

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SERAMİK MALZEMELERİN MEKANİK
DAVRANIŞLAR AÇISINDAN İNCELENMESİ**

Orhan ÇİNAR

Mart, 2015
İZMİR

SERAMİK MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLAR AÇISINDAN İNCELENMESİ

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı**

Orhan ÇİNAR

Mart, 2015

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ORHAN ÇİNAR, tarafından PROF. DR. MEHMET ZOR yönetiminde hazırlanan “SERAMİK MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLAR AÇISINDAN İNCELENMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Prof. Dr. Mehmet Zor

Yönetici



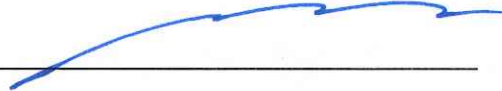
Prof. Dr. Esim ATAŞ

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Mustafa Toparlı

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin tüm aşamalarında beni destekleyen ve ışık tutan, bilgi ve tecrübelerinin yanı sıra insani yönleri ile de ilerideki yaşamımda bana örnek teşkil eden değerli danışman hocam Prof. Dr. Mehmet ZOR 'a şükranlarımı sunarım.

Çalışmanın yürütülmesinde bilgi ve birikimlerini eksik etmeyen Prof. Dr. Cesim ATAŞ'a, deney numunelerinin teminindeki yardımları için Prof. Dr. Turhan BATAR'a, deneylerin uygulama aşamasında yardımları için Araştırma Görevlisi Akar DOĞAN'a, Ansys analizlerindeki önemli yardımları için Yusuf Emre OYACI'ya tezimin yazım aşamasında desteklerini aldığım Hüseyin BAHAR'a, Süleyman BOZKURT'a ve Ömer Faruk AYDIN'a, teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde bana karşı anlayışını ve manevi desteğini hiç esirgemeyen öncelikle eşime ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Orhan ÇİNAR

SERAMİK MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLAR AÇISINDAN İNCELENMESİ

ÖZ

Seramikler, çoğul olarak kullanıldığı zaman, metaller ve alaşımları hariç, kimyasal açıdan anorganik olan, genellikle yüksek ısıda işlemlerle elde edilen ürün ya da maddelerin tümü olarak tanımlanır.

Bu çalışmada kırkiki dakika, bin ikiyüz derece pişme sıcaklığında elde edilmiş sabit kalınlıkta onaltı grup seramik malzemenin öncelikle üç nokta eğilme ve basma deneyleri yapılmıştır. Elastisite modülleri ve bası mukavemetleri bu değerler ışığında formülizasyonla hesaplanmıştır. Daha sonra Ansys'te farklı boyutlarda seramik plakalar modellenerek, aynı vurucu ağırlığı için darbeli yükleme analizleri yapılmış, kırılmaya sebep olacak kritik düşme yüksekliği (minimum yükseklik) hesaplanıp burada coulomb kriteri esas alınmış ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Ansys, sonlu elemanlar metodu, bası ve üç nokta eğilme testi yapılan seramik malzemeler, deneysel olarak inceleme, elastisite modülü.

INVESTIGATION OF CERAMIC MATERIALS IN TERMS OF MECHANICAL BEHAVIOR

ABSTRACT

Ceramics, when used in the plural, except for metals and alloys, which is chemically inorganic, usually defined as all of the high temperature obtained by the process the product or substance.

In this study, forty- two minutes , one thousand two hundred degree cooking temperature constant thickness obtained ceramic material is made primarily of sixteen groups of three point bending and compression tests. Modulus of elasticity and compression strength were calculated with these values in the light of formulate. Then ceramic plates in different sizes Ansys modeled , built pulsed load analysis for the same batter weight, critical fall height will cause breakage (minimum height) were compared with the calculated here Coulomb criteria essentially taken and the results together.

Keywords: Ansys, finite element method, compression and ceramic materials made three-point bending test, experimental investigation, modulus of elasticity.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ	xii
BÖLÜM BİR –SERAMİK MALZEMELERİN İNCELENMESİ.....	1
1.1 Seramik Malzemeler.....	4
1.1.1 Geleneksel Seramikler.....	5
1.1.1.1 Gözenekli Seramikler	5
1.1.1.2 Geçirimsiz Seramikler	6
1.1.2 Endüstriyel Seramikler ve Çeşitleri.....	6
1.1.2.1 Borürler.....	6
1.1.2.2 Nitrürler	6
1.1.2.3 Karbürler.....	6
1.1.2.4 Oksitler	6
1.1.2.5 Silisürler	7
1.1.3 Seramik Malzemelerin Özellikleri	7
1.1.3.1 Kimyasal Özellikler.....	7
1.1.3.2 Mekaniksel Davranış Özellikleri.....	7
1.1.3.3 Fiziksel Davranış Özellikleri.....	8
1.1.3.4 Termal-Isıl Davranış Özellikleri.....	8
1.1.3.5 Elektriksel Davranış Özellikleri	8
1.1.3.6 Manyetik Davranış Özellikleri	9
1.2 Seramik Malzemelerin Endüstride Kullanım Alanları	9
1.2.1 Seramik Malzemelerin Mekanik Alanlardaki Uygulamaları	9
1.2.1.1 Elektrik ve Manyetik Teknoloji Uygulamaları.....	10
1.2.1.2 Uzay ve Havacılık Sanayi Uygulamaları	11

1.2.1.3 Biyoseramik Alanı Uygulamaları.....	11
1.2.1.4 Nükleer Güç Alanı Uygulamaları.....	11
1.2.1.5 Yapı ve İnşaat Alanı Uygulamaları	12
1.2.1.6 Seramik Kaplaması Alanı Uygulamaları.....	12
1.3 Mühendislik Seramikleri	12
BÖLÜM İKİ – SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	15
2.1 Sonlu Elemanlar Metodunun Tarihsel Gelişimi	15
2.2 Darbeli Yükleme Test Düzenegi	17
2.3 Testin Tatbiki.....	18
2.4 Kırılma Kriterleri.....	18
2.5 Coulomb Kriteri.....	19
BÖLÜM ÜÇ– MALZEME VE YÖNTEM.....	20
3.1 Malzemeler ve Mekanik Özellikleri	20
3.1.1 Seramik Numunelere 3 Nokta Eğme Deneyi Uygulanması.....	22
3.1.2 Seramik Numunelere Bası Deneyi Uygulanması	25
3.2 Deney Sonuçlarının İncelenmesi	28
3.2.1 Numunelerin Eğme Deneyi Kuvvet-Deplasman Grafik Örnekleri	28
BÖLÜM DÖRT – ANSYS ANALİZ ADIMLARI.....	33
4.1 Malzeme Özelliklerinin Girilmesi	33
4.1.1 Analiz İçin Katı Modelin Hazırlanması	35
4.2 Ayarlar	36
4.2.1 Varsayım ve Kabuller	37
BÖLÜM BEŞ –SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	41
5.1 Analiz Sonuçları (1 Metre Yükseklik).....	42

5.2 Analiz Sonuçları (3 Metre Yükseklik).....	47
5.3 Kritik Yükseklik Değerlerinin Hesaplanması.....	51
5.4 Değerlendirmeler	65
KAYNAKLAR.....	66

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Seramikler, metaller ve polimerlerin çalışma sıcaklığı sınırları	14
Şekil 2.1 Klasik tip darbeli yükleme cihazı	17
Şekil 2.2 Sünek ve gevrek malzemelere ait gerilme -zorlanma eğrileri	18
Şekil 2.3 Kırılmanın gerçekleşme biçimleri.....	19
Şekil 2.4 Coulomb kriteri'nde mohr çemberi	19
Şekil 3.1 Deneyler öncesi 16 grup seramik malzeme	22
Şekil 3.2 Deneş cihazı.....	22
Şekil 3.3 KT 1 deney numunesinin aparata yerleşimi	24
Şekil 3.4 KT 1 deney numunesinin uygulanan kuvvetle kırılması	24
Şekil 3.5 Deney numuneleri 3 nokta eğme deneyi sonuçlarını gösteren örnek grafik	25
Şekil 3.6 Deney numunesine bası testi uygulanması	27
Şekil 3.7 Bası testi deney cihazı.....	27
Şekil 3.8 3 Nokta eğme testi deney cihazı	28
Şekil 3.9 Bası sonuçlarını gösteren örnek grafik	30
Şekil 3.10 Eğme testi sonuçlarını gösteren örnek grafik.....	31
Şekil 4.1 Explicit dynamics modülü başlangıç vaziyeti	33
Şekil 4.2 Malzeme özelliklerinin programa girilmesi.....	34
Şekil 4.3 Solidworks'te oluşturulan modelin ansys içine aktarılmış hali	35
Şekil 4.4 Mesh atıldıktan sonra modelin görünüşü.....	36
Şekil 4.5 Analiz kapsamındaki cisim- koyu renkte olan seramik plaka	39
Şekil 4.6 Gerekli ayarlar sonrası proje ağacı görünümü	39
Şekil 4.7 Çözüm esnasında ansys bilgi ekranı	40
Şekil 4.8 Analiz sonrası explicit dynamics modülü	40
Şekil 5.1 Eşdeğer gerilme dağılımı	42
Şekil 5.2 Kırılma anı güvenlik faktörü dağılımı	43
Şekil 5.3 Maksimum asal gerilme dağılımı	43
Şekil 5.4 Minimum asal gerilme dağılımı.....	44
Şekil 5.5 Maksimum asal gerilme	45
Şekil 5.6 Minimum asal gerilme	45

