

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BETONARME PLAKLARIN DARBE YÜKÜ ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞLARININ  
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Süleyman İstemihan COŞĞUN**

**MAYIS 2014**

**TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BETONARME PLAKLARIN DARBE YÜKÜ ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞLARININ  
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**İnş. Müh. Süleyman İstemihan COŞĞUN**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09.05.2014  
Tezin Savunma Tarihi : 30.05.2014**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Metin HÜSEM**

**Trabzon 2014**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**  
**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında**  
**Süleyman İstemihan COŞGÜN tarafından hazırlanan**

**BETONARME PLAKLARIN DARBE YÜKÜ ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞLARININ**  
**SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 13 / 05 / 2014 gün ve 1553 sayılı**  
**kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Metin HÜSEM** .....

**Üye : Doç. Dr. Selim PUL** .....

**Üye : Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI** .....

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

“Betonarme Plakların Darbe Yüğü Etkisindeki Davranışlarının Sayısal Olarak İncelenmesi” konulu bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda hazırlanmıştır. Yüksek lisans tez danışmanlığıı üstlenerek konu seçimi ve tezin yürütülmesinde yardımlarını esirgemeyen Sayın Hocam Prof. Dr. Metin HÜSEM'e teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Tüm hayatım boyunca hep yanımda olan, bana güven ve sevgi veren, maddi ve manevi desteklerini her zaman hissettiren, bütün zorluklara katlanarak beni yetiştiren başta annem ve babam olmak üzere tüm aileme şükranlarımı sunarım.

Süleyman İstemihan COŞĞUN  
Trabzon 2014

## TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Betonarme Plakların Darbe Yüğü Etkisindeki Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Metin Hüsem’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.09/05/2014

Süleyman İstemihan COŞĞUN

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	III
TEZ BEYANNAMESİ .....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XVI
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XVII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Malzeme Modelleri Hakkında Genel Bilgiler .....	2
1.2.1. Lineer ve Lineer Olmayan Elastik Malzeme Modeli .....	2
1.2.2. Viskoelastik ve Viskoplastik Malzeme Modeli.....	3
1.2.3. Elastoplastik Malzeme Modeli.....	4
1.2.4. Pekleşen Elastoplastik Malzeme Modeli.....	4
1.2.5. Mekanik Hasar Malzeme Modeli .....	5
1.2.6. Drucker-Prager Malzeme Modeli.....	5
1.2.7. Betonun Plastikleşme Hasar Modeli (CDP).....	8
1.2.8. Genel Metal Plastisite Modeli (CMP).....	16
1.3. Dinamik Yüklemede Betonun Mekanik Özellikleri.....	17
1.3.1. Şekildeğiştirme Hızının Betonun Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi.....	18
1.3.2. Şekildeğiştirme Hızının Betonun Elastisite Modülü Üzerindeki Etkisi.....	19
1.3.3. Şekildeğiştirme Hızının Betonun Nihai Şekildeğiştirme Değeri Üzerindeki Etkisi.....	20
1.3.4. Şekildeğiştirme Hızının Betonun Çekme Dayanımı Üzerindeki Etkisi .....	20
1.3.5. Şekildeğiştirme Hızının Betonun Kesme Dayanımı Üzerindeki Etkisi .....	21
1.3.6. Şekildeğiştirme Hızının Betonun Basınç Kırılma Enerjisi Üzerindeki Etkisi .....	23
1.3.7. Şekildeğiştirme Hızının Betonun Çekme Kırılma Enerjisi Üzerindeki Etkisi .....	24
1.4. Yüksek Şekildeğiştirme Hızında Betonarme Çeliğinin Mekanik Özellikleri .....	26
1.5. Darbe Yükleri .....	28
1.5.1. Darbe Yüklerinin Beton ve Betonarme Plaklar Üzerindeki Etkileri.....	31
1.5.2. Darbe Yüklemesinin Tek Serbestlik Dereceli Sistemi (TSDS).....	34
1.6. Konu ile ilgili Yapılan Çalışmalar .....	35

1.7.	Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....	42
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	44
2.1	Betonarme Plakların Özellikleri ve Sonlu Elemanlar Modeli.....	44
2.1.1	Plak Boyutları, Mesnet Koşulları, Donatı Planı ve Malzeme Modelleri.....	44
2.1.2.	Betonarme Plakların Sonlu Eleman Modelleri.....	46
2.1.3.	Plakların Mesnet Koşulları ve Darbe Yüğü.....	49
2.1.3.1	Mesnet Koşulları .....	49
2.1.3.2	Darbe Yüğü .....	50
2.1.4.	Malzeme Özellikleri.....	52
2.1.4.1	Betonun Malzeme Özellikleri .....	52
2.1.4.2	Betonarme Çeliğinin Malzeme Özellikleri.....	56
3.	BULGULAR VE İRDELEMELER .....	57
3.1.	Betonarme Plakların Darbe Yüğü Altındaki Analizi .....	58
3.1.1.	PK1011-1 Betonarme Plağı.....	58
3.1.2.	PK1011-2 Betonarme Plağı.....	64
3.1.3.	PK1011-3 Betonarme Plağı.....	70
3.1.4.	PK1011-4 Betonarme Plağı.....	73
3.1.5.	PK1012-1 Betonarme Plağı.....	76
3.1.6.	PK1012-2 Betonarme Plağı.....	82
3.1.7.	PK1012-3 Betonarme Plağı.....	88
3.1.8.	PK1012-4 Betonarme Plağı.....	91
3.1.9.	PK1020-1 Betonarme Plağı.....	95
3.1.10.	PK1020-2 Betonarme Plağı.....	101
3.1.11.	PK1020-3 Betonarme Plağı.....	107
3.1.12.	PK1020-4 Betonarme Plağı.....	110
3.2.	Betonarme Plaklarda Darbe Etkisiyle Oluşan Kırılma Enerjileri .....	114
4.	SONUÇ VE ÖNERİLER .....	119
5.	KAYNAKLAR .....	121

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

BETONARME PLAKLARIN DARBE YÜKÜ ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞLARININ  
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Süleyman İstemihan COŞĞUN

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Metin HÜSEM  
2014, 125 Sayfa

Günümüzde yapılar, düşey (öz ağırlık ve hareketli yükler) ve yatay (deprem ve rüzgâr) yüklerin yanında darbe ve patlama yükleri gibi etkilere de maruz kalabilmektedir. Genellikle nükleer santraller, havalimanları, savunma sanayi ve askeri tesisler gibi yapıların maruz kaldığı patlama ve darbe yükleri, zaman zaman doğal gaz sistemlerinde oluşan patlama ve terör saldırısı gibi nedenlerle, normal yapılara da meydana gelmektedir. Dolayısıyla da betonarme yapılarda bir cismin çarpmasıyla ya da patlamayla oluşan darbe yüklerinin oluşturduğu etkilerin araştırılması önem kazanmıştır. Özellikle son yıllarda, darbe etkilerine karşı yeterli dayanıma sahip olmayan beton ile üretilen, betonarme elemanların bu etkiler altında davranışlarının ortaya konulması amacı ile deneysel ve teorik çalışmalar yapılamaya başlanmıştır. Darbe etkisine maruz yapıların tam ölçekli olarak deneysel çalışmalara dâhil edilmesi ekonomik olmamaktadır. Bu nedenle bu gibi yükleme durumlarında yapıların analitik olarak incelenmesi kaçınılmaz olmaktadır.

Bu çalışmada, bir cismin çarpmasıyla oluşan darbe yükünün betonarme plaklara etkisi analitik olarak incelenmiştir. Bu incelemede üç farklı boyutta ve iki farklı mesnet koşullarındaki betonarme plaklar, darbe yüküne maruz bırakılmıştır. Farklı mesnet koşullarındaki betonarme plaklarda, beton için biri Drucker-Prager (DP) diğeri ise Betonun Plastikleşme Hasar Modeli (Concrete Damage Plasticity Model-CDP) olmak üzere iki farklı malzeme modeli dikkate alınmıştır. Betonarme çeliği için ise Genel Metal Plastisite Modeli (Classical Metal Plasticity Model-CMP) kullanılmıştır.

Yapılan çalışmalardan elde edilen bulguların irdelenmesinden CDP malzeme modelinin DP malzeme modeline göre daha iyi sonuçlar verdiği, plakların ankastre mesnetli olması durumunda en büyük darbe yükünün olduğu, plak boyutlarının artmasıyla darbe yükünün belirlenmesinde mesnetlenme etkisinin azaldığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Betonarme plak, Darbe yükü, CDP, DP



Master Thesis

SUMMARY

NUMERICAL INVESTIGATION OF REINFORCED CONCRETE PLATES  
BEHAVIOUR UNDER IMPACT LOAD

Süleyman İstemihan COŞĞUN

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Metin HÜSEM  
2014, 125 Pages

Today buildings are exposed to the effects such as impact and explosion loads in addition to vertical (dead load and live load) and horizontal (earthquake and wind) loads. Usually explosion and impact loads that expose the buildings such as nuclear power plants, airports, defense industry and military installations, can occur occasionally to the normal buildings because of the reasons like natural gas system explosions or terrorism attacks. Therefore, it has gained importance that to research the effects of the impact loads which has become by the explosion or impact of an object in reinforced concrete buildings. Especially at last years experimental and theoretical studies has made with aim of to reveal the actions of the reinforced concrete elements which has produced with the concrete that has not adequate strength, when they are affected. It is not economical that including the buildings exposed to the influence impact ,full scale to the experimental studies. Because of this, in such cases as loading situations, it is inevitable to examine the buildings analitically.

In this study it is examined quantitatively that the effect to the plates of the impact that has consisted by hit of an object. In this examination three different sized and two different boundry conditioned reinforced concrete plates were exposed to impact load. In different boundry conditioned reinforced concrete plates, two different models of material for concrete such one is the Drucker-Prager (DP), and another is the Concrete Damage Plasticity Model (CDP) were taken into consideration. For reinforced concrete steel the Classical Metal Plasticity Model (CMP) were used also.

By the examination of findings of study results, it was observed that; CDP model gave the better results than DP model, the largest impact load was occured when the plates were fixed support, with the increase in plate size boundary condition effect in determining the impact load is decreased.

**Key Words:** Reinforced concrete plate, impact load, CDP, DP

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Elastik ve Lineer olmayan elastik malzemelerin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.....	3
Şekil 1.2.	Viskoelastik ve Viskoplastik malzemelerin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri	3
Şekil 1.3.	Elastoplastik malzemelerin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri .....	4
Şekil 1.4.	Pekleşen Elastoplastik malzemelerin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri .....	4
Şekil 1.5.	DP malzeme modelinin hiperbolik akma fonksiyonu eğrisi.....	6
Şekil 1.6.	DP malzeme modelinin lineer akma fonksiyonu eğrisi .....	7
Şekil 1.7.	K parametresinin akma yüzeyi şekli üzerindeki etkisi .....	7
Şekil 1.8.	Bölgesel çatlama (a), ayrık çatlama (b) oluşumu durumları(Pankaj, 2010)...	9
Şekil 1.9.	Betonun aksenal basınç altında CDP model ile betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin tanımlanması (Hibbitt vd. ,2011).....	10
Şekil 1.10.	Betonun aksenal çekme altında CDP model ile betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin tanımlanması(Hibbitt vd. ,2011).....	10
Şekil 1.11.	Rijitliğin iyileştirilmesi parametrelerinin betonun gerilme-şekildeğiştirme eğrisi üzerinde gösterimi(Hibbitt vd., 2011).....	12
Şekil 1.12.	DP malzeme modelinin, deviyatör düzlemde (a) ve üç boyutlu gerilme uzayında (b) akma yüzeyinin yapısı (Pankaj,2010).....	13
Şekil 1.13.	CDP modelde, iki aksenli gerilme halinde akma yüzeyinin yapısı (Hibbitt,2011) .....	14
Şekil 1.14	Drucker-Prager malzeme modelinin potansiyel plastik akma fonksiyonunun p-q düzlemde gösterimi (Hibbitt, 2011) .....	15
Şekil 1.15.	Dilatasyon açısının malzeme davranışı üzerindeki etkisi (Malm vd., 2006) .....	16
Şekil 1.16.	Genel şekildeğiştirme ve plastik şekildeğiştirme değerlerinin gerilme-şekildeğiştirme eğrisi üzerinde gösterimi .....	17
Şekil 1.17.	Şekildeğiştirme hızının betonun basınç gerilmeleri altında gösterdiği davranış üzerindeki etkileri.....	19
Şekil 1.18.	Şekildeğiştirme hızının betonun çekme gerilmeleri altında gösterdiği davranış üzerindeki etkileri.....	21

Şekil 1.19. Deneş düzeneği (Takeda,1971).....	22
Şekil 1.20. Şekildeğiştirme hızının betonun kesme dayanımı üzerindeki etkisi (Statik yüklenme durumu (S), (III) düşük yüklenme hızı, (I)yüksek yüklenme hızı)....	23
Şekil 1.21. Şekildeğiştirme hızına bağlı olarak betonun aksenal basınç dayanımı değerindeki değişim (Ngo vd. 2004) .....	24
Şekil 1.22. Üç nokta eğilme deneş düzeneği(Fathy vd., 2008) .....	25
Şekil 1.23. Betonun basınç dayanımının ve yüklenme durumunun betonun çekme kırılma enerjisi üzerindeki etkisi (Banthia vd., 1989) .....	26
Şekil 1.24. Şekildeğiştirme hızının çeliğin akma ve çekme dayanımı üzerindeki etkisi (Malvar ve Crawford, 1998) .....	27
Şekil 1.25. Darbe yükünün kütleli-yay modeli (Daudeville ve Malécot, 2011) .....	29
Şekil 1.26. Yumuşak darbe yükünün şematik gösterimi (Daudeville ve Malécot, 2011) .....	30
Şekil 1.27. Sert darbe yükünün şematik gösterimi (Daudeville ve Malécot, 2011) .....	30
Şekil 1.28. Darbe yerel davranış üzerindeki etkileri (Li vd., 2005).....	32
Şekil 1.29. Darbe yükünün, yapısal davranış üzerindeki etkisi(Zielinski,1984) .....	32
Şekil 1.30. Darbe yükünün betonarme plakların yapısal davranışı üzerindeki etkileri (Martin vd. ,2011).....	33
Şekil 1.31. Darbe yüklemesine maruz bir yapı elemanının TSDS analitik modeli ve kuvvetler dengesi (Saatçi, 2007).....	34
Şekil 1.32. Darbe yüklemesi ile elde edilen yerel deformasyon tipleri Chen ve May(2007) .....	36
Şekil 1.33. Darbe yükünü oluşturmak için hazırlanan test düzeneği. Schellenberg vd., (2008).....	37
Şekil 1.34. Hasır donatılı döşemede oluşan yerel deformasyon. Zineddin ve Krauthammer (2007) .....	38
Şekil 1.35. Simülasyon yardımı ile elde edilen delinme tipi yerel hasar durumu Agard ve Laine (1999).....	40
Şekil 1.36. Dairesel parçalar arasındaki yay ve sönüm elemanları (Sawamoto vd.,1998).....	42

Şekil 1.37. Deney ve model çalışmalarından elde edilen hasar tiplerinin karşılaştırılması (Sawamoto vd. ,1998) .....	42
Şekil 2.1. PK1011 betonarme plaklarının boyutları ve donatısı .....	45
Şekil 2.2. PK1012 betonarme plaklarının boyutları ve donatısı .....	45
Şekil 2.3. PK1020 betonarme plaklarının boyutları ve donatısı .....	46
Şekil 2.4. C3D8R sonlu eleman detayı .....	47
Şekil 2.5. PK1011 beton plağın sonlu eleman ağı .....	47
Şekil 2.6. T3D2 çubuk sonlu eleman detayı .....	48
Şekil 2.7. Betonarme donatılarının sonlu eleman modeli (PK1011) .....	48
Şekil 2.8. Betonarme plakların mesnet koşulları .....	49
Şekil 2.9. Çarpan cismin sonlu eleman ağı sistemi.....	50
Şekil 2.10. Darbe yükünün oluşum şeması.....	51
Şekil 2.11. Darbe yükünün oluşum şeması .....	51
Şekil 2.12. Aksenal basınç yüklemesi altında beton için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.....	53
Şekil 2.13. Aksenal çekme yüklemesi altında beton için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.....	53
Şekil 2.14. $d_c$ parametresi, elastik olmayan şekildeğiştirme ilişkisi .....	55
Şekil 2.15. $d_t$ parametresi, elastik olmayan şekildeğiştirme ilişkisi.....	55
Şekil 2.16. S420 için gerilme-plastik şekildeğiştirme eğrisi .....	57
Şekil 3.1. Betonarme plaklarda darbe yükünün etkimesi .....	58
Şekil 3.2. PK1011-1 plağının açıklık ortası yerdeğiştirme-zaman eğrisi .....	59
Şekil 3.3. PK1011-1 plağının darbe yükü-zaman eğrisi .....	59
Şekil 3.4. PK1011-1 plağına ait darbe kuvveti-yerdeğiştirme eğrisi .....	60
Şekil 3.5. PK1011-1 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmeye karşı gelen gerilmenin zamanla değişimi .....	61

Şekil 3.6. PK1011-1 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmenin zamanla değişimi.....	61
Şekil 3.7. PK1011-1 plağında $d_t$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu .....	62
Şekil 3.8. PK1011-1 plağında $d_c$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu .....	62
Şekil 3.9. Betonarme plağın alt yüzünde oluşan hasar (Chen ve May, 2009) .....	64
Şekil 3.10. PK1011-2 plağının açıklık ortası yerdeğiştirme-zaman eğrisi .....	65
Şekil 3.11. PK1011-2 plağının darbe yükü-zaman eğrisi .....	65
Şekil 3.12. PK1011-2 plağına ait darbe yükü-yerdeğiştirme eğrisi .....	66
Şekil 3.13. PK1011-2 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmeye karşılık gelen gerilmenin zamanla değişimi .....	67
Şekil 3.14. PK1011-2 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmenin zamanla değişimi.....	67
Şekil 3.15. PK1011-2 plağında $d_t$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu .....	68
Şekil 3.16. PK1011-2 plağında $d_c$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu .....	69
Şekil 3.17. PK1011-3 plağının açıklık ortası yerdeğiştirme-zaman eğrisi .....	70
Şekil 3.18. PK1011-3 plağının darbe yükü-zaman eğrisi .....	71
Şekil 3.19. PK1011-3 plağına ait darbe yükü-yerdeğiştirme eğrisi .....	71
Şekil 3.20. PK1011-3 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmeye karşı gelen gerilmenin zamanla değişimi .....	72
Şekil 3.21. PK1011-3 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmenin zamanla değişimi.....	72
Şekil 3.22. PK1011-4 plağının açıklık ortası yerdeğiştirme-zaman eğrisi .....	73
Şekil 3.23. PK1011-4 plağının darbe yükü-zaman eğrisi .....	74
Şekil 3.24. PK1011-4 plağına ait darbe yükü-yerdeğiştirme eğrisi .....	74
Şekil 3.25. PK1011-4 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmeye karşı gelen gerilmenin zamanla değişimi .....	75
Şekil 3.26. PK1011-4 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmenin zamanla değişimi.....	75

Şekil 3.27. PK1012-1 plağının açıklık ortası yerdeğiştirme-zaman eğrisi .....	76
Şekil 3.28. PK1012-1 plağının darbe yükü-zaman eğrisi .....	77
Şekil 3.29. PK1012-1 plağına ait darbe yükü-yerdeğiştirme eğrisi .....	77
Şekil 3.30. PK1012-1 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmeye karşı gelen gerilmenin zamanla değişimi .....	78
Şekil 3.31. PK1012-1 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmenin zamanla değişimi.....	78
Şekil 3.32. PK1012-1 plağında $d_t$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu .....	80
Şekil 3.33. PK1012-1 plağında $d_c$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu .....	81
Şekil 3.34. PK1012-2 plağının açıklık ortası yerdeğiştirme-zaman eğrisi .....	82
Şekil 3.35. PK1012-2 plağının darbe yükü-zaman eğrisi .....	83
Şekil 3.36. PK1012-2 plağına ait darbe yükü-yerdeğiştirme eğrisi .....	83
Şekil 3.37. PK1012-2 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmeye karşılık gelen gerilmenin zamanla değişimi .....	84
Şekil 3.38. PK1012-2 plağının donatısında oluşan plastik şekil değiştirmenin zamanla değişimi .....	84
Şekil 3.39. PK1012-2 plağında $d_t$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu .....	86
Şekil 3.40. PK1012-2 plağında $d_c$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu .....	87
Şekil 3.41. PK1012-3 plağının açıklık ortası yerdeğiştirme-zaman eğrisi .....	88
Şekil 3.42. PK1012-3 plağının darbe yükü-zaman eğrisi .....	89
Şekil 3.43. PK1012-3 plağına ait darbe yükü-yerdeğiştirme eğrisi .....	89
Şekil 3.44. PK1012-3 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmeye karşı gelen gerilmenin zamanla değişimi .....	90
Şekil 3.45. PK1012-3 donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmenin zamanla değişimi.....	91
Şekil 3.46. PK1012-4 plağının açıklık ortası yerdeğiştirme-zaman eğrisi .....	92
Şekil 3.47. PK1012-4 plağının darbe yükü-zaman eğrisi .....	92
Şekil 3.48. PK1012-4 plağına ait darbe yükü-yerdeğiştirme eğrisi .....	93

Şekil 3.49. PK1012-4 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmeye karşı gelen gerilmenin zamanla değişimi .....	94
Şekil 3.50. PK1012-4 Plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmenin zamanla değişimi.....	94
Şekil 3.51. PK1020-1 plağının açıklık ortası yerdeğiştirme-zaman eğrisi .....	95
Şekil 3.52. PK1020-1 plağının, darbe kuvvet-zaman eğrisi .....	96
Şekil 3.53. PK1020-1 plağına ait darbe kuvveti-yerdeğiştirme eğrisi .....	96
Şekil 3.54. PK1020-1 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmeye karşı gelen gerilmenin zamanla değişimi .....	97
Şekil 3.55. PK1020-1 donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmenin zamanla değişimi.....	97
Şekil 3.56. PK1020-1 plağında $d_t$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu .....	99
Şekil 3.57. PK1020-1 plağında $d_c$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu .....	100
Şekil 3.58. PK1020-2 plağının açıklık ortası yerdeğiştirme-zaman eğrisi .....	101
Şekil 3.59. PK1020-2 plağının darbe yükü-zaman eğrisi .....	102
Şekil 3.60. PK1020-2 plağına ait darbe yükü-yerdeğiştirme eğrisi .....	102
Şekil 3.61. PK1020-2 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmeye karşı gelen gerilmenin zamanla değişimi .....	103
Şekil 3.62. PK1020-2 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmenin zamanla değişimi.....	103
Şekil 3.63. PK1020-2 plağında $d_t$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu .....	105
Şekil 3.64. PK1020-2 plağında $d_c$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu .....	106
Şekil 3.65. PK1020-3 plağının açıklık ortası yerdeğiştirme-zaman eğrisi .....	107
Şekil 3.66. PK1020-3 plağının darbe yükü-zaman eğrisi .....	108
Şekil 3.67 PK1020-3 plağına ait darbe kuvveti-yerdeğiştirme eğrisi .....	108
Şekil 3.68. PK1020-3 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmeye karşı gelen gerilmenin zamanla değişimi .....	109

Şekil 3.69. PK1020-3 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmenin zamanla değişimi.....	109
Şekil 3.70. PK1020-4 plağının açıklık ortası yer değiştirme-zaman eğrisi .....	110
Şekil 3.71. PK1020-4 plağının darbe yükü-zaman eğrisi .....	111
Şekil 3.72. PK1020-4 plağına ait darbe yükü-yerdeğiştirme eğrisi .....	111
Şekil 3.73. PK1020-4 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmeye karşı gelen gerilmenin zamanla değişimi .....	112
Şekil 3.74. PK1020-4 plağının donatında oluşan plastik şekildeğiştirmenin zamanla değişimi.....	112
Şekil 3.75. Deneysel ( Chen ve May, (2009)) ve sayısal çözümlmeden elde edilen darbe yükü-zaman ilişkisinin karşılaştırılması .....	113
Şekil 3.76. Deneysel ( Chen ve May, (2009)) ve sayısal çözümlmeden elde edilen hasar durumları .....	114
Şekil 3.77. PK1011 serisi plaklara ait kırılma enerjisi-yerdeğiştirme eğrileri.....	116
Şekil 3.78. PK1012 serisi plaklara ait kırılma enerjisi-yerdeğiştirme eğrileri.....	116
Şekil 3.79. PK1020 serisi plaklara ait kırılma enerjisi-yerdeğiştirme eğrileri.....	117



## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Farklı yükleme tiplerinde genel şekildeğiştirme hızları (CEB,1988).....	17
Tablo 2.1. Darbe yükü analizlerinde kullanılan plakların özellikleri .....	44
Tablo 2.2. Sonlu eleman modellerinde tanımlanan betonun genel malzeme özellikleri .....	52
Tablo 2.3. CDP modelde beton için tanımlanan lineer olmayan davranış parametreleri .....	54
Tablo 2.4. DP modelde beton için tanımlanan lineer olmayan davranış parametreleri .....	56
Tablo 3.1. Darbe yükü analizlerinden elde edilen sonuçlar .....	118

## SEMBOLLER DİZİNİ

CDP	Beton Plastikleşme Hasar Modeli(Concrete Damage Plasticity Model)
DP	Drucker-Prager Malzeme Modeli
CMP	Genel Metal Plastisite Modeli(Classical Metal Plasticity Model)
$\sigma - \epsilon$	Gerilme şekildeğiştirme ilişkisi
$\beta$	İçsel sürtünme açısı
$d'$	Sertleşme parametresi
$\sigma_c$	Basınç dayanımı
$\sigma_t$	Çekme dayanımı
K	Akma yüzeyinin şeklini belirleyen parametre(DP)
$\bar{q}$	Eşdeğer Mises gerilmesi
$\bar{p}$	Hidrostatik basınç gerilmesi
$\Psi$	Dilatasyon açısı
$E_0$	Başlangıç elastisite modülü
$d_c$	Rijitlik azalım parametresi (basınç)
$d_t$	Rijitlik azalım parametresi (çekme)
$\epsilon_c^{in}$	Elastik olmayan şekildeğiştirme(basınç)
$\epsilon_t^{ck}$	Çatlama şekildeğiştirme(çekme)
$\omega_c$	Rijitliğin iyileştirilmesi parametresi(basınç)
$\omega_t$	Rijitliğin iyileştirilmesi parametresi(çekme)
$\epsilon_c^{pla}$	Plastik şekildeğiştirme(basınç)
$\epsilon_t^{pla}$	Plastik şekildeğiştirme(çekme)
$f_{co}$	Eksenel basınç gerilmesi altında akma gerilmesi

$f_{bo}$	İki eksenli gerilme durumunda akma gerilmesi
$K_c$	Akma yüzeyinin şeklini belirleyen parametre (CDP)
$G$	Potansiyel plastik akma fonksiyonu
$e$	Eksantrisite(Dış merkezlik)
$F_d$	Darbe yükü
$W_{net}$	Çarpan cismin yaptığı iş
$\nu$	Poisson oranı
$\sigma_{tru}$	Gerçek gerilme
$\epsilon_{pla}$	Plastik şekildeğiştirme(CMP)
$\epsilon_{nom}$	Genel şekildeğiştirme
$\dot{\epsilon}$	Dinamik durumlarda şekildeğiştirme hızı
$\dot{\epsilon}_o$	Statik durumlarda şekildeğiştirme hızı
$f_{imp}$	Dinamik yükleme durumunda basınç dayanımı
$f_{sta}$	Statik yükleme durumunda basınç dayanımı
$E_{imp}$	Dinamik yükleme durumunda elastisite modülü
$E_{sta}$	Statik yükleme durumunda elastisite modülü
$f_c'$	Statik durumda küp numune beton basınç dayanımı
$f_{ctk}$	Betonun karakteristik basınç dayanımı
$G_f$	Kırılma enerjisi
$\dot{\omega}$	Çatlak açılma hızı
$f_y$	Betonarme çeliğinin akma dayanımı
$f_u$	Betonarme çeliğinin çekme dayanımı
$f_d$	Sönüm kuvveti
$f_s$	Yay kuvveti
$k$	Yay rijitliği

$c$	Sönüm katsayısı
$V_d$	Cismin çarpma hızı
$d$	Çarpmadan sonra cismin duruncaya kadar aldığı mesafe
$h$	Cismin serbest bırakıldığı yükseklik
$m$	Cismin kütlesi
$g$	Yer çekimi ivmesi

## 1.GENEL BİLGİLER

### 1.1.Giriş

Beton, beton ve betonarme yapılarda yaygın olarak kullanılan kompozit bir yapı malzemesidir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan bu betonun dayanım ve dayanıklılığı, teknolojinin de gelişmesiyle önemli oranda artmış artmaya da devam etmektedir. Ancak betonun dayanımı arttıkça kırılabilirliği de artmaktadır. Bu kompozit yapı malzemesi ile inşa edilen betonarme yapılar servis süreci boyunca statik (kendi ağırlığı ve hareketli yükler) ve dinamik yüklere (deprem, rüzgâr, vb.) maruz kalmaktadırlar. Betonarme yapılar ekonomik ömürleri boyunca bu yükleri emniyetle taşıyabilecekleri şekilde projelendirilmektedir. Bir yapının projelendirilmesinde sabit (kendi ağırlığı) ve hareketli yükler dışında deprem ve rüzgâr gibi dinamik yükler de dikkate alınmaktadır.

Günümüzde yapılar darbe ve patlama yükleri gibi etkilere de maruz kalabilmektedir. Genellikle nükleer santraller, havalimanları, savunma sanayi ve askeri tesisler gibi yapıların maruz kaldığı patlama ve darbe yükleri, zaman zaman doğal gaz sistemlerinde oluşan patlama ve terör saldırısı gibi nedenlerle, normal yapılara da meydana gelmektedir. Dolayısıyla da betonarme yapılarda bir cismin çarpmasıyla ya da patlamayla oluşan darbe yüklerinin oluşturduğu etkilerin araştırılması önem kazanmıştır. Özellikle son yıllarda, darbe etkilerine karşı yeterli dayanıma sahip olmayan beton ile üretilen, betonarme elemanların bu etkiler altında davranışlarının ortaya konulması amacı ile deneysel ve teorik çalışmalar yapılamaya başlanmıştır. Darbe etkisine maruz yapıların tam ölçekli olarak deneysel çalışmalara dâhil edilmesi ekonomik olmamaktadır. Bu nedenle bu gibi yükleme durumlarında yapıların analitik olarak incelenmesi kaçınılmaz olmaktadır.

Bu çalışmada, bir cismin çarpmasıyla oluşan darbe yükünün betonarme plaklara etkisi analitik olarak incelenmiştir. Bu incelemede üç farklı boyutta betonarme plak iki farklı mesnet koşulunda darbe yüküne maruz bırakılmıştır. Farklı mesnet koşullarındaki betonarme plaklarda, beton için biri Drucker-Prager (DP) diğeri ise Betonun plastikleşme hasar modeli (Concrete Damage Plasticity Model-CDP) olmak üzere toplam iki farklı malzeme modeli dikkate alınmıştır. Betonarme çeliği için ise genel plastisite modeli (Classical Metal Plasticity Model-CMP) kullanılmıştır. Çözümlemelerde ABAQUS/CAE v.6.13 bilgisayar programı kullanılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda plaklarda darbe yükleri, yer değiştirme, enerji yutma kapasiteleri ve çatlak mekanizmaları elde edilmiştir.

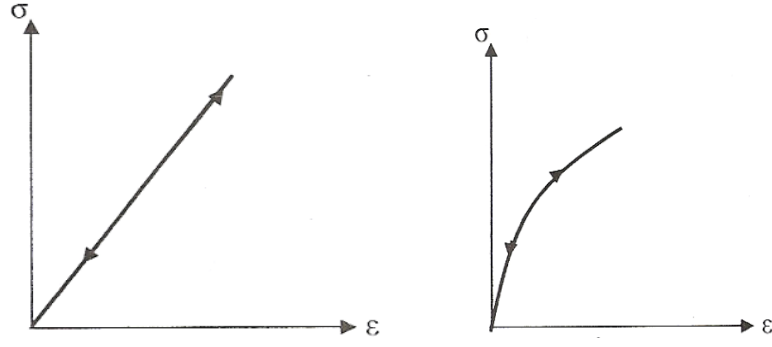
## **1.2. Malzeme Modelleri Hakkında Genel Bilgiler**

Betonun gerilme-deformasyon özelliklerini basınç dayanımı, yükleme hızı, numune boyutları, kullanılan presin özellikleri, sargının olup olamaması gibi birçok değişkenin etkilediği bilinmektedir. Bu sebeplerden dolayı beton için kesin olarak kabul edilebilecek bir gerilme-şekildeğiştirme eğrisi elde edilememektedir. Bu belirsiz durumu aşabilmek ve malzeme davranışını temsil etmek amacı ile deneylerden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrileri yardımıyla ve bazı kabuller yapılarak, beton için birçok matematiksel model önerilmiştir. Malzemelerin matematiksel modellerinin oluşturulabilmesi için bu malzemenin gerçek davranışının, elastik, plastik, viskoplastik, elastoplastik vb. davranışlardan herhangi biri veya birbirleri ile birleşimleri sonucu oluşan bazı modellere uygunluk gösterdiği kabulleri yapılmıştır. Betonunun gerilme-şekildeğiştirme davranışı temsil etmek için oluşturulan birçok model yukarıda da belirtildiği gibi birden fazla malzeme davranışının birleştirilmesi ile elde edilmiştir. CEB (1988), bu malzeme modellerinin oluşturulması için kullanılan teorileri sınıflandırmıştır (Murtiadi,1999). Bu malzeme modelleri aşağıda özetlenmiştir.

### **1.2.1. Lineer ve Lineer Olmayan Elastik Malzeme Modeli**

Lineer davranış gösteren malzemeler, yük altında malzemenin belli bir bölümünde gerilme ve şekildeğiştirme değerlerinin doğru orantılı olarak değiştiği durumu tanımlamak için kullanılmaktadır. Özellikle deformasyon hızının yüksek olduğu, darbe yüklemeleri, patlamalar, deprem gibi aşırı ve ani yükleme durumlarında betonun davranışını temsil edememektedir.

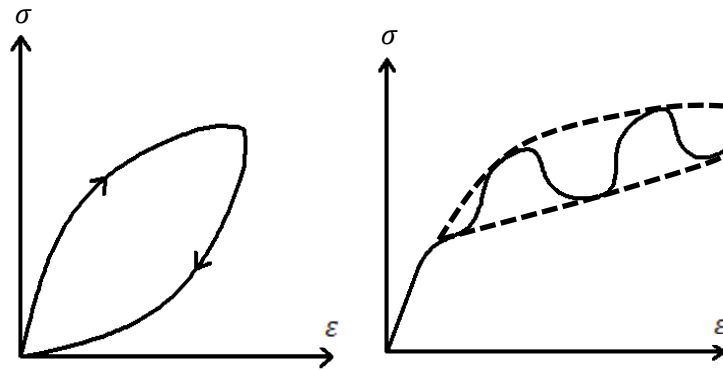
Lineer olmayan elastik malzeme modellerinde ise malzeme elastik özellik göstermekte fakat “Hooke cismi” gibi gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi tam anlamıyla doğru orantılı olmamaktadır. Lineer elastik malzeme davranışına benzer olarak bu malzeme modeli de yüksek şekildeğiştirme hızın olduğu yüklemelerde betonun davranışını temsil edememektedir. Lineer ve lineer olmayan malzeme modelleri Şekil 1.1’de verilmektedir.



Şekil 1.1. Elastik ve Lineer olmayan elastik malzemelerin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri

### 1.2.2.Viskoelastik ve Viskoplastik Malzeme Modeli

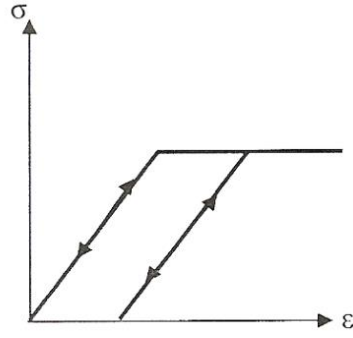
Viskoelastik davranış, bazı araştırmacılar tarafından, sünme gibi sabit gerilmeler altında, zamana bağlı olarak şekildeğiştirmelerde artış olması durumunu idealize etmek için kullanılan malzeme modelidir. Viskoplastik malzeme modeli ise yüksek şekildeğiştirme hızının olduğu yükleme durumlarındaki problemlerin çözümü için kullanılmaktadır. Bu modelde şekildeğiştirme hızının malzeme dayanımı üzerindeki etkisi dikkate alınmaktadır. Bu nedenle, darbe yüklerine maruz betonarme elemanlarının davranışına uygun bir model olduğu düşünülmektedir (Murtiadi,1999). Viskoelastik ve viskoplastik malzeme modeli Şekil 1.2’de verilmektedir.



Şekil 1.2. Viskoelastik ve Viskoplastik malzemelerin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri

### 1.2.3. Elastoplastik Malzeme Modeli

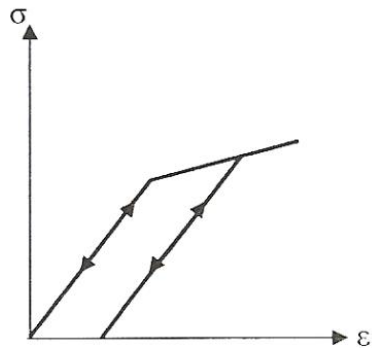
Bu modelde, maruz olduğu gerilmeler akma gerilmesinden daha küçük olduğu sürece malzeme Hooke cimine benzer davranış göstermektedir. Gerilmeler akma sınırına dayandığında akma sınırsızdır. Teorik olarak akma gerilmesinin üzerindeki gerilme değerlerinin karşılığı yoktur. Genellikle, sayısal modellemelerde, betonarme çeliğinin davranışını idealleştirmek için kullanılan malzeme modelidir (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Elastoplastik malzemelerin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri

### 1.2.4. Pekleşen Elastoplastik Malzeme Modeli

Bu tür malzeme modelleri akma gerilmesine kadar malzeme Hooke yasasına uygun davranmakta, artan gerilmeler akma gerilmesine dayandığında ise akma olayı gerçekleşmektedir. Bu malzeme modelinde akma gerilmesinin üzerindeki gerilme değerlerinin karşılığı vardır (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. Pekleşen elastoplastik malzemelerin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri



### 1.2.5.Mekanik Hasar Malzeme Modeli

Bu malzeme modeli, yük altında şekildeğiştirmeye uğrayan malzemenin dayanımında ve dolayısıyla da rijitliğinde azalma olduğu düşüncesine dayanmaktadır. Bu davranışı matematiksel olarak tanımlamak için skaler ya da vektörel olarak bir hasar parametresi tanımlanır (Murtiadi, 1999). Bu çalışmada, beton malzemenin yük altındaki davranışını tanımlamak için kullanılan CDP modeli bir mekanik hasar malzeme modeli olarak tanımlanmaktadır.

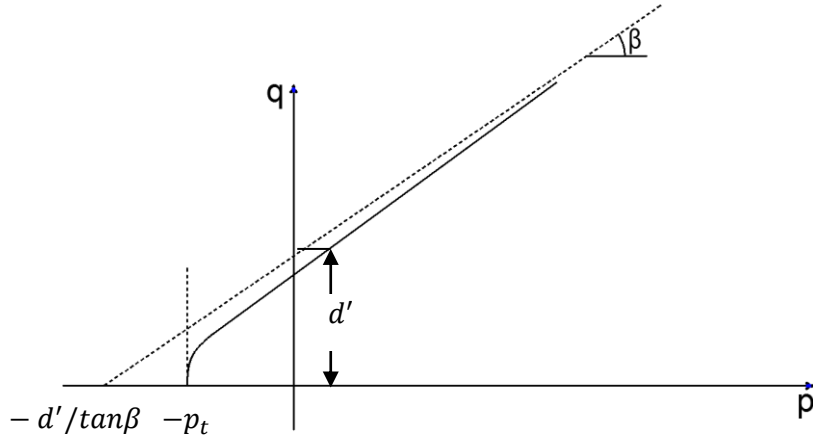
### 1.2.6.Drucker-Prager Malzeme Modeli

Drucker-Prager (DP) malzeme modeli, plastik akmanın gerçekleşmesi ile malzemenin dayanımını kaybettiği düşüncesine dayanan malzeme modelidir. Genellikle zeminlerin plastik şekildeğiştirme yapması durumunda zeminlerin malzeme özelliklerinin tanımlanmasında kullanılmaktadır. Beton, kaya, polimer gibi basınç dayanımının çekme dayanımından daha yüksek olduğu malzemelerin yük altındaki davranışlarını tanımlamak için uygun bir model olduğu düşünülmektedir (Drucker ve Prager,1952).

DP malzeme modeli, Von-Mises kriterinin genişletilmiş hali olarak tanımlanmaktadır. DP modelde Von-Mises kriterine ek olarak hidrostatik basınç durumu ek bir parametreyle ifade edilmektedir. DP malzeme modelinin ABAQUS programında tanımlanan akma yüzeyi fonksiyonu hiperbolik (Şekil 1.5) ve lineer (Şekil 1.6) olarak iki ayrı biçimde ifade edilebilmektedir. Hiperbolik akma yüzeyi fonksiyonunun denklemi aşağıda verilmektedir.

$$F = \sqrt{l_o^2 + q^2} - p \cdot \tan\beta - d' = 0 \quad (1.1)$$

$$l_o = d' - p_t \cdot \tan\beta \quad (1.2)$$



Şekil 1.5. DP malzeme modelinin hiperbolik akma fonksiyonu eğrisi

Hiperbolik akma yüzeyi fonksiyonu denkleminde (1.1), malzemenin içsel sürtünme açısı  $\beta$ , malzemenin hidrostatik gerilme durumundaki başlangıç çekme dayanımı  $p_t$  ve sertleşme parametresi olarak tanımlanan  $d'$  ile hesaplanmaktadır. Malzeme modelindeki  $d'$  sertleşme parametresi ise malzemenin aksenal basınç veya aksenal çekme gerilmesi uygulanması durumuna göre hesaplanmaktadır. Başka bir ifade ile analizi yapılacak olan sistemde malzemenin hangi sertleşme durumu oluşması isteniyorsa o duruma göre  $d'$  parametresi hesaplanmaktadır (1.3-1.4).

$$d' = \sqrt{l_0^2 + \sigma_c^2} - \frac{\sigma_c}{3} \tan\beta \quad (1.3)$$

$$d' = \sqrt{l_0^2 + \sigma_t^2} + \frac{\sigma_t}{3} \tan\beta \quad (1.4)$$

Eğer sertleşme parametresi aksenal basınç durumu için hesaplanacak ise (1.3) eşitliği ile hesaplanmakta, aksenal çekme durumu için ise (1.4) eşitliği kullanılmaktadır. Eşitliklerde verilen  $(\sigma_c, \sigma_t)$  gerilme değerleri sırası ile aksenal yüklemeler ile elde edilen basınç dayanımı ve çekme dayanımını ifade etmektedir. Benzer şekilde, DP malzeme modelinin lineer akma yüzeyi fonksiyonu Şekil 1.6'de görülmektedir.

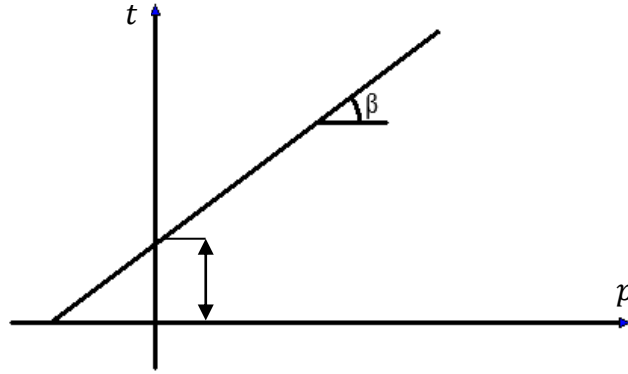
$$F = t - p \cdot \tan\beta - d = 0 \quad (1.5)$$

$$t = \frac{1}{2} \cdot q \cdot \left[ 1 + \frac{1}{K} - \left( 1 - \frac{1}{K} \right) \left( \frac{r}{q} \right)^3 \right] \quad (1.6)$$

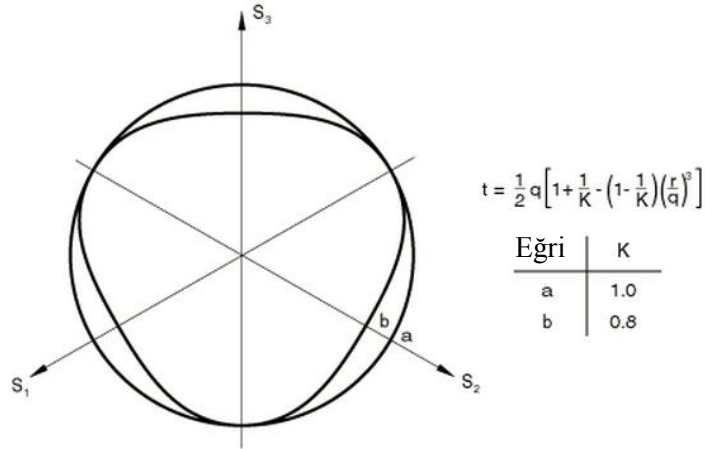
$$d = \left(1 - \frac{1}{3} \tan \beta\right) \sigma_c \quad (1.7)$$

$$d = \left(\frac{1}{K} + \frac{1}{3} \tan \beta\right) \sigma_t \quad (1.8)$$

Eşitlik 1.5’de  $d$  malzemenin kohezyonunu,  $\beta$  malzemenin içsel sürtünme açısını  $\bar{q}$  ve  $\bar{p}$  değerleri ise sırasıyla eşdeğer Mises gerilmesini ve hidrostatik basıncı ifade etmektedir. Diğer parametre  $t$  ise eşdeğer Mises gerilme değeri ve deviyatör düzlemdeki akma yüzeyinin şeklini belirleyen  $K$  parametresi (Şekil 1.7) ile hesaplanmaktadır.  $K$ , üç eksenli gerilme etkisinde çekme ve basınç akma gerilme değerlerinin oranı olarak tanımlanmaktadır ve ABAQUS programı ( $K$ ) parametresinin,  $0.778 \leq K \leq 1$  aralığında alınmasını önermektedir.



Şekil 1.6. DP malzeme modelinin lineer akma fonksiyonu eğrisi



Şekil 1.7. K parametresinin akma yüzeyi şekli üzerindeki etkisi

DP malzeme modelinde, bir önceki sayfada bahsedildiği gibi lineer ve hiperbolik olmak üzere iki şekilde tanımlanabilmektedir. Malzemenin yüklemeler altında oluşan plastik şekil değiştirme değerinin artımını tanımlayan bir “potansiyel plastik akma” fonksiyonu tanımlanmaktadır. DP malzeme modelinin lineer akma yüzeyi ile tanımlanan malzeme modelinin potansiyel plastik akma fonksiyonunun denklemi aşağıda verilmektedir.

$$G = t - p \cdot \tan\Psi \quad (1.9)$$

DP malzeme modelinde, akma yüzeyinin tanımlanmasında içsel sürtünme açısı  $\beta$ , potansiyel plastik akma fonksiyonu tanımlanırken dilatasyon açısı  $\Psi$  kullanılmaktadır. Dilatasyon açısı ( $\Psi$ ), malzemenin plastik akma süresi boyunca hacimsel olarak gerçekleşen plastik şekil değiştirmeleri kontrol eden değişkendir. Bu değişken Drucker-Prager malzeme modelinin p-q düzleminde, yüksek yanal basınç gerilme değerleri ile eşdeğer Mises gerilme değerlerinin oluşturduğu eğrinin eğim açısıdır (Şekil 1.14). Fiziksel olarak, beton için tanımlanan dilatasyon açısı, betonun içsel sürtünme açısı olarak yorumlanabilmektedir (Kmieciak ve Kaminski, 2011).

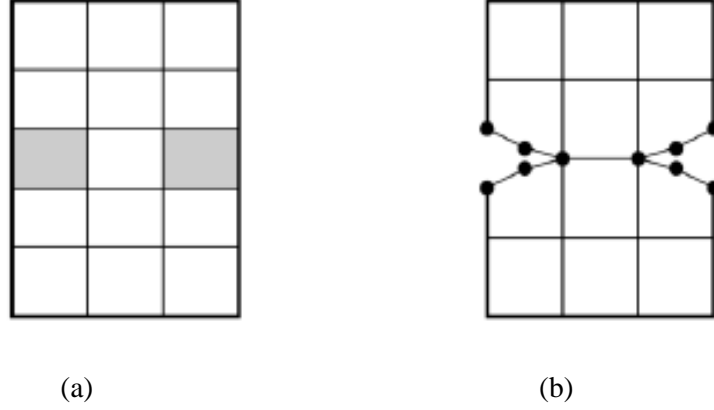
### 1.2.7. Betonun Plastikleşme Hasar Modeli (CDP)

CDP modeli, “ABAQUS/Explicit” programında tanımlanan betonun donatılı veya donatısız olarak modellenmesini sağlayan bir mekanik hasar malzeme modelidir. Bu model Lubliner vd. (1989), tarafından statik yükleme durumları için önerilmiş ve daha sonra Lee ve Fenves (1998) tarafından dinamik ve tekrarlı yükleme durumları için geliştirilmiştir.

Betonarme yapı elemanları genellikle yükleme durumlarına bağlı olarak, çekme gerilmelerinin etkili olduğu kısımda çatlama, basınç gerilmelerinin etkili olduğu bölgelerde ise ezilme davranışı göstermektedirler. Bu iki farklı göçme tipini kontrol edebilmek için Lee ve Fenves (1998) birbirinden bağımsız iki farklı skaler değişken ( $d_c$ ,  $d_t$ ) ile betonun gerilme-şekil değiştirme davranışını tanımlamışlardır.

Sonlu elemanlar yöntemleri ile yapılan çalışmalarda çatlak oluşumu tanımlanırken iki farklı yöntem izlenmektedir. Bunlar; ayırık çatlak oluşumu ve bölgesel çatlama

oluşumudur (Şekil 1.8). CDP modeli yüklemeler altında oluşacak çatlakları, bölgesel çatlama olarak (Şekil 1.8, (a)) göstermektedir (Kamali,2012).



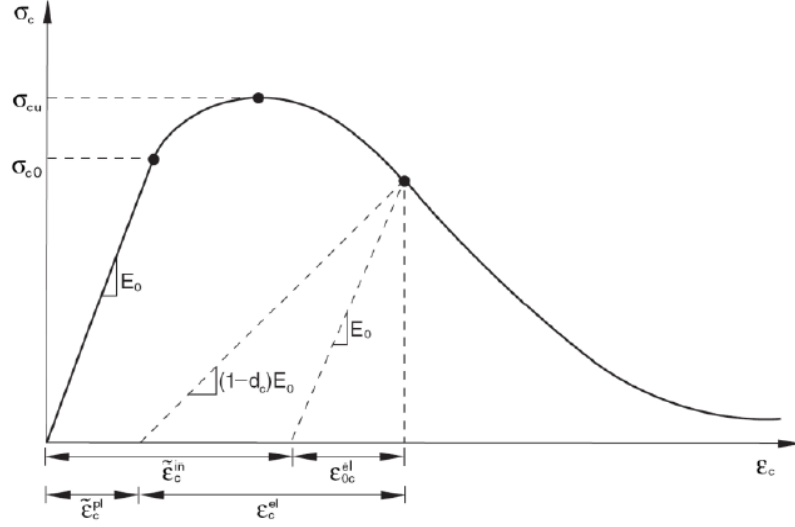
Şekil 1.8. Bölgesel çatlama (a), ayrık çatlama (b) oluşumu durumları(Pankaj, 2010)

Burada, bölgesel çatlama (a), hasarın olduğu bölgede belirli bir çatlak oluşumu olmadan sadece çatlağın etkili olduğu bölgeyi gösteren çatlak gösterim tipidir. Ayrık çatlak (b) oluşumu ise oluşturulan çözüm ağı sistemde tanımlanan malzemenin dayanımına ve mekanik özelliklerine bağlı olarak ağ bağlantıları arasındaki kopmalar ile açıklanmaktadır.

