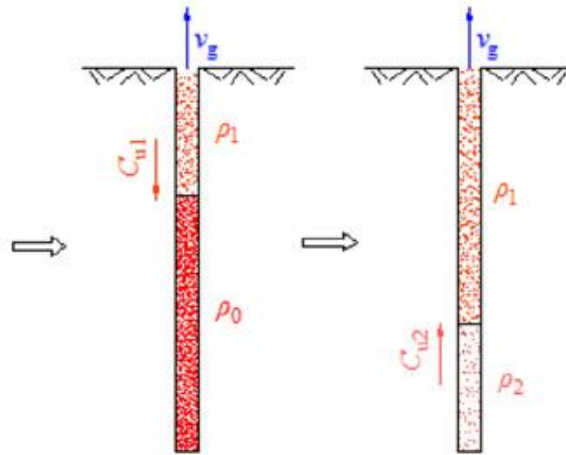
içerisinde patlama sonrasında yükselmiş olan basınçlı gazlar, haznenin ağzından boşalarak tabana doğru bir dalga (sabit kalan basınçlı hacim ile azalan basınçlı hacmin arasında bir sınır olduğu düşünülebilir) olarak ilerler. Bu dalga tabana ulaşana kadar basınç yükünü zayıflatarak ilerlemeye devam eder. Sonrasında ise tabandan yansiyarak içerideki basınçlı gazları dışarı doğru öterler. Bu yük boşaltım dalgasının hazne ağzından tabana ulaşması:

$$t_{u1} = \frac{L_1 + L_2}{C_{u1}} \quad (2.3)$$

Tabandan yansıyan yük boşaltım dalgasının ise ağza kadar ulaşarak iç basıncı atmosfer basıncına düşürmesi ise:

$$t_{u2} = \frac{L_1 + L_2}{C_{u2}} \quad (2.4)$$

sürelerinde gerçekleşir. Şekil 2.3'de yük boşaltım dalgasının ilerlemesi gösterilerek, C_{u1} yük boşaltım dalgası ilerleme hızı, C_{u2} yansıyan yük boşaltım dalgası ilerleme hızı olarak tabir edilebilir.



Şekil 2.3. Tahliye aşamasında infilak gazlarının durumu (Lu *et al.* 2012)

Burada ρ_0 boşaltım dalgasından önceki gaz yoğunluğu ρ_1 boşaltım dalgasından sonra azalan gaz yoğunluğu ρ_2 ise yansıyan boşaltım dalgasından sonraki azalan gaz yoğunluğudur. Bir yaklaşım olarak yayılım hızı C_U (yansıyan boşalma dalgasına ait olan) infilak gazlarının hızına eşit olarak kurulabilir. İnfilak gazlarının akustik hızı ise;

$$C_u = \sqrt{\frac{\partial P_b}{\partial \rho_g}} = \sqrt{\frac{\gamma P_b}{\rho_g}} \quad (2.5)$$

olarak tanımlanır. Burada P_b aşağıda açıklanacak olan patlayıcı gaz basıncı, ρ_g gaz yoğunluğu, γ ise infilak gazlarının özgül ısı oranıdır. Genellikle veriler C_u için 1000 m/sn civarında olduğunu göstermektedir (Lu *et al.* 2011)

2.2. Patlama Yükünün Tanımlanması

2.2.1. Başlangıç aşaması (infilak)

Patlama olayını yukarıda belirtilen 3 evrede incelemek istenirse, başlangıç evresinde patlayıcı maddenin infilakı tanımlanmaktadır. Burada patlayıcı madde (şarj) çok yüksek bir basınç ve hızla yanar. Chapman-Jouguet modeline göre infilak sürecinde patlayıcı şarjın oluşturduğu basınç:

$$P_D = \frac{1}{\gamma+1} \rho_0 D^2 \quad (2.6)$$

ve akustik hız:

$$C_D = \frac{\gamma}{\gamma+1} D \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilir.

Burada P_D patlama basıncı, C_D infilak gazlarına bağlı akustik hız, γ ise infilak gazının özgül ısı oranıdır. Bu süreçte sıkılama ile kapatılmış olan ağız kısmından herhangi bir gaz çıkışı olmadığı varsayılır. İmla haznesi duvarlarına, kendini çevreleyen kayanın dayanımının çok üstünde bir basınç uygulanır. Bu aşamada uygulanan basıncın hesaplanmasında imla haznesinin sabit bir hacimde kaldığı düşünülür ve şarjın durumuna ya sıkı sıkıya doldurulmuş ya da imla haznesi duvarları ile patlayıcı arasında boşluk bırakılmış şekilde yerleştirilmiş olmasına göre bağıntı 2.8 ve 2.9 a göre hesaplama yapılır.

Patlayıcı maddenin sıkı sıkıya doldurulduğu hallerde (sıkılanmış şarj) aşağıdaki bağıntı sonucunda elde edilen basınç değeri imla haznesinin duvarlarına etki eder.

$$P_0 = \frac{\rho_0 D^2}{2(\gamma+1)} \quad (2.8)$$

İmla haznesi ile patlayıcı şarj arasında kayda değer bir boşluk bırakılmışsa (sıkılanmamış şarj) basınç; yerleştirilen patlayıcının yarıçapının, imla haznesi yarıçapına oranında azalarak imla haznesi duvarlarına etki eder.

$$P_0 = \frac{\rho_0 D^2}{2(\gamma+1)} \left(\frac{a}{b}\right)^{2\gamma} \quad (2.9)$$

Hazne duvarına patlayıcının sıkı sıkıya oturtulmadığı durumlarda a patlayıcı şarjın çapı, b imla haznesi çapına oranlanarak sıkılamanın yarattığı etki daha geçerli biçimde hesaplanabilir. Burada elde edilen basınç değeri, patlayıcının infilak sürecinde imla haznesi duvarına uyguladığı basıncın tepe değeridir. Yani hazne içerisinde aynı anda bir basınç yükselişi olmaz. Bunun yerine bir dalga şeklinde infilakın gerçekleştiği noktada basınç P_0 değerine kadar yükselir.

2.2.2. Genişleme-çatlama aşaması

İkinci aşama olarak, uygulanan bu yüksek basınç altında imla haznesinin genişlemesi, çatlakların oluşması ve imla haznesini dolduran infilak gazları basıncının hacmin büyümesiyle ters orantılı olarak azalması sürecine girilir. Bu safhada da henüz gaz çıkışının olmadığı varsayılır. Dolayısıyla kapalı bir kap içerisinde yalnızca hacmin değiştiği göz önüne alınırsa haznenin her yerinde aynı basınç eğrisi ortaya çıkar. İdeal gaz denklemi infilak gazının etkilerine uyarlanarak hacmin zamana bağlı değişimi sonucunda basınç değişimi şu şekilde bulunabilir.

$$P_1(t) = \left(\frac{V_0}{V_0 + \Delta V(t)} \right)^{\gamma} P_0 \quad (2.10)$$

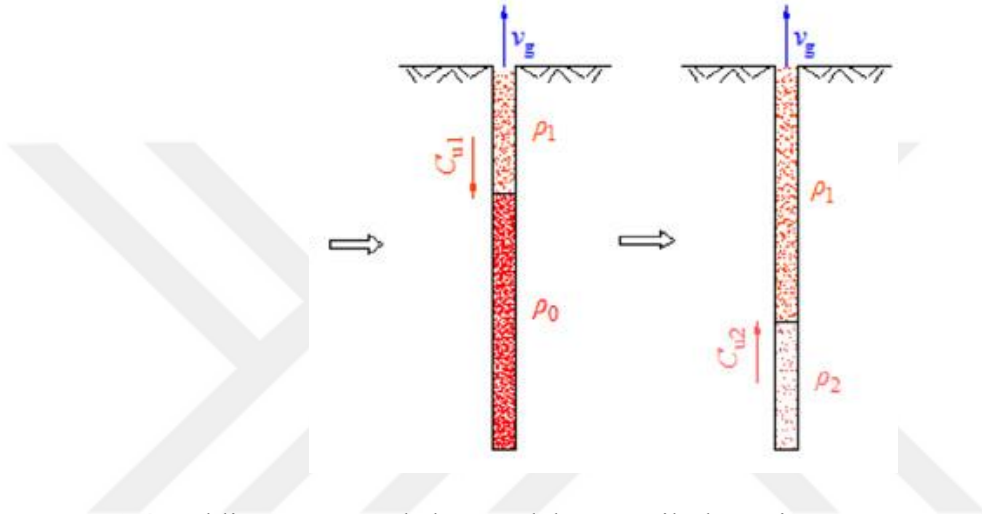
Burada V_0 başlangıçtaki hazne hacmi, $\Delta V(t)$ ise artan gaz hacmidir. $\Delta V(t)$; t_c kadar zaman içerisinde başlangıçtaki hacmin yaklaşık %15'ine ulaşır ve imla haznesindeki çatlaklardan infilak gazları dışarıya doğru hızla boşalmaya başlar. Hacim değişimine bağlı basınç düşüşü imla haznesinin kapalı bir kap gibi hareket ettiği süreçte incelenir. Cidarın delinmesi ve gazların çıkışı başladığı andan itibaren genişleme evre tamamlanmış olacaktır. Hesaplamalarda kolaylık olması açısından $\Delta V(t)$ değerinin değişimini t_c kadar zamanda üssel olarak %15 artacak şekilde oranlanarak t_a zamanına kadar artışı devam ettirilmiştir. Böylelikle sonraki aşamalarda da azalmanın kontrolü için aynı bağıntıdan faydalanılmıştır.

2.2.3. Tahliye aşaması

t_c zamanının sonuna gelindiğinde hacim genişlemesi nedeniyle çatlakların oluşması ve bu çatlakların hem yüzeye doğru hem de yan yana hazneler arasında ilerleyerek basınçlı gazların tahliye edilebileceği boşluklar oluşturduğu görülmektedir. Artık yüzeyde yüksek basınçlı gazların dışarı çıkışını engelleyecek kalınlıkta ve mukavemette bir kayaç kütlesi bulunmadığından dolayı yeni bir aşama olan püskürme ya da tahliye

aşaması başlar. Burada yüksek basınçlı gazlarla birlikte bir miktar toprak malzeme de ötelenmektedir.

Bu aşamada gazın hacmi genişlemiş olan haznenin ağzından tabanına doğru bir boşaltım dalgası Şekil 2.4’deki gibi ilerlediği kabul edilmiştir.



Şekil 2.4. Tahliye aşamasında basınç dalgasının ilerlemesi (Lu *et al.* 2012)

Yukarıdaki şekilde daha önce de değinildiği gibi toplamda üç farklı basınç bölgesinden bahsedilmiştir. ρ_0 olarak belirtilen bölüm genişleme evresi sonucunda ulaşılan basınç değeridir. ρ_1 ağızdan gaz çıkışına bağlı olarak azalan basıncın bulunduğu hacim olarak değerlendirilir. Buradaki ρ_1 basıncını hesaplariken;

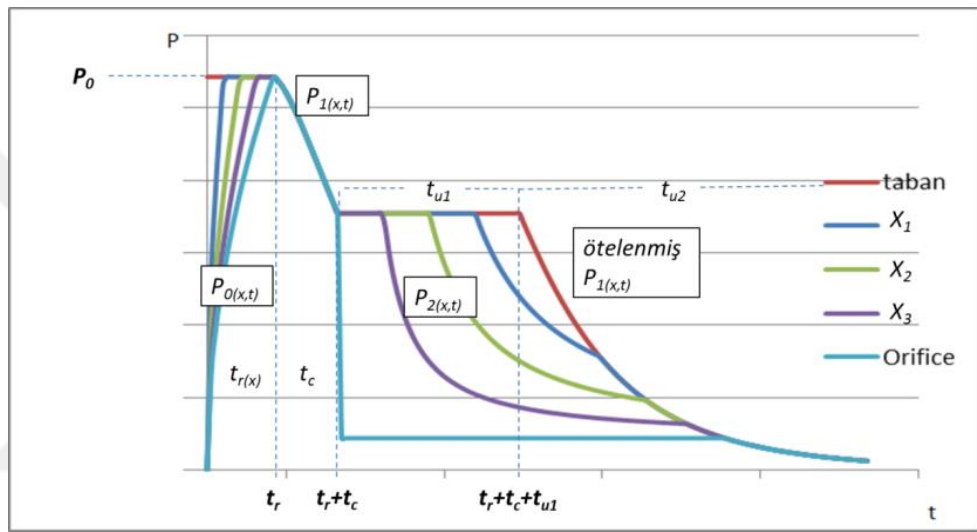
$$P_2(x, t) = \left(\frac{C}{C_1}\right)^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} P_1 \quad (2.11)$$

$$C = \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \left(\frac{x}{\Delta t} + \frac{2}{\gamma-1} C_1\right) \quad (2.12)$$

bağıntılardan yararlanılmıştır.

Bağıntıda kullanılan Δt genişleme evresinin sonundan itibaren ilerleyen zaman olarak ifade edilmiştir. $\gamma = 3$ (infilak gazı özgül ısı oranı) olarak alınmıştır.

Basınç farkının hazne tabanına kadar ilerlemesinin sonrasında ($\Delta t = x/C_1$) ise yansıyan bir boşaltım dalgası oluşur. Bu dalga ρ_2 ile ρ_1 arasındaki sınır olarak değerlendirilir ve yine daha önce de bahsedildiği gibi t_a zamanına ulaşılan kadar $P_1(t)$ eğrisi kullanılır.



Şekil 2.5. Patlama aşamalarına göre basınç–zaman grafiği

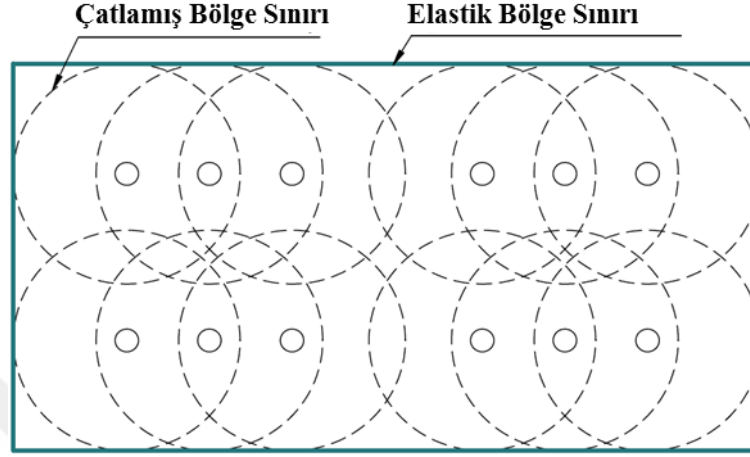
Sonuç olarak, Şekil 2.5'te gösterilmekte olan patlama yükünün tanımlanmasında kapalı bir kap gibi görülen haznede t_r zamanda infilakın gerçekleştiği x noktasının imla haznesindeki konumuna göre patlayıcının tabandan hazne ağzına doğru farklı zamanda yanmasına bağlı olarak farklı zamanlarda P_0 değerine doğru bir basınç artışı olduğu, t_c zaman aralığında haznenin mevcut sınırında herhangi bir delinme olmadan genişlemesine bağlı olarak haznenin her yerinde aynı oranda $P_1(x,t)$ eğrisine göre basıncın düştüğü, t_{u1} sürecinde hazne ağzı ve yüzeye yakın çatlaklardan gaz sızıntı olmasına bağlı genişlemenin durmasıyla basıncında sabitlendiği, sızıntının azalttığı gaz basıncının $P_2(x,t)$ değerine göre tanımlandığı ve bu sızıntıyla bağlı olarak ilerleyen yük boşaltım dalgasının tabana ulaşmasıyla yansıyan boşaltım dalgasının yine $P_1(x,t)$ eğrisinin kaldığı yerden t_{u1} kadar ötelenmesi ve P_2 eğrisiyle çakıştığı noktadan itibaren P_1 eğrisine göre basıncın düştüğü kabul edilmiştir.

2.3. Elastik Sınırın Belirlenmesi

Delme ve patlatma yöntemlerinde patlama yükü yerleştirildiği hazneyi çevreleyen kayaçların basınç dayanımı ile karşılanamayacak bir gerilme oluşturduğu için hazne çevresinde 3 bölge oluştuğundan bahsetmiştik. Hazneye en yakın bölüm ezilmiş bölge çok yüksek basınç altında kalması sebebiyle sıvılaşıma gösterip plastik bir hareket sergilemektedir. Aslında direk patlama sonucunda taşınan toprak kütlesi bu kısımdaki malzemedir. Bir dıştaki kısım olarak tabir edilebilecek olan genişmiş-çatlamış bölgesi ise yine yüksek basınç altında elasto-plastik bir davranış gösterdiği değerlendirilebilir. Buradaki kütle basınçlı gazların etkisiyle normal formunu ve mukavemetini kaybeder, çatlaklar oluşur. Mekanik kazı için uygun bir kütle haline gelir. İstenmeyen etkilere sebep olan uzak mesafe sarsıntısının ise, kazı patlatmaları sonucunda yayılan sismik dalgalarının sonucu olduğu bilinmektedir.

Bu sebeple uzak mesafelerde daha doğrusu elastik hareket gösteren bölge içerisindeki sarsıntının, plastik ve elasto-plastik hareket gösteren ortamlardaki etkilerle birlikte tespit etmek hem oldukça güç hem de gereksiz bir uğraş olacaktır. Genel olarak yapılan incelemenin bu sismik dalgaların etkisi olduğu değerlendirilirse, patlama titreşimini modellemek için yapılan devamlı mekanik hareketin uyum ve birleştirme sürecinde ezilmiş, çatlamış bölgelerin tamamının sarsıntı kaynağı olduğu ele alınarak patlama yükünün gerekli azaltma faktörü de göz önüne alınarak elastik davranışın görüldüğü sınır olan çatlamış bölge sınırından itibaren uygulanması daha uygun bir yöntem olmuştur.

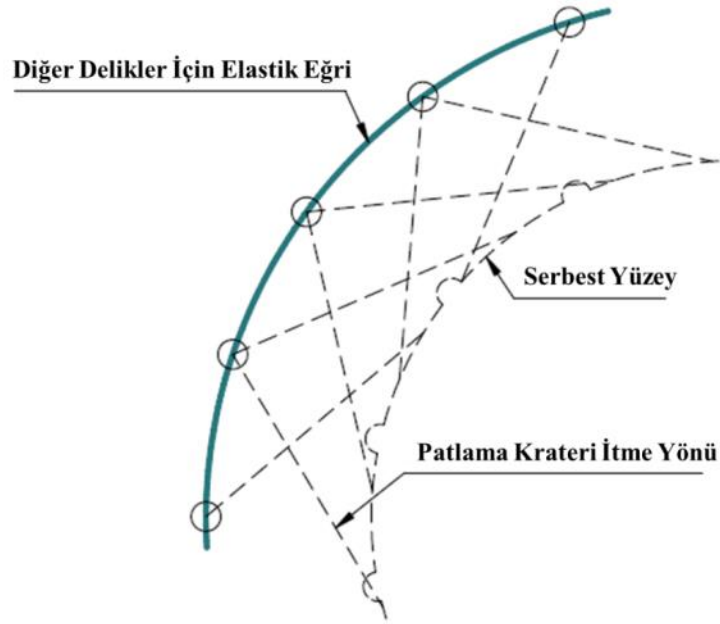
2.3.1. Elastik sınırın hesaplanması



Şekil 2.6. Kesme delikleri için elastik sınır (Lu *et al.* 2011)

Kesme delikleri, Şekil 2.6 ayna üzerinde malzemenin taşınabileceği serbest bir yüzey yokken bu boşluğu oluşturmak için tasarlanmalarından dolayı tüm eksenlerde sıkıştırılmış olan tek deliklerdir. Çok hazneli delme ve patlatma yöntemleri uygulandığında elastik sınır kesme bölgesi için çatlamış bölge sınırlarına teğet olarak geçen bir hat olarak alınabilir. Buradaki amaç daha önce de belirtildiği gibi davranışı tam olarak tanımlanması çok zor olan 3 ortam modeli yerine elastik tek bir ortam modeli tanımlayarak sismik elastik davranış gösteren eğriyi tespit etmek ve patlama yükünü gerekli azalımı hesaplayarak bu eğriye uygulamaktır.

Kesme delikleri dışındaki deliklerde kendinden önceki patlamış olan şarjın açtığı serbest yüzeye doğru bir yönelim olması sebebiyle aynı elastik sınırın uygulanması doğru olmaz. Yerleştirilen şarjın patlatılması neticesinde basınç büyük ölçüde önceden örselenmiş olan serbest yüzeye doğru aktarılacağı için elastik sınırı Şekil 2.7’de gösterildiği gibi şarj delikleri hizasından geçecek şekilde hesaplamak daha doğru olacaktır.



Şekil 2.7. Tarama ve sınır delikleri için elastik sınır (Lu *et al.* 2011)

Şarjın etrafındaki kaya kütesinin sıkıştırılmaz, lineer elastik olduğu ve patlayıcının tüm enerjisinin kinetik enerjiye dönüştüğü varsayılmıştır. Bu durumda hidro dinamik teoriye göre radyal hızı:

$$V = \sqrt{\frac{\rho \cdot q}{8 \cdot \rho_r \cdot v_s}} \cdot \frac{\bar{L}}{\sqrt{\bar{r}^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2}} \quad (2.13)$$

$$v_s = \ln \frac{\bar{L} + \sqrt{1 + L^2}}{-\bar{L} + \sqrt{1 + L^2}} \quad (2.14)$$

$$\bar{L} = \frac{L_1}{2r_0}; \quad (2.15)$$

$$\bar{r} = \frac{r}{2r_0} \quad (2.16)$$

olarak tanımlanır. Aslında çatlamış bölge sınırı, kaya tipine göre kritik hız ile radyal hızın ilişkilendirilmesi sonucunda elde edilebilmektedir.

Burada ρ ; toprağa göre patlayıcı yoğunluğu, q ; patlayıcı ısısı, r_0 ; imla haznesi yarıçapı, r ; imla haznesi merkezine olan uzaklık, L_1 ; patlayıcı şarj boyudur.

Zanikayev'in (1974) çalışmalarına göre yarı başlatmalı kaya ortamında (tek patlama noktası) ve patlama yükünün bilinmesi durumunda, r_1 ; ezilmiş bölge, r_2 ; çatlamış bölge olarak tanımlanırsa:

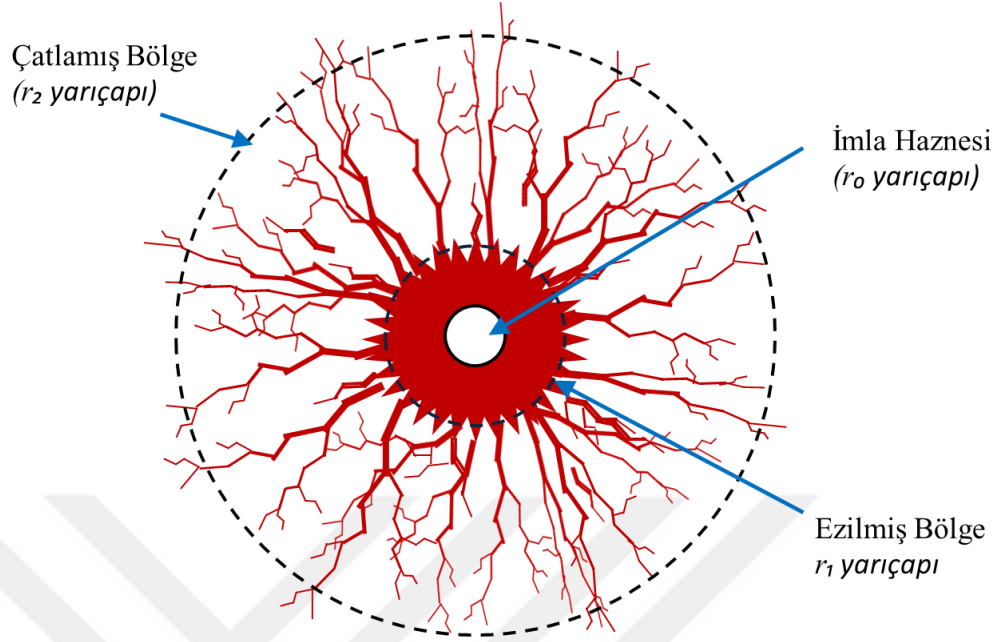
$$r_1 = \left(\frac{\rho r \cdot C_p^2}{5\sigma_c} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{P}{\sigma_*} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot r_0 \quad (2.17)$$

$$r_2 = \left[\frac{\mu \cdot P}{(1-\mu)\sigma_t} \right]^{\frac{1}{\alpha}} \cdot r_0 \quad (2.18)$$

olur.

Burada μ ; ortam kaya kütleline ait Poisson oranı, C_p ; P dalgasının hızı, σ_c, σ_t ; serbest (sınırlanmamış) çekme ve basınç gerilmeleri, σ_* ; kayanın çok eksenli gerilme altındaki basınç dayanımı, P ; radyal patlama yükü, α ; gerilme dalgasının azalma katsayısıdır.

Patlama sonrasında oluşan ezilmiş ve çatlamış bölge gösterimi Şekil 2.8'de olduğu gibidir.



Şekil 2.8. Patlatma sonucunda oluşan ezilmiş ve çatlamış bölgeler (Esen vd 2003)

Araştırmalar ve tecrübeler, ezilmiş bölge yarıçapının, imla hazne yarıçapının 3–5 katı kadar olduğunu; çatlamış bölge yarıçapının ise imla haznesinin yarıçapının 10–15 katı büyüklüğünde olduğunu göstermiştir.

2.3.2. Elastik sınıra etki eden yükün tespit edilmesi

Simülasyonda kullanılmak üzere patlama yükünün nasıl tespit edildiğinden bahsedilmiştir. Bahsi geçen patlama yükü patlayıcı maddenin hazne duvarına uyguladığı yükü tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır. Hazne duvarına uygulanan yük elastik sınıra kadar kayaçların plastik deformasyon göstermesine, dolayısıyla bir kısım gerilmenin bu deformasyon esnasında sönmelenmesine sebep olmaktadır. Burada zemin faktörünün davranışı çok önemli bir faktördür. Patlayıcının infilakıyla ortaya çıkan yüksek basınç patlatılan malzemenin sıkılması, sertliği patlama yükünü sıkıştırıp hapsedebilmesi gibi durumlara bakılarak sismik dalgayı ileten ana zemin malzemesine geçişini büyük oranda değiştirir. Daha yumuşak bir kayaçta oluşan basınç daha büyük bir krater açarak, fazla miktarda bir kütle öteleyeceği için enerjisinin daha fazla kısmını

kaybetmiş olacaktır. Sismik dalgaların daha kolay hesaplanabilmesi maksadıyla plastik deformasyon olmayan bölge sınırına patlama yükünün belli bir oranda azaltım yapılarak uygulanması en doğru yaklaşım olacaktır.

Patlama yükünü $P(x,t)$ olarak tanımladığımızda, imla haznesinin herhangi bir kısmında ya da zamanında şok dalgası için azalma, aşağıdaki matematiksel bağıntı ile açıklanır:

$$P_a(x, t) = P(x, t) \left(\frac{r_0}{r} \right)^\alpha \quad (2.19)$$

$$\text{Şok dalgası için } \alpha = 2 + \mu / (1 - \mu) \quad (2.20)$$

$$\text{Gerilme dalgası için } \alpha = 2 - \mu / (1 - \mu) \quad (2.21)$$

Burada;

$P_a(x,t)$ mesafeye göre azalmış patlama kaynaklı basınç yükü, r patlama merkezine uzaklık r_0 imla haznesi yarıçapı, α azalım katsayısı, μ Poisson oranıdır.

Tespit edilmek istenen mesafe (elastik bölge sınırı) çatlamış bölgenin sonu olduğu için ezilmiş bölgede şok dalgası, çatlamış bölgede ise gerilme dalgasının aktif olduğu değerlendirilebilir. Böylece elde edilen azaltım katsayılarını çok hazneli, kesme delikleri için kullanılan bağıntıda yerine konulursa Eşdeğer Elastik Sınırın patlama yükü:

$$P_e(x, t) = k \cdot P(x, t) \cdot \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^{2 + \mu / (1 - \mu)} \cdot \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^{2 - \mu / (1 - \mu)} \quad (2.22)$$

(k : çok hazneli patlatmalarda kullanılan darbe faktörüdür. Delik tasarımı ve mesafelerine göre belirlenmektedir. Yapılan simülasyonlarda normal şarj edilmiş kesme delikleri için $k=10$ olarak alınmıştır.)

Çoklu patlamada kullanılan patlama yükü durdurma, tampon ya da sınır delikleri için oyuğun merkezi ile aksları birleştirmek için kullanılır. St. Venant prensibine göre hazne duvarları ile uzak alanlardaki tepkilerin birbirine uyumlu olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak elastik sınıra uygulanan yük şu şekilde tanımlanır (Lu *et al.* 2011).

$$P_e(x, t) = \frac{2r_o}{L_s} P(x, t) \quad (2.23)$$

2.4. Ölçekli Mesafe Yöntemi

Patlatma simülasyonları dışındaki kontrol yöntemlerinin sıklıkla kullanılmakta olduğu ve bu konuda en güvenilir yöntemlerin maksimum parçacık hızına dayananlar olduğundan bahsedilmiştir. Ölçekli Mesafe, uzaklık ve sismik dalgaların temelini etkileyen veya hava şoklarındaki enerjiyi yaratan patlayıcı madde miktarı kullanılarak ortaya konulmuş bir kavram olup en çok kullanılan versiyonu aşağıdaki şekilde ortaya konmuştur.

$$SD = R / W^{0.5} \quad (2.25)$$

Burada: SD : Ölçekli Mesafe, R : uzaklık (m), W : gecikme başına düşen en fazla şarj miktarıdır (kg).