Şekil 5.7 Eşdeğer gerilme	46
Şekil 5.8 3,31 kg-100 cm için emniyet katsayısı	46
Şekil 5.9 Eşdeğer gerilme dağılımı	47
Şekil 5.10 Kırılma anı güvenlik faktörü dağılımı	47
Şekil 5.11 Maksimum asal gerilme dağılımı	48
Şekil 5.12 Minimum asal gerilme dağılımı.....	48
Şekil 5.13 Maksimum asal gerilme.....	49
Şekil 5.14 Minimum asal gerilme	49
Şekil 5.15 Eşdeğer gerilme	50
Şekil 5.16 Emniyet katsayısı (3,31 kg-300 cm için).....	50
Şekil 5.17 Emniyet katsayısı(3,31 kg 10 cm yükseklik -200 mm kenar için)	51
Şekil 5.18 Emniyet katsayısı (3,31 kg 21 cm yükseklik -200 mm kenar için)	51
Şekil 5.19 Emniyet katsayısı (3,31 kg 30 cm yükseklik -200 mm kenar için)	52
Şekil 5.20 Emniyet katsayısı (3,31 kg 50 cm yükseklik -200 mm kenar için)	52
Şekil 5.21 Emniyet katsayısı (3,31 kg 100 cm yükseklik -200 mm kenar için)	53
Şekil 5.22 Emniyet katsayısı (3,31 kg 100 cm yükseklik -350 mm kenar için)	53
Şekil 5.23 Emniyet katsayısı (3,31 kg 150 cm yükseklik -350 mm kenar için)	54
Şekil 5.24 Emniyet katsayısı (3,31 kg 159 cm yükseklik -350 mm kenar için)	54
Şekil 5.25 Emniyet katsayısı (3,31 kg 200 cm yükseklik -350 mm kenar için)	55
Şekil 5.26 Emniyet katsayısı (3,31 kg 100 cm yükseklik -400 mm kenar için)	55
Şekil 5.27 Emniyet katsayısı (3,31 kg 135 cm yükseklik -400 mm kenar için)	56
Şekil 5.28 Emniyet katsayısı (3,31 kg 150 cm yükseklik -400 mm kenar için)	56
Şekil 5.29 Emniyet katsayısı (3,31 kg 200 cm yükseklik -400 mm kenar için)	57
Şekil 5.30 Emniyet katsayısı (3,31 kg 100 cm yükseklik -600 mm kenar için)	57
Şekil 5.31 Emniyet katsayısı (3,31 kg 200 cm yükseklik -600 mm kenar için)	58
Şekil 5.32 Emniyet katsayısı (3,31 kg 300 cm yükseklik -600 mm kenar için)	58
Şekil 5.33 Emniyet katsayısı (3,31 kg 420 cm yükseklik -600 mm kenar için)	59
Şekil 5.34 Emniyet katsayısı (3,31 kg 450 cm yükseklik -600 mm kenar için)	59
Şekil 5.35 Emniyet katsayısı (3,31 kg 600 cm yükseklik -600 mm kenar için)	60
Şekil 5.36 Seramik levha : 200x200x5 mm ³ , Vurucu :3.31 kg.....	61
Şekil 5.37 Seramik levha : 350x350x5 mm ³ , Vurucu :3.31 kg.....	61
Şekil 5.38 Seramik levha : 400x400x5 mm ³ , Vurucu :3.31 kg.....	62

Şekil 5.39 Seramik levha : 600x600x5 mm ³ , Vurucu :3.31 kg.....	62
Şekil 5.40 Plaka genişliği ve-kritik düşme yüksekliği grafiği	64
Şekil 5.41 Plaka boyutu ve kritik yükseklik arasındaki eğri diyagramı.....	64

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1 Seramik malzemelerin özelliklerine göre sınıflandırılması	4
Tablo 1.2 Endüstriyel seramiklerin mekanik özellikleri	12
Tablo 1.3 Bazı ileri teknoloji seramik özellikleri.....	13
Tablo 3.1 Deney numuneleri karışım kompozisyon yüzdeleri	21
Tablo 3.2 Gruplandırılmış deney numunesi seramikleri.....	21
Tablo 3.3 Eğme deneyi için hazırlanmış olan 16 grup numunenin 3 nokta eğme testi detayları	23
Tablo 3.4 Bası deneyi için hazırlanmış 6 grup numune bası testi detayları	26
Tablo 3.5 Seramik numune elastisite modülü ve ortalama kuvvet hesaplamaları	29
Tablo 3.6 Eğme testi yapılmış olan 16 grup numune kuvvet-elastisite değerleri	31
Tablo 3.7 Numunelerin ortalama kuvvet-bası gerilmesi değerleri	32
Tablo 4.1 Hız girdisine ait detay parametreleri.....	37
Tablo 4.2 Coulomb kriteri için girilmesi gereken bası- çeki kritik mukavemet değerleri.....	38
Tablo 5.1 Ansys'te hesaplanan ortalama gerilme-güvenlik faktörü değerleri	41
Tablo 5.2 Seramik plaka kritik düşme yüksekliği.....	63

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Seramik insanların kullandığı en eski gereçlerden biridir. Yüzyıllar boyunca, özellikle çeşitli ev gereçleri yapımında seramiğin üstün niteliğinden yararlanılmıştır. Seramikler, sert, kırılğan, yüksek ergime derecesine sahip, düşük elektrik ve ısı iletimi ile iyi kimyasal ve ısı kararlılığı olan ve yüksek basma dayanımı gösteren malzemelerdir. Hammadde bolluğu, kolay işlenebilme, basit imalat, nispeten düşük maliyet, kullanma rahatlığı, yüksek sıcaklıklara dayanıklılıkları, yüksek kimyasal kararlılıkları, sertlikleri ve zorlu koşullar altında bu yapılarını koruyabilmeleri, metallere hafif olmaları (% 40 'a varan hafiflik), hammadde kaynaklarının bol ve metallere göre ucuz olması, pahalı ve stratejik metallere gerek duyulmaması, erozyon ve aşınmaya dayanıklı olmaları, oksitlenmeye dirençli olmaları, sürtünme katsayılarının düşük olması, basma kuvvetlerinin yüksek olması gibi sahip oldukları bu özellikler endüstride çok tercih edilen bir malzeme grubu olmalarını sağlamıştır.

Günümüzde seramik ailesi, klasik seramiklerin niteliklerini taşımakla beraber, yeni mekanik yetenekler edinmiş olan teknik seramikleri de kapsamaktadır. Bugün seramiğin ısıl sanayi seramikleri, yapısal seramikler ya da ince seramikler gibi çeşitleri de bulunmaktadır. Tüm bur türlerde; ana madde mineral kökenlidir ve toz halinde işlenir, eşyaya son şeklini vermek için sıkıştırma ve pişirme gibi iki aşamalı bir işlem uygulanır.

Seramiklerin mekanik özelliklerinden bahsederek sahip oldukları bağ yapıları (kovalent-iyonik) nedeniyle plastik şekil vermeleri düzgün ve iyi değerleri sağlamamaktadır. bu yüzden gevrek davranış özellikleri sergilerler. Basma dayanımları çekme mukavemetlerinden çok daha iyidir. Çünkü üretim esnasında oluşan boşluk ve düzensizlikler çentik etkisi yapar. Seramik türü malzemeler çok sert olduklarından çekme testi uygulamak oldukça zordur. Bunun nedeni çenelerin sert malzemeleri tutmada yetersiz kalmasıdır. Buna istinaden söz konusu seramik malzemelere üç noktadan eğme testi uygulanır.

Sarı (2010) yaptığı çalışmada, patlama basıncı (yük kapasitesi) ve yorulma ömür çevirimi ile alakalı genel verileri araştırmış, filaman sarma tekniği ile kapların üretimi ile darbe ve yorulma deneyi hakkında bilgi ve prosedürleri incelemiştir. Ayrıca üç ayrı enerji seviyesine (5J, 7.5J ve 10J) sahip olan darbe testleri oda sıcaklığında gerçekleştirmiş bunların darbe ve yorulma test sonuçları sunmuş, maksimum kuvvet, maksimum çökme ve toplam absorbe edilen enerji gibi darbe karakteristiklerini listelemiştir. Kuru ortam ve deniz suyu ortamında bulunan numunelerin söz edilen darbe karakteristik eğilimleri uygulana darbe enerjilerine göre grafik analizlerini yapmış, yük-çökme ve yük-zaman eğrileri kullanılarak cam filaman sargılı kompozit boruların darbe özellikleri her iki ortam için yorumlamıştır. Genel olarak iki sonuca ulaşılmıştır. Darbe enerjisinin kompozit boruların patlatma mukavemet değerlerinde düşüğe neden olduğu doğrulanmıştır. Dikkate değer diğer bulgu deniz suyuna üç ay maruz bırakılan kompozit boruların darbe ve patlatma mukavemetlerinde bir miktar artış olduğunu gözlemlemiştir.

Erbil (2008) yaptığı çalışmada ilk olarak tabakalı kompozitlerde darbe hasarının incelenmesi (öngörme, başlangıç ya da yayılma), ne zaman ve hangi şartlarda ortaya çıktığının deney sonuçlarıyla gözlenmesi ve bu sonuçların sonlu elemanlar çözümleriyle kıyaslayıp, yorumlamıştır. Her bir kenarı 100 mm'olan kare numuneler kullanılmıştır. Deney numuneleri üçerli öbekler halinde muayeneye tabi tutulmuş, hız, kütle ve enerji etkisini incelenmiştir. Delaminasyon olayının başladığı temas kuvveti esik değeri incelenmiş, bu değerin darbe yazılımı ile öngörülüp öngörülemeyeceği araştırılmıştır. Deney sonucunda hasara uğrayan numuneler, bilgisayar ortamında nokta tabanlı resim işleme kodu ile süzülerek delaminasyon miktarları ve yüzdeleri yüksek hassasiyetle saptanmıştır. Ayrıca deneylerde bulunmayan, numune kalınlığının iki ve üç katı kalınlıklarda malzemenin nasıl bir tutum sergileyeceği araştırılmıştır.

Benli (2010) yaptığı çalışmada, tabakalı kompozitlerin darbe davranışlarını incelemek amacıyla, cam/epoksi, karbon/epoksi ve cam/karbon hibrit kompozit plakalar üzerine 20, 90 ve -50 °C sıcaklık koşullarında düşük hızda darbe testleri yapılmıştır. Düşük orta ve yüksek enerji seviyelerinde kompozitlerin darbe

davranışları, maksimum kontak kuvveti, kalıcı deformasyon, maksimum kuvvete karşılık gelen enerji ve absorbe edilen enerji gibi darbe parametreleri açısından değerlendirilmiştir. Enerji profil diyagramları ve kuvvet deplasman eğrileri farklı numune tipi ve sıcaklıklar için çizilmiştir. Yedi ay deniz suyunda bekletilen numunelere de aynı darbe testleri yapılmıştır. İlk hasar, delinme ve hasar yayılma enerjileri her numune ve sıcaklık için elde edilmiştir. Hasarlı numuneler gözlemsel olarak incelenmiştir. Hasarlı numunelere üç nokta eğme testleri de yapılmıştır. Ayrıca, 20 ve 90 °C sıcaklıklarda tek yönlü cam/epoksi ve carbon/epoksi kompozit plakaların mekanik özellikleri tespit edilmiştir. ANSYS programı vasıtasıyla 20, 90 ve -50 °C sıcaklıkta termal gerilmeler hesaplanmış ve bu gerilmelerin darbe uygulanmadan önceki matris kırılma hasarı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, tabakalı kompozitlerin darbe davranışının farklı ortam koşullarından etkilendiğini göstermiştir.