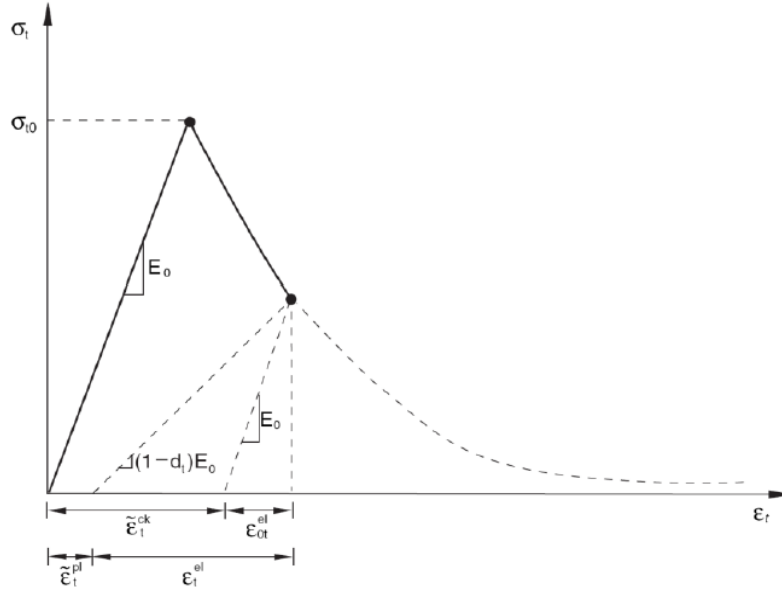
CDP modelde betonun aksenal basınç ve çekme gerilmeleri altında gerilme-şekildeğiştirme ( $\sigma - \varepsilon$ ) ilişkisi (Şekil 1.9-1.10) gösterilmektedir. Diyagramlardan da anlaşılacağı gibi betonun hem aksenal çekme hem de aksenal basınç altında elastik rijitliğinin azalmasını tanımlayan ( $d_c, d_t$ ) iki tane birbirinden bağımsız değişken tanımlanmıştır. Bu ilişki matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$E = (1 - d_{t,c}) E_0 \quad (1.8)$$

Eşitlikten (1.8) anlaşılacağı gibi her iki hasar parametresi de  $0 < d < 1$  aralığında değişmektedir.  $d=0$  da  $E_0 = E$  eşit olması durumunda, elastik bölgedeki elastisite modülünü ifade etmektedir. Diğer bir durumda  $d=1$  ise artık “d” parametresi elastik rijitliği kontrol edemez hale gelmektedir. Bu iki durumda da betonun lineer olmayan davranışını tanımlamak mümkün olmamaktadır (Şekil 1.9). Bu değişkenlerden  $d_c$  aksenal basınç altında elastik rijitliğin azalmasını kontrol eden değişken,  $d_t$  ise aksenal çekme altında betonun elastik rijitliğindeki azalmayı kontrol eden değişkendir.



Şekil 1.9. Betonun aksel basınç altında CDP model ile betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin tanımlanması (Hibbitt vd. ,2011)



Şekil 1.10. Betonun aksel çekme altında CDP model ile betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin tanımlanması (Hibbitt vd. ,2011)

CDP modelde betonun aksel çekme ve basınç yüklemeleri etkisinde davranışını tanımlarken  $d$  parametresinin yanında aksel basınç için  $\varepsilon_c^{in}$  ve aksel çekme  $\varepsilon_t^{ck}$  şekildeğiştirme değerleri tanımlanmıştır. Bu şekildeğiştirme değerleri sırası ile elastik olmayan şekildeğiştirme değerleri ile çatlama şekildeğiştirme değerleridir.

Hibbitt vd.(2011) tarafından önerilen eşitlikler ile hesaplanırlar.

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (1.9)$$

$$\varepsilon_t^{ck} = \varepsilon_t - \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (1.10)$$

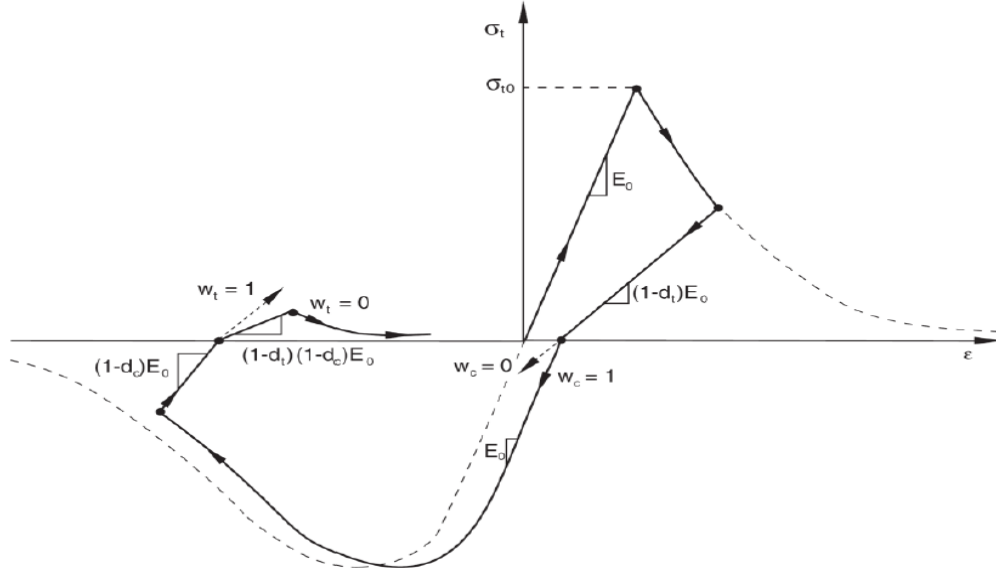
ABAQUS programında yukarıda tanımları yapılan  $\varepsilon_c^{in}$  ve  $\varepsilon_t^{ck}$  şekildeğiştirme değerleri ile kullanıcı tarafından girilen hasar parametreleri ( $d_c, d_t$ ) yardımı ile betonun hem basınç hem de çekme gerilmeleri altında oluşan plastik şekildeğiştirme değerleri aşağıdaki eşitliklerle otomatik olarak hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_c^{pla} = \varepsilon_c^{in} - \frac{d_c}{1-d_c} \cdot \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (1.11)$$

$$\varepsilon_t^{pla} = \varepsilon_t^{ck} - \frac{d_t}{1-d_t} \cdot \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (1.12)$$

Betonun dinamik ve tekrarlı yüklemelere maruz kaldığı durumlarda ardı ardına basınç ve çekme gerilmelerine maruz kalabilmektedir. Yapılan birçok çalışma beton gibi yarı gevrek malzemelerin çekme gerilmesinden sonra ani olarak basınç gerilmeleriyle yüklenmesi sonucunda çekme gerilmeleri etkisinde oluşan mikro çatlakların kapanma eğiliminde olduğunu ortaya koymaktadır. Bunun yanında basınç gerilmesinden çekme gerilmesine geçiş olması durumunda ise basınç gerilmeleri etkisinde oluşan mikro düzeydeki ezilme çatlaklarında herhangi bir iyileşme ya da kapanma olmamaktadır (Malm,2009). CDP modelde yukarıda anlatılan her iki durumu betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisine yansıtılabilmek için  $\omega_c, \omega_t$  parametreleri tanımlanmıştır (Şekil 1.11). Bu değişkenlere rijitliğin iyileştirilmesi parametreleri denilmektedir. Her iki parametrede  $0 \leq \omega \leq 1$  aralığında değişmektedir. Örneğin  $\omega_c = 1$  olması durumunda çekme gerilmesinde sonra basınç gerilmesine maruz bırakılan bir beton bir elamanda çekme gerilmeleri etkisinde kaybedilme eğiliminde olan rijitliğin geri kazanımının tamamen sağlandığı anlamına gelmektedir. Benzer olarak  $\omega_t = 0$  olması durumunda ise basınç gerilmesinden sonra çekme gerilmesine geçişte herhangi bir iyileşmenin olmadığı

sonucuna varılmaktadır.



Şekil 1.11. Rijitliğin iyileştirilmesi parametrelerinin betonun gerilme-şekildeğiştirme eğrisi üzerinde gösterimi(Hibbitt vd., 2011)

CDP modelin akma yüzeyi, “Drucker-Prager, (DP)” kırılma kriterinin beton için uyarlanmış hali olarak yorumlanabilmektedir. Bu akma fonksiyonu Lubliner vd., (1989) tarafından önerilmiş ve Lee ve Fenves (1998), tarafından hem normal gerilme hem de kayma gerilmeleri altında kırılmayı tanımlayan bir fonksiyon haline getirilmiştir. Bu akma yüzeyinin fonksiyonu denklem (1.13)’de verilmiştir (Hibbitt,2011).

$$F = \frac{1}{1-a} (\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\varepsilon^{pla}). \langle \bar{\sigma}_{max} \rangle - \gamma. \langle -\bar{\sigma}_{max} \rangle) - \bar{\sigma}_c(\varepsilon_c^{pla}) = 0 \quad (1.13)$$

Denklemden  $\bar{q}$  ve  $\bar{p}$  değerleri sırasıyla eşdeğer Mises gerilmesini ve hidrostatik yanal basıncı  $\varepsilon_c^{pla}$  ve  $\varepsilon_t^{pla}$  ise eşitlik (1.11) ve (1.12)’de görüldüğü gibi  $\varepsilon_c^{in}$ ,  $\varepsilon_t^{ck}$  ve başlangıç elastisite modülüne bağlı olarak hesaplanan plastik şekildeğiştirme değerlerini ifade etmektedir. Denklemden  $\alpha$  katsayısı  $f_{co}$  aksenal basınç durumunda hesaplanan akma gerilmesi ile  $f_{bo}$  ise iki eksenli gerilme durumunda elde edilene akma gerilmesi değerleri ile hesaplanmaktadır. Hibbitt (2011), tarafından  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları aşağıda verilen eşitlikler ile hesaplanmaktadır.



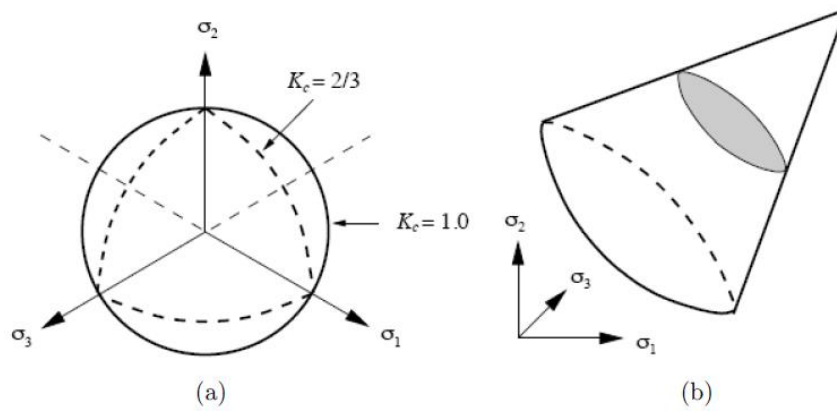
$$\alpha = \frac{\left(\frac{f_{bo}}{f_{co}}\right)^{-1}}{2\left(\frac{f_{bo}}{f_{co}}\right)^{-1}} \quad (1.14)$$

Eşitlik (1.14)'de  $\left(\frac{f_{bo}}{f_{co}}\right)$  Abaqus programı tarafından 1.16 olarak alınmasını önerilmiştir. Bu değer, Kupfer (1969), tarafından yapılan deneyler sonucunda elde edilen değerlere örtüşmektedir (Kmiecik ve Kaminski, 2011). Diğer katsayı  $\beta$  ise  $\alpha$  katsayısına ve plastik şekildeğiştirme değerlerine bağlı olarak (1.15-1.16) eşitlikleri ile hesaplanmaktadır.

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_c(\varepsilon_c^{pla})}{\bar{\sigma}_t(\varepsilon_t^{pla})} (1 - \alpha) - (1 + \alpha) \quad (1.15)$$

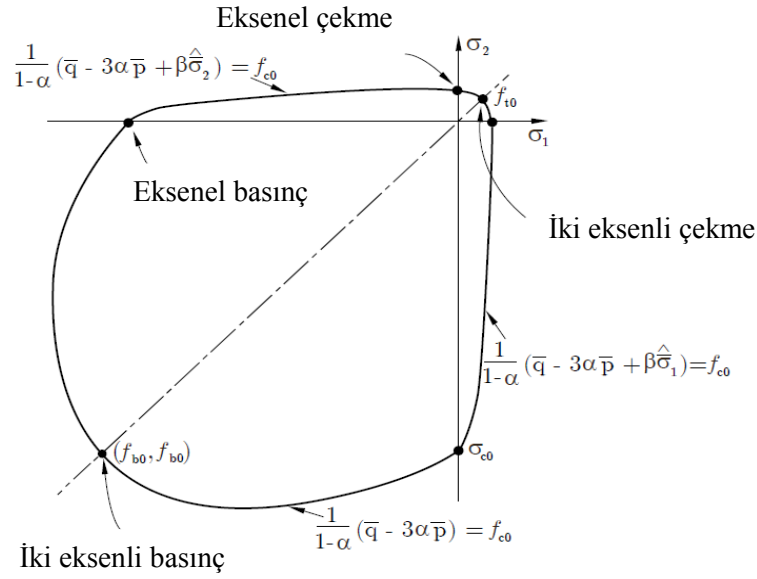
$$\gamma = \frac{3(1-K_c)}{2K_c-1} \quad (1.16)$$

Eşitlik (1.16)'da verilen  $\gamma$  katsayısı ise  $K_c$  katsayısı yardımı ile hesaplanmaktadır.  $K_c$  parametresi, üç boyutlu gerilme uzayında, akma yüzeyinin deviyatör düzlemdeki kesitinin oluşturduğu akma eğrisinin şeklini belirleyen parametredir. Akma yüzeyinin üç boyutlu gerilme uzayında ve deviyatör düzlemdeki yapısı Şekil 1.12'de görülmektedir.



Şekil 1.12.DP malzeme modelinin, deviyatör düzlemde (a) ve üç boyutlu gerilme uzayında (b) akma yüzeyinin yapısı (Pankaj,2010)

Şekil 1.12’de görüldüğü gibi  $K_c = 1$ , olması durumunda DP modelin deviyatör düzlemde akma yüzeyi oluşmaktadır. CDP malzeme modelinde DP modelinin akma yüzeyi ise yeniden düzenlenerek,  $K_c = 2/3$  alınması önerilmiştir. CDP model için tanımlanan iki eksenli gerilme halinde betonun akma yüzeyi,  $(\sigma_1$  ve  $\sigma_2)$  gerilme düzleminde Şekil 1.13’de gösterilmiştir.

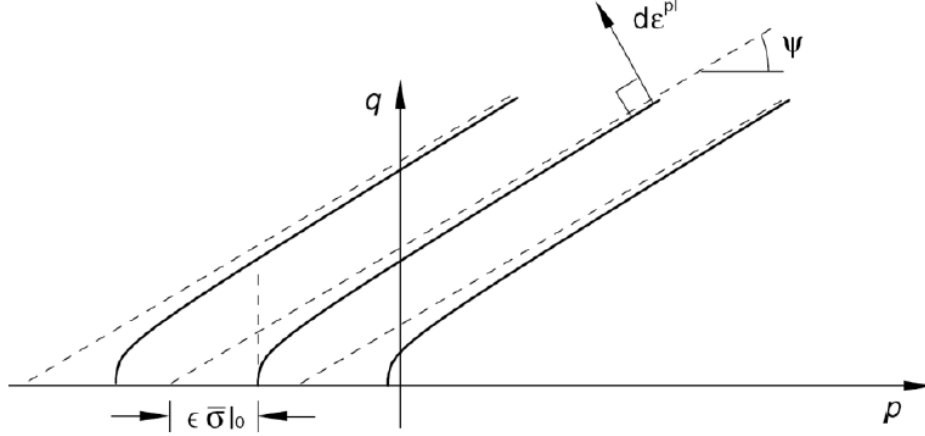


Şekil 1.13. CDP modelde, iki eksenli gerilme halinde akma yüzeyinin yapısı (Hibbitt,2011)

Beton plastik şekil değiştirme durumunda hacminde belirli bir miktarda değişim olduğu bilinmektedir. Bu hacim değiştirme ile oluşan plastik şekil değiştirmeleri “Potansiyel Plastik Akma Fonksiyonu-(G)” ile tanımlanmaktadır. Bir önceki kısımda anlatılan akma yüzeyi ile malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışı arasındaki ilişki bir akma kriteri ile tanımlanmaktadır. CDP malzeme modelinde betonun plastik şekil değiştirme davranışını belirlemek için Hibbitt (2011) tarafından düzenlenen potansiyel plastik akma fonksiyonu aşağıda verilmektedir.

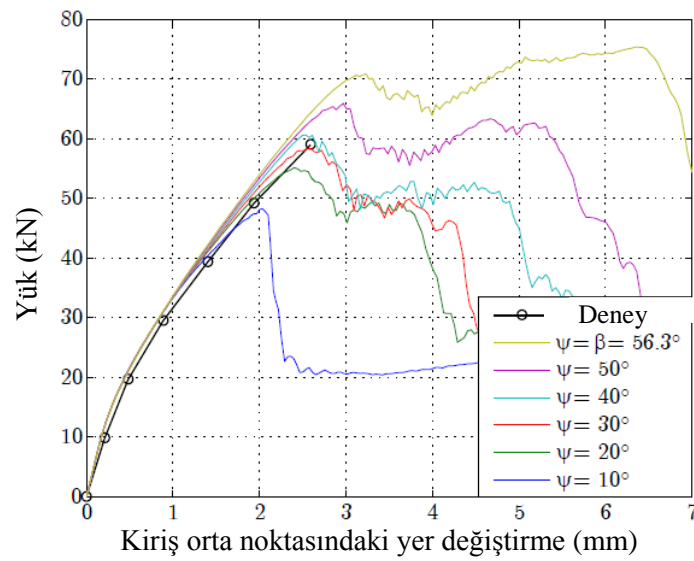
$$G(\sigma) = \sqrt{(e \cdot \sigma_{to} \cdot \tan \Psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \cdot \tan \Psi \quad (1.17)$$

Denklemdaki ( $\sigma_{to}$ ) aksel çekme durumunda kırılma anındaki çekme gerilmesini, ( $\Psi$ ) ise dilatasyon açısı olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 1.14. Drucker-Prager malzeme modelinin potansiyel plastik akma fonksiyonunun p-q düzlemde gösterimi (Hibbitt, 2011)

CDP modelde, dilatasyon açısı değerinin malzemenin yük altında göstereceği davranış üzerinde etkilidir. Malm vd. (2006), tarafından betonarme kiriş numuneler üzerinde yapılan dört nokta eğilme deney sonuçları ile farklı dilatasyon açıları dikkate alınarak oluşturulan modellerin analiz sonuçları karşılaştırılmıştır (Şekil 1.15).



Şekil 1.15. Dilatasyon açısının malzeme davranışı üzerindeki etkisi (Malm vd., 2006)

Deneysel ve sayısal sonuçlar yardımıyla, Malm (2009) tarafından, CDP modelde beton için hesaba katılacak dilatasyon açısı değerleri  $25^{\circ}$  ile  $40^{\circ}$  derece arasında seçilmesi önerilmektedir (Malm,2009).Potansiyel plastik akma fonksiyonun tanımlanmasında kullanılan diğer bir değişken ise eksantrisite parametresi ( $e$ ) olarak tanımlanmaktadır. Bu değişken plastik potansiyel akma fonksiyonunun asimptotlara olan yakınlığının bir ölçüsüdür (Şekil 1.14). Geniş bir hidrostatik yanal basınç gerilmesi aralığında malzemenin aynı dilatasyon açısına sahip olabilmesi için oluşturulan modellerde ABAQUS programı eksantrisite parametresi ( $e$ )'nin 0.1 olarak alınmasını önermektedir.

### 1.2.8.Genel Metal Plastisite Modeli (CMP)

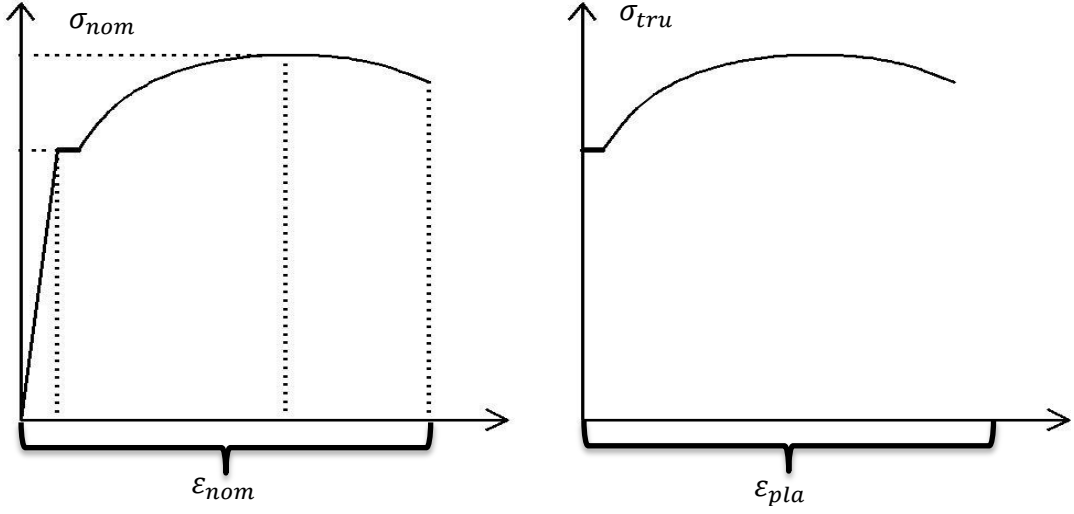
CMP malzeme modeli, metal malzemenin aksenal yüklemeler etkisinde gerilme-şekildeğiştirme davranışını tanımlayan malzeme modelidir. Bu modelde malzemenin elastik ve plastik davranışı bir birinden ayrı düşünülmektedir. Malzemenin elastik davranışı için elastisite modülü ( $E$ ) ve poisson oranı ( $\nu$ ) değerleri ile tanımlanırken, malzemenin plastik davranışı ise gerçek gerilme ( $\sigma_{tru}$ ) ve plastik şekildeğiştirme ( $\epsilon_{pla}$ ) değerleriyle tanımlanmaktadır. Bu gerilme ve şekildeğiştirme değerleri aşağıda verilen bağıntılar ile hesaplanırlar.

$$\sigma_{tru} = \sigma_{nom}(1 + \epsilon_{nom}) \quad (1.18)$$

$$\epsilon_{tru} = \ln(1 + \epsilon_{nom}) \quad (1.19)$$

$$\epsilon_{pla} = \epsilon_{tru} - \frac{\sigma_{tru}}{E} \quad (1.20)$$

Eşitlik (1.20)'de verilen ( $\epsilon_{pla}$ ), plastik şekildeğiştirme değerinin hesabı için genel şekildeğiştirme ( $\epsilon_{nom}$ ) değerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu şekildeğiştirme değeri  $\epsilon_{nom}$ , malzemenin elastik ve plastik şekildeğiştirme değerlerinin bütünü olarak kabul edilmektedir (Şekil 1.15).



Şekil 1.16. Genel şekildeğiştirme ve plastik şekildeğiştirme değerlerinin gerilme-şekildeğiştirme eğrisi üzerinde gösterimi

### 1.3. Dinamik Yüklemede Betonun Mekanik Özellikleri

Betonun dinamik yükler altında davranışını belirlemek amacıyla yapılan birçok çalışmada yükleme hızına bağlı olarak gerilme değişim hızının ve şekildeğiştirme hızının malzeme dayanımı, nihai şekildeğiştirme, maksimum gerilme değerleri gibi parametrelerin üzerinde etkisi araştırılmış ve deformasyon hızının betonun mekanik davranışı üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Avrupa Beton Komitesi (Comité Euro-International du Beton-CEB) ,1988 tarafından “Darbe ve patlama yüklerine maruz beton yapılar” raporunda farklı yükleme durumlarında, şekildeğiştirme hızı değerleri verilmiştir. Bu değerler Tablo 1.1’de verilmektedir.

Tablo 1.1. Farklı yükleme tiplerinde genel şekildeğiştirme hızları (CEB,1988)

Yükleme tipi	Genel şekildeğiştirme hızı değerleri (s <sup>-1</sup> )
Trafik	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-6</sup>
Patlamalar	5.10 <sup>-5</sup> -5.10 <sup>-5</sup>
Deprem	5.10 <sup>-3</sup> -5.10 <sup>-1</sup>
Kazık çakımı	10 <sup>-2</sup> -10 <sup>0</sup>
Uçak çarpması	5.10 <sup>-2</sup> -5.10 <sup>0</sup>
Sert darbe	10 <sup>0</sup> -5.10 <sup>1</sup>
Yüksek hızlı darbe	10 <sup>2</sup> -10 <sup>6</sup>

Bununla birlikte, dinamik yükleme durumunun, betonun mekanik özelliklerinden olan basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü, nihai şekildeğiştirme değerleri üzerinde etkisini araştırmak amacı ile birçok çalışma yapılmıştır.

Ammann ve Nussbaumer (1995), tarafından darbe ve patlama yüklerinin beton üzerindeki etkileri ile ilgili yapılan çalışmalarda betonun şekildeğiştirme hızına bağlı olarak değişen basınç dayanımı, çekme dayanımı, nihai şekildeğiştirme değeri, elastisite modülü değerlerinin değişimi için bazı matematiksel bağıntılar önermişlerdir. Deformasyon hızı ile mekanik özelliklerin arasındaki ilişki aşağıda başlıklar halinde özetlenmiştir.

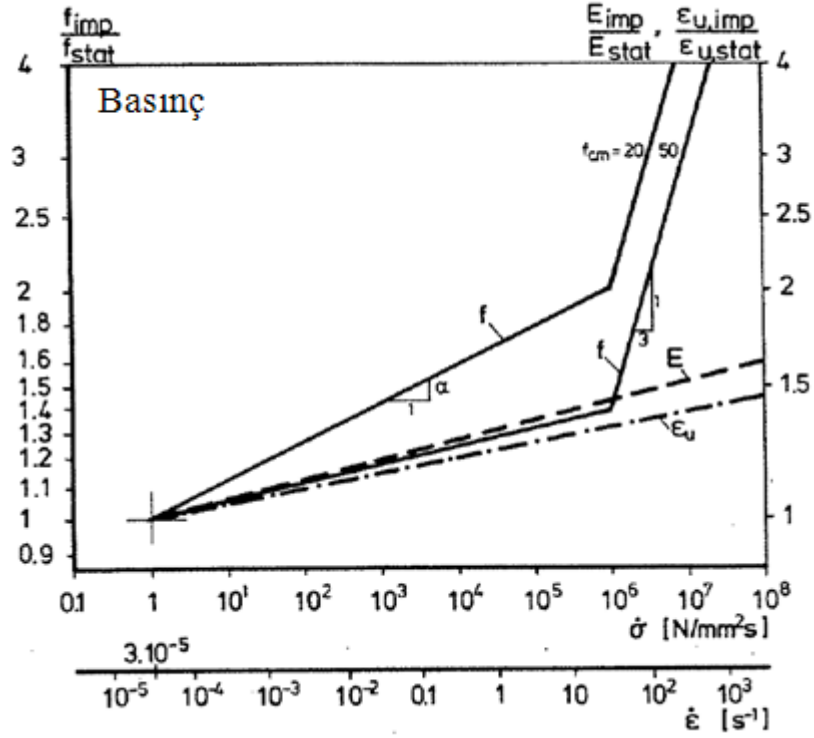
### 1.3.1.Şekildeğiştirme Hızının Betonun Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi

Betonun basınç dayanımı değerinin şekildeğiştirme hızına bağlı olarak değişimini araştırmak için statik ve dinamik test olarak ifade edilen çalışmalar yapılmıştır. Statik testler için yükleme hızına bağlı olarak elde edilen gerilme hızı değeri 1 MPa/s olarak belirlenmiştir. Bu gerilme değişim hızı değeri ile numunenin bu gerilme değişim hızı değerinde elastik davranış gösterdiği varsayımıyla elastisite modülü  $E=33000$  MPa olarak kabul edilmiş ve şekildeğiştirme hızı değerleri hesaplanmıştır.

Gerilme hızı değerleri  $10^6$  MPa/s çıkarıldığında, statik teste göre basınç dayanımı, düşük dayanımlı betonlar için 2 kat yüksek dayanımlı betonlar için ise yaklaşık olarak 1.4 kat kadar arttığı gözlemlenmiştir. Bu veriler yardımıyla beton basınç dayanımı ( $f$ )-şekildeğiştirme hızı ( $\dot{\epsilon}$ ) arasındaki ilişkisi için aşağıdaki ifade önerilmiştir (Ammann ve Nussbaumer, 1995).

$$\frac{f_{imp}}{f_{sta}} = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_o} \right)^{1.026a} \quad \text{ile} \quad a = 1 / (5 + 0.75f_c') \quad \dot{\epsilon} \leq 30s^{-1} \quad (1.21)$$

Denklem (1.21)'de  $\dot{\epsilon}$  şekildeğiştirme hızı değerini,  $\dot{\epsilon}_o$  statik yükleme durumunda hesaplanan şekildeğiştirme hızını,  $f_c'$  statik durumda hesaplanan küp numune basınç dayanımını ifade etmektedir.



Şekil 1.17. Şekildeğiştirme hızının betonun basınç gerilmeleri altında gösterdiği davranış üzerindeki etkileri

Ayrıca önerilen denklem (1.21) ve Şekil 1.17’de görüleceği gibi basınç dayanımının artması, aynı yükleme hızı değerlerinde darbe yükü altında teorik olarak hesaplanan basınç dayanım değerinin düşük dayanımlı betona göre daha az olduğu gözlenmektedir.

### 1.3.2.Şekildeğiştirme Hızının Betonun Elastisite Modülü Üzerindeki Etkisi

Yapılan araştırmalar, betonun davranışını tanımlamak için kullanılan elastisite modülü (E) değerinin, betonun statik ve dinamik yüke maruz kalması durumlarına göre değişkenlik gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Bu iki farklı yükleme durumunda statik durum temsil eden  $E_{sta}$  ile dinamik yükleme durumunu temsil eden  $E_{imp}$  elastisite modülü değerlerinin arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilmiştir (Ammann ve Nussbaumer,1995).

$$\frac{E_{imp}}{E_{sta}} = \left(\frac{\dot{\sigma}}{\dot{\sigma}_o}\right)^{0,025} \quad \dot{\sigma}_o = 1 \text{ MPa/s} \quad (1.22)$$

$$\frac{E_{imp}}{E_{sta}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_o}\right)^{0,025} \quad \dot{\epsilon}_o = 30 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1} \quad (1.23)$$

Denklem (1.22) ve (1.23)'de  $\dot{\sigma}$  gerilme hızı değişimi,  $\sigma_o$  statik durumda hesaplanan gerilme değerini,  $\dot{\varepsilon}$  dinamik yük altında ölçülen şekildeğiştirme hızını,  $\varepsilon_o$  ise statik yükleme durumunda elde edilen şekildeğiştirme hızını ifade etmektedir.

### 1.3.3.Şekildeğiştirme Hızının Betonun Şekildeğiştirme Değeri Üzerindeki Etkisi

Betonun nihai şekildeğiştirme  $\varepsilon_u$  değerinin, betonun basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri gibi şekildeğiştirme hızı değerlerinin bir fonksiyonu olduğu ifade edilmiştir. Aşağıdaki eşitlikler, nihai şekildeğiştirme  $\varepsilon_u$  ile şekildeğiştirme hızı değeri arasındaki ilişki için aşağıdaki eşitlikler önerilmiştir.

$$\frac{\varepsilon_{u_{imp}}}{\varepsilon_{u_{sta}}} = \left(\frac{\dot{\sigma}}{\sigma_o}\right)^{0,020} \quad \dot{\sigma}_o = 1 \text{ MPa/s} \quad (1.24)$$

$$\frac{\varepsilon_{u_{imp}}}{\varepsilon_{u_{sta}}} = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_o}\right)^{0,020} \quad \dot{\varepsilon}_o = 30.10^{-6} \text{ s}^{-1} \quad (1.25)$$

### 1.3.4.Şekildeğiştirme Hızının Betonun Çekme Dayanımı Üzerindeki Etkisi

Betonunu çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasında orantılı bir ilişki olduğu bilinmektedir. Betonun çekme dayanımının hesaplanması için betonunu basınç dayanımına bağlı bir fonksiyon ifade edilmektedir. Dinamik yükleme durumlar için betonun çekme dayanımı-şekildeğiştirme hızı arasındaki ilişkiyi ifade edebilmek için betonunun darbe yükü altında basınç dayanımı değerinin değişiminden yararlanılmaktadır.

Denklem 1.27 ve 1.28'de TS 500 ve CEB tarafından önerilen betonun basınç dayanımına bağlı çekme dayanımının hesaplanmasını sağlayan eşitliklerdir.

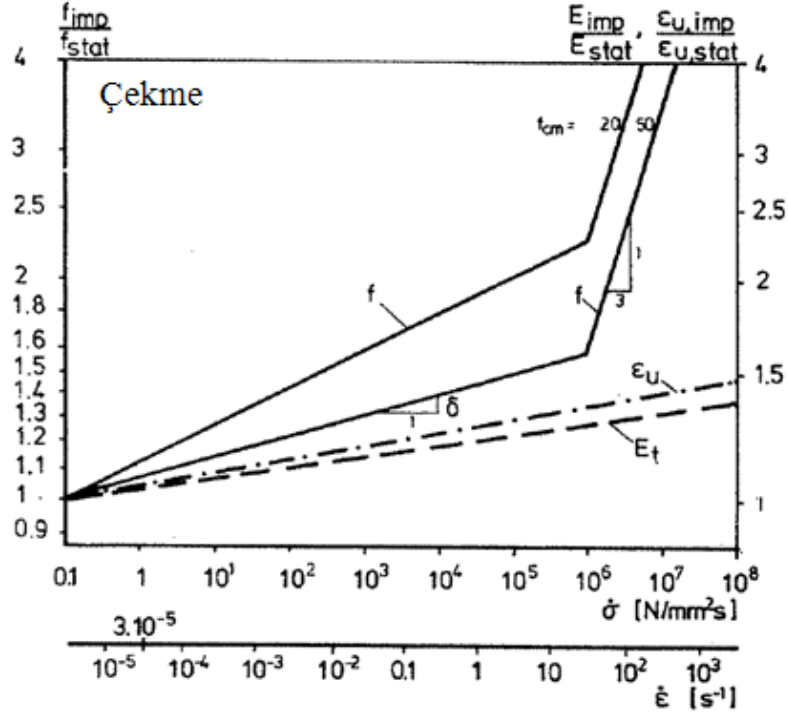
$$\frac{f_{imp}}{f_{sta}} = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_o}\right)^{1.016a} \quad \text{ile} \quad \delta = 1/(10+0.5f_c') \quad \dot{\varepsilon} \leq 30 \text{ s}^{-1} \quad (1.26)$$

$$f_t = 0.35\sqrt{f_c} \text{ (MPa)} \quad \text{TSE 500} \quad (1.27)$$

$$f_t = 0.20(f_c')^{2/3} \text{ (MPa)} \quad \text{CEB} \quad (1.28)$$



Eşitliklerde  $\dot{\epsilon}$  şekilgeçirme hızını,  $\epsilon_o$  ise statik yükleme durumunda elde edilen şekilgeçirme hızını,  $f_c'$  statik durumda hesaplanan küp numune basınç dayanımını,  $f_t$  ise karakteristik aksenal çekme dayanımını ifade etmektedir.



Şekil 1.18. Şekilgeçirme hızının betonun çekme gerilmeleri altında gösterdiği davranış üzerindeki etkileri

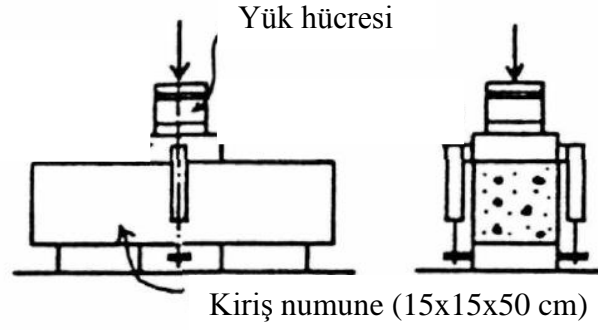
Şekil 1.18'de görüldüğü gibi basınç dayanımına benzer olarak çekme dayanımının da yükleme hızına dolayısıyla da şekilgeçirme hızına bağlı olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, aynı yükleme hızı değerinde dinamik yük altında hesaplanan dayanım değeri ile statik yükleme altında hesaplanan dayanım oranlarının ( $f_{imp}/f_{sta}$ ), beton sınıfına da bağlı olduğu görülmektedir.

### 1.3.5. Şekilgeçirme Hızının Betonun Kırma Dayanımı Üzerindeki Etkisi

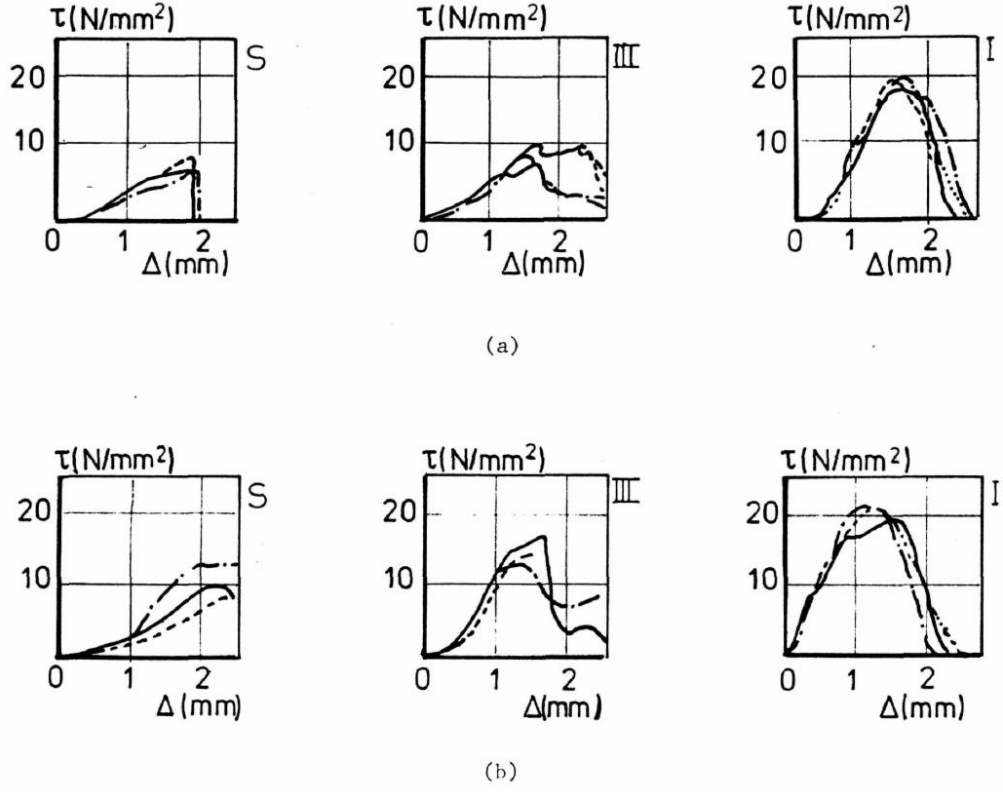
Takeda (1971) tarafından yapılan çalışmalarda, beton ve betonarme olarak üretilen yapı elemanlarının yüksek hızlarda darbe yüklerinin oluşması durumunda darbe kuvvetini oluşturan cismin boyutu, yüke maruz kalan yapı elemanının boyutları özellikle kiriş ve döşeme gibi yapı elemanlarında eleman kalınlıklarının önemli bir etken olduğu

gözlenmiştir. Ayrıca betonarme elemanlarda, kullanılan donatının akma dayanımı, çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerinin ve elemandaki donatı oranı, kullanılan donatının çapı, donatılar arası mesafe gibi parametrelerin de elemanda meydana gelebilecek kırılma tipinin oluşumunda belirleyici olmaktadır. Betonarme elemanların darbe yüküne maruz kalması durumunda kesme kuvvetlerinin sebep olduğu zımbalama kırılmasına benzeyen kesme kırılmaları oluşmaktadır. Bu tür yükleme hızının zamana bağlı olarak değiştiği, dinamik yükleme durumlarında betonun nasıl bir davranış gösterdiğinin bilinmesi olası hasar durumlarının belirlenmesinde ve anlaşılmasında yardımcı olmaktadır.

Yükleme hızına bağlı olarak hesaplanan gerilme değişimi hızının betonun kayma dayanımı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla Takeda (1971) tarafından, beton ve betonarme olarak üretilen kiriş numuneler üzerinde yapılan çalışmalarda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 1.20).



Şekil 1.19. Deney düzeneği (Takeda, 1971)

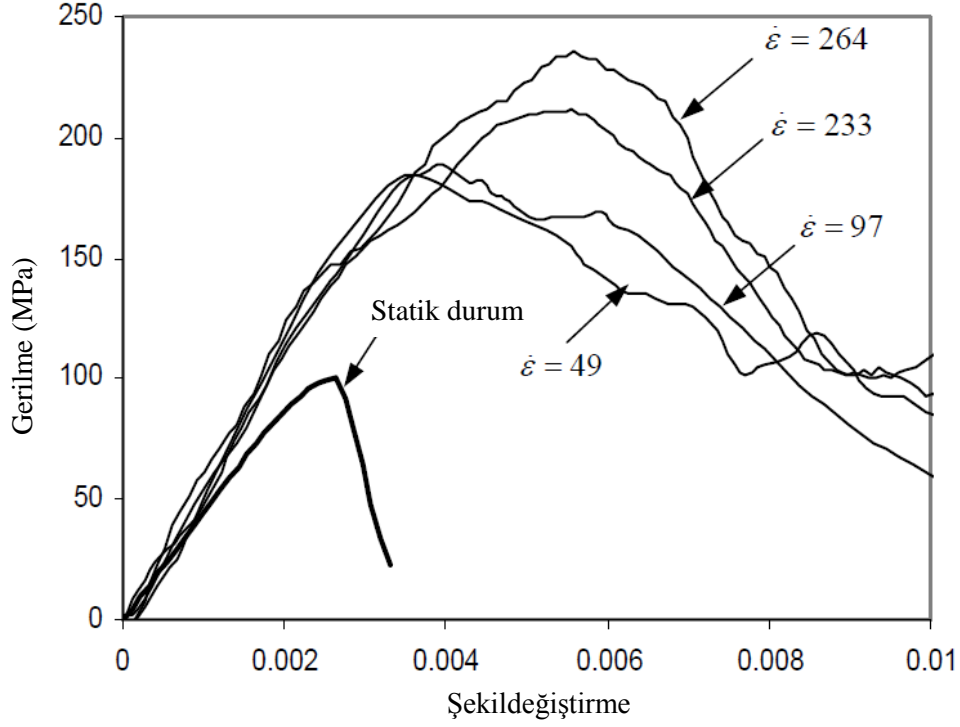


Şekil 1.20. Şekildeğiştirme hızının betonun kesme dayanımı üzerindeki etkisi (Statik yükleme durumu (S), (III) düşük yükleme hızı, (I)yüksek yükleme hızı)

Diyagramlardan da görüldüğü (Şekil 1.20) gibi, malzemenin kesme dayanımı statik yükleme durumuna göre yükleme hızına bağlı olarak artış göstermektedir.

### 1.3.6. Şekildeğiştirme Hızının Betonun Basınç Kırılma Enerjisi Üzerindeki Etkisi

Betonunun aksenal yükleme yapılarak basınç gerilmeleri etkisinde elde edilen ( $\sigma - \varepsilon$ ) eğrilerinin altında kalan alan betonun basınç gerilmeleri altında tükettiği enerji olarak tanımlanmaktadır. Yapılan çalışmalar betonun dinamik yükleme altında ( $\sigma - \varepsilon$ ) ilişkisinin, statik yükleme durumuna göre değiştiğini ortaya koymaktadır. Patlama, darbe vb. dinamik yüklemelerde beton ve/veya betonarme yapı elemanlarında kısa süre yüke maruz kalma durumu söz konusu olduğundan betonun değişen yükleme hızına bağlı olarak değişen basınç dayanımının tahmin edilebilmesi gerekmektedir.

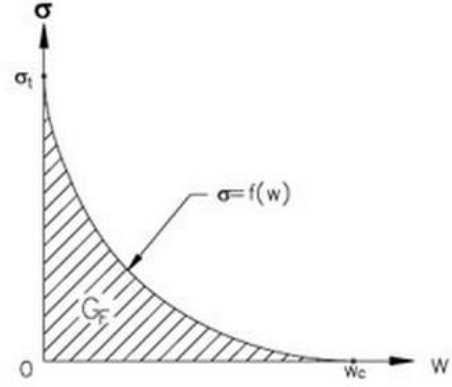
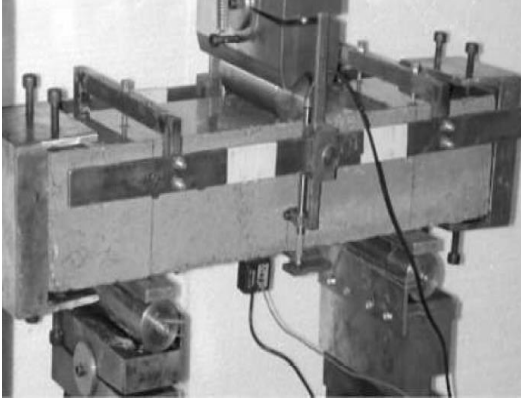


Şekil 1.21. Şekildeğiştirme hızına bağlı olarak betonun aksel basınç dayanımı değerindeki değişim (Ngo vd. 2004)

Şekil 1.21’de görüldüğü gibi şekildeğiştirme hızının artmasıyla betonun basınç dayanımı ile nihai şekildeğiştirme değerinde ciddi bir artış oluşmaktadır. Bu değişim, beton ile üretilen yapı elemanlarının dinamik yükleme durumlarında, aynı elemanın statik durumda tüketeceği enerji miktarından daha fazla enerji tüketeceği sonucuna varılabilmektedir.

### 1.3.7. Şekildeğiştirme Hızının Betonun Çekme Kırılma Enerjisi Üzerindeki Etkisi

Betonun çekme kırılma enerjisi hesaplanırken, basınç kırılma enerjisinden farklı olarak, kiriş numuneler üzerinde yapılan eğilme deneyleriyle elde edilen gerilme-çatlak genişliği eğrisinin altında kalan alan olarak ifade edilmektedir (Şekil 1.22).



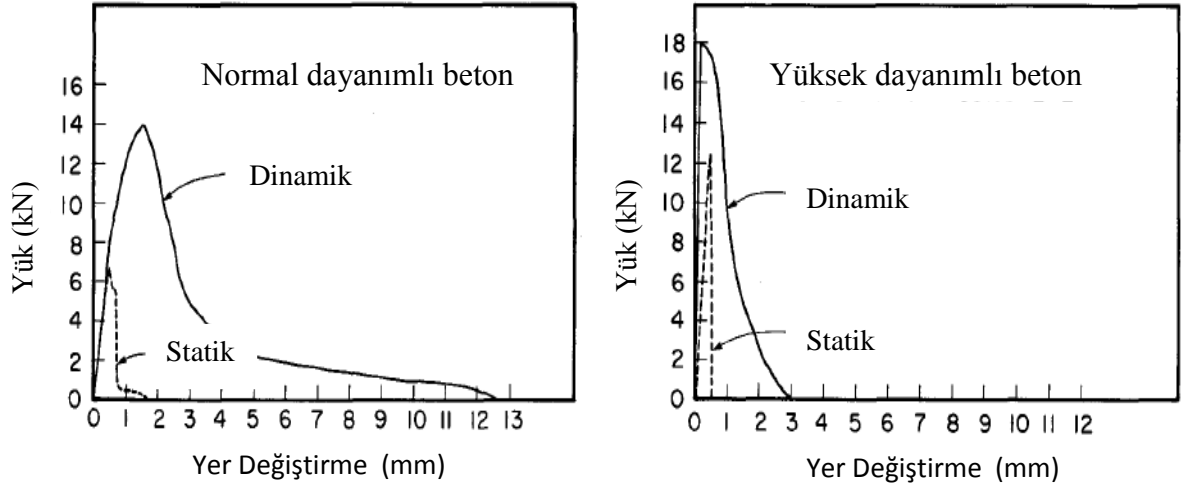
Şekil 1.22. Üç nokta eğilme deney düzeneği(Fathy vd., 2008)

Gerilme-çatlak genişliği eğrisinin altında kalan alanın denklem (1.29)'da matematiksel olarak ifade edilmiştir.

$$G_F = \int_0^{w_c} \sigma(w) dw \quad (1.29)$$

$$\frac{G_{F,imp}}{G_{F,sta}} = (\dot{w}/\dot{w}_o)^{0.045} \quad (1.30)$$

Denklem (1.29)'da  $G_F$  çekme kırılma enerjisini,  $w_c$  çatlak genişliğinin bir fonksiyonu olan  $\sigma(t)$ 'nin sıfır olduğu andaki çatlak genişliği olarak tanımlanmaktadır. Statik ve dinamik yükleme durumlarının arasındaki ilişki denklem (1.30)'da ifade edilmiştir. Eşitlikte  $\dot{w}_o$ ,  $\dot{w}$ , değerleri sırasıyla statik yükleme durumundaki şekildeğiştirme hızı  $10^{-3}$  mm/s ve çatlak açılma hızı olarak tanımlanmaktadır. Statik ve dinamik yükler altında betonun çekme kırılma enerjisinin değişimini ifade eden eşitlikten de anlaşılacağı gibi (1.30) dinamik yükleme durumunda betonun diğer mekanik özellikleri gibi çekme kırılma enerjisinde statik yükleme durumuna göre artış göstermektedir. Ayrıca Banthia vd. (1989) tarafından yapılan çalışmalarda beton sınıflarına göre şekildeğiştirme hızlarına bağlı olarak çekme kırılma enerjisindeki değişim elde edilmiştir (Şekil 1.23).



Şekil 1.23. Betonun basınç dayanımının ve yükleme durumunun betonun çekme kırılma enerjisi üzerindeki etkisi (Banthia vd., 1989)

Sonuç olarak, betonun mekanik özelliklerinin yükleme hızına ve buna bağlı olarak şekildeğiştirme hızına karşı hassas bir malzeme olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Genel olarak beton, yüksek şekildeğiştirme hızlarının meydana geldiği dinamik yükleme durumlarında, statik yüklerle kıyasla yüke karşı daha güçlü kaşı koyduğu ve aynı zamanda daha fazla enerji tüketebildiği sonucu açıkça gözlenmektedir.