Patlayıcı madde miktarı kaya kütlelerinde meydana gelen titreşimin kaynağı olan enerjiyi ortaya çıkaran ana unsurdur. Patlama kaynaklı dalgalar ilerledikçe daha fazla kaya kütlelerini etkilerken sarsıntı kaynağı enerji de azalarak ilerler. Patlatmadan kaynaklanan yer sarsıntılarının önceden tahminine yönelik birçok kişi ve kuruluş çeşitli araştırmalar

yapmış ve maksimum parçacık hızının Ölçekli Mesafeye bağlı tahmini literatürün çoğunda kabul görmüştür (Arpaz 2000). Maksimum parçacık hızının tahminine yönelik yapılan bazı çalışmaların sonuçları (Kumar *et al.* 2016) aşağıda verilmektedir.

$$1. \text{ Duvall and Petkof (1959) } PPV = K \left(\frac{R}{\sqrt{W}} \right)^{-\beta} \quad (2.26)$$

$$2. \text{ Langefors and Kihlstrom (1963) } PPV = K \left(\frac{W}{\sqrt[3]{R^2}} \right)^{\frac{\beta}{2}} \quad (2.27)$$

$$3. \text{ Ambraseys and Hendron (1968) } PPV = K \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-\beta} \quad (2.28)$$

$$4. \text{ Nicholls } et \text{ al. (1971) } PPV = 362W^{-1,63} \quad (2.29)$$

$$5. \text{ IS 6922 (1973) } PPV = K \left(\frac{\sqrt[3]{W^2}}{R} \right)^{1,25} \quad (2.30)$$

$$6. \text{ Siskind } et \text{ al. (1980) } PPV = 0,828W^{-1,32} \quad (2.31)$$

$$7. \text{ Ghosh and Daemen (1983) } PPV = K \left(\frac{R}{\sqrt{W}} \right)^{\beta} e^{-\alpha R} \quad (2.31)$$

$$8. \text{ Ghosh and Daemen (1983) } PPV = K \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right)^{\beta} e^{-\alpha R} \quad (2.32)$$

$$9. \text{ Pal Roy (1991) } PPV = n + K \left(\frac{R}{\sqrt{W}} \right)^{-1} \quad (2.33)$$

$$10. \text{ Pal Roy (1991) } PPV = n + K \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1} \quad (2.34)$$

$$11. \text{ CMRI (1993) } PPV = n + K \left(\frac{R}{\sqrt{W}} \right)^{-1} \quad (2.35)$$

$$12. \text{ Kahrman (2002) } PPV = n + K \left(\frac{R}{\sqrt{W}} \right)^{-1} \quad (2.36)$$

$$13. \text{ Kahrman (2004) } PPV = 0,34W^{-1,79} \quad (2.37)$$

$$14. \text{ Kahrman } et \text{ al. (2006) } PPV = 0,561W^{-1,432} \quad (2.38)$$

$$15. \text{ Rai and Singh (2004) } PPV = kR^{-\beta} W_{max} e^{\alpha} \quad (2.39)$$

$$16. \text{ Nicholson (2005) } PPV = 0,438W^{-1,52\alpha} \quad (2.40)$$

$$17. \text{ Rai } et \text{ al. (2005) } W_{max} = k(PPV x W^2)^{\beta} \quad (2.41)$$

$$18. \text{ Ozer (2008) (sandstone) } PPV = 0,257W^{-1,03} \quad (2.42)$$

$$19. \text{ Ozer (2008) (shale) } PPV = 6,31W^{-1,9} \quad (2.43)$$

$$20. \text{ Ozer (2008) (limestone) } PPV = 3,02W^{-1,69} \quad (2.44)$$

$$21. \text{ Ak et al. (2009) } PPV = 1,367W^{-1,59} \quad (2.45)$$

$$22. \text{ Badal (2010) } PPV = 0,29W^{-1,296} \quad (2.46)$$

$$23. \text{ Mesec et al. (2010) } PPV = 0,508W^{-1,37} \quad (2.47)$$

$$24. \text{ Kumar et al. } PPV = \frac{f_c^{0,642}W^{-1,463}}{\gamma} \quad (2.48)$$

Burada;

PPV : Mak. parçacık hızı (m/sn)

R : Patlatma noktasından uzaklık (m)

W : Gecikme başına maksimum patlayıcı madde miktarı (kg)

K, β, a, n : Saha sabitleri

$e^{-\alpha R}$: İnelastik Seyreltme Faktörü

$e^{-\alpha(R/W)}$: İnelastik Sönme Faktörü

Yukarıda verilen çok sayıda farklı bağıntılar birbirinden farklı zeminlerde farklı yerlerde alınan ölçümler sonucunda elde edilen eşitliklerdir. Bu kadar fazla sayıda yaklaşımın olması saha sabitlerinin hesaplamalarda çok önemli olduğunu göstermektedir. Saha sabitleri, K ve β sahada aletsel olarak ölçülerek elde edilen çok sayıda maksimum parçacık hızı (PPV) ve Ölçekli Mesafe (D_s) değerleri (önerilen en az 30 data noktası, Kahrıman vd. 2000) üzerinde 26 numaralı denklemde verilen bağıntıya uygun olarak yapılacak regresyon analizinden elde edilebilir. Parçacık hızı tahmin denkleminin güvenilirliğinin sağlam olması için kararlılık katsayısı (R^2) değerinin 0,7'den büyük olması gereklidir (Erçikdi 2004). Herhangi bir saha için K sabiti, atım noktasında patlatılan malzeme sonucu zemine yayılan sismik enerjiyle orantılıdır ve β sabiti bu enerjinin kaynaktan uzaklaştıkça azalmasını belirler. K sabiti dolayısıyla PPV aşağıdaki faktörlere bağlı olarak azalım gösterir (Kazaz 2013).

Enerji açığa çıkarken etraftaki sıkıştırma etkisinin az olması (sıkıştıran/patlayan kaya)

- Kaya elastik modülünün azalması
- Enerji yayılım (patlatma) kaynaklarının uzaysal dağılımının artması
- Enerjinin açığa çıkma süresinin artması veya atımların gecikmeli olarak yapılması
- Enerji kaynaklarının etkileşiminin azalması

PPV, bu faktörlerin etkisi ters çevrildiğinde artar. Mesafe ve patlayıcı miktarından sonra parçacık hızını etkileyen en önemli faktör patlatma deliğinde patlama enerjisinin sıkıştırılmasıdır. Patlamalarda enerjinin hapsedilme etkisi taşınan kaya kütlesi (derinlik) ve kayanın katılığı arttıkça artar. Oriard (1942) β sabitinin yaklaşık olarak 1,6 ve K sabitinin 26-960 arasında değişen değerler alabileceğini önermiştir. K sabiti (kayaktan yayılan enerji miktarı) atımların hapsedilme etkisi ve/veya kayaların katılığı arttıkça (elastik Young modülü) artar. Çok iyi derecede hapsedilmiş patlamalarda K değerinin en üst limit olarak 2000 alınabileceği önerilmiştir. Başka kaynaklarda (New, 1996) K ve n sabitlerinin sırasıyla 700-2000 ve 1.5-2 değerleri arasında değişebileceği belirtilmiştir.

K ve n sabitlerini belirlemek için ölçülmüş sahaya mahsus veri olmadığında, K değeri kayanın fiziksel özellikleri ve patlamanın hapsedilme derecesi temel alınarak tahmin edilebilir. Bu tip durumlarda K faktörü 1140 alınarak değişik mesafelerdeki maksimum parçacık hızı hesaplanabilir. Bu şekilde seçilecek olan büyük K değeriyle, tahmin edilen titreşim seviyesi gerçekte ölçülecek değerlerden daha yüksek olacaktır. Benzer durumda saha üs sabiti n için değişik kayalarda önerilen değerler aşağıdaki gibidir (Kazaz 2013).

- Riyodasit / Rhyolite: 2.2-2.5
- Granit: 2.1-2.4
- Kireçtaşı: 2.1
- Ordovisiyen çökelleri: 2.8
- Kömür madeni üst yapısı: 1.5 – 1.8
- Bazalt (kil zemin): 1.5 – 1.6
- Bazalt (masif): 1.9-3.0

Saha üs sabitinin/jeolojik sabitin (n) büyük değerler alması yer sarsıntısının şiddetinin (PPV) daha çabuk azalım göstermesine neden olur. Çoğu araştırmacı; tipik patlatmaların, geometrik ve jeolojik şartlardaki değişimler nedeniyle, en iyi yer sarsıntısı tahmin şeklinin, gerçek atımların gözlemlenmesi sonucu elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

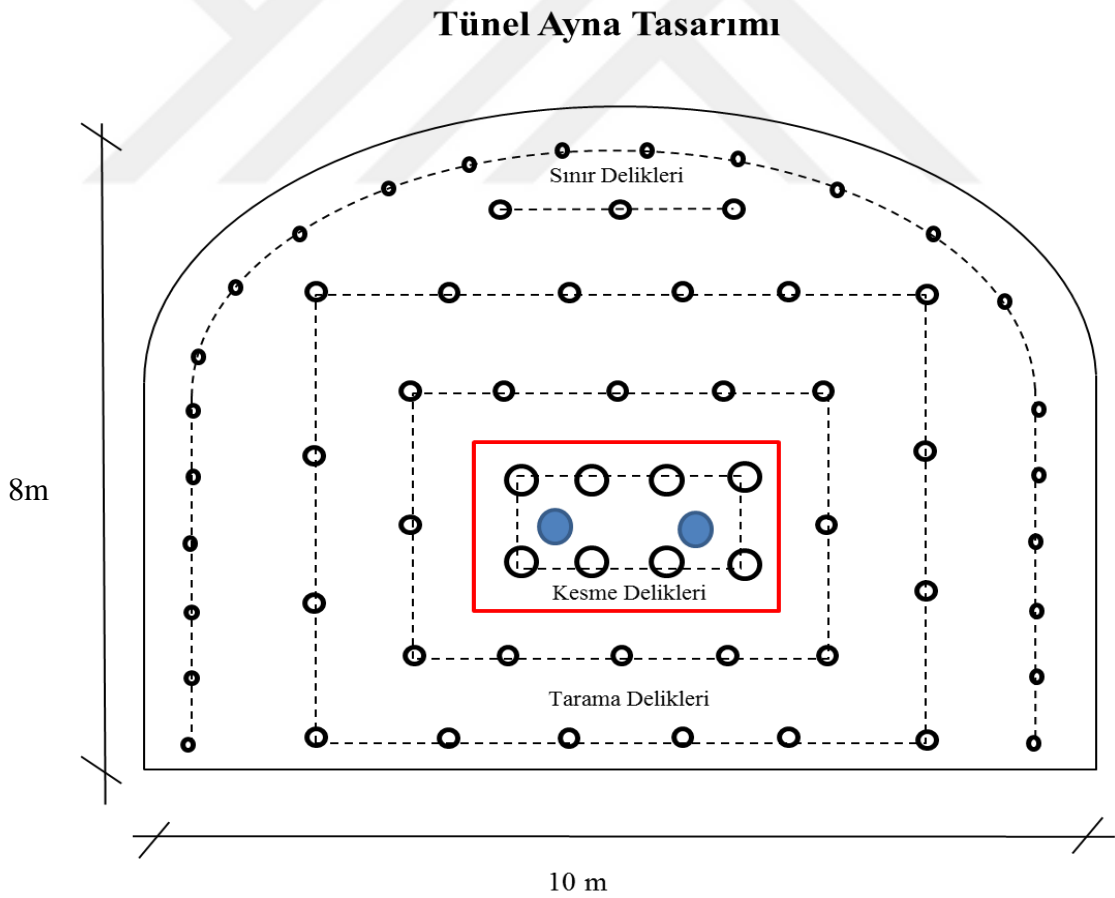


3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

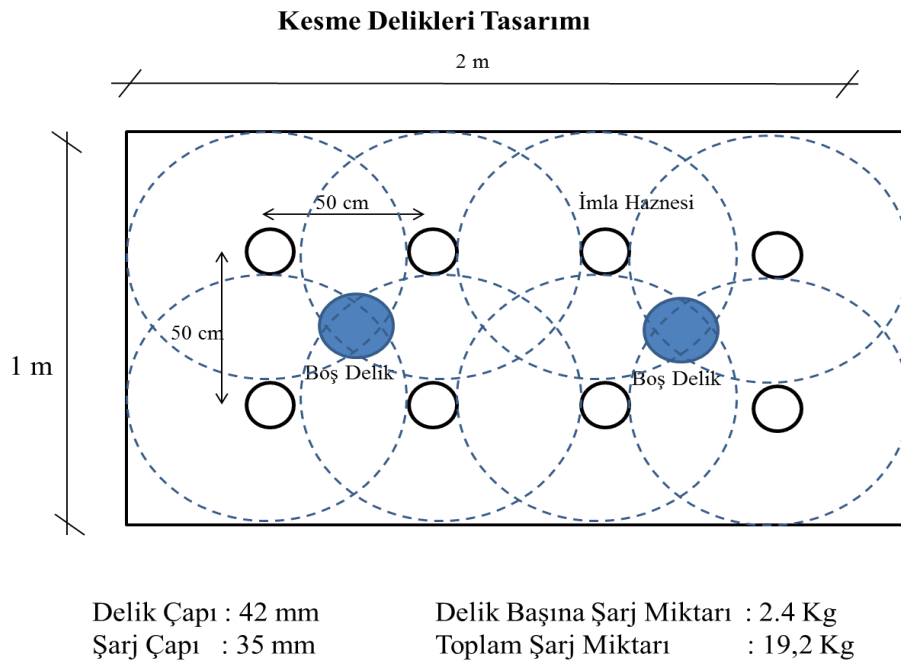
3.1.1. Patlama yükünün tespiti

Bu çalışmada öncelikle Eşdeğer Elastik Sınır Yöntemi kullanılarak patlama yükünün tespiti yapılmıştır. Bu arada en yoğun patlayıcının aynı anda patlatıldığı kesme bölgesinin elastik sınırı tespit edilerek bütün patlama yükü hesapları bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir.



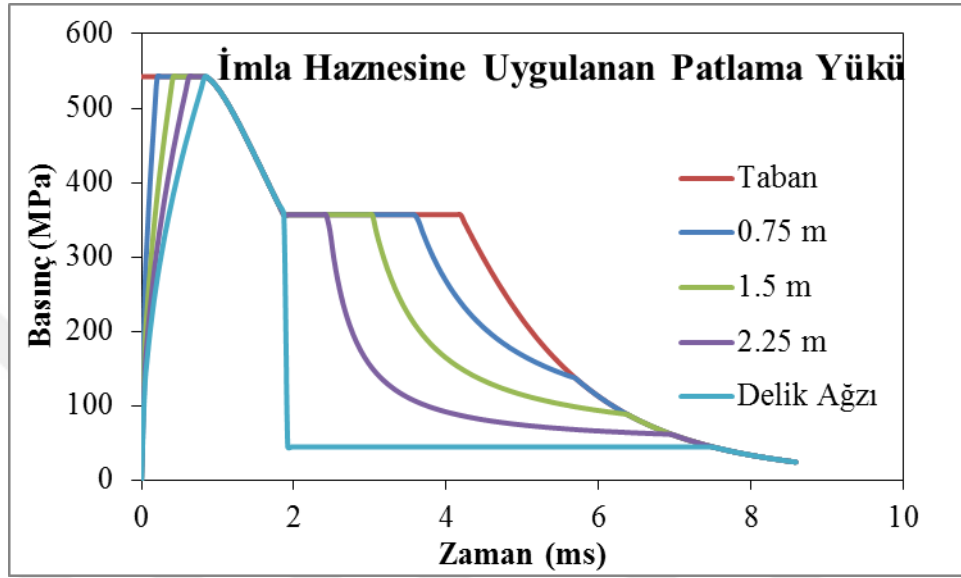
Şekil 3.1. Paralel delik yöntemine göre örnek tünel ayna tasarımı

Ayna tasarımı paralel delik yöntemine göre hazırlanmıştır. Şekil 3.1’de gösterilen mavi renkli delikler daha önce de bahsedildiği gibi şarj edilmeyen yalnızca patlama anında kaya kütleinin serbest yüzeye doğru ötelenerek istenen verimi elde edebilmek maksadıyla boş bırakılmıştır. Tasarımda gösterildiği şekilde uygulamada emniyetli patlatmanın sağlanabilmesi tüm patlayıcılar tek seferde gecikmeli fünyelerle ateşlenmektedir. Kesik çizgilerle birleştirilmiş olan delikler aynı anda patlayan deliklerdir. Kesme deliklerinden dışa doğru gidildikçe en az 50 ms gecikmeli olarak patlatma yapılmakta dolayısıyla tek seferde patlayan maksimum patlayıcı miktarı sınırlandırılmış olmaktadır. Patlayıcı madde miktarının simülasyon üzerindeki etkisini görebilmek için iki adet kesme bölgesi tasarımı yapılmıştır. Her iki tasarımda da endüstriyel maksatla en çok kullanılan patlayıcı tipi olan ANFO kullanılmıştır (Lu *et al.* 2011). ANFO için kabul edilen yoğunluk $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$, infilak hızı $D=3600 \text{ m/sn}$ olarak alınmıştır. Birinci tasarımda delik çapları $b=42 \text{ mm}$, şarj için kullanılan patlayıcı madde çapı $a=35 \text{ mm}$, delik boyu $L=3 \text{ m}$, şarj boyu $L_1=2,5 \text{ m}$, sıkılama boyu $L_2=0,5 \text{ m}$, delikler arası mesafe $L_5=0,5 \text{ m}$ olarak alınmıştır. İnfilak delik tabanından hazne ağzına doğru başlatılmıştır. Şekil 3.2’de verilen örnek patlatma tasarımı normal şarj edilmiş kesme bölgesi olarak kabul edilmiştir.



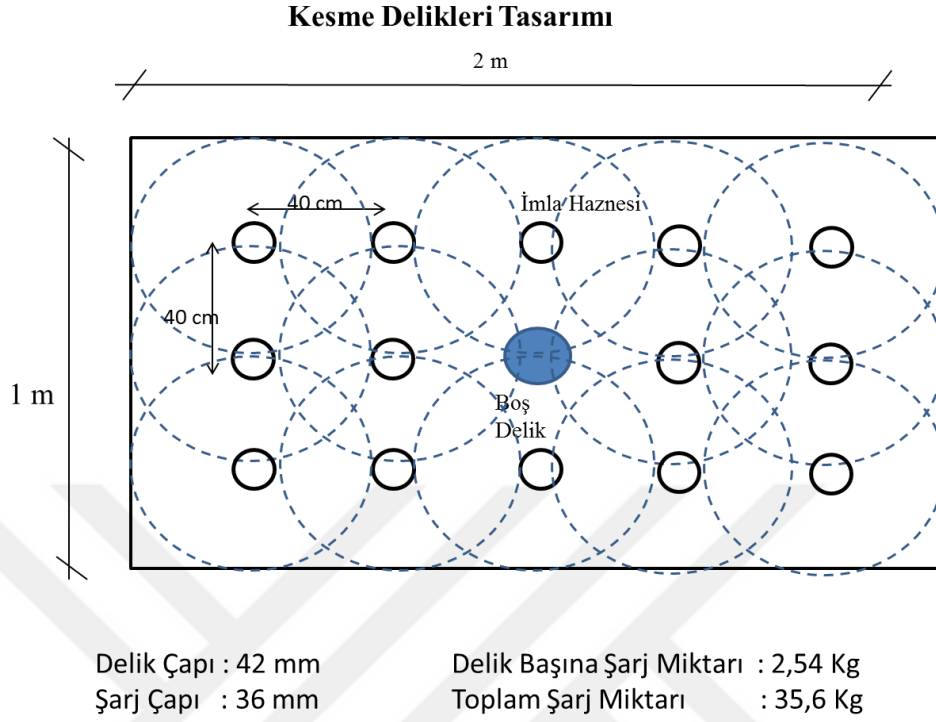
Şekil 3.2. Örnek kesme delik tasarımı (normal şarj)

Yukarıdaki tasarıma uygun olarak yapılan patlama yükü hesabı Şekil 3.3'deki grafikte sunulmuştur. Burada hesaplanan değerler patlayıcı maddenin imla haznesi duvarına yaptığı basınçtır.



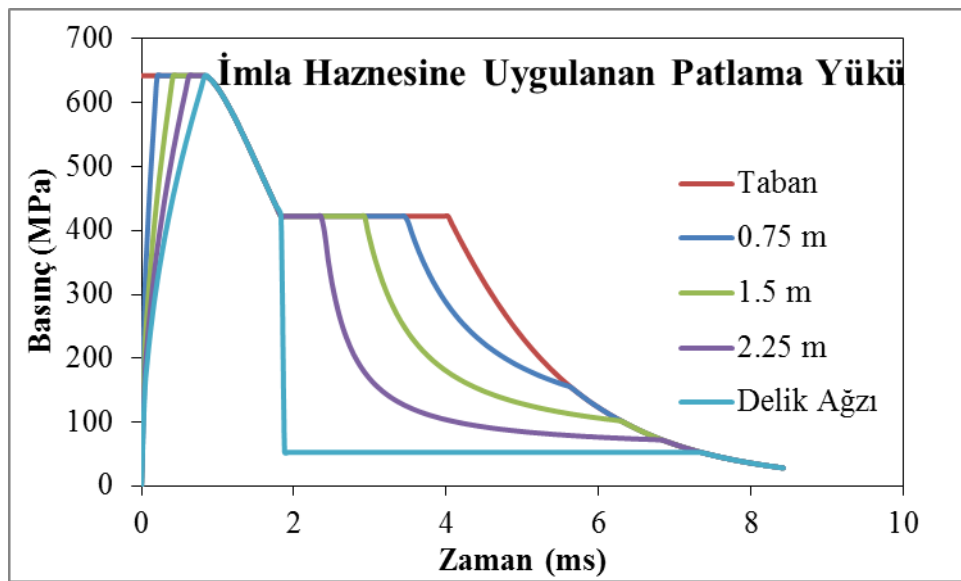
Şekil 3.3. Normal şarjlı patlatmada imla hazne duvarına uygulanan basınç

Patlayıcı madde miktarındaki değişimin tespiti için yapılan ikinci kesme bölgesi tasarımında delik çapları $b=40$ mm, şarj için kullanılan patlayıcı madde çapı $a=35$ mm, delik boyu $L=3$ m, şarj boyu $L_1=2,5$ m, sıkılama boyu $L_2=0,5$ m, delikler arası mesafe $L_3=0,4$ m olarak alınmıştır. Bu durumda mevcut şarj paketlerinin çaplarında değiştirilme yapılmadığı bunun yerine Şekil 3.4'deki gibi delikler arasındaki mesafenin kısaltılarak daha fazla miktarda patlayıcının aynı alana sığdırılması sağlanmıştır.



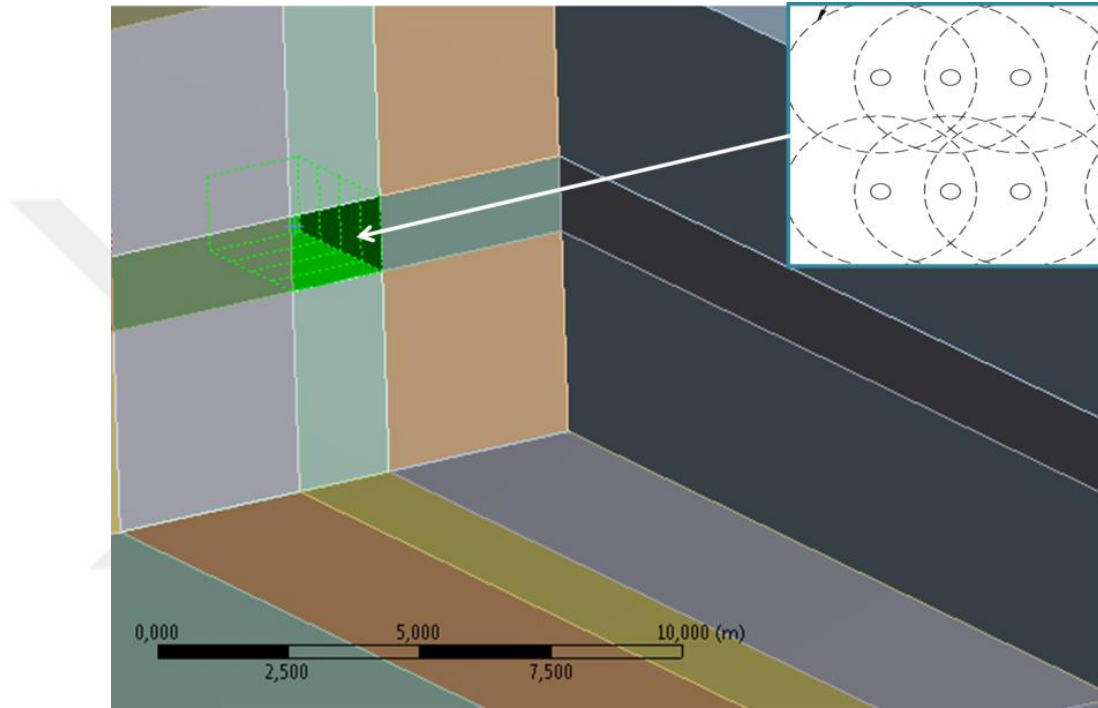
Şekil 3.4. Örnek kesme delik tasarımı (fazla şarjlı)

İkinci delik tasarımına göre imla haznesi duvarlarında oluşan basınç zaman grafiği Şekil 3.5'deki grafikte sunulmuştur.



Şekil 3.5. Fazla şarjlı patlatmada imla hazne duvarına uygulanan basınç

Ancak patlama yükünün uygulamasında kolaylık sağlayacak olan elastik sınır yönteminin kullanılması büyük bir avantaj sağlayacaktır. Burada tünel içerisindeki kesme bölgesi Şekil 3.6'da gösterildiği gibi esas alınarak ona ait elastik sınırı belirlenmiştir.

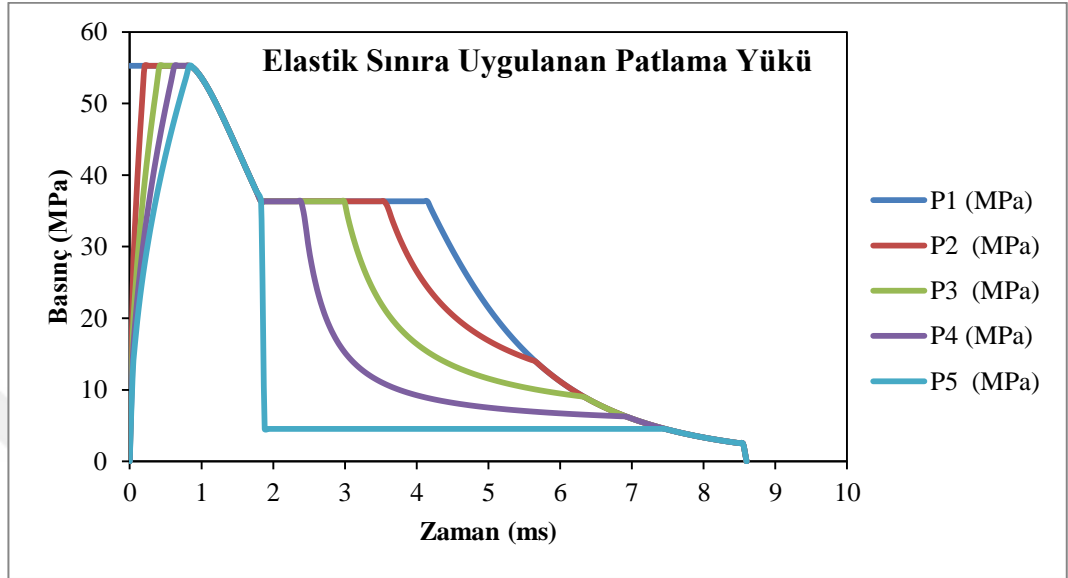


Şekil 3.6. Model üzerinde Eşdeğer Elastik Sınır yükün uygulanması

Patlama yükü, taban ve 4 eşit parçaya bölünen hazne duvarları olmak üzere toplamda 5 bölüme göre hesaplanarak t zamanlarına göre uygulama yapılmıştır. $P(x,t)$ basınç eğrisinin elastik sınır yöntemi için gerekli oranda azalım yapılması 22 numaralı denklemde verildiği üzere r_0 , r_1 ve r_2 boyutları ile Poisson oranlarına bağlıdır. Diğer yandan Bu durumda zemin tipi elastik sınır yüzeyine uygulanacak olan basıncı büyük ölçüde değiştirmektedir. Araştırmalar ve tecrübeler, ezilmiş bölgenin $r_1=3-5 r_0$ ve çatlamış bölgenin $r_2=10-15 r_0$ olduğunu göstermiştir (Lu 2011).

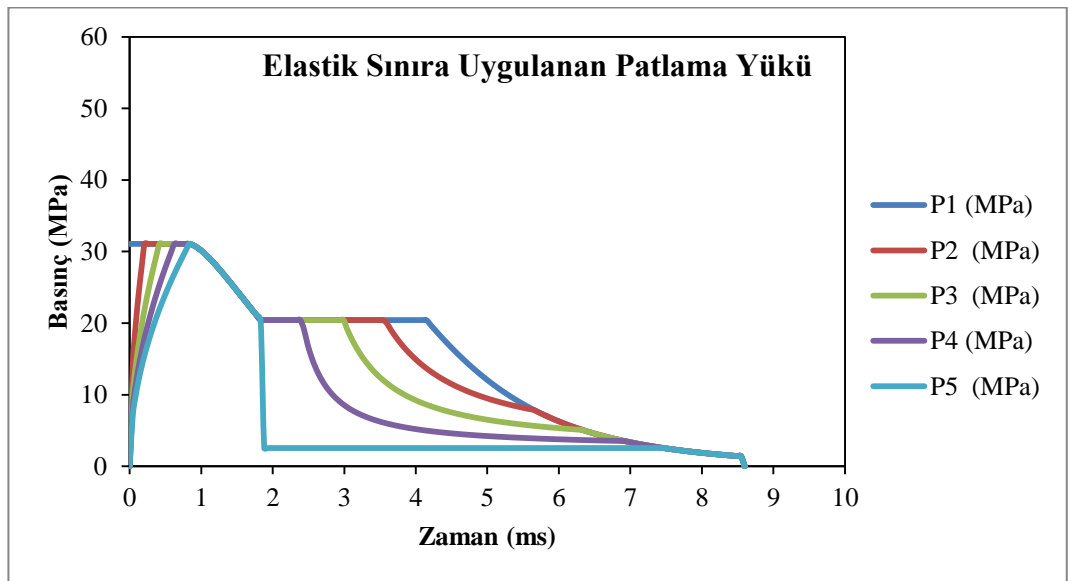
Bu durumlar göz önüne alındığında üç farklı zemin tipi için elastik sınıra uygulanan basınç durumu Şekil 3.7, 3.8 ve 3.9'daki grafiklerde verilmiştir.

Sert Zemin ($E=60$ GPa, $\mu=0.15$)



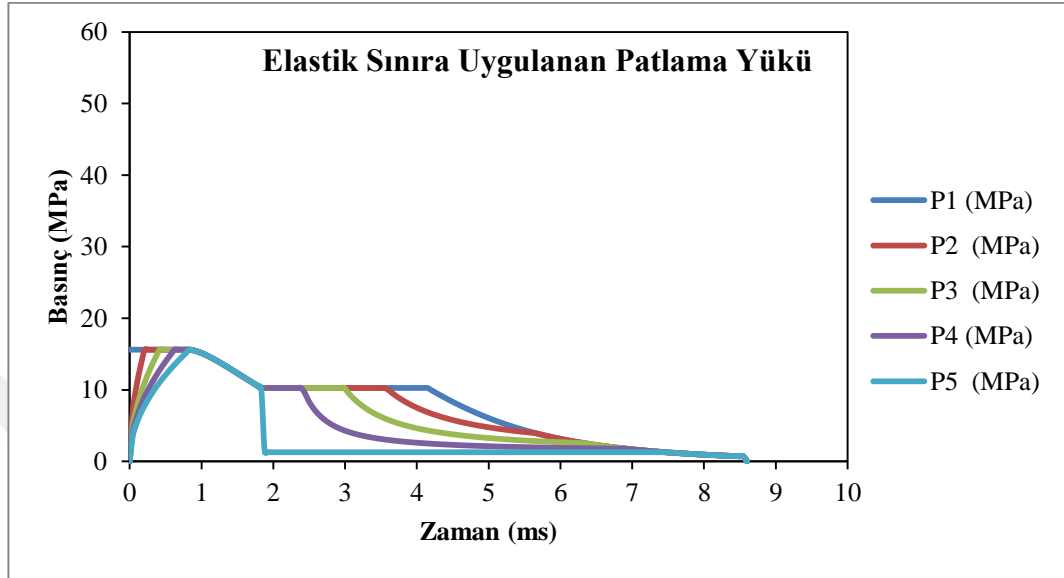
Şekil 3.7. Sert malzemeli zemin tipine göre Eşdeğer Elastik Sınır yükü

Orta Zemin ($E=35$ GPa, $\mu=0.2$):



Şekil 3.8. Orta sert malzemeli zemin tipine göre Eşdeğer Elastik Sınır yükü

Yumuşak Zemin ($E=15\text{GPa}$; $\mu=0.25$)



Şekil 3.9. Yumuşak malzemeli zemin tipine göre Eşdeğer Elastik Sınır yükü

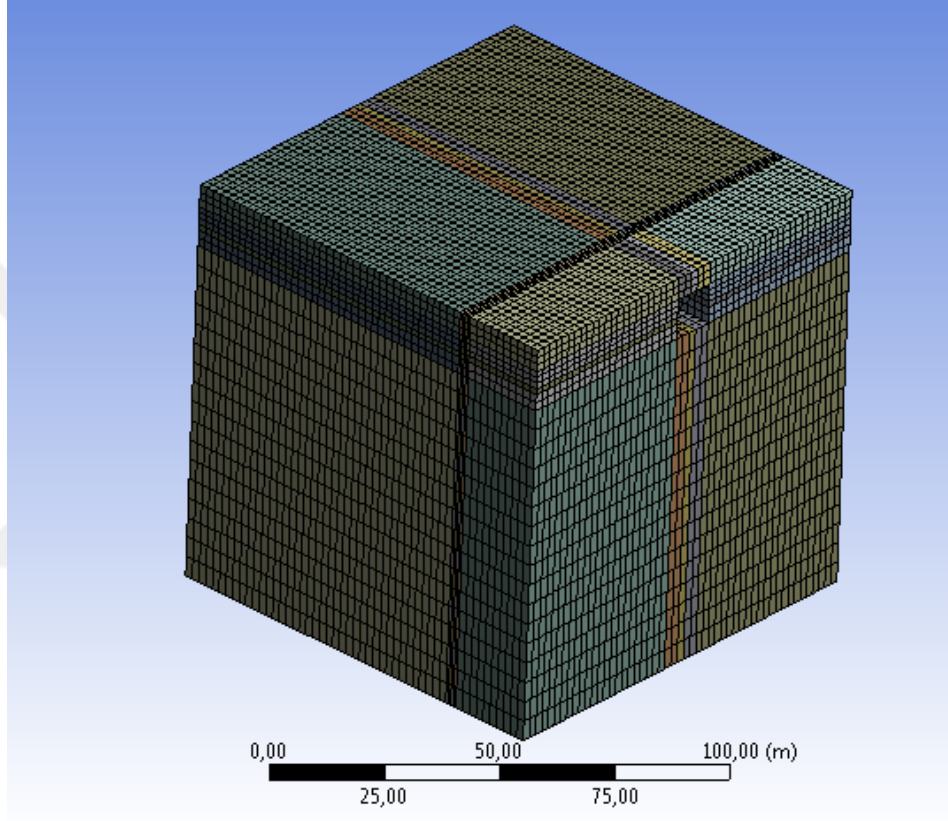
Daha önce de belirtildiği gibi patlayıcı şarjın ürettiği anlık ısı ve basınç etkisinin elastik sınıra dolayısıyla sismik sarsıntıya maruz kalan bölgeye ulaşması patlatılan kayanın fiziksel özellikleri ile üretilen enerjinin hapsedilme oranına bağlıdır. Bu etkinin gösterilebilmesi için açılacak olan kraterin yumuşak kayalardan sertlere doğru büyüyeceği değerlendirilerek, sert kaya zeminde $r_1=3r_0$; $r_2=10r_0$, orta sert kaya zeminde yaklaşık $r_1=4r_0$, $r_2=12.5r_0$, yumuşak kaya zeminde yaklaşık $r_1=5r_0$, $r_2=15r_0$ olarak kabul edilmiştir.