Kılıçaslan ve Odacı (2012) çalışmalarında düşük hızlarda darbeye maruz kalan 1050 H14 ve 3003 alüminyum alaşımı plakalarda oluşan hasar, düşen ağırlık test cihazı ile gerçekleştirilen çarpışma deneyleriyle belirlemiş, sonlu elemanlar simülasyonları ile deneysel olarak oluşan hasar ve kuvveti karşılaştırmıştır. Testler sırasıyla 1,5 ve 6,1 m/s darbe hızı aralığında, 15,778 kg darbe yüküyle gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modelleri LS-DYNA programı kullanılarak oluşturulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda, plakalarda düşük çarpışma hızlarında sadece çökme meydana geldiği, daha yüksek hızlarda ise delinme, deformasyon bölgesinde çanak ve radyal çatlakların oluştuğu belirlenmiştir. Simülasyonlarda oluşan hasar şeklinin, kullanılan ağ yapısındaki eleman büyüklüğüne ve kullanılan hasar değerine bağımlı olduğu gözlemlenmiştir.

1.1 Seramik Malzemeler

Seramik, yunanca kil anlamındaki yada pişirilmiş nesne anlamına gelen *keramos* sözcüğünden türemiştir. Seramik üretimi eski çağlardan beri gerçekleştirilmekte olup arkeolojik buluntular seramik üretimini M.Ö 6500 yıllarına kadar dayanabileceğini ortaya koymuştur. Seramikler metaller ve alaşımları hariç, kimyasal açıdan anorganik olan, genellikle yüksek ısıda işlemlerle elde edilen maddelerin ve doğada bileşikleri halinde bulunan elementlerin uygun karışımlarından, ısı enerjisinden yararlanarak elde edilen ürün grubu şeklinde tanımlanabilir Seramik metal alaşımı az miktarda organik malzeme içeren bileşimler olarak da değerlendirilir.

Seramikler başlıca *geleneksel seramikler, endüstriyel seramikler ve ileri teknoloji seramikler* olmak üzere üç ana gruba ayrılır.

Tablo 1.1 Seramik malzemelerin özelliklerine göre sınıflandırılması

SERAMİKLER		
Geleneksel Seramikler	Endüstriyel Seramikler	İleri Teknoloji Seramikler
Gözenekli Seramikler	Borürler	Titan Karbür
Geçirimsiz Seramikler	Karbürler	Titan Nitrür
	Nitrürler	Molibden Disülfat
	Silisürler	
	Oksitler	

Endüstri için 1850'li yıllardan itibaren modern seramik malzemelerin kullanımına başlanmıştır. Modern seramik malzemelerin (teknik seramikler), endüstriyel

seramikler, üretimi ancak özel fırınlarda çok yüksek sıcaklıklarda pişirilmesiyle gerçekleşebilmiştir. Seramik malzemeler farklı bileşimde kristal ve cam yapıları içermekte ve genellikle gözeneklilik ihtiva etmektedir. Bu farklı yapı bileşenlerinin miktarı ve orantısal dağılımları seramik malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Örneğin; yapıda mevcut fazların yerleşim düzenini değiştirmek, yalıtkan olan bir seramik malzemeyi iletken hale getirmekte veya bunun tersi olmaktadır. Bu sebeple, seramik malzemelerin teknolojilerinin geliştirilmesi konusunda çalışmalar mikro yapı üzerinde yoğunlaşmıştır.

Yüzyıllar önce çömlekçilik olarak başlayan seramik çalışmaları, günümüzde birçok sanayi dalının üretim teknolojisine önemli katkısı olan bir bilim dalıdır. Seramik; doğada bileşikleri halinde bulunan elementlerin uygun karışımlarının, ısı enerjisinden yararlanarak ürün elde etmek şeklinde tanımlanabilir. Bu tanım çömlek, yapı malzemeleri, porselen refrakter ürünler, yalıtkan malzemeler, cam, çimento, emaye, abrasif (aşındırıcı), kesici, kapasitör ve piezo-elektrik (kuvars kristalleri ile ultra ses eldesi) malzemeleri kapsar.

1.1.1 Geleneksel Seramikler

Bu grupta, öncelikle kireç, cam, çimento, ve emayeleri sayabiliriz. Geleneksel seramiklerin temel malzeme birimi kildir. Uzun yıllardır bilinen bu grup seramikler pişmiş hamurun yapısına göre iki sınıfa ayrılır.

1.1.1.1 Gözenekli Seramikler

Bu tür seramik ürünlerin dış yapıları, nüveleri geçirgendir. Bu tür seramiklere örnek olarak; ısı işlem görmüş fayanslar, sertleştirilmiş toprak, , yüksek ısıya dayanıklı refrakter ürünler söylenebilir. Endüstriyel amaçlı kullanımlar için yaygın bir kullanım alanı mevcuttur.

1.1.1.2 Geçirimsiz Seramikler

Bu tür seramiklerin geçirimsizlik özellikleri, çok yüksek derecede pişirilerek camlaşmalarından kaynaklanır. Bu tür seramiklere örnek olarak; sert porselenler, gösterilebilir.

1.1.2 Endüstriyel Seramikler ve Çeşitleri

Endüstriyel seramiklerin önde gelen çeşitleri; borürler, silisürler, nitrürler, oksitler, karbürler, gibi birçok gruba ayrılabilir.

1.1.2.1 Borürler

Örnek vermek gerekirse, sert, refrakter dayanıklı malzemeler (silis SiO , alümina $Al_2 O_3$, zirkon ZrO , manyetik ferritikler , nükleer enerji yakıtları (U_2O) sayılabilir.

1.1.2.2 Nitrürler

Örnek olarak, silisyum karbür (SiC , kuvvetli ateşe stabil, mukavim, dirençli ve aşındırıcı) ve tungsten karbür , sayılabilir.

1.1.2.3 Karbürler

Örnek olarak *termo mekanik* seramiklerin (pistonlu motorlar ateşleme donanım parçaları), özellikle de silisyum nitrür (SiN), ve bor nitrür (BN) bileşikleri verilebilir.

1.1.2.4 Oksitler

Örnek olarak çok sert ve aşındırıcı, yıprandırıcı etkisi olan Bor karbür (BC_4) gibi tanımlanmış malzemeler sayılabilir. Oksitlerin sahip olduğu özellikler sayesinde

endüstride, sanayide, ileri endüstriyel sanayi gibi bölgelerde geniş kullanım alanları vardır.

1.1.2.5 Silisürler

Bu grup Korozyona karşı yüksek bir stabilite, mukavemet gösteren malzemelerdir ($MoSi_2$).

1.1.3 Seramik Malzemelerin Özellikleri

Endüstriyel seramiklerin elektriksel, manyetik, mekaniksel, termal ve kimyasal olarak farklı özellikleri ve bu özelliklerine bağlı olarak pek çok kullanım alanları vardır. Söz konusu özellikler seramikleri, metaller ve plastikler gibi diğer malzemelerden ayırır.

1.1.3.1 Kimyasal Özellikler

Endüstriyel seramiklerin bilinen türlerinden biri oksijen bileşikleri olarak bilinen oksitlerdir.. Fakat bazı nitrürler (azot bileşikleri), borürler (bor bileşikleri), karbürler (karbon bileşikleri), ve silisürler (silisyum bileşikleri) de kullanım alanları yaygındır. Seramikler, metaller ve plastiklerden daha fazla korozyona mukavimdir. Ayrıca sıvılar, gazlar, alkaliler ve asitlerle reaksiyona girmezler. Seramiklerin çoğunluğu, çok yüksek ergime noktalarına sahiptir ve bazı seramikler ergime noktalarına çok yakın sıcaklıklarda endüstride kullanım alanı bulabilirler.

1.1.3.2 Mekaniksel Davranış Özellikleri

Seramikler, yüksek sıcaklıklara dayanıklı, sertlik, basma ve eğilme mukavemet değerleri yüksek malzemelerdir. Eğilme mukavemeti, seramiklerin dayanımlarının belirlenmesinde sıklıkla kullanılır. En mukavim seramiklerden biri olan zirkonyum dioksit (ZrO), çeliğe yakın bir eğilme mukavemeti değerine sahiptir. Zirkonyalar, bu mukavemet değerlerini 800 °C 'nin üzerinde bile korurlar. Silisyum karbür (SiC) ve

silisyum nitrür (SiN) ise eğilme mukavemet değerlerini 1300 °C 'nin üzerinde muhafaza edebilirler. Bu silisyum malzemeler, çok yüksek sıcaklıkların olduğu, gaz türbin motoru ve roket üretim parçalarının yapımında kullanılırlar. Her ne kadar, seramikler sert, sıcaklığa dayanıklı olsalar da, bu malzemeler oldukça kırılğandır. Çok hızlı bir şekilde ısıtıldıklarında ve soğutulduklarında veya düşürüldüklerinde kırılabilirler.

1.1.3.3 Fiziksel Davranış Özellikleri

Endüstriyel seramiklerin birçoğu, karbon ve azotun metaller ve oksijenle yaptığı bileşiklerdir. Bu yüzden seramikler, metallerin çoğundan daha düşük bir yoğunluğa sahiptir. Sonuç olarak, hafif bir seramik parça, ağır bir metal parça kadar dayanıklı olabilir. Aynı zamanda seramikler yüksek bir aşınma ve korozyona karşı dirence sahiptir. Bilinen en sert madde elmadır ve onu bor nitrür takip eder. Alüminyum oksit ve silisyum karbür de oldukça sert malzemelerdir. Bu malzemeler metallerin parlatılması, kesilmesi, zımparalanması işlemlerinde sıklıkla kullanılırlar.

1.1.3.4 Termal-Isıl Davranış Özellikleri

Seramiklerin birçoğu mukavemetlerini yüksek sıcaklıklarda kaybetmezler ve bunun sonucu olarak yüksek ergime noktalarına sahiptirler ve diğer malzemelere göre. Örneğin, silisyum karbür (SiC) ve silisyum nitrür (SiN) gibi seramiklerin sıcaklık değişimlerine dirençleri birçok metalden daha iyidir. Çok keskin ve beklenmeyen sıcaklık değişimleri seramikleri zayıflatabilir.