#### 1.4. Yüksek Şekildeğiştirme Hızında Betonarme Çeliğinin Mekanik Özellikleri

Betonarme donatı çeliğinin, akma ve çekme dayanımı, elastisite modülü gibi mekanik özelliklerin betonarme yapı elemanlarının farklı yüklemeler altında eleman davranışlarının sünek veya gevrek davranış göstermesi bakımından önemli rol oynamaktadır. Betonarme çeliğinin düşük şekildeğiştirme değerlerinde nasıl davranış gösterdiği ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalar şekildeğiştirme hızının yaklaşık olarak  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  s<sup>-1</sup> olduğu davranışı açıklamaktadır. Fakat yapılan çalışmalar, patlama ve darbe yükleri gibi yapı elemanlarında kısa sürede yüksek şekildeğiştirme hızlarının oluşması durumlarında beton gibi betonarme çeliğinin de mekanik özelliklerinde statik duruma göre farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Yapılan birçok çalışma, betonarme çeliğinin akma ve çekme dayanımının şekildeğiştirme hızına bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. Malvar ve Crawford (1998), tarafından yapılan çalışmalarda Keenan (1983) ve Wood (1956) ve birçok araştırmacı tarafında önerilen eşitlikler (1.31-1.33) kullanılarak betonarme çeliğinin dinamik yükler

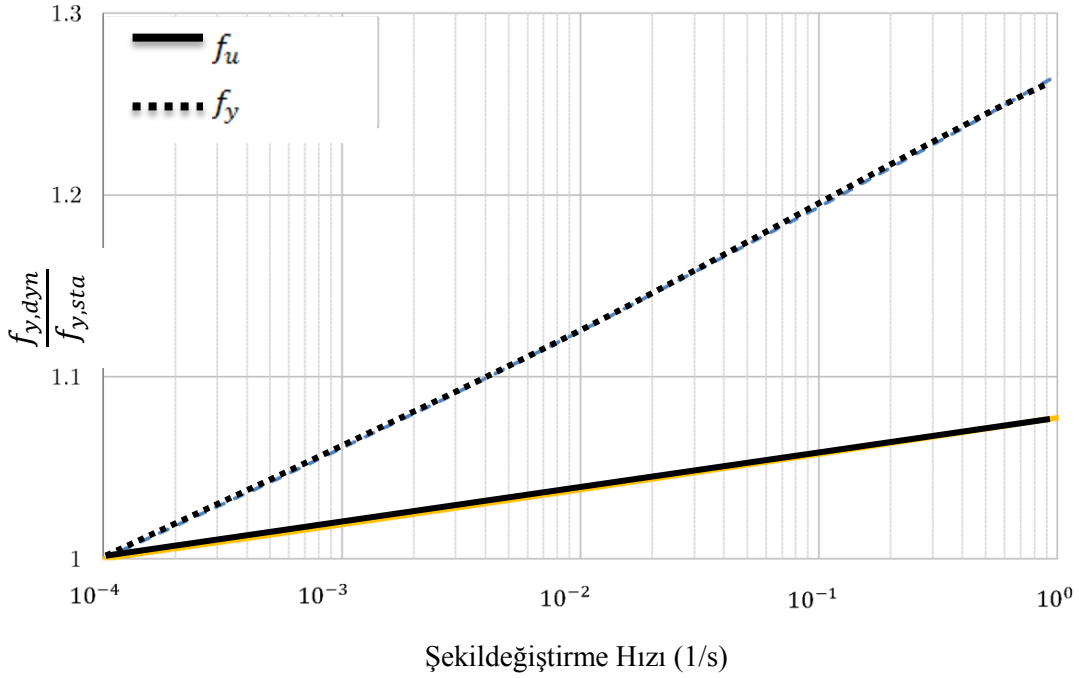
altındaki davranışlarını incelemişlerdir.

$$\frac{f_{y,dyn}}{f_{y,sta}} = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{10^{-4}} \right)^\alpha \quad (1.31)$$

$$\alpha f_y = 0.0074 - \frac{0.040 f_y}{414} \quad (1.31)$$

$$\alpha f_u = 0.019 - \frac{0.009 f_y}{414} \quad (1.33)$$

Statik yüklemeler altında hesaplanan farklı akma dayanımlarına ( $f_y$ ) ve çekme dayanımlarına ( $f_u$ ) sahip betonarme çelikleri kullanılarak yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlardan statik yük altındaki akma dayanımı 500 MPa olan betonarme çeliğinin akma ve çekme dayanımının şekildeğiştirme hızına bağlı olarak değişimi grafiksel olarak ifade edilmiştir (Şekil 1.24).



Şekil 1.24. Şekildeğiştirme hızının çeliğin akma ve çekme dayanımı üzerindeki etkisi (Malvar ve Crawford, 1998)

Şekil 1.24’de görüldüğü gibi şekildeğiştirme hızının artması betonarme çeliğinin akma ve çekme dayanımını arttırmaktadır. Aynı şekildeğiştirme hızında akma dayanımındaki artış çekme dayanımındaki artıştan daha fazla olmaktadır.

Çeliğin mekanik özelliklerindeki bu değişim, patlama ve darbe yükleri gibi yüksek şekildeğiştirme hızına sahip yüklemelere maruz betonarme yapı elemanlarının davranışını önemli derecede etkileyeceği düşünülmektedir.

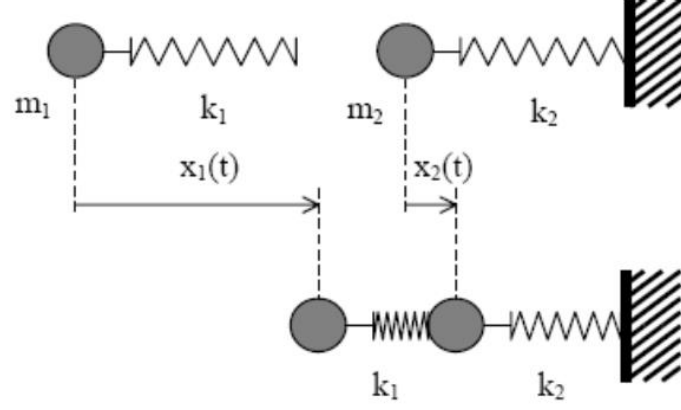
### **1.5. Darbe Yükleri**

Dinamik yükler zamana bağlı olarak değişen yükleri ifade etmektedir. Bu yükler rüzgâr, deprem gibi doğal olaylar neticesinde oluşabileceği gibi patlamalar, darbe yükleri gibi kaza veya bir saldırı sonucu da oluşabilmektedir. Darbe yükü, kısa bir zaman zarfında iki veya daha fazla cismin teması sonucu kinetik ve/veya potansiyel enerjinin yük olarak aktarılması durumu olarak tanımlanmaktadır.

Darbe yüklemesi sert ve yumuşak darbe olarak iki ana grupta toplanmaktadır (Daudeville ve Malécot, 2011). Sert ve yumuşak darbenin tanımı Eibl (1987) ve CEB (1988), tarafından yapılan tanıma göre; iki cismin çarpışmasından ibaret olan ve birinin bir başlangıç hızına sahip olması, diğ erinin hareketsiz olması durumu söz konusudur. Hedef nesne darbe yüküne karşı tasarımı yapılacak olan, yapıyı veya yapı elemanını temsil etmekte, çarpan nesne ise darbe yükünün oluşmasına sebep olan cisim olarak tanımlanmaktadır.

Bu iki cismin oluşturduğu çarpma olayı, yığış ımlı kütleli yaklaşımla basitleştirilebilmektedir (Şekil 1.25).





Şekil 1.25. Darbe yükünün kütleli-yay modeli (Daudeville ve Malécot, 2011)

Bu sistemde (Şekil 1.14),  $k_1$  iki kütle arasında kalan yayı ifade etmekte ve  $k_1$  yayı, iki cismin çarpışmasında depolanan potansiyel enerjinin cisimlerin temasından sonra şekildeğişimlere sebep olan kuvveti temsil etmektedir. Sistemdeki diğer yay ise  $k_2$ , çarpma sonucu yapıda oluşması öngörülen yer değiştirmeler ve şekildeğişimlere karşı yapının ve/veya yapı elemanının direnme kuvvetini temsil etmektedir (Daudeville ve Malécot, 2011).

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 [x_1 - x_2] = 0 \quad (1.34)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - k_1 [x_1 - x_2] + k_2 x_2 = 0 \quad (1.35)$$

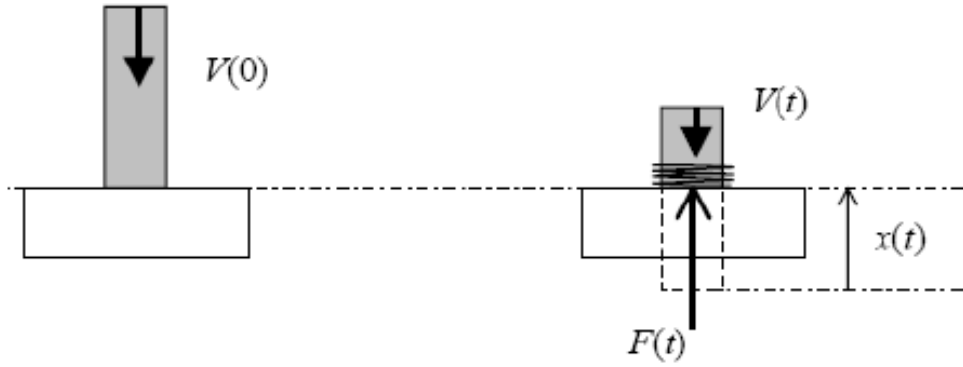
Hareket denkleminde, yay katsayıları  $k_1$ ,  $k_2$  ve  $m_1$ ,  $m_2$  kütleleri yerine konularak her iki kütle için hareket denklemleri yazılır (1.34-1.35). Bu denklemlerden yola çıkarak sert ve yumuşak darbe tanımlanır ise; Çarpan nesnede oluşan deformasyon hedef nesnede oluşan deformasyondan daha fazla olması durumuna  $x_1 \gg x_2$  göre denklemler;

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 = 0 \quad (1.36)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2 x_2 = F(t) \quad (1.37)$$

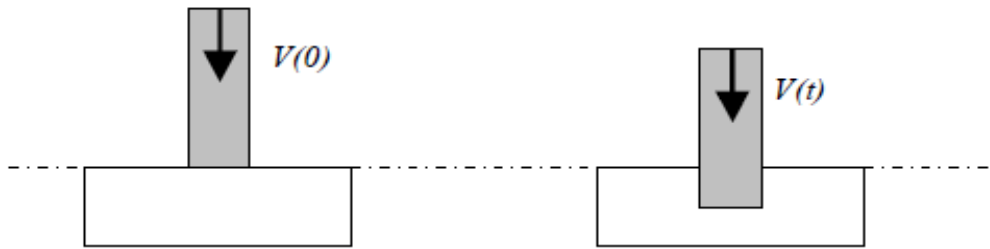
Yukarıdaki gibi düzenlendiğinde, eşitlik grubunda da görüldüğü gibi  $m_1$  kütesinin hareketi sonucu oluşan ve deformasyona neden olan kuvvet  $F(t) = m_1 \ddot{x}_1$  oluşmaktadır. İkinci denklemde ise  $F(t)$ 'den dolayı, yapıda oluşan deformasyonu ( $x_2$ ) vermektedir. Bu durumda, hedef cisim deformasyona uğramadan kalır bu yüzden çarpma nesnenin tüm kinetik enerjisi kendi bünyesinde deformasyona sebep olur. Bu tür çarpma durumuna yumuşak darbe denilmektedir (Şekil 1.26).

$$x(t) = x_1, V(t) = \dot{x}_1 \quad (1.38)$$



Şekil 1.26. Yumuşak darbe yükünün şematik gösterimi (Daudeville ve Malécot, 2011)

Aynı şekilde  $x_1 \ll x_2$  durumunda ise sert darbe durumu oluşmaktadır. Çarpma esnasında, çarpma nesne rijit ve kinetik enerjisinin tamamı hedef nesnede deformasyona sebep olduğu darbe yüklemesidir (Şekil 1.27).



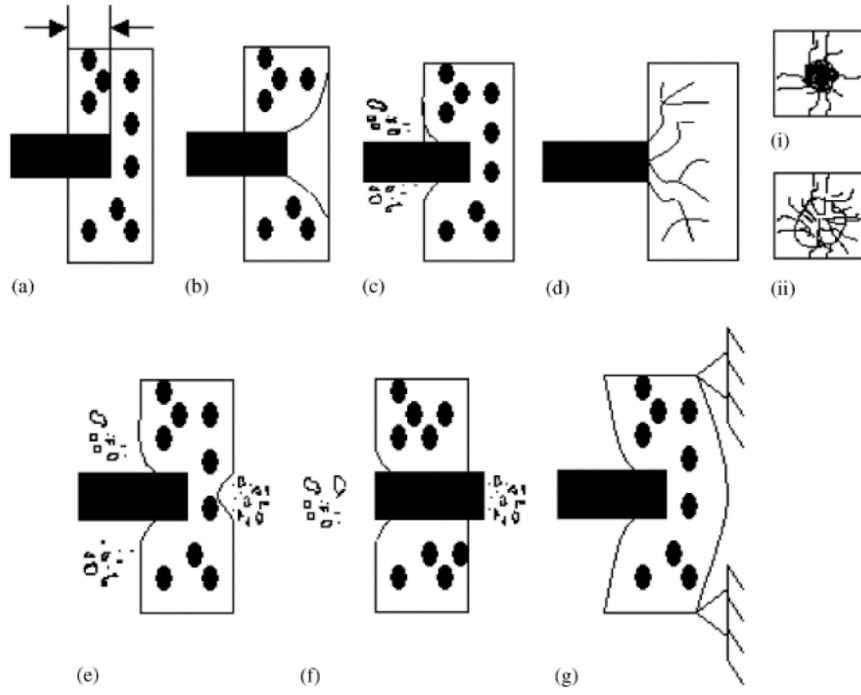
Şekil 1.27. Sert darbe yükünün şematik gösterimi (Daudeville ve Malécot, 2011)

### 1.5.1. Darbe Yüklerinin Beton ve Betonarme Plaklar Üzerindeki Etkileri

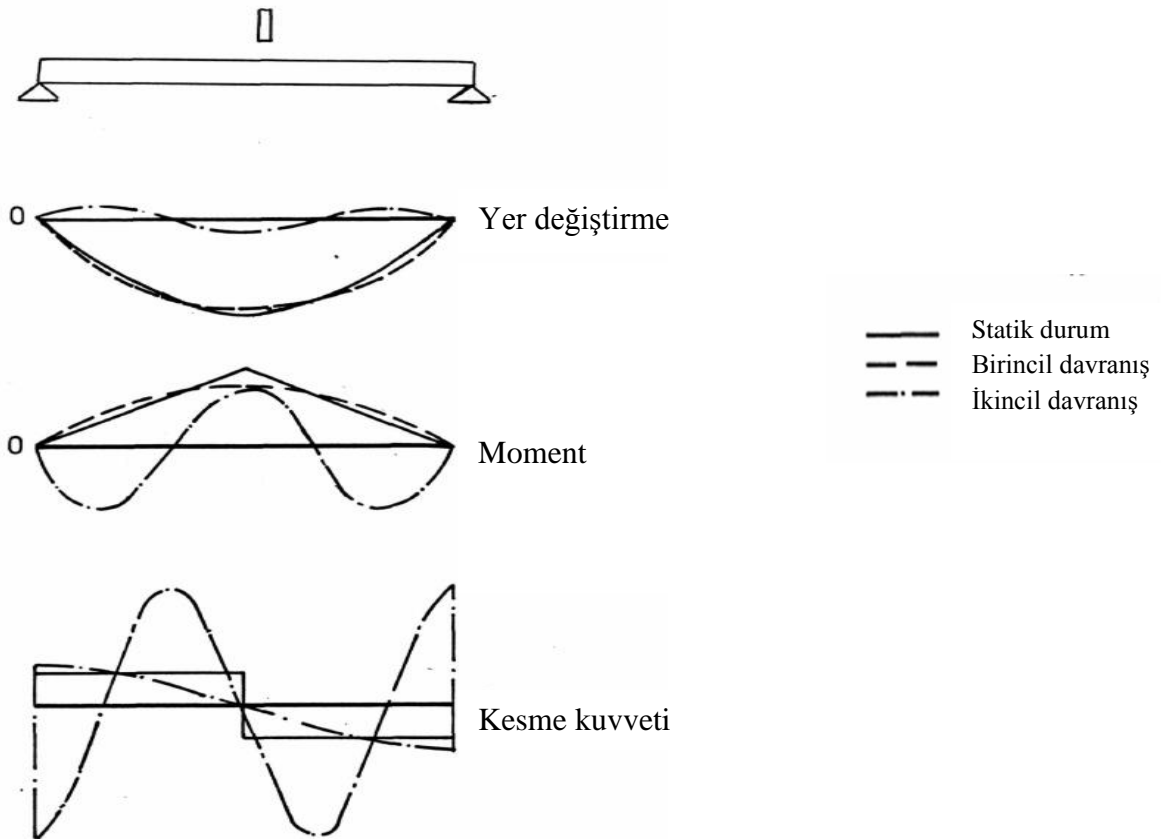
Yüksek şekildeğiştirme hızının oluştuğu darbe yüklemesi gibi dinamik yüklemeler yapılarda ve/veya yapı elemanlarında, yükün oluşturduğu gerilmenin eleman üzerindeki dağılımı ve atalet kuvvetleri etkisiyle yerel ve yapısal olarak iki ana davranış gösterirler (Zielinski,1984).

Betonarme yapı elemanlarında darbe yükü gibi dinamik yükler altında görülen yerel davranışlar; batma, delinme, zımbalama kırılması gibi yerel hasarların oluşması olarak değerlendirilmekte ve gerilmelerin eleman üzerindeki yayılımı ile oluşmaktadır. Bu tür davranışlar, darbe yüklemesinin tipi (sert veya yumuşak), darbe yükünün oluşmasına sebep olan nesnelere boyutları ve ağırlıkları, yükleme hızı, mesnet koşulları gibi parametrelerle doğrudan bağlantılı olduğunu ortaya koymaktadır (Martin vd., 2011). Bunun yanında, yapının veya elemanın göstereceği yapısal davranışının ise dinamik yükleme altında titreşim hareketi yapmasıyla açıklanmaktadır. Bu titreşim hareketine etki eden unsurlar yerel davranış parametrelerin yanı sıra sistemi oluşturan betonun ve betonarme çeliğinin mekanik özellikleri, eleman rijitlikleri ve betonun yük altında oluşan çatlama durumunun etkili olduğu görülmektedir. Genel olarak darbe yükünün sistemde oluşturduğu yapısal davranış (Şekil 1.29)'de görülmektedir.

Darbe yüklemesi ile beton plaklar üzerinde oluşacak muhtemel yerel hasarlar ise yedi ana grupta sınıflandırılmıştır Kennedy (1967). Bunlar; (a) batma, (b) konik kırılma, (c) sadece ön yüzde dökülme, (d) ön ve arka yüzde dairesel çatlama, (e) ön ve arka yüzde dökülme, (f) delinme, (g) genel yapı elemanı davranışı, olarak tanımlanmaktadır(Şekil 1.28).

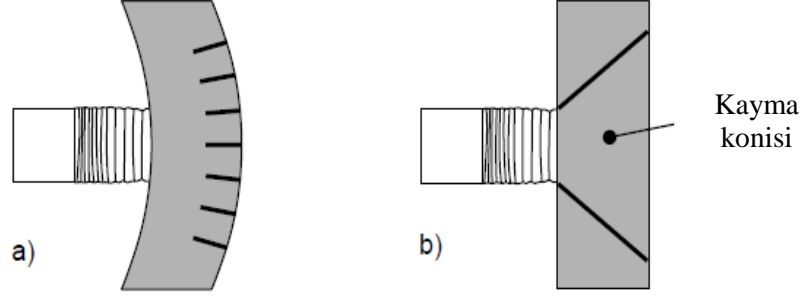


Şekil 1.28. Darbe yükünün, yerel davranış üzerindeki etkileri (Li vd., 2005)



Şekil 1.29. Darbe yükünün, yapısal davranış üzerindeki etkisi (Zielinski, 1984)

Darbe yüklemesine maruz betonarme bir plakta, yapısal davranış sonucu teorik olarak beklenen iki ana göçme tipinin oluşması beklenmektedir. Bu göçme tipleri, eğilme momenti etkisinde oluşan esnek kırılma ve kesme kuvvetlerinden dolayı oluşan zımbalama kırılmasıdır (Şekil 1.30). Her iki göçme tipide betonarme plakların darbe yükü altında gösterdiği elastik ve plastik davranışın bir sonucudur.



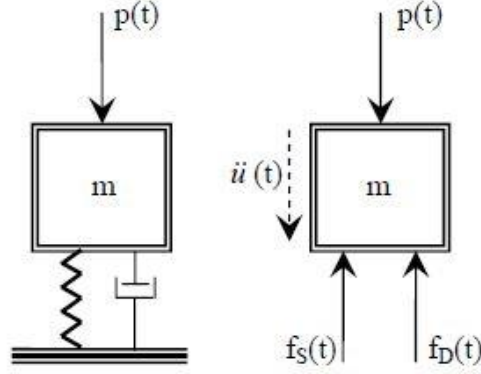
Şekil 1.30. Darbe yükünün betonarme plakların yapısal davranışları üzerindeki etkileri (Martin vd., 2011)

Esnek göçme oluşması durumunda, plağın yüke maruz kalan ön yüzünde basınç gerilmeleri, betonarme plağın arka yüzünde ise çekme gerilmeleri etkilidir. Çekme gerilmeleri, plağın arka yüzünde oluşan ve kesiti içinde devam eden eğilme çatlakların oluşmasına sebep olmakta ve bazı durumlarda arka yüzeyde beton malzemenin dökülmesine sebep olmaktadır. Zımbalama kırılması ise ani yükleme sonucu plak kesiti içerisinde kesme kuvvetlerinin etkisi ile oluşan koni şeklindeki kırılma tipidir. Eğer kırılmaya neden olan gerilmeler yüksek değerlere ulaşır ise ön ve arka yüzlerde plağın kalınlığına bağlı olarak beton malzeme kabuklanarak dökülmektedir.

Betonarme bir plağın darbe yükü etkisi ile oluşan kırılma tipinin, betonarme plağın tasarımı üzerinde etkisi vardır. Başka bir ifade ile yapılan deneysel ve teorik çalışmalar göstermektedir ki yoğun ve güçlü bir şekilde donatılan betonarme bir plakta daha çok eğilme momenti etkisinde oluşan esnek kırılma durumu oluşmaktadır. Tam tersi durumunda ise, yatay donatı yoğunluğunun az olması veya donatı bulunmaması durumunda ise koni şeklinde kesme kırılmaları oluşmaktadır. Donatı yoğunluğunun etkisinin yanında, çarpan cismin hızının, plağın kalınlığının ve genişlik-kalınlığının oranının, mesnet koşullarının da darbe yükü altında göçme tipinin oluşumunda etkili oldukları gözlenmiştir (Martin vd., 2011).

### 1.5.2. Darbe Yüklemesinin Tek Serbestlik Dereceli Sistemi (TSDS)

Herhangi bir dinamik yükleme etkisindeki bir sistemin davranışının belirlenebilmesi için, dış kuvvetlerin dengesinden yararlanılarak elde edilen hareket denkleminin çözülmesi gerekmektedir. Şekil 1.31’de basit haliyle darbe kuvvetine maruz bir yapı elemanının TSDS analitik modeli gösterilmektedir.



Şekil 1.31. Darbe yüklemesine maruz bir yapı elemanının TSDS analitik modeli ve kuvvetler dengesi (Saatçi, 2007)

Sistemi oluşturan kuvvetlerin dengesinden yararlanılarak elde edilen bağıntı aşağıda verilmektedir.

$$p(t) = f_s + f_d + m\ddot{u} \quad (1.39)$$

Bu bağıntıda verilen ( $m\ddot{u}$ ) atalet kuvvetini, ( $f_d = c\dot{u}$ ) sönüm kuvvetini, ( $f_s = ku$ ) ise yay kuvvetini ifade etmektedir. Bağıntı (1.39) yeniden düzenlenirse;

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (1.40)$$

tek serbestlik dereceli bir sistemin genel hareket denklemi elde edilmektedir.

Bağıntı 1.40'da görüldüğü gibi dinamik yükleme durumlarında sistemin davranışını belirleyen en önemli parametre (c) yapısal sönüm katsayısıdır. Buna rağmen, darbe ve patlama yük etkileri gibi çok kısa bir zaman zarfında dinamik yük değerlerinin maksimuma ulaştığı durumlarda yapısal sönüm katsayısı (c), dolayısıyla sönüm kuvveti ( $f_d$ ) ihmal edilebilmektedir (Kamali, 2012). Bunun yanı sıra, söz konusu darbe ve patlama yüklemeleri sebebiyle meydana gelebilecek çatlaklar ve lineer olamayan yer değiştirmelerden dolayı oluşan içsel sönüm, sistemin yapısal sönümünden çok daha fazla enerji tüketmektedir. Bu durumda sistemi hareket denklemini aşağıdaki gibi olmaktadır (1.41).

$$m.\ddot{u} + k.u = p(t) \quad (1.41)$$

Bu çalışmada oluşturulan betonarme plakların sonlu eleman modellerinde, yapı elemanı için ayrıca bir yapısal sönüm katsayısı (c) tanımlanmamıştır.

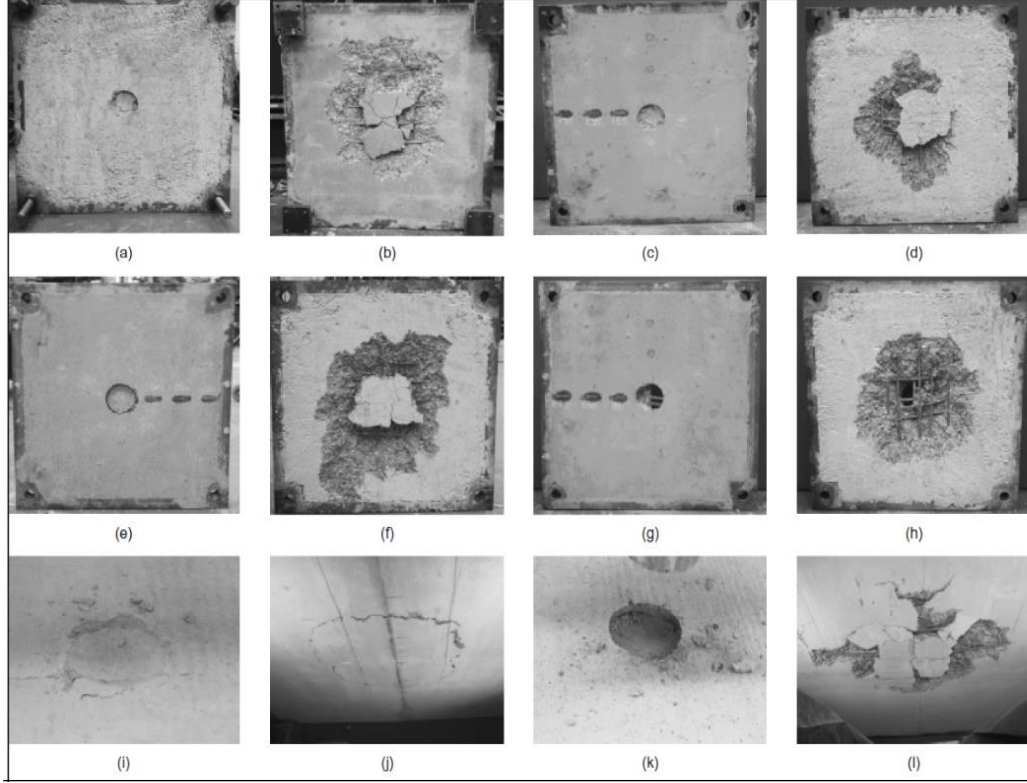
## 1.6.Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Betonarme yapı elemanlarının darbe dayanımının araştırılması amacıyla birçok analitik ve deneysel çalışma yapılmıştır. Deneysel çalışmalar yumuşak ve sert çarpma olması durumuna göre iki ana gruba ayrılarak incelenmektedir. Bu tür çalışmalar genellikle ülkelerin savunma sistemlerinin geliştirilmesi amacını taşıırken diğer bir kısmı ise nükleer santrallerin olası iç ve dış patlamalardan dolayı oluşabilecek zararları engelleme amacı taşımaktadır.

Bu kısımda özellikle, darbe yükü etkisinde beton ve betonarme plakların davranışı üzerine yapılmış deneysel çalışmalar ve oluşturulan çeşitli sayısal modellemeler incelenmiş ve özetlenmiştir.

Chen ve May (2009), tarafından yapılan çalışmada ağırlıkça fazla olan ve düşük hızda çarpan cisimlerin oluşturduğu darbe yüklemesinin kiriş, plak gibi betonarme elemanlar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kirişler ile yapılan deneylerde boyutları 2.7m olan 14 adet ve 1.5m olan 4 adet kiriş kullanılmıştır. Plaklar üzerinde yapılan çalışmalarda ise kare biçimli, boyutları 2.3m olan, kalınlığı 150mm olan 2 adet plak ile boyutları 0.8m kalınlığı 76mm olan 4 adet plak kullanılmıştır. Kirişler ile yapılan çalışmalarda, darbe yüklemesi altında oluşan yerel hasar, göçme tipi, çatlak yayılımı gibi parametreler ile darbe

yükünün zamanla değişimi arasındaki ilişki incelenmiştir. Plaklar ile yapılan çalışmalarda ise plağın maruz kaldığı çarpma kuvvetinin oluşturduğu enerji ile plağın çatlayarak dökülmesine sebep olan minimum enerji değerleri karşılaştırılmıştır. Her iki deneyden de elde edilen sonuçların sayısal model oluşturabilmek için veri olarak kullanılması düşünülmektedir.



Şekil 1.32. Darbe yüklemesi ile elde edilen yerel deformasyon tipleri (Chen ve May, 2009)

Murtiadi, Marzouk (1999), tarafından yapılan çalışmada darbe yüküne maruz yüksek dayanımlı beton ile üretilen betonarme plakların davranışları araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda 16 adet çift sıra donatılı betonarme plak ile darbe kuvvetini oluşturmak için 220 kg ağırlıklı, 304,5 mm çaplı çelik bir silindir kullanılmıştır. Darbe yükünü oluşturan bu cismin hız aralığı ise 4-9 m/s arasında tutulmuştur. Yapılan çalışmalarda, mesnet koşullarının, donatı oranının, yükleme hızının, dinamik yüke maruz beton ve donatı çeliğinde oluşan şekildeğişirmeler ile plakta meydana gelen düşey yer değiştirme değeri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.



Deney sonuçları yardımı ile belirlenen kuvvet-yer değiştirme eğrileri darbe y¼k¼ne maruz betonarme plakların kırılma enerjilerinin tespit edilmesi için kullanılmıştır.

Schellenberg vd. (2008), İsviçre’de yaptıkları çalışmalarda kaya d¼řmesi riski altında olan galerilerin davranışlarını incelemişlerdir. Galerilerin üst kısmında bulunan betonarme d¼řmeleri temsil eden farklı kalınlıklarda 6 adet donatılı ve donatısız d¼řeme numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bu d¼řemelerin üstlerine yerleştirilen farklı yastık tabakalarının, darbe y¼k¼ne karşı nasıl etkiler g¼sterdięi araştırılmıştır. D¼řemelere etkiyen darbe y¼k¼n¼ oluşturmak için 800 kg ve 4000 kg beton k¼pler hazırlanarak farklı y¼ksekliklerden numunelerin üzerlerine bırakılmıştır. Yastık tabakalılarının darbe y¼klemesine maruz d¼řemelerin davranışlarına etkisini araştırmak için sıkıştırılmış çakıl tabakası ve sıkıştırılmış çakıl tabakaları arasına, y¼ksek akma dayanımına sahip çelik ile oluşturulmuş ağlar ile cam lifi tabakası serilerek oluşturulmuş toplam 3 adet yastık tabakası hazırlanmıştır. Oluşturulan test d¼zeneklerine 2-10 m arasında değişen y¼ksekliklerden y¼kler bırakılarak sistemde oluşan darbe y¼kleri ve çarpma enerjileri ölç¼lm¼řt¼r. Deney sonuçlarından, temel araştırma konusu olan d¼řeme kalınlığının çarpma davranışına etkisinin yansıra, farklı kalınlıklarda farklı yastık tabakalarının çarpma davranışına etkisi, donatılı ve donatısız olarak hazırlanan d¼řemelerin davranışları arasındaki farklar gibi farklı araştırma konuları hakkında da bilgi edinilmesi amaçlanmıştır.



şekil 1.33. Darbe y¼k¼n¼ oluşturmak için hazırlanan test d¼zeneęi (Schellenberg vd., 2008)

Zineddin, Krauthammer (2007) tarafından yapılan çalışmalarda, betonarme döşemelerin darbe yükleri altındaki davranışlarını incelemek ve betonarme döşeme elemanların darbe dayanımını artırma amacı taşımaktadır. Yapılan çalışmalarda, farklı tip donatı düzenlemelerinin betonarme döşemelerin darbe dayanımına olan etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda, üç farklı donatı düzenine sahip, boyutları 90x1524x3353 mm olan betonarme döşemeler üretilmiştir. Üretilen birinci eleman, 152x152 mm göz açıklıklı ve 5 mm çaplı donatılar ile imal edilen hazır hasırlar, 25 mm paspayı olacak şekilde elemanın her iki yüzüne yerleştirilmesiyle üretilmiştir. İkinci eleman, 152x152 mm göz açıklıklı olacak şekilde 9,5 mm çaplı donatılar ile oluşturan hasırın betonarme elemanının, döşeme düzlemine paralel olacak şekilde ortasına yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Üçüncü eleman ise 152x152 mm göz açıklıklı olacak şekilde 9,5 mm çaplı donatılar ile oluşturan hasır elemanların, 25 mm paspayı olacak şekilde elemanın her iki yüzüne yerleştirilmesiyle üretilmiştir. Darbe yükünü oluşturmak için 152 mm, 305 mm, 610 mm yüksekliklerden, 2608kg ağırlık betonarme elemanların üzerlerine bırakılmıştır. Oluşan darbe kuvvetleri yük hücreleri yardımıyla elde edilerek, her model için farklı yüksekliklerden bırakılma durumlarına göre maksimum değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca betonarme döşemelerin alt kısmına yerleştirilen ivmeölçerlerle de plak davranışları incelenmiştir.

Betonarme döşemelerin darbe yükü altında davranışını belirleyen en önemli parametrelerin yükün düşme yüksekliği ve donatı oranı olduğu sonucuna varılmıştır.

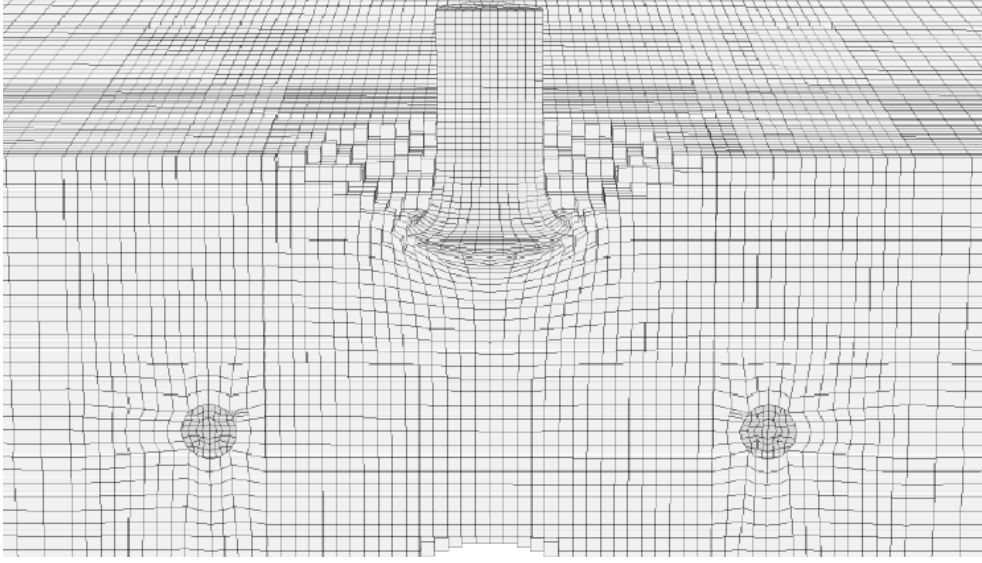


Şekil 1.34. Hasır donatılı döşemede oluşan yerel deformasyon  
(Zineddin ve Krauthammer, 2007)

Abbas vd., (2004) tarafından darbe yüküne maruz betonarme döşeme ve kirişlerin lineer olmayan davranışlarını tanımlamak için sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Döşemler üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda farklı gradasyonlara sahip beton karışımları ile hazırlanmış yaklaşık 24 mm kalınlığında numuneler üretilmiştir. Belirli bir yükseklikten bırakılan yarım küre şeklinde uca sahip çelik silindir şeklindeki kütle ile döşemelerin orta noktasında darbe kuvveti oluşturulmuştur. Deney düzeneğine yerleştirilen yük hücreleri yardımıyla darbe kuvvetinin değişimi elde edilmiştir. Ayrıca çatlama şekildeğiştirmesi ve döşeme numunelerinde oluşan hasar miktarı belirlenmiştir. Elde edilen deneysel verilerin ve öngörülen malzeme modeliyle elde edilen sonuçların örtüştüğü belirtilmiştir.

Triverdi ve Sinha (2013) tarafından yapılan çalışmalarda, darbe yüküne maruz betonarme plaklarda oluşabilecek yerel deformasyonlar ile yapısal davranışları öngörebilmek için oluşturulan sayısal modelleri içermektedir. Oluşturulan sayısal modeller yardımıyla elde edilen göçme tipi, kırılma enerjisi ( $G_f$ ) gibi değerlerin, Zineddin ve Krauthammer (2007), tarafından yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen değerler ile ne derecede benzerlik gösterdiği araştırılmıştır. Bu çalışmaların yanı sıra oluşturulan sayısal modeller ile çözüm ağ boyutu, şekildeğiştirme hızı, betonarme çeliğinin davranışı gibi parametrelere de elde edilen sonuçlara olan etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda sayısal modelden elde edilen kırılma enerjisi değerinin, deneysel çalışmalardan elde edilen değeriyle uygunluk gösterdiği belirtilmiştir.

Agard ve Laine (1999) çelik lifli betonarme plakların darbe yüklemesi altında davranışlarını araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalarda 400x400x60 mm boyutlarında çelik lifli betonarme plaklar üretilmiştir. Darbe yükünü oluşturmak için başlangıç hızı 1500 m/s olan çelik mermiler kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar plaklarda delinme tipi yerel deformasyon olduğu tespit edilmiştir. LS-DYNA programı yardımı ile oluşturulan sayısal model yardımıyla deneysel çalışmalardan elde edilen göçme tipi teyit edilmiştir (Şekil). Ayrıca darbe yükünü oluşturan mermilerin darbe yüklemesi boyunca hızlarındaki değişim değerleri elde edilerek plaklarda oluşan delinme davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.



Şekil.1.35 Simülasyon yardımı ile elde edilen delinme tipi yerel hasar durumu  
Agard ve Laine (1999)

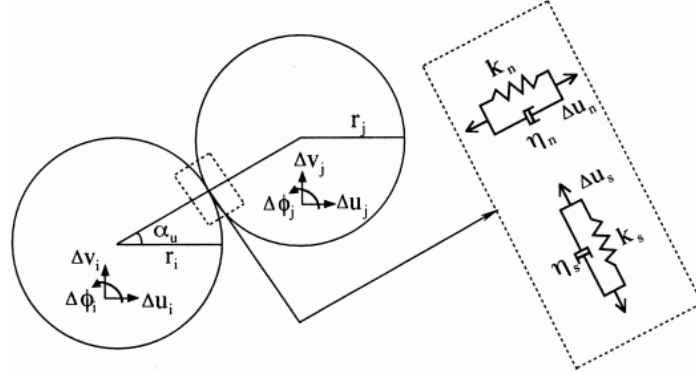
Banthia (1987), tarafından 500 adet liflerle güçlendirilmiş kiriş eleman üzerinde yapılan çalışmalarda darbe yükün altında betonun lineer olmayan davranışı ile kiriş elemanların üretilmesinde kullanılan lif çeşitlerinin etkisi araştırılmıştır. Şekildeğiştirmeleri ölçmek amacı ile şekildeğiştirme ölçerler, 0.15 - 2.30 m değerleri arasında değişen yüksekliklerden bırakılan çekice monte edilmiştir. Ayrıca üç adet ivmeölçer, kiriş eleman boyunca elemanların üzerlerine yerleştirilerek kiriş elemanların zaman ile değişen davranışları incelenmiştir. Elde edilen değerlerle darbe yükünden dolayı oluşan eylemsizlik kuvvetlerini hesaplanmıştır. Çalışmalarda, basınç dayanımı normal (42 MPa) ve yüksek (82MPa) olmak üzere iki beton karışımı kullanılmıştır. Betonu güçlendirmek için ise yüksek elastiklik modülüne sahip çelik lifler ile elastiklik modülüne düşük olan polipropilen lifler kullanılmıştır. Deneyler sırasında yüksek hızda çekim yapabilen kamera kullanılarak darbe yüküne maruz elemanlarda çatlak gelişiminin incelenmesi amaçlanmıştır.

Batarlar (2013), tarafından düşük hızla oluşan darbe yüklerine maruz betonarme döşemelerin statik ve dinamik yükleme durumlarında göstereceği davranışları araştırma amacı taşımaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda, boyutları 2015x2015x150 mm olan altı adet betonarme döşeme hazırlanmış, çalışmalarda kullanılan yük hücreleri, yer değiştirme ve şekildeğiştirme ölçerler yardımı ile ölçümler alınarak bu döşemelerin statik ve dinamik yükleme koşulları altında gösterdiği farklı davranışları tipleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda, statik yükleme durumu ve döşeme boyunca yerleştirilen

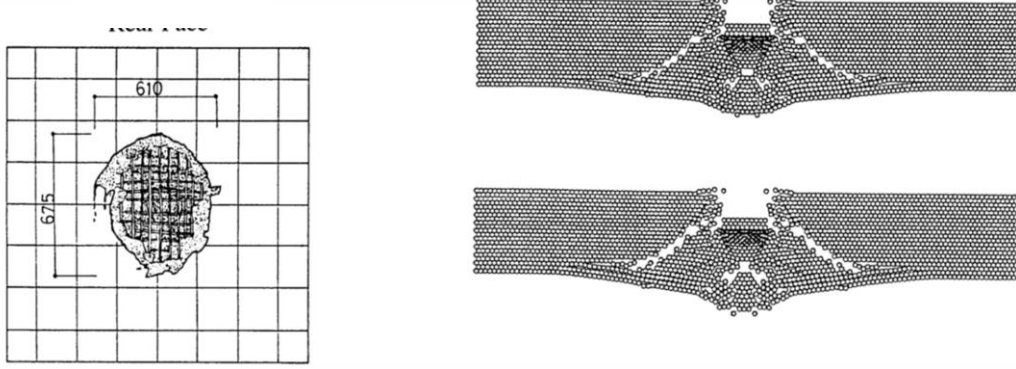
yatay donatı miktarının döşemelerde daha sünek davranış göstermesinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Dinamik yükleme durumlarında ise darbe sırasında oluşan yüksek atalet kuvvetleri, şekildeğişirmeler ve kuvvet dağılımlarının döşeme davranışı üzerinde önemli etkileri olduğu belirtilmiştir. Ayrıca yapılan bu çalışmaların ileride araştırılması düşünülen farklı tip darbe yüklemeleri, farklı darbe yükü hız değerleri ve farklı beton karışımları gibi parametrelerin darbe yükü etkisindeki betonarme döşemelerin davranışı üzerindeki etkilerinin anlaşılmasına imkân sağlayacağı düşünülmektedir.

Martin (2010), tarafından darbe yükü etkisindeki beton ile üretilmiş yapı elemanlarının davranışlarını araştırmak amacı ile sayısal modellemeler yapılmıştır. Abaqus programı yardımı ile oluşturulan SE modellerinde beton için önerilen farklı malzeme modellerinin yapısal davranış üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Darbe yükünü oluşturmak için hem deformasyona uğrayabilen hem de rijit mermiler modellenerek yumuşak ve sert darbe yüklemelerinin de yerel ve yapısal davranışlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Modellenen mermiler 75, 250, 500 m/s hızlarla yapı elemanlarına çarptırılarak enerjinin korunumu ilkesince, malzeme modellerinin mermilerin kinetik enerjilerinin hangi oranda şekildeğiştirme, sürtünme enerjisi gibi farklı biçimlerde sönümlendiği araştırılmıştır.

Sawamoto vd., (1998) tarafından yapılan çalışmalarda darbe yüklemesi etkisindeki betonarme panel elemanlarda görülebilecek yerel deformasyonları belirlemek için analitik model geliştirilmiştir. Bu model sistemi oluşturan elemanların yapısının birbiri ile teması olan rijit dairesel parçalardan oluşmaktadır. Her dairesel eleman birbirine bir yay ve sönümleyici ile birbirine bağlı olduğu kabul edilmektedir Şekil (1.36). Geliştirilen analitik model yardımı ile oluşturulan “Ayrık Eleman Metodu (AEM)” ile betonarme paneller ve darbe kuvvetini oluşturan mermiler modellenmiştir. AEM ile oluşturulan elemanlardan elde edilen analiz sonuçları ile deneysel çalışmalardan elde edilen yerel deformasyon tipleri karşılaştırılmıştır Şekil (1.37).



Şekil 1.36. Dairesel parçalar arasındaki yay ve sönüm elemanları (Sawamoto vd., 1998)



Şekil 1.37. Deney ve model çalışmalarından elde edilen hasar tiplerinin karşılaştırılması (Sawamoto vd., 1998)

### 1.7. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Betonarme yapı elemanlarının kullanım süreleri boyunca maruz kaldığı yükleri emniyetli bir şekilde taşıyabilmesi için birçok hesap yöntemi ve yönetmelik kullanılmaktadır. Bu hesap yöntemleri betonun veya betonarme elemanların statik ve/veya yarı statik yük durumları için geçerli olmaktadır. Yapılar bu tür yük durumlarının yanı sıra zamana bağlı olarak değişen (dinamik) yüklere de maruz kalamaktadırlar. Bu dinamik yüklemeler deprem, rüzgâr gibi dinamik yüklemelerin yanı sıra darbe ve patlama yüklemeleri de olabilmektedir. Bilgisayar teknolojilerinin gelişmesi ile farklı tip yüklemelere maruz yapı elemanlarının lineer davranışlarının yanı sıra lineer olmayan davranışlarının da incelenebilmesine imkân sağlamıştır.

Bu çalışmada darbe yüküne maruz betonarme plakların yük etkisindeki davranışlarını araştırma amacı taşımaktadır. Yapılan çalışmalar sonlu elemanlar sonlu elemanlar çözüm

yöntemi tabanlı ABAQUS programı yardımı ile oluşturulan sonlu eleman modellerini içermektedir. Sonlu eleman modelleri oluşturulurken beton için iki farklı malzeme modeli kullanılmıştır. Sonlu eleman modellerinde, iki farklı beton malzeme modelinin darbe yüküne maruz betonarme plak davranışı üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Bunun yanında, farklı mesnet koşullarının ve betonarme plak boyutlarının dinamik yükleme durumlarında eleman davranışı üzerindeki etkileri, darbe yükünün zamanla değişimi, darbe yükü-yer değiştirme eğrileri yardımı ile hesaplanan kırılma enerjilerinin karşılaştırılması, plalarda oluşan yerel hasarlar ve çatlak biçimlerinin tespit edilmesi, betonarme donatı çeliğinde dinamik yük etkisiyle oluşan şekildeğiştirme değerlerinin elde edilmesi olarak özetlenebilir.

## 2.YAPILAN ÇALIŞMALAR

Darbe yükleri etkisinde, farklı mesnet koşullarındaki plakların davranışının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmanın bu bölümünde; plakların boyutları, mesnet koşulları, donatı düzenleri, sonlu eleman modellerinin oluşturulması ve malzeme özellikleri ile verilmektedir.

### 2.1.Betonarme Plakların Özellikleri ve Sonlu Elemanlar Modeli

#### 2.1.1.Plak Boyutları, Mesnet Koşulları, Donatı Planı ve Malzeme Modelleri

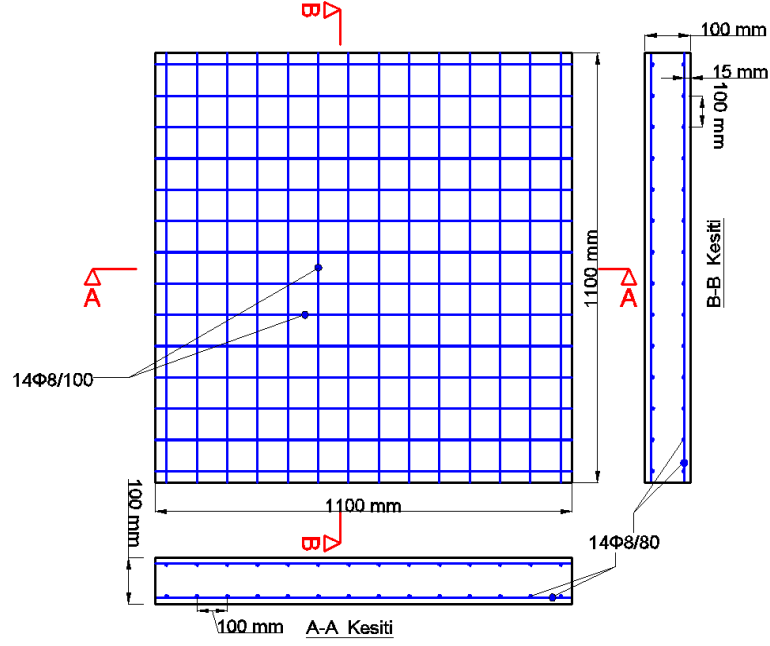
Bu çalışma kapsamında üç farklı boyutta betonarme plak için darbe yükü etkisinde analizler gerçekleştirilmiştir. Plakların, mesnetlerine serbest ve tam bağlı (ankastre) olarak oturduğu kabul edilmiştir. Her bir mesnet koşulundaki plaklar için, “Beton Hasar Modeli-(CDP)” ve “Drucker-Prager-(DP)” malzeme modelleri kullanılmıştır. Dolayısıyla da her bir plak için dört adet olmak üzere toplam on iki adet betonarme plak üzerinde darbe yükü analizleri gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, darbe yüküne maruz bırakılan plakların özellikleri Tablo 2.1 verilmiştir.