3.1.2. Modellerin oluşturulması

3.1.2.a. Zemin modellerin oluşturulması

ANSYS Workbench programında tespit edilen yükleme durumunun uygulanacağı modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Amaca yönelik istenen sonuçların alınması amacıyla 3 tip model üretilmiştir. Modellerin kullanılmasında iki ana amaç

hedeflenmiştir. İlk olarak zemin tiplerinin mesafeye de bağılı olarak patlama kaynaklı titreşimleri nasıl ileticeğinin tespiti, sonrasında gerçek zemin yapısına daha uygun simülasyonlar gerçekleştirilerek gerçekçi bir senaryo eşliğinde yüzey titreşiminin ölçülmesidir.

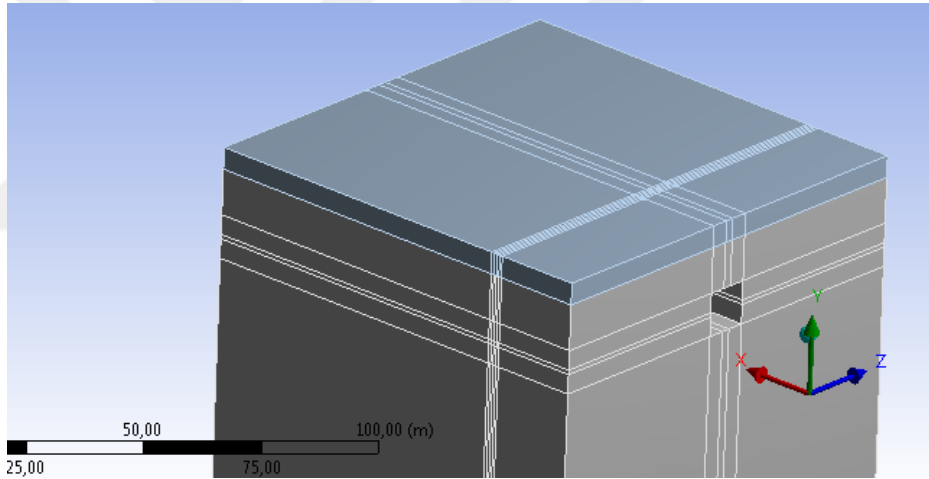


Şekil 3.10. Patlama kaynağı yüzeyden 10 m derinlikte tasarlanan model

Bu maksatla öncelikle tek zemin çeşidinde delme-patlatma uygulamasının yapıldığı kabul edilerek uygulamanın yapılabileceği en küçük mesafe olarak 10 m derinlikte patlatma uygulaması için Şekil 3.10'daki model üretilmiştir. Üretilen model 100 m genişliğinde, 100 m derinliğinde ve 100 m uzunluğunda bir küp şeklinde tasarlanmış modelin yatayda tam ortasına, düşeyde ise elastik sınırı yüzeye 10 m derinlikte olacak şekilde mesafeli olarak konumlandırılmıştır.

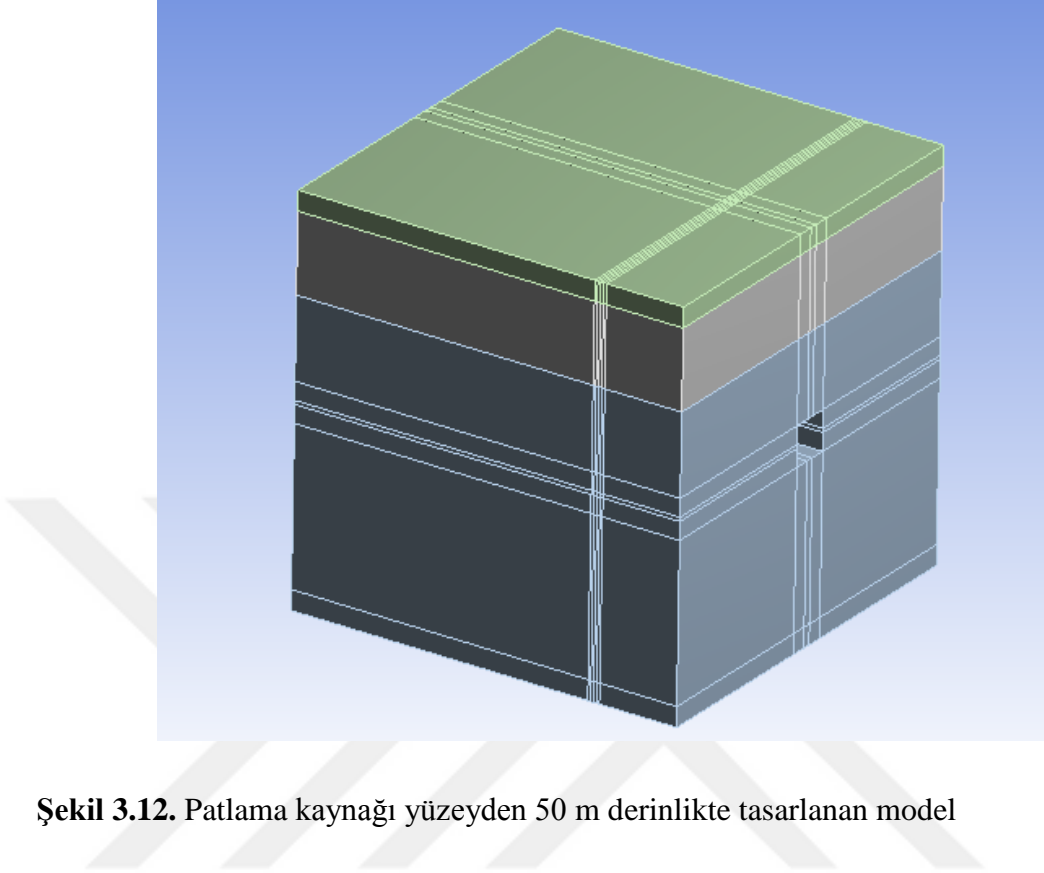
Dışarıdan görülen boşluk 10x10 m'lik tünel kesiti olup içerisinde 1m x 2m boyutlarında yukarıda belirtilen kesme bölgesi bulunmaktadır. Tünel derinliği ön yüzeyden 20 m kesme bölgesi ise tünel ayna yüzeyinde itibaren 3 m derinlikte olacak şekilde tasarlanmıştır.

Yukarıda görülen model aynı genişlik ve uzunlukta yalnızca tünel kesiti 10 m daha derine indirilerek tekrar üretilmiş ve Şekil 3.11'deki ikinci tip model elde edilmiştir. Bu modelde farklı zemin tiplerinde etkiyi görebilmek için yüzeye yakın son 5 m'lik bölüm ayrı zemin tipi tanımlamaya elverecek şekilde tasarlanmıştır. Burada patlama noktası yüzeye 20 m mesafededir.



Şekil 3.11. Patlama kaynağı yüzeyden 20 m derinlikte tasarlanan model

Şekil 3.12'de verilen son modelde uygulamaya daha müsait olduğu düşünülen yine 100m x 100m x 100m boyutlarında bir model üretilmiştir. Burada da farklı zemin tiplerinin uygulanmasına izin verecek şekilde düşey kademelendirme yapılmıştır.



Şekil 3.12. Patlama kaynağı yüzeyden 50 m derinlikte tasarlanan model

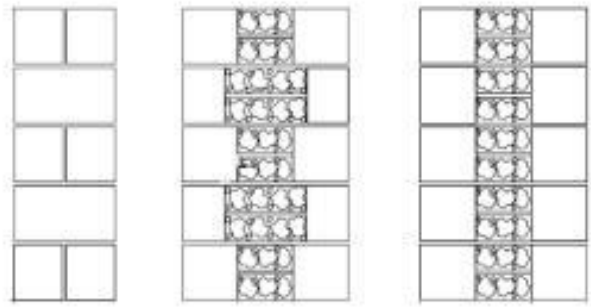
En üst katman 5 m altındaki katman 20 m en alt katman ise patlama yükü kaynağına 25 m olacak şekilde tasarlanmıştır.

Modellerde patlatma etkisinin daha iyi gözlenebilmesi için özellikle patlama kaynağının bulunduğu katman ile ölçümlerin alınacağı en üst katmanda daha kısa mesafeli bir mesh aralığı tercih edilmiştir.

3.1.2.b. Tarihi yapı modelinin oluşturulması

Selçuklu döneminde yapılan esere bakıldığında, Osmanlı döneminde Mimar Sinan'ın yapmış olduğu eserler arasında birçok benzerlik görülebilmektedir. Bu benzerlik sadece mimari özellikler değil, yapım teknikleri ve malzeme açısından da görünür şekildedir. Hatta daha geç bir dönem olarak sayılabilecek Erzurum ve Kars bölgesinde 1870-1910 yılları arasında Ruslar tarafından yapılmış yığma taş yapılarda da aynı yapısal yöntem görülebilmektedir.

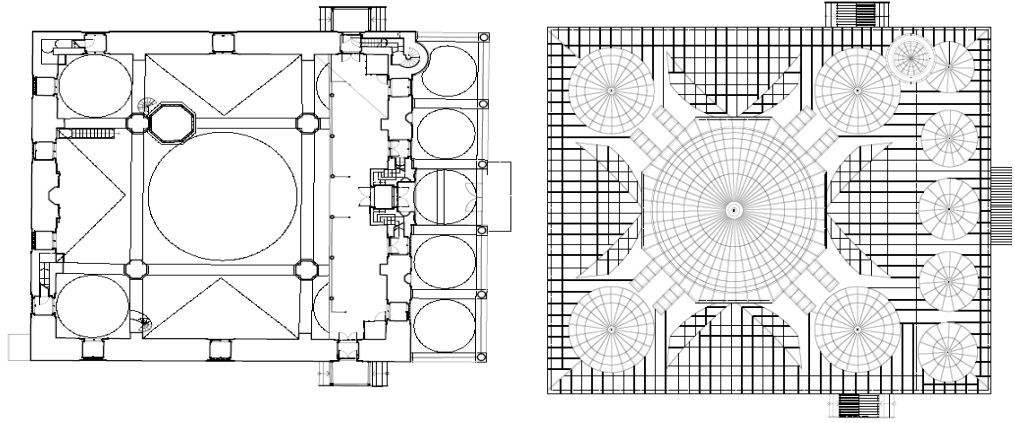
Erzurum Yakutiye Medresesi kubbelerin yükünü taşıyan dış/iç duvarları, iki kesme taş duvarın arasında, harç, moloz ve vb. bağlayıcılar bulunan dolgu duvar ile tamamlanan bir sistemle inşa edilmiştir. Yapı örneğine ait duvar görünümü Şekil 3.13’de gösterilmektedir.



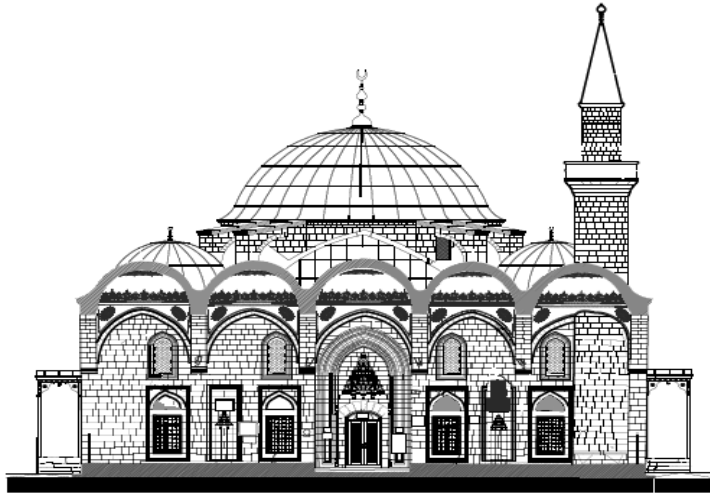
Şekil 3.13. Üç katmanlı kesme taş duvar kesiti (Tomazevic 1999)

Bu tip duvarların basınç dayanımı ve elastisite modüllerinin belirlenmesi için, önce ayrı ayrı kesme taş duvar dayanımı ve dolgu duvar dayanımının belirlenmesi gerekmektedir.

Tarihi yapı örneği olarak Erzurum Lalapaşa Camisi’sinin ANSYS için oluşturulan modeli kullanılmıştır. Yapının rölöve çizimleri Şekil 3.14 ve 3.15’de görülmektedir. Lalapaşa Camisi 1562 yılında Osmanlı mimarbaşı Mimar Sinan tarafından yapılmış yığma bir yapıdır. Taşıyıcı fil ayakları yekpare, duvarları ise kesme bazalt taşlardan yapılmıştır.



Şekil 3.14. Lalapaşa Camisi plan çizimleri



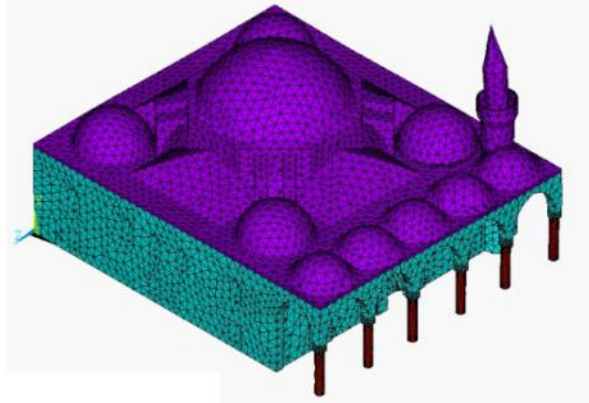
Şekil 3.15. Lalapaşa Camisi ön cephe çizimleri

Modellemede üç tip malzeme kullanılmıştır. Taşıyıcı yekpare kolonlarını temsil edebilmek için daha sağlam bir malzeme modellenmiştir. Duvarları temsil edebilecek basınç ve çekme dayanımı nispeten daha düşük farklı bir malzeme modeli kullanılmıştır. Kubbelerde ise duvarlarda tanımlanan malzeme modeline daha yakın farklı yapı malzemesi modellenmiştir. Modellemede kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Lalapaşa Camisi için modellemede kullanılan malzemeler

Caminin Bölümü	Elastisite Modülü MPa	Basınç Dayanımı MPa	Çekme Dayanımı MPa	Malzeme Yoğunluğu kg/m³
Duvarlar	5.000	5	0,2	2350
Fil Ayakları	30.000	25	1	2350
Kubbeler	5.000	3	0,2	2350

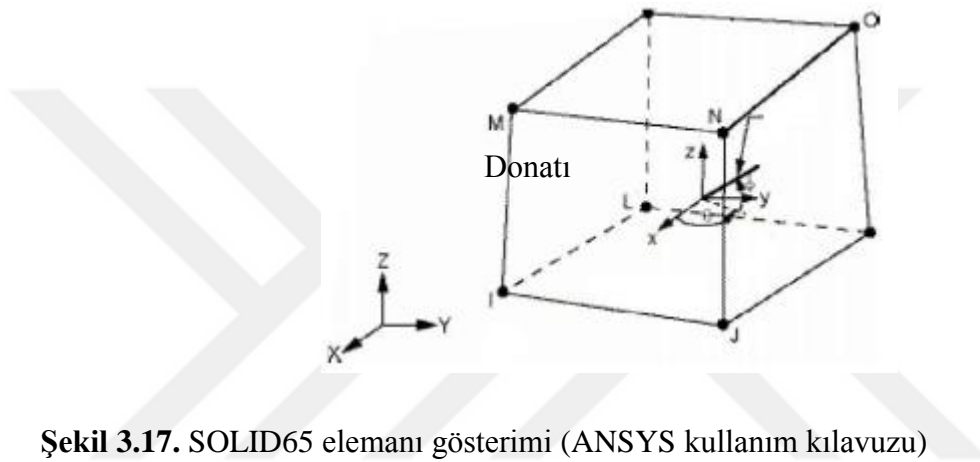
Yukarıdaki tabloda verilen özelliklere göre sonlu elemanlar yöntemi kullanan ANSYS APDL yazılımında modellenmiş ve malzeme tanımlaması şekil 3.16'da görülen şekilde yapılmıştır.

**Şekil 3.16.** Lalapaşa Camisi ANSYS sonlu eleman modeli

Tarihi yapı modellerini yapı davranışlarının incelenmesi ve nümerik modellerinin oluşturulması karışık ve oldukça zor olduğundan sonlu eleman yöntemini kullanan bir bilgisayar yazılımından faydalanmak olumlu katkılarda bulunmuştur. Yapının modellenmesinde ANSYS programı tabanında bulunan SOLID65 elemanından faydalanılmıştır.

SOLID65 elemanı, donatılı ya da donatısız olarak üç boyutlu modellemelerde kullanılan her düğüm noktasında üç öteleme serbestlik derecesine sahip sekiz düğüm noktasından

oluşan bir elemandır. Bu üç boyutlu blok eleman, çekme gerilmelerinde çatlama, basınç gerilmelerinde ezilme özelliklerine de sahiptir. SOLID65 elemanı içerisine donatı tanımlamaya izin veren bir yapıda olduğu gibi kompozit betonları ve jeolojik kaya türlerini tanımlamaya da elverişli olan eleman tiplerinden biridir. Modellemede ihtiyaç duyulacak elastisite modülü, Poisson oranı, yoğunluk, çekme ve basınç dayanımları tanımlamaya imkân vermektedir.



Şekil 3.17. SOLID65 elemanı gösterimi (ANSYS kullanım kılavuzu)

Sekiz düğüm noktalı izoparametrik SOLİD65 elemanı, sekiz birleşim (düğüm) noktası ile, (2x2x2) geometri ve yer değiştirme için sekiz enterpolasyon fonksiyonu verilmektedir. Bu eleman için enterpolasyon şekil fonksiyonu aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$N_i = \frac{1}{8}(1 \pm \xi)(1 \pm \eta)(1 \pm \zeta) \quad i=1, \dots, 8 \quad (3.1)$$

Bu N_i şekil fonksiyonuna bağlı olarak, noktasal yer değiştirme (u_i, v_i, w_i) eleman üzerindeki bir noktanın (ξ, η, ζ) koordinatlarına bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} u &= u_1 N_1 + u_2 N_2 + \dots + u_8 N_8 \\ v &= v_1 N_1 + v_2 N_2 + \dots + v_8 N_8 \\ w &= w_1 N_1 + w_2 N_2 + \dots + w_8 N_8 \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.1.3. Kullanılacak zemin tiplerinin tespiti

Modellemede kullanılması planlanan zemin tiplerinin fiziksel özelliklerinin nem, yoğunluk, porozite vb. sebeplerle net olarak ortaya koymak mümkün değildir. Uygulamada yerinde yapılan ölçümlerle alınacak olan değerlerin kullanılması daha doğru olabilecektir. Çizelge 3.2. ve 3.3’de yaygın olarak bilinen kayaç türlerinden 9 farklı kayaç üzerinde yapılan incelemelerde elastisite modülü ile Poisson oranları verilmiştir.

Çizelge 3.2. Genel kaya çeşitlerine ait tipik elastisite modülleri (GPa) (Johnson and Degraff 1988)

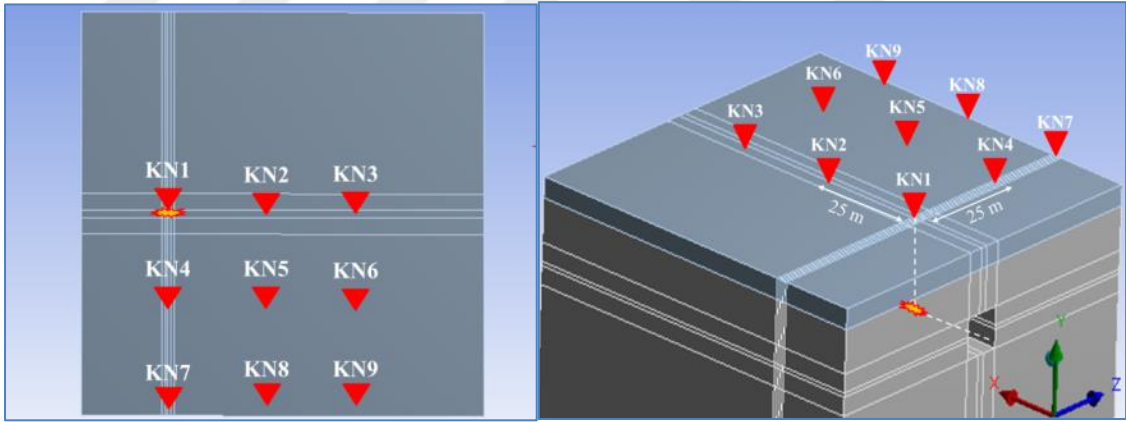
	Granit	Bazalt	Gnays	Şist	Kuvarsit	Mermer	Kireç Taşı	Kum Taşı	Tortulu Şist
Ort.E.	59.3	62.6	58.6	42.4	70.9	46.3	50.4	15.3	13.7
Maks.E	75.5	100.6	81.0	76.9	100.0	72.4	91.6	39.2	21.9
Min.E.	26.2	34.9	16.8	5.9	42.4	23.2	7.7	1.9	7.5
Genlik	49.3	65.7	64.2	71.0	57.6	49.2	83.9	37.3	14.4
Örnek No..	24	16	17	18	10	16	29	18	9

Çizelge 3.3. Genel kaya çeşitlerine ait tipik Poisson oranları (Johnson and Degraff 1988)

	Granit	Bazalt	Gnays	Şist	Kuvarsit	Mermer	Kireç Taşı	Kum Taşı	Tortulu Şist
Ort.μ	0.23	0.25	0.21	0.12	0.15	0.23	0.25	0.24	0.08
Maks.μ	0.39	0.38	0.40	0.27	0.24	0.240	0.33	0.46	0.18
Min. μ	0.10	0.16	0.08	0.01	0.07	0.10	0.12	0.06	0.03
Genlik	0.29	0.22	0.32	0.26	0.17	0.30	0.21	0.40	0.15
Örnek No..	24	16	17	18	10	16	29	18	9

Yukarıda verilen çizelgeler incelendiğinde, aynı kayaç çeşidinde bile alınan minimum ve maksimum değerler arasında çok büyük farklar olduğu görülmektedir. Aynı zamanda elastisite modülü ile Poisson oranı arasında da bir ilişkinin bulunmadığı ortaya çıkmaktadır. Örneğin en yüksek ve en düşük elastisite modülüne sahip malzemelerden kuvarsit (70.9 GPa) ile tortulu şist (13.7 GPa) incelendiğinde Poisson oranlarının kuvarsit için (0.15), tortulu şist için (0.08) ile en düşük değerlere sahip malzemeler olduğu görülmektedir.

Ayrıca doğada homojen bir şekilde aynı özellikleri taşıyan bir zemin tipi bulmak çok zordur. Bu sebeple modellenecek zemin tiplerinin elastisite modülü ile Poisson oranına bağlı olarak maksimum parçacık hızını nasıl iletceği incelenmiştir. ANSYS Workbench yazılımında yapılan simülasyonlardan alınan maksimum parçacık hızı sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.18. Patlatma modeli yüzey kontrol noktaları gösterimi

Yukarıda görülen model üzerinde aynı patlama yükü uygulanmak suretiyle analizler yapılmıştır. Her analizde E ve μ değerleri değiştirilerek Şekil 3.18'deki solda görülen sırayla maksimum parçacık hızı sonuçları alınmıştır. Elde edilen sonuçlar çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Elastisite modülü ve Poisson oranına göre PPV değerleri (mm/sn)

	$\mu=0.1$			$\mu=0.2$			$\mu=0.3$		
E =15 GPa	<u>KN1</u>	<u>KN2</u>	<u>KN3</u>	<u>KN1</u>	<u>KN2</u>	<u>KN3</u>	<u>KN1</u>	<u>KN2</u>	<u>KN3</u>
	126,6	19,0	7,7	112,6	20,6	8,0	112,4	19,9	7,7
	<u>KN4</u>	<u>KN5</u>	<u>KN6</u>	<u>KN4</u>	<u>KN5</u>	<u>KN6</u>	<u>KN4</u>	<u>KN5</u>	<u>KN6</u>
	27,0	12,1	8,1	28,8	13,2	7,5	27,3	13,7	7,7
	<u>KN7</u>	<u>KN8</u>	<u>KN9</u>	<u>KN7</u>	<u>KN8</u>	<u>KN9</u>	<u>KN7</u>	<u>KN8</u>	<u>KN9</u>
	12,3	12,1	9,0	15,1	14,5	9,3	15,2	15,8	8,0
E =35 GPa	<u>KN1</u>	<u>KN2</u>	<u>KN3</u>	<u>KN1</u>	<u>KN2</u>	<u>KN3</u>	<u>KN1</u>	<u>KN2</u>	<u>KN3</u>
	76,7	14,6	5,5	57,1	16,1	5,7	60,5	14,4	5,5
	<u>KN4</u>	<u>KN5</u>	<u>KN6</u>	<u>KN4</u>	<u>KN5</u>	<u>KN6</u>	<u>KN4</u>	<u>KN5</u>	<u>KN6</u>
	16,9	7,8	5,0	20,3	8,2	5,2	19,2	8,5	5,1
	<u>KN7</u>	<u>KN8</u>	<u>KN9</u>	<u>KN7</u>	<u>KN8</u>	<u>KN9</u>	<u>KN7</u>	<u>KN8</u>	<u>KN9</u>
	9,3	7,8	5,9	11,4	9,2	5,9	11,3	10,0	5,8
E =60 GPa	<u>KN1</u>	<u>KN2</u>	<u>KN3</u>	<u>KN1</u>	<u>KN2</u>	<u>KN3</u>	<u>KN1</u>	<u>KN2</u>	<u>KN3</u>
	54,8	10,5	4,5	49,5	11,8	4,5	44,3	11,0	4,3
	<u>KN4</u>	<u>KN5</u>	<u>KN6</u>	<u>KN4</u>	<u>KN5</u>	<u>KN6</u>	<u>KN4</u>	<u>KN5</u>	<u>KN6</u>
	12,8	6,2	3,4	15,0	6,4	3,6	14,5	6,4	3,5
	<u>KN7</u>	<u>KN8</u>	<u>KN9</u>	<u>KN7</u>	<u>KN8</u>	<u>KN9</u>	<u>KN7</u>	<u>KN8</u>	<u>KN9</u>
	7,3	5,7	4,6	9,2	6,3	4,8	9,2	6,1	4,2

Aynı kontrol noktalarından alınan veriler karşılaştırıldığında, elastisite modülü daha yüksek olan malzemede aynı patlama yüküne maruz bırakıldığında beklenenin aksine daha düşük hız ve daha kısa sürede sönmümlenme olduğu görülmüştür. Elastisite modülü daha düşük olan malzemede ise daha yüksek parçacık hızı olduğu görülmüştür. Ancak düşük elastisite modülüne sahip olan malzemeden alınan ölçüm noktalarının çok yakın mesafelerde olması sebebiyle daha yüksek hızlar elde edilebilirken mesafe arttıkça daha fazla sönmümlendiği görülmüştür. Elastisite modülü yüksek olan malzemede ise daha uzak mesafelerde maksimum parçacık hızının muhafaza edildiği görülmüştür.

Poisson oranının değişimi kapsamında KN1 noktalarının birbirleri ile kontrolünde ise Poisson oranı artışının kısa mesafede parçacık hızını düşürürken daha uzak mesafelerde maksimum parçacık hızını yükselten bir etki yaptığı düşünülmektedir.

Patlama noktasının yüzeye olan mesafesine bağlı olarak aynı zemin malzemesi ile üç farklı model üretilmiş ve analizler yapılmıştır. Farklı yüksekliklerden yapılan patlatma analizlerine göre elde edilen parçacık hızları Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Yükseklik farkına oranla PPV değişimi

PARÇACIK HIZLARININ AYNI ZEMİN MALZEMESİNDE PATLATMA NOKTASINDAN YÜZEY YÜKSEKLİĞİNE GÖRE DEĞERLENDİRİLMESİ			
10 M	<u>KN1</u>	<u>KN2</u>	<u>KN3</u>
	222,22	29,63	8,99
	<u>KN4</u>	<u>KN5</u>	<u>KN6</u>
20 M	40,91	15,77	10,44
	<u>KN7</u>	<u>KN8</u>	<u>KN9</u>
	23,58	19,54	9,67
50 M	<u>KN1</u>	<u>KN2</u>	<u>KN3</u>
	57,06	16,09	5,74
	<u>KN4</u>	<u>KN5</u>	<u>KN6</u>
50M	20,29	8,18	5,17
	<u>KN7</u>	<u>KN8</u>	<u>KN9</u>
	11,36	9,17	5,89
50M	<u>KN1</u>	<u>KN2</u>	<u>KN3</u>
	11,69	4,70	2,94
	<u>KN4</u>	<u>KN5</u>	<u>KN6</u>
50M	5,18	3,96	2,67
	<u>KN7</u>	<u>KN8</u>	<u>KN9</u>
	4,21	4,23	3,84

Yapılan analizlerde parçacık hızının doğrusal bir şekilde azalmadığı mesafe arttıkça parçacık hızının buna oranla üssel bir şekilde azaldığı görülmüştür. Ayrıca yapılan tasarımlar kesme bölgesi boyu 3 m derinliği 1 m genişliği 2 m olarak alınmıştır. Burada patlayıcı şarjların boyutlandırılması ve yönlendirilmesinin farklı etkiler yarattığı görülmüştür. Örneğin KN2 ile KN4, KN3 ile KN7 ve KN6 ile KN8 numaralı kontrol noktalarının patlama notalarına mesafeleri birbirleri ile aynıdır. Ancak KN4, KN7 ve KN8 patlatma noktasına yan istikamette olması ve basınç alanının daha fazla bir bölümünün bulunduğu istikamette yer almaları sebebiyle maksimum parçacık hızları kendi mesafelerindeki diğer kontrol noktalarına göre fazla olarak tespit edilmiştir.