1.1.3.5 Elektriksel Davranış Özellikleri

Bazı seramikler elektriği iletir. Fakat silisyum karbür (SiC) gibi bazı seramikler de, elektriği iyi iletmez, fakat bu tür seramikler yarı iletkenlerin yapımında kullanılırlar. Geniş kullanım alanları mevcuttur. Örneğin krom dioksit (Cr_2O) elektriği bir çok metal kadar iyi iletir. Bazı alüminyum oksit bileşikleri gibi seramikler, yalıtkan olarak bazı elektrikli aletlerde ve elektronik devrelerde

kullanılırlar. Porselen gibi bazı seramikler ise düşük sıcaklıklarda yalıtkan iken, yüksek sıcaklıklarda elektriği iletirler.

1.1.3.6 Manyetik Davranış Özellikleri

Demir oksit kökenli tür olan *ferritler* FeO içerikli seramikler olarak da bilinirler; nikel kobalt demir, gibi manyetik malzemeler ile aynı manyetik özelliklere sahip olabilirler. Manyetik seramikler, elektrik motor ve devrelerin de kullanılır.

1.2 Seramik Malzemelerin Endüstride Uygulama Alanları

Seramikler; sahip oldukları stabil olmak, mukavimlik, uzun ömür ve sertlik gibi mekanik özellikler sayesinde malzeme bilimi içerisinde çok kapsamlı şekilde kullanılırlar . Manyetik ve elektriksel özellikleri, seramikleri yarı iletken ,yalıtkan, iletken ve manyetikler olarak kullanıldıkları elektronik saha uygulamalarında öncü rol almalarını sağlamaktadır. Aynı zamanda seramikler, özellikli yapılarda, uzay ve havacılık sanayisinde, biyomedikal ve nükleer teknolojide de çok geniş bir kullanıma sahiptir.

1.2.1 Seramik Malzemelerin Mekanik Alanlardaki Uygulamaları

Endüstriyel seramikler, dayanım, sertlik, refrakter özelliği ve aşınma direnci ihtiyacı duyulan uygulamalarda geniş kullanım sahasına sahiptir. Örnek olarak, makine operatörleri, silisyum karbür (SiC) ve silisyum nitür (SiN) metal kesme takımlarını metallere şekil vermede; dökme demir, nikel esaslı alaşımlar ve diğer metalleri zımparalayarak parlatmakta kullanılırlar. Ayrıca silisyum nitür (SiN), silisyum karbür (SiC) ve bazı zirkonya tipleri yüksek sıcaklıkların oluştuğu gaz-türbin motorlarının kompresörlerinde ve dizel motorlarının subap parçalarında kullanılırlar.

1.2.1.1 Elektrik ve Manyetik Teknoloji Uygulamaları

Seramikler, yalıtkan olarak (düşük elektrik iletkenliği sebebiyle), ve yarı iletken olarak da kullanılırlar. Seramik malzemeler elektriksel özellikleri bakımından geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Alüminyum oksit gibi seramikler elektriği tamamen iletmediklerinden yalıtkan yapımında kullanılırlar. Yüksek voltaj güç hatlarında, iletim direklerinde kullanılan simit diskler bu malzemeden yapılır. Aynı örneklemede, yüksek frekanslı akımlara maruz kalan ince alüminyum oksit parça, elektriksel ve kimyasal kararlılığını koruduğu için mikroçip malzemesi ve teknolojisinde kullanılma imkanına sahiptir.

Bazı seramikler yarı iletken yapımında kullanılırlar. Küçük yarı iletken mikroçipler genellikle, baryum titan oksit ($BaTiO$) ve stronsiyum titan oksit ($SrTiO$) malzemelerden yapılır. Yine aynı malzemelerden yapılan yüz binlerce transistör, elektronik araçların çok küçük mikro boyutlara indirgenmesinde baş rol oynamıştır.

Süper iletkenlik, özel yöntemlerle soğutulan bir malzemenin hiçbir direnç göstermeden elektrik akımını iletmesidir. Bu olay, sadece aşırı düşük sıcaklıklarda meydana gelebilir. Araştırmacılar yakın tarihte bakır oksit seramiğin $-148\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de süper iletken olduğunu keşfetmişlerdir.

Baryum titan oksit ($BaTiO$) gibi seramik malzemelerin ince yalıtkan tabakaları, çok küçük hacimlerde, büyük miktarlarda elektrik depolanabilmesine imkan verir. Elektriksel şarjın depolanabildiği bu araçlar *kapasitör* olarak tanımlanır. Mühendis ve araştırmacılar seramikler sayesinde, çok daha küçük boyutlarda kapasitörler geliştirmekte ve bunları televizyon, bilgisayar ve diğer elektronik ürünlerin yapımında kullanmaktadırlar.

Ferritler elektrik akımını yüksek frekanslarda iletim yetenekleri mevcuttur. Bunun sayesinde metal iletkenlerin kaybettiği kadar güç kaybetmezler. Ferritler, aynı zamanda, video, radyo ve mikrodalga teçhizatlarında kullanılırlar. Mangan

Çinko ferritler, manyetik kayıt kafalarında ve ferrit oksit seramikler bilgisayar disketlerinde yaygın Şekilde kullanılırlar.

Bu tip uygulamalarda söz konusu malzemeler optimal en yüksek verimlilikte kullanılırlar. Elektronik, haberleŐme, ileri teknoloji gerektiren özellikli uygulamalarda sıklıkla tercih edilen bir malzeme grubudur.

1.2.1.2 Uzay ve Havacılık Sanayi Uygulamaları

Bu tip seramik malzemeler spesifik uzay araçlarının bazı parçalarının yapımında kullanılırlar. Yüksek mukavemet, rijitlik ve sertlik, aşınmaya kimyasal etkilere ve yüksek sıcaklığa dayanıklılık, boyutlarda kararlılık gibi üstün özellikleri sebebiyle uçak ve uzay endüstrisinde önemli ölçüde kullanılmaktadırlar. Uzay mekiği için ısı kalkanı tuğlaları gibi bileŐenler bu grup seramiklerden yapılırlar.

1.2.1.3 Biyoseramik Alanı Uygulamaları

Bazı geliŐmiŐ seramikler biyomedikal alanda vücutta doku içerisine implantasyon yapmak amacıyla kullanılır. Örneğin kemik, diŐ, bazı yumuŐak doku parçaları ile uyum gösterir. Bu uygulamalardan biri olan özel olarak hazırlanan gözenekli alümina, kemik ve diğer doğal yumuŐak dokuları birbirine bağlar. Tıp ve diŐ hekimliği uzmanları, bu tür seramikleri diŐ kaplamaları, diŐ köprüleri kalça eklemleri, ve implant uygulamaları yapmak amacıyla kullanılırlar.

1.2.1.4 Nükleer Güç Alanı Uygulamaları

Uranyum seramik parçaları nükleer güç üretmek için kullanılırlar. Bu hücreler, yakıt imalat fabrikalarında gaz uranyum bileŐiklerinden üretilir. Hücreler daha sonra yakıt çubukları adı verilen borulara doldurulur ve nükleer santrallere gönderilir.

1.2.1.5 Yapı ve İnşaat Alan Uygulamaları

Bu grup seramikler borular tuğlalar, kiremitler ve diğer inşaat malzemelerinin yapımında kullanılırlar. Ev tipi kullanımlarda oldukça geniş bir kullanım alanları mevcuttur. Bu tür seramiklerin başlıca hammaddesi kildir. Meskun mahal evlerde kullanılan lavabo, banyo küveti gibi öncelikli kullanılan vitrifiyeler kil ve feldispat esaslı seramiklerden imal edilir. Uzun süreli korozif etkilere karşı dayanım ömürleri oldukça iyi seviyelerdedir.

1.2.1.6 Seramik Kaplaması Alan Uygulamaları

Seramik malzemeler, yüksek sertliğe, termal kapasiteye ve metallerin pek çoğundan daha iyi korozyon direncine sahiptir. Bu özellikleri dolayısıyla imalâtçılar tarafından metalleri seramik emaye ile kaplama amacı için kullanılırlar. İmalâtçılar seramik emayeyi, seramik tozu içeren yüksek basınçlı havayı, hidrokarbon-oksijen bileşimi ile 2500 °C sıcaklığa ısıtarak, yüzeye enjekte etmek suretiyle elde ederler. Yarı ergimiş toz parçacıkları metale yapışır ve sert bir emaye tabakası için metal soğutulurak biçimlendirilir. Buzdolabı gövdeleri, fırınlar, bulaşık makineleri, çamaşır makineleri ve kurutucular genellikle seramik emaye ile kaplanır.

Tablo 1.2 Endüstriyel seramiklerin mekanik özellikleri

Malzeme	Yoğunluk g/cm ³	Basma Mukavemeti Mpa	Çekme Mukavemeti Mpa	Eğme Mukavemeti Mpa	Kırılma Tokluğu Mpa ^{1/2}
AL ₂ O ₃ (%99)	3,85	2585	207	345	4
Si ₃ N ₄ (Sıcak Pres)	3,19	3450	—	690	6,6
Si ₃ N ₄ (Tepkime Bağlı)	2,8	770	—	255	3,6
SiC (Sinter)	3,1	3860	170	550	4
ZrO ₂ , %9 MgO	5,5	1860	—	690	8+

1.3 Mühendislik Seramikleri

Geleneksel seramik üretim ve satış açısından önemli bir yer tutmakta beraber son çeyrek asırda bir takım üst düzey özelliklere sahip yeni seramikler geliştirilmiştir.

Söz konusu seramikler günümüzde “ileri teknoloji seramikleri, teknolojik seramik, mühendislik seramiği, yeni seramikler veya ince seramik” gibi isimlerle tanımlanmıştır. Çok iyi özelliklerde malzeme arayışları son dönemlerde yönelimi tamamen ileri teknoloji seramikleri üzerine toplamıştır. İleri teknoloji seramikleri, alışılmış seramiklerin aksine oldukça sade yapıdadır. Saf halde metal oksit, karbür ya da nitrürden oluşurlar. İleri teknoloji seramik grupları, karbürler, nitrürler ve borürler olarak sınıflandırılmaktadır. Tablo 1.3’de bazı ileri teknoloji seramiklerin özellikleri verilmektedir. Bu tabloda yoğunluk, mukavemet, Elastisite modülü, sertlik, tokluk, ergime sıcaklığı gibi önemli kriterler listelenmiştir.

Tablo 1.3 Bazı ileri teknoloji seramik özellikleri (Geçkinli, 1992).