Tablo 2.1 Darbe yükü analizlerinde kullanılan plakların özellikleri

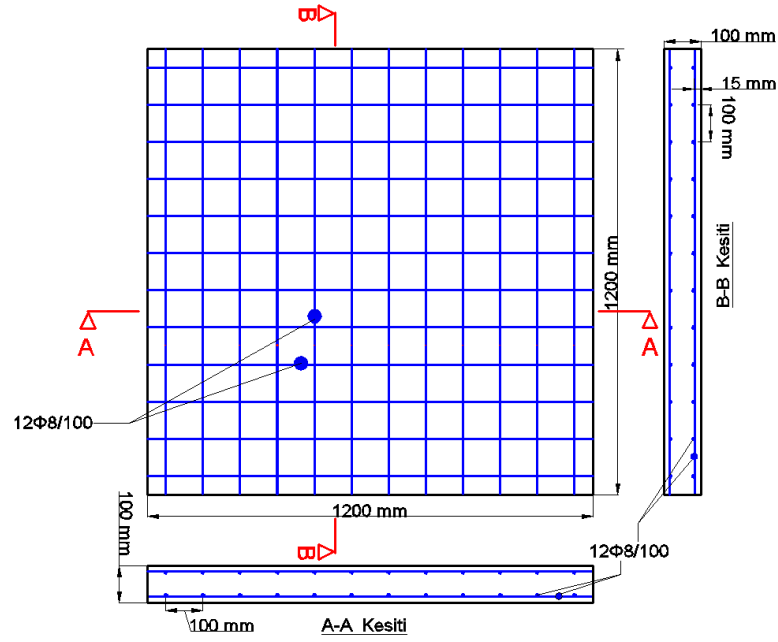
Plak Adı	Boyutlar (mm)	Mesnetlenme Durumu	Malzeme Modeli	Donatı (alt-üst)
PK1011-1	1100x1100x100	Serbest oturma	CDP	Ø8/100-Ø8/100
PK1011-2		Ankastre	CDP	
PK1011-3		Serbest oturma	DP	
PK1011-4		Ankastre	DP	
PK1012-1	1200x1200x100	Serbest oturma	CDP	
PK1012-2		Ankastre	CDP	
PK1012-3		Serbest oturma	DP	
PK1012-4		Ankastre	DP	
PK1020-1	2000x2000x100	Serbest oturma	CDP	
PK1020-2		Ankastre	CDP	
PK1020-3		Serbest oturma	DP	
PK1020-4		Ankastre	DP	



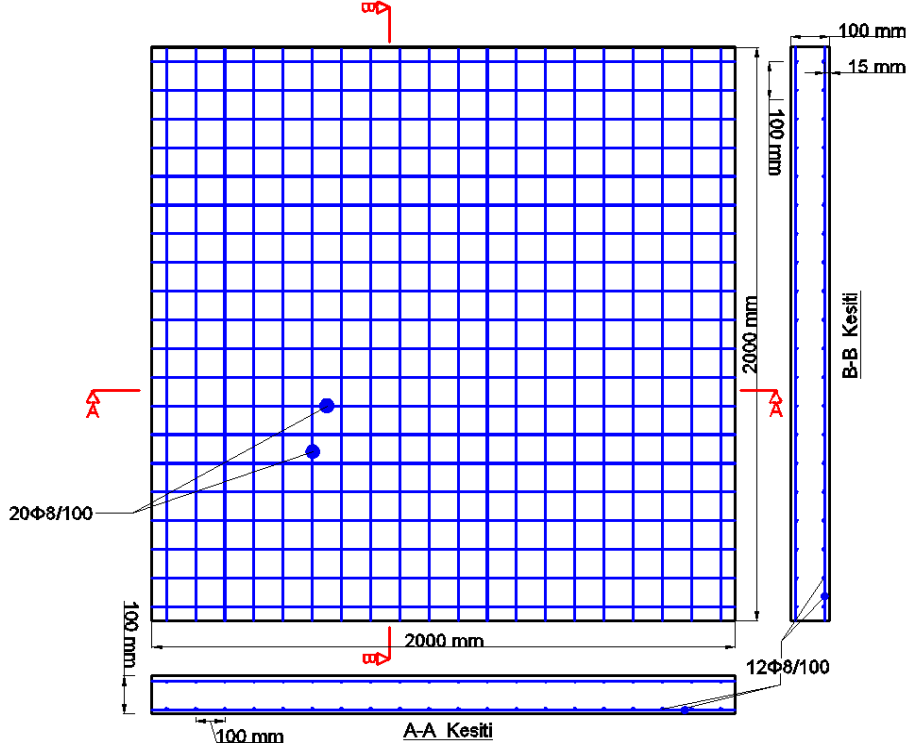
Darbe yükü analizi yapılan plakların donatı planları PK1011 plakları için Şekil 2.1'de, PK1012 plakları için Şekil 2.2'de ve PK1020 plakları için ise Şekil 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2.1. PK1011 betonarme plaklarının boyutları ve donatısı



Şekil 2.2. PK1012 betonarme plaklarının boyutları ve donatısı



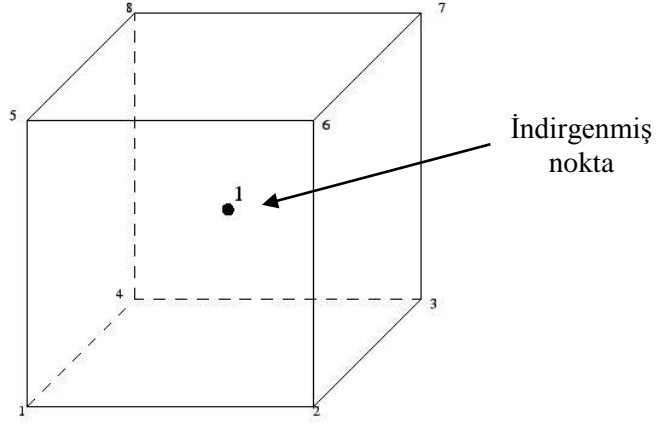
Şekil 2.3. PK1020 betonarme plaklarının boyutları ve donatısı

### 2.1.2. Betonarme Plakların Sonlu Eleman Modelleri

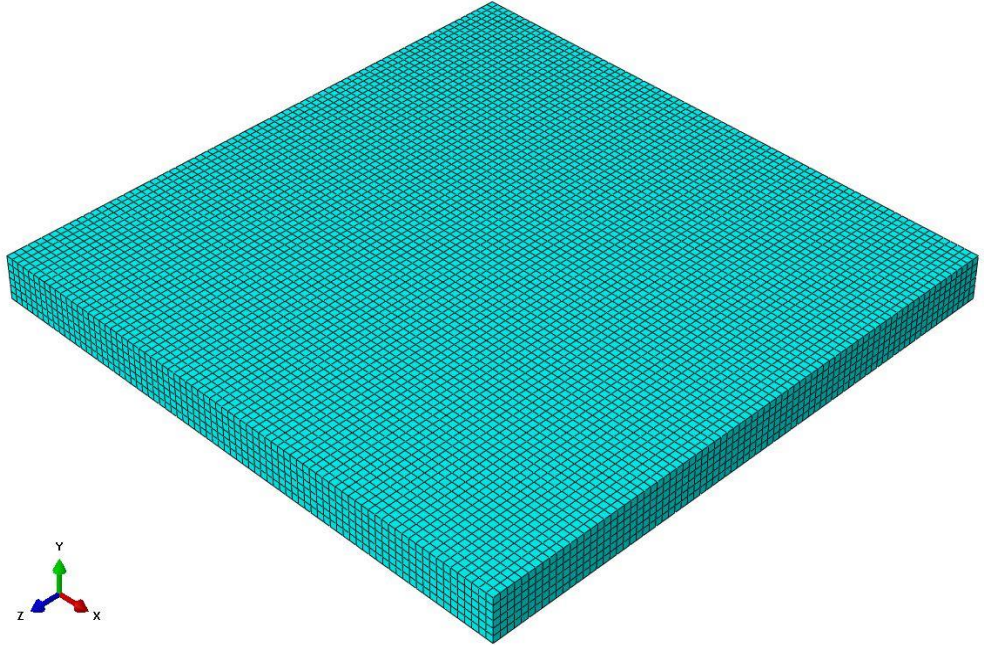
Betonarme plakların sonlu eleman modelleri ABAQUS/CAE v6.13 programı ile oluşturulmuştur. Tablo 2.1’de boyutları ve donatısı verilen betonarme plakların sonlu elemanlar modeli iki ayrı eleman olarak oluşturulmuştur. Plak önce beton olarak modellendi sonra oluşturulan donatı modeli ile birleştirildi. Beton plak elemanlar C3D8R kübik katı (sürekli) elemanı ile betonarme donatıları ise T3D2 çubuk elemanı ile modellenmiştir.

Beton plakların SE modelinin oluşturulmasında kullanılan C3D8R sonlu elemanı Şekil 2.4’de görülmektedir. Bu sonlu elemanın her köşesinde bir düğüm noktası bulunmaktadır. Bu düğüm noktalarının her biri üç serbestlik derecesine sahiptir. Çalışmalarda, C3D8R sonlu elemanın kullanılması; analizleri yapılacak sistemlerin gerilme-şekildeğiştirme değerlerinin önemli olduğu durumlarda doğru sonuçlar vermesi, eleman ortasında bulunan indirgenmiş nokta ile sonlu eleman ağı boyutunun küçük seçildiği problemlerde analiz süresinin kısalması, sonlu elemanlar ağının oluşturulmasında kolaylık sağlaması, gibi nedenlerle tercih edilmektedir. ABAQUS tarafından da, özellikle

lineer olmayan malzeme davranışı durumunda ve farklı yükleme etkisindeki sistemlerde oluşan şekildeğişmelerinin önemli olduğu sonlu eleman modellerinde, bu elemanın kullanılması önerilmektedir. C3D8R sonlu elemanı kullanılarak oluşturulan PK1011 beton plağının sonlu eleman ağı Şekil 2.5’de örnek olarak verilmektedir.

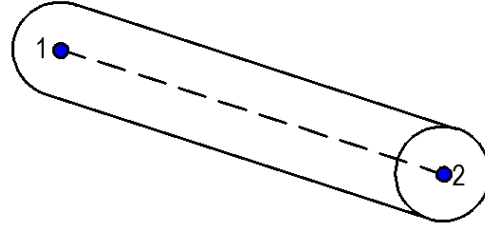


Şekil 2.4. C3D8R sonlu eleman detayı



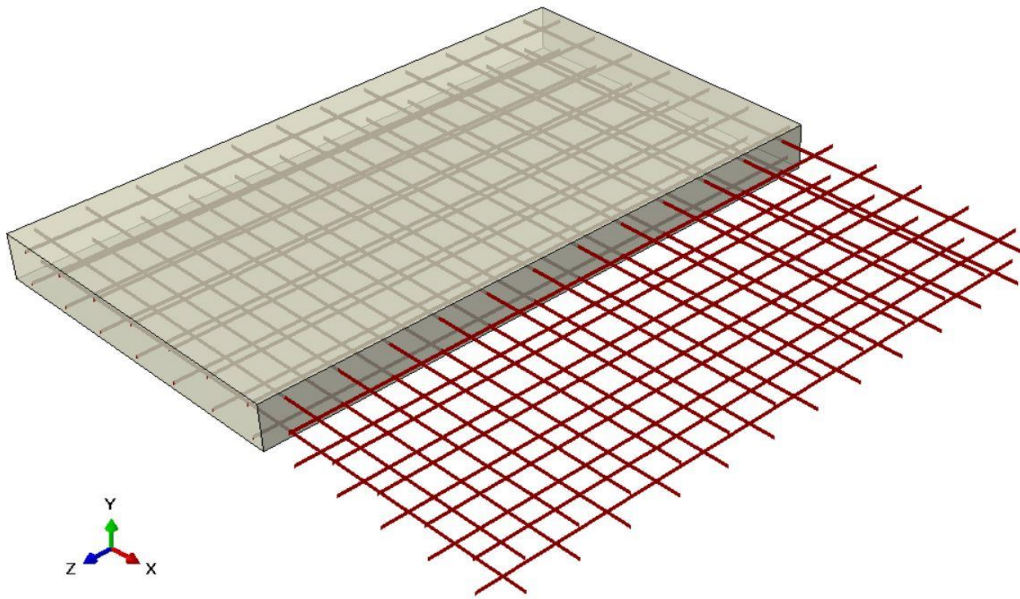
Şekil 2.5.PK1011 beton plağın sonlu eleman ağı

Sonlu eleman ağı oluşturulan beton plakların içine, ayrı olarak modellenen betonarme donatılar yerleştirilmiştir. Betonarme donatıların modellenmesinde T3D2 çubuk sonlu elemanı kullanılmıştır (Şekil 2.6). T3D2 sonlu elemanının temel özelliği, eksenine dik yüklere karşı rijit davranmaması ve sadece aksenal olarak basınç ya da çekme yükü almasıdır. Çubuk sonlu elemanı, her iki ucunda iki düğüm noktasına ve bu düğüm noktalarının her biri üç ötelenme serbestlik derecesine sahiptir.



Şekil 2.6.T3D2 çubuk sonlu eleman detayı

C3D8R elemanı kullanılarak oluşturulan beton plak sonlu eleman modeli ile T3D2 elemanı ile oluşturulan donatı sonlu eleman modelinin birleştirilmiş hali Şekil 2.7'de verilmiştir.

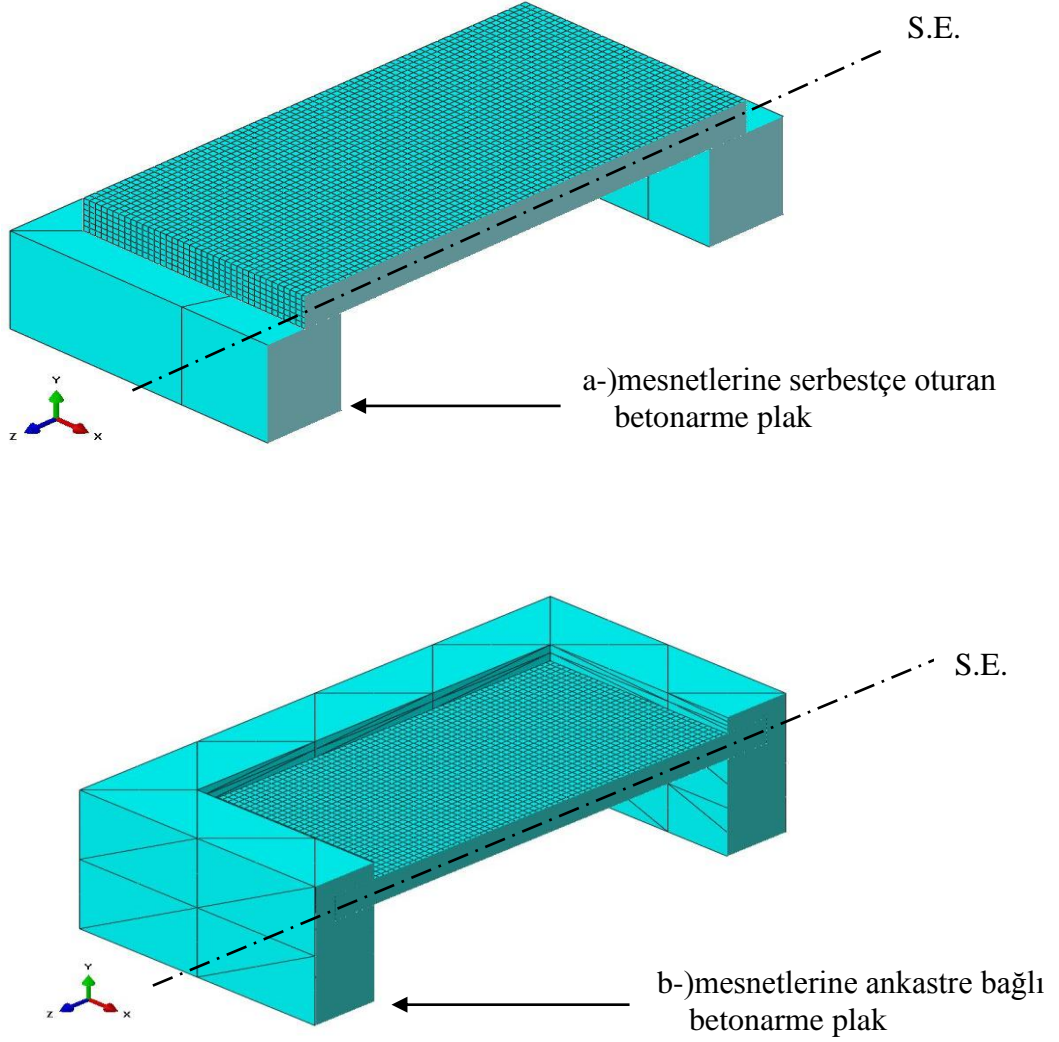


Şekil 2.7. Betonarme donatılarının sonlu eleman modeli (PK1011)

### 2.1.3. Plakların Mesnet Koşulları ve Darbe Yüğü

#### 2.1.3.1. Mesnet Koşulları

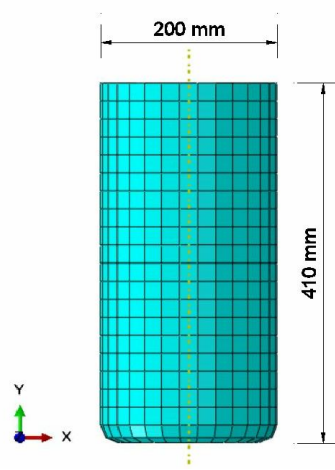
Bu çalışmada betonarme plaklar, bütün kenarları mesnetlerine tam bağlı (ankastre) ve serbestçe oturacak şekilde sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Mesnetlerin sonlu eleman modellerinde C3D8R sonlu elemanı kullanılmıştır. Bu çalışmada mesnetlerde oluşan gerilmeler ve şekildeğişirmeler, araştırma konusu olmadığından sonlu eleman modellerinde sonlu elemanlar ağının boyutu büyük seçilmiştir. Bu şekilde oluşturulan plak mesnetlerinin sonlu elemanlar modeli Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8. Betonarme plakların mesnet koşulları

### 2.1.3.2. Darbe Yüğü

Bu çalışmada, sabit duran betonarme plağa bir kütlelin kısa bir zaman zarfında çarpma etkisiyle oluşan darbe yüğü dikkate alınmıştır. Betonarme plaklar üzerinde darbe yüklemesini oluşturmak için belirli bir yükseklikten yük bırakılması durumuna denk olacak şekilde çarpan cismin yüksekliğine bağlı olarak hesaplanan hız değeri ( $V_d$ ) programa tanımlanmaktadır. Çarpan cismin geometrisi silindir şeklinde, akma dayanımı 420 MPa olan çelik bir kütle olarak tanımlanmıştır. Kütleli 100 kg olan bu cismin sonlu eleman modeli ise beton plaklar ve mesnetlere benzer olarak C3D8R sonlu elemanı ile oluşturulmuştur (Şekil 2.9).



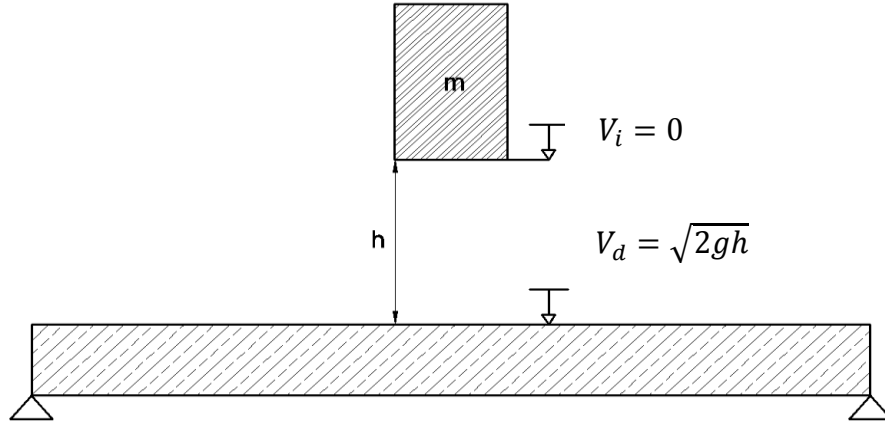
Şekil 2.9. Çarpan cismin sonlu eleman ağı sistemi

Bu çalışmada darbe yüğü, bir kütlelin belirli bir yükseklikten bırakıldıktan sonra betonarme plağa çarpmadan hemen önceki hız değeri  $V_d$  yardımı ile hesaplanmıştır. Şekil 2.10'da betonarme bir plağın orta kısmının kesit görünüşü verilmektedir. Plak üzerinde darbe kuvvetini oluşturan  $m$  kütleli cismin,  $h$  kadar yükseklikten bırakılarak plağa  $V_d$  hızıyla çarpması sağlanmaktadır. Burada enerjinin korunumundan yararlanarak darbe anındaki hız  $V_d$ ;

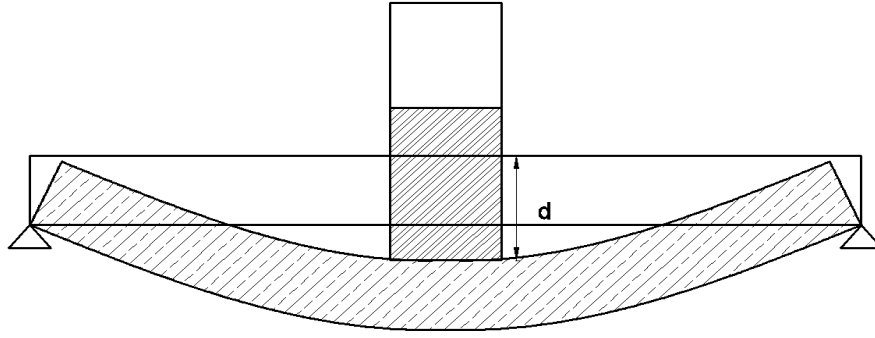
$$mgh = \frac{1}{2}mV_d^2 - \frac{1}{2}mV_i^2 \quad (2.1)$$

$$V_d = \sqrt{2gh} \quad (2.2)$$

bağıntıları ile hesaplanmaktadır.



Şekil 2.10.Darbe yükünün oluşum şeması



Şekil 2.11.Darbe yükünün oluşum şeması

Çarpan cismin darbe kuvveti  $F_d$ , bu cismin kinetik enerjisinden yararlanarak hesaplanmaktadır. Şekil 2.11’de görüldüğü gibi, çarpan cismin plağa temasından sonra  $d$  kadar hareket ederek durmaktadır. Bu durumda çarpan cismin yaptığı iş, darbe yüklemesi oluşmadan hemen önceki kinetik enerjisine, bağıntı (2.3)’de görüldüğü gibi, eşit olmaktadır.

$$W_{net} = \frac{1}{2}mV_d^2 = F_d d \quad (2.3)$$

Bu bağıntı yardımıyla betonarme plakta oluşan darbe kuvveti  $F_d$ ,

$$F_d = \frac{W_{net}}{d} \quad (2.4)$$

şeklinde elde edilmektedir.

## 2.1.4. Malzeme Özellikleri

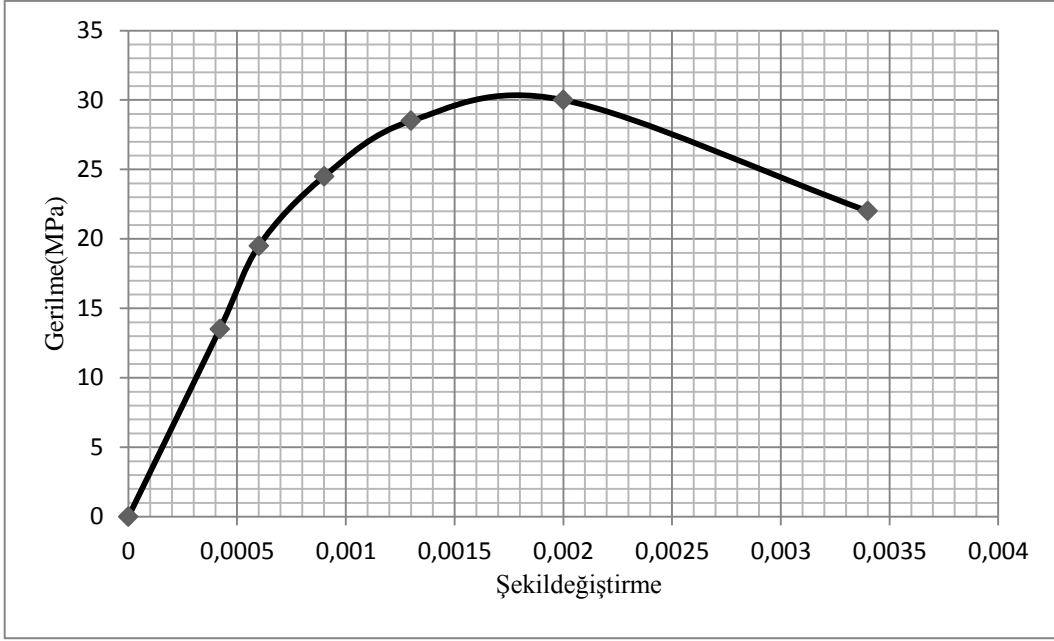
### 2.1.4.1. Betonun Malzeme Özellikleri

Bu çalışmada, sonlu eleman modelleri oluşturulan betonarme plaklarda kullanılan betonun dayanım sınıfı C30/37, donatının dayanım sınıfı ise S420 kabul edilmiştir. Darbe yüküne maruz kalan plakların analizinde betonun, şekildeğiştirme hızına bağlı olarak basınç ve çekme dayanımındaki değişimin bilinmesi gerekmektedir. Betonun şekildeğiştirme hızına bağlı olarak basınç ve çekme dayanımındaki değişim konusunda Ammann ve Nussbaumer, (1995)'in hazırladıkları abaklardan (bkz. Şekil 1.17 ve Şekil 1.18), şekildeğiştirme hızının 1 1/s alınarak hesaplanan dayanım artış katsayısı 1.3 alınmıştır. Betonarme plakların analizinde kullanılan betonun özellikleri Tablo 2.2'de, aksenal basınç altında betonun gerilme-şekildeğiştirme eğrisi Şekil 2.12'de, merkezi çekme etkisindeki betonun gerilme-şekildeğiştirme eğrisi ise Şekil 2.13'de verilmiştir.

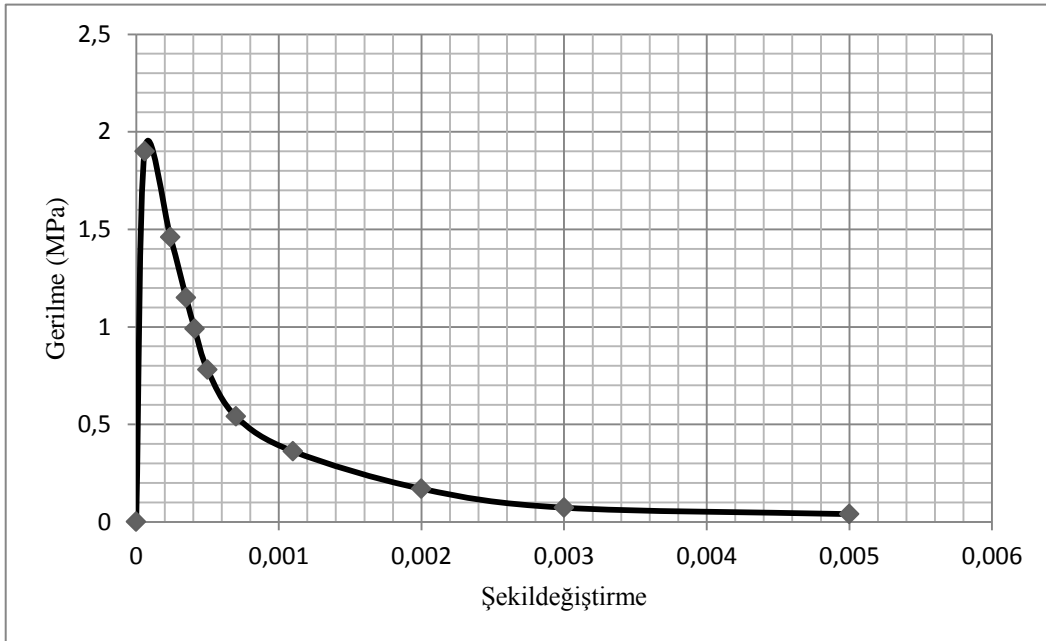
Tablo 2.2. Sonlu eleman modellerinde tanımlanan betonun genel malzeme özellikleri

	Birim	Sembol	Statik Durum	Dinamik Durum
Elastisite Modülü	$N/mm^2$	$E$	$32.10^3$	$32.10^3$
Özgül ağırlık	$kg/m^3$	$\rho$	2400	2400
Karakteristik Basınç Dayanımı	$(N/mm^2)$	$f_{ck}$	30	39
Karakteristik Çekme Dayanımı	$(N/mm^2)$	$f_{ctk}$	1.9	2.47
Poisson Oranı	-	$\nu$	0.2	0.2
Maks. Gerilmedeki Şekildeğiştirme	-	$\varepsilon$	0.002	0.002
Şekildeğiştirme Hızı	1/s	$\dot{\varepsilon}$	0	1





Şekil 2.12.Eksenel basınç yüklemesi altında beton için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi



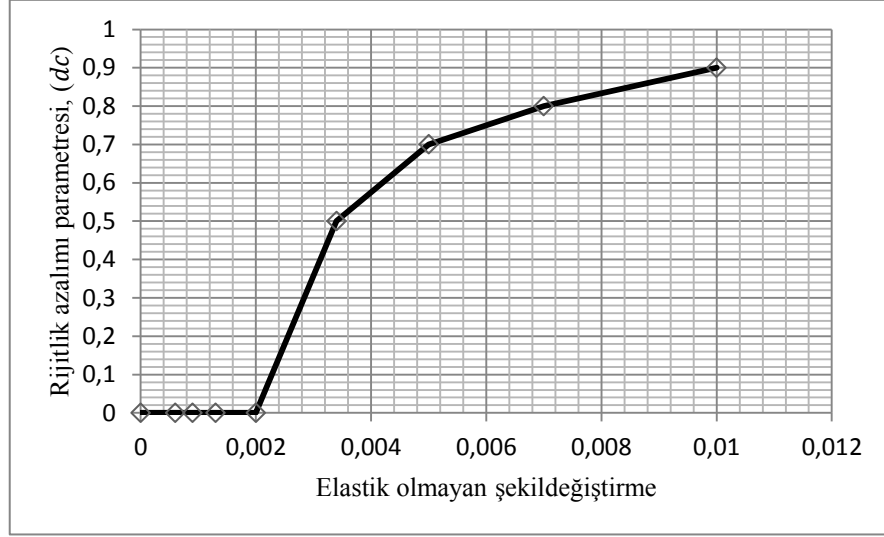
Şekil 2.13.Eksenel çekme yüklemesi altında beton için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi

Betonarme plakların analizinde, yukarıda verilen beton özellikleri yanında, beton plastikleşme hasar modeli (CDP) ve Drucker-Prager (DP) malzeme modelleri için akma yüzeyi ve akma kriterlerine de ihtiyaç duyulmaktadır. CDP malzeme modellerinde akma yüzeyi ve akma kriterlerinin tanımlanması için kullanılan parametreler Tablo 2.3’de, verilmektedir. CDP malzeme modelinde, betonun lineer olmayan davranışını tanımlamak için dilatasyon açısı  $\Psi = 36^\circ$ , plastik potansiyel plastik akma fonksiyonunun asimptotlara (sonuşmaz) olan yakınlığının bir göstergesi olan dışmerkezlilik  $e=0.1$ , iki eksenli yükleme durumundaki akma gerilmesinin, tek eksenli yükleme halinde elde edilen akma gerilmesine oranı  $f_{bo}/f_{co}=1.16$  ve üç boyutlu gerilme uzayında akma yüzeyinin deviyatör düzlemindeki kesitinin oluşturduğu akma eğrisinin şeklini belirleyen  $K_c$  ise 0.667 alınmıştır.

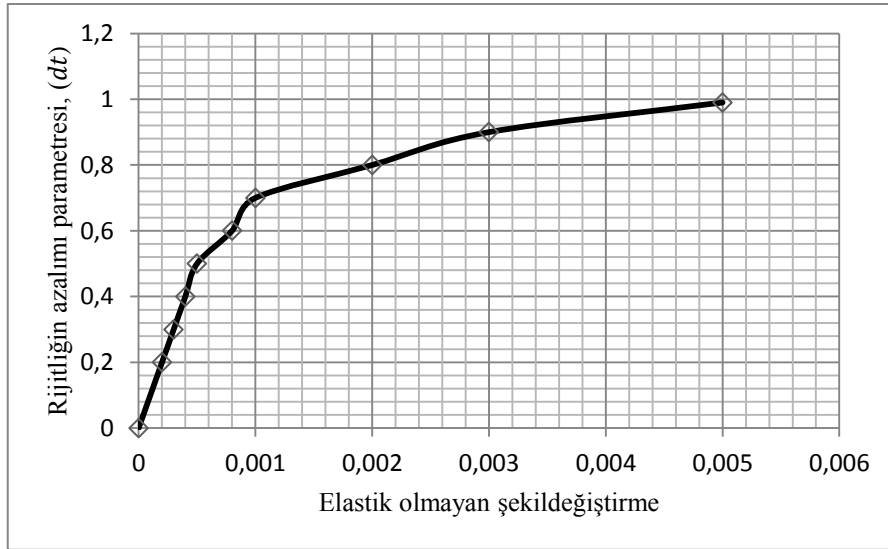
Tablo 2.3. CDP modelde beton için tanımlanan lineer olmayan davranış parametreleri

	Akma Gerilmesi [MPa]	Elastik olmayan şekildeğiştirme	$d_c, d_t$	Dinamik artım çarpanı
Eksenel basınç altında plastik davranış	13.5	0	0	1.3
	19.5	0.0006	0	1.3
	24.5	0.0009	0	1.3
	28.5	0.0013	0	1.3
	30	0.002	0	1.3
	22	0.0034	0.5	1.3
	17.5	0.005	0.7	1.3
	13	0.007	0.8	1.3
	7	0.01	0.9	1.3
	Eksenel çekme altında plastik davranış	1.9	0	0
1.46		0.0002	0.2	1.3
1.15		0.0003	0.3	1.3
0.96		0.0004	0.4	1.3
0.78		0.0005	0.5	1.3
0.54		0.0008	0.6	1.3
0.36		0.001	0.7	1.3
0.17		0.002	0.8	1.3
0.073		0.003	0.9	1.3
0.04		0.005	0.99	1.3

Tablo 2.3’de verilen ve betonun rijitliğindeki azalımı kontrol eden  $d_c$  ,  $d_t$  parametrelerinin, aksel basınç ve çekme yüklemeleri altında elde edilen elastik olmayan şekildeğiştirme değerlerine bağlı olarak değişimi Şekil 2.14 ve 2.15’de verilmektedir.



Şekil 2.14.  $d_c$  parametresi, elastik olmayan şekildeğiştirme ilişkisi



Şekil 2.15.  $d_t$  parametresi, elastik olmayan şekildeğiştirme ilişkisi

DP malzeme modellerinde akma yüzeyi ve akma kriterlerinin tanımlanması için kullanılan parametreler Tablo 2.4’de verilmektedir. DP malzeme modelinde, yüksek yanal basınç gerilme değeri ile eşdeğer Von-Mises gerilme değerini oluşturan eğrinin eğim açısı (dilatasyon açısı- $\Psi$ ),  $15^\circ$ , betonun içsel sürtünme açısı  $\beta = 30^\circ$  ve üç boyutlu gerilme uzayında akma yüzeyinin deviyatör düzlemindeki kesitinin oluşturduğu akma eğrisinin

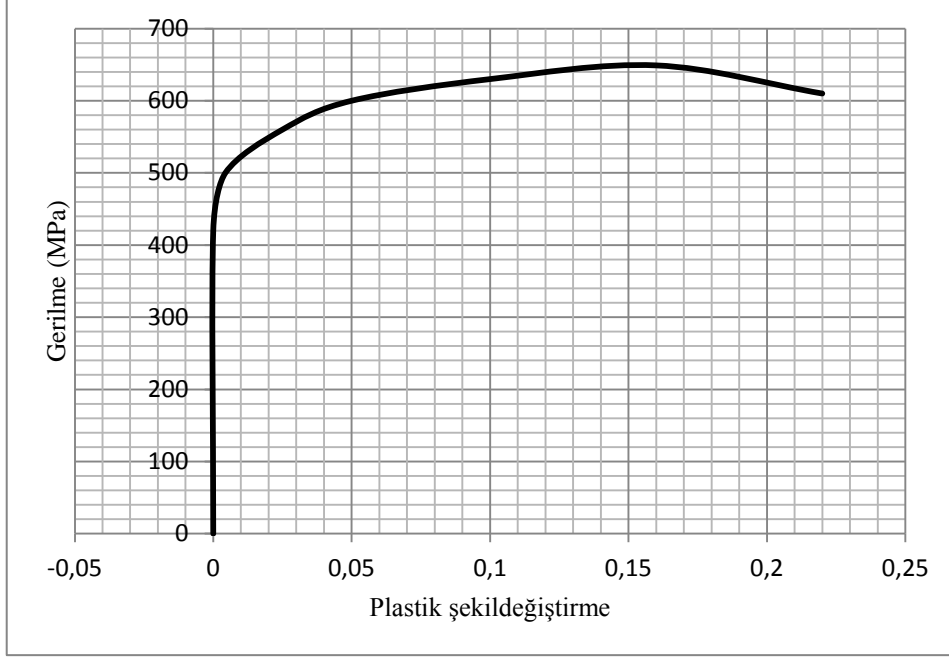
şeklini belirleyen K ise 1 olarak alınmıştır.

Tablo 2.4. DP modelde beton için tanımlanan lineer olmayan davranış parametreleri

Akma Gerilmesi (MPa)	Elastik Olmayan Şekildeğiştirme	Dinamik Artım Çarpanı
13.5	0	1.3
19.5	0.0006	1.3
24.5	0.0009	1.3
28.5	0.0013	1.3
30	0.002	1.3
22	0.0034	1.3
17.5	0.005	1.3
13	0.007	1.3
7	0.01	1.3

#### 2.1.4.2. Betonarme Çeliğinin Malzeme Özellikleri

Betonarme donatı çeliğinin sonlu eleman modellerinde malzeme özellikleri, genel bilgiler kısmında anlatılan CMP modeline göre tanımlanmıştır. TS 708’de belirtilen S420 çelik sınıfına göre donatı elemanların gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi idealize edilmiştir. İdealize edilen ve donatı modelinde kullanılan gerilme ( $\sigma_{tru}$ ), plastik şekildeğiştirme ( $\epsilon_{pla}$ ) ilişkisi Şekil 2.16’de verilmektedir.

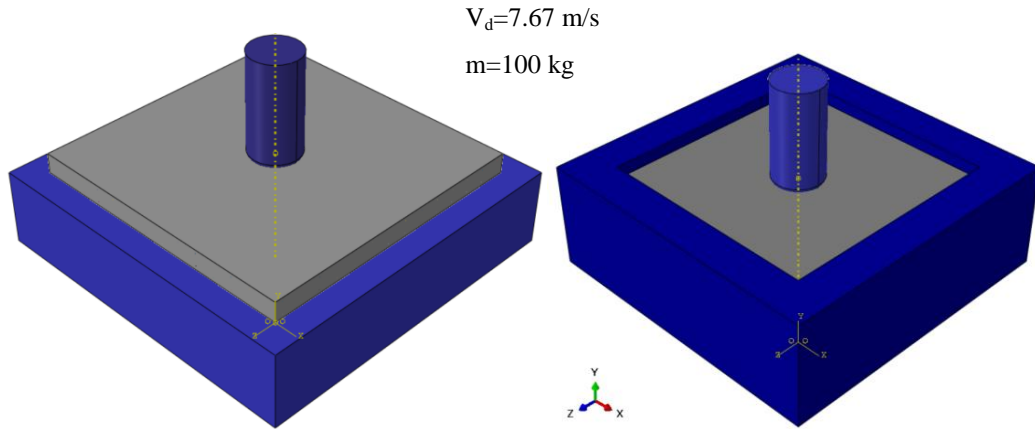


Şekil 2.16.S420 için gerilme-plastik şekil değiştirme eğrisi

Betonarme plakların darbe yüklemesi etkisindeki davranışlarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen sonlu elemanlar modelinde kullanılan malzeme modelleri yukarıda verildiği gibi alınmış ve farklı boyuttaki plaklar üzerinde iki farklı mesnet koşulu dikkate alınarak ABAQUS bilgisayar programı yardımıyla çözümlenmesi yapılmıştır. Yapılan çözümlemede plak açıklık ortası yer değiştirmesi, darbe yükünün zamanla değişimi, çatlama mekanizması, enerji yutma kapasiteleri belirlenmiştir.

### 3.BULGULAR VE İRDELEMELER

Yapılan analizlerde her bir plak grubu için, açıklık ortası yer değiştirme, darbe yükü-zaman ve darbe yükü-yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Plaklardaki betonarme donatılarının darbe kuvvetinin maksimum olduğu durumdaki gerilme değerleri ile plastik şekil değiştirme değerlerinin zamanla değişimi belirlenmiştir. Ayrıca CDP beton modeli ile modellenen plaklarda darbe yüklemesi etkisiyle oluşan çatlama mekanizmaları elde edilmiştir. Betonarme plak üzerinde darbe yükünü oluşturan silindirik cisim, kütlesi  $m=100\text{kg}$  ve  $h=3\text{m}$  yükseklikten serbest düşme durumunu temsil edecek şekilde,  $V_d = 7.67$  m/s hızla farklı mesnet koşullarındaki betonarme plağa çarpıtılmıştır (Şekil 3.1).

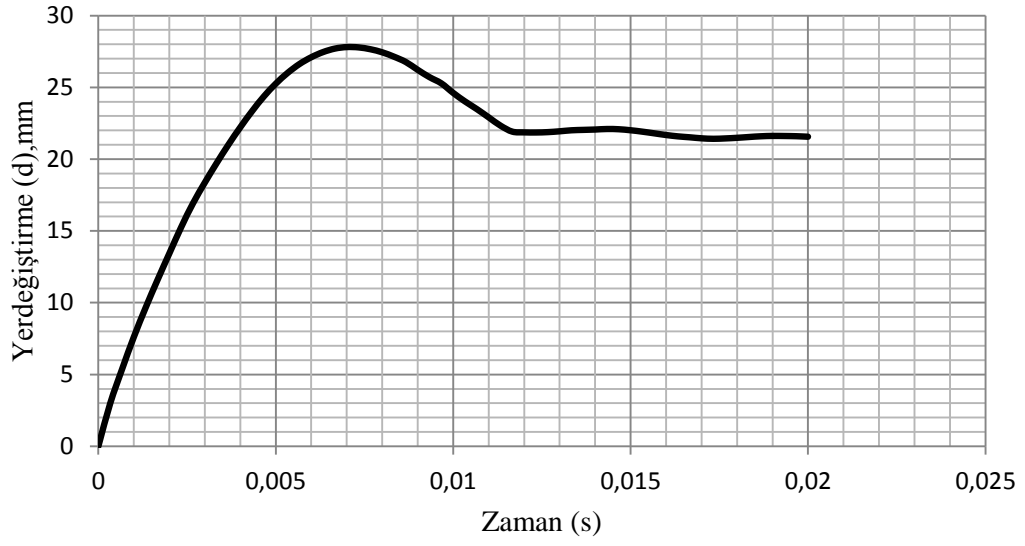


Şekil 3.1. Betonarme plaklarda darbe yükünün etkimesi

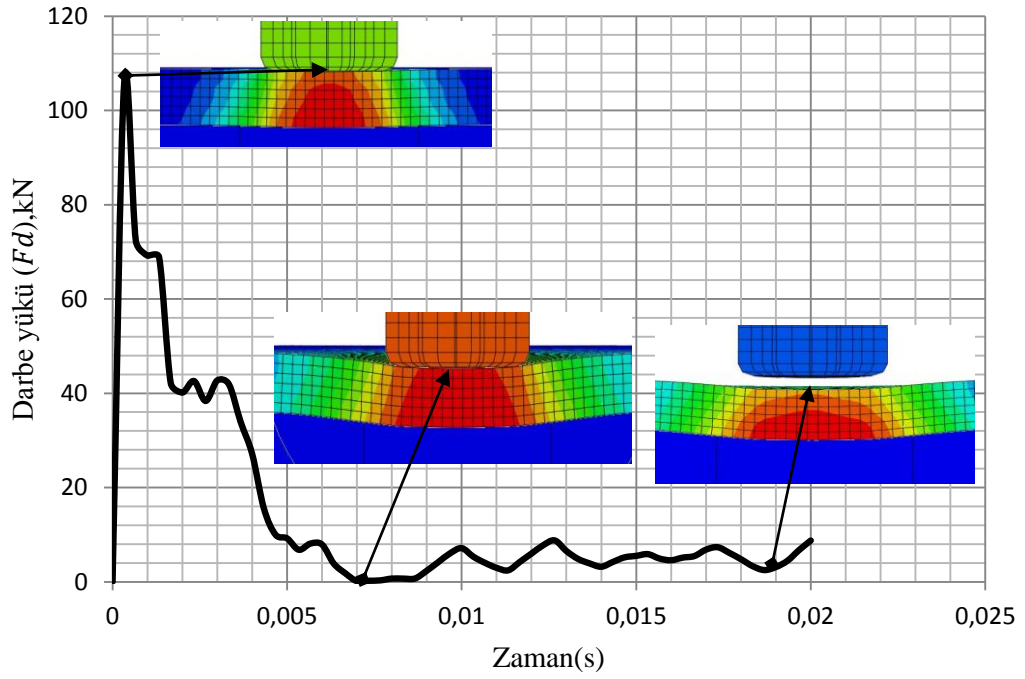
#### 3.1. Betonarme Plakların Darbe Yükü Altındaki Analizi

##### 3.1.1. PK1011-1 Betonarme Plağı

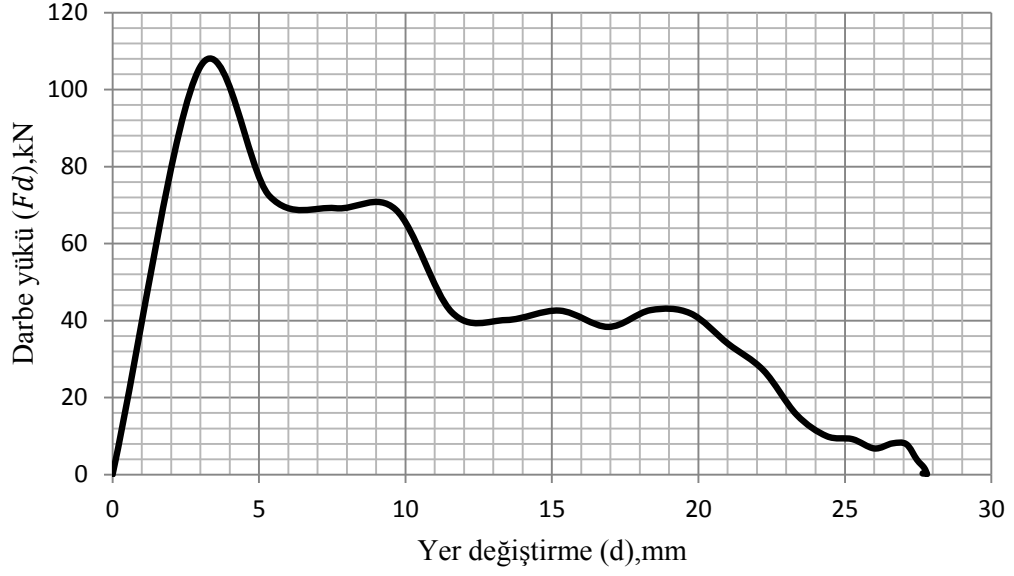
PK1011-1 betonarme plağın analizinde (mesnetlerine serbestçe oturan) “Beton Plastikleşme Hasar Modeli-Concrete Damage Plasticity Model (CDP)” kullanılmıştır. Darbe yükü etkisinde betonarme plakta oluşan yerdeğiştirmenin zamanla değişimi Şekil 3.2’de, darbe kuvvetinin zamanla değişimi Şekil 3.3’de, darbe kuvveti-yerdeğiştirme ilişkisi ise Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.2. PK1011-1 plağının açıklık ortası yerdeğiştirme-zaman eğrisi



Şekil 3.3. PK1011-1 plağının darbe yükü-zaman eğrisi

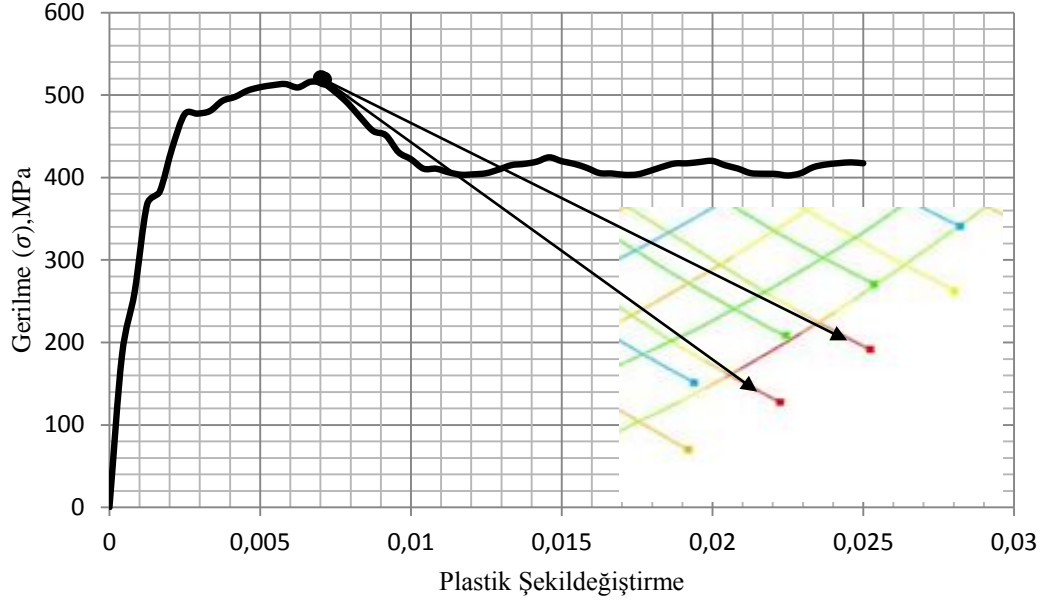


Şekil 3.4.PK1011-1 plağına ait darbe kuvveti-yerdeğiştirme eğrisi

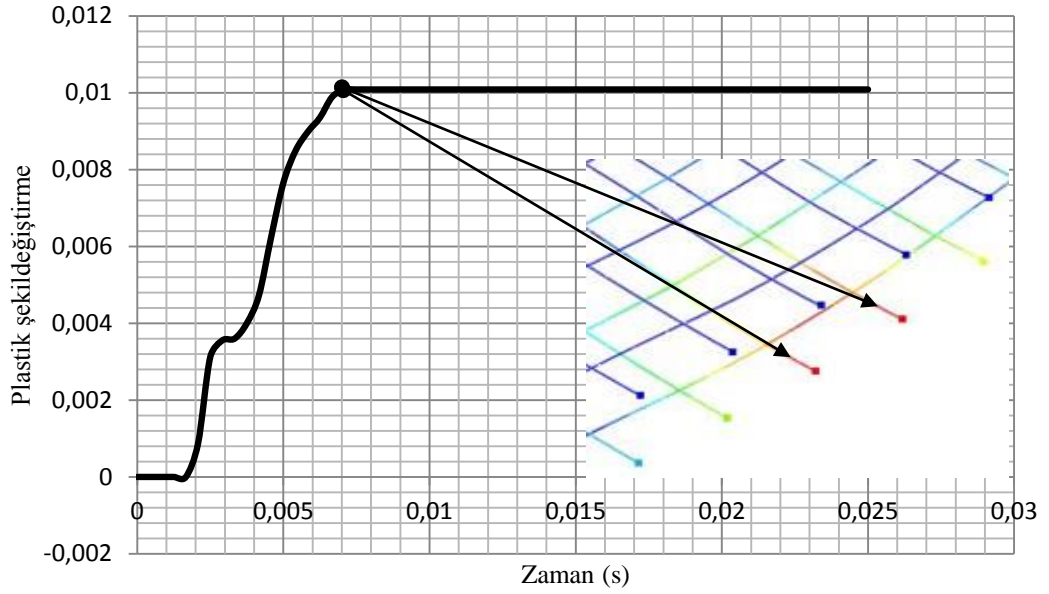
Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'den görüldüğü gibi, PK1011-1 betonarme plağının (mesnetlerine serbestçe oturan), açıklık ortası maksimum yerdeğiştirmesi 27 mm, darbe kuvvetinin maksimum değeri ise 105.8 kN olarak elde edilmiştir. Bu plağın açıklık ortası yerdeğiştirme değeri, darbe etkisinden 0.01 s sonra 22 mm yer değıştirme değerine ulaşmış ve bu değerden sonra yerdeğiştirmedeki değışim yok denecek kadar az değışme olmuştur.(bkz. Şekil 3.2).