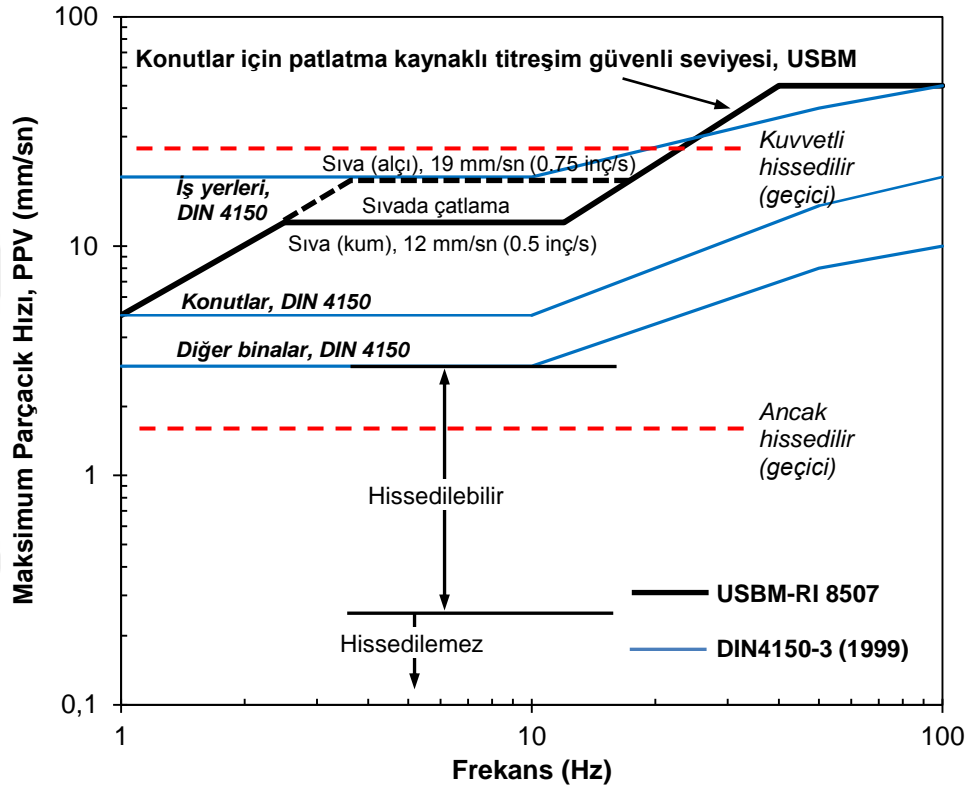
3.2. Yöntem

Bu çalışmada öncelikle “Materyal” kısmında bahsedilen modeller üretilerek üç zemin malzemesi oluşturulmuş ve modellere atanmıştır. Zemin çeşitleri sert zemin malzemesi $E=60$ GPa, $\mu=0.15$ olarak, orta sert zemin malzemesi $E=35$ GPa , $\mu=0.20$ olarak, yumuşak zemin malzemesi $E=15$ GPa, $\mu=0.25$ olarak alınmıştır.

Zemin çeşitlerine göre önce normal şarj edilmiş delik tasarımına göre patlama yükleri belirlenmiş, sonra farklı miktarda patlayıcı ile veri elde edebilmek amacıyla fazla şarj edilmiş delik tasarımına göre patlama yükü belirlenerek her modelde her zemin çeşidine ikişer adet patlama yükü olacak şekilde analizler gerçekleştirilmiştir.

Yapılan her modelin analizinde patlatma kaynağına farklı yön ve mesafelerde en az 9 kontrol noktasından patlayıcı miktarı değişimi de göz önüne alınarak maksimum parçacık hızları hesaplanmıştır. Silitonga (1986) tarafından önerilen hasar kriterleri ilk başlarda sarsıntı frekansının göz ardı edildiği durumlara örnek olabilir. Yapılan çalışmalarda hissedilebilir değer 0,5 mm/sn, sıkıntı yaratabilecek parçacık hızı 5 mm/sn, ciddi hasarlara yol açacak olan parçacık hızı değeri ise 17,5 mm/sn olarak önerilmiştir. Ancak daha sonraları yapı frekanslarının düşük olması ve yapıya etkiyen sarsıntı frekansının yapı frekansına göre durumuna bakılarak farklı hasar kriterleri ortaya konmuştur.

Amerika Birleşik Devletleri Madencilik bürosu (USBM-RI 8507) ve DIN 4150-3 Alman standardı tarafından önerilen güvenli patlatma ve insanlar tarafından hissedilebilir frekansa bağlı parçacık hızı ve frekans arasındaki ilişkisi Şekil 3.19'da sunulmuştur.



Şekil 3.19. Parçacık hızına göre hasar kriterleri

USBM RI 8507 ve DIN4150-3 (1999) tarafından patlayıcıların yapı hasar limitleri Şekil 3.19'da da görüldüğü gibi frekans değerlerine bağlı olarak değişmektedir. Yapı frekanslarının çoğunun 0-10 (Hz) arasında olması sebebiyle rezonans etkisinin yaratabileceği yüksek hasardan kaçınabilmek için özellikle bu değer aralığında daha düşük parçacık hızına izin verilmektedir. Aşağıdaki şekil incelendiğinde DIN4150-3 de verilen hasar kriterlerinin daha emniyetli değerler önerdiği görülürken USBM RI 8507 tarafından önerilen değerlerin frekans faktörünü daha fazla dikkate aldığı görülmektedir. Kullanılacak zemin modellerinin parçacık hızı için frekans değeri yumuşak tip zeminleri için yaklaşık 200 Hz, sert zemin tipi için yaklaşık 320 Hz olarak tespit edilmiştir. Bu

durumda yukarıdaki hasar kriterleri incelenerek en yüksek parçacık hızının yapı hasarı oluşturmaması için 50 mm/sn hızı geçmemesi gerektiği söylenebilir.

Kullanılan patlayıcı miktarları hesaplanmış, her kontrol noktasının patlama kaynağına mesafesi ölçülerek Denklem 2.25'de gösterilen şekilde Ölçekli Mesafe değeri elde edilmiştir.

Her bir zemin tipi için tüm analiz ve kontrol noktalarından farklı patlayıcı miktarları için elde edilen maksimum parçacık hızları bir araya getirilerek en yaygın eşitlik olan Denklem 2.26'da belirtilen bağıntıda yerlerine konularak yapılan analizlerin geçerliliği farklı bir açıdan teyit edilmiştir.

Ayrıca üretilen 20 m derinlikli modellerde sert ve yumuşak zemin çeşidi için yapılan analizler neticesinde vektörel parçacık hızları, ivmeler ve deformasyonlar örnek bir tarihi yapı modellerine ivme şeklinde uygulanmıştır. Erzurum Lalapaşa Camisi örnek tarihi yapı olarak seçilmiştir. Uygulanan titreşim karşısında yapı davranışları incelenmiştir.

Patlatma yükünün tespiti, zemin özelliklerine göre gösterdiği farklılıklar ve şok dalgasının kaya kütlesi içerisindeki ilerleyişi ile maksimum parçacık hızı tahminleri ANSYS Workbench programı ile çözümlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan kritik olabileceği değerlendirilen iki farklı zemin tipinin yarattığı zemin titreşimleri ise ANSYS APDL programı ile yapıya aktarılmıştır. Burada yapısal analiz esnasındaki çatlak oluşu, çekme birim deformasyonlarının görülmesi, yapının modal analizinin yapılması ve deforme olmuş yapı şeklinin gösterilmesi gibi avantajların kullanılabilmesi amaçlanmıştır.

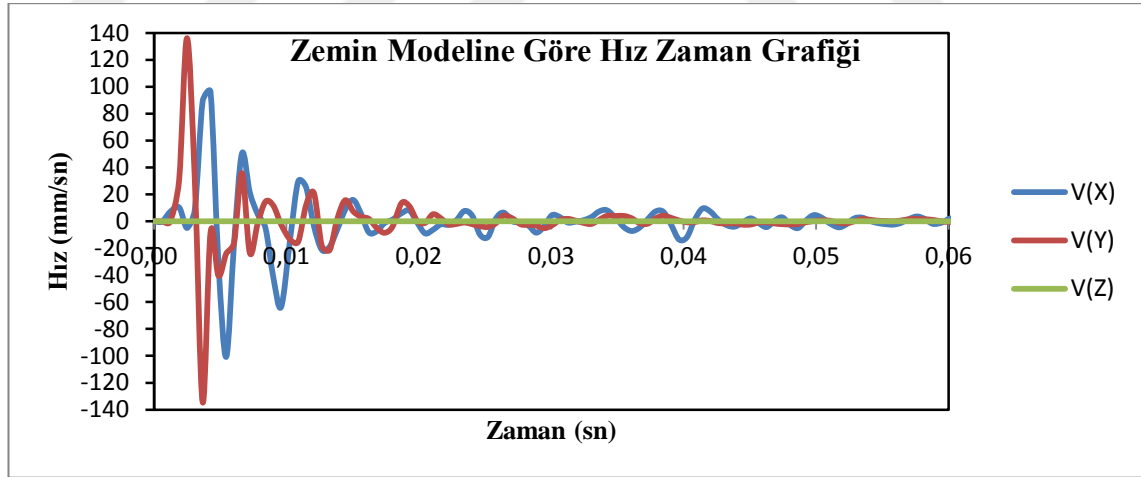
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde ANSYS programında sonlu eleman yöntemi ile modellenen tünel modellerinde başlangıç kesmesi patlama yükü altında dinamik analizler yapılarak yüzeyde bulunan farklı noktalardan alınan maksimum parçacık hızları değerlendirilmiştir. Zemin tiplerine göre hız zaman grafikleri oluşturulmuştur. Patlayıcının yerleştirilme şekli ve istikametinin aynı mesafede farklı noktalarda farklı parçacık hızı oluşturduğu gözlenmiştir. Eşdeğer Elastik Sınır Yönteminin patlama yükünü tespit etmede yeterlilik ve eksikleri irdelenmiştir. Zemin özelliklerinin patlama yükünün tespitinde büyük rol oynadığı görülmüş, ancak zemin özelliklerinin patlama yükünü modellemede Eşdeğer Elastik Sınır Yöntemine aktarma konusunda zorluklarla karşılaşmıştır. Yapılan analizler patlayıcı yükünün değişimindeki etkinin görülmesi için materyal bölümünde belirtildiği üzere imla haznelerinin fazla şarj edilerek patlatılmasına göre tekrar edilmiştir. Elde edilen maksimum parçacık hızları normal şarjlı delik patlatmalarındaki parçacık hızları ile kıyaslanmış patlayıcı miktarının doğrusal olarak bir değişim göstermediği tespit edilmiştir. Elde edilen tüm parçacık hızları aynı zemin tipleri için bir grafikte düzenlenerek Ölçekli Mesafeye bağlı olarak irdelenmiştir. Her bir zemin tipi için elde edilen maksimum parçacık hızlarının denklem 2.26 bağıntısına göre hesaplanarak grafikler halinde sunulmuş, arazide yapılan kontrol atımlarından elde edilen saha sabitleri K ve β değerleri analiz sonuçlarından elde edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen K değerinin zemin malzeme özelliklerinde elastisite modülü ile ilişkili olarak tanımlanabileceği değerlendirilmiştir. K katsayısının E modülü ile ilişkilendirilmesi sonucunda uygun sonuçlar elde edildiği gözlenmiştir. Bu sayede sahada kontrol atımların gerçekleştirilmeden önce de zemin malzemesinin elastisite modülüne bağlı olarak tahmini değerler elde edileceği ve maksimum parçacık hızına yönelik fikir yürütülebileceği düşünülmüştür. Ayrıca tipik kaya özelliklerine göre belirlenen zemin tiplerinde görülen etkileri, kaya üzerindeki yüzeyde 5 m lik bölümün toprak olduğu modellerde tekrar gözlemlenmiştir. Burada yapılan kontrollerde yüzey altında 5 m derinliğinde toprak bulunan modellerde beklenenden çok daha düşük parçacık hızları gözlenmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmı olarak değerlendirilebilecek olan tarihi yapı modeline patlama kaynaklı yer sarsıntısının etkisi incelenmiştir. ANSYS sonlu eleman modeline uygulanan iki farklı zemin tipine göre hasar limitleri üzerinde parçacık hızına sahip bir titreşim uygulanmıştır. Bu titreşimler sonucunda yapıda oluşan şekil değişikliği, deplasmanlar ve hasar oluşumları incelenmiştir.

4.1. Patlama Kaynağının 10 m Derinlikte Olduğu Modelde Yapılan Patlatma Uygulamalarının Değerlendirilmesi

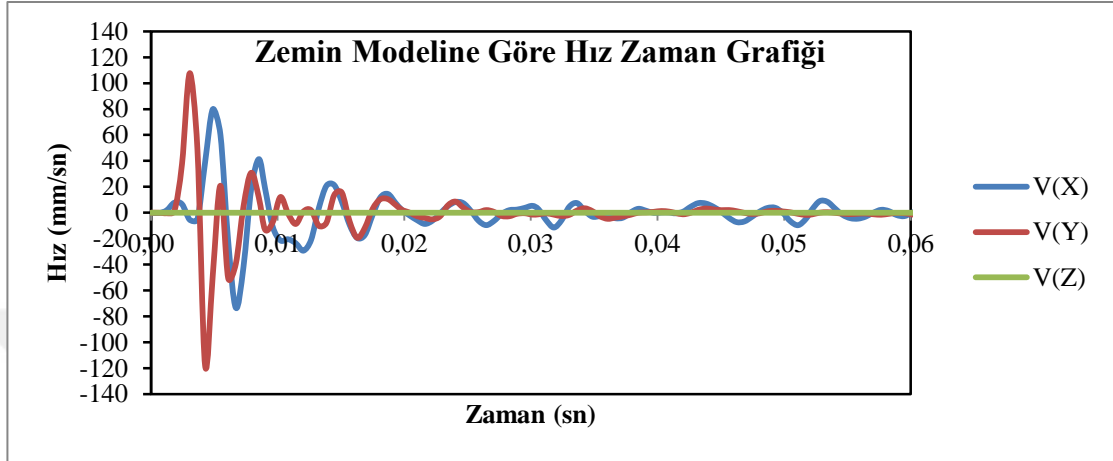
Normal şarj ile elde edilen patlama yükü 10 m derinlikte sert zemin için $E=60$ GPa patlatıldığında patlatmanın tam üzerinde elde edilen zamana göre parçacık hızı grafiği Şekil 4.1'de görülmektedir. Elde edilen maksimum vektörel parçacık hızı 136 mm/sn olarak düşey yönde elde edilirken yapı hasarına sebep olacak bileşke maksimum parçacık hızı $PPV=161,5$ mm/sn olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.1. Patlatma kaynağı 10 m derinlikte sert malzemeli model için parçacık hızı

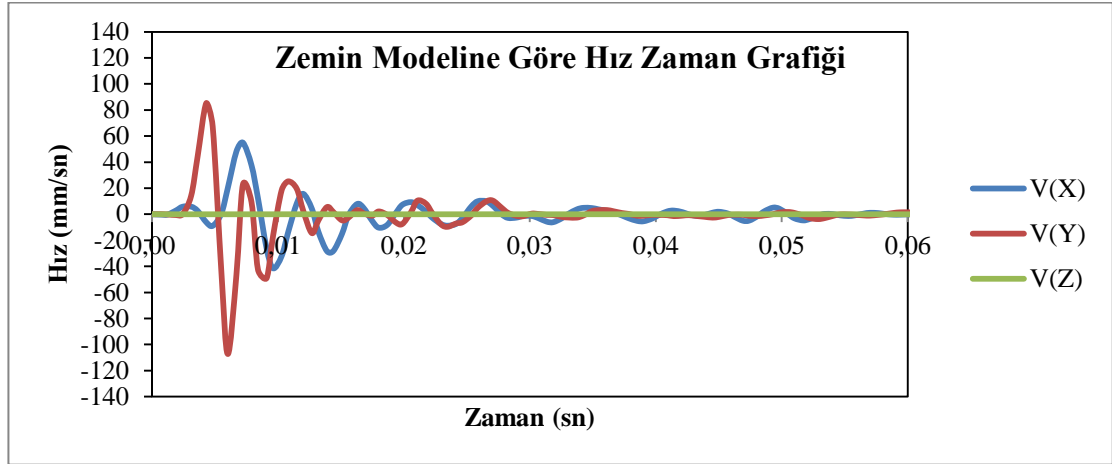
Aynı modelde orta sert kaya tipi olarak belirlenen $E=35$ GPa zemin tipinde normal şarj ile zemin tipine göre elde edilen patlama yükünde patlatmanın tam üzerinde elde edilen parçacık hızı grafiği Şekil 4.2'de görülmektedir. Elde edilen maksimum vektörel

parçacık hızı 107 mm/sn olarak düşey yönde elde edilirken yapı hasarına sebep olacak toplam $PPV=124$ mm/sn olarak ölçülmüştür.



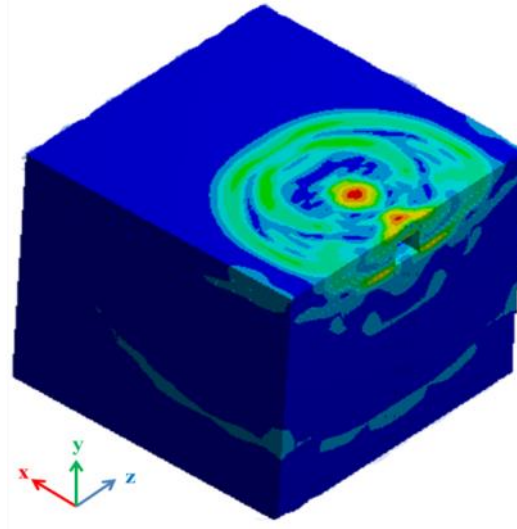
Şekil 4.2. Patlatma kaynağı 10 m derinlikte orta sert malzemeli model için parçacık hızı

Yine aynı modelde $E= 15$ GPa olan elastite modülüne sahip olan yumuşak zemin tipinde normal şarj ile zemin tipine göre elde edilen patlama yüküne göre parçacık hızı grafiği Şekil 4.3'de görülmektedir. Düşey yönde maksimum parçacık hızı 85 mm/sn olarak düşey yönde elde edilirken yapı hasarına sebep olacak toplam $PPV=109$ mm/sn olarak ölçülmüştür. Her tip zemin malzemesinde yapılar için risk oluşturacak olan parçacık hızlarına ulaşıldığı görülmektedir.



Şekil 4.3. Patlatma kaynağı 10 m derinlikte yumuşak malzemeli model için parçacık hızı

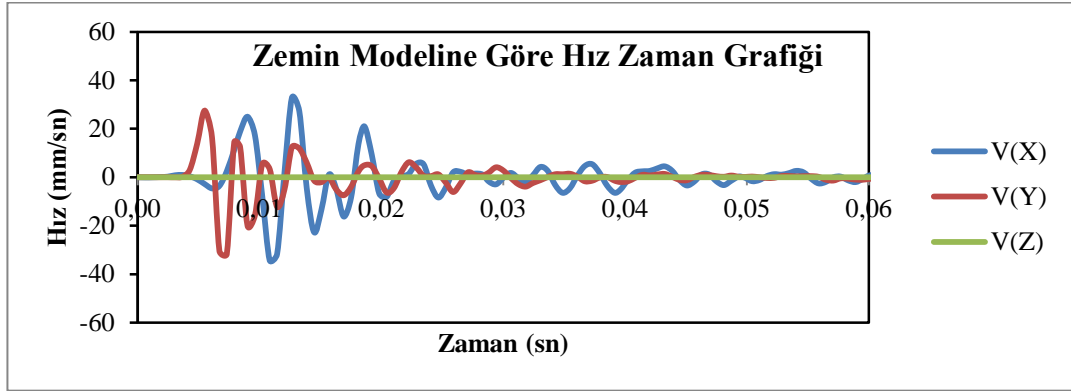
Yapılan üç zemin çeşidindeki analiz sonuçlarına göre kontrol noktasının tam patlama noktası üzerinde olması sebebiyle elde edilen en yüksek değer in düşey yönde olduğu görülmüştür. Kontrol noktasının patlayıcı haznenin tam ortasında yer alması sebebiyle z ekseninde sağına ve soluna doğru aynı patlama yükü eş zamanlı olarak etkiğinden dolayı Z yönündeki hız çok küçük değerlerde görülmektedir. X yönünde kazı istikametinde delik tabanına basınç uygulanırken, ayna yüzeyinden tünel boşluğuna doğru basınç uygulanmamaktadır. Bu sebeple Z yönünde görüldüğü gibi simetrik bir basınç olmayacağından yüzeyde ölçülen parçacık hızı da X yönünde yükselmektedir. 10 m derinlikte patlatma kaynağının olduğu modelde elde edilen toplam parçacık hızı Şekil 4.4’de gösterilmektedir. En yüksek hız değerinin patlatma noktasına en yakın yer olan kesme bölgesinin tam üzerinde yer aldığı görülmektedir.



Şekil 4.4. Patlatma kaynağı 10 m derinlikte modelde toplam hız

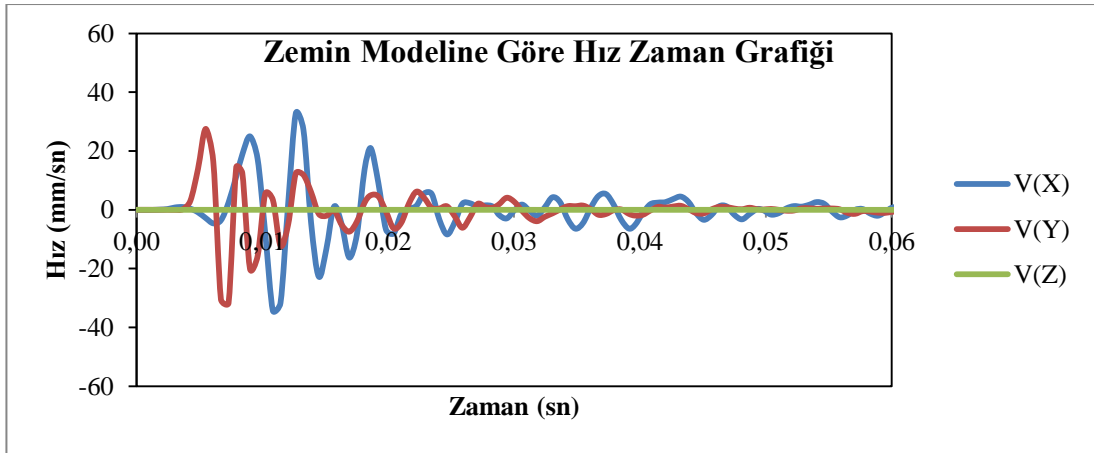
4.2. Patlama Kaynağının 20 m Derinlikte Olduğu Modelde Yapılan Patlatma Uygulamalarının Değerlendirilmesi

Patlatma kaynağının 20 m mesafede sert malzemeli olduğu modele, zemin tiplerine uygun olarak normal şarjlı patlayıcı yükü uygulanmıştır. 10 m’de görülen etkiye göre oldukça düşük parçacık hızları alınmıştır. Bu durumda parçacık hızının mesafeye oranla doğrusal olmayan bir bağıntıyla azaldığı görülmektedir. Ayrıca düşeydeki parçacık hızının x eksenindeki parçacık hızından daha bir değerde olduğu görülmüştür. Bu analiz sonucunda alınan x-y-z eksenlerinin bileşkesi olan *PPV* değeri 54 mm/sn olarak hesaplanmıştır. Eksenel olarak elde edilen parçacık hızları Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Patlatma kaynağı 20 m derinlikte sert malzemeli model için parçacık hızı

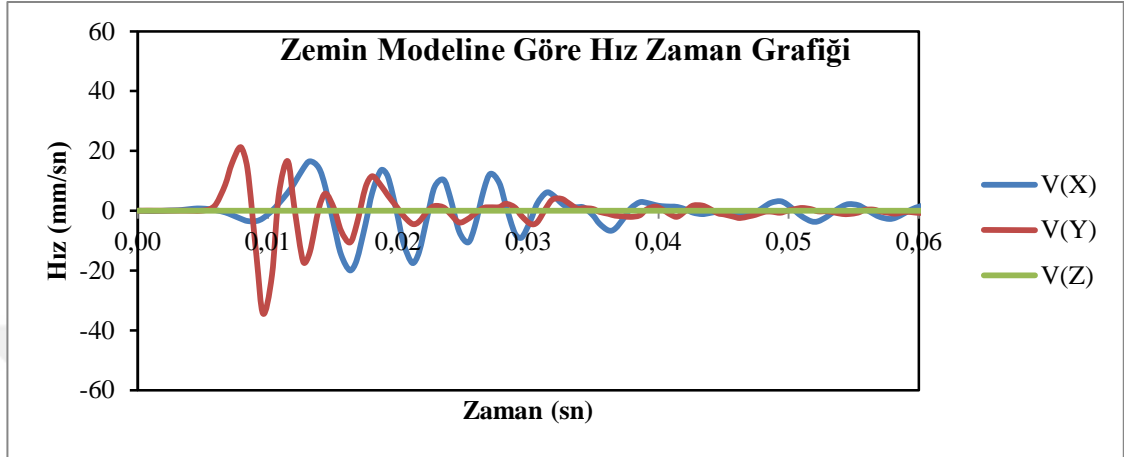
Orta sert zemin malzemesi kullanılan zemin tipinde sert zemine benzer bir parçacık hızı değişimi Şekil 4.6’da görülmektedir. X yönündeki parçacık hızında Y değerine doğru bir yaklaşım olduğu dikkat çekmektedir. Hesaplanan bileşke *PPV* değeri 38 mm/sn’dir. Toplam *PPV* değerindeki düşüş X yönündeki değişimin daha çok etkili olduğu görülmektedir.



Şekil 4.6. Patlatma kaynağı 20 m derinlikte orta sert malzemeli model için parçacık hızı

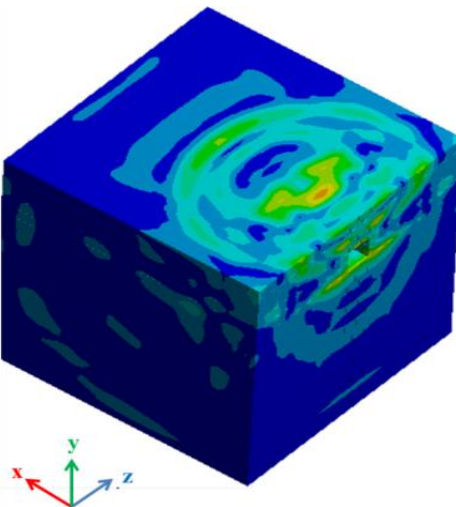
Üç eksenli parçacık hızlarının verildiği Şekil 4.7’de yumuşak zemin malzemesinde X yönünde ulaşılan tepe değeri 20 m derinlikte yapılan modellerde ilk defa Y istikametindeki parçacık hızından daha düşük olduğu görülmüştür. Ancak diğer iki

modelde de görüldüğü Y yönündeki parçacık hızının azalımı çok daha hızlı olurken X yönündeki titreşim hızı daha uzun süre muhafaza edildiği görülmektedir.



Şekil 4.7. Patlatma kaynağı 20 m derinlikte yumuşak malzemeli model için parçacık hızı

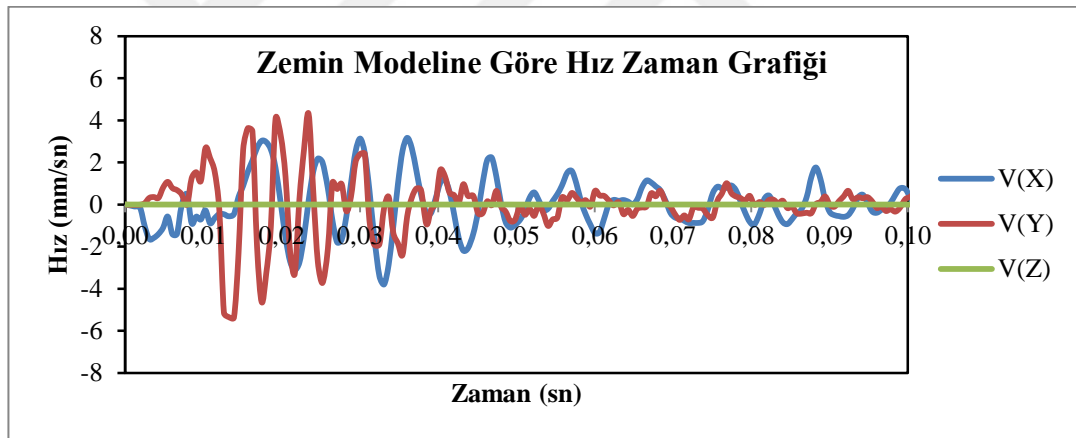
10 m derinlikte yapılan kontrollere göre 20 m'lik modelde X yönündeki hız eğrisinin daha geç sönümlendiği görülmektedir. Derinlik arttıkça doğrusal olmayan bir şekilde düşey hızın azaldığı buna kaşı yatay kuvvetlerin daha etkin olarak parçacık hızına müdahil olduğu Şekil 4.8'deki dalga ilerleyişinde gözlemlenmektedir.



Şekil 4.8. Patlatma kaynağı 20 m derinlikte modelde toplam hız

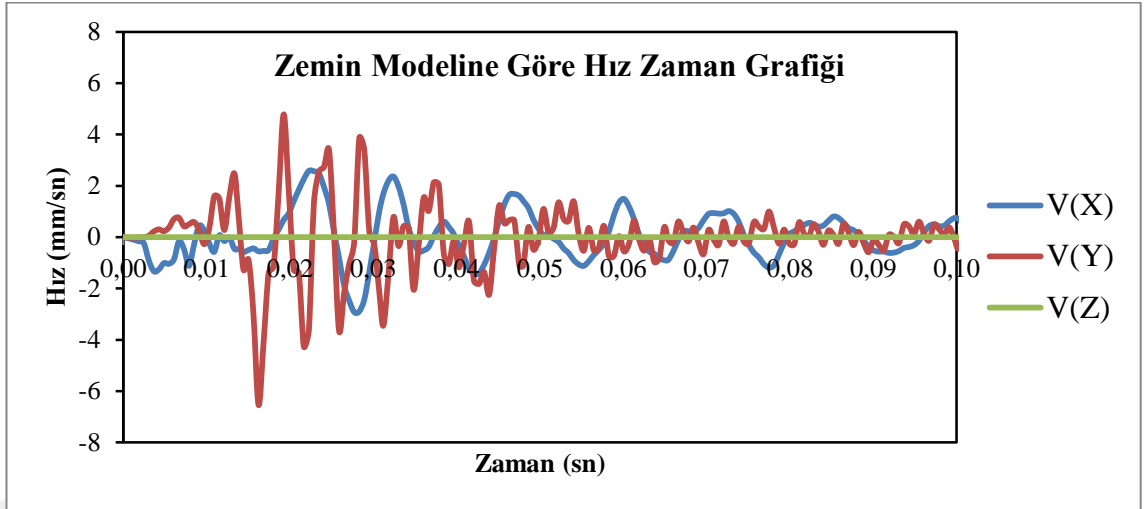
4.3. Patlama Kaynağının 50 m Derinlikte Olduğu Modelde Yapılan Patlatma Uygulamalarının Değerlendirilmesi

Patlatma kaynağının 50 m mesafede olduğu sert zemin malzemesi tanımlanmış modele, zemin tiplerine uygun olarak normal şarjlı patlayıcı yükü uygulanmıştır. Diğer modellere nazaran çok daha düşük parçacık hızları elde edilmiştir. Bu modelde elde edilen *PPV* yalnızca 5,53 mm/sn'dir. Bu değer hasar kriterinin çok altındadır. Değişen mesafe çok fazla olmamasına rağmen hasar kriterinin hatta hissedilebilir sınırın altında bir parçacık hızı elde edilmiştir. Çok daha düşük bir parçacık hızı elde edilmesine rağmen mevcut hızın sönümlenmesi diğer modellere göre daha uzun zamana yayıldığı Şekil 4.9'da görülmektedir.