Malzeme	Ergime Sıcaklığı(°C)	Yoğunluk (g/cm ₃)	Mukavemet (MPa)	Elastik Modül(GPa)	Sertlik (Kg/mm ₂)	Tokluk (Kc)
AL ₂ O ₃	2050	3,96	250-300	36-40	1000-1600	4,5
ZrO ₂	2700	5,6	113-130	17-25	1200	6-9
SiC	3000	3,2	310	40-44	2800	3,4
Si ₃ N ₄	1900	3,24	410	30,7	1300	5,0
WC (tungsten karbür)	2700	15,7	350-550	54-70	2000	5-8

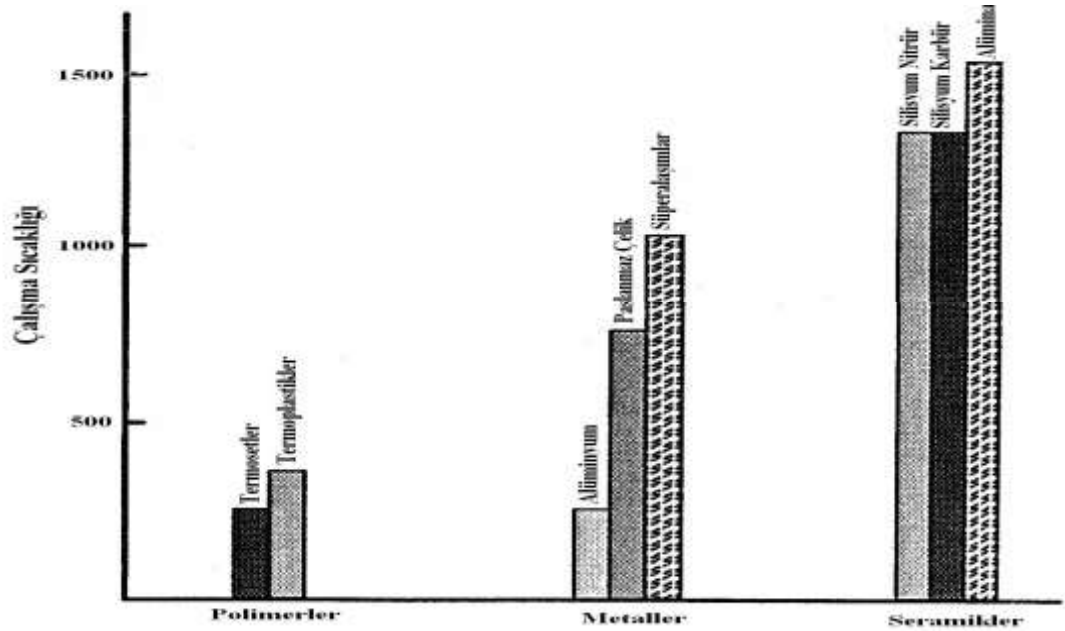
İleri teknoloji seramikleri önemli kılan üstün özelliklerinden bazıları aşağıdaki listede belirtildiği gibidir.

- Yüksek sıcaklıkta dayanımları,•Kimyasal kararlılığın yüksek oluşu,
- Sertliklerin yüksek oluşu,• Metallerle göre daha hafiflik,
- Hammadde kaynaklarının tabiatta bol miktarda bulunması,
- Aşınmaya karşı dayanıklı olmaları, Sürtünme katsayılarının düşük olması,
- Isıl genleşme katsayılarının düşük olması olarak sıralanabilir.

Bu üstün özelliklerin yanı sıra seramik malzemelerde birtakım dezavantajları mevcuttur. Bunların en önemlisi gevrek karakterde olmaları yani kırılganlıklarıdır. Kırılğan olmalarının nedeni ise yapılarında meydana gelen gözenek ve katmanlarından dolayıdır.

Farklı tür malzemelerin servis veya kullanım sıcaklığının karşılaştırılması oldukça bilgilendiricidir. Şekil 1.1’de bazı önemli seramik, polimer, metallerin yaklaşık servis sıcaklık aralıklarının karşılaştırılması verilmiştir. Şekilde de görüleceği gibi açık bir şekilde seramikler çok yüksek sıcaklıklarda (>1000 °C) uygulanabilir tek malzeme sınıfıdır. Seramikler, metallere ve polimerlerden daha yüksek sertlik, elastisite modülüne sahiptir. Aynı zamanda, daha düşük yoğunluk, termal genleşme katsayısı, termal ve elektrik iletkenliğine sahiptir. Özellikle, seramiklerin düşük yoğunluk ve termal genleşme özelliği çoğu uygulamalarda büyük öneme sahiptir. Bununla birlikte şekildeki malzemelerin çalışma sıcaklığı baz alındığında endüstriyel kullanımda hatta uzay sanayi uygulamaları dahil olmak üzere tercih edilen malzeme gruplarında en ön sırayı seramikler daha sonra ise metaller ve polimer malzemeler almaktadır.

Seramiklerin kırılma tokluğu, metallerle karşılaştırıldığında son derece düşük olması en büyük dezavantajıdır. Seramiklerde yapısal hataların sayısını minimize etmek önemlidir ve aynı zamanda ham maddenin ve prosesin dikkatli kontrolüyle belirli kritik hata büyüklüğünden daha küçük hata seviyelerine düşebilir. Bununla birlikte, çevrenin etkisi, termal yük, mekanik yük vb. sonucunda kırılma hasarları oluşabilir.



Şekil 1.1 Seramikler, metaller ve polimerlerin çalışma sıcaklığı sınırları (Chawla,1993)

BÖLÜM İKİ

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yöntemi fizik ve mühendislikte karşılaşılan bir çok problemin çözümünde kullanılan en yaygın ve etkin sayısal yöntemlerden biridir. Sonlu elemanlar metodu matematikçilerden ziyade daha çok mühendisler tarafından geliştirilmiştir. Bu metod ilk olarak gerilme analizi problemlerine uygulanmıştır. Tüm bu uygulamalarda bir büyüklük alanının hesaplanması istenmektedir. Gerilme analizinde bu değer deplasman alanı veya gerilme alanı; ısı analizinde sıcaklık alanı veya ısı akısı; akışkan problemlerinde ise akım fonksiyonu veya hız potansiyel fonksiyonudur. Hesaplanan büyüklük alanının ulaştığı en büyük değer veya en büyük gradyan pratikte özel bir önem içerir. Sonlu elemanlar metodunda yapı, davranışı daha önce belirlenmiş olan bir çok elemana bölünür. Elemanlar "nod" adı verilen noktalarda tekrar birleştirilirler. Bu şekilde cebri bir denklem takımı elde edilir. Gerilme analizinde bu denklemler nodlardaki denge denklemleridir. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde çok sayıda denklem elde edilir. Bu denklem takımının çözümü ise bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır.

2.1 Sonlu Elemanlar Metodunun Tarihsel Gelişimi

Sonlu elemanlar metodu ilk olarak yapı analizinde kullanılmaya başlandı. İlk çalışmalar Hrennikoff (1941) ve Mc Henry (1943) tarafından geliştirilen yarı analitik analiz metotlarıdır. Argyis ve Kelsey (1960) virtuel is prensibini kullanarak bir direkt yaklaşım metodu geliştirmiştir. Turner ve diğer.,(1956) Bir üçgen eleman için rijitlik matrisini oluşturmuştur. "Sonlu Elemanlar" terimi ilk defa Clough (1960) tarafından çalışmasında telâffuz edilmiştir. Metodun üç boyutlu problemlere uygulanması iki boyutlu teoriden sonra kolayca gerçekleşmiştir. (Argyis, (1964).) İlk gerçek kabuk elemanlar aksenal simetrik elemanlar olup Grafton ve Strome (1963), bunları silindirik ve diğer kabuk elemanları izlemiştir. Araştırmacılar 1960'lı yılların başlarında non-lineer problemlerle ilgilenmeye başladılar. Turner (1960) geometrik olarak non-lineer problemler için bir çözüm tekniği geliştirdi. Sonlu elemanlar metoduyla stabilite analizi ise ilk Martin (1965) tarafından araştırılmış,

Statik problemlerin yanısıra dinamik problemlerde sonlu elemanlar metoduyla incelenmeye başlamıştır Zienkiewicz ve Koenig Davids 1943 yılında Courant bölgesel sürekli lineer yaklaşım kullanarak bir burulma problemi için çözüm üretmiştir. Yapı alanı dışındaki problemlerin sonlu elemanlar metoduyla çözümü 1960'lı yıllarda başlamıştır. Örneğin Zienkiewicz ve Cheung (1965) sonlu elemanlar metodu ile Poisson denklemini çözmüştür. 1970'te ise bu metod potansiyel akışa uygulanmıştır. Sonlu elemanlar metodu geliştirilerek ısı transferi, yeraltı sularının akışı, manyetik alan dahil olmak üzere pek çok alana uygulanmaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminin genel uygulanabilirliği, onu geniş bir sahada problemler için güçlü ve esnek bir kullanım aracı haline getirmiştir. Bu nedenle yapısal ve mekanik problemlerin çözümü için çok sayıda yapısal program geliştirilmiştir. ANSYS sonlu elemanlar analiz programı da 1970'li yıllarda Dr. John Swanson tarafından bilgisayarlar üzerinde geliştirilen bir sayısal analiz programıdır. Sürekli olarak geliştirilen ve yenilenen bu program, mühendisliğin hemen her dalında (yapı, otomotiv, endüstri, elektronik, uzay bilimleri vs.) kullanılabilen genel maksatlı bir paket program haline getirilmiştir (Uçar, 2002).

ANSYS programında çözümlerin elde edilmesi üç aşamada gerçekleşir. Bu aşamalar, Ön işleme (preprocessing), İşleme (processor) Son işleme (postprocessor) aşamalarıdır. Ön işleme aşamasında çözüm esnasında gerekli olan dataların oluşturulması söz konusudur. Bu aşamada program kullanıcısı koordinat sisteminin seçimi, eleman tipinin belirlenmesi, malzeme sabitlerinin ve özelliklerinin belirlenmesi, katı modelin oluşturulması ve sonlu elemanlara ayrılması işlemlerini yapar. Daha sonra çözüm aşamasına geçilir. Bu aşamada kullanıcı analiz tipini, analiz opsiyonlarını, yükleme durumlarını ve sonlu eleman çözüm tekniğini belirler ve problemi çözdürür.