PK1011-1 plağının betonarme donatısında darbe kuvveti etkisiyle oluşan gerilme ve plastik şekildeğiştirme dağılımları Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da verilmiştir.





Şekil 3.5. PK1011-1 plağının donatısında oluşan plastik şekil değiştirmeye karşı gelen gerilmenin zamanla değişimi

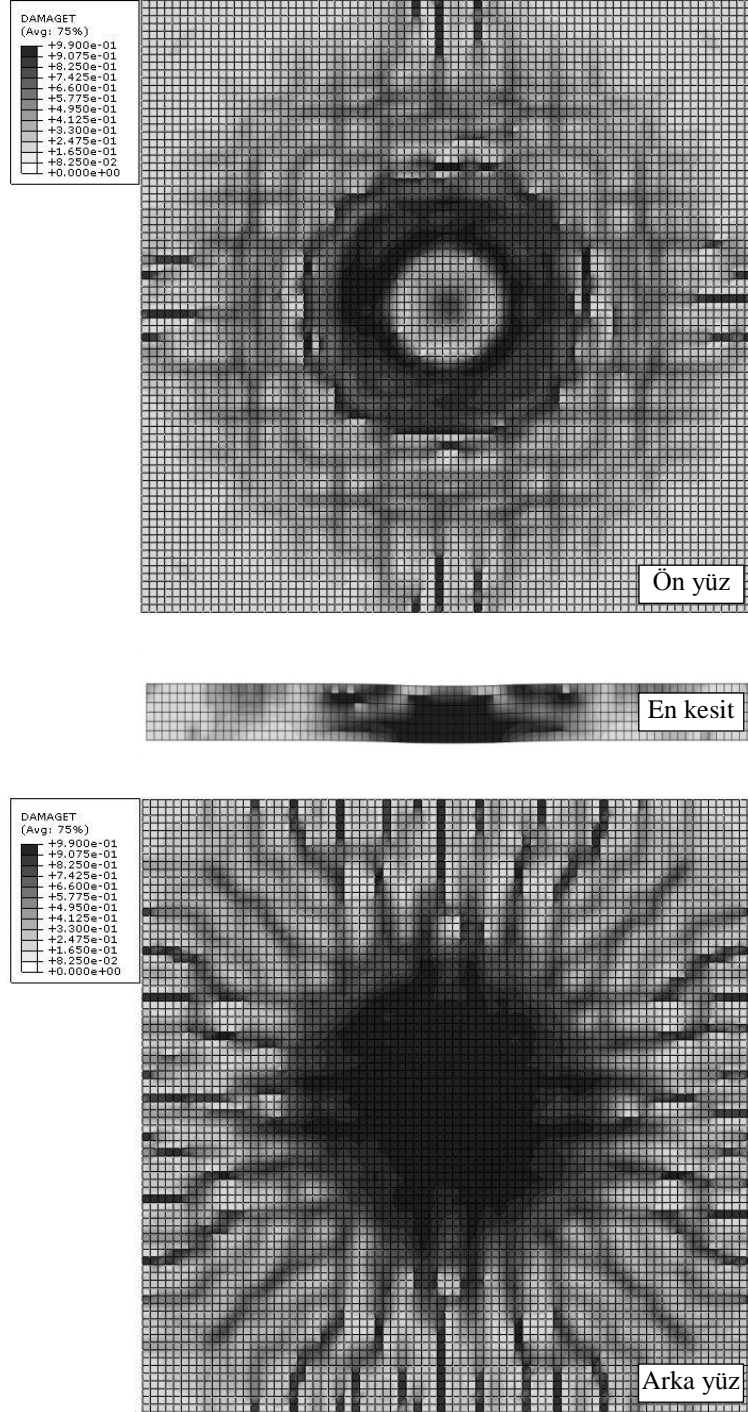


Şekil 3.6. PK1011-1 plağının donatısında oluşan plastik şekil değiştirmenin zamanla değişimi

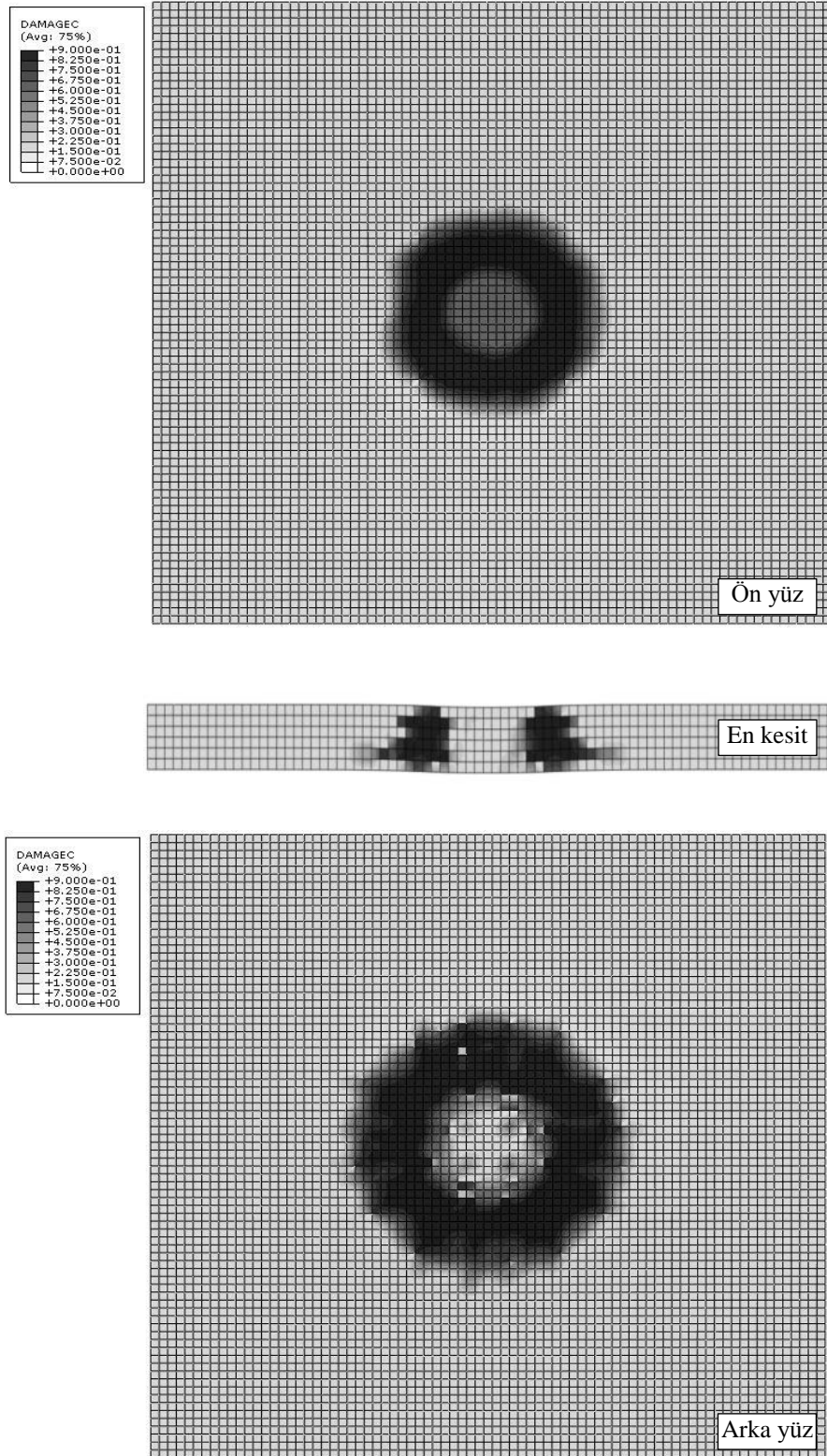
Bu şekillerden görüldüğü gibi mesnetlerine serbestçe oturan plağın ortasında, çekme bölgesindeki, donatılarda darbe etkisiyle oluşan plastik şekil değiştirme, darbe etkisinden 0,007 s sonra oluşmuştur. Donatılardaki gerilme ise 514 MPa değerine ulaşmıştır. Bu durumda darbe etkisiyle plak ortasındaki çekme donatılarının (plağın altında) plastik

bölgeye geçtiği ( $f_{yk}=420$  MPa) görülmüştür.

PK1011-1 plağında CDP malzeme modeli dikkate alınarak yapılan darbe analizi sonucunda,  $d_c$  basınç etkisinde rijitlik azalım katsayısını ve  $d_t$  çekme etkisinde rijitlik azalım katsayısını göstermek üzere,  $d_t$ 'nin değişimine bağlı plağın muhtemel hasar durumları Şekil 3.7'de,  $d_c$  değişimine bağlı olarak ise Şekil 3.8'de verilmektedir.

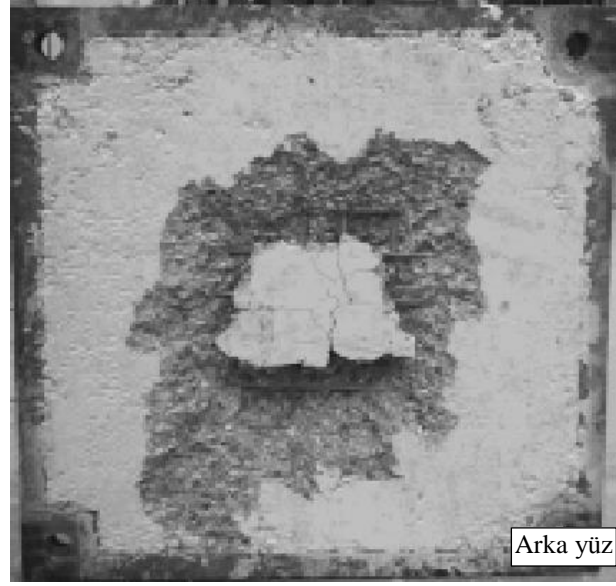


Şekil 3.7. PK1011-1 plağında  $d_t$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu



Şekil 3.8.PK1011-1 plağında  $d_c$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu

Bu şekillerden, plağın çekme etkisinde rijitliğinin azalması durumu dikkate alındığında plakta oluşan çatlakların ön ve arka yüzde mesnetlere doğru yayıldığı, basınç etkisindeki rijitliğin azalması durumunda ise plağın alt ve üstünde çarpma bölgesi etrafında hasarın oluştuğu görülmüştür. Chen ve May(2009) tarafından betonarme plaklar üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, darbe etkisine maruz kalan plakta oluşan hasarın (Şekil 3.9), Şekil 3.8’dekine benzer olduğu görülmüştür.

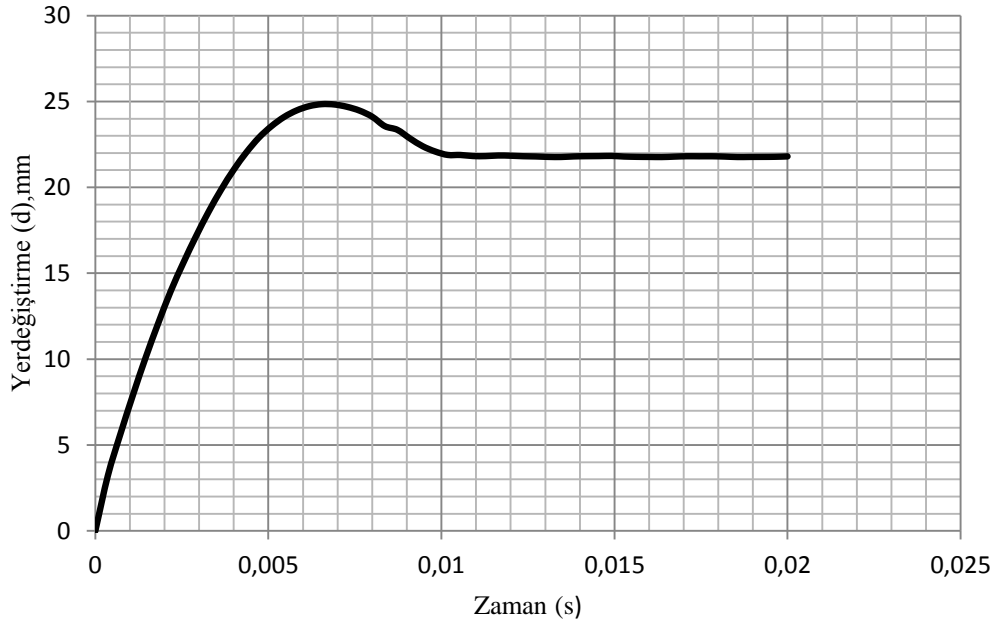


Şekil 3.9. Betonarme plağın alt yüzünde oluşan hasar (Chen ve May, 2009)

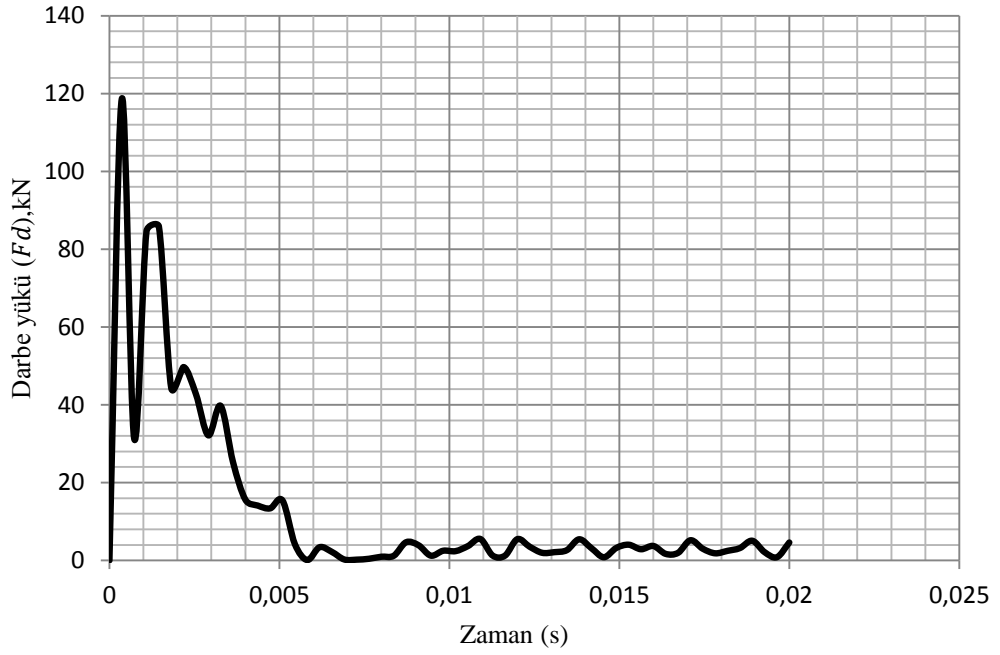
Betonarme plaklarda darbe etkisiyle oluşan hasar şeklinin plak boyutlarına bağlı olduğu, plak açıklığının artmasıyla plak eğilme davranışı gösterdiği, dolayısıyla da çekme etkisinin daha belirgin olduğu analizler sonucunda görülmüştür.

### 3.1.2. PK1011-2 Betonarme Plağı

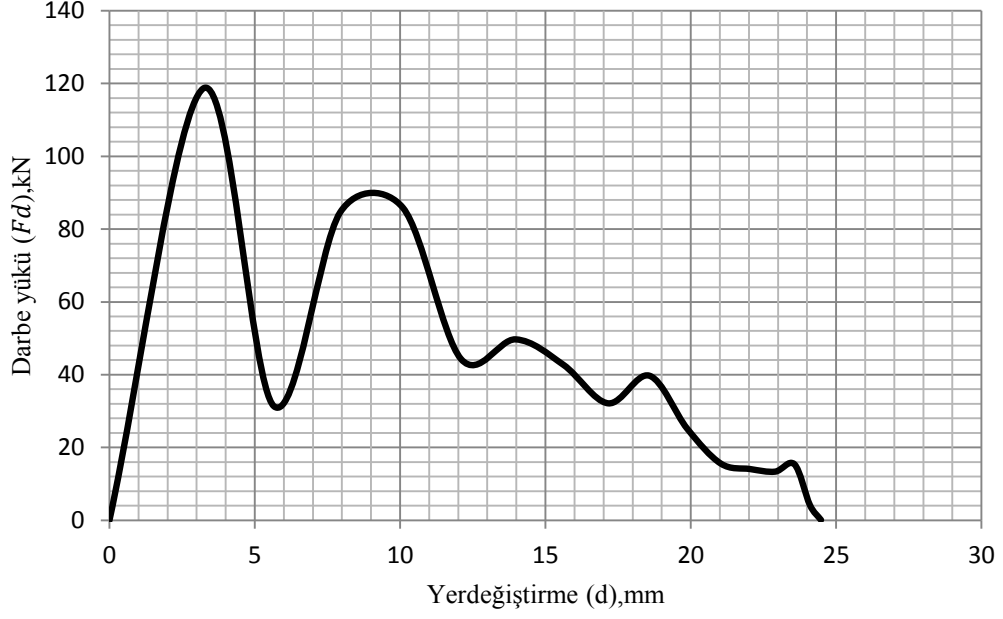
PK1011-2 betonarme plağın analizinde (mesnetlerine ankastre bağlı) “Beton Plastikleşme Hasar Modeli-Concrete Damage Plasticity model (CDP)” kullanılmıştır. Darbe yükü etkisinde betonarme plakta oluşan yerdeğiştirmenin zamanla değişimi Şekil3.10’da, darbe kuvvetinin zamanla değişimi Şekil 3.11’de, darbe kuvveti-yerdeğiştirme ilişkisi ise Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.10.PK1011-2 plağının açıklık ortası yerdeğiştirme-zaman eğrisi



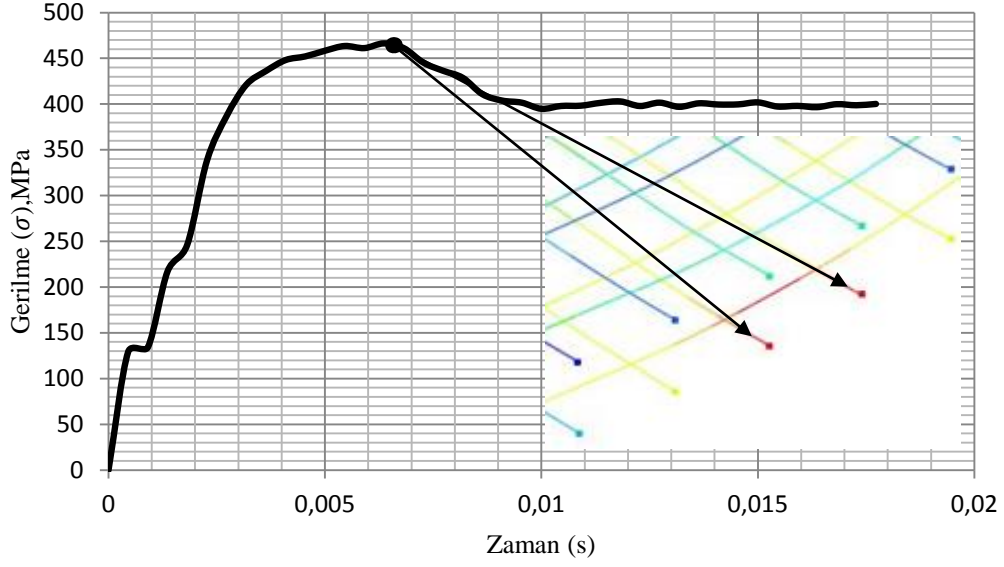
Şekil 3.11.PK1011-2 plağının darbe yükü-zaman eğrisi



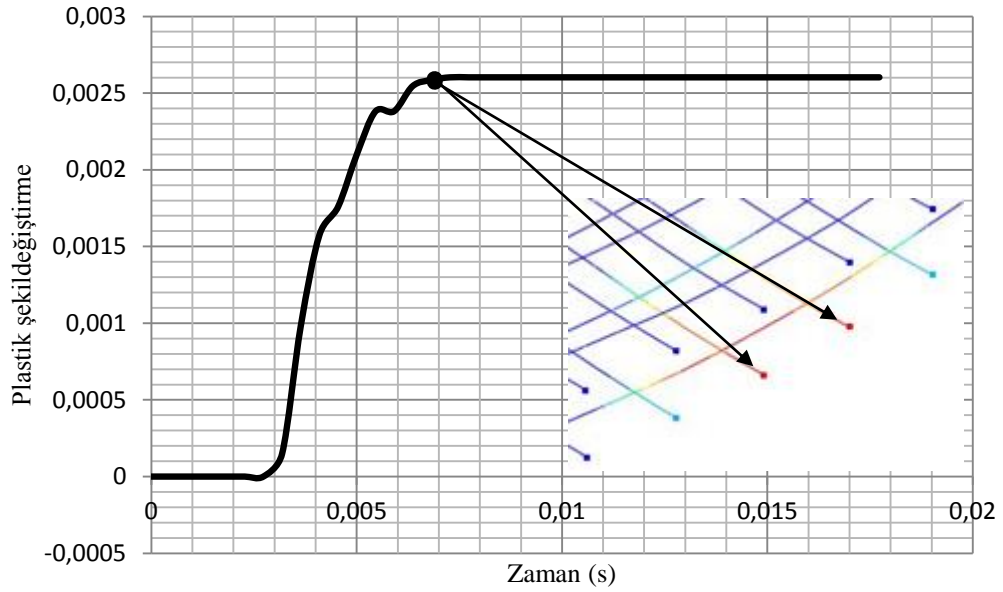
Şekil 3.12.PK1011-2 plağına ait darbe yükü-yerdeğiştirme eğrisi

Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'den görüldüğü gibi, PK1011-2 betonarme plağının (mesnetlerine ankastre bağlı), açıklık ortası maksimum yerdeğiştirmesi 25 mm, darbe yükünün maksimum değeri ise 118.6 kN elde edilmiştir. PK1011-1 plağında (mesnetlerine serbestçe oturan) maksimum yerdeğiştirme 27 mm, maksimum darbe yükü ise 105.8 kN olmuştur. Buradan, plağın mesnetlenme koşulunun darbe yükü üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Bu plağın açıklık ortası yerdeğiştirme değeri, darbe etkisinden 0.01 s sonra 22 mm yer değiştirme değerine ulaşmış ve bu değerden sonra yerdeğiştirmedeki değişim yok denecek kadar az olmuştur (bkz. Şekil 3.10).

PK1011-2 plağının betonarme donatısında darbe kuvveti etkisiyle oluşan gerilme ve plastik şekil değiştirme dağılımları Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'de verilmiştir.



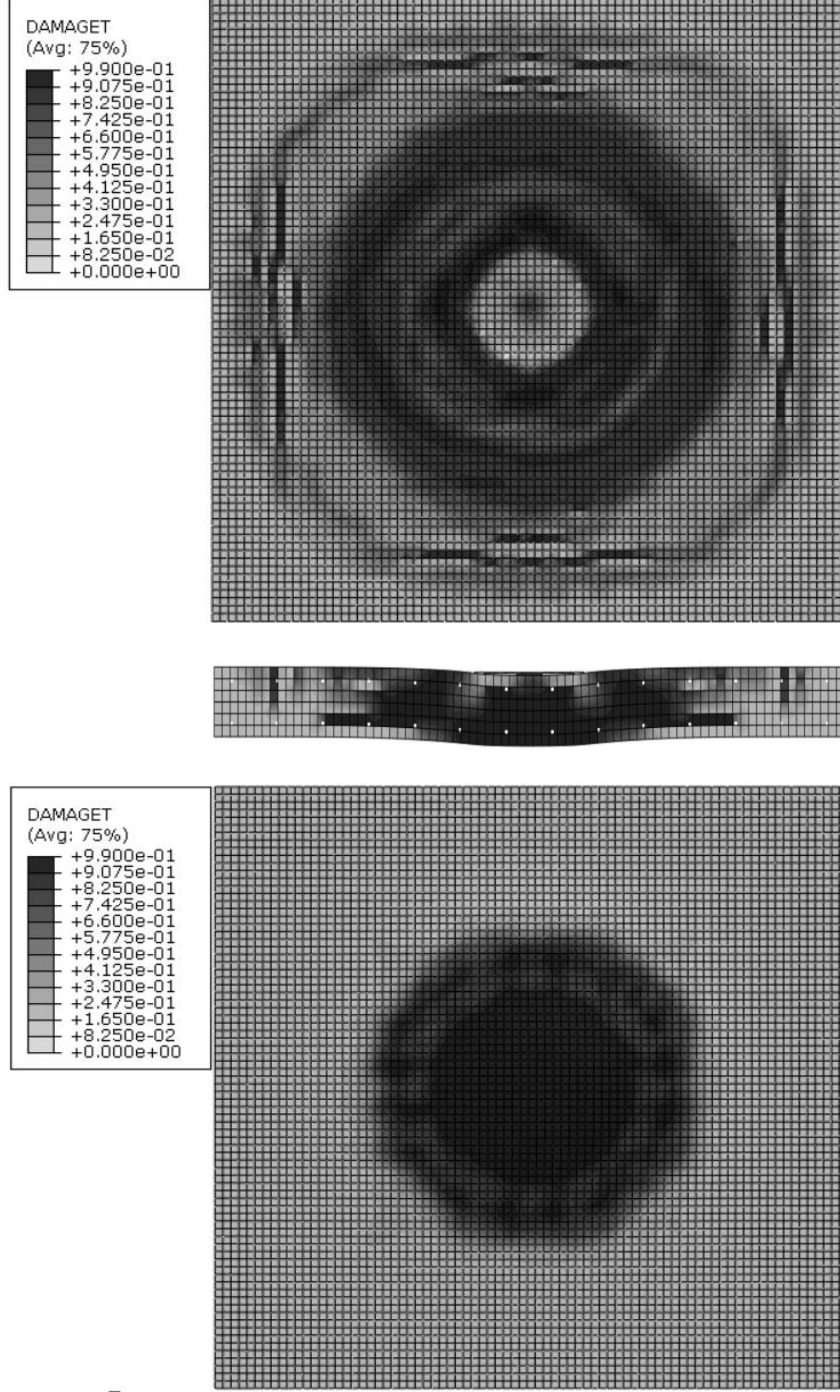
Şekil 3.13.PK1011-2 plağının donatısında oluşan plastik şekil değiştirmeye karşılık gelen gerilmenin zamanla değişimi



Şekil 3.14.PK1011-2 plağının donatısında oluşan plastik şekil değiştirmenin zamanla değişimi

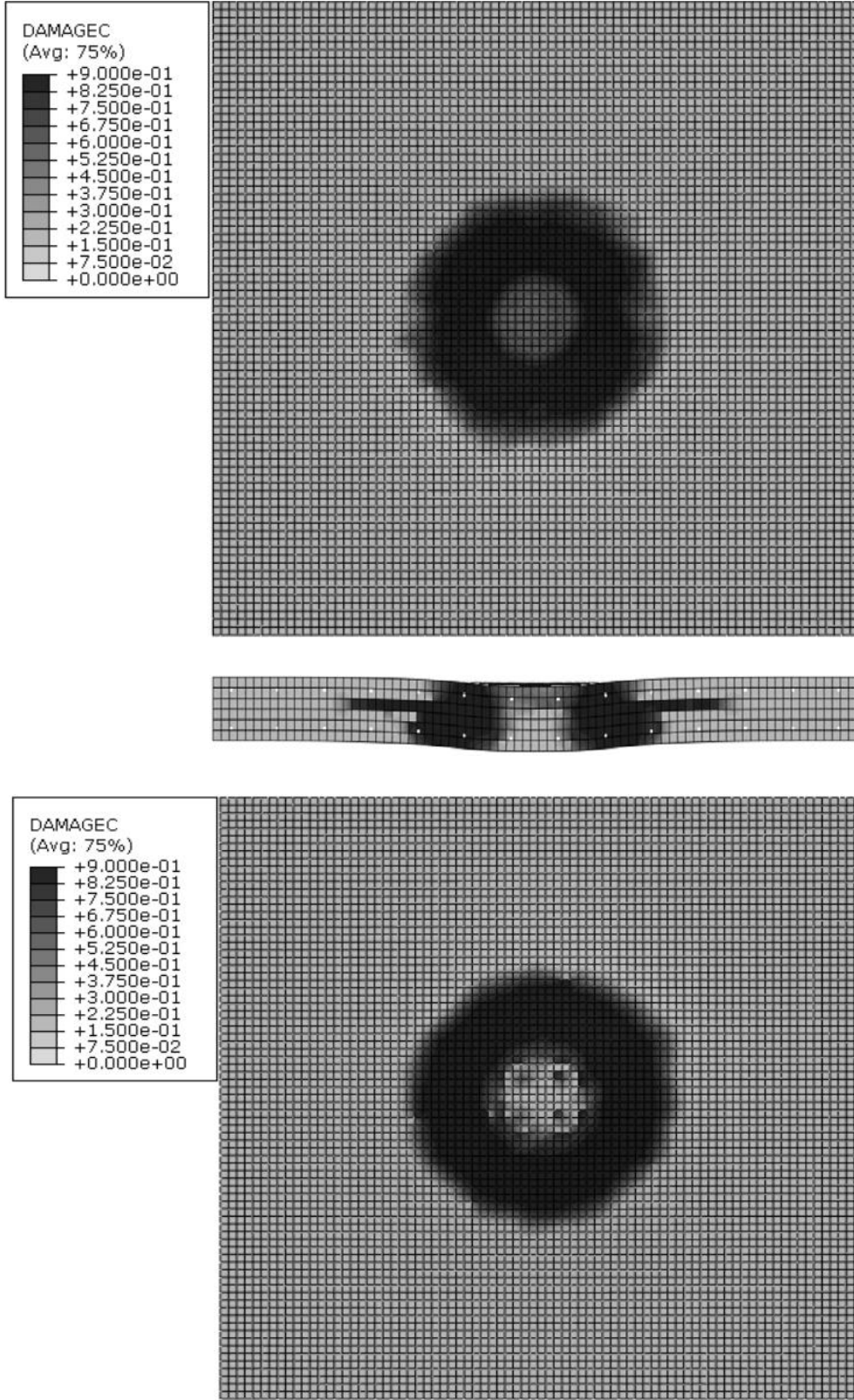
Bu şekillerden görüldüğü gibi ankastre olarak mesnetlenmiş plağın ortasında, PK1011-1'de olduğu gibi çekme bölgesindeki, donatılarda darbe etkisiyle oluşan plastik şekil değiştirme, darbe etkisinden 0.007 s sonra oluşmuştur. Donatılardaki gerilme ise 461 MPa değerine ulaşmıştır. Mesnetlerine serbestçe oturan plakta (PK1011-1) bu değer 514 MPa'dır.

PK1011-2 plağında CDP malzeme modeli dikkate alınarak yapılan darbe analizi sonucunda,  $d_c$  ve  $d_t$  parametrelerine bağlı olarak plağın kırılma mekanizmaları belirlenmiştir.  $d_t$ 'nin değişimine bağlı plağın muhtemel hasar durumları Şekil 3.15'de,  $d_c$  değişimine bağlı olarak ise Şekil 3.16'de verilmektedir.



Şekil 3.15. PK1011-2 plağında  $d_t$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu



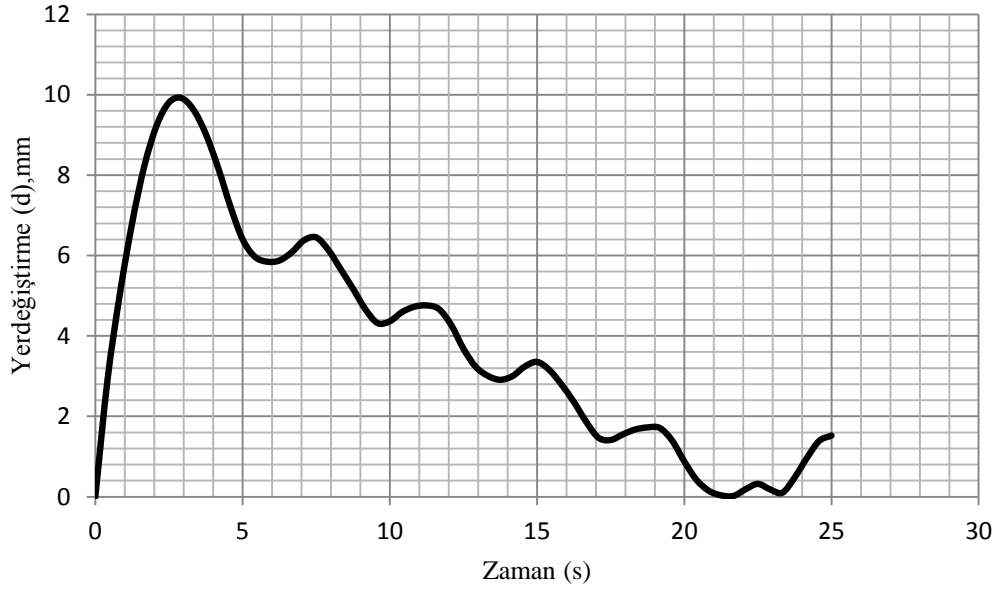


Şekil 3.16.PK1011-2 plağında  $d_c$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu

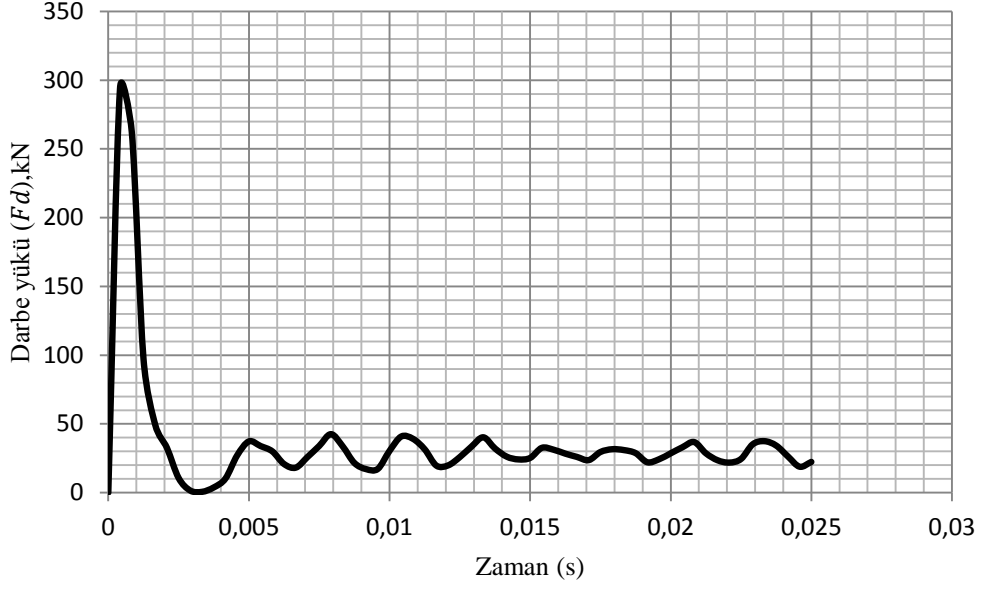
Bu şekillerden, plağın çekme etkisinde rijitliğinin azalması ( $d_t$ ) durumu dikkate alındığında, plağın ön yüzünde oluşan çatlakların mesnetlere doğru çatlakların dairesel olarak yayıldığı, arka yüzde ise hem  $d_t$  hem de  $d_c$  (basınç etkisinde rijitliğin azalması), ankastre mesnet etkisiyle darbe yükünün etkilediği çevrede çatlakların dar bir alanda yoğunlaştığı görülmüştür.

### 3.1.3. PK1011-3 Betonarme Plağı

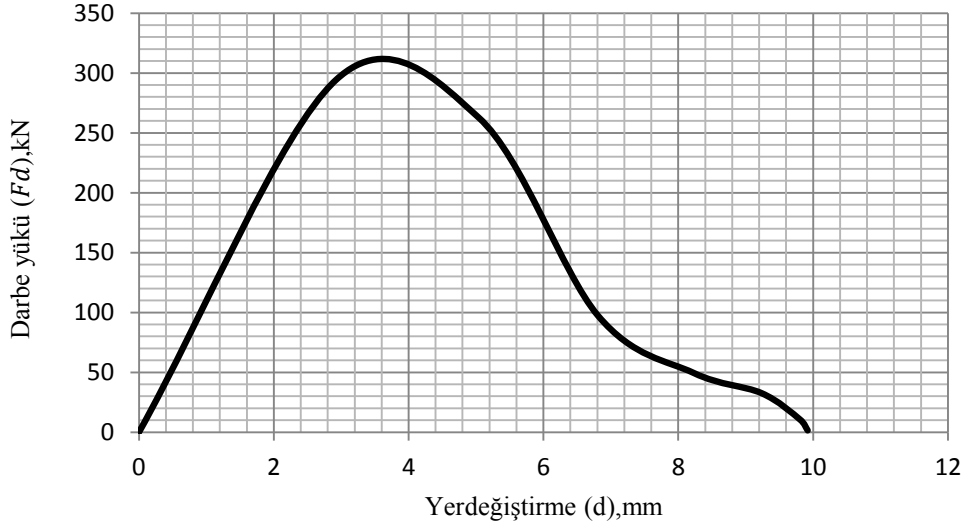
PK1011-3 betonarme plağın analizinde (mesnetlerine serbestçe oturan) “Drucker-Prager (DP)” malzeme modeli kullanılmıştır. Darbe yükü etkisinde betonarme plakta oluşan yerdeğiştirmenin zamanla değişimi Şekil 3.17’de, darbe kuvvetinin zamanla değişimi Şekil 3.18’de, darbe kuvveti-yerdeğiştirme ilişkisi ise Şekil 3.19’da verilmiştir.



Şekil 3.17.PK1011-3 plağının açıklık ortası yerdeğiştirme-zaman eğrisi



Şekil 3.18. PK1011-3 plağının darbe yükü-zaman eğrisi

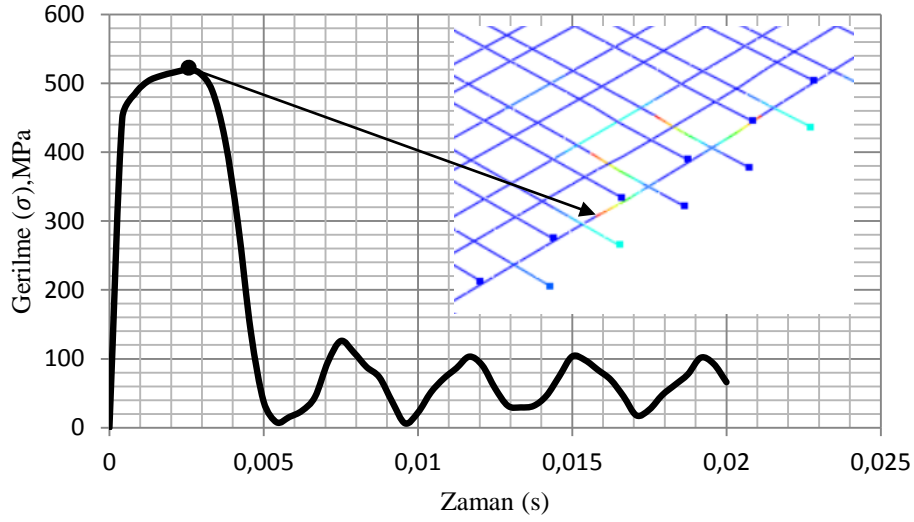


Şekil 3.19. PK1011-3 plağına ait darbe yükü-yerdeğiştirme eğrisi

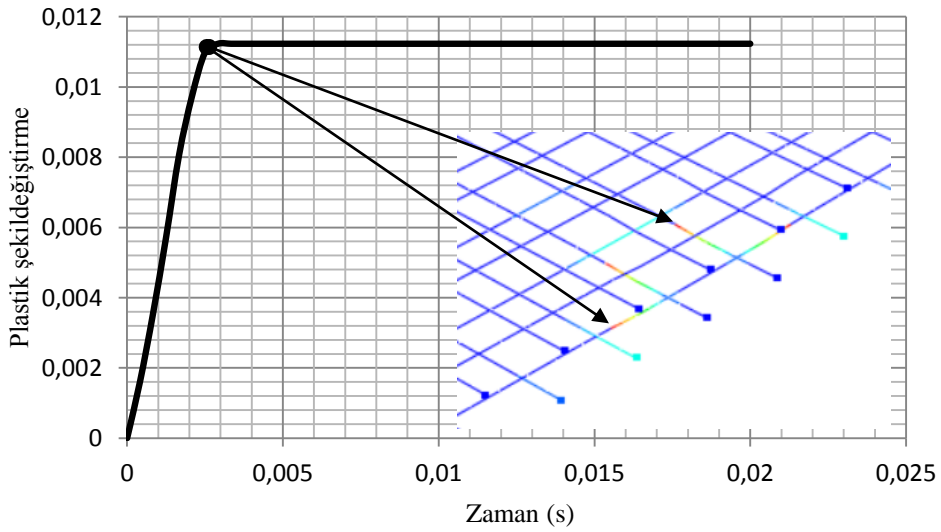
Bu şekillerden görüldüğü gibi, PK1011-3 betonarme plağının (mesnetlerine serbestçe oturan), açıklık ortası maksimum yerdeğiştirmesi 10 mm, darbe yükünün maksimum değeri ise 294.1 kN elde edilmiştir. Aynı plağın yalnızca CDP malzeme modeli kullanılması durumunda (PK1011-1), maksimum yerdeğiştirme 27 mm, maksimum darbe yükü ise 105.8 kN olmuştu. Burada, plağın çözümünde dikkate alınan malzeme modellerinden DP modelinde yerdeğiştirmenin CDP malzeme modeline göre 2.7 kat daha düşük, darbe yükünün ise 2.8 kat daha fazla olması, CDP malzeme modelinde bulunan

betonun basınç ve çekme rijitliklerini dikkate alan rijitlik parametrelerinin ( $d_c$ ,  $d_t$ ) ve betonun çekme dayanımının DP malzeme modelinde doğrudan bulunmamasından kaynaklandığını belirtmek uygun olmaktadır. Bu plağın açıklık ortası yerdeğiştirme değeri, darbe etkisinden 0.01 s sonra 10 mm yer değiştirme değerine ulaşmış ve bu değerden sonra yerdeğiştirme hızla azalarak devam etmiştir(bkz. Şekil 3.17).

PK1011-3 plağının betonarme donatısında darbe kuvveti etkisiyle oluşan gerilme ve plastik şekildeğiştirme dağılımları Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de verilmiştir.



Şekil 3.20.PK1011-3 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmeye karşı gelen gerilmenin zamanla değişimi

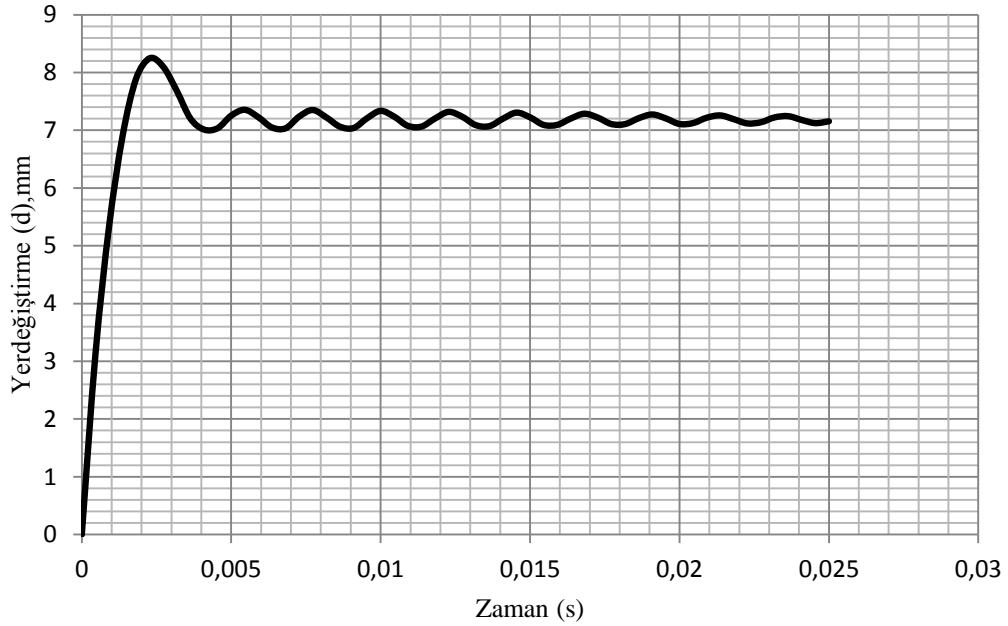


Şekil 3.21.PK1011-3 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmenin zamanla değişimi

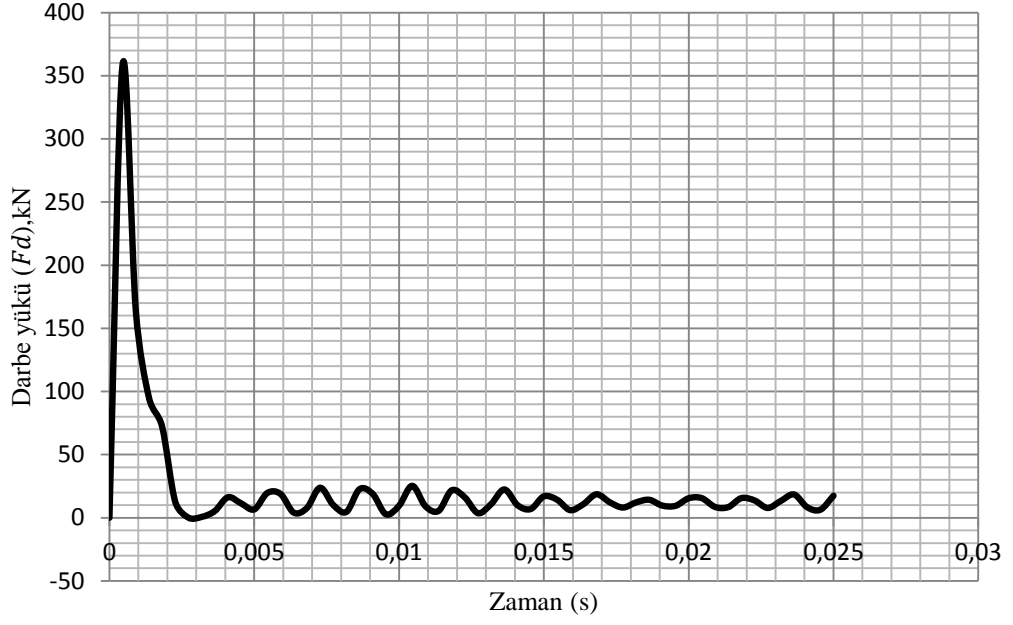
Bu şekillerden görüldüğü gibi mesnetlerine serbestçe oturan plağın ortasında, CDP malzeme modeli dikkate alınarak çözümü yapılan PK1011-1’de olduğu gibi çekme bölgesindeki, donatılarda darbe etkisiyle oluşan plastik şekildeğiştirme, darbe etkisinden 0.0025 s sonra oluşmuştur. Donatılardaki gerilme ise 519 MPa değerine ulaşmıştır. Mesnetlerine serbestçe oturan plakta (PK1011-1) bu değer 514 MPa dır. Bu da aynı boyut ve mesnetlenme koşullarında CDP VE DP malzeme modellerine göre yapılan çözümlemede donatılardaki maksimum gerilmenin fazla değişmediğini göstermektedir.

### 3.1.4. PK1011-4 Betonarme Plağı

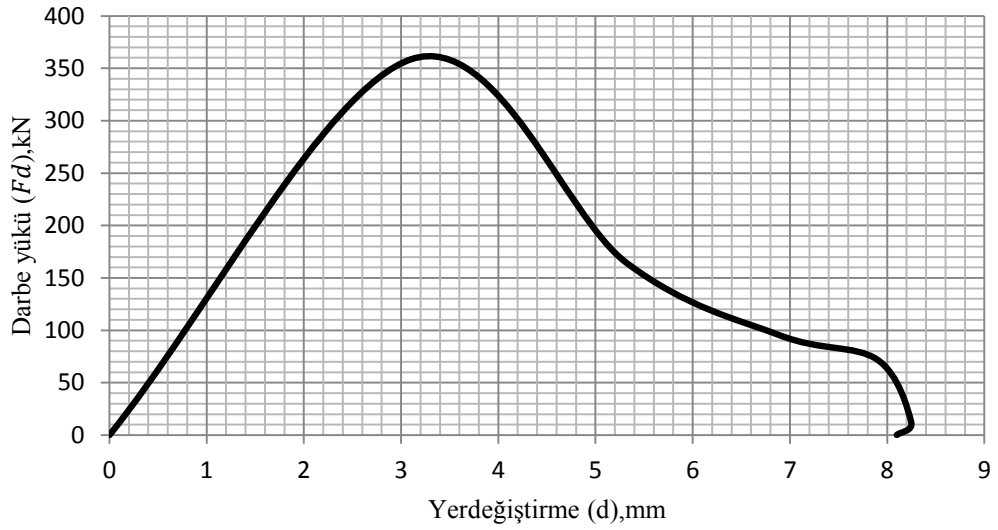
PK1011-4 betonarme plağın analizinde (mesnetlerine ankastre bağlı) “Drucker-Prager (DP)” malzeme modeli kullanılmıştır. Darbe yükü etkisinde betonarme plakta oluşan yerdeğiştirmenin zamanla değişimi Şekil 3.22’de, darbe kuvvetinin zamanla değişimi Şekil 3.23’de, darbe kuvveti-yerdeğiştirme ilişkisi ise Şekil 3.24’de verilmiştir.