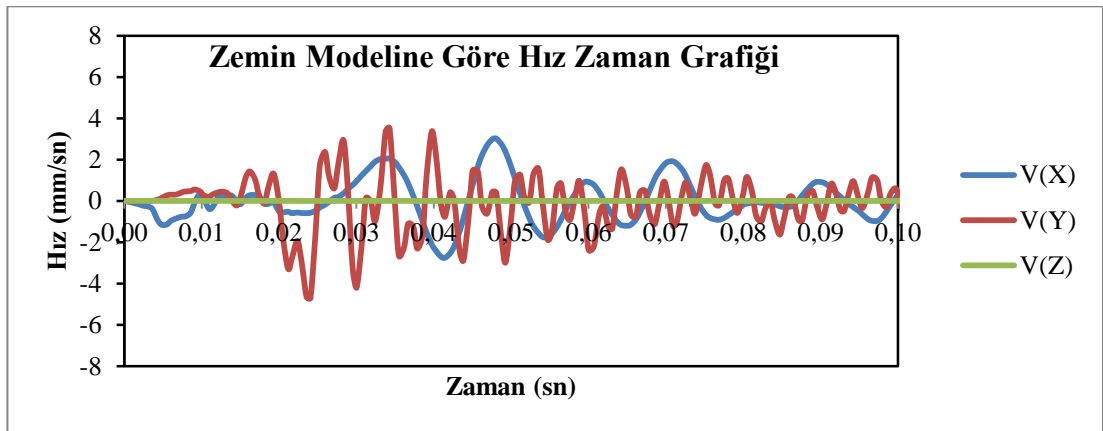
Şekil 4.9. Patlatma kaynağı 50 m derinlikte sert malzemeli model için parçacık hızı

Orta sert zemin malzemesinde 50 m derinlikte patlatma kaynağı bulunan modelde yapılan kontrollerde hesaplanan bileşke *PPV* =6,53 mm/sn'dir. Bu değer küçük bir farkla sert zemin malzemeli modele göre yüksek olarak elde edilmiştir. Üç eksenli parçacık hızlarının zamana bağlı değişimi Şekil 4.10'da verilmiştir.



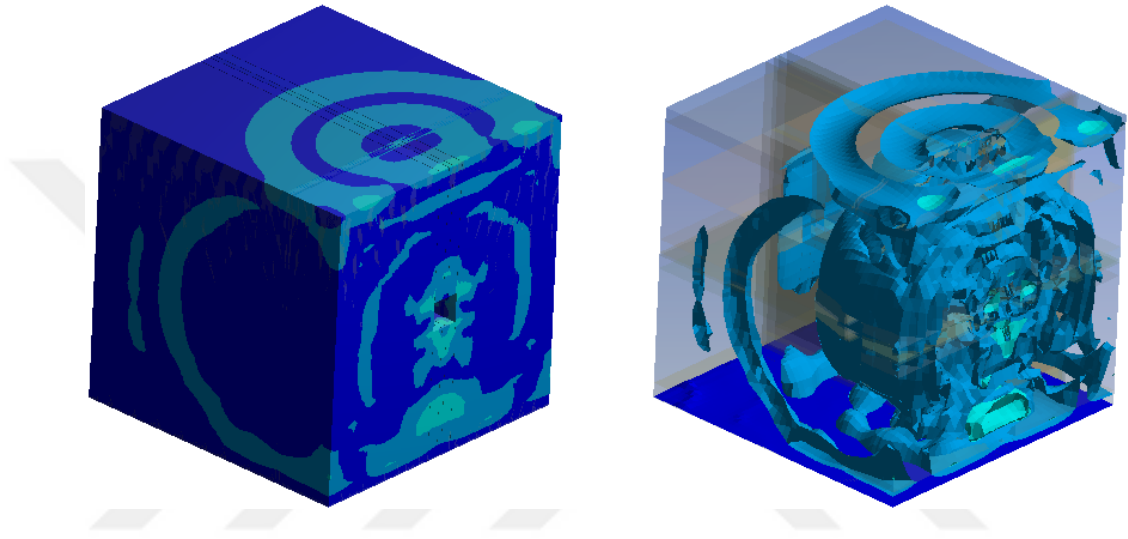
Şekil 4.10. Patlatma kaynağı 50 m derinlikte orta sert malzemeli model için parçacık hızı

Yumuşak zemin malzemesinde 50 m derinlikte patlatma kaynağı bulunan modelde yapılan kontrollerde $PPV=4,7$ mm/sn civarında hesaplanmıştır. Bu analiz sonucunda Şekil 4.11’de düşey ve yatay parçacık hızının frekans değişimi dikkat çekmektedir. Patlama etkisiyle ortaya çıkan titreşimde düşey hız değişimi iki farklı frekansla değişim göstermektedir. Yatayda (X yönünde) meydana gelen hız değişimi benzer olarak düşey hız için de görülmektedir. Ancak düşeyde yataydakine benzeyen birinci titreşimin yanında daha küçük genlikli ikinci bir titreşim olduğu görülmüştür.



Şekil 4.11. Patlatma kaynağı 50 m derinlikte yumuşak malzemeli model için parçacık hızı

Şekil 4.12'deki modellerden de anlaşılacağı gibi patlama kaynağı yüzeyden daha derinde oldukça etkilenen kaya kütlesi miktarı arttığından yüzeye ulaşan ve maksimum parçacık hızını belirleyecek şok dalgasının gücü etkilediği kaya kütlesi oranında azalmıştır. Etkilenen kaya kütlesi her üç ekseninde de artarak şok dalgasını ilettiği için azalım doğrusal bir şekilde olmaz.



Şekil 4.12. Patlatma kaynağı 50 m derinlikte modelde toplam hız

Langefors and Kihlström (1973) kaplanmamış tünellerde 305 mm/sn parçacık hızında kaya düşmesinin gerçekleştiğini, parçacık hızının 610 mm/sn olduğu durumda yeni çatlakların oluştuğunu kaydetmiştir. Calder (1977) parçacık hızının 254 mm/sn olduğu durumda sağlam kayada herhangi bir kırılma gözlemlememiştir. Öte yandan, maksimum parçacık hızının 254-635 mm/sn arasındaki değerlerinde az kavlaklanma (gevşek kayalarda ayrışma) ve 635-2540 mm/sn arasındaki değerlerde büyük çekme ve radyal çatlaklar meydana gelir. 2540 mm/sn parçacık hızında kaya kütlesi kırılarak ayrılır. Oriard (1982) parçacık hızının 635 mm/sn'nin üstüne çıktığı durumlarda çoğu kayanın belli oranda hasar göreceğini söylemiştir.

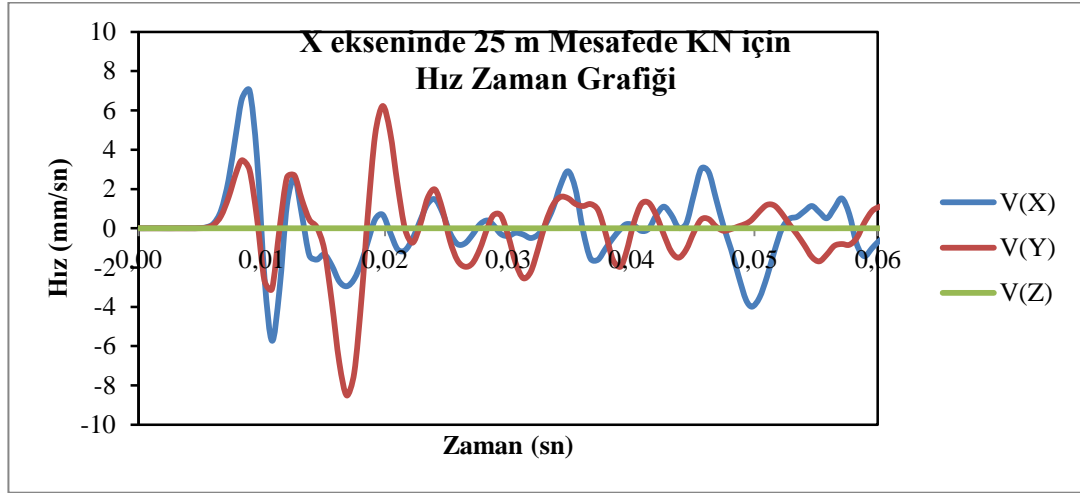
Çizelgelerde elde edilen en yüksek parçacık hızı değerlerinin en yakın ölçüm mesafesi olan 10 m mesafeden tespit edildiği göz önüne alınırsa yukarıda belirtildiği gibi tünel içerisindeki kayaların belli oranda hasar göreceğinden bahsedilebilir. Bu durumda daha

sert zemin malzemesi bulunan tünellerde patlatmalarında kesme alanının daha küçük bir alanda tutmak ve gecikme başına düşecek patlayıcı miktarını azaltmak istenmeyen hasarların önlenmesinde yardımcı olabilir.

4.4. Patlama Kaynağının Tünel Tasarımına Göre Yerleştirilmesinden Kaynaklanan Etkilerin İncelenmesi

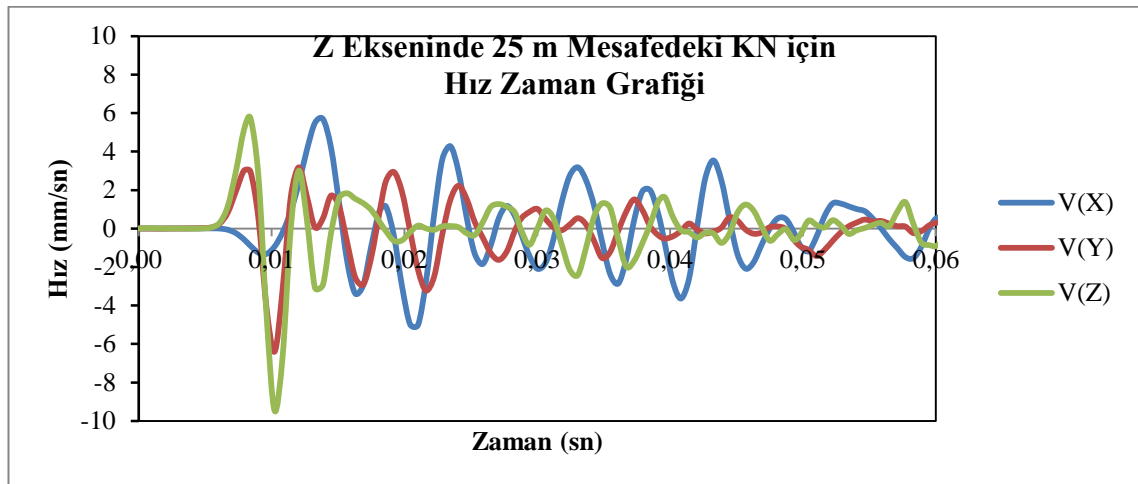
Patlayıcı tünel tasarımına bağlı olarak x ekseninde 2 m^2 , y ekseninde 12 m^2 , z ekseninde 6 m^2 lik alanlara basınç olarak uygulanmaktadır. Bunun yanı sıra Y eksenini için basınç bölgeleri patlatma kaynağının alt ve üstü, Z eksenini için ise basınç bölgeleri patlatma kaynağının iki yan tarafıdır. Ancak X ekseninde yalnızca patlatma kaynağının önünde kazı istikametinde temas eden bir yüzey bulunmakta, ayna yani patlatma istikametinin arka kısmında herhangi bir basınç bölgesi bulunmaz. Zaten bu sebeple patlatma gerçekleştiğinden sonrasında kesme bölgesinin içerisinde bulunan kaya kütlesi X ekseninde serbest olan bu tarafa doğru taşınır. Bu arada taşınan kütle ve hızı oranında momentum etkisiyle ana kütleyle bir itme uygulanır. Dolayısıyla Y ve Z eksenlerinde patlama kaynaklı sarsıntılar simetrik bir etki yaratırken X eksenindeki parçacık hızı için asimetrik bir değişim gözlemlenmiştir.

20 m derinlikli modelde $E=35\text{GPa}$, $\mu=0.2$ malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Yapılan analizin sonuçlarında patlatma kaynağının Y ekseninde 20 m üstü olan yüzey noktası merkez olarak kabul edilerek 25 m X eksenini istikametinde mesafeden parçacık hızı elde edilmiştir. Şekil 4.13'deki grafik incelendiğinde patlatma noktasının tam üzerinden alınan parçacık hızı grafiğine benzer özellik taşıdığı görülmektedir. Y ve X ekseninde baskın parçacık hızı oluşturulmuş Z eksenindeki parçacık hızı ise neredeyse hiç görülmemiştir. Bunun sebebi kontrol noktasının direkt patlatma istikametinden okunması dolayısıyla Z ekseninde simetrik olarak yük uygulayan iki karşılıklı basınç yüzeyinin arasında etkilenmeyen bölgede kalmış olmasıdır. Bu noktada bulunan maksimum parçacık hızı $PPV=9,01 \text{ mm/sn}$ değerindedir.



Şekil 4.13. X yönünde 25 m mesafeli kontrol noktası için parçacık hızı

Patlatma kaynağına Z ekseninde 25 m mesafedeki diğer kontrol noktasından alınan parçacık hızının Şekil 4.14’de verilen grafiğinde ise Y ve X eksenindeki hızların bir önceki kontrol noktasında görüldüğü kadar yüksek görülmesine de yakın değerlerde olduğu bunun yanında Z ekseninde ciddi bir hız değişimi görüldüğü tespit edilmiştir. Maksimum parçacık hızı $PPV=11,47$ mm/sn olarak elde edilmiştir. Maksimum Parçacık hızının düşey ve yatayda aynı mesafedeki fakat farklı bir istikametteki kontrol noktasında göre daha büyük çıkmasını sağlayan Z eksenindeki hızın değişimi dolayısıyla patlayıcı şarjların şekline bağlı olarak kontrol noktasının konumudur.



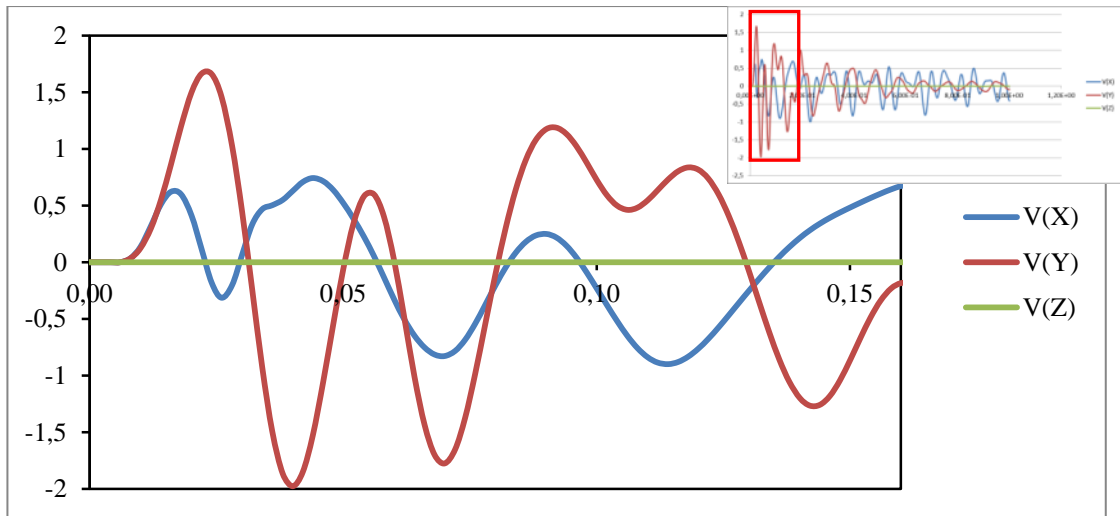
Şekil 4.14. Z yönünde 25 m mesafeli kontrol noktası için parçacık hızı

Kısaca, aynı mesafede aynı patlayıcı yükünün uygulandığı patlatma durumunda daha büyük basınç yüzeyine sahip eksende daha yüksek parçacık hızı elde edilmektedir. Yani patlatma kaynağına göre aynı mesafedeki yan istikametlerde bulunan yapılar patlatma istikametinde bulunan yapılara göre daha yüksek hasar riskine sahiptir.

4.5. Kaya Zemin Üzerinde Toprak Örtü Bulunması

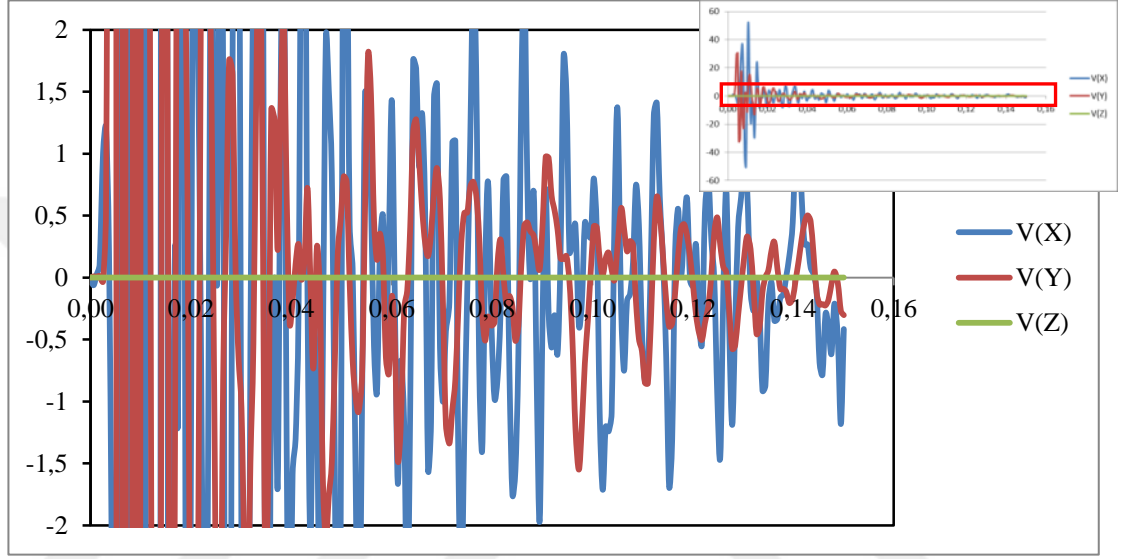
Bu kısımda zemin tek çeşit zemin çeşidinden farklı, doğal olarak karşılaşılan ihtimali yüksek olan zemin modelleri üretilerek farklı zemin çeşitlerinin yüzeyde oluşan parçacık hızına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla daha önce incelenmiş modellerde yüzeye en yakın 5 m yüksekliğindeki kısmın toprak olduğu varsayılmıştır. Modellemede zemin malzemesinin elastisite modülü $E=100$ GPa, Poisson oranı $\mu=0,3$ olarak alınmıştır.

Yapılan simülasyonların analiz sonuçlarına bakıldığında yüzeyde oluşan parçacık hızının çok düşük değerlere indiği görülmüştür. Şekil 4.15'deki grafikte gösterilen PPV değerleri yine patlatma kaynağının yüzeye 20 m mesafede olduğu sert malzeme özelliklerinde normal şarj ile patlatma yapılmış durum olup yalnızca yüzeye yakın son 5m mesafedeki katman toprak olarak alınmıştır. Şekil 4.16'da görülen grafikte ise herhangi bir katmanı olmayan tek çeşit zemin simüle edilmiştir.



Şekil 4.15. Toprak örtülü modelde elde edilen parçacık hızı

Şekil 4.15'deki görülen kısım 1 saniye süren parçacık hızı grafiğinin 0,16 saniye kadar olan bölümüdür. Bu analizdeki yüzeyden 5 m derinliğe kadar toprak tabakası bulunan modelde elde edilen maksimum parçacık hızının başlangıçta 2,07 mm/sn olduğu 1 sn sonunda ise yaklaşık olarak 0,5 mm/sn civarında devam ettiği görülmektedir.



Şekil 4.16. Toprak örtüsü olmayan modelde elde edilen parçacık hızı

Şekil 4.16'da ise 20 m boyunca tek kat sert zemin çeşidi bulunan modele ait parçacık hızlarının gerekli kıyaslamaların yapılabilmesi amacıyla 0,2 mm/sn değerine kadar olan bölümü alınmıştır. Tek katmanlı modelde elde edilen maksimum parçacık hızı $PPV=53$ mm/sn civarındadır. Görüldüğü üzere zemin malzemesinin normalkaya zemin olması ile üzerinde toprak bir katman bulunması arasında parçacık hızı konusunda büyük bir fark bulunmaktadır. Buna karşın yapılan analizlerde parçacık hızlarının zamana bağlı olarak azalımı incelendiğinde tek katmanlı zemin tipinde 0,16 saniye içerisinde 60 mm/sn civarında olan parçacık hızı 1,2 mm/sn değerlerine kadar inmektedir. Toprak örtülü zemin modelinde ise 0,16. sn.lerde parçacık hızının 2 mm/sn civarından 1,3 mm/sn değerlerine ancak indiği, 1 sn.lik analiz sonunda ise yaklaşık 0,5 mm/sn şeklinde devam ettiği görülmektedir.

Çizelge 4.1’de farklı modeller için katmanlı zemin yapıları denemeleri yapılarak farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bu konuyla ilgili olarak kaya zemin malzemesinin 5m civarında bir toprak katman ile örtülü olması durumunda kontrol noktalarından okunan maksimum parçacık hızlarının *PPV* çok önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.

Çizelge 4.1. Kaya zemin ile toprak örtülü zeminlere ait *PPV* değerleri

MODEL TİPİ	TEK ZEMİNLİ MODELDE OKUNAN PPV	TOPRAK ÖRTÜLÜ MODELDE OKUNAN PPV	ZEMİN KATMANI
Patlatma Merkezi 20 m Derinde Yumuşak Kaya Tipi	34,52 mm/sn	2,68 mm/sn	15 m Yumuşak Kaya 5m Toprak
Patlatma Merkezi 20 m Derinde Sert Kaya Tipi	61,05 mm/sn	2,07 mm/sn	15 m Sert Kaya 5m Toprak
Patlatma Merkezi 50 m Derinde Sert Kaya Tipi	6,36 mm/sn	0,505 mm/sn	50 m Sert Kaya 5m Toprak
Patlatma Merkezi 50 m Derinde Sert Kaya Tipi	6,36 mm/sn	3,76 mm/sn	25 m Sert kaya 25 m Toprak
Patlatma Merkezi 50 m Derinde Sert Kaya Tipi	6,36 mm/sn	0,55 mm/sn	25 m Sert Kaya 20 m Orta Kaya 5 m Toprak

Bunun yanında kontrol noktalarından alınan *PPV* değerleri incelendiğinde 50 m derinlikte patlatılan modellerde tek malzemeli zeminlerde görüldüğü gibi en yüksek değer patlama noktasının tam üzerinde olmadığı, farklı kontrol noktalarından daha yüksek *PPV* değerlerinin alınabildiği görülmüştür. Örneğin patlama yükünün uygulandığı alan üzerinde 25 m sert kaya 25 m toprak bulunan modelde 9 adet kontrol noktasından alınan *PPV* değerleri Çizelge 4.2’de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Toprak örtülü modelde kontrol noktalarından alınan *PPV* değerleri (mm/sn)

<u>KN1</u> 3,7649	<u>KN2</u> 4,6347	<u>KN3</u> 4,1592
<u>KN4</u> 4,473	<u>KN5</u> 3,7936	<u>KN6</u> 3,6353
<u>KN7</u> 4,1183	<u>KN8</u> 3,7685	<u>KN9</u> 3,6679

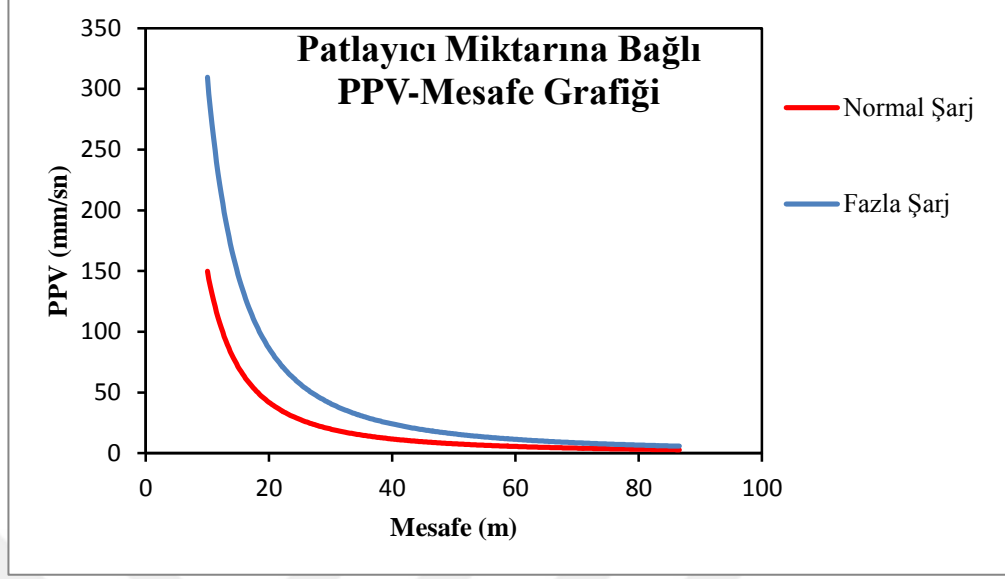
KN1 patlatma noktasının tam üzeri, sağa doğru sıralanan noktalar x ekseninde 25'er m., aşağı doğru sıralanan noktalar z ekseninde 25'er m. mesafeli olarak kontrol noktası şeklinde konumlandırılmıştır. Çizelge 4.2.ye göre kaya zemin üzerindeki toprak katmanı parçacık hızını maksimum değer olarak düşürmekle birlikte maksimum parçacık hızının daha geniş bir alanda etkili olmasına neden olduğu görülmüştür.

Ayrıca zemin üzerinde toprak gibi çok düşük elastisite modülüne sahip ve gevşek malzemeler 5 m gibi düşük kalınlıktaki katmanlar olarak karşılaşıldığında sarsıntıyı azaltacak etkilere sahip olmasına karşın, yüzeyden derinlerine doğru gidildikçe azalım etkisi düşmekte ayrıca yapı frekansına daha yakın titreşimlere neden olduğu için tehlikeli durumlar ortaya koymaktadır.

4.6. Patlayıcı Miktarındaki Değişimin Parçacık Hızına Etkisi

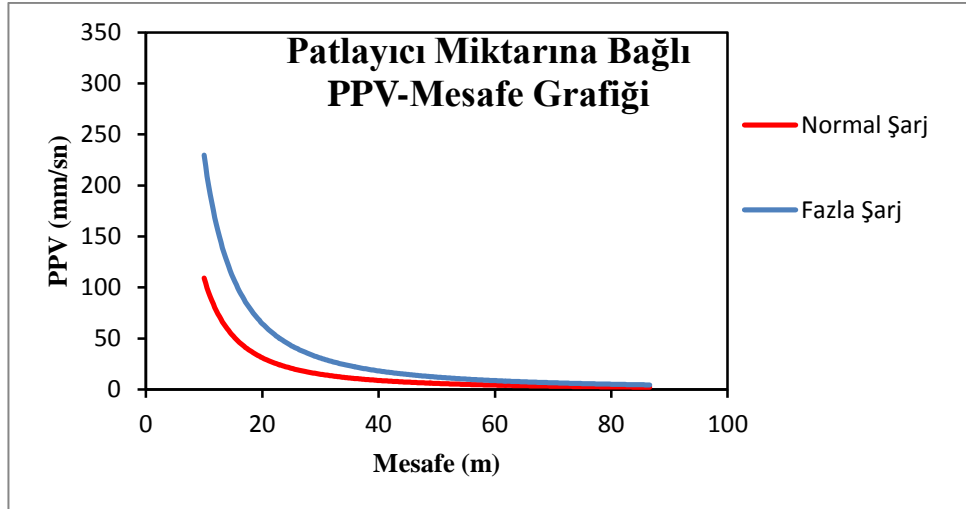
Yer sarsıntısına sebep olan patlatmalarda, patlama yükünü belirleyen en önemli unsur patlayıcı miktardır. Bu kısımda patlayıcı miktarındaki değişimin daha önce yapılmış olan modellerle kıyaslanması yapılmıştır. Zemin özelliklerinde herhangi bir değişime gidilmediğinden dolayı hız zaman grafiğinin genel şeklinde, sönümlenme sürecinde büyük farklar görülmemektedir. Patlayıcı miktarındaki değişimin daha iyi gözlenebilmesi, aynı modellerde aynı kontrol noktalarından parçacık hızları elde edilmiştir.

Sert zemin çeşidinde yapılan analizlerde 11 farklı kontrol noktasında ve farklı derinlikli 3 modelden alınan maksimum parçacık hızları okunarak genel değişim eğilimi şekil 4.18'deki grafikte gözlemlenmiştir.



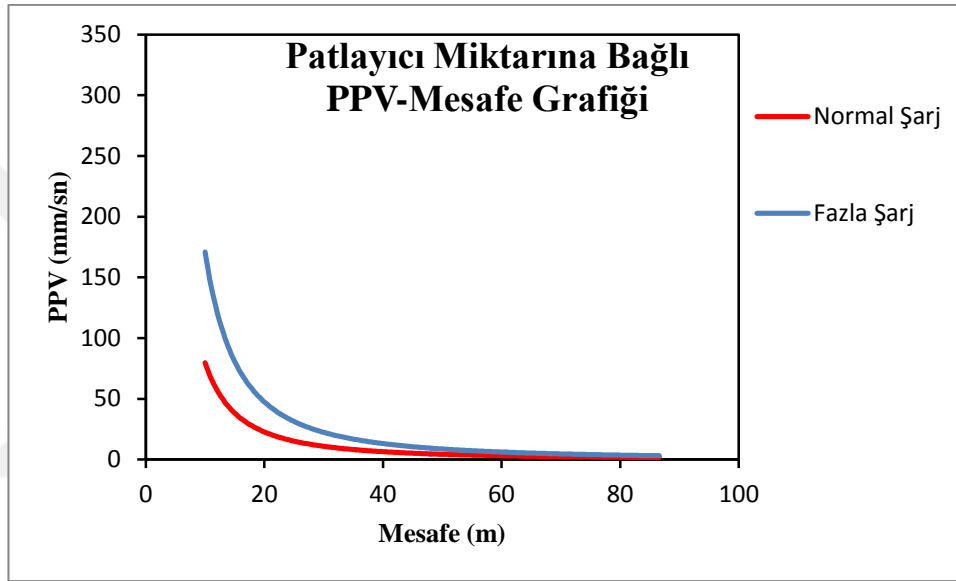
Şekil 4.17. Sert zemin malzemeli model için şarj miktarına göre PPV

Sert kaya zemin malzemesine ($E=60$ GPa) sahip modellerde uygulanan tüm analizler orta sert zemin malzemesine ($E=35$ GPa) sahip modellerde ve yumuşak zemin malzemesine ($E=15$ GPa) de uygulanmış elde edilen parçacık hızlarının mesafeye bağlı değişimi Şekil 4.18’de sunulmuştur.