2.2 Darbeli Yükleme Test Düzenegi

Darbeli yüklemelerle alakalı yapılan laboratuvar çalışmalarında kullanılan darbe test düzenegiinde belirli bir yükseklikten belirli bir kütleyle serbest düşme hareketi yaptırılarak bu kütleyle test numunesinin çarpıştırılması sağlanır.

Aşağıdaki düzenek klasik darbeli yükleme test düzeneklerinden birisidir. Burada 1-Vurucu uç, 2-Kuvvet sensörü 3-Ağırlık 4-Mıknatis tipinde cihaz tasarımı görölmektedir.



şekil 2.1 Klasik tip darbeli yükleme cihazı

Test düzenegi; çelik çubuklardan ve çelik taban bloğundan oluşan ana gövde, ağırlık, Piezo elektrik algılayıcı, alınan kuvveti kuvvetlendirmeye yarayan amplifikatör ve bilgisayar olmak üzere beş unsurdan oluşmaktadır. Minimum sürtünme kuvveti için çelik çubuklar, yüzeyi düzgün işlenmiş St 52 malzemedен imal edilmiş transmisyon millerinden yapılmıştır. Ayrıca bu millerin standart rulman çaplarına uyumlu olması için çapları 30 mm seçilmiştir. Tablaya sabitleyebilmek açısından her bir uca tablanın kalınlığı olan 20 mm diş boyuna sahip olacak şekilde M30 diş açılmıştır. Tüm bunların yanı sıra bu çelik çubukların düşey durumda yan kuvvetlerden etkilenmemeleri için bir destek plakası üst uçlarına monte edilmiştir. Bunun içinde çubukların üst uçlarına diş açılmıştır.

2.3 Testin Tatbiki

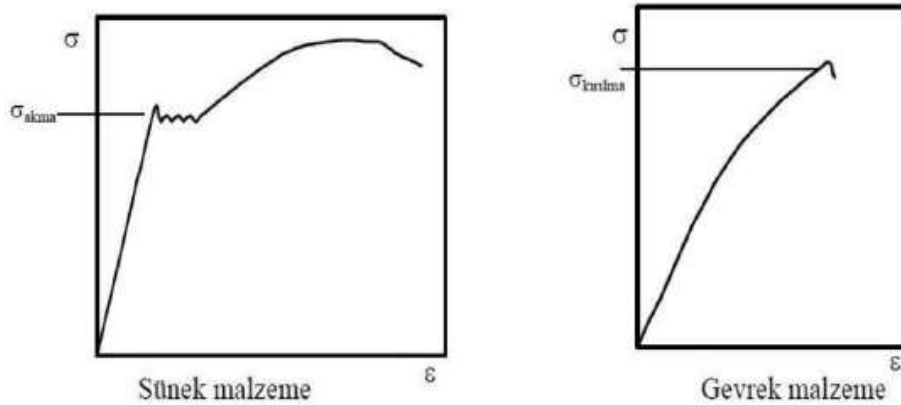
Ağırlık düşürme test sisteminde temas kuvvetini ölçmek için bir transducer vardır. Her test için düşme yüksekliği, numunenin merkezine göre önceden belirlenir. İlk darbeden sonra tekrar çarpması engellenir. Deney sistemi darbe anında vurucunun (silindirik başlıklı vurucu uç) hızını ölçmek için bir foto-elektrik sensöre sahiptir. Bu sayede vurucunun ivmesi de bilinebilmektedir. Bu test vasıtasıyla darbe kuvveti F , t zamanına karşı çizilerek kaydedilir. Temas kuvveti $F(t)$ vurucu başına monte edilen bir transducer ile ölçülür. Bu sinyal, yükselticide kuvvetlendirilerek bilgisayarda matlab gibi programlar vasıtasıyla işlenip grafik haline getirilir. Elde edilen kuvvet-zaman eğrisinin altında kalan alan, malzemenin absorbe ettiği enerjiyi verir.

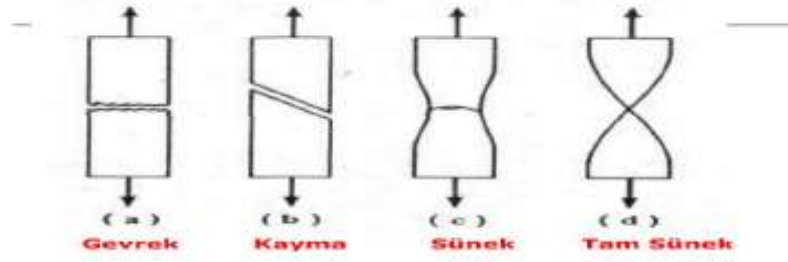
2.4 Kırılma Kriterleri

Kırılma, gerilme altında malzemelerin parçalara ayrılmasıdır. Kırılma olayı çatlağın oluşması ve ilerlemesi safhalarından meydana gelir. İkiye ayrılır.

1. Sünek Kırılma: Malzeme ilk önce plastik deformasyona uğrar, ardından kırılma meydana gelir.

2. Gevrek Kırılma: Malzeme deformasyona uğramadan kırılır.





Şekil 2.3 Kırılmanın gerçekleşme biçimleri

2.5 Coulomb Kriteri

Gevrek malzemeler için çok iyi sonuç veren bu kritere göre bir malzemenin herhangi bir noktasında kırılma olmamasının şartı;

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_o} - \frac{\sigma_3}{\sigma_o C} < 1 \quad (2.1)$$

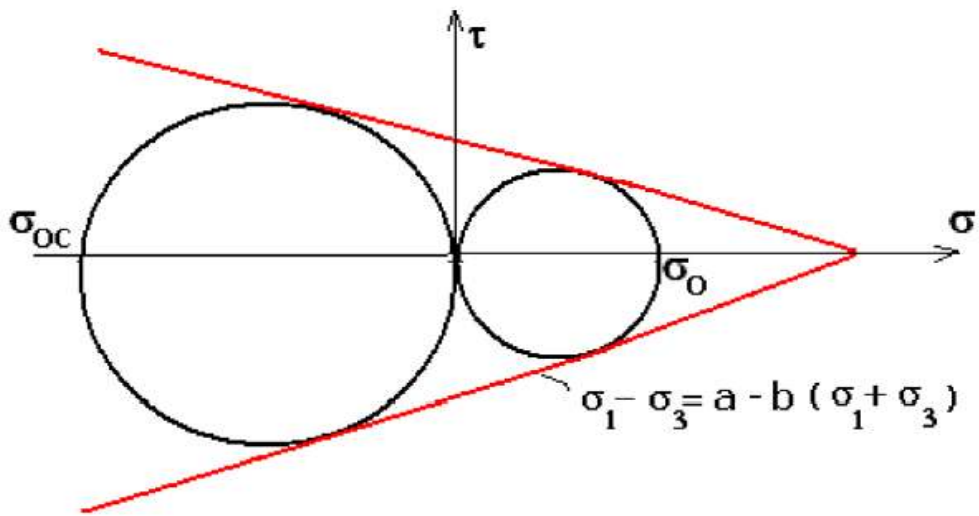
σ_1 = Maksimum asal gerilme

σ_3 = Çekme mukavemeti

σ_o = Minimum asal gerilme

$\sigma_o C$ = Basma mukavemeti

Başka bir ifadeyle bu kritere göre; basit çekme ve basit basma hallerinin en büyük Mohr çemberlerinin teğetleri dışında kalan yüklemelerde kırılma olur.



Şekil 2.4 Coulomb kriteri'nde Mohr çemberi

BÖLÜM ÜÇ

MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada, farklı kompozisyonlara sahip, Bor esaslı ve 1200 °C de üretilmiş yeni seramik malzemelerin darbeli yüklemeye karşı davranışları incelenmiştir.

Analizler Ansys 14.5 programında gerçekleştirilmiş ve hasar kriteri olarak Coulomb kriteri kullanılmıştır. Öncelikle incelenen malzemelerin gerekli mekanik özellikleri üç nokta eğme testi ve basma deneyi ile tespit edilmiştir. Daha sonra 5 mm kalınlığa sahip, 200x200, 350x350, 400x400, 600x600 boyutlarında 4 farklı plaka modellenmiştir.

3,31 kg lık vurucu, farklı yüksekliklerden, alt yüzeyi sabit olan plakaların üstüne düşürülmüş ve her analiz için maksimum güvenlik faktörü eğrileri elde edilmiştir. Bu eğrilerden ise güvenlik faktörü 1 için kritik yükseklikler elde edilerek bu yükseklikler için tekrar analizler yapılmıştır.

3.1 Malzemeler ve Mekanik Özellikleri

Bu bölümde seramik malzemenin mekanik değerlerinin deneysel olarak incelenebilmesi için, seramik malzemelerin numunelerinin nasıl hazırlandığı üzerinde durulacaktır.

Deney numunelerinde kullandığımız seramik malzemeler 1200 °C sıcaklıkta 42 dakika süren pişirme süreci sonrası 16 grup 95*50*5 mm ölçülerinde imal edilmiştir. Söz konusu KT grup numuneleri Kalsine Trinkal karışımlarını, BP grup numuneleri Boraks Pentahidrat karışımlarını BA grup numuneleri Borik Asit ve Feldspat (Masse) karışımlarını içermektedir. Numune isimleri karışım isimlerine göre verilmiştir.

KT-BP-BA numune gruplarında ağırlıklı olarak Kalsine Trinkal, Boraks Pentahidrat, Borik Asit kompozisyonları karışımlarına ilave olarak Feldspat (Masse) karışımı belli yüzdelerde numunelere eklenmiştir. Bu yüzdeler aşağıdaki tabloda listelenmiştir.