Şekil . 3.22.PK1011-4 plağının açıklık ortası yerdeğiştirme-zaman eğrisi



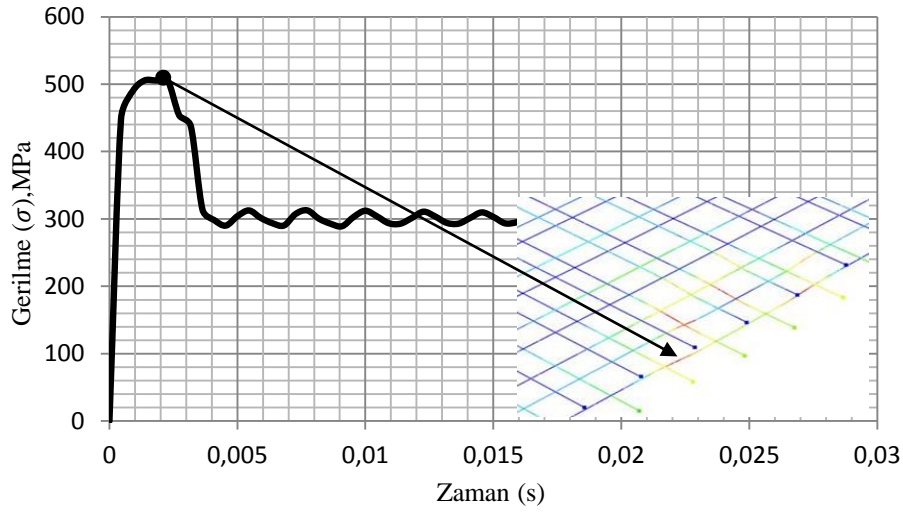
Şekil 3.23. PK1011-4 plağının darbe yükü-zaman eğrisi



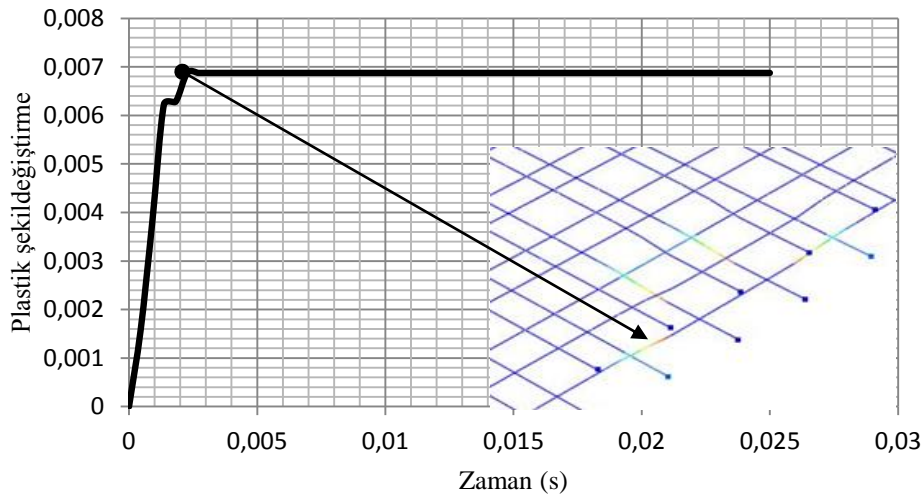
Şekil 3.24. PK1011-4 plağına ait darbe yükü-yerdeğiştirme eğrisi

Bu şekillerden görüldüğü gibi, PK1011-4 betonarme plağının (mesnetlerine ankastre bağlı), açıklık ortası maksimum yerdeğiştirmesi 8.2 mm, darbe yükünün maksimum değeri ise 358.7 kN elde edilmiştir. Aynı plağın yalnızca CDP malzeme modeli kullanılması durumunda (PK1011-2), maksimum yerdeğiştirme 25 mm, maksimum darbe yükü ise 118.6 kN olmuştu. Burada, plağın çözümünde dikkate alınan malzeme

modellerinden DP modelinde yerdeğiştirmenin, CDP malzeme modeline göre 3 kat daha az, darbe yükünün ise 3 kat daha fazla olması, plakların zmlemesinde PK1011-3’de de belirtildiği gibi dikkate alınan malzeme modellerinden kaynaklanmaktadır. Bu plağın açıklık ortası yerdeğiştirme değeri, darbe etkisinden 0.0022 s sonra 8.2 mm yerdeğiştirme değerine ulaşmış ve bu değerden sonra yerdeğiştirmedeki değişim yok denecek kadar azdır. (bkz. şekil 3.22). PK1011-4 plağının betonarme donatısında darbe kuvveti etkisiyle oluşan gerilme ve plastik şekildeğiştirme dağılımları şekil 3.25 ve şekil 3.26’da verilmiştir.



şekil 3.25. PK1011-4 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmeye karşı gelen gerilmenin zamanla değişimi

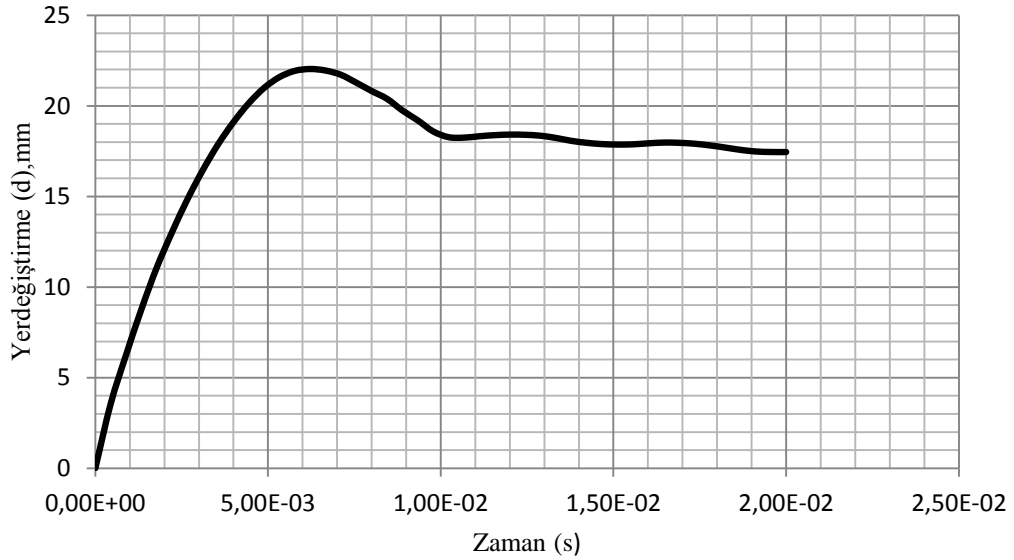


şekil 3.26. PK1011-4 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmenin zamanla değişimi

Bu şekillerden görüldüğü gibi ankastre mesnetli bu plağın ortasında, DP malzeme modeli dikkate alınarak çözümü yapılan PK1011-2’de olduğu gibi çekme bölgesindeki donatılarda darbe etkisiyle oluşan plastik şekildeğiştirme, darbe etkisinden 0.0025 s sonra oluşmuştur. Donatılardaki gerilme ise 506 MPa değerine ulaşmıştır. Mesnetlerine serbestçe oturan plakta (PK1011-2) bu değer 519 MPa dır. Bu da aynı malzeme modeli kullanılması durumunda mesnet değişiminin plağın açıklık ortasındaki donatılarda oluşan gerilme düzeyini önemli oranda değiştirmedeğini göstermektedir.

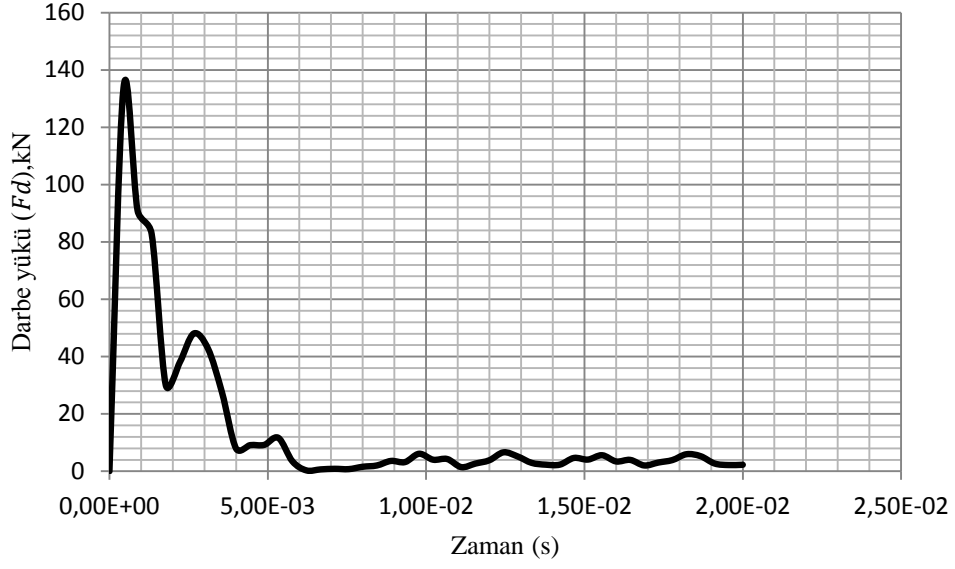
### 3.1.5. PK1012-1 Betonarme Plağı

Bu betonarme plağın PK1011 serisinden farkı plak boyutlarıdır. PK1012 serisi plakların boyutları 1200x1200x100 mm dir.PK1012-1 betonarme plağın analizinde (mesnetlerine serbestçe oturan) “Beton Plastikleşme Hasar Modeli-Concrete Damage Plasticity Model (CDP)” kullanılmıştır. Darbe yükü etkisinde betonarme plakta oluşan yerdeğiştirmenin zamanla değişimi Şekil 3.27’de, darbe kuvvetinin zamanla değişimi Şekil 3.28’de, darbe kuvveti-yerdeğiştirme ilişkisi ise Şekil 3.29’de verilmiştir.

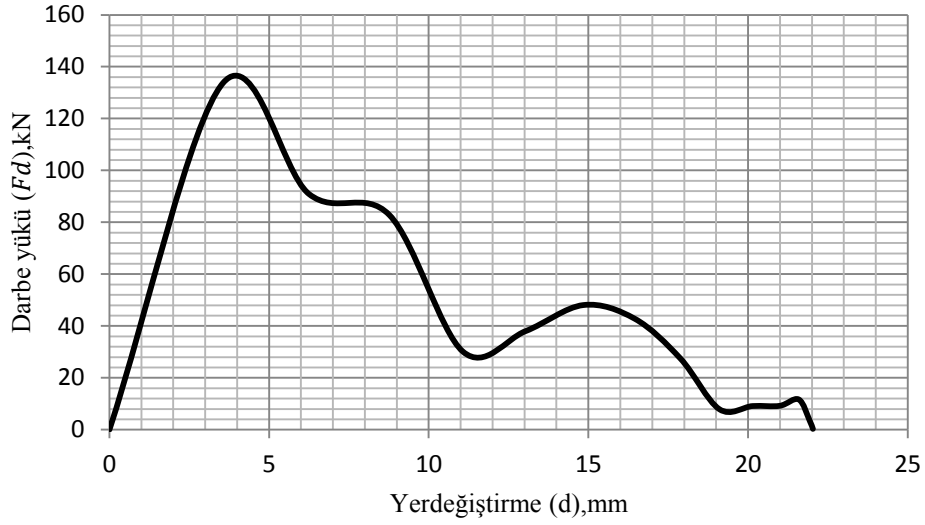


Şekil 3.27. PK1012-1 plağının açıklık ortası yerdeğiştirme-zaman eğrisi





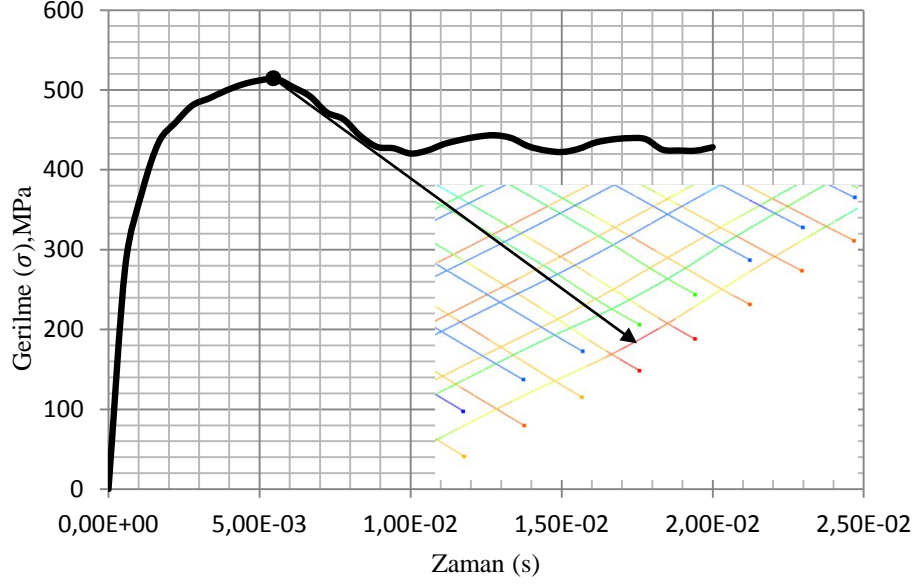
Şekil 3.28. PK1012-1 plağının darbe yükü-zaman eğrisi



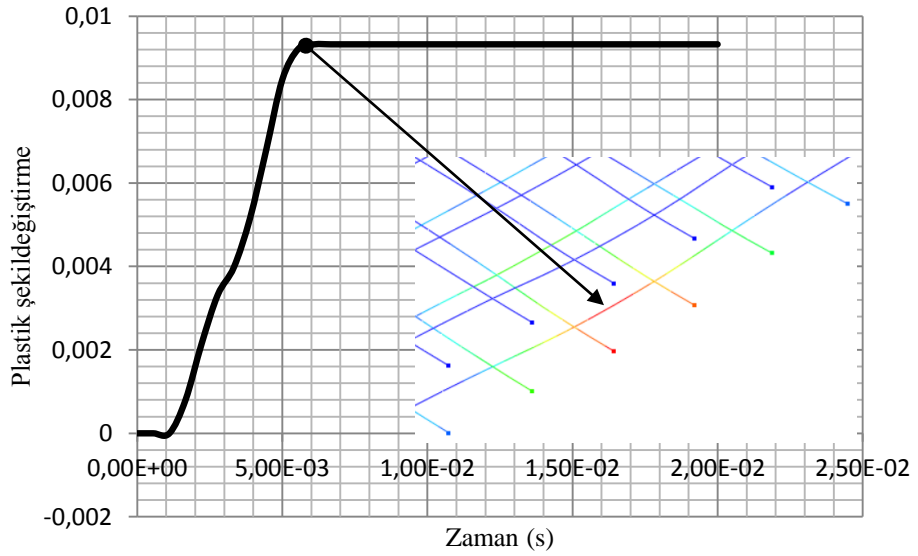
Şekil 3.29. PK1012-1 plağına ait darbe yükü-yerdeğiştirme eğrisi

Şekil 3.27 ve Şekil 2.28'den görüldüğü gibi, PK1012-1 betonarme plağının (mesnetlerine serbestçe oturan), açıklık ortası maksimum yerdeğiştirmesi 22 mm, darbe kuvvetinin maksimum değeri ise 133,7 kN olarak elde edilmiştir. Bu plağın açıklık ortası yerdeğiştirme değeri, darbe etkisinden 0,01 s sonra 18 mm yer değıştirme değerine ulaşmış ve bu değerden sonra yerdeğiştirmedeki değişim yok denecek kadar az olmuştur. (bkz. Şekil 3.27).

PK81012-1 plağının betonarme donatısında darbe yükü etkisiyle oluşan gerilme ve plastik şekildeğiştirme dağılımları Şekil 3.30 ve Şekil 2.31’de verilmiştir.

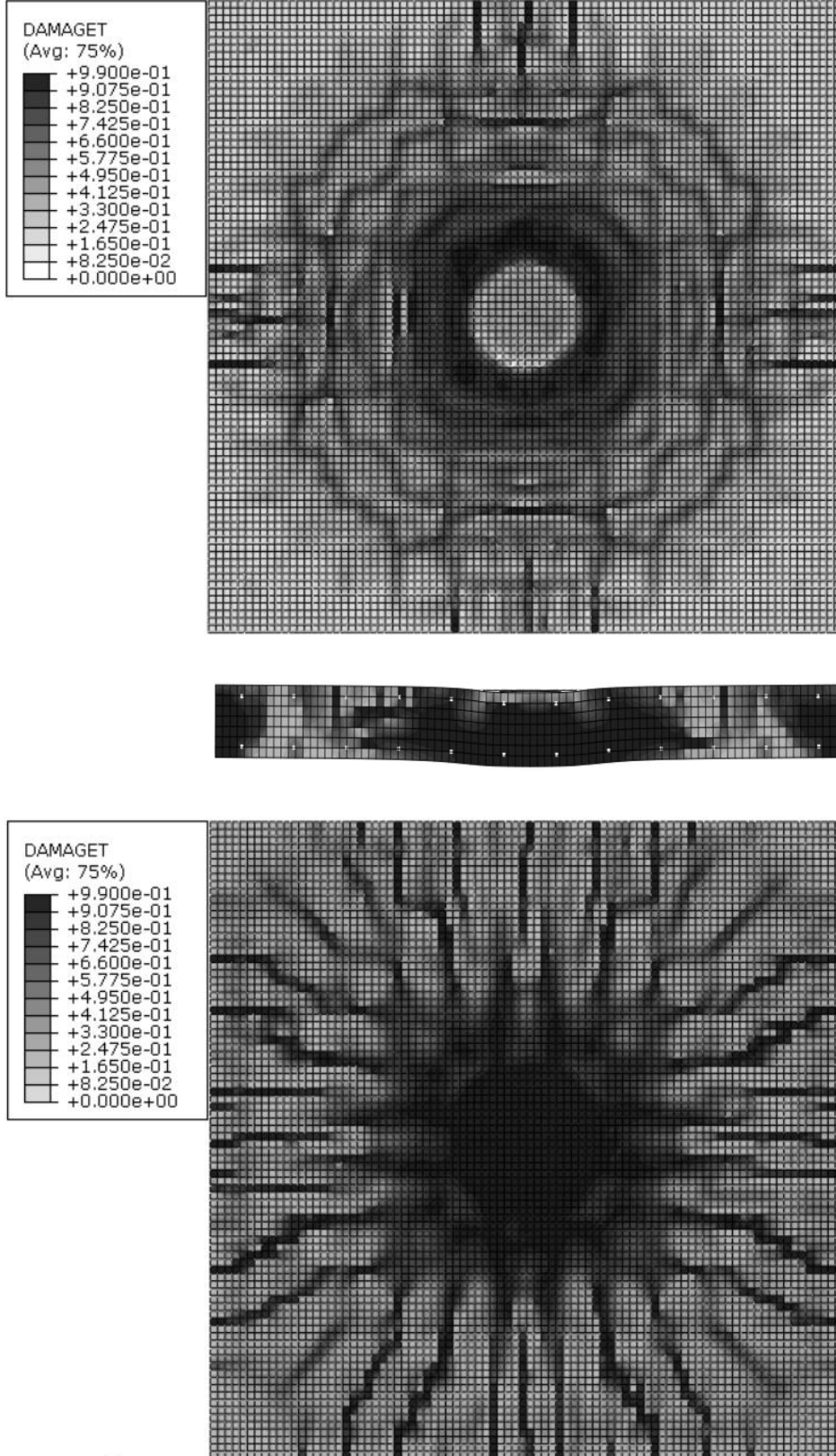


Şekil 3.30. PK1012-1 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmeye karşı gelen gerilmenin zamanla değişimi

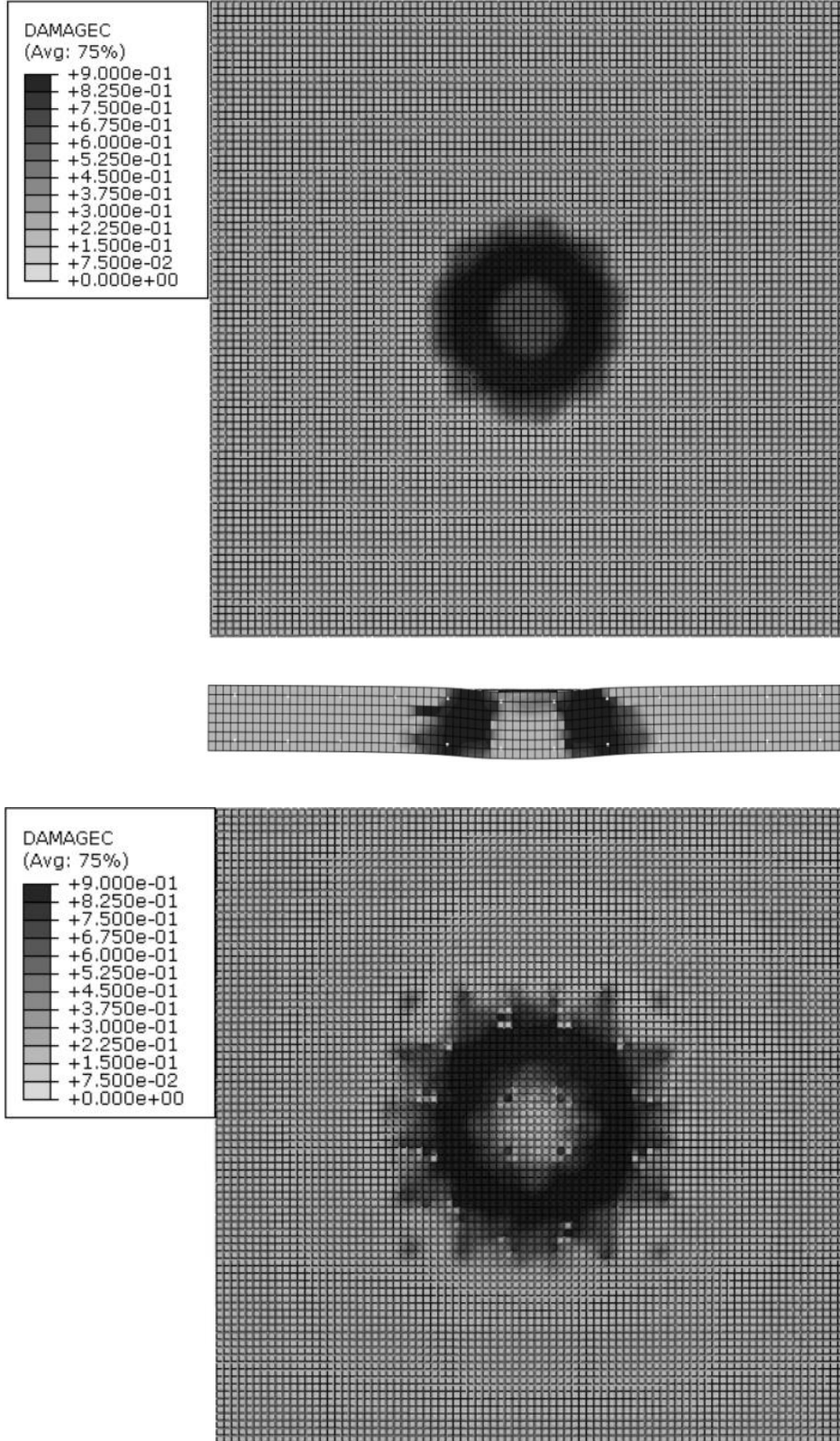


Şekil 3.31. PK1012-1 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmenin zamanla değişimi

Bu şekillerden görüldüğü gibi mesnetlerine serbestçe oturan plağın ortasında, çekme bölgesindeki, donatılarda oluşan plastik şekildeğiştirme, darbe etkisinden 0.006 s sonra oluşmuştur. Donatılardaki gerilme ise 513.8 MPa değerine ulaşmıştır. Bu durumda darbe etkisiyle plak ortasındaki çekme donatılarının (plağın altında) plastik bölgeye geçtiği ( $f_{yk}=420$  MPa) görülmüştür. PK1012-1 plağında CDP malzeme modeli dikkate alınarak yapılan darbe analizi sonucunda,  $d_c$  basınç etkisinde rijitlik azalım katsayısını ve  $d_t$  çekme etkisinde rijitlik azalım katsayısını göstermek üzere,  $d_t$ 'nin değişimine bağlı plağın muhtemel hasar durumları Şekil 3.32'de,  $d_c$  değişimine bağlı olarak ise Şekil 3.33'de verilmektedir.



Şekil 3.32.PK1012-1 plağında  $d_t$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu

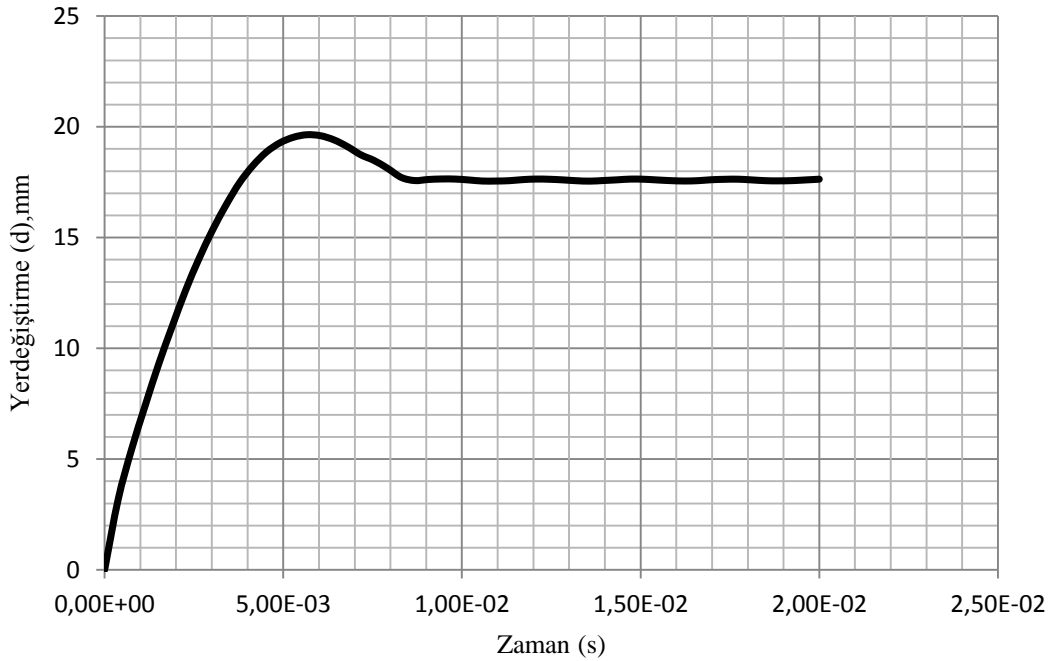


Şekil 3.33.PK1012-1 plağında  $d_c$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu

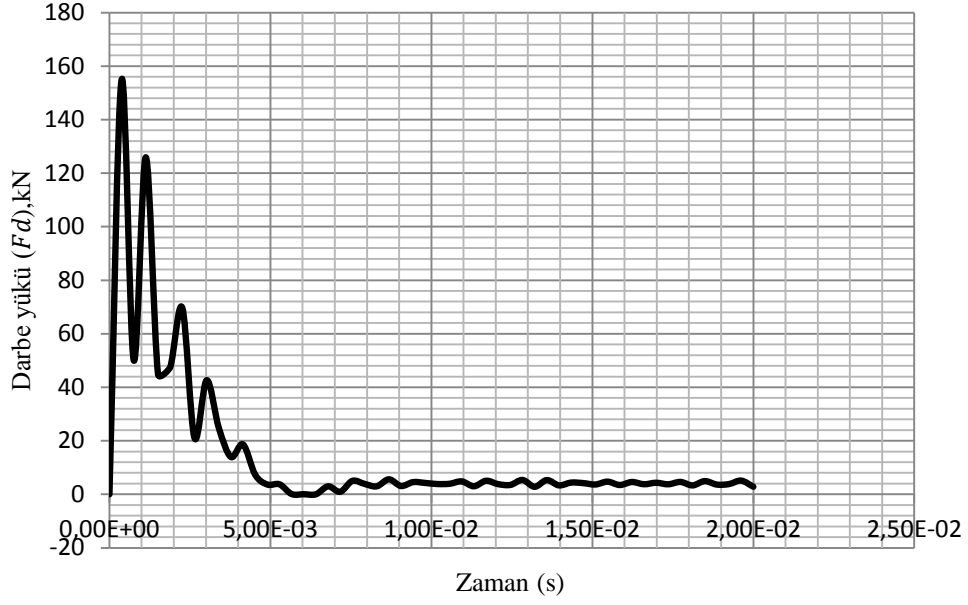
Bu şekillerden PK1011-1 plağında da olduğu gibi, plağın çekme etkisinde rijitliğinin azalması durumu dikkate alındığında plakta oluşan çatlakların ön ve arka yüzde mesnetlere doğru yayıldığı, basınç etkisindeki rijitliğin azalması durumunda ise plağın alt ve üstünde çarpma bölgesi etrafında hasarın olduğu görülmüştür.

### 3.1.6. PK1012-2 Betonarme Plağı

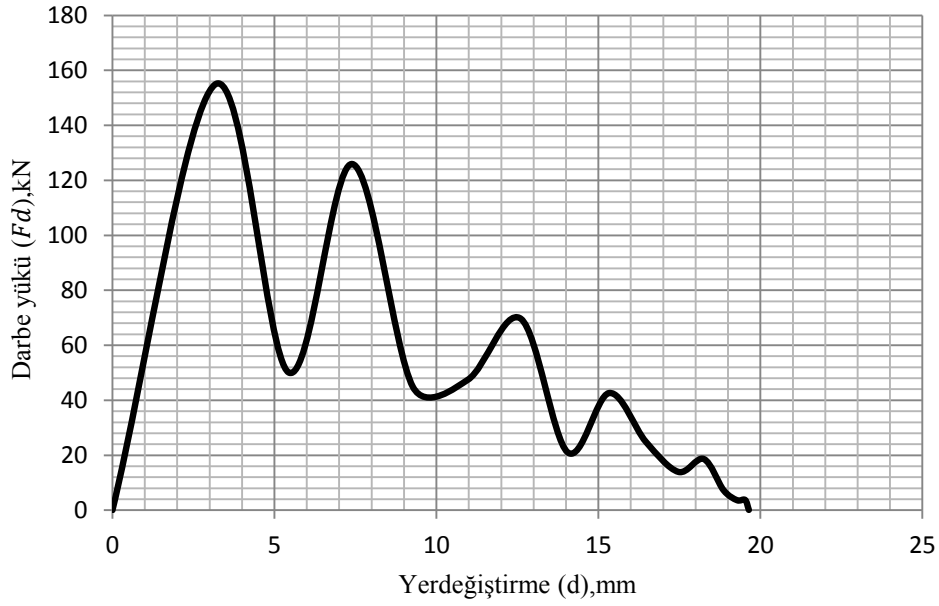
PK1012-2 betonarme plağın analizinde (mesnetlerine ankastre bağlı) “Beton Plastikleşme Hasar Modeli -Concrete Damage Plasticity (CDP)” modeli kullanılmıştır. Darbe yükü etkisinde betonarme plakta oluşan yerdeğiştirmenin zamanla değişimi Şekil 3.34’de, darbe yükünün zamanla değişimi Şekil 3.35’de, darbe yükü-yerdeğiştirme ilişkisi ise Şekil 3.36’de verilmiştir.



Şekil 3.34. PK1012-2 plağının açıklık ortası yerdeğiştirme-zaman eğrisi



Şekil 3.35.PK1012-2 plağının darbe yükü-zaman eğrisi



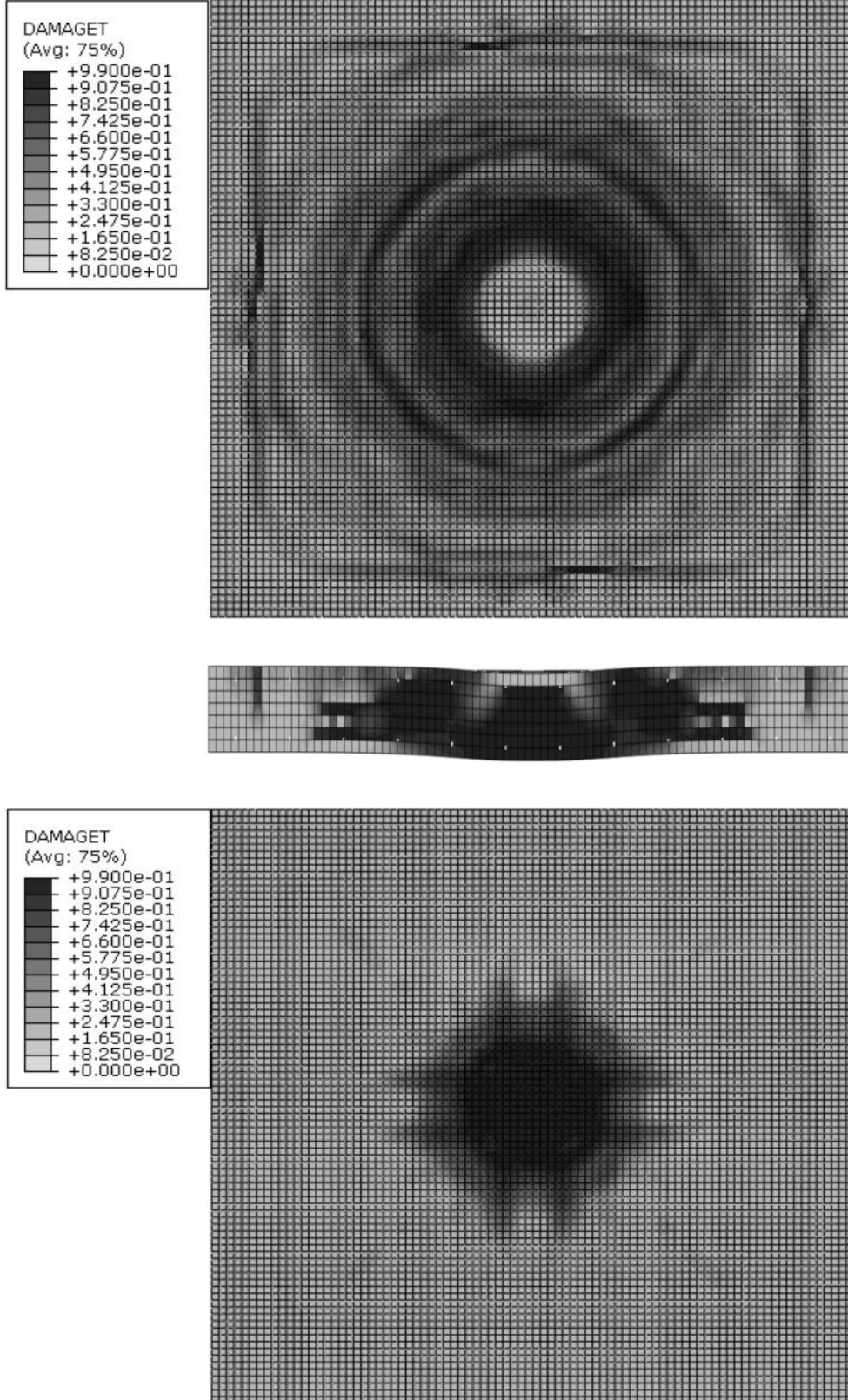
Şekil 3.36. PK1012-2 plağına ait darbe yükü-yerdeğiştirme eğrisi

Şekil 3.34 ve Şekil 3.35'de görüldüğü gibi, PK1012-2 betonarme plağının (mesnetlerine ankastre bağlı), açıklık ortası maksimum yerdeğiştirmesi 19.6 mm, darbe yükünün maksimum değeri ise 154.8 kN elde edilmiştir. PK1012-1 plağında (mesnetlerine serbestçe oturan) maksimum yerdeğiştirme 22 mm, maksimum darbe yükü ise 133.7 kN olmuştur. Buradan, plağın mesnetlenme koşulunun darbe yükü üzerinde etkili olduğu

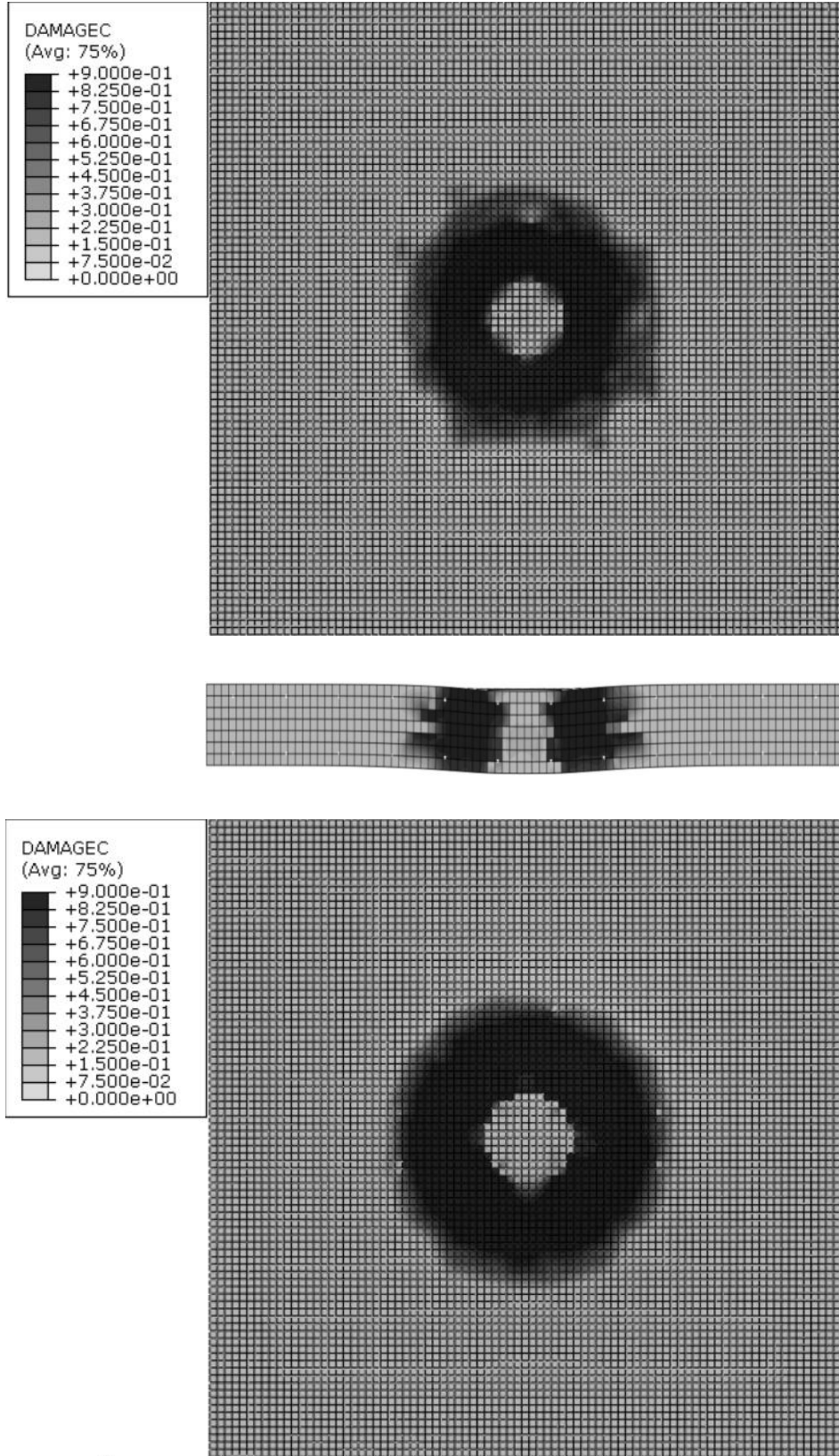




Bu şekillerden görüldüğü gibi ankastre olarak mesnetlenmiş plağın ortasında, PK1012-1’de olduğu gibi çekme bölgesindeki, donatılarda darbe etkisiyle oluşan plastik şekildeğiştirme, darbe etkisinden 0.006 s sonra oluşmuştur. Donatılardaki gerilme ise 424 MPa değerine ulaşmıştır. Mesnetlerine serbestçe oturan plakta (PK1012-1) bu değer 513.8 MPa dır. PK1012-2 plağında CDP malzeme modeli dikkate alınarak yapılan darbe analizi sonucunda,  $d_c$  ve  $d_t$  parametrelerine bağlı olarak plağın kırılma mekanizmaları belirlenmiştir.  $d_t$ ’nin değişimine bağlı plağın muhtemel hasar durumları Şekil 3.39’da,  $d_c$  değişimine bağlı olarak ise Şekil 3.40’da verilmektedir.

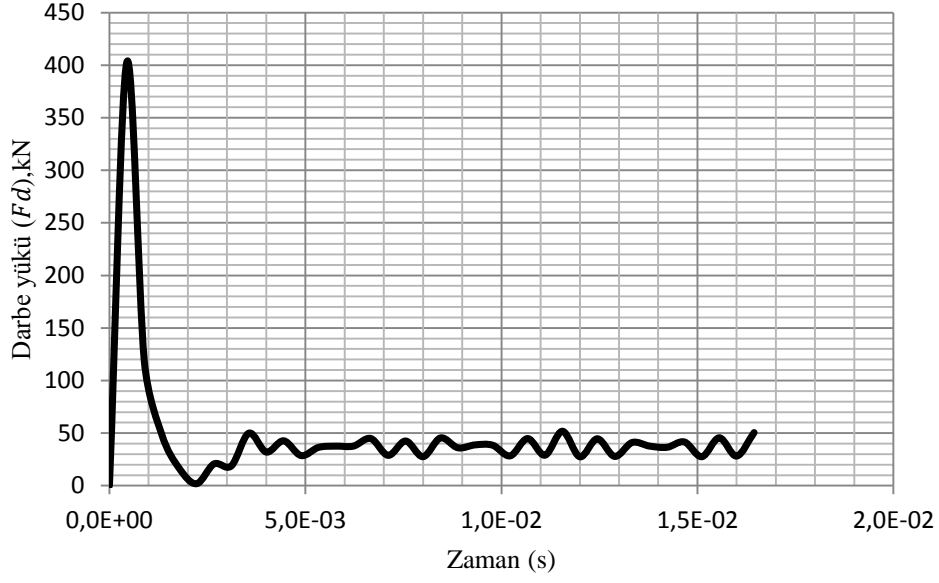


Şekil 3.39. PK1012-2 plağında  $d_t$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu

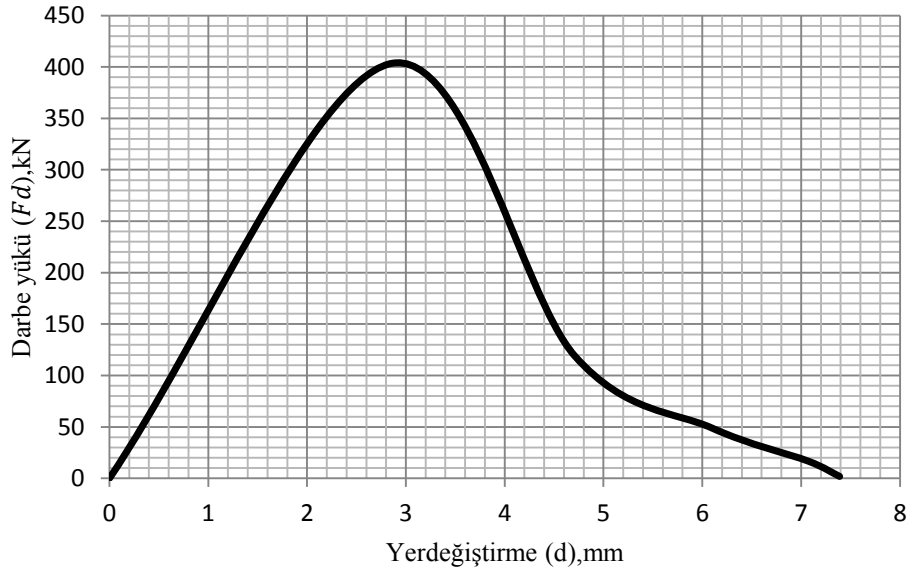


Şekil 3.40.PK1012-2 plağında  $d_c$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu





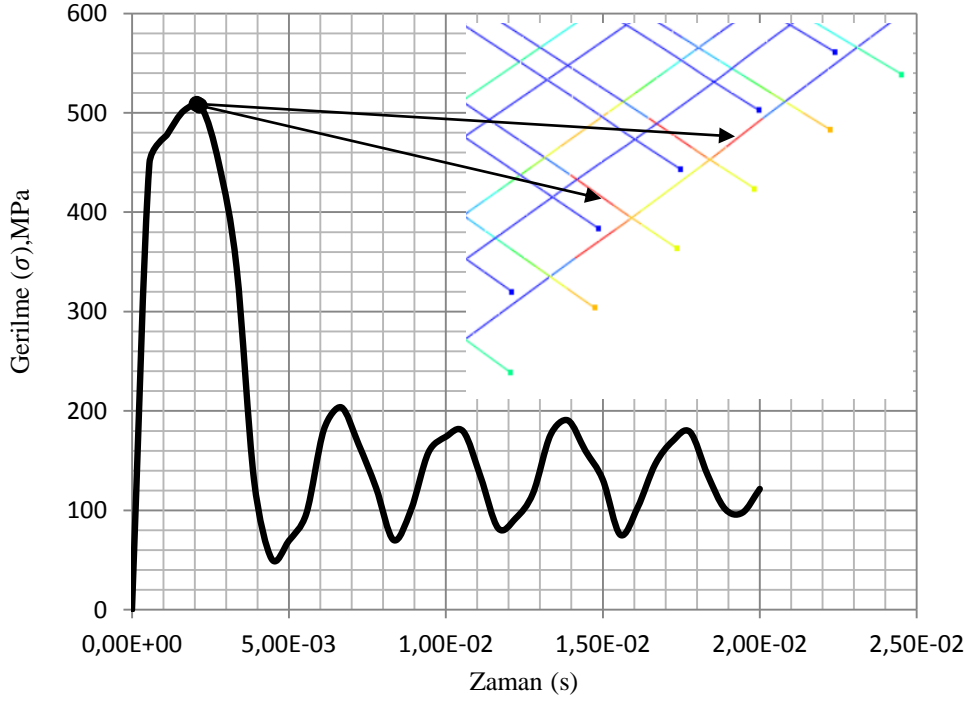
Şekil 3.42.PK1012-3 plağının darbe yükü-zaman eğrisi



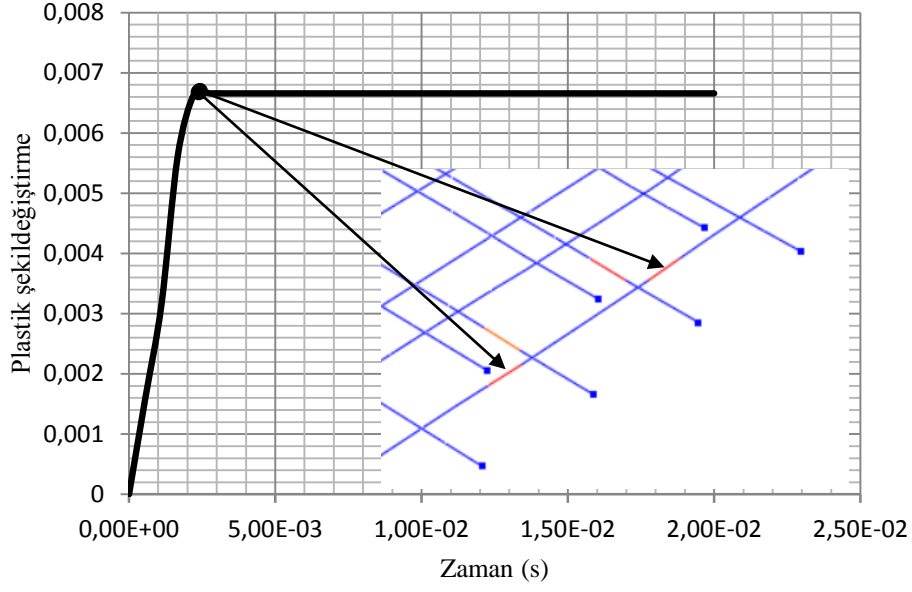
Şekil 3.43.PK1012-3 plağına ait darbe yükü-yerdeğiştirme eğrisi

Bu şekillerden görüldüğü gibi, PK1012-3 betonarme plağının (mesnetlerine serbestçe oturan), açıklık ortası maksimum yerdeğiştirmesi 7 mm, darbe yükünün maksimum değeri ise 402.9 kN elde edilmiştir. Aynı plağın yalnızca CDP malzeme modeli kullanılması durumunda (PK1012-1), maksimum yerdeğiştirme 22 mm, maksimum darbe yükü ise 133.7 kN olmuştu. Burada, plağın çözümünde dikkate alınan malzeme modellerinden DP modelinde yerdeğiştirmenin CDP malzeme modeline göre 3.1 kat daha

düşük, darbe yükünün ise 3 kat daha fazla olması, CDP malzeme modelinde bulunan betonun basınç ve çekme rijitliklerini dikkate alan rijitlik parametrelerinin ( $d_c$ ,  $d_t$ ) ve betonun çekme dayanımının DP malzeme modelinde doğrudan bulunmamasından kaynaklandığını belirtmek uygun olmaktadır. Bu plağın açıklık ortası yerdeğiştirme değeri, darbe etkisinden 0.0022s sonra 7 mm yer değıştirme değerine ulaşmış ve bu değerden sonra yerdeğiştirme, hızla azalarak devam etmiştir (bkz. Şekil 3.41). PK1012-3 plağının betonarme donatısında darbe yükü etkisiyle oluşan gerilme ve plastik şekildeğiştirme dağılımları Şekil 3.44 ve Şekil 3.45’de verilmiştir.



Şekil 3.44. PK1012-3 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmeye karşı gelen gerilmenin zamanla değişimi

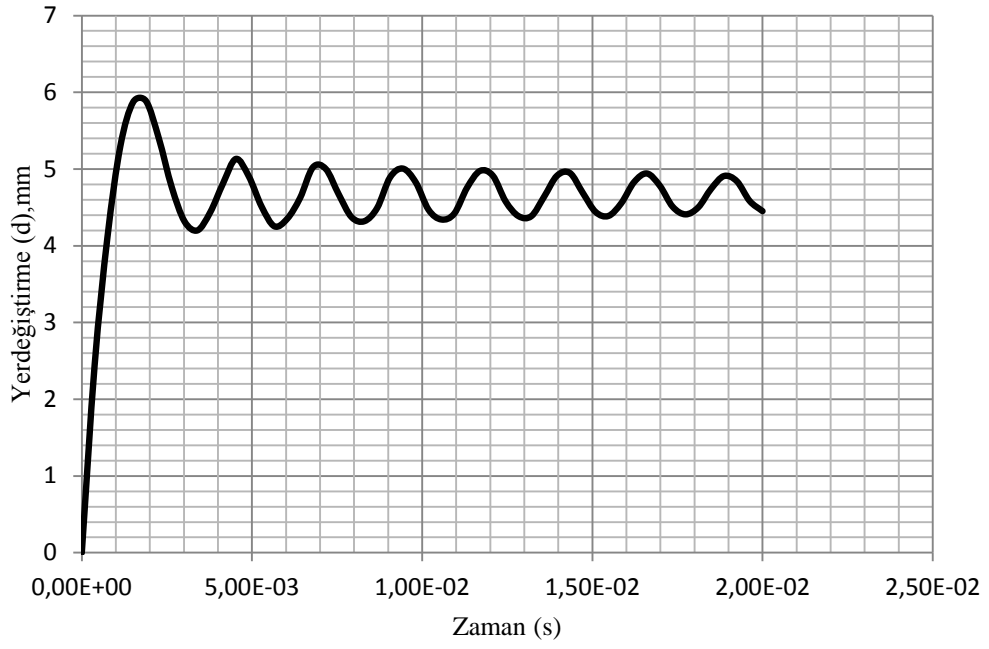


Şekil 3.45.PK1012-3 donatısında oluşan plastik şekil değişiminin zamanla değişimi

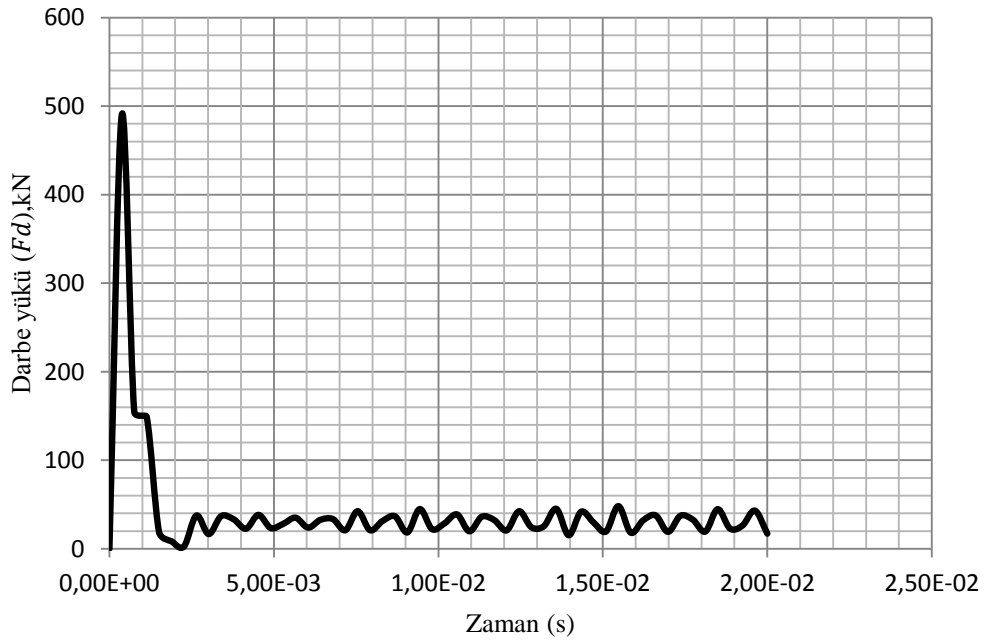
Bu şekillerden görüldüğü gibi mesnetlerine serbestçe oturan plağın ortasında, CDP malzeme modeli dikkate alınarak çözümü yapılan PK81012-1’de olduğu gibi, çekme bölgesindeki donatılarda darbe etkisiyle oluşan plastik şekil değişimi, darbe etkisinden 0.0027 s sonra oluşmuştur. Donatılardaki gerilme ise 504 MPa değerine ulaşmıştır. Mesnetlerine serbestçe oturan plakta (PK1012-1) bu değer 513.8 MPa dır. Bu da aynı boyut ve mesnetlenme koşullarında CDP ve DP malzeme modellerine göre yapılan çözümlemede donatılardaki maksimum gerilmenin fazla değişmediğini göstermektedir.