Şekil 4.18. Orta sert zemin malzemeli model için şarj miktarına göre PPV

Aynı yöntemle yumuşak zemin için elde edilen parçacık hızlarının mesafeye göre değişim grafiği Şekil 4.19’da verilmiştir. Kesme bölgesinde kullanılan patlayıcı miktarı 19,2 kg ağırlığından 35,6 kg ağırlığına çıkarılmıştır. Genel olarak grafikler değerlendirildiğinde patlayıcı miktarının mesafeye oranla maksimum parçacık hızını değiştirdiği görülmektedir. Parçacık hızının yükseliş oranı normal şarjlı deliklerin ürettiği parçacık hızına benzer olarak yaklaşık 2 kat farkla büyümüştür.



Şekil 4.19. Yumuşak zemin malzemeli model için şarj miktarına göre PPV

4.7. Eşdeğer Elastik Sınır Yönteminin Zemin Özelliklerine Göre İrdelenmesi

Patlama yükünün tanımlanması aşamasında patlama basıncından bahsedilmiştir. Patlama basıncı patlayıcı maddenin infilakı sonucunda oluşan basınçtır. Dolayısıyla patlama basıncı isminden de anlaşılacağı tamamen patlayıcı maddenin yanma hızı, yoğunluğu, infilak sonrasında çıkan gazların özgül ısı oranı gibi değişkenlere bağlıdır.

Patlama basıncının imla haznesi duvarlarına etkisi en yüksek olduğu durumda toplam basıncının yarısı olarak hesaplanmıştır. Eğer patlayıcı madde ile imla haznesi sıkı sıkıya doldurulmamışsa bu oran patlayıcı madde çapı ile delik çapının farkı oranında azalır.

gösterir. Bu süreçte de henüz kaya malzemesi özelliklerinin patlama yükünün tepe değerine ulaşana kadar bir etkisi olmamaktadır.

Patlama yükünün genişleme evresindeki değişimi ideal gaz denklemi ile ilişkilendirilmiştir. Dolayısıyla imla haznesinin genişlemesi ve çatlak oluşumunun sürecine bağlıdır. Bu evreden itibaren imla haznesi duvarlarına uygulanan basıncın değişimi kendisi tarafından çevrelenen kaya özelliklerine bağlanmaya başlar. Çünkü daha sert ve sağlam bir zeminde aynı miktarda patlayıcı maddenin yapacağı genişletme ve çatlatma etkisi ile zayıf bir zeminde görülecek olan genişletme-çatlatma etkisi birbirinden farklı olacaktır. Bu aşamalardan sonra patlama gazlarının imla haznesini tahliyesi ve basıncın sönümlenmesi sürecindeki değişimler kaya kütleindeki çatlakların değişimi ve hazne genişlemesinin boyutlarına bağlı olacaktır.

Lu 1994'de yaptığı çalışmasında imla haznesindeki genişlemeyi aşağıdaki denkleme bağlamıştır.

$$\Delta V(t) = 2\pi r(t)u(t)Ldt + 2L \int_0^{L_a} \omega(\zeta)d(\zeta) + \frac{1}{4}\pi r(t)^2 y(t) \quad (4.1)$$

Burada $r(t)$: zamana göre hazne yarıçapı, $u(t)$: genişleme hızı, $\omega(\zeta)$: çatlak genişliği, L_a :çatlak boyu, $y(t)$:sızıntı deplasmanıdır. Ancak kaya çeşitlerinin elastisite modülü, Poisson oranı gibi yaygın bilinen fiziksel özelliklerinde çok geniş bir aralıktan bahsedilirken kayanın çatlak olarak verebileceği tepkileri hesaplamak çok zordur.

İmla haznesinde oluşan patlama yükünün tespitinden sonra sismik etkilere sebep olan elastik sınırına etkileyen yükün tespiti aşamasına gelinmektedir. Burada elde edilen $P(x,t)$ eğrisi kesme delikleri için farklı, diğer delikler için farklı şekilde hesaplandığı belirtilmiştir. Bu kapsamda kesme deliklerinin patlatılması sonucunda elastik sınırı etkileyen yük aşağıdaki şekilde iletildiği belirtilmiştir.

$$P_e(x, t) = k.P(x, t) \cdot \left(\frac{r_0}{r_1}\right)^{2+\frac{\mu}{1-\mu}} \cdot \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^{2-\frac{\mu}{1-\mu}} \quad (4.2.)$$

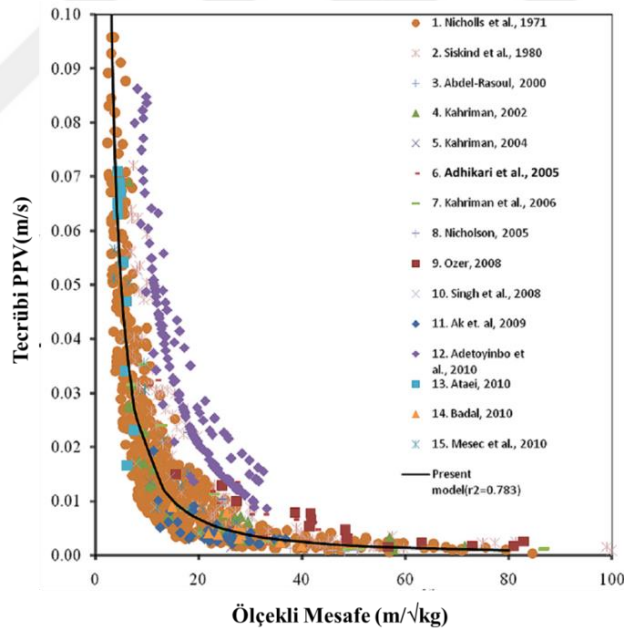
Burada en önemli husus r_0 , r_1 ve r_2 'nin tespitinde ve bağıntının özelliği sebebiyle bu oranların çok hassas olmasından kaynaklanmaktadır. Zanikayev'in (1974) çalışmalarına göre r_1 ve r_2 yani ezilmiş bölge ve çatlamış bölge yarıçapları μ (ortam kaya kütleline ait Poisson oranı), C_p (P dalgasının hızı), σ_c, σ_t (serbest çekme ve basınç gerilmeleri), σ_* (kayanın çok eksenli gerilme altındaki basınç dayanımı), P (radyal patlama yükü), α (gerilme dalgasının azalma katsayısına) değişkenlerine bağlı olarak tanımlanmıştır. Ancak literatürde kaya türlerine ya da malzeme özelliklerine bağlı değerleri bulmakta zorluklarla karşılaşmıştır. Ayrıca tespit edilen bazı verilerin örneğin çok eksenli basınç dayanımının (triaxial compressive strength) aynı malzeme için bile çok geniş bir aralıkta değerlere sahip olduğu görülmüştür. Temsili olarak kullanılmak istenen değerlerin küçük değişimlerinin r_1 ve r_2 büyüklüklerini önemli oranda değiştirdiği tespit edilmiştir. Aynı etkiyle r_1 ve r_2 oranındaki değişimde basınç dalgasının elastik sınıra taşınması konusunda farklı sonuçlar ortaya konulduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak r_1 ve r_2 (Lu 2011) çalışmasında da belirtildiği gibi r_0 imla haznesi yarıçapının katlarına göre hesaplanmıştır.

Kesme deliklerinin patlatılması sonucunda elde edilen patlama yükünün elastik sınıra istenen azalım ile aktarılması yukarıda belirtilen şekilde başarılabilir. Ancak tarama, sınır, durdurma delikleri gibi kesme deliklerinden farklı şekilde çalışan deliklerinin patlatılması sonucundaki yükün elastik sınıra aktarılması konusunda direk olarak arazi faktörleri göz önüne alınmadığı tespit edilmiştir. Patlama yükü $2r_0/L_s$ oranında azaltılarak elastik sınıra uygulanması öngörülmüştür. Burada L_s delikler arası mesafedir. Dolayısıyla elastik sınırdaki yük imla haznesi yarı çapı ile yanyana iki delik arasındaki mesafeye bağlı olacaktır. Kısaca patlatma yapılan malzemenin yük azaltımında direk bir etkisi olmamakta yalnızca başlangıçta patlatma ayna yüzeyinin tasarımını yapan mühendisin zemin faktörlerine göre imla hazne yarıçapını ve delik aralıklarını belirlemesine bağlı olacağından, elastik sınıra etkiyen yükü dolaylı şekilde etkilemektedir.

4.8. Simülasyon Sonucunda Elde Edilen Verilerin Ölçekli Mesafe Yöntemi ile İrdelemesi

ANSYS Workbench yazılımı üzerinde yapılan simülasyon çalışmalarında elde edilen verilerin gerçek verilere uygunluğu önem kazanmıştır. Bu kapsamda sahada yapılan çalışmalardaki zemin özelliklerini birebir simülasyona taşıma fırsatı bulunamadığından mevcut kontrol yöntemleri ile yapılan simülasyonlar kontrol edilmiştir. Bu sebeple en çok kullanılan kontrol yöntemi olan Ölçekli Mesafe yöntemi ile irdeleme yapılmıştır.

Birçok farklı Ölçekli Mesafe eşitliği olduğundan daha önce bahsedilmiştir. Bu Ölçekli Mesafe eşitliklerinden bazılarına göre sahada elde edilen maksimum parçacık hızları Ölçekli Mesafeyle ilişkilendirilerek Şekil 4.20'deki grafikte verilmiştir (Kumar 2016).



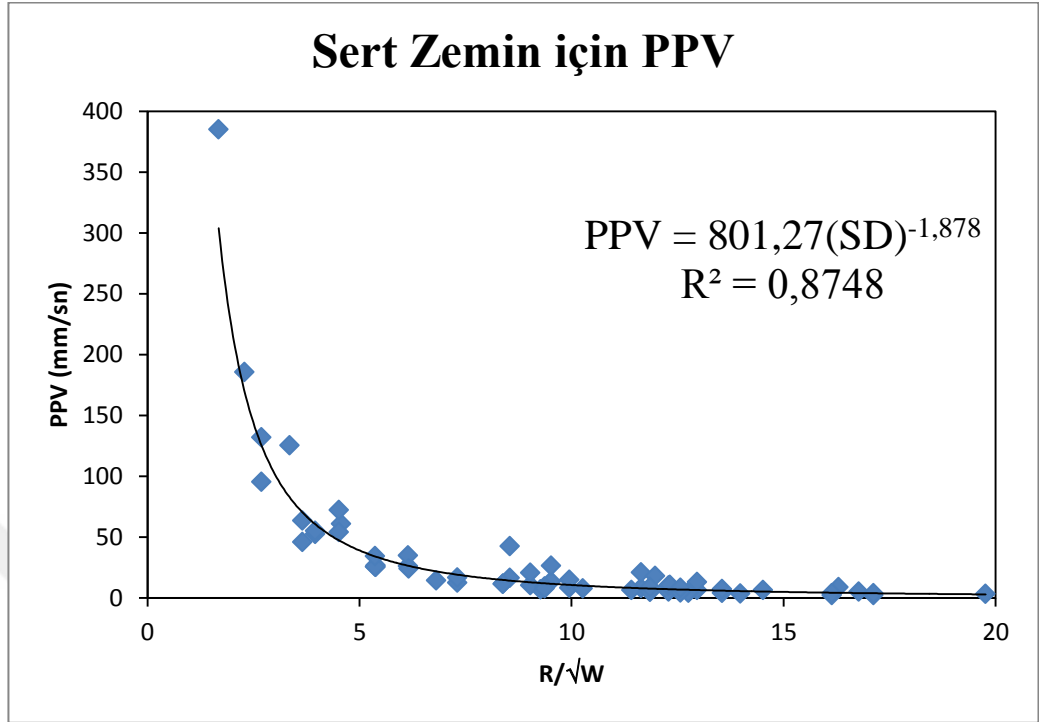
Şekil 4.20. Ölçekli Mesafe eşitliklerine göre ölçülen PPV - $R\sqrt{W}$ grafiği

Ölçekli Mesafe ile ilişkilendirilmiş birçok *PPV* denklemi bulunduğundan en temel ve yaygın olarak bilinen aşağıdaki eşitlik kontrol maksadıyla kullanılmıştır.

$$PPV = K \left(\frac{R}{\sqrt{W}} \right)^{-\beta} \quad (4.3.)$$

Ölçekli Mesafe ile parçacık hızı tahminine yönelik olarak yapılan çalışmaların tamamında K ve β katsayılarının tespit edilmesi gerekmektedir. Zemin-malzeme özelliklerine göre belirlenecek olan K ve β katsayılarının deneme atımları sonrasında en az 30 farklı veri ile oluşturulması durumunda sağlıklı sonuçlar vereceği belirtilmiştir. (Kahriman vd 2000) Bu doğrultuda yapılan simülasyon analizlerin de her bir model için 9 ile 11 arasında farklı mesafelerde kontrol noktaları seçilerek parçacık hızları alınmıştır. Kontrol noktaları 10 m ile 87 m arasında X ve Z yönlerinde yatayda 12,5 m - 25 m boşluk bırakılarak seçilmiştir. Aynı zemin çeşidine bağlı “Maksimum Parçacık Hızı – Ölçekli Mesafe” grafiğini elde edebilmek için aynı zemin özelliklerinin kullanıldığı ve patlatma kaynağının 10 m, 20 m ve 50 m derinlikte olduğu modellerin tamamı kullanılmıştır. Ayrıca patlayıcı madde miktarı yapılan tüm analizlerde fazla şarjlı patlatma tasarımı olarak belirtilen şekilde modele uygulanmış ve yüzeyde elde edilen parçacık hızları okunmuştur. Dolayısıyla her bir zemin çeşidi için 62 adet maksimum parçacık hızı verisi toplanmıştır. Toplanan veriler ile “Maksimum Parçacık Hızı – Ölçekli Mesafe” grafiği oluşturularak zemin malzemeleri için saha sabitleri elde edilmiştir.

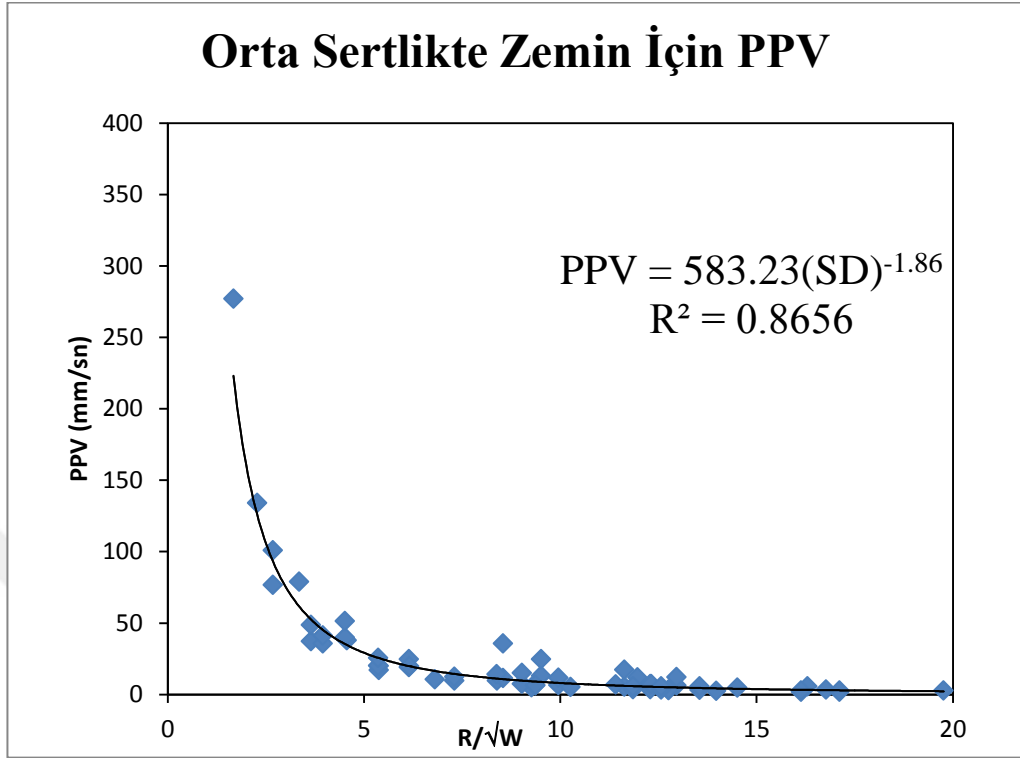
Simülasyonda sert zemin malzemesi için elde edilen parçacık hızları yukarıda belirtilen bağıntıda yerlerine konularak elde edilen “Maksimum Parçacık Hızı – Ölçekli Mesafe” değişimleri Şekil 4.21’deki grafikte verilmiştir.



Şekil 4.21. Sert zemin malzemeli modelde okunan PPV - R/\sqrt{W} grafiği

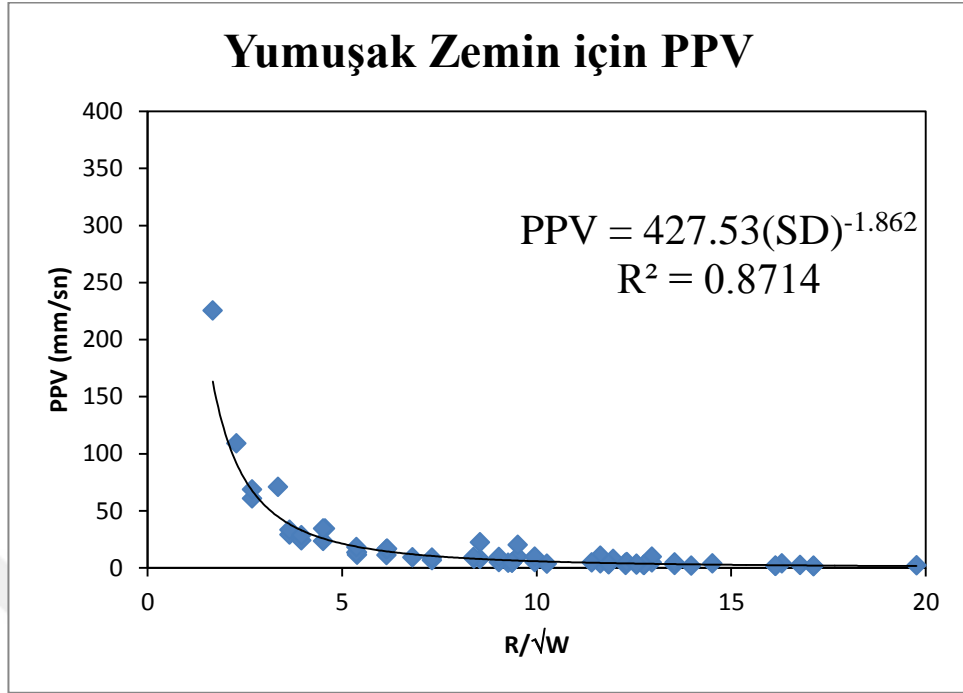
Elde edilen grafiğin üs eğilim çizgisi oluşturularak $K=801,27$ $\beta=1,878$ olarak elde edilmiştir. Oriard (1942) β sabitinin yaklaşık olarak 1,6 civarlarında ve K sabitinin 26-960 arasında değişen değerler alabileceğini önermiştir. Dolayısıyla elde edilen saha faktörleri önerilen değerler içerisinde olduğu değerlendirilmektedir.

Orta sert olarak tabir edilen malzeme yukarıda detaylı şekilde belirtilen modellerde zemin malzemesi olarak atanmış ve yine patlayıcı madde miktarı da artırılarak aynı 62 farklı veri alınmıştır. Elde edilen Şekil 4.22'deki grafiğin üs eğilim çizelgesine bakılarak K faktörü için 583,2 β katsayısı için ise -1,86 değeri elde edilmiştir. Elastisite modülü değeri azaldıkça zemin özelliğine bağlı olan K katsayısının azalım eğiliminde olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4.22. Orta sert zemin malzemeli modelde okunan PPV - R/\sqrt{W} grafiği

Yumuşak zemin malzemesi olarak belirtilen malzeme aynı modellere zemin malzemesi olarak atanmış ve yine aynı 62 maksimum parçacık hızı elde edilmiştir. Elde edilen parçacık hızlarının ölçekli mesafeye göre değişimini gösteren Şekil 4.23'deki grafiğin üs eğilim çizelgesine bakılarak K faktörü için 427,53 değeri elde edilmiştir. Zeminin elastisite modülü daha da azaltıldığında elde edilen K faktörü değerinin azaldığı görülmektedir. β katsayısı için ise 1,862 değeri elde edilmiştir.



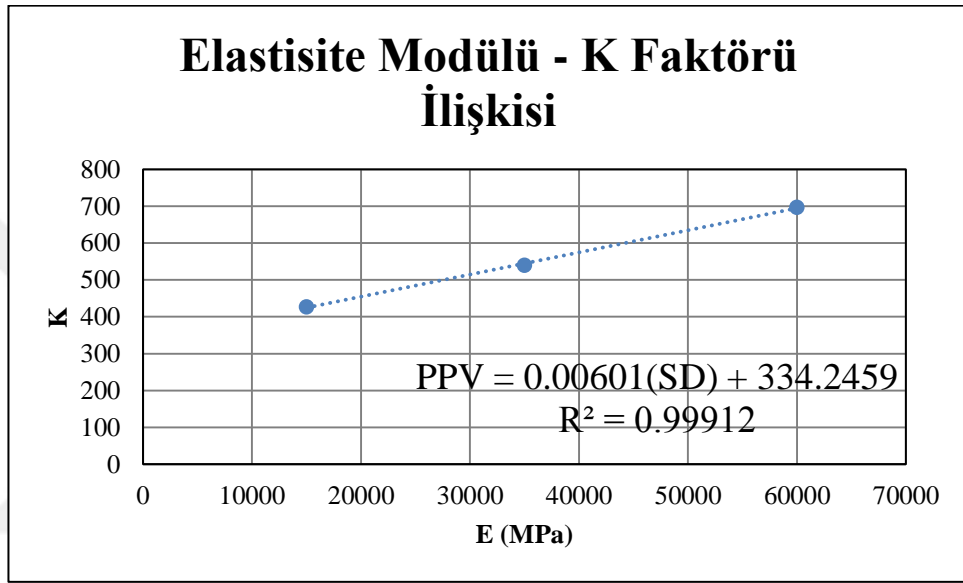
Şekil 4.23. Yumuşak zemin malzemeli modelde okunan PPV - R/\sqrt{W} grafiği

Elde edilen veriler doğrultusunda $R^2=0,70$ 'in üzerinde olması istenen bir özelliktir. Temel kuramlar bölümünde belirtilmiş olan K sabitinin zeminin patlatma gazlarını hapsedme özelliğiyle de ilişkili olarak elastisite modülünün azalmasına uygun olarak azalmış olduğu tespit edilmiştir. Dikkat çekmekte olan bir husus da β saha sabitinin farklı zemin tiplerine rağmen yaklaşık 1,86 olarak tespit edilmiş olmasıdır.

Ölçekli Mesafe ile parçacık tahmini denklemlerinin bir kısmında araştırmacılar tarafından β değerine bir değişken yerine sabit bir sayı verilmiş olması bu durumu açıklayabilmektedir. Kullanılan bağıntıda K sabitinin zemine yayılan sismik enerjiyle ilgili olduğundan, β sabitinin ise mesafenin değişimine oranla azalmasını belirlediğinden bahsedilmiştir (Kazaz 2013).

Bu durumda K sabitini zemin malzemesinin parçacık hızına direk etkileyen özelliklerinden biri olan elastisite modülü ile ilişkilendirmek yanlış bir yaklaşım olmayacaktır. Üretilen modellerde kullanılan zemin malzeme özellikleri elastisite modülü ve Poisson oranına göre belirlenmiştir. Yumuşak zemin malzemesi olarak tarif

edilen zemin malzemesinde elastisite modülü $E=15.000$ MPa, orta sertlikte zemin malzemesinde elastisite modülü $E= 35.000$ MPa, sert olarak tarif edilen zemin malzemesinde ise elastisite modülü $E=60.000$ MPa değerleri kullanılmıştır. Kullanılan zemin malzemelerinin elastisite modülüne oranlar K sabitleri Şekil 4.24'deki tabloda sunulmuştur.



Şekil 4.24. Analiz sonuçlarından elde edilen K - E ilişkisi

Elde edilen K değerleri elastisite modülü değerine göre yukarıdaki şekilde bir grafik çizdirildiğinde aralarında doğrusal bir ilişki olduğu gözükmemektedir. K faktörü Ölçekli Mesafeye göre parçacık hızı tahmin bağıntısında parçacık hızını doğrusal olarak etkileyen, patlayıcı ve mesafeyle alakalı bir ilişkisi bulunmayan bir faktördür. Dolayısıyla K sayısının değişimi zeminin enerjisi parçacık hızı oluşturacak şekilde iletimiyle alakalı olduğu düşünülmektedir. β daha önce de belirtildiği gibi azalımı daha alakalı bir sabittir. Bu bağlamda K değerini zeminin karakteristiğini belirleyen en önemli fiziksel özelliklerden biri olan elastisite modülüne göre ifade etmek gerekirse aşağıdaki şekilde sunulabilir:

$$K = 6,01E(\text{GPa}) + 335 \quad (4.4.)$$

Çizelge 4.3. K faktörünün simülasyon sonucuna ve önerilen denkleme göre değerleri

Elastisite Modülü E (GPa)	K Simülasyon Sonucunda Elde Edilen	K Önerilen Eşitlikten Elde Edilen
15	427	424,4
35	540	544,25
60	697	694,25

K faktörünün yukarıdaki çizelgeye göre elastisite modülüne bağlı olarak hesaplanması sonucunda çok yakın değerler elde edilebilmektedir.

Bu durumda sahadaki parçacık hızını elastisite modülüne göre tahmin etmek için aşağıdaki bağıntısından yararlanılabileceği önerilmektedir.

$$PPV = (6,01 E + 335) \left(\frac{R}{\sqrt{W}} \right)^{-1,86} \quad (4.5.)$$

4.9. Simülasyonda Patlatma Kaynaklı Sarsıntıya Maruz Bırakılacak Tarihi Yapı Örneğinin İncelenmesi



Şekil 4.25. Lalapaşa Camisi yandan görünüm fotoğrafı (www.cihan.com.tr)

Erzurum Lala Mustafa Paşa Cami, Sadrazamlık yapmış bir Osmanlı devlet adamı olan ve 1570 yılında Kıbrıs serdarlığı sırasında gösterdiği başarısından dolayı "Kıbrıs Fatihi" olarak da anılan "Lala" ünvanlı, (şehzadeliğinde II. Selim'e lalalık etmiş olmasından dolayı) Mustafa Paşa tarafından, Erzurum'da Beylerbeyi olarak görev yaptığı dönemde 1562 yılında yaptırılmış bir Osmanlı eseridir (Wikipedia).

Mimar Sinan'ın Osmanlı mimarbaşı olması sebebiyle tutulan kayıt ve listelerde Erzurum Lala Mustafa Paşa Cami Mimar Sinan'ın eseri olduğu kayıt edilmiştir. Günümüzde yalnızca cami kısımları kalmış olan yapının başlangıçtaki hali külliye olup saray ve sübyan mektebi kısımları zaman içerisinde yıkılmıştır.

Erzurum tarih boyunca birçok kez düşman istilasında kalmış olmasında dolayı istilacıların kovulması esnasında yıkılmış, yağmalanmış ve eserlere hasarlar verilmiştir. Rus ve Ermeni istilacılar tarafından caminin çinileri, mermer minberi kırılmış ve sökülmüş taşınabilir eserler de yağmalanarak götürülmüştür.



Şekil 4.26. Lalapaşa Camisi genel görünüm fotoğrafı (www.wowturkey.com)

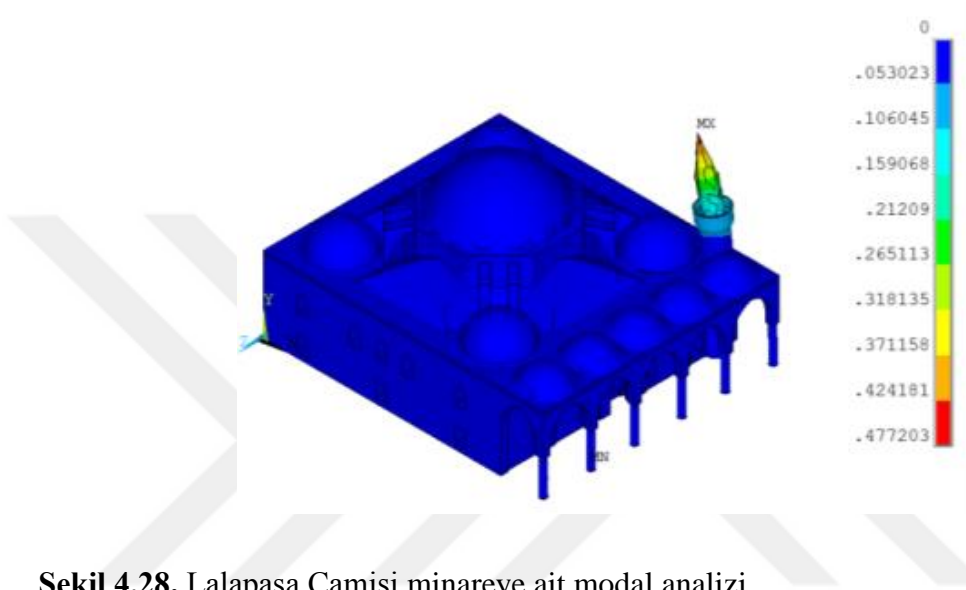
Erzurum Lala Mustafa Paşa Cami, inşasında merkezi plan tipine bağlı kalındığından merkezde büyük bir kubbe bulunmaktadır. Büyük kubbe ortada dört payeye oturtulmuştur. Merkezi kubbe dört yandan yarım çapraz tonozlarla desteklenir. Köşelerde yer alan küçük kubbeler esere bütünlük kazandırır.(Şekil 4.26.) Doğu, Batı ve Kuzey tarafta açılan dört kapısı bulunur. Kuzey taraftaki kapı cümle kapısıdır. Caminin Kuzey-Batı köşesinde bölgesel ve tektonik özellikte, kısa boyda bir minare mevcuttur. Minaresi kesme beyaz taştan yapı ve kırmızı taş bileziklerle süslenmiştir. Sivri kemerli pencere alınlıklarında yazı ve nebati kompozisyonlu Şekil 4.27'deki örnekler gibi süslemelere yer verilmiştir. Camide çini alınlıklar haricinde halı, şamdan ve hat örnekleri mevcuttur. İç kısımdaki çiniler günümüze kısmen ulaşmıştır. Ancak dış kısımdaki çiniler tahribattan ötürü günümüze ulaşamamıştır.



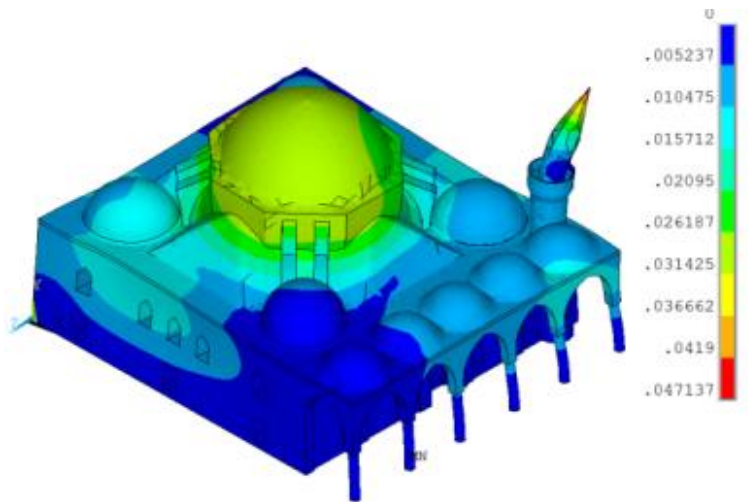
Şekil 4.27. Lalapaşa Camisi'nin mimari detaylar ve iç görünüm (Wikipedia)

Erzurum Lalapaşa Camisinin ANSYS programında analiz edilebilmesi için üretilmiş olan modeller kullanılarak ilk başta yapının tepkilerini değerlendirebilmek amacıyla frekanslarına bakılmıştır. Bu maksatla ANSYS APDL yazılımı üzerinde modal analiz yaptırılmıştır. Modal analiz 15 farklı modda incelenmiş temel etkileri gösterecek olan modlar üzerinde durulmuştur. Üzerinde durulan x, y, z temel yönlerinde xz bileşke şeklinde ve minareye ait frekansın belirlenmesi için incelenen modlar olmuştur.