Tablo 3.1 Deney numuneleri karışım kompozisyon yüzdeleri

Malzeme Türü	Kalsine Trinkal %	Masse %	Boraks Pentahidrat %	Borik Asit %
KT1	-	100	-	-
KT2	0,25	99,75	-	-
KT3	0,50	99,50	-	-
KT4	0,75	99,25	-	-
KT5	1	99,0	-	-
KT6	1,25	98,75	-	-
BA2	-	99,75	-	0,25
BA3	-	99,50	-	0,5
BA4	-	99,25	-	0,75
BA5	-	99,0	-	1
BA6	-	98,75	-	1,25
BP2	-	99,75	0,25	-
BP3	-	99,50	0,50	-
BP4	-	99,25	0,75	-
BP5	-	99,0	1	-
BP6	-	98,75	1,25	-

Tablo 3.2 Gruplandırılmış deney numunesi seramikleri

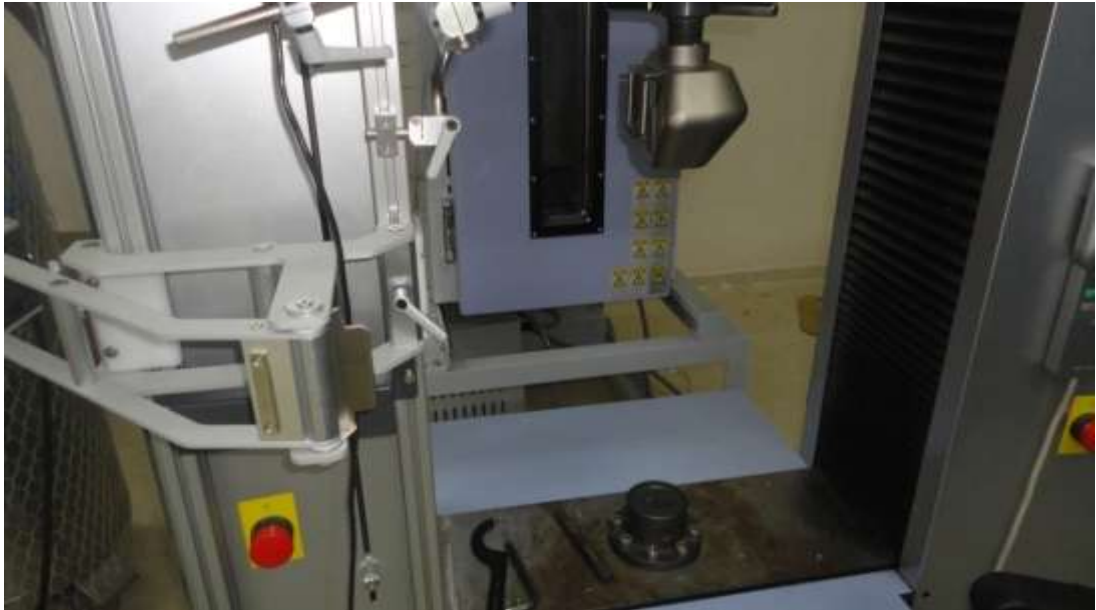
MALZEME	16 GRUP	SERAMİK	LİSTESİ			
1. SIRA	KT1	KT2	KT3	KT4	KT5	KT6
2. SIRA	BP2	BP3	BP4	BP5	BP6	—
3. SIRA	BA2	BA3	BA4	BA5	BA6-TEK	—



Şekil 3.1 Deneyler öncesi 16 grup seramik malzeme

3.1.1 Seramik Numunelere 3 Nokta Eğme Deneyi Uygulanması

Bu numunelerin test edilmesinde Shimadzu Autograph AG-X makinası kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler bu cihaz vasıtasıyla 3 nokta eğilme işlemine tabi tutulmuştur. Veriler bilgisayar vasıtasıyla alınmıştır. Eğme hızı 1 mm/dk olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.2 Deney cihazı

Tablo 3.3 Eğme deneyi için hazırlanmış olan 16 grup numunenin 3 nokta eğme testi detayları

Malzeme Türü	Test Tarihi	Test Hızı	Malzeme Sayısı	Uygulanan Test Tekniği
Alaşımli Seramik	12.11.2013	1 N/mm2	16	3 Nokta Eğme

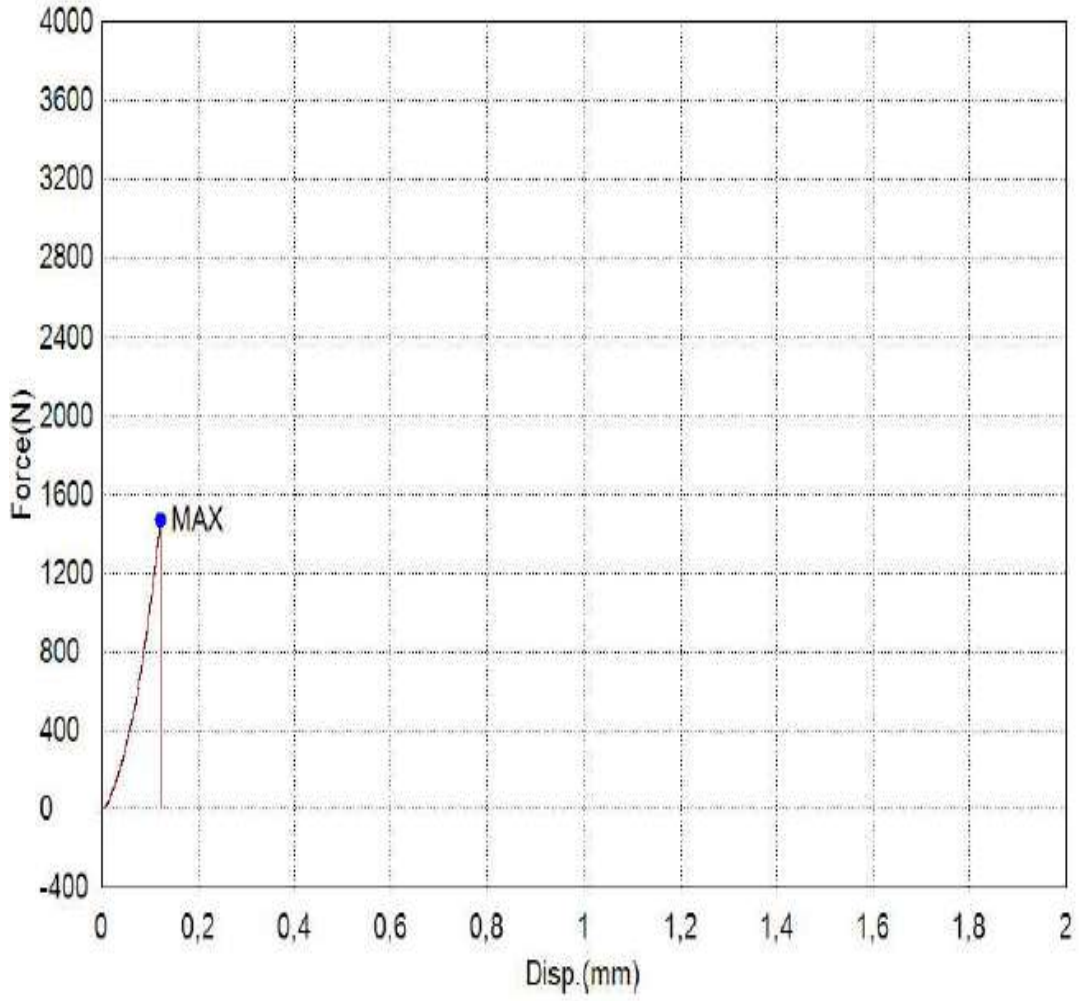
Malzeme İsmi	Uygulanan Maksimum Kuvvet (N)	Maksimum Gerilme (N/mm2)	Maksimum Çökme (mm)
KT1	1329,77	36,3160	0,11731
KT1	1328,25	34,8019	0,13804
KT1	1622,31	44,8962	0,13754
KT1	2130,60	58,9628	0,15865
KT2	1509,52	42,1553	0,12694
KT2	2154,53	60,1678	0,19279
KT2	1466,99	39,8097	0,13252
KT2	1917,41	52,0328	0,18227
KT3	2455,16	64,4749	0,23777
KT3	1443,43	37,9061	-0,17063
KT3	1467,48	42,6862	0,12100
KT3	1402,66	40,8008	0,14321
KT4	1419,91	40,4681	0,12931
KT4	1863,88	53,1214	0,15667
KT4	1668,47	45,0196	0,12113
KT4	1932,94	52,1557	0,15231



Şekil 3.3 KT 1 Deney numunesinin aparata yerleşimi



Şekil 3.4 KT 1 Deney numunesinin uygulanan kuvvetle kırılması



Şekil 3.5 Deney numunelerinin 3 nokta eğme deneyi sonuçlarını gösteren örnek grafik

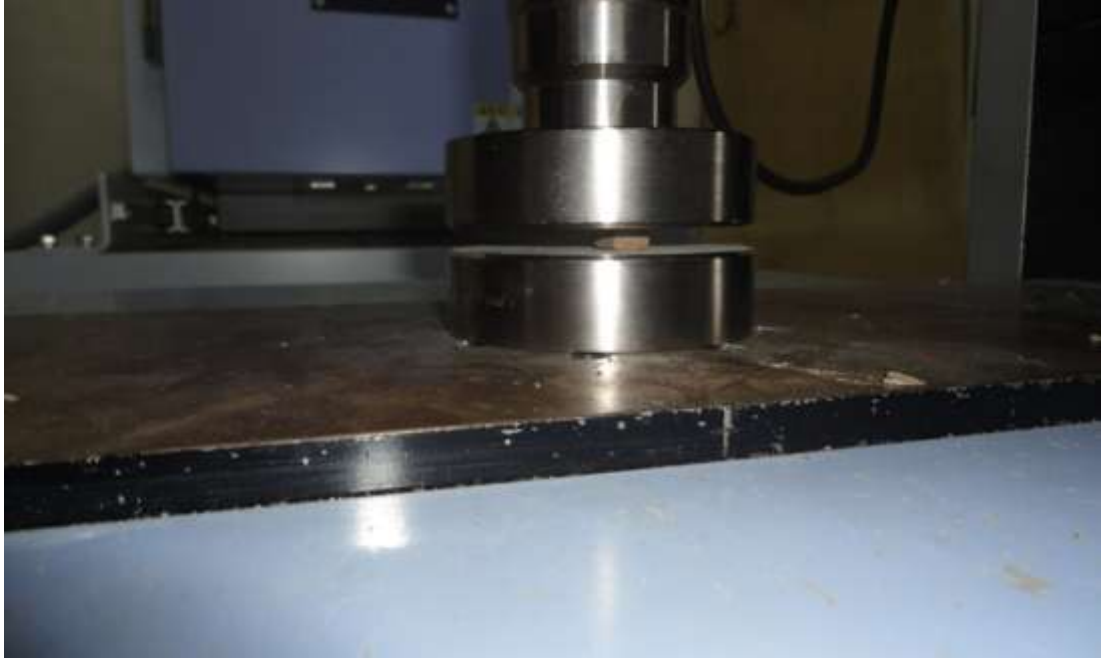
3.1.2 Seramik Numunelere Bası Deneyi Uygulanması

Bu numunelerin test edilmesinde Shimadzu Autograph AG-X makinası kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler bu cihaz vasıtasıyla bası testi işlemine tabi tutulmuştur. Veriler bilgisayar vasıtasıyla alınmıştır. Eğme hızı 0,5 mm/dk olarak ayarlanmıştır.