### 3.1.8. PK1012-4 Betonarme Plağı

PK1012-4 betonarme plağının analizinde (mesnetlerine ankastre bağlı) “Drucker-Prager (DP)” malzeme modeli kullanılmıştır. Darbe yükünün etkisinde betonarme plakta oluşan yer değiştirmenin zamanla değişimi Şekil 3.46’de, darbe kuvvetinin zamanla değişimi Şekil 3.47’de, darbe kuvveti-yer değiştirme ilişkisi ise Şekil 3.48’de verilmiştir.

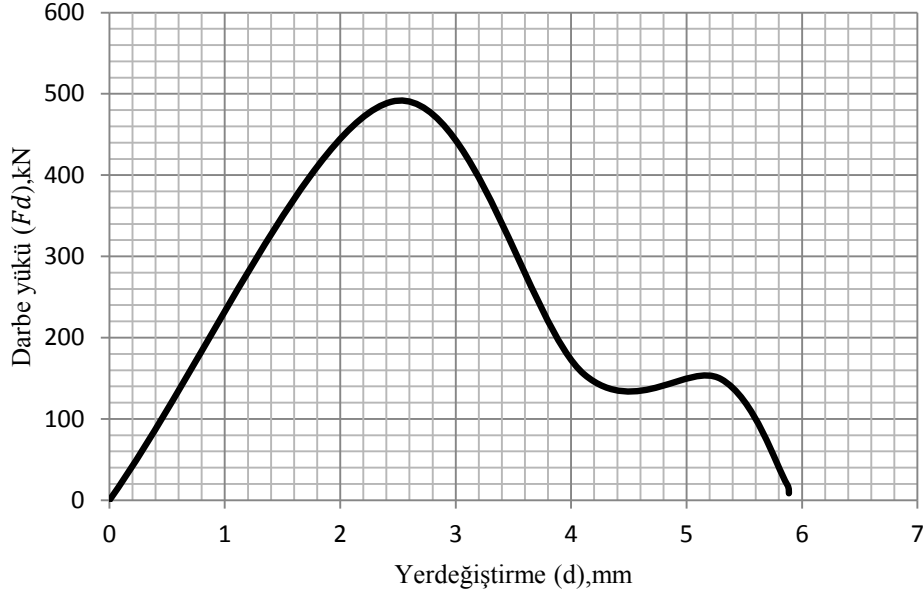


Şekil 3.46.PK1012-4 plağının açıklık ortası yerdeğiştirme-zaman eğrisi



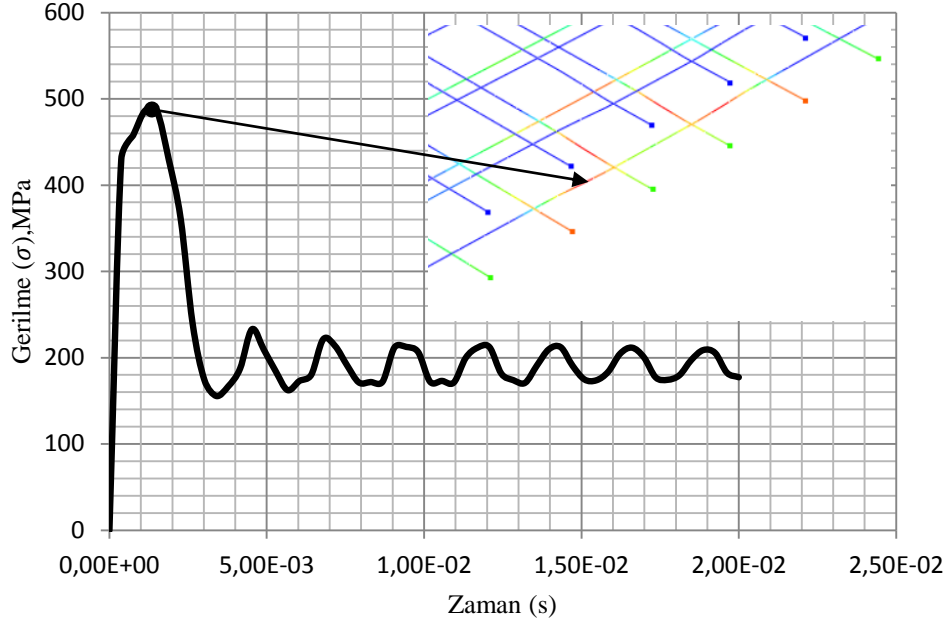
Şekil 3.47.PK1012-4 plağının darbe yükü-zaman eğrisi



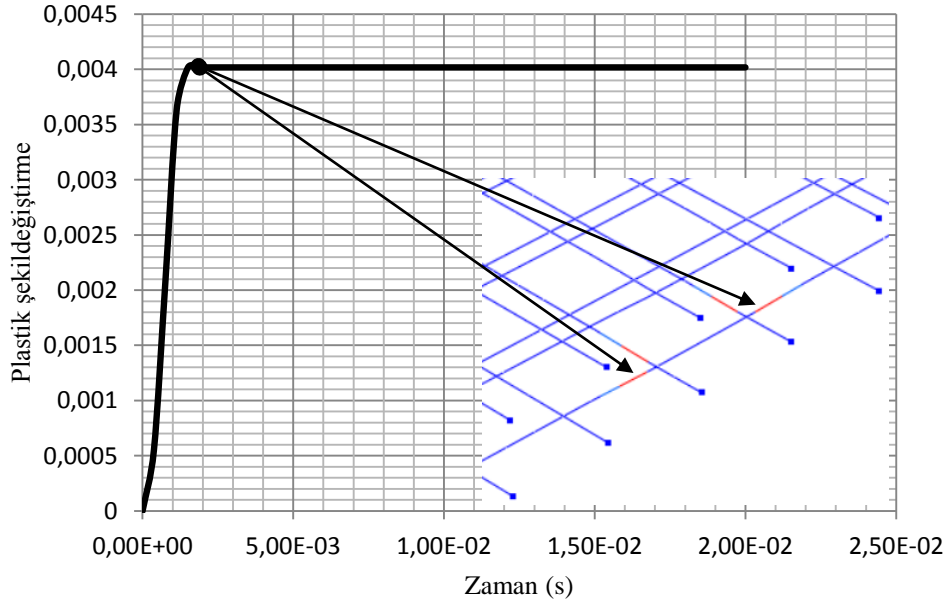


Şekil 3.48.PK1012-4 plağına ait darbe yükü-yerdeğiştirme eğrisi

Bu şekillerden görüldüğü gibi, PK1012-4 betonarme plağının (mesnetlerine ankastre bağlı), açıklık ortası maksimum yerdeğiştirme 6 mm, darbe yükünün maksimum değeri ise 490.2 kN elde edilmiştir. Aynı plağın yalnızca CDP malzeme modeli kullanılması durumunda (PK1012-2), maksimum yerdeğiştirme 19.6 mm, maksimum darbe yükü ise 154.8kN olmuştu. Burada, plağın çözümünde dikkate alınan malzeme modellerinden DP modelinde yerdeğiştirmenin, CDP malzeme modeline göre 3.26 kat daha az, darbe yükünün ise 3.16 kat daha fazla olması, plakların çözümlemesinde PK1012-3'de de belirtildiği gibi dikkate alınan malzeme modellerinden kaynaklanmaktadır. Bu plağın açıklık ortası yerdeğiştirme değeri, darbe etkisinden 0.0015 s sonra 6 mm yerdeğiştirme değerine ulaşmış ve bu değerden sonra yerdeğiştirmenin genliği zamanla azalarak devam etmiştir. (bkz. Şekil 3.46). PK1012-4 plağının betonarme donatısında darbe kuvveti etkisiyle oluşan gerilme ve plastik şekildeğiştirme dağılımları Şekil 3.49 ve Şekil 3.50'de verilmiştir.



Şekil 3.49.PK1012-4 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmeye karşı gelen gerilmenin zamanla değişimi

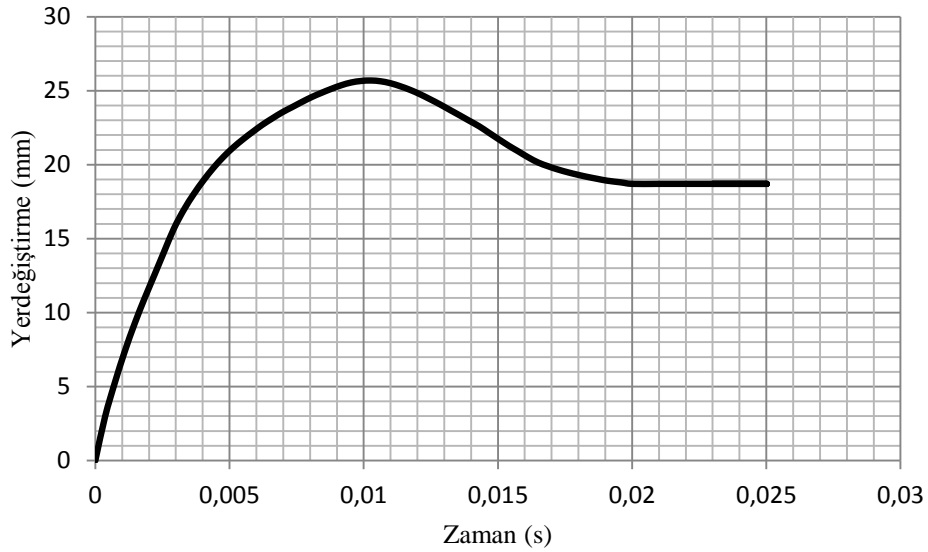


Şekil 3.50.Plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmenin zamanla değişimi

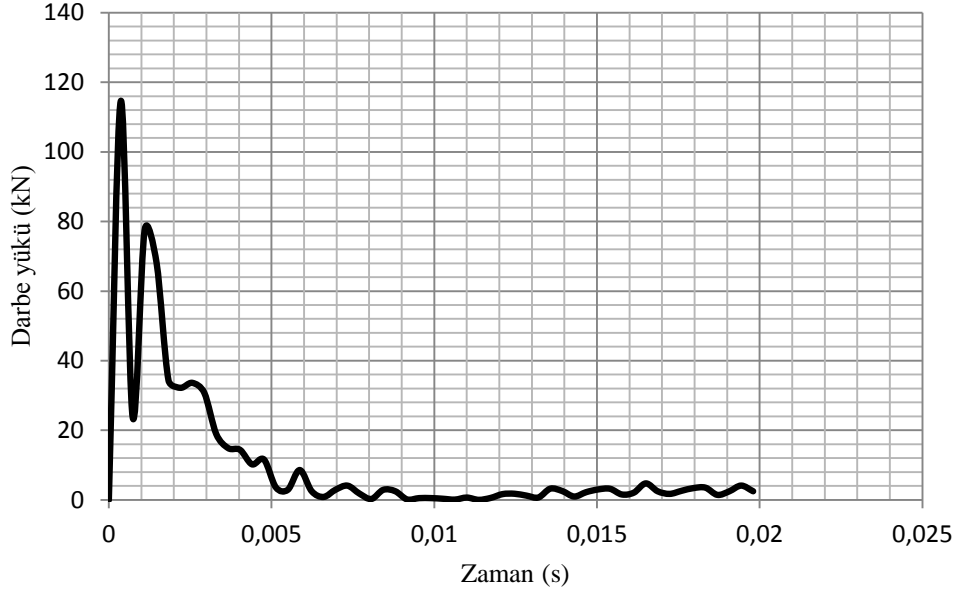
Bu şekillerden görüldüğü gibi mesnetlerine ankastre bağlı plağın ortasında, çekme bölgesindeki donatılarda, darbe etkisiyle oluşan plastik şekildeğiştirme, darbe etkisinden 0.0022 s sonra oluşmuştur. Donatılardaki gerilme ise 487 MPa değerine ulaşmıştır. Mesnetlerine serbestçe oturan plakta (PK1012-2) bu değer 424 MPa dır. Bu da aynı boyut ve mesnetlenme koşullarında CDP ve DP malzeme modellerine göre yapılan çözümlemede donatılardaki maksimum gerilmenin 1.15 kat değiştiğini göstermektedir.

### 3.1.9. PK1020-1 Betonarme Plağı

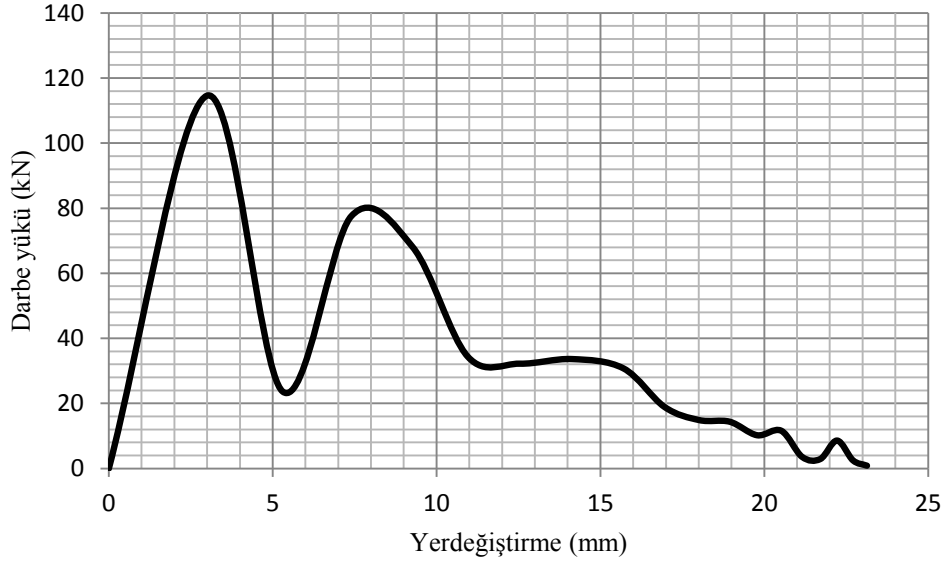
PK1020-1 betonarme plağın analizinde (mesnetlerine serbestçe oturan) “Beton Plastikleşme Hasar Modeli-Concrete Damage Plasticity Model (CDP)” kullanılmıştır. Darbe yükü etkisinde betonarme plakta oluşan yerdeğiştirmenin zamanla değişimi Şekil 3.51’de, darbe kuvvetinin zamanla değişimi Şekil 3.52’de, darbe kuvveti-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3.53’de verilmiştir.



Şekil 3.51. PK1020-1 plağının açıklık ortası yerdeğiştirme-zaman eğrisi



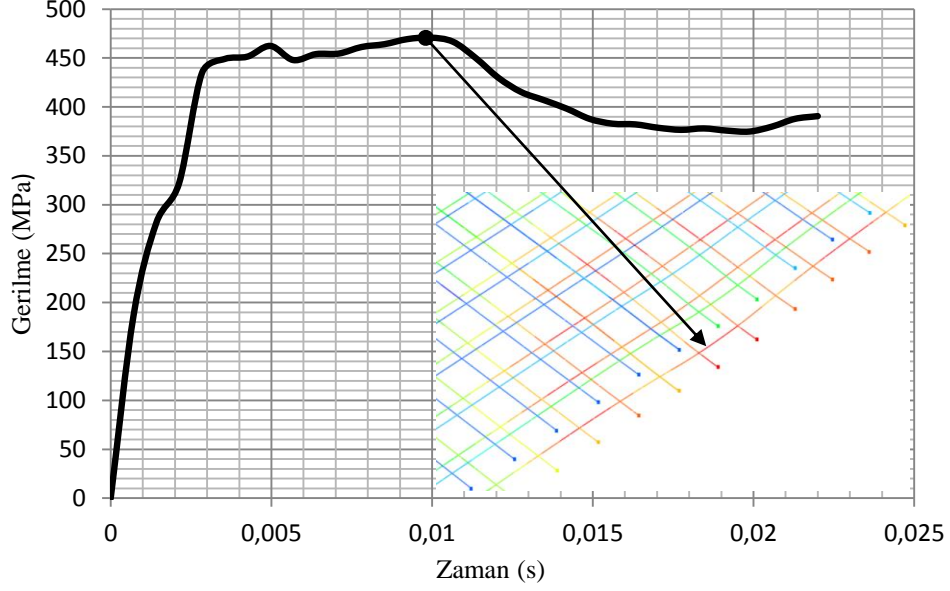
Şekil 3.52.PK1020-1 plağının, darbe kuvvet-zaman eğrisi



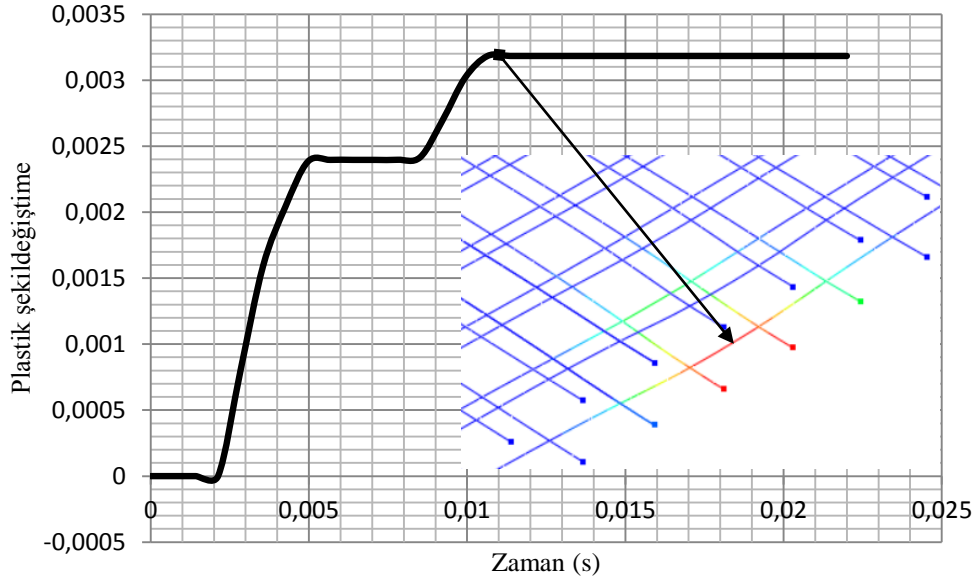
Şekil 3.53.PK1020-1 plağına ait darbe kuvveti-yerdeğiştirme eğrisi

Şekil 3.51 ve Şekil 3.52'den görüldüğü gibi, PK1020-1 betonarme plağının (mesnetlerine serbestçe oturan), açıklık ortası maksimum yerdeğiştirmesi 26 mm, darbe kuvvetinin maksimum değeri ise 114.5 kN olarak elde edilmiştir. Bu plağın açıklık ortası yerdeğiştirme değeri, darbe etkisinden 0.019 s sonra 18 mm yer değiştirme değerine ulaşmış ve bu değerden sonra yerdeğiştirmedeki değişim yok denecek kadar az olmuştur. (bkz. Şekil 3.51).

PK1020-1 plağının betonarme donatısında darbe kuvveti etkisiyle oluşan gerilme ve plastik şekildeğiştirme dağılımları şekil 3.54 ve şekil 3.55’de verilmiştir.

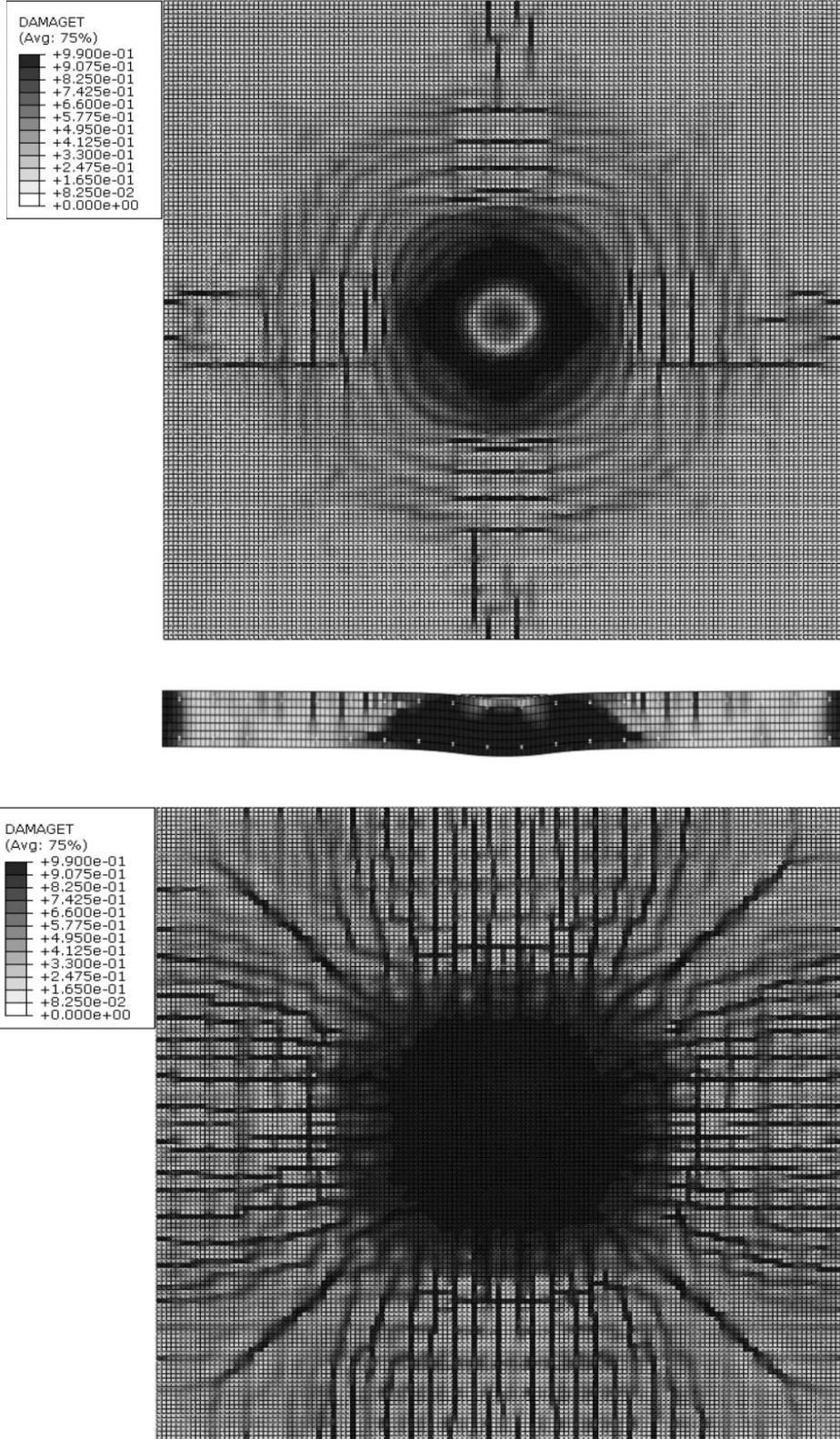


şekil 3.54. PK1020-1 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmeye karşı gelen gerilmenin zamanla değişimi

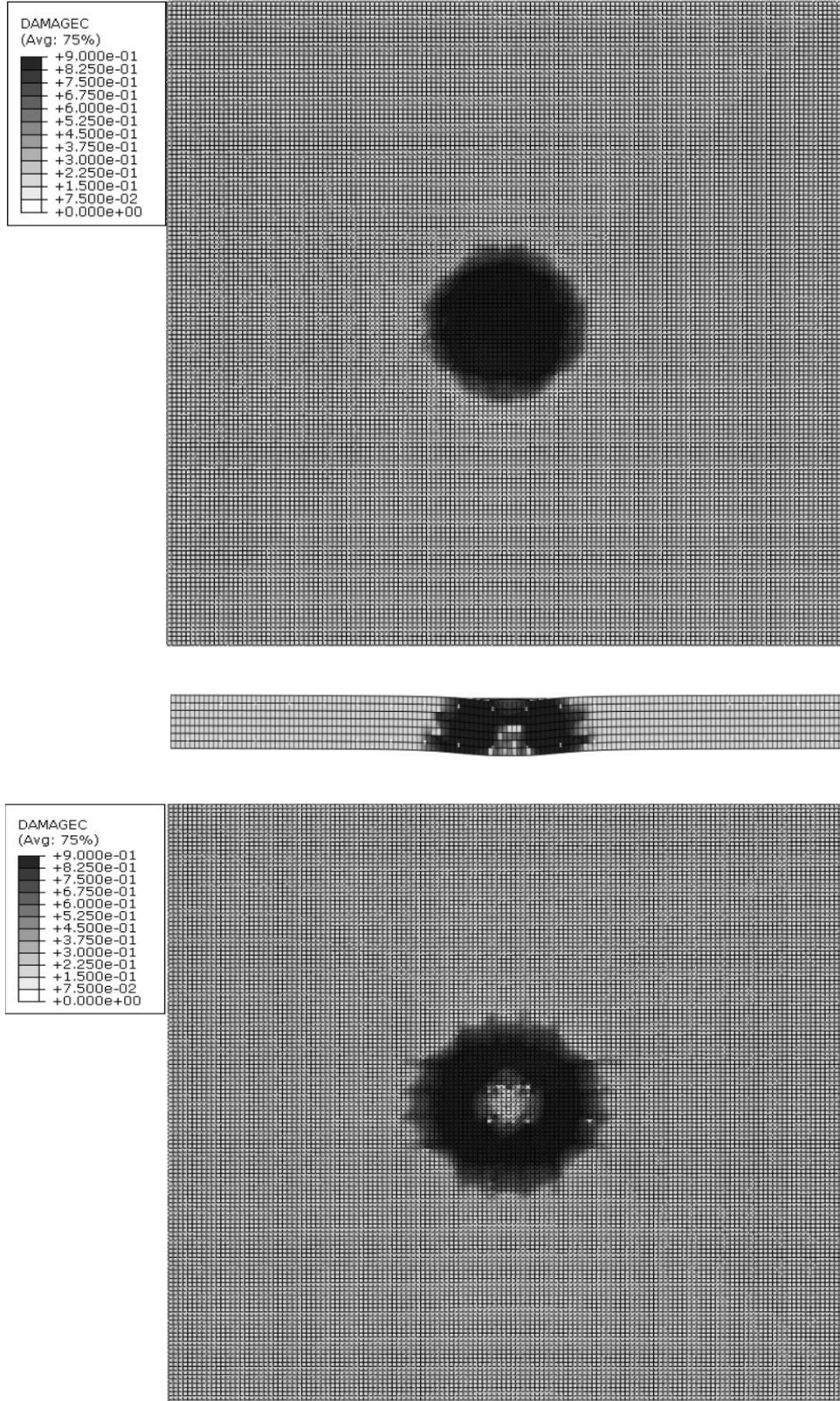


şekil 3.55. PK1020-1 donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmenin zamanla değişimi

Bu şekillerden görüldüğü gibi mesnetlerine serbestçe oturan plağın ortasında, çekme bölgesindeki, donatılarda darbe etkisiyle oluşan plastik şekil değiştirme, darbe etkisinden 0.01 s sonra oluşmuştur. Donatılardaki gerilme ise 470.8 MPa değerine ulaşmıştır. Bu durumda darbe etkisiyle plak ortasındaki çekme donatılarının (plağın altında) plastik bölgeye geçtiği ( $f_{yk}=420$  MPa) görülmüştür. PK1020-1 plağında CDP malzeme modeli dikkate alınarak yapılan darbe analizi sonucunda,  $d_c$  basınç etkisinde rijitlik azalım katsayısını ve  $d_t$  çekme etkisinde rijitlik azalım katsayısını göstermek üzere,  $d_t$ 'nin değişimine bağlı plağın muhtemel hasar durumları Şekil 3.56'de,  $d_c$  değişimine bağlı olarak ise Şekil 3.57'de verilmektedir.



Şekil 3.56. PK1010-1 plağında  $d_t$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu



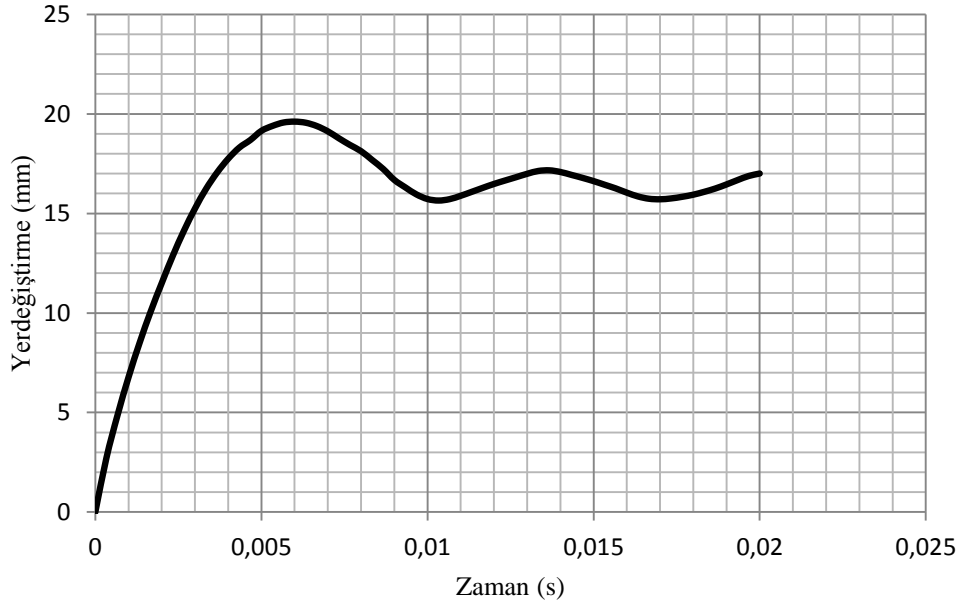
Şekil 3.57. PK1010-1 plağında  $d_c$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu



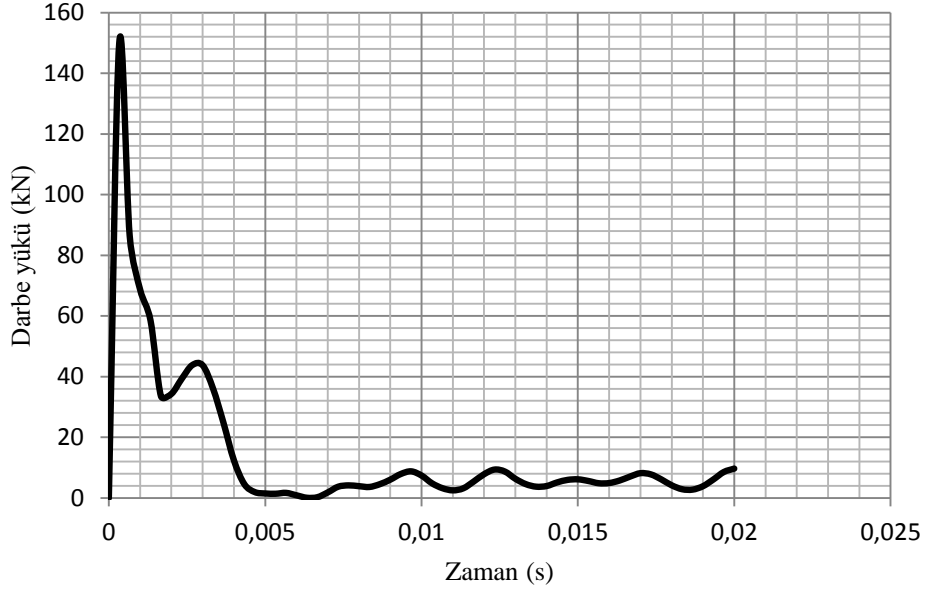
Bu şekillerden, plağın çekme etkisinde rijitliğinin azalması durumu dikkate alındığında plakta oluşan çatlakların ön ve arka yüzde mesnetlere doğru, diğer plaklara göre daha belirgin bir şekilde yayıldığı, basınç etkisindeki rijitliğin azalması durumunda ise plağın alt ve üstünde çarpma bölgesi etrafında hasarın oluştuğu görülmüştür.

### 3.1.10. PK1020-2 Betonarme Plağı

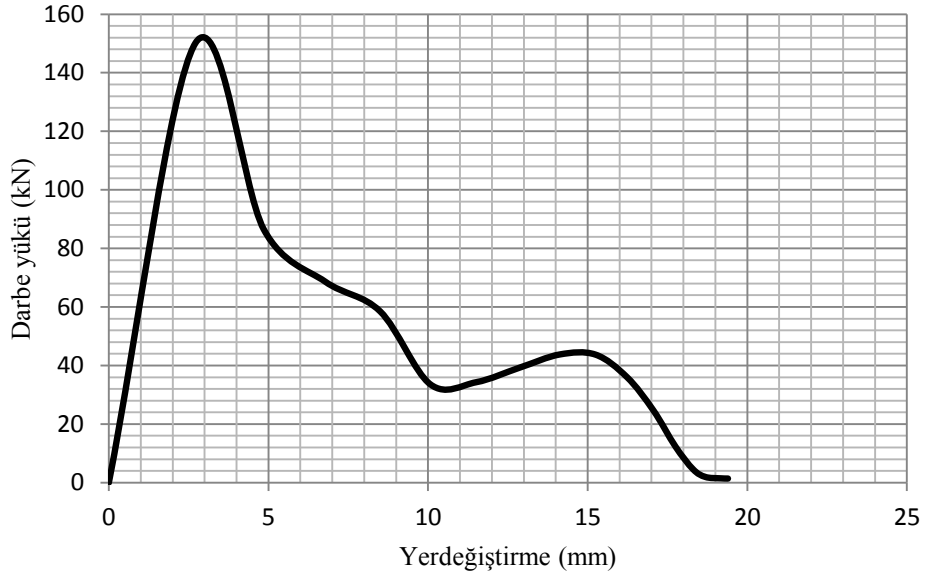
PK1020-2 betonarme plağın analizinde (mesnetlerine ankastre bağlı) “Beton Plastikleşme Hasar Modeli-Concrete Damage Plasticity Model (CDP)” kullanılmıştır. Darbe yükü etkisinde betonarme plakta oluşan yerdeğiştirmenin zamanla değişimi Şekil 3.58’de, darbe kuvvetinin zamanla değişimi Şekil 3.59’de, darbe kuvveti-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3.60’de verilmiştir.



Şekil 3.58. PK1020-2 plağının açıklık ortası yerdeğiştirme-zaman eğrisi



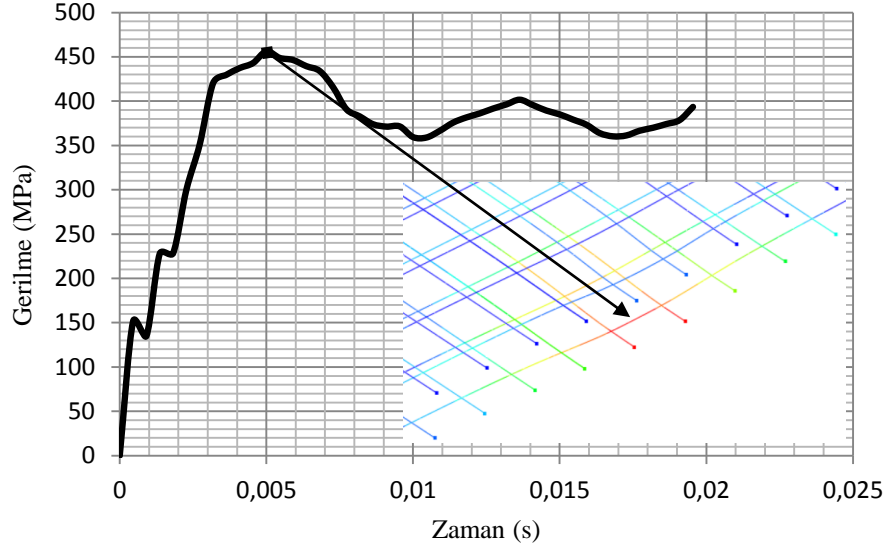
Şekil 3.59. PK1020 plağının darbe yükü-zaman eğrisi



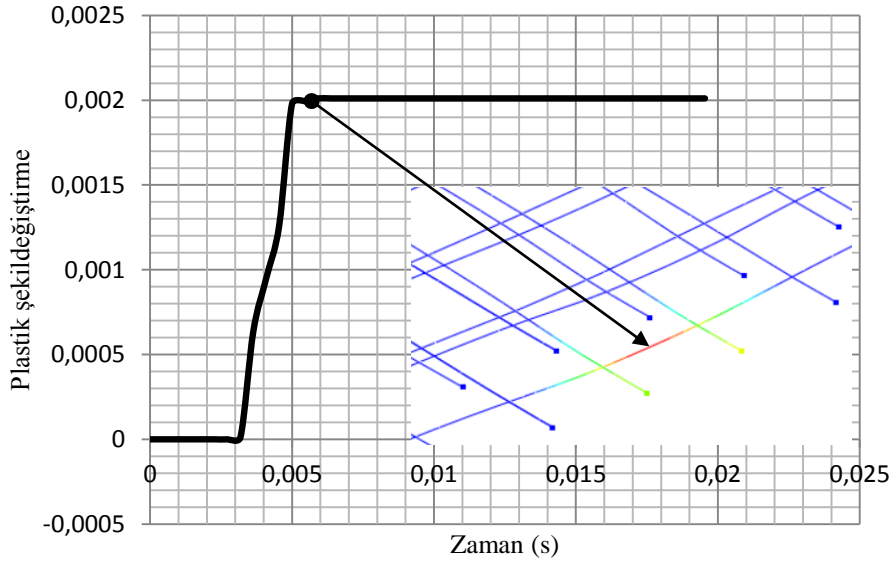
Şekil 3.60. PK1020-2 plağına ait darbe yükü-yerdeğiştirme eğrisi

Şekil 3.58 ve Şekil 3.59'dan görüldüğü gibi, PK1020-2 betonarme plağının (mesnetlerine ankastre bağlı), açıklık ortası maksimum yerdeğiştirmesi 20 mm, darbe yükünün maksimum değeri ise 150 kN elde edilmiştir. PK1020-1 plağında (mesnetlerine serbestçe oturan) maksimum yerdeğiştirme 26 mm, maksimum darbe yükü ise 114.5 kN olmuştur. Buradan, plağın mesnetlenme koşulunun darbe yükü üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Bu plağın açıklık ortası yerdeğiştirme değeri, darbe etkisinden 0.01 s sonra

16 mm yer değiştirme değerine ulaşmış ve bu değerden sonra yerdeğiştirmedeki değişim yok denecek kadar az olmuştur (bkz. Şekil 3.58). PK1020-2 plağının betonarme donatısında darbe kuvveti etkisiyle oluşan gerilme ve plastik Şekildeğiştirme dağılımları Şekil 3.61 ve Şekil 3.62’de verilmiştir.

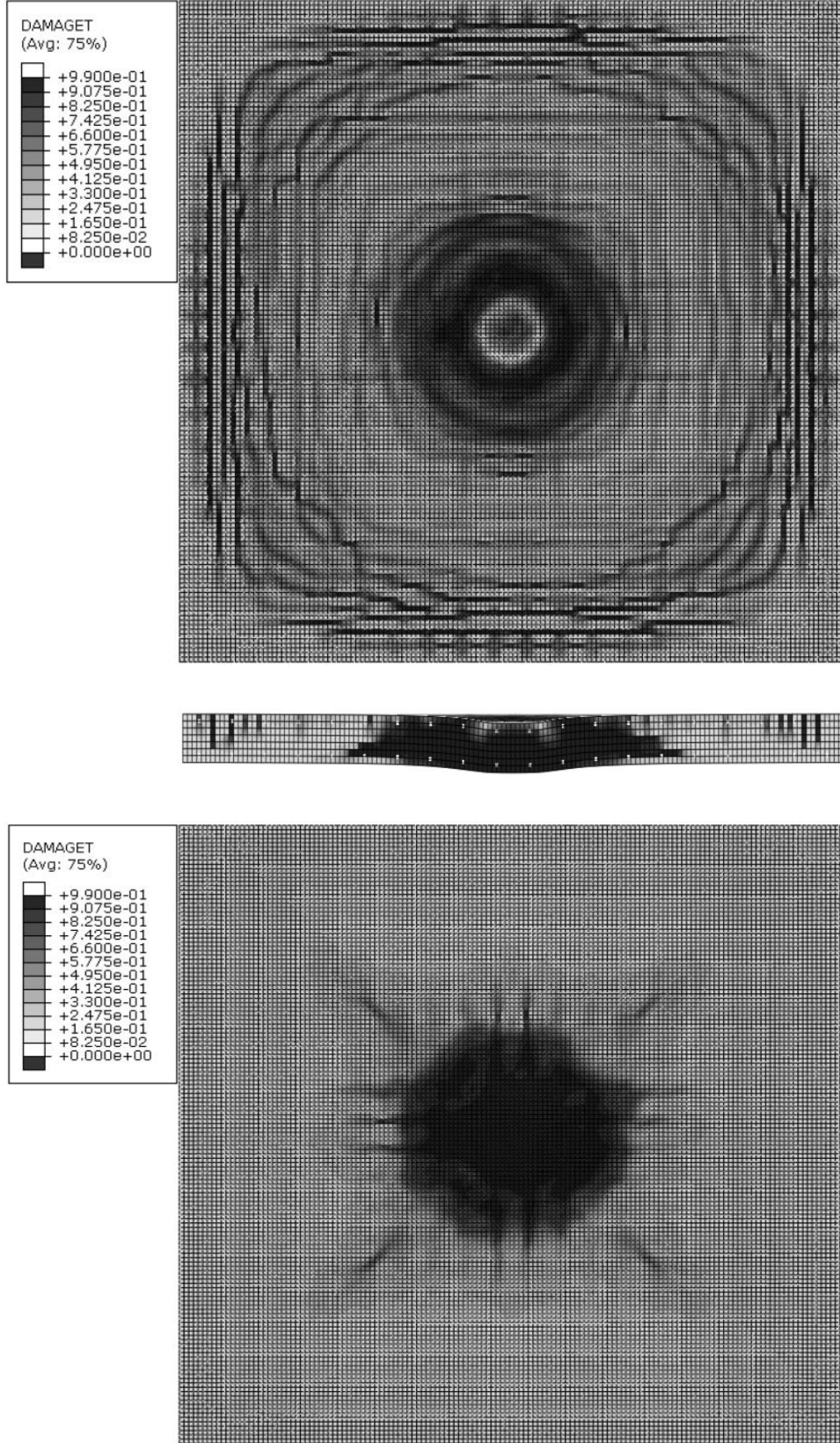


Şekil3.61.PK1020-2 plağının donatısında oluşan plastik Şekildeğiştirmeye karşı gelen gerilmenin zamanla değişimi

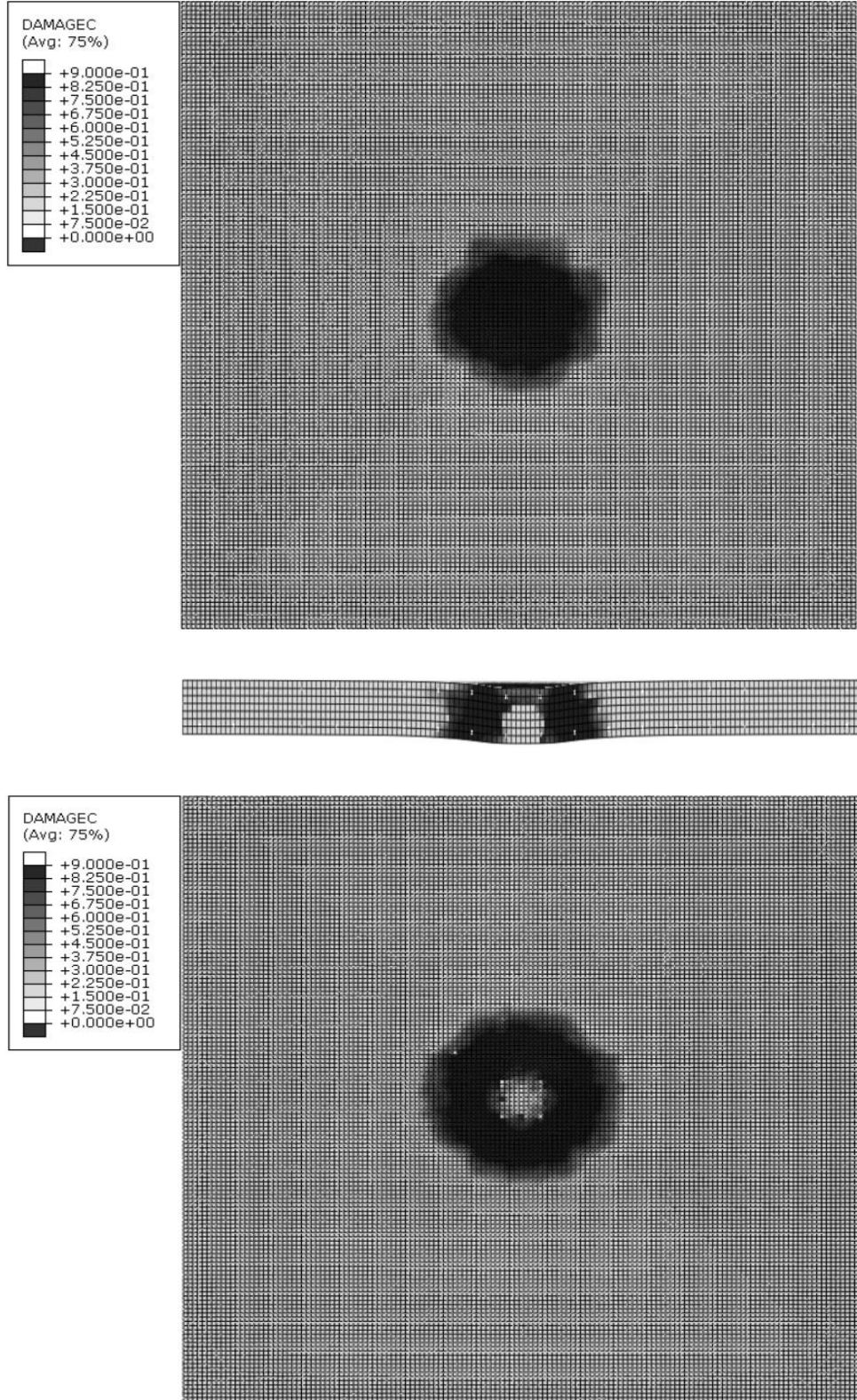


Şekil 3.62. PK1020-2 plağının donatısında oluşan plastik Şekildeğiştirmenin zamanla değişimi

Bu şekillerden görüldüğü gibi ankastre olarak mesnetlenmiş plağın ortasında, PK1020-1’de olduğu gibi çekme bölgesindeki, donatılarda darbe etkisiyle oluşan plastik şekildeğiştirme, darbe etkisinden 0.0045 s sonra oluşmuştur. Donatılardaki gerilme ise 456.2 MPa değerine ulaşmıştır. Mesnetlerine serbestçe oturan plakta (PK1020-1) bu değer 470.8 MPa dır. PK1020-2 plağında CDP malzeme modeli dikkate alınarak yapılan darbe analizi sonucunda,  $d_c$  ve  $d_t$  parametrelerine bağlı olarak plağın kırılma mekanizmaları belirlenmiştir.  $d_t$ ’nin değişimine bağlı plağın muhtemel hasar durumları Şekil 3.63’da,  $d_c$  değişimine bağlı olarak ise Şekil 3.64’de verilmektedir.