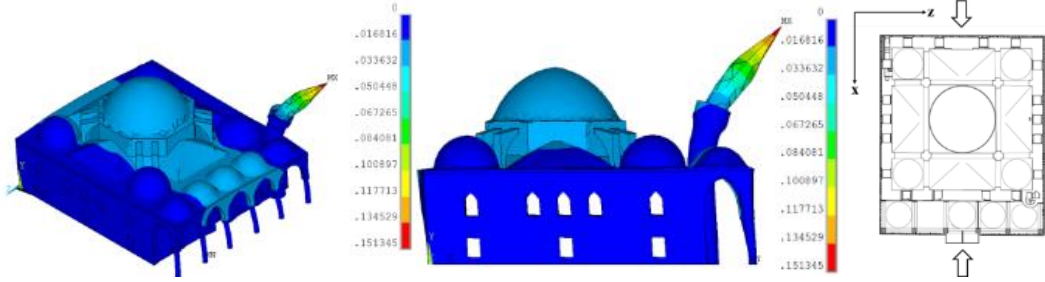
Modal analiz ile minarenin yapı frekansı incelendiğinde 8,02 Hz olarak tespit edilmiştir. En tehlikeli deformasyonun minarede oluşması dolayısıyla ilk hasar görecek yerlerden bir olabileceği düşünülmektedir. Yapının minareye yönelik modal analizinin gösterimi Şekil 4.28’de sunulmuştur.



Şekil 4.29’da Y yönündeki (düşey) modda yapılan analizde yapı frekansı 13,44 Hz olarak elde edilmiştir.

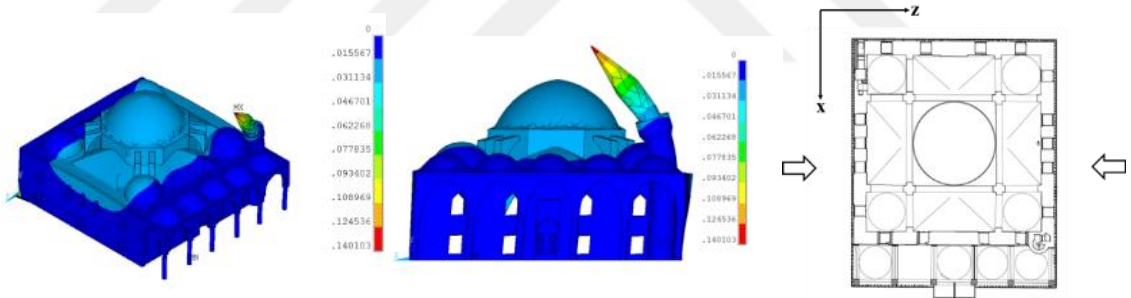


Şekil 4.30'da görüle modda (yatay) yapıya X yönünde etki edilmiş yapı frekansı 9,56 Hz olarak hesaplanmıştır.



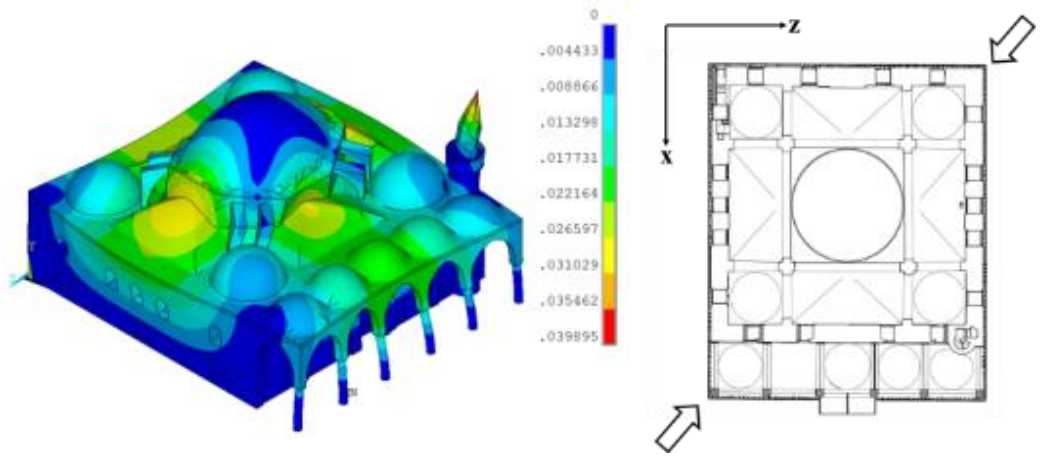
Şekil 4.30. Lalapaşa Camisi X yönünde modal analizi

Şekil 4.31'de gösterilen modda yapıya Z yönünde (yatay) etkide bulunularak etkisi gözlenmiş ve yapı frekansı z yönünde 9,46 Hz olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.31. Lalapaşa Camisi Z yönünde modal analizi

Son olarak Şekil 4.32'de yapıya XZ bileşke yönünde etki eden bir modda maruz bırakılarak yapılan modal analizde yapının frekansı 10,72 Hz olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.32. Lalapaşa Camisi XZ bileşke yönünde modal analizi

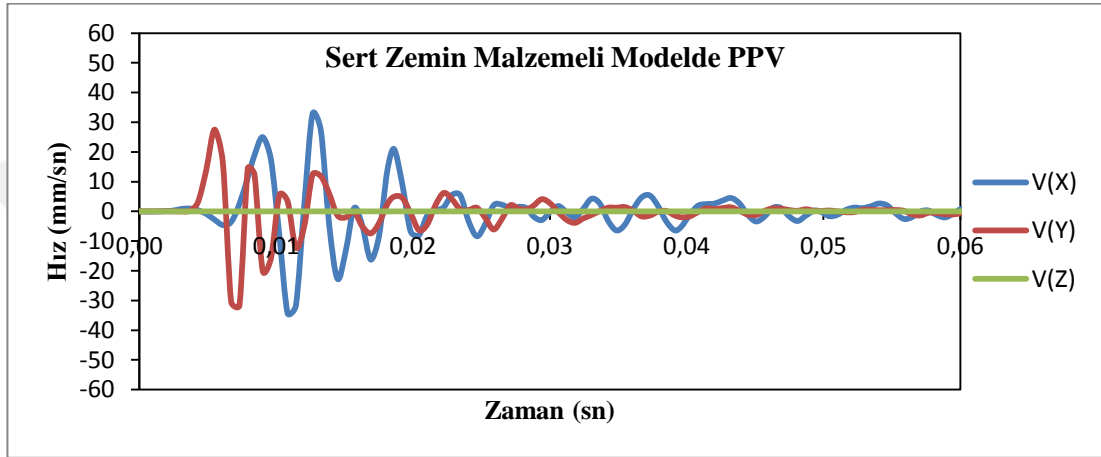
4.10. Lalapaşa Camisinin Patlatma Kaynaklı Yer Sarsıntısı Etkisinde Dinamik Analizi

Erzurum'da bulunan tarihi yapı örneklerinden Lalapaşa Camisinin modal analizi tamamlandıktan sonra patlatma kaynaklı yer sarsıntıları etkisinde oluşabilecek durum ve hasarları ortaya koymak için dinamik analizler yapılmıştır. Analiz için muhtemel iki senaryo göz önüne alınmıştır. İlk senaryoda zemin tipinin sert malzeme olduğu değerlendirilerek yüzeyden 20 m derinlikte patlatma kaynağı olan bir kazı faaliyetinden kaynaklanan yüzey sarsıntısı yapıya uygulanmıştır. İkinci senaryoda daha düşük parçacık hızı oluşturacak olan yumuşak zeminli modelde patlatma yapılmıştır.

4.10.1. Hasar kriteri üzerinde PPV ile Lalapaşa Camisinin incelenmesi

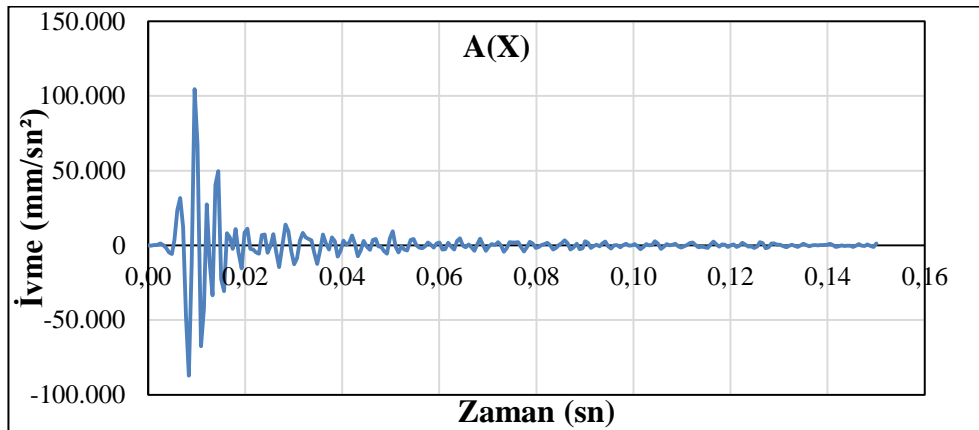
Sert malzemeli modelde elde edilen maksimum parçacık hızının $PPV=53,09$ mm/sn olduğu değerlendirilerek USBM-RI 8507 ve DIN4150-3 (1999) hasar kriterlerine göre hasar olacağı beklenmektedir. Alınan parçacık hızları ANSYS APDL programı vasıtasıyla yapıya uygulanarak yapıda oluşturduğu şekil değişikliği, çekme gerilmeleri ve çatlama durumunun olup olmayacağı incelenmiştir.

Yapıya uygulanan parçacık hızı grafiği Şekil 4.33’de verilmiştir. Yapılan yüklemde kullanılan parçacık hızına ait grafik incelendiğinde en büyük değerlerin X ve Y yönünde olduğu görülmüştür. Y yönünde statik olarak ölü yükün bulunduğu taşımanın bu istikamette devam ettiği değerlendirilerek en kritik etkinin X yönünde olacağı düşünülmüştür.

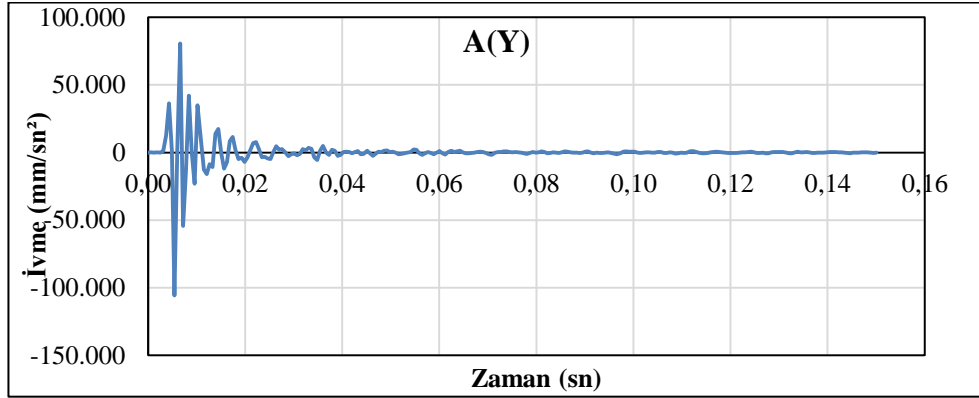


Şekil 4.33. Cami modeline birinci senaryoda uygulanan parçacık hızı

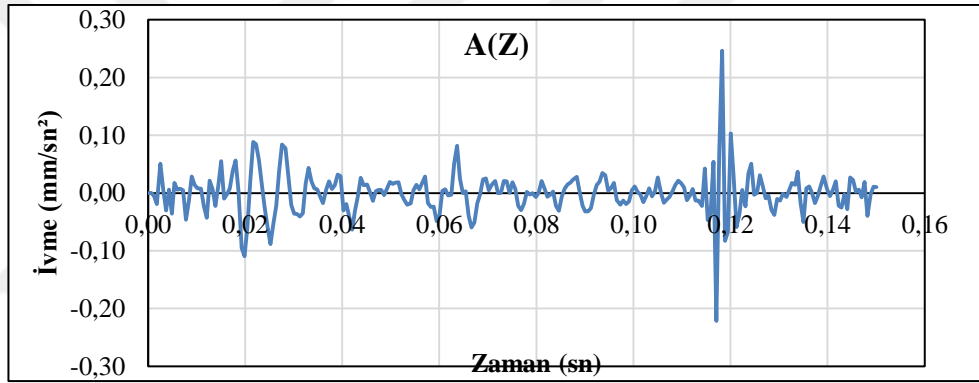
Patlatma kaynağının yüzeyde oluşturduğu parçacık hızlarından elde edilerek modele uygulanan ivme-zaman grafikleri şekil 4.34, 4.35. ve 4.36’da verilmiştir.



Şekil 4.34. Cami modeline birinci senaryoda uygulanan X yönündeki ivme



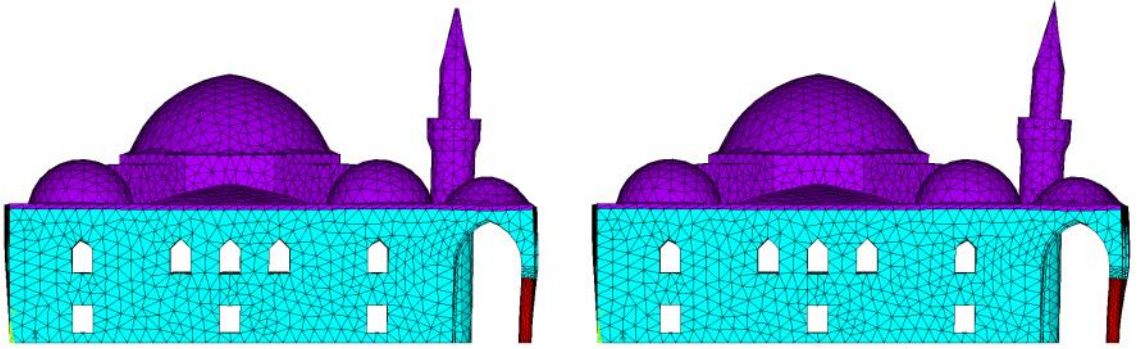
Şekil 4.35. Cami modeline birinci senaryoda uygulanan Y yönündeki ivme



Şekil 4.36. Cami modeline birinci senaryoda uygulanan Z yönündeki ivme

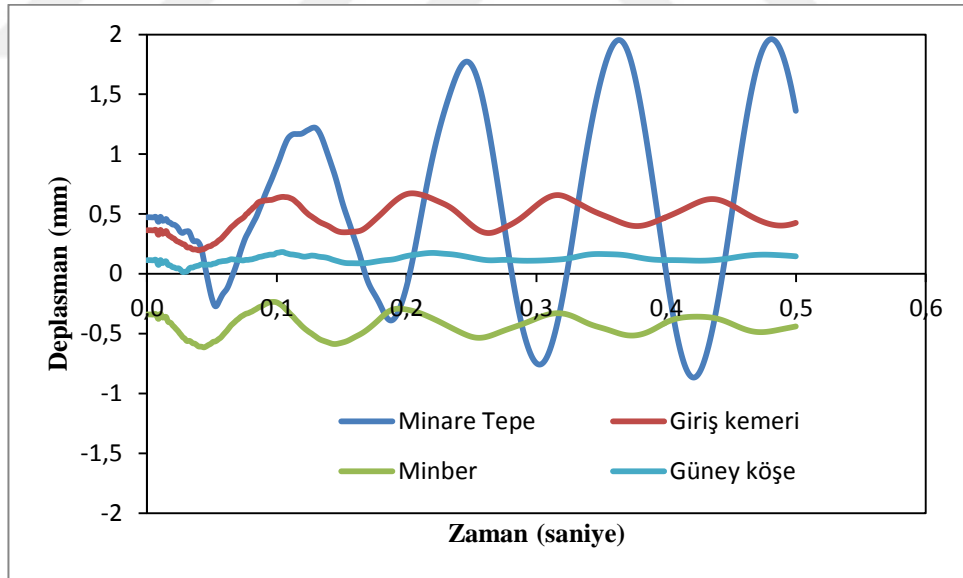
Uygulanan ivme değerlerinin X ve Y yönünde çok yüksek değerler olduğu görülmüştür. Yapının bu ivmelenme altında çok fazla hasar görmemiş ya da ayakta kalabilmiş olmasının sebebi ise yapıya patlama sonucunda çok kısa süreli olarak şok dalgasının etkimiş olmasıdır. Bir deprem etkisinde olduğu gibi 30-40 saniye gibi uzun süreli bir sarsıntı yerine çok daha kısa süreli ve yüksek ivmeli bir sarsıntı uygulanmaktadır.

Yapıda meydana gelen şekil değişikliği Şekil 4.37'de gösterilmiştir. Aşağıdaki şekle göre en yüksek bozulma minarenin şeklinde ve X yönünde gerçekleşmiştir.



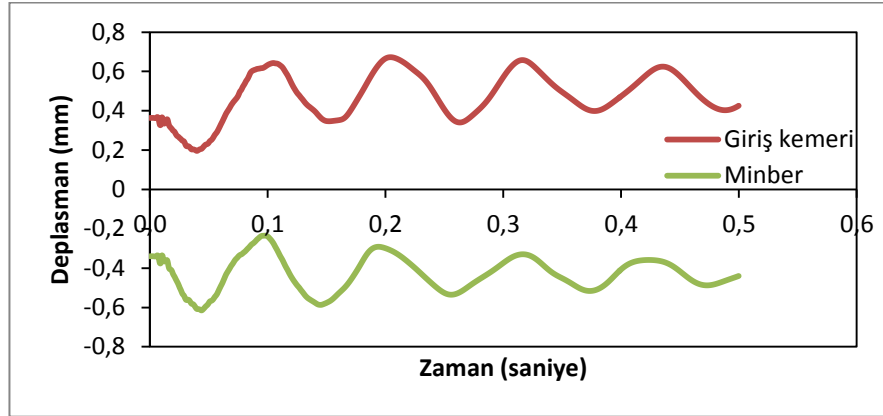
Şekil 4.37. Cami modeli birinci senaryoda şekil değişikliği

Yapı analizi tamamlandıktan sonra oluşan deplasmanların yüksek olabileceği noktalardan yer değiştirme değişimlerini gösterir çıktılar alınıp yukarıdaki grafikte gösterilmiştir. Şekil 4.38'deki grafikte en yüksek yer değiştirmenin yaklaşık -1 ile 2 mm arasında değişen minarenin ucunda olduğu görülmektedir.



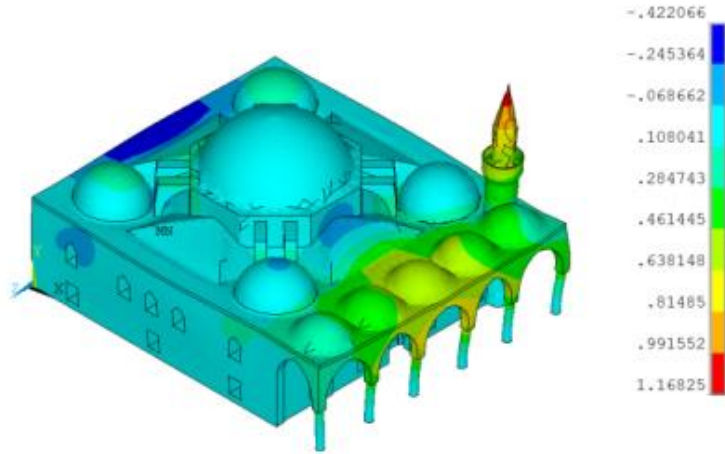
Şekil 4.38. Cami modeli birinci senaryoda kritik noktaların yer değiştirmeleri

Giriş kemiği şeklinde belirtilen nokta yapının X yönünde başlangıcı, minber üstünün de yapının X yönündeki son hattı olarak değerlendirildiği takdirde Şekil 4.39. da görülen iki yer değiştirme arasındaki fark çekme gerilmelerine ve çatlaklara sebep olmaktadır.

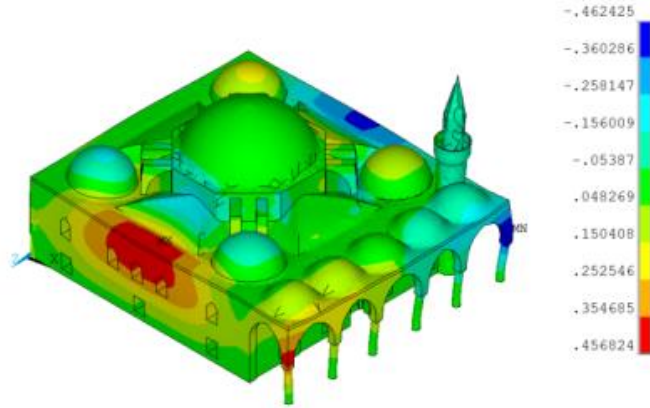


Şekil 4.39. Cami modeli birinci senaryoda aynı istikametteki iki noktanın yer değiştirmeleri

Yapının X ve Z yönündeki yer değiştirmeleri incelenmiştir. Şekil 4.40'da Z yönündeki yer değiştirmelerin çok daha düşük olduğu görülmektedir. Şekil 4.41 incelendiğinde X yönündeki en yüksek yer değiştirmenin minarede, kemerlerin bulunduğu giriş kısmında ve minber kısmında olduğu görülmektedir.

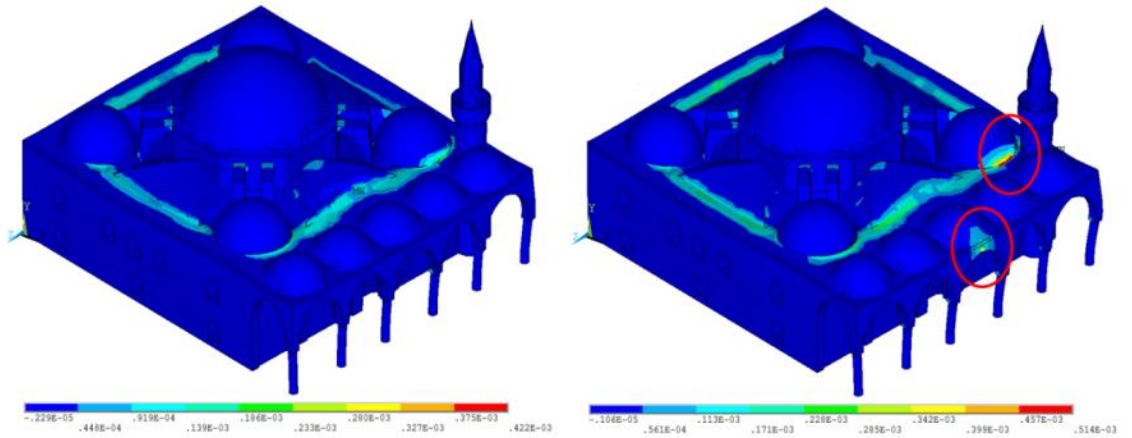


Şekil 4.40. X Yönünde yer değiştirmeler



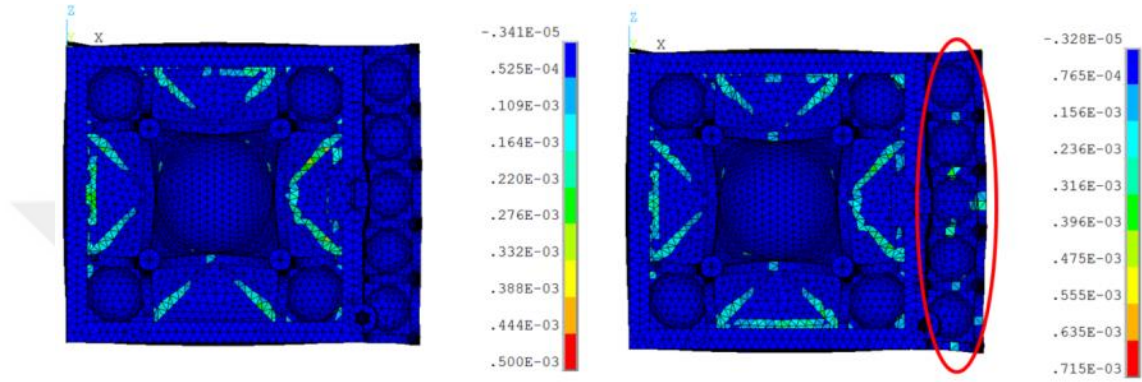
Şekil 4.41. Z Yönünde yer değiştirmeler

Yapıda meydana gelen yer değiştirmelerden sonra meydana gelen çekme birim şekil değiştirmeleri incelenmiştir. Şekil 4.42’de sol tarafta yapının kendi yüklemeleri ölü yük ve benzeri sebeplerle meydana gelen birim şekil değiştirmeleri görülmektedir. Sağ tarafta ise yapının titreşim anında çekme birim şekil değiştirmelerini göstermektedir. Yapının mevcutta zaten çekme birim şekil değiştirmelerine maruz kalan yerlerinde birim şekil değiştirme değerlerinde artışın olduğu aynı zamanda da mevcutta önemsenerek birim şekil değiştirme bulunmayan giriş kapısı üzerindeki kemer bölgesi ile minarenin yapıya birleşim yerinde yüksek çekme birim şekil değiştirmelerine ulaşıldığı görülmektedir.



Şekil 4.42. Cami modeli birinci senaryoda meydana gelen birim şekil değiştirmeleri

Yapının altını gösteren Şekil 4.43’de birim şekil değiştirmelerinin özellikle giriş kısmında bulunan kemerlerin ve küçük kubbelerin olduğu bölümde yükseldiği görülmektedir. Bu sebeple hasar görebileceği değerlendirilen noktalardan biri de giriş bölümündeki kemerlerin orta noktalarıdır.

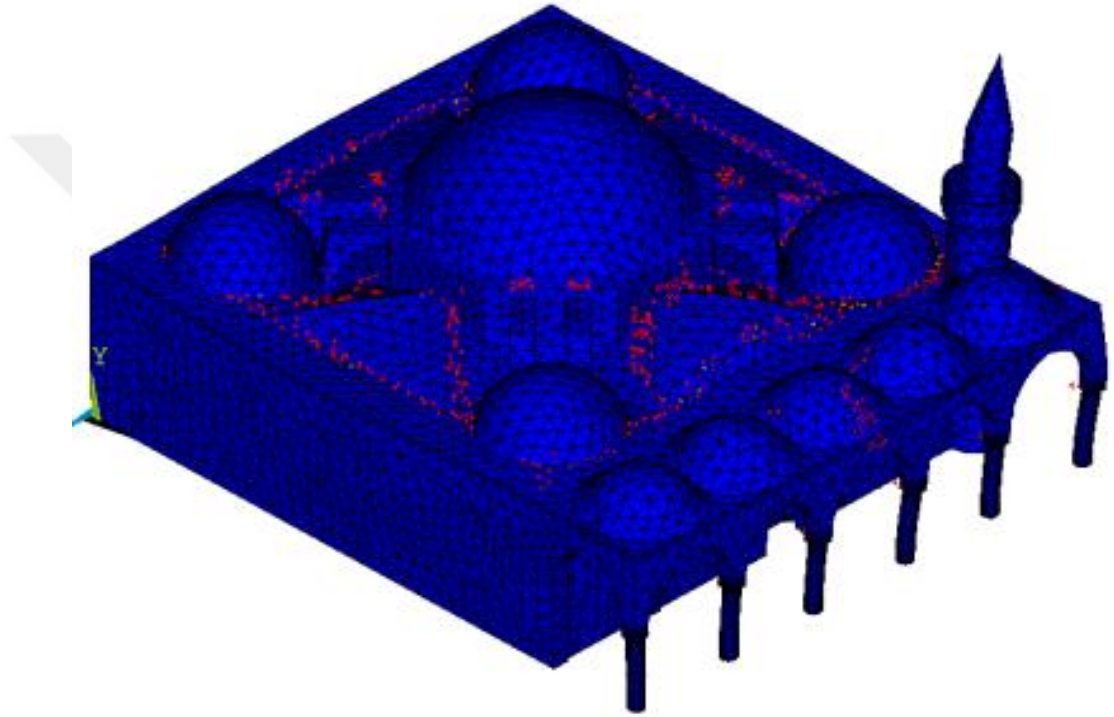


Şekil 4.43. Cami modeli birinci senaryoda meydana gelen birim şekil değiştirmeleri alttan görünüm

Çekme birim şekil değiştirmeleri ANSYS programının sonuç grafiklerinde incelendiğinde kritik olabileceği değerlendirilen yerlerden minarenin ana binaya bağlandığı noktada çekme birim şekil değiştirmesinin (düğüm noktalarında) $0,66 E^{-3}$ değerine, kemer bölgesindeki çekme birim şekil değiştirmesinin ise $0,39 E^{-3}$ değerine ulaştığı görülmüştür.

Son olarak yapıda oluşan hasarların kontrolü için ANSYS programında bulunan “cracks and crushing” bölümünden faydalanılarak oluşan çatlakların yerleri ve durumları hakkında bilgi edinilmiştir. Yukarıdaki özellikle birim şekil değiştirme durumlarını gösteren şekiller incelendiğinde yapının kendi ölü yükü altında bile bir miktar birim şekil değiştirme durumunda kaldığı ve bu sebeple tonozların çapraz birleşimleri ile dört küçük kubbe arasında kalan bölgeler hassas olarak değerlendirilebilmektedir. Zaten hassas olan bu bölgelerde patlatma kaynaklı sarsıntının sebep olduğu ilave birim şekil değiştirmeler sayesinde çatlak oluşumları gözlenmektedir. Ayrıca minarenin birleşim yeri ile cümle giriş kapısı olarak tabir edilen küçük kubbecikler ve kemerlerin

bulunduğu yerde çatlakların oluğuğu gözlemlenmiştir. Çatlak boyutu elamanlardaki birim şekil değiştirmelerin, eleman boyutlarına oranlanarak kritik olduğu değerlendirilen yerlerde 0,35 mm civarında olduğu tespit edilmiştir. Oluşan çatlaklar yapıya büyük hasar verecek boyutta olmadığı düşünülmektedir. Yapıda oluşan çatlaklar şekil 4.44’de gösterilmiştir.

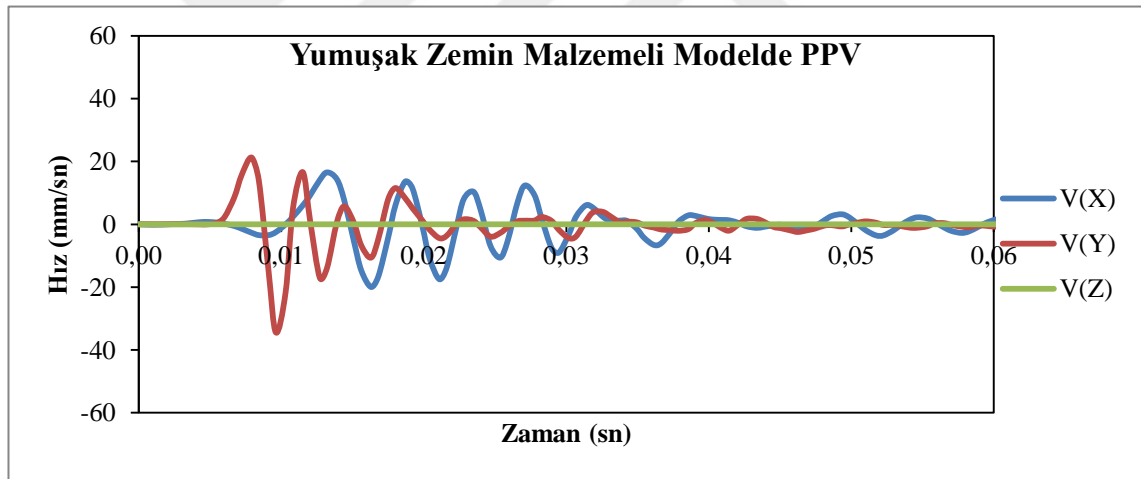


şekil 4.44. Cami modeli birinci senaryoda meydana tlak gösterimi

4.10.2. Hasar kriteri altında PPV ile Lalapaşa Camisinin incelenmesi

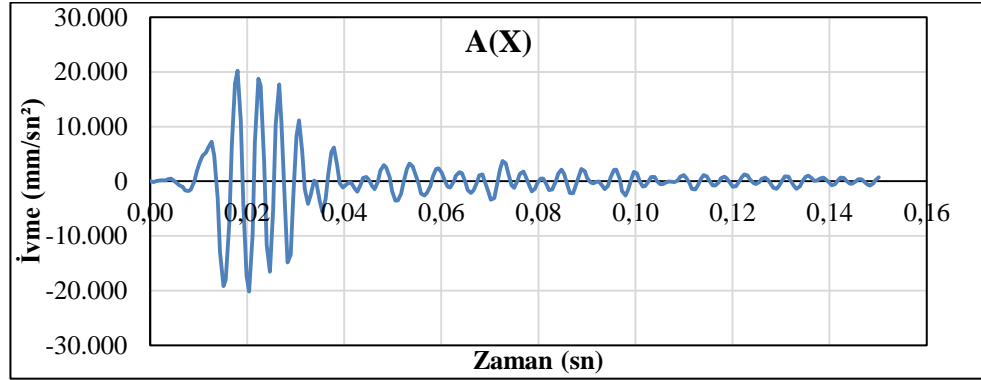
Yumuşak malzemeli modelde elde edilen maksimum parçacık hızının $PPV=34,52$ mm/sn olduğu değerlendirilerek USBM-RI 8507 ve DIN4150-3 (1999) hasar kriterlerine göre hasar limitinin altında olduğu görülmektedir. Alınan parçacık hızları ANSYS APDL programı vasıtasıyla yapıya uygulanarak yapıda oluşturduğu şekil değişikliği, çekme birim şekil değiştirmeleri ve çatlama durumunun olup olmayacağı incelenmiştir.

Yapılan yüklemde kullanılan parçacık hızına ait grafik incelendiğinde en büyük değerlerin X ve Y yönünde olduğu Şekil 4.45’de görülmektedir.

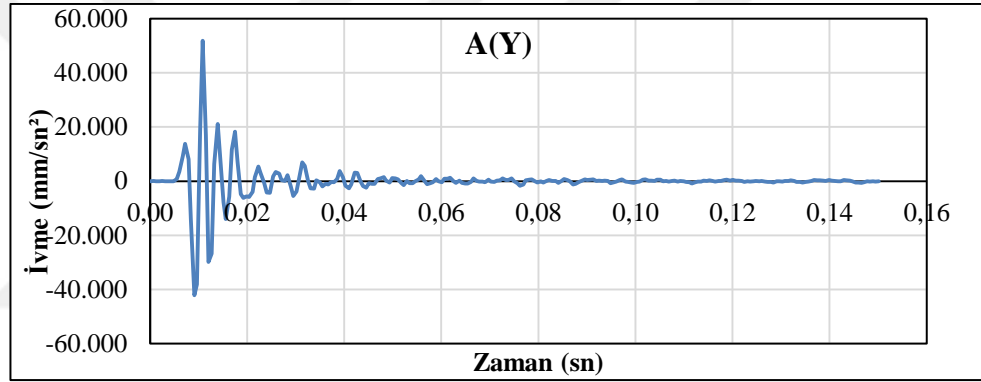


Şekil 4.45. Cami modeline ikinci senaryoda uygulanan parçacık hızı

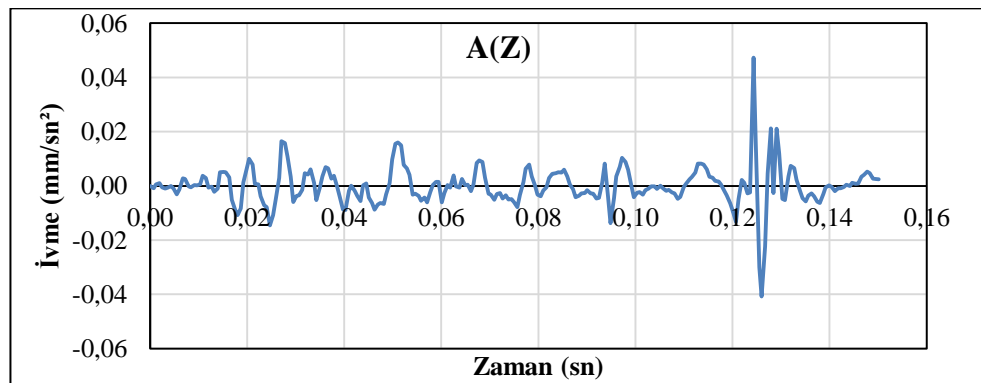
Y yönünde statik olarak ölü yükün bulunduğu taşımanın bu istikamette devam ettiği değerlendirilerek en kritik etkinin X yönünde olacağı düşünülmüştür. Yapı analizinde ivme olarak uygulanan etki değerleri de Şekil 4.46., 4.47. ve 4.48’de sunulmuştur.



Şekil 4.46. Cami modeline ikinci senaryoda uygulanan X yönündeki ivme



Şekil 4.47. Cami modeline ikinci senaryoda uygulanan Y yönündeki ivme

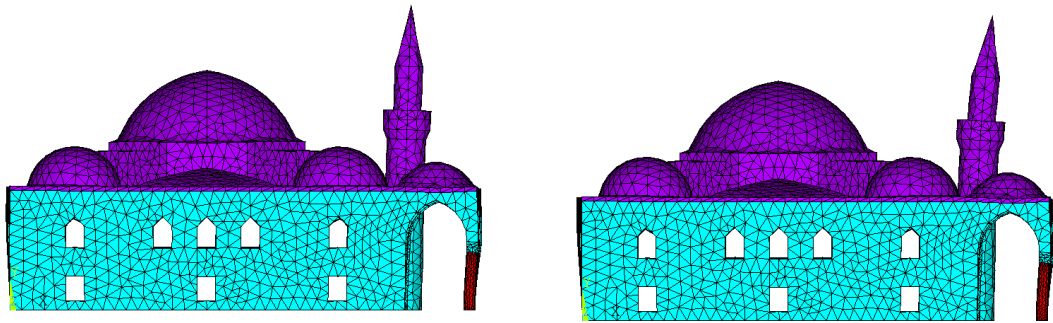


Şekil 4.48. Cami modeline ikinci senaryoda uygulanan Z yönündeki ivme

Görüldüğü gibi ivmelenme değerleri de sert zemindeki değerlere oranla oldukça düşüktür. Aynı ifadeyle deprem sarsıntılarında olduğu gibi 30-40 saniye sürmesi yerine

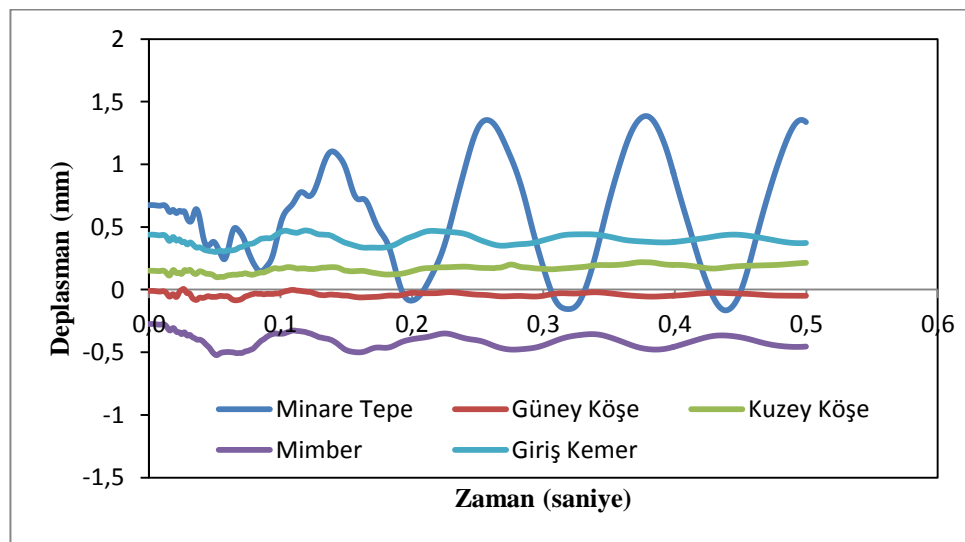
patlatma kaynaklı etkinin tamamının 0,15 saniye esas yüksek değerlerdeki darbenin ise 0,01 ile 0,03 saniye arası değiştiği göz önüne alınmıştır.

Yapıda meydana gelen şekil değişikliği Şekil 4.49'da gösterilmiştir. Sert zeminde oluşan deformasyona nazaran daha düşük bir şekil değişikliği görülmüştür.



Şekil 4.49. Cami modeli ikinci senaryoda şekil değişikliği

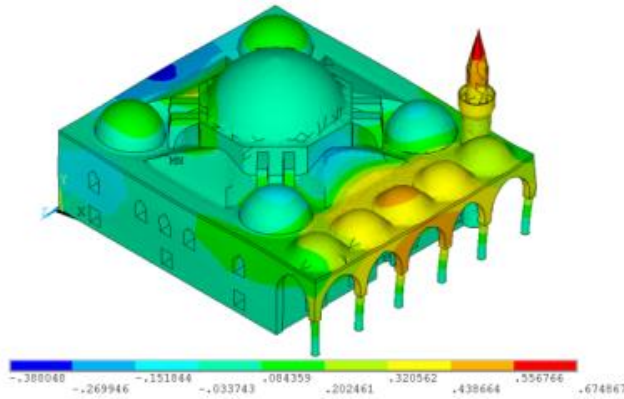
Yapı analizi tamamlandıktan sonra oluşan deplasmanların yüksek olabileceği noktalardan deplasman değişimlerini gösterir çıktılar alınıp Şekil 4.50'deki grafikte gösterilmiştir.



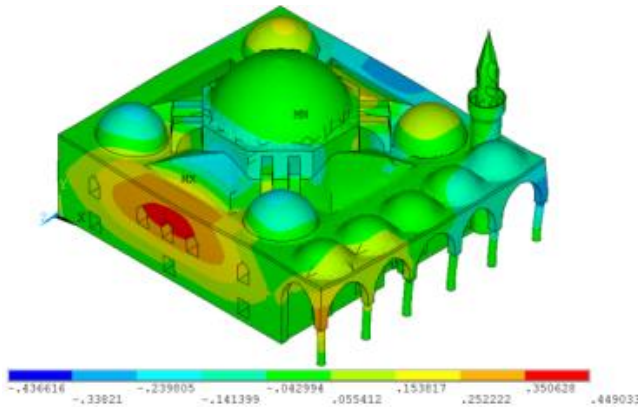
Şekil 4.50. Cami modeli ikinci senaryoda kritik noktaların yer değiştirmeleri

Sert zemin malzemeli modelde minarenin ucunda X yönünde yaklaşık -1 ile 2 mm arasında değişen yer değiştirme görülürken bu modelde -0,1 ile 1,3 mm arasında değiştiği görülmektedir.

Yapının X ve Z yönündeki yer değiştirmeleri Şekil 4.51 ve 4.52'de gösterilmiştir. X yönünde bir önceki modelde kritik görülen bölgelerde ancak sert zemin malzemeli modele nazaran düşük değerlerde olduğu Z yönünde ise sert zemin malzemeli modeldeki deplasmanlara çok yakın değerlerde olduğu görülmüştür. Zaten düşük değerlerde olan Z eksenindeki deplasmanların yapının Z ekseninde Y eksenindeki hareketi ve ölü yükü altındaki ezilme etkisi sonucunda oluşabileceği düşünülmüştür.

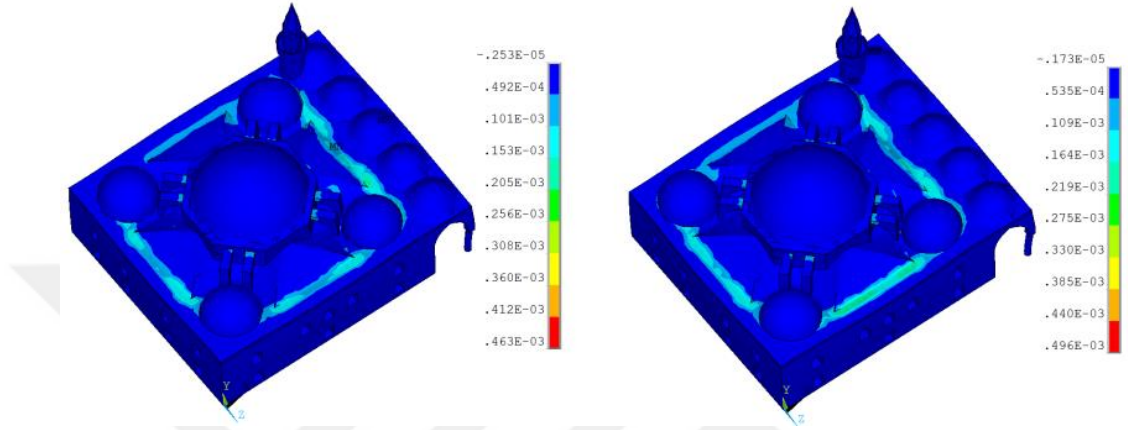


Şekil 4.51. X Yönünde yer değiştirmeler



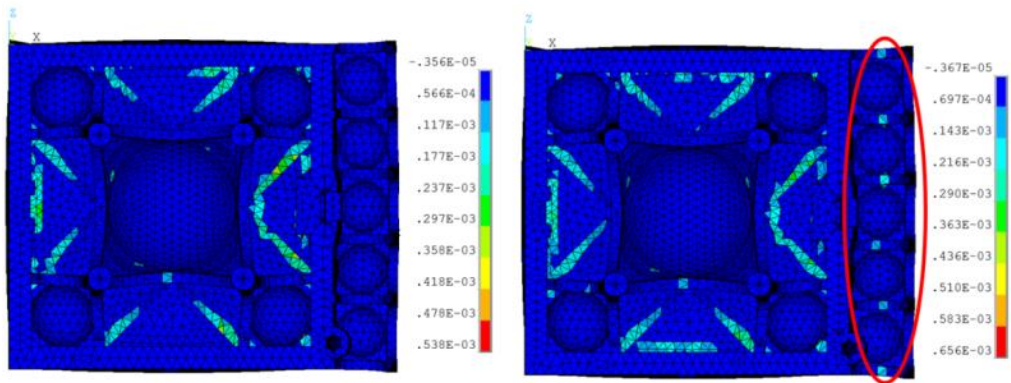
Şekil 4.52. Z Yönünde yer değiştirmeler

Yapıda meydana gelen çekme birim şekil değiştirmeleri incelenmiştir. Üst cepheden yapılan kontrollerde mevcut yükler altında zaten birim şekil değiştirme olan bölgelerdeki artışlar haricinde bir değişiklik olmadığı Şekil 4.53’de görülmektedir.



Şekil 4.53. Cami modeli ikinci senaryoda meydana gelen birim şekil değiştirmeleri

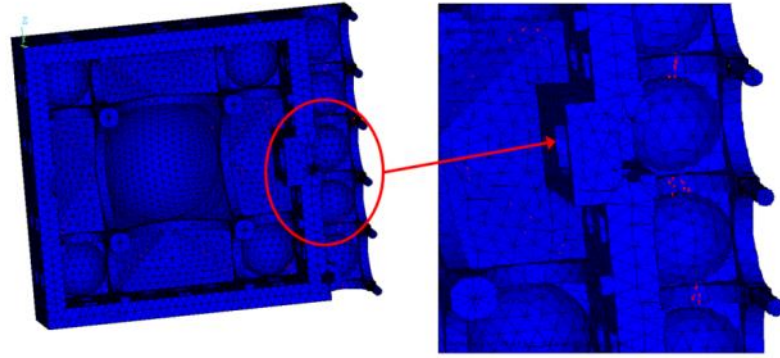
Şekil 4.54’de yapının altından çekilen fotoğraflar incelendiğinde yine ön giriş bölgesindeki kemerlerin alt kısmında yeni birim şekil değiştirme bölgeleri olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.54. Cami modeli ikinci senaryoda meydana gelen birim şekil değiştirmeleri alttan görünüm

Çekme gerilemeleri ANSYS programının sonuç grafiklerinde incelendiğinde kritik olabileceği değerlendirilen yerlerden minarenin ana binaya bağlandığı noktada çekme birim şekil değiştirmesinin (düğüm noktalarında) $0,49 E^{-3}$ değerine ulaştığı görülmüştür.

ANSYS programında bulunan “crush and crack” bölümünden faydalanılarak oluşan çatlakların yerleri ve durumları hakkında Şekil 4.55’de görülen bilgiler edinilmiştir. Önceki modelde oluşan çatlaklara nazaran çok daha az sayıda ve boyutlarda çatlakla karşılaşmıştır. Yapı üstten incelendiğinde çatlak oluşumu görülmemiştir. Alt cepheden yapılan kontrollerde daha önce de belirtildiği gibi mevcut halde hassas olan tonozların köşe bağlantıları ile kemer altlarında yeni oluşan çatlaklar tespit edilmiştir.



Şekil 4.55. Cami modeli ikinci senaryoda meydana çatlak gösterimi

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, delme ve patlatma yöntemlerinden tünel patlatmalarının yüzeyde oluşturduğu parçacık hızı ve zemin sarsıntısı ile bu etkilerin tarihi yapı örnekleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla Eşdeğer Elastik Sınır Yöntemi kullanılarak patlatma kaynaklı basınç yükü tespit edilmiş, elde edilen yük ile ANSYS Workbench yazılımı kullanılarak tünel tasarımı üzerinde uygulama yapılmış ve zemin sarsıntısı araştırılmıştır. İkinci kısım olarak değerlendirilebilecek şekilde elde edilen sarsıntı değerleri ANSYS APDL üzerinde modellenmiş olan tarihi yapı örneği Lalapaşa Camisine uygulanarak yapı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Oluşturulan modeller üzerinde statik ve dinamik analizler yapılarak çıktıları çalışma içerisinde sunulmuştur.

Tünel patlatma tasarımında açılı kesme ve paralel delik yöntemleri incelenmiş, paralel delik yönteminin günümüz teknolojisine göre daha verimli ve tercih edilen bir yöntem olması sebebiyle tünel kazısında uygulandığı kabul edilerek ayna tasarımı buna göre hesaplanmıştır. Ayna tasarımlarında kesme, tarama ve sınır deliklerinin hesaplamalara özelliklerine göre dâhil edilmesi gerektiğinin önemli olduğu görülmüştür.

Eşdeğer Elastik Sınır uygulamasının patlama yükünün tanımlanmasında mantıklı ve kolaylık sağlayan bir yöntem olduğu düşünülmektedir. Patlama yükünün tespiti esnasında kullanılacak verilerin doğruluğu önem kazanmaktadır. Patlatma etkisinin tespitinde patlayıcı madde özelliklerine dayalı eşitlikler kullanıldığından, patlayıcı maddenin infilakı ile ortaya çıkan enerjinin şarjı çevreleyen kaya kütesine aktarılmasında kayanın fiziksel özellikleri dikkate alınmalıdır. Bu hususta patlama basıncının elastik sınıra uygulanabilmesi için kullanılacak formülasyonda kayanın patlamayı hapsediciliği göz önüne alınması gereken en önemli faktördür.

Patlayıcı şarjın infilakı sonrasında çıkan gazların hapsedilmesi meydana gelen çatlaklar ve açılan kraterle orantılı olarak anlaşılabilir. Daha yumuşak olan kaya tipinde patlama sonrasında daha büyük bir krater açılır ve çatlama bölgesi daha geniş olacaktır.

Açılan kraterin çapı ve çatlakların genişliği arttıkça çıkan gazların hapsedilmesi azalacağından dolayısıyla elastik sınıra etkiyen basınç çok daha küçük olması beklenmelidir.

Patlatma sonrasında meydana gelecek kraterin hesaplanmasında Zanicayev (1974) tarafından r_1 ve r_2 yarıçaplarının tespiti için patlatılan kaya türünün çekme dayanımı, normal ve çok eksenli basınç dayanımı, P dalgasının hızı, kaya kütesine ait Poisson oranı gibi verilere ihtiyaç bulunmaktadır. Ancak hem r_1 ve r_2 boyutlarının elastik sınıra aktarılan yükün değişiminde çok hassas olması hem de yukarıda belirtilen kaya özelliklerine yönelik yeterli çalışma ve veri bulunmadığından bu yaklaşım ile ezilmiş ve çatlamış bölge yarıçaplarının tespiti oldukça zorlaşmaktadır.

Elastik sınıra uygulanan yükün yukarıda belirtilen şekilde hapsedilme etkisine göre değişmesi beklenen bir sonuçtur. Bu kapsamda daha sert kaya tipinde daha yüksek basıncın elastik sınıra etkimesi beklenmiştir. Tarama ve sınır deliklerin elastik sınıra uyguladığı basınç yalnızca imla haznesinin çapı ile iki delik arasındaki mesafeye bağlıdır. Başlangıç kesme deliklerinin ise elastik sınıra uyguladığı basınç hesaplanırken r_1 ve r_2 değerleri dolayısıyla kaya tipinin etkileri hesaplamalara dahil olmaktadır. Bu sebeple elastik sınıra uygulanan basıncın hesaplanmasında başlangıç deliklerinin etkisinin incelenmesi gerçeğe daha yakın sonuçlar vereceği önerilmektedir.

Zemin modellerinde yapılan analizlerde elastisite modülü ile Poisson oranının parçacık hızına ve zemin titreşimine etkisi incelenmiştir. Aynı basıncın modelin aynı noktasından uygulandığı durumlarda elastisite modülü düştükçe yüzey titreşiminin arttığı görülmüştür. Patlatmalarda ise kaya elastisite modülü arttıkça patlama gazlarının hapsedilmesi artacağından yüzey titreşiminin ve parçacık hızının büyük ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Poisson oranının yükselmesinin elastik sınıra uygulanan basıncı düşürdüğü görülmüş ancak elastik sınıra gelen etkiyi yüzeye aktarımında çok önemli farklara sebep olmadığı tespit edilmiştir.

ANSYS Workbench ile yapılan analizler neticesinde kontrol mesafesinin parçacık hızına doğrusal olmayan şekilde etkideği ve mesafe arttıkça yüzeyde ölçülen parçacık hızının üssel olarak azaldığı görülmüştür. Patlayıcı şarjların yerleştirilme yönünün zemindeki sarsıntı büyüklüğünü değiştirdiği görülmüştür. Yapılacak olan tasarımlarda patlatma kaynağının tam yan cephelerinde kalan yapıların delik istikametindeki yapılara nazaran daha fazla risk taşıdığı göz önünde bulundurulması önerilmektedir.

Aynı basıncın uygulandığı daha düşük elastisite modülüne sahip malzemelerin yüzeyde daha büyük sarsıntılara sebep olduğu görülmektedir. Ancak kaya zemin üzerinde bulunan az miktarda (örnek 5 m) toprak ve benzeri elastisite modülü patlatılan kayaya oranla çok düşük olan malzemenin şok dalgasını büyük ölçüde sönmülediği gözlemlenmiştir. Bu bilgilere dayanarak sağlam kaya zemin üzerinde belirtildiği gibi 3-5 m derinliğinde toprak örtü bulunmasının yapı için emniyeti artıracak ve oluşacak hasarı düşürecek bir etki oluşturduğu görülmektedir.

Eşdeğer Elastik Sınır Yöntemi yardımıyla yapılan simülasyon sonuçları Ölçekli Mesafeye dayanan parçacık hızı tahminlerine çok yakın sonuçlar vermektedir. Ölçekli Mesafe ile PPV tahmin yöntemlerinde kontrol atımları sonucunda toplanılan veriler ile bilgi edinilebilmektedir. Ancak kontrol atımlarının hasar oluşturmayacağına dair bir geçerlilik yoktur. Bu sebeple Eşdeğer Elastik Sınır Yöntemi ile elde edilen basınç değerleri ve simülasyon analizleri sahada patlatma yapmadan önce fikir verebilecek emniyetli bir yaklaşım olduğu düşünülmektedir. Teknolojik gelişmelerin sağladığı önemli bir katkı olan simülasyonların kullanılması, kontrol atımlarının verebileceği hasarı en aza indirmek ve ekonomik kaygılardan dolayı önerilen bir yöntem olmaktadır.

Kontrol patlatmalarının yapılmasındaki maksat en geçerli şekilde *PPV* tahminindeki zemin sabitleri olan K ve β sabitlerinin elde etmektir. Bu kontrol atımlarının oluşturabileceği hasarları ortadan kaldırabilmek adına yapılacak farklı bir yöntem de simülasyonun yanında zemin fiziksel özelliklerine bağlı olarak K değerini tespit etmek olacağı düşünülmektedir. Bu amaçla aşağıda sunulan eşitliğin *PPV* tahmininde kullanılabileceği önerilmektedir.

$$PPV = (6,01 E + 334,25) \left(\frac{R}{\sqrt{W}} \right)^{-1,86} \quad (5.1)$$

Patlatma kaynaklı sarsıntuların tarihi yapılara etkisi incelenmiştir. Bu aşamada tarihi yapıların betonarme binalarla benzer davranışlar gösterdiği ancak verilen hasar kriterlerine göre daha alt parçacık hızlarından bile etkilenebileceği gözlemlenmiştir. Tarihi yapılarda meydana gelecek hasarların giderilmesi mümkün olmayacağından çok daha emniyetli bir şekilde davranmak gerektiği açıktır.

ANSYS APDL yazılımı ile yapılan analizlerde Lalapaşa Camisi modelinde parçacık hızı yaklaşık olarak 54 mm/sn ve 34 mm/sn hızlarında olan iki patlatma kaynaklı yer sarsıntısının etkisi incelenmiştir. İlk analiz sonrasında yapının hâlihazırdaki ölü yükleri neticesinde zorlanmakta olan kubbe birleşim yerlerinde hasar olduğu görülmüştür. Bunun yanında mevcut halinde bir zorlamaya maruz kalmayan minarenin ana yapı ile birleşim yeri ile cümle giriş kapısı olarak tabir edilen küçük kubbelerin ve kemerlerin olduğu giriş bölümünde çatlamların olduğu görülmüştür. İkinci analizde ise ilk analize nazaran yapısal hasar daha az miktarda ve benzer noktalarda görülmüştür.

Yapılan analizler yalnızca tek bir patlatma yapıldığı durumu göstermektedir. Delme ve patlatma yöntemi gereğince her bir ayna tasarımında en az 3 (başlangıç/kesme, tarama ve sınır) patlatma yapılacağı ve ortalama her patlatmanın 3 m (şarj boyunun %100 verimi ile) civarında ilerleme sağladığı değerlendirildiğinde yapının maruz kalacağı şok dalgası sayısı çok yükselmektedir. Tarihi yapının tek bir patlama için hasar gören bir elemanda yaklaşık 0,30 mm çatlak oluşturacağı beklenmektedir. Çatlamış elemanın mukavemetinin aynı kalacağı beklenemeyeceğinden yapılacak her bir delme patlatma uygulamasında yapı daha büyük hasarlar göreceğinden tarihi yapıların yakınlarında delme ve patlatma uygulamalarının uygun olmadığı söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Arpaz, E., Ceylanoğlu, A., 2001. Patlatma Kaynaklı Yer Sarsıntısı ve Hava Şoku Ölçümlerinin Değerlendirilmesi İçin Geliştirilen Bir Bilgisayar Programı. Türkiye 17. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi-TUMAKS 2001, ISBN 975-395-416-6, 103-110
- Bağdatlı, S. 2013. Üsküdar- Ümraniye- Çekmeköy Metro Hattı Libadiye İstasyonu Yaklaşım Tüneli Kazısında Yapılan Patlatmalı Kazılardan Kaynaklanan Titreşimlerin Ölçülmesi ve Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi, Y.Lisans Tezi, Okan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü , İstanbul
- Bilgin, A., Paşamehmetoğlu G., Onur Ç., Lağımalar için Çift - V Orta Çekmeli Patlatma Düzeni. http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/aa2c95dc0a6833d_ek.pdf (23.06.2016)
- Erçıkdi, B., Kesimal, A., Yılmaz, E. ve Cihangir, F., 2004. Patlatma kaynaklı yer sarsıntısı ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi. Fen Bilimleri Dergisi, Dumlupınar Üniversitesi, 7, 195-216.
- Erkoç Y., 1990. Kaya Patlatma Tekniği. İstanbul, <http://delmepatlatma.org/tunel-patlatma-yontemleri-syfdty-98.html> (23.06.2016)
- Esen, S., Onederra, I., Bilgin, H.A., 2003. Modelling The Size Of The Crushed Zone Around a Blasthole. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 40 (4) 485–495.
- Evergen, T., 1985. Tünel Açma işlerinde Paralel Delik Düzeni İle İlgili Parametreler. Madencilik 24 (4). 39-47
- Johansen J., Modern Trends in Tunnelling and Blast Desing, <http://delmepatlatma.org/tunel-patlatma-yontemleri-syfdty-98.html> (23.06.2016)
- Johnson, R.B. and DeGraff, J.V., 1988. Principles of Engineering Geology, Wiley
- Kahraman, S. ve Kılıç, A. 2000. Kontrollü Patlatma Yöntemleri ve Tarsus Ayırımı Gaziantep Otoyolu T2 Tüneli Uygulaması., Madencilik 39 (2), 10-22
- Kahrıman A., Görgün S., Karadoğan A., Tuncer G., 2000. Tuzla-Dragos tüneli kazısında patlatmadan kaynaklanan yersarsıntısı ölçüm sonuçları ve değerlendirilmesi. İstanbul Yerbilimleri Dergisi. 13 (1-2), 133-143
- Kazaz, İ., 2013. Tagar Regülatörü ve Hes İnşaatının Çemişgezek İlerine Etkisinin İncelenmesi, Erzurum
- Kumar, R., Choudhury, D., Bhargava, K., 2016. Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 8, 341-349
- Lu W., Yang, J., Chen, M. Zhou, C., Yan, P., Luo, Y., Jin, L., 2012 Dynamic response of rock mass induced by the transient release of in-situstress. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 53. 129–141
- Lu W., Yang, J., Chen, M. Zhou, C., 2011. An equivalent method for blasting vibration simulation. Simulation Modelling Practice and Theory 19. 2050–2062
- Richards, A., B., and Moore A., J., Blast Vibration Course Measurement - Assessment – Control. Terrocks Consulting Engineers.
- Silitonga, M., 1986. Prediction of ground vibration due to blasting. Ground Movement and Control Related to Coal Mining Symposium

Standard DIN 4150-3 (1999). Structural Vibration – Part 3: Effects of vibration on structures.

Tomazevic M. , 1999. Earthquake Resistant Design of Masonry Buildings. Singapore: Imperial College Press, 268

Zanikayev A.H., 1974, Physical Process of Rock Blasting in Mining. Mineral Press, Leningrad



ÖZGEÇMİŞ

Mehmet ÖZEL, 1986 yılında İzmir’de doğdu. 2004 yılında Maltepe Askeri Lisesi’ni bitirdi. Aynı yıl girdiği Kara Harp Okulu’ndan 2008 yılında mezun oldu. 2011 yılında Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim Dalında Yüksek Lisans çalışmasına başladı.