Şekil 3.63. PK1010-2 plağında  $d_t$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu

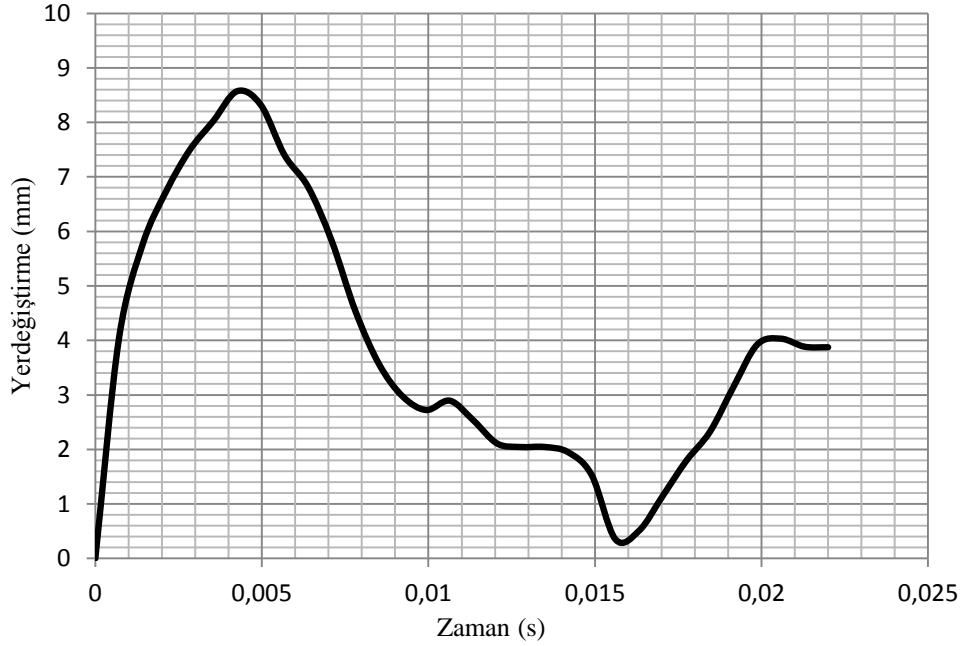


Şekil 3.64. PK1010-2 plağında  $d_c$ 'nin değişimine bağlı hasar durumu

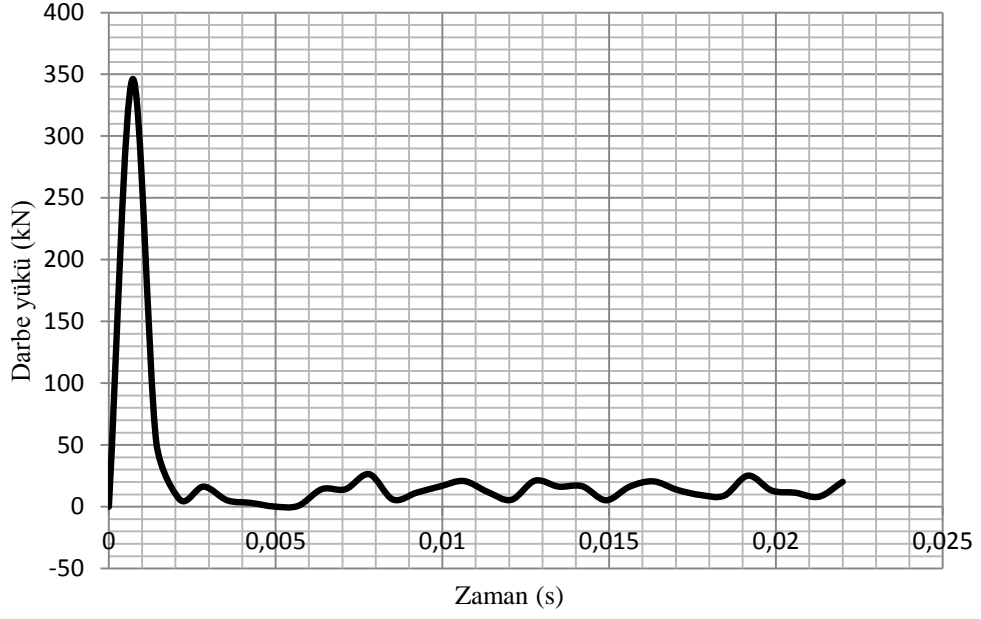
Bu şekillerden, plağın çekme etkisinde rijitliğinin azalması ( $d_t$ ) durumu dikkate alındığında, plağın ön yüzünde oluşan çatlakların mesnet bölgesine yakın, dairesel olarak yoğunlaştığı, arka yüzde ise hem  $d_t$  hem de  $d_c$  (basınç etkisinde rijitliğin azalması), ankastre mesnet etkisiyle darbe yükünün etkilediği çevrede çatlakların dar bir alanda yoğunlaştığı görülmüştür.

### 3.1.11. PK1020-3 Betonarme Plağı

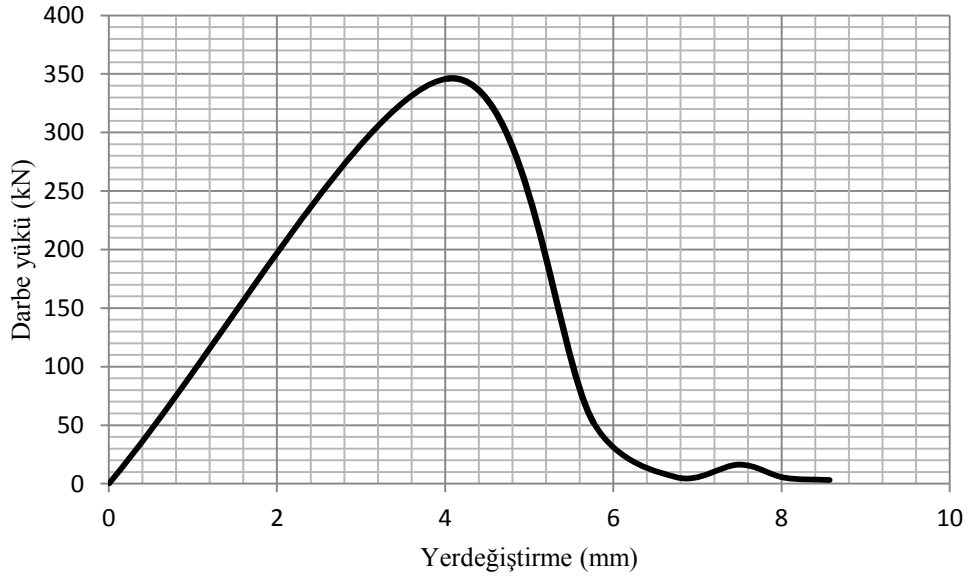
PK1020-3 betonarme plağın analizinde (mesnetlerine serbestçe oturan) “Drucker-Prager (DP)” malzeme modeli kullanılmıştır. Darbe yükü etkisinde betonarme plakta oluşan yerdeğiştirmenin zamanla değişimi Şekil 3.65’de, darbe yükünün zamanla değişimi Şekil 3.66’de, darbe yükü-yerdeğiştirme ilişkisi ise Şekil 3.67’de verilmiştir.



Şekil 3.65.PK1020-3 plağının açıklık ortası yerdeğiştirme-zaman eğrisi



Şekil 3.66. PK1020-3 plağının darbe yükü-zaman eğrisi

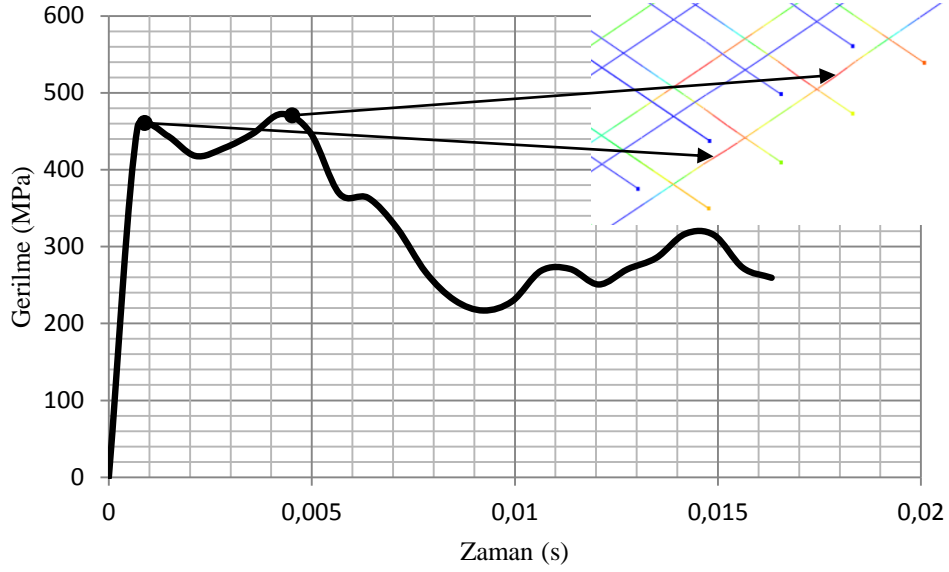


Şekil 3.67 PK1020-3 plağına ait darbe kuvveti-yerdeğiştirme eğrisi

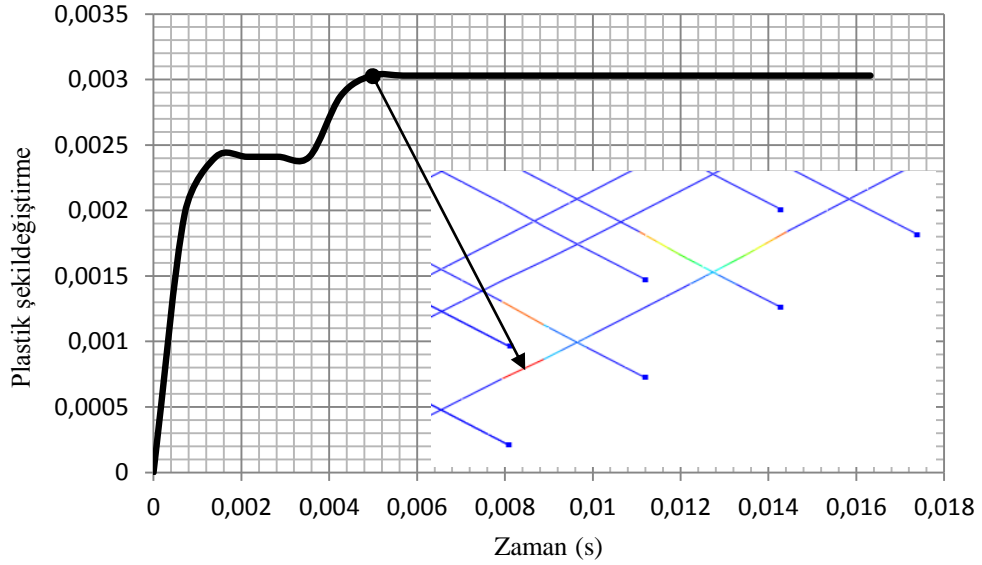
Bu şekillerden görüldüğü gibi, PK1020-3 betonarme plağının (mesnetlerine serbestçe oturan), açıklık ortası maksimum yerdeğiştirmesi 8,5 mm, darbe yükünün maksimum değeri ise 346 kN elde edilmiştir. Aynı plağın yalnızca CDP malzeme modeli kullanılması durumunda (PK1020-1), maksimum yerdeğiştirme 26 mm, maksimum darbe yükü ise 114,5 kN olmuştu. Burada, plağın çözümünde dikkate alınan malzeme modellerinden DP modelinde yerdeğiştirmenin CDP malzeme modeline göre 3 kat daha



düşük, darbe yükünün ise 3 kat daha fazladır. Bu plağın açıklık ortası yerdeğiştirme değeri, darbe etkisinden 0.004 s sonra 8.5 mm yer değiştirme değerine ulaşmış ve bu değerden sonra yerdeğiştirme hızla azalarak devam etmiştir (bkz. Şekil 3.63). PK1020-3 plağının betonarme donatısında darbe kuvveti etkisiyle oluşan gerilme ve plastik şekildeğiştirme dağılımları Şekil 3.68 ve Şekil 3.69’de verilmiştir.



Şekil 3.68. PK1020-3 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmeye karşı gelen gerilmenin zamanla değişimi

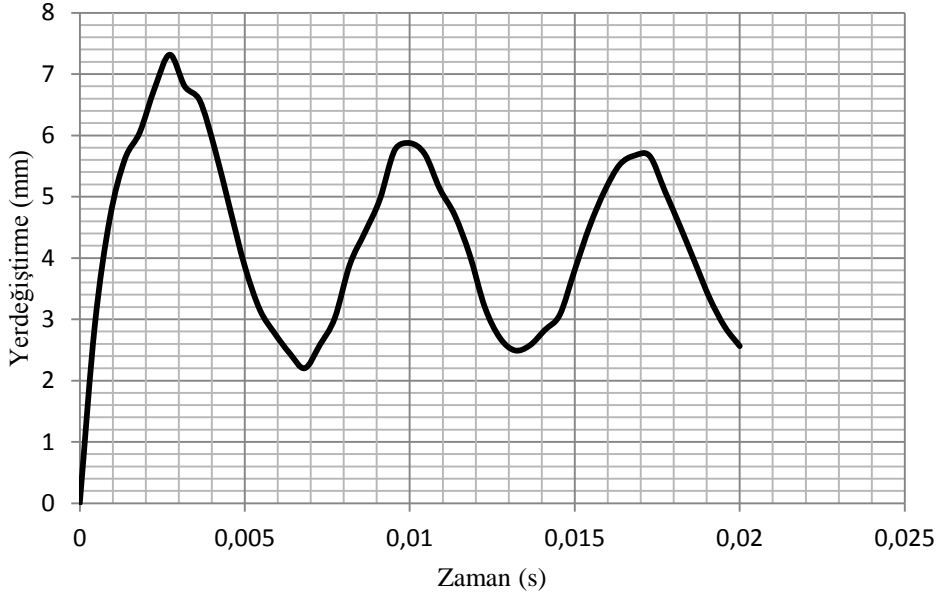


Şekil 3.69. PK1020-3 plağının donatısında oluşan plastik şekildeğiştirmenin zamanla değişimi

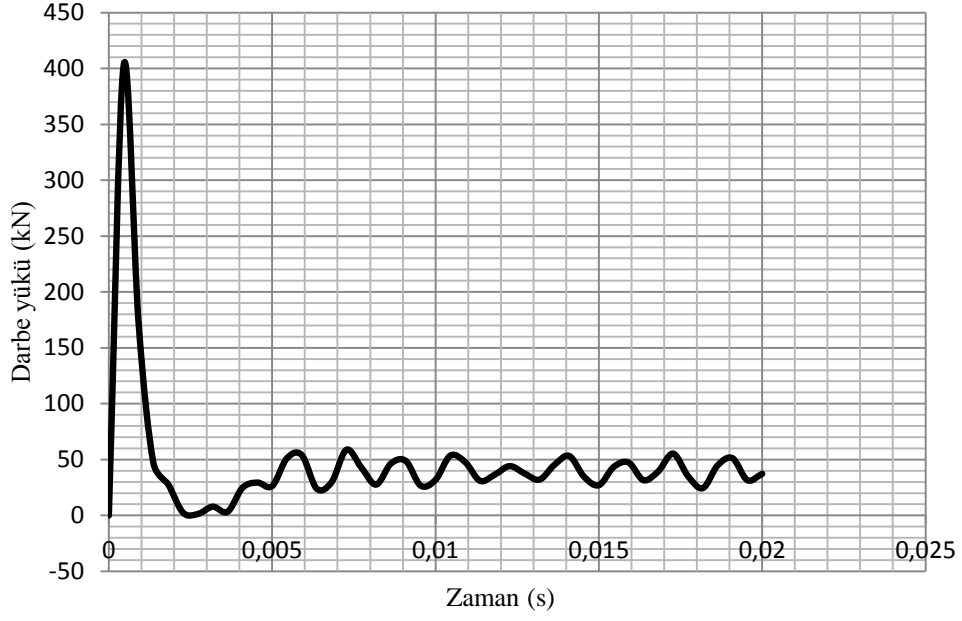
Bu şekillerden görüldüğü gibi mesnetlerine serbestçe oturan plağın ortasında, CDP malzeme modeli dikkate alınarak çözümü yapılan PK1020-1’de olduğu gibi, bu plakta da çekme bölgesindeki donatılarda darbe etkisiyle oluşan plastik şekildeğiştirme, darbe etkisinden 0.0025 s sonra oluşmuştur. Donatılardaki gerilme ise 472.4 MPa değerine ulaşmıştır. Mesnetlerine serbestçe oturan plakta (PK1020-1) bu değer 513.8 MPa dır. Bu da aynı boyut ve mesnetlenme koşullarında CDP ve DP malzeme modellerine göre yapılan çözümlemede donatılardaki maksimum gerilmenin 1.1 kat değiştiğini göstermektedir.

### 3.1.12. PK1020-4 Betonarme Plağı

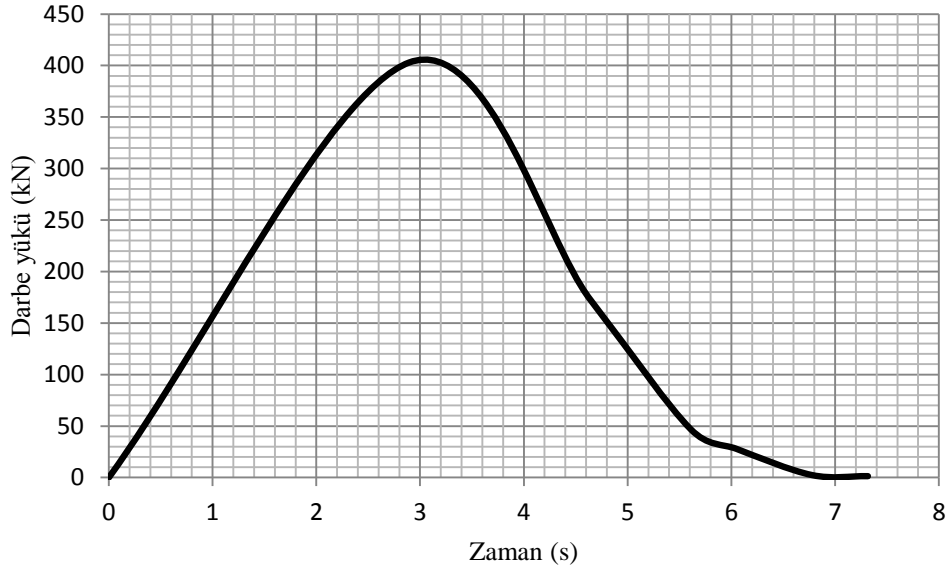
PK1020-4 betonarme plağın analizinde (mesnetlerine ankastre bağlı) “Drucker-Prager (DP)” malzeme modeli kullanılmıştır. Darbe yükü etkisinde betonarme plakta oluşan yerdeğiştirmenin zamanla değişimi Şekil 3.70’de, darbe kuvvetinin zamanla değişimi Şekil 3.71’de, darbe kuvveti-yerdeğiştirme ilişkisi ise Şekil 3.72’de verilmiştir.



Şekil 3.70. PK1020-4 plağının açıklık ortası yer değiştirme-zaman eğrisi



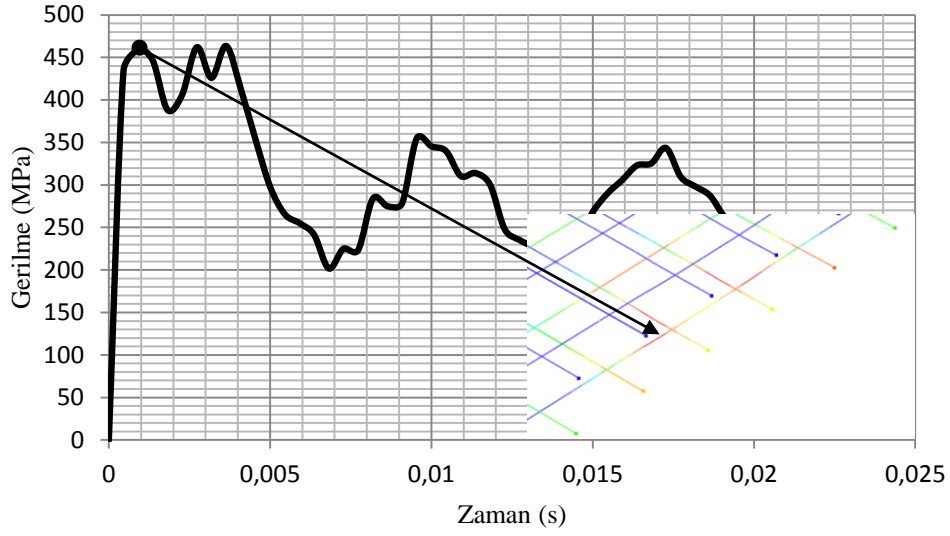
Şekil 3.71. PK1020-4 plağının darbe yükü-zaman eğrisi



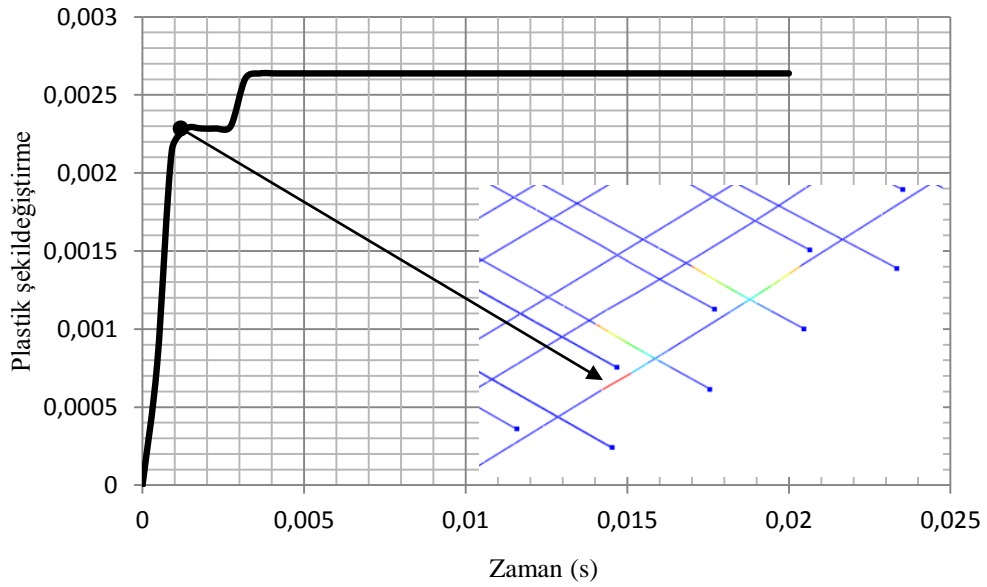
Şekil 3.72. PK1020-4 plağına ait darbe yükü-yerdeğiştirme eğrisi

Bu şekillerden görüldüğü gibi, PK1020-4 betonarme plağının (mesnetlerine ankastre bağlı), açıklık ortası maksimum yerdeğiştirmesi 7.3 mm, darbe yükünün maksimum değeri ise 403 kN elde edilmiştir. Aynı plağın yalnızca CDP malzeme modeli kullanılması durumunda (PK1020-2), maksimum yerdeğiştirme 20 mm, maksimum darbe yükü ise 150 kN olmuştur. Burada, plağın çözümünde dikkate alınan malzeme

modellerinden DP modelinde yerdeğiştirmenin, CDP malzeme modeline göre 2.6kat daha az, darbe yükünün ise 2.7 kat daha fazla olması, plakların çözümlenmesinde PK1020-3’de de belirtildiği gibi dikkate alınan malzeme modellerinden kaynaklanmaktadır. PK1020-4 plağının betonarme donatısında darbe kuvveti etkisiyle oluşan gerilme ve plastik Şekildeğiştirme dağılımları Şekil 3.73 ve Şekil 3.74’de verilmiştir.



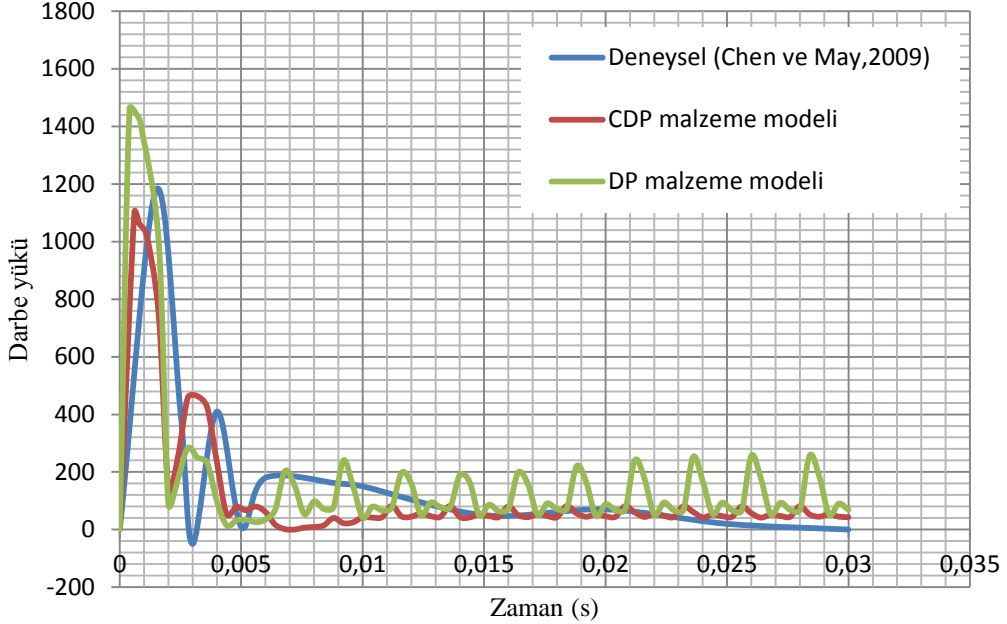
Şekil 3.73. PK1020-4 plağının donatısında oluşan plastik Şekildeğiştirmeye karşı gelen gerilmenin zamanla değişimi



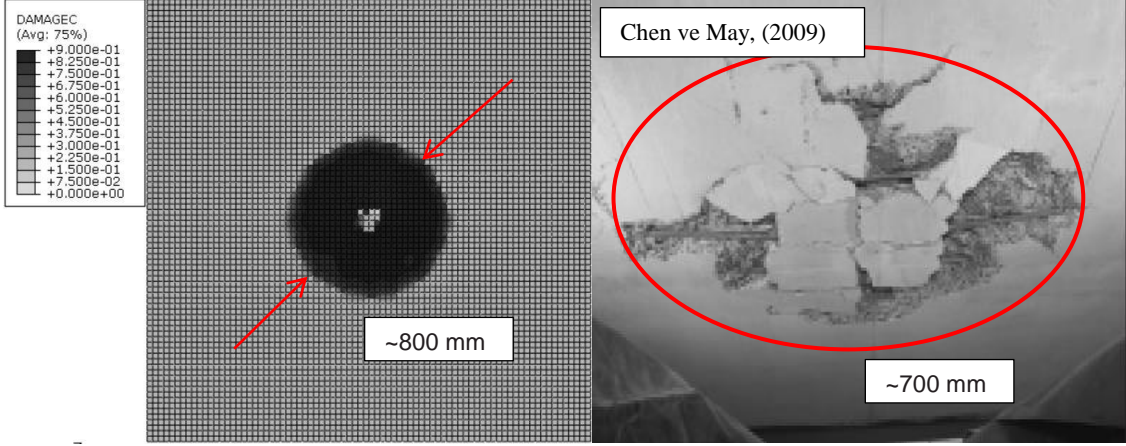
Şekil 3.74. PK1020-4 plağının donatısında oluşan plastik Şekildeğiştirmenin zamanla değişimi

Bu şekillerden görüldüğü gibi mesnetlerine ankastre bağlı plağın ortasında, çekme bölgesindeki donatılarda darbe etkisiyle oluşan plastik şekildeğiştirme, darbe etkisinden 0.001 s sonra oluşmuştur. Donatılardaki gerilme ise 459 MPa değerine ulaşmıştır. Aynı mesnetlenme koşuluna sahip olan plakta (PK1020-2) bu değer 456.2 MPa dır. Bu da aynı boyut ve mesnetlenme koşullarında CDP ve DP malzeme modellerine göre yapılan çözümlemede donatılardaki gerilme düzeyinin çok fazla değişmediğini göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında CDP ve DP malzeme modeli kullanılarak darbe yükü etkisinde analizleri yapılan betonarme plaklardan elde edilen sonuçların malzeme modellerine göre değişiminin değerlendirilmesi amacıyla hangi malzeme modelinin deneysel sonuçlara benzerlik gösterdiği araştırılmıştır. Bu amaçla, Chen ve May (2009), tarafından yapılan deneysel çalışmada kullanılan betonarme plağın CDP ve DP malzeme modeli kullanılarak analizi yapılmıştır. Analiz sonunda CDP ve DP malzeme modeline göre elde edilen darbe yükü-zaman ilişkisi ve darbe yükü etkisinde betonarme plakta kabuklanarak dökülen bölgenin çapı deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır (Şekil3.75 ve Şekil 3.76).



Şekil 3.75. Deneysel (Chen ve May, (2009)) ve sayısal çözümlemeden elde edilen darbe yükü-zaman ilişkisinin karşılaştırılması



Şekil 3.76. Deneysel ( Chen ve May, (2009)) ve sayısal çözümlmeden elde edilen hasar durumları

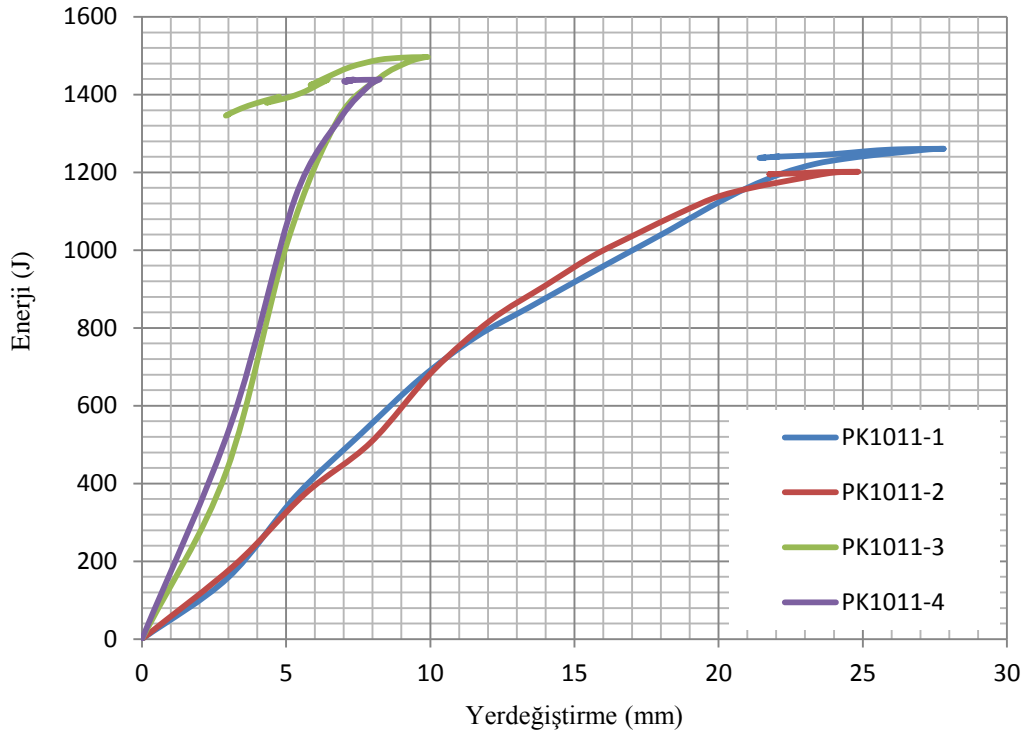
Bu şekillerden görüldüğü gibi, DP malzeme modeli dikkate alınarak yapılan çözümler sonucunda darbe yükü 1461 kN, CDP malzeme modeli dikkate alınarak yapılan çözümlerde ise 1103 kN elde edilmiştir. Chen ve May, (2009) tarafından yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen darbe yükü 1180 kN'dur. Buna göre deneysel darbe yüküne göre DP malzeme modeli dikkate alınarak elde edilen darbe yükü %24 daha büyük, CDP malzeme modeli dikkate alınarak elde edilen darbe yükü ise %7 daha küçüktür. Bu da CDP malzeme modelinde betonun basınç ve çekmede rijitlik azalmasını yansıtan  $d_c$  ve  $d_t$  değişkenlerinin bulunmasından kaynaklanmaktadır. Chen ve May, (2009) yaptıkları çalışmada deney sonrasında plak alt yüzünde betonun kabuklanarak döküldüğü bölgenin çapı yaklaşık 700 mm olarak vermiştir. CDP malzeme ile yapılan çözümlerde ise yaklaşık 800 mm bulunmuştur. Dolayısıyla da yapılan çözümlerden elde edilen hasar biçimi, deneysel çalışmadakiyle benzerlik göstermektedir.

### 3.2. Betonarme Plaklarda Darbe Etkisiyle Oluşan Kırılma Enerjileri

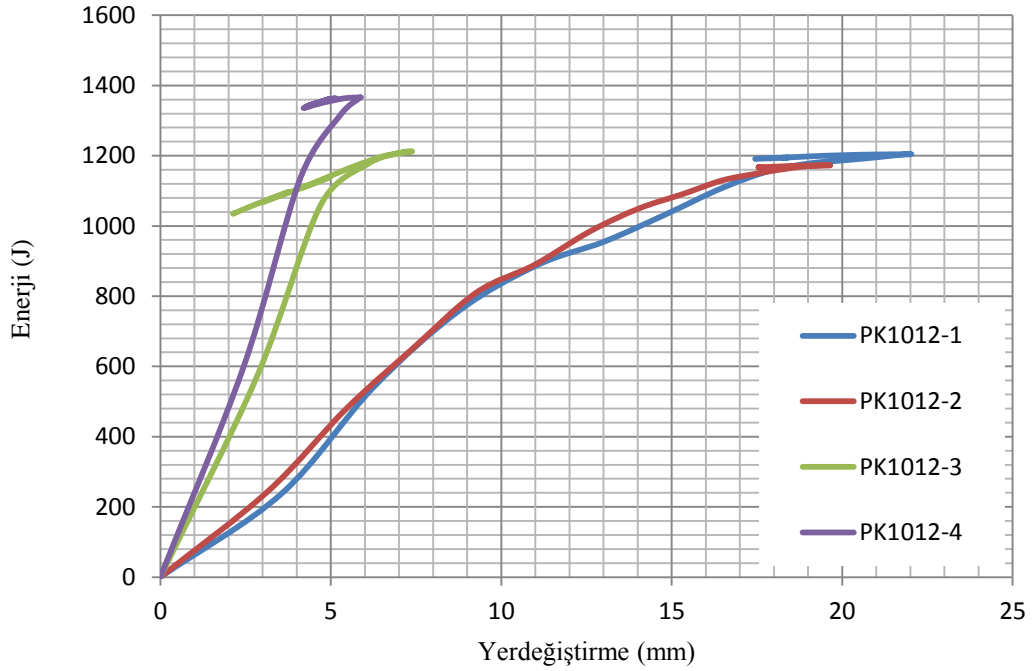
Darbe yüküne maruz betonarme plakların farklı malzeme modeli ve farklı mesnetlenme koşullarında kırılma enerjilerinin değişiminin incelenmesi için darbe yüküne maruz kalan betonarme plakların çözümlerinden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrilerinin altında kalan alan hesaplanmıştır. Bu şekilde elde edilen enerji-yerdeğiştirme diyagramları PK1011 serisi betonarme plaklar için Şekil 3.77'de PK1012 serisi plaklar için Şekil 3.78'de ve PK1020 plakları için ise Şekil 3.79'de verilmiştir.

Bu şekillerden görüldüğü gibi plakların sonlu elemanlar modellerinde dikkate alınan malzeme modellerine göre kırılma enerjileri önemli oranda değişmektedir. İnceleme konusu plaklarda, plak kalınlığının plak açıklığına oranı %9 ve %8 olan plaklarda (PK1011-PK1012) malzeme modeli DP olan ankastre ve serbest mesnetli plaklarda, CDP malzeme modeline göre daha büyük kırılma enerjisi elde edilmiştir. Ancak DP modelinde yerdeğiştirme en fazla 10mm, CDP modelinde ise en fazla 27 mm yerdeğiştirme kapasitesine ulaşılmıştır. Plak kalınlığının plak açıklığına oranı %5 olan PK1020 plaklarında DP malzeme modelinde, plağın ankastre mesnetli olması durumunda kırılma enerjisi diğer malzeme modeli ve mesnetlenme koşullarına göre daha fazla olmuştur. Plak açıklığının yüksekliğine oranının fazla olması durumunda CDP malzeme modeli kullanılarak çözümlenmesi yapılan ankastre mesnetli plakta oluşan kırılma enerjisi DP malzeme modeli kullanılarak çözümlenmesi yapılan serbest mesnetli plağınkine benzerdir. Ancak ankastre mesnetli olması durumunda plak daha fazla yer değıştirme yapmıştır (bkz. Şekil 3.78).

Bu çalışma kapsamında darbe yükü etkisinin farklı malzeme modelleri ve mesnet koşulları dikkate alınarak yapılan çözümlmelerinden elde edilen maksimum darbe yükü, maksimum yerdeğiştirme, çekme bölgesindeki donatılarda oluşan maksimum gerilme ve kırılma enerjileri Tablo 3.1’de verilmiştir.

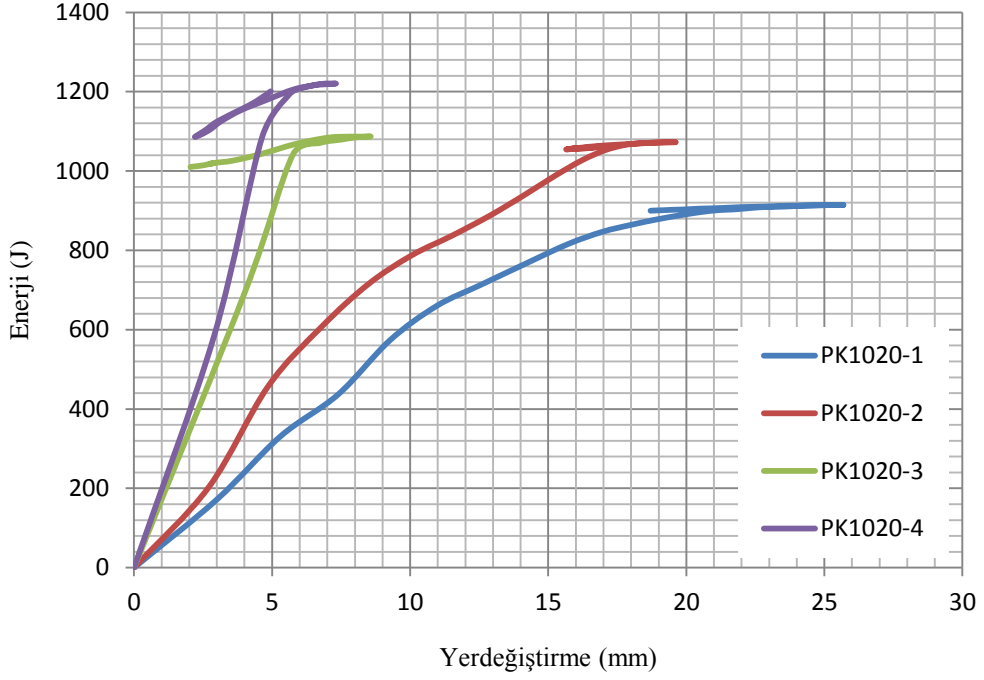


Şekil 3.77. PK1011 serisi plaklara ait kırılma enerjisi-yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 3.78. PK1012 serisi plaklara ait kırılma enerjisi-yerdeğiştirme eğrileri





Şekil 3.79. PK1020 serisi plaklara ait kırılma enerjisi-yerdeğiştirme eğrileri

Tablo3.1'den görüldüğü gibi CDP ve DP malzeme modeli dikkate alınarak yapılan analizler sonucunda betonarme plakların maksimum darbe yükleri mesnet koşullarına bağlı olarak değişmiştir. Ankastre mesnetli betonarme plakların analizinde CDP malzeme modeli kullanılması durumunda elde edilen maksimum darbe yükü, mesnetlerine serbestçe oturan plaklarınkine göre, PK1011 serisi plaklarda %12, PK1012 serisi plaklarda %16 ve PK1020 serisi plaklarda %31 daha büyük olmuştur. Buradan, bu malzeme modeli için, plak boyutu arttıkça mesnet koşulu nedeniyle oluşan farkın büyüdüğü görülmektedir. Ankastre mesnetli betonarme plakların analizinde DP malzeme modeli kullanılması durumunda ise, elde edilen maksimum darbe yükü, mesnetlerine serbestçe oturan plaklarınkine göre, PK1011 serisi plaklarda %22, PK1012 serisi plaklarda %21 ve PK1020 serisi plaklarda %16 daha büyük olmuştur. Buradan, bu malzeme modeli için, plak boyutu arttıkça mesnet koşulu nedeniyle oluşan farkın azaldığı görülmektedir. CDP malzeme modeliyle yapılan çözümlemede betonun basınç ve çekme gerilmeleri altında rijitlik azalım değişkenlerinin ( $d_c$ ,  $d_t$ ) kullanılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Tablo 3.1. ve şekillerden görüldüğü gibi,

Tablo 3.1 Darbe yükü analizlerinden elde edilen sonuçlar

Plak adı	Boyut (mm)	Mesnet durumu	Malzeme modeli	Donatı (alt-üst)	Maks. darbe yükü (kN)	Maksimum yerdeğiştirme (mm)	Maks. gerilme (donatı) MPa	Toplam kırılma enerjisi (J)
PK1011-1	1100x1100x100	Serbest oturma	CDP	Ø8/100-Ø8/100	105.8	27	514	1260.7
PK1011-2		Ankastre	CDP		118.6	25	461	1201.7
PK1011-3		Serbest oturma	DP		294.1	10	519	1496.6
PK1011-4		Ankastre	DP		358.7	8.2	506	1439.2
PK1012-1	1200x1200x100	Serbest oturma	CDP	Ø8/100-Ø8/100	133.7	22	513.8	1204.4
PK1012-2		Ankastre	CDP		154.8	19.6	424	1172.7
PK1012-3		Serbest oturma	DP		403	7.3	504	1212
PK1012-4		Ankastre	DP		490.2	5.8	487	1366.25
PK1020-1	2000x2000x100	Serbest oturma	CDP	Ø8/100-Ø8/100	114.5	26	470.8	914.5
PK1020-2		Ankastre	CDP		150	20	456.2	1072.6
PK1020-3		Serbest oturma	DP		346	8.5	472.4	1087.1
PK1020-4		Ankastre	DP		403	7.3	459	1220.47

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, bir cismin çarpmasıyla oluşan darbe yükünün betonarme plaklara etkisi analitik olarak incelenmiştir. Bu incelemede 1100x1100x100 mm, 1200x1200x100 mm ve 2000x2000x100 mm boyutlarında üç farklı betonarme plak kullanılmıştır. Bu plaklarda ankastre ve serbest mesnet olmak üzere iki farklı mesnet koşulu dikkate alınmıştır. Farklı mesnet koşullarındaki betonarme plaklarda, beton için biri “Drucker-Prager (DP)” diğeri ise “Betonun Plastikleşme Hasar Modeli (Concrete Damage Plasticity Model-CDP)” olmak üzere iki farklı malzeme modeli, betonarme çeliği için ise “Genel Metal Plastisite Modeli (Classical Metal Plasticity Model-CMP)” kullanılmıştır. Her bir mesnet koşulu dikkate alınarak iki farklı malzeme modeliyle yapılan analizler sonucunda, plaklarda darbe yükleri, yerdeğiştirme, enerji yutma kapasiteleri ve hasar durumları elde edilmiş ve bir birleriyle karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmadan çıkartılabilecek başlıca sonuç ve öneriler aşağıda özetlenmektedir;

1-Yapılan çalışmalardan plağın mesnetlerine serbestçe oturması (serbest mesnet) durumunda hem CDP malzeme modeli hem de DP malzeme modellerinde en düşük darbe yükü elde edilmiştir.

2- Plakların darbe yükü etkisinde, CDP ve DP malzeme modelleri dikkate alınarak yapılan çözümlemede her iki mesnet koşulu için de plak boyutunun (PK1011’e göre) 1.1 kat artmasıyla darbe yükünün de arttığı ancak plak boyutunun (PK1012’e göre) 1.7 kat artması durumunda ise darbe yükünde azalma olmuştur. Bu da plak boyutunun artmasıyla mesnet etkisinin azaldığını göstermektedir.

3- Plakların çözümlemesinden DP malzeme modeli dikkate alınarak hesaplanan enerji yutma kapasiteleri, CDP malzeme modeliyle elde edilen enerji yutma kapasitesinden daha büyük olmuştur.

4-Darbe yükü analizlerinde CDP malzeme modeli betonun davranışını, betonun rijitliğinin azalmasını yansıtan basınç ve çekme değişkenleri nedeniyle, DP malzeme modeline göre daha iyi temsil ettiği görülmüştür.

5-Drucker-Prager (DP), malzeme modelinden darbe yükü, yerdeğiştirme ve kırılma enerjileri elde edilmekte plak hasar mekanizması ise elde edilememektedir. CDP malzeme modelinde ise plakta darbe etkisiyle oluşan hasar durumları deneysel çalışmalara yaklaşık olarak elde edilebilmektedir.

6-Bu çalışma kapsamında dikkate alınan betonarme plaklardan elde edilen sonuçlara göre, darbe yükü etkisiyle betonarme plaklarda oluşabilecek hasarların, DP malzeme modeli yerine CDP malzeme modeli kullanılarak belirlenmesi daha uygun olmaktadır.

7-Betonarme plakların darbe yükü etkisindeki davranışlarının, farklı malzeme modelleri dikkate alınarak, teorik olarak incelemesi yanında bunların farklı mesnet koşulları da dikkate alınarak deneysel olarak doğrulanmalıdır.

8-CDP ve DP malzeme modellerinin darbe etkisinde betonarme plakların davranışlarındaki etkinliği, farklı boyut ve donatı oranında üretilecek betonarme plaklar üzerinde, farklı darbe yükleri altında deneylerle belirlenebilir.

Bu çalışma kapsamında, bir cismin çarpması sonucu oluşan darbe yükünün betonarme plaklar üzerindeki etkisi, CDP ve DP malzeme modelleri kullanılarak teorik olarak araştırılmıştır. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar, bu çalışmada verilen betonarme plaklar için geçerlidir. Bu sonuçların genellenebilmesi için çok sayıda farklı boyutlardaki plaklar üzerinde teorik ve deneysel çalışmaların yapılması gerekmektedir.

## 5.KAYNAKLAR

- Abaqus/CAE v6.12 Programme, Dassault Systemes Simulia Corp. Providence, RI, USA.
- Abbas, H., Gupta, N. K. ve Alam, M., 2004. Nonlinear response of concrete beams and plates under impact loading, International Journal of Impact Engineering, 30, 1039-1053.
- Agardh, L. ve Laine, L., 1999. 3D FE-simulation of high-velocity fragment perforation of reinforced concrete slabs, International Journal of Impact Engineering, 22, 911-922.
- Ammann, H. and Nussbaumer, H., 1995. Behavior of concrete and steel under dynamic actions' in Vibrations problems in structures practical guide, 177-183.
- Banthia, P. N., 1987. Impact Resistance of Concrete, Doctor of Philosophy Thesis, The University of British Columbia, Canada.
- Batarlar, B., 2013. Behavior of reinforced concrete slabs subjected to impact loads, Masters of Science Thesis, İzmir Institute of Technology, İzmir.
- Chen, Y. ve May, I. M., 2009. Reinforced concrete members under drop-weight impacts. Proceedings of the ICE - Structures and Buildings, 162, 45-56.
- C.E.B., 1988. Comité Euro-International du Béton, Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading. Bulletin D'Information, 187.
- Daudeville, L. ve Malécot, Y., 2011. Concrete structures under impact. European Journal of Environmental and Civil Engineering. 15, 101-140.
- Eibl J., 1987. Soft and Hard Impact. Concrete for Hazard Protection. Concrete Society, Edinburgh, UK, 175-186.
- Fathy, A. M., Sanz, B., Sancho, J. M., Planas, J., Basha, A., Superior, E. P. ve Montepincipe, C. D., 2008. Determination of the bilinear stress-crack opening curve for normal- and high-strength concrete.
- Hibbitt, H., Karlsson, B. ve Sorensen P., 2011. Abaqus Analysis Users Manual Version 6.11 Dassault Systèmes Simulia Corp. Providence, RI, USA.
- Kamali, A. Z., 2012. Shear Strength of Reinforced Concrete Beams subjected to Blast Loading, Masters of Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, 2012.
- Kennedy, R. P., 1976. A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects. Nuclear Engineering and Design, 37, 183-203.

- Kmiecik, P. ve Kaminski, M., 2011. Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration, 25, 50-307.
- Kœchlin, P. ve Potapov, S., 2009. Classification of soft and hard impacts-Application to aircraft crash. Nuclear Engineering and Design, 239, 613-618.
- Kupfer, H., Hilsdorf, H. K. ve Rusch, H., 1969. Behavior of concrete underbiaxial stresses, ACI Journal, 66,8.
- Lee, J. ve Fenves , G., 1998. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structure. Engineering Mechanics, 124, 892-900.
- Li, Q. M., Reid, S. R., Wen, H. M. ve Telford, A. R., 2005. Local impact effects of hard missiles on concrete targets. International Journal of Impact Engineering, 32, 224-284.
- Lublinear, J., Oliver, J., Oller, S. ve Onate, E., 1989. A plastic-damage model for concrete, Solids and Structures., 25, 299-326.
- Malm, R., 2006. Shear Cracks in Concrete Structures Subjected to in-plane stresses, Licentiate thesis, Royal Institute of Technology, Division of Structural Design and Bridges, Stockholm, Sweden.
- Malm, R., 2009. Predicting Shear Type Cracks Initiation and Growth in Concrete with Nonlinear Finite Elements Methods, PhD thesis, Royal Institute of Technology, Division of Structural Design and Bridges, Stockholm, Sweden.
- Malvar, L.J. ve Crawford, J.E., 1998. Dynamic increase factors for concrete, Department of Defence Explosives Safety Seminar (DDESB), Orlando FL, USA.
- Malvar, L.J. ve Crawford, J.E., 1998. Dynamic increase factors for steel reinforcing bars, Department of Defence Explosives Safety Seminar (DDESB), Orlando FL, USA.
- Martin, O., 2010. Comparison of different Constitutive Models for Concrete in ABAQUS-Explicit for Missile Impact Analyses.
- Martin, O., Centro, V. ve Schwoertzig T., 2011. Numerical Analyses on the Missile Impact Tests performed at VTT within the Benchmark Project IRIS.
- Mokhatar, S. N. ve Abdullah, R. (2012). Computational Analysis of Reinforced Concrete Slabs Subjected to Impact Loads, 4, 70-76.
- Murtiadi, S., 1990. Behaviour of High-Strength Concrete Plate Under Impact Loads, Master of Science Thesis, Memorial University of Newfoundland, Canada.

- Ngo T., Mendis, P., Gupta, A. ve Ramsay, J., 2007. Blast Loading and Blast Effects on Structures, Journal of Structural Engineering, Australia, 76-91.
- Pankaj P., Real Structural Behavior and Its Analysis - Material Nonlinearity, Lecture Note. [http:// www.see.ed.ac.uk/pankaj/real\\_structural](http://www.see.ed.ac.uk/pankaj/real_structural). 22 Kasım 2012.
- Saatcı, S., 2007. Behaviour and modelling of Reinforced Concrete Structures Subjected to Impact Loads, Doctor of Philosophy Thesis, University of Toronto, Canada.
- Sawamoto, Y., Tsubota, H., Kasai, Y. ve Koshika, N., 1998. Analytical studies on local damage to reinforced concrete structures under impact loading by discrete element method, Nuclear Engineering and Design, 179, 157-177.
- Schellenberg, K., Volkwein, A., Roth A. ve Vogel, T., 2008. Large-scale impact tests on rock fall galleries, 43, 302-303.
- Takeda, J. ve Tachikawa, H., 1971. Deformation and fracture of concrete subjected to dynamic load. Conference of Mechanical Behaviour of Materials, 479-486.
- Trivedi, N. ve Singh, R. K., 2013. Prediction of impact induced failure modes in reinforced concrete slabs through nonlinear transient dynamic finite element simulation. Annals of Nuclear Energy, 56, 109-121.
- TS500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, T.S.E., Ankara, I. Baskı.
- TS708, 2010. Çelik-Betonarme için-Donato Çeliği, T.S.E., Ankara, I. Baskı.
- Zielinski, A. J., 1984. Concrete Structures under Impact Loading Rate Effects Netherlands, Report 5-84-14, TH Delft, 84, 408-747.
- Zineddin, M. ve Krauthammer, T., 2007. Dynamic response and behavior of reinforced concrete slabs under impact loading. International Journal of Impact Engineering, 34,9,1517-1534.

## ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Erzincan'da doğdu. Lise eğitimini Erzincan Milli Piyango Anadolu Lisesin'de tamamladı. 2007 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne giriş hakkı kazandı. Lisans mezuniyetinin ardından Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalın 'da yüksek lisans eğitimine başladı. 2013 yılı Şubat ayında Erzincan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Anabilim Dalın 'da Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Orta derecede İngilizce bilmektedir.