Deney numunelerinde kullandığımız malzemeler 16 grup malzemenin arasından seçilip 10*10*5 mm ölçülerinde kesimi yapılan 6 grup seramikten oluşmaktadır.

Tablo 3.4 Bası deneyi için hazırlanmış olan 6 grup numune bası testi detayları

Malzeme İsmi	Uygulanan Maksimum Kuvvet (N)	Maksimum Gerilme (N/mm²)
KT2-1	14168,5	79,5876
KT2-2	44994,5	231,487
KT1-1	18796,8	108,803
KT1-2	50045,5	338,237
BP3-1	15097,2	85,6938
BP3-2	8874,07	46,4253
BP6-1	36213,4	189,331
BP6-2	19946,9	101,356
BA5-1	19197,2	100,694
BA5-2	6089,39	34,2485
BP2-1	2638,28	1,10296



Şekil 3.6 Deneş numunesine bası testi uygulanması



Şekil 3.7 Bası testi deneş cihazı

3.2 Deneý Sonuçlarının İncelenmesi

3.2.1 Numunelerin Eğme Deneyi Kuvvet-Deplasman Grafik rnekleri

3 Nokta Eğilme deneyinin tamamlanmasının ardından deney cihazı bilgisayarından alınan F max, Eğilme Dayanımı, Max ökme değerleriyle numune boyutları L,b,h (mm) değerleri kullanılarak $E = (F \cdot L^3) / 48 \cdot I$ formülünden Elastisite Modülü (Mpa) değeri, $I = (b \cdot h^3) / 12$ (Atalet Momenti) değeri, Kırılma Mukavemeti değerleri hesaplanmıştır. Her numune için ortalama değerler hesaplanmış tabloda 3.4 detaylı gösterilmiştir.

Ayrıca 16 grup numuneye ait kuvvet-deplasman grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler numunelerin Fmax, Eğilme Dayanımı, Max ökme, Kırılma Mukavemeti değişimine göre dayanımlarını tespit edebilme ve bu durumları karşılaştırabilme imkanı sağlamıştır.



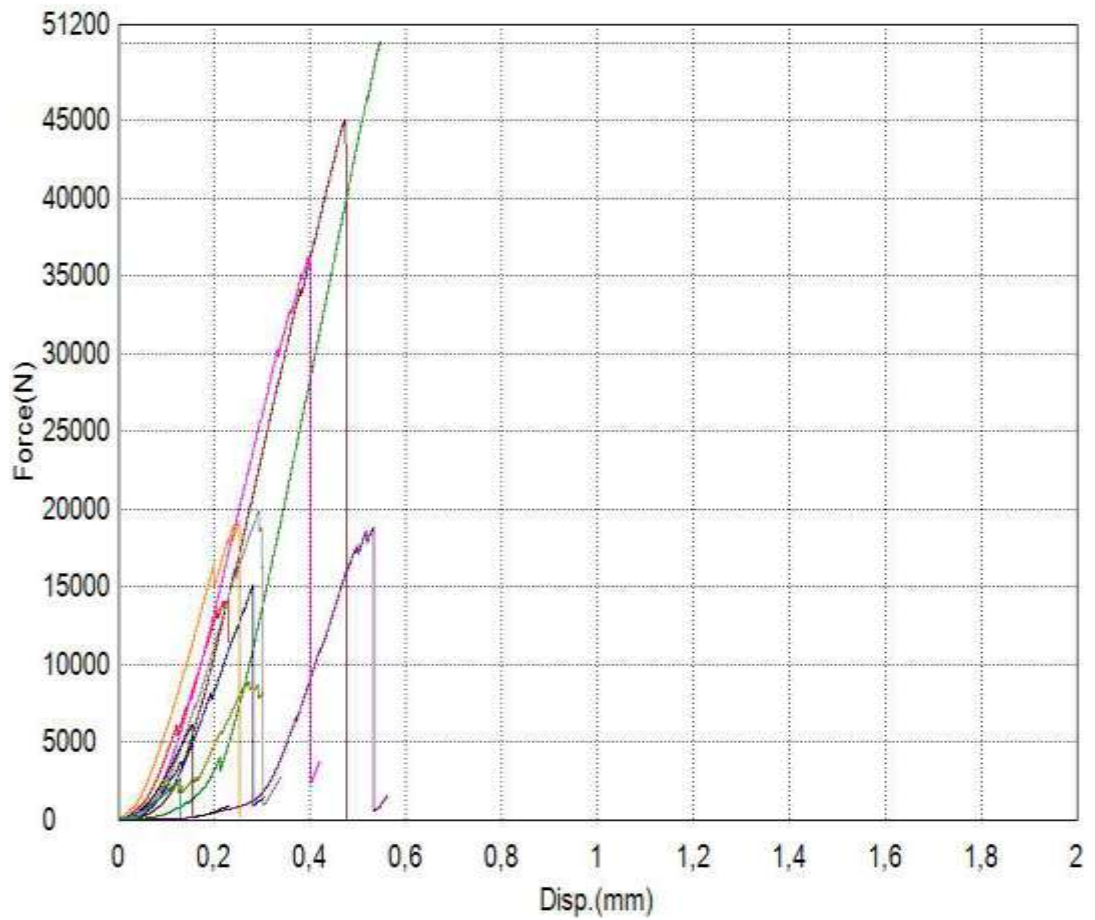
şekil 3.8 3 nokta eğme testi deney cihazı

Tablo 3.5 Seramik numunelerin elastisite modülü ve ortalama kuvvet hesaplamaları

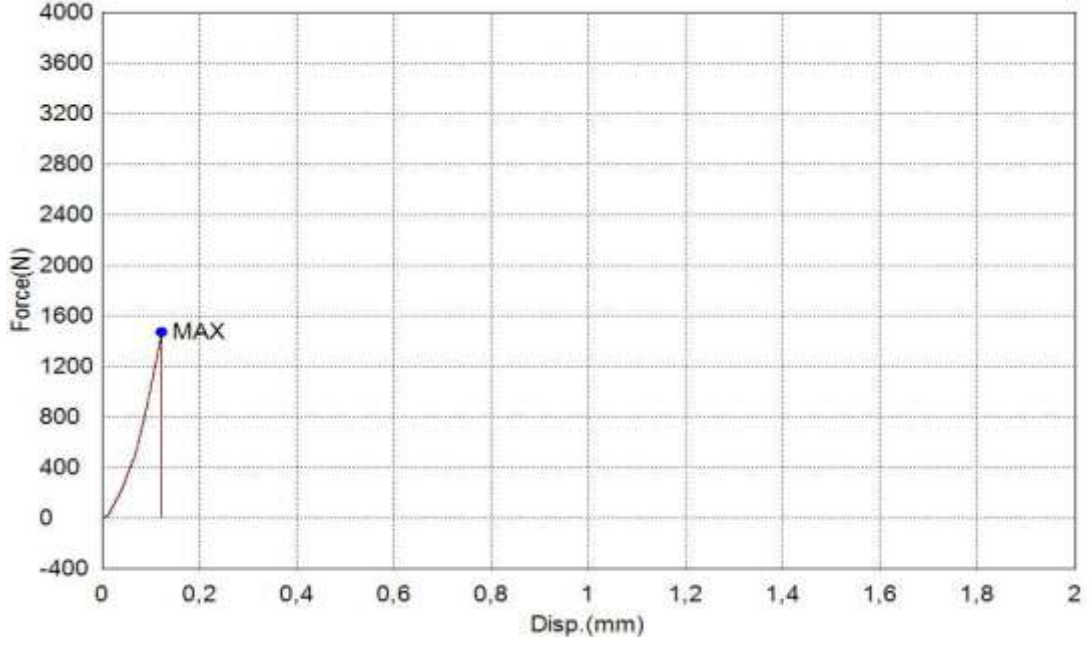
Numune Çeşitleri	F Max Kuvvet (N)	Max Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Max Çökme (mm)	Kırma Mukavemeti Mpa	L (mm)	b (mm)	h (mm)	l (mm)	E (Mpa)	16 Grup Numunenin Ortalaması Alınmış F Max (N) Değerleri	16 Grup Numunenin Ortalaması Alınmış E (Mpa) Değerleri
kt1	1329,77	34,8	0,11	64,626822	40,5	50	5	520,8333333	32.122,47		
kt1	1308,25	34,8	0,13	63,58095	40,5	50	5	520,8333333	26.740,68	1.697,73	32.441,54
kt1	1622,31	44,89	0,13	78,844266	40,5	50	5	520,8333333	33.160,08		
kt1	2130,6	58,96	0,15	103,54716	40,5	50	5	520,8333333	37.742,94		
kt2	1509,52	42,15	0,12	73,30662994	40,55	50,1	5	521,875	33.482,85		
kt2	2154,53	60,16	0,19	104,6301695	40,55	50,1	5	521,875	30.183,10	1.762,11	33.240,29
kt2	1466,99	39,8	0,13	71,2412589	40,55	50,1	5	521,875	30.036,45		
kt2	1917,41	52,03	0,13	93,11494072	40,55	50,1	5	521,875	39.258,75		
kt3	2455,16	64,47	0,23	120,5527865	41	50,1	5	521,875	29.369,45		
kt3	1443,43	37,9	0,17	70,87500599	41	50,1	5	521,875	23.360,96	1.692,18	28.485,54
kt3	1467,48	42,68	0,12	72,05590419	41	50,1	5	521,875	33.646,10		
kt3	1402,66	40,8	0,14	68,87312575	41	50,1	5	521,875	27.565,65		
kt4	1419,91	40,46	0,12	70,711518	41,5	50	5	520,8333333	33.828,59		
kt4	1863,88	53,12	0,15	92,821224	41,5	50	5	520,8333333	35.524,75	1.721,30	36.486,18
kt4	1668,47	45,01	0,12	83,088806	41,5	50	5	520,8333333	39.750,39		
kt4	1932,94	52,15	0,15	96,260412	41,5	50	5	520,8333333	36.841,00		
kt5	1345,75	34,85	0,13	68,63325	42,5	50	5	520,8333333	31.786,87		
kt5	1686,21	43,66	0,19	85,99671	42,5	50	5	520,8333333	27.251,15	1.444,94	31.154,92
kt5	1453,83	39,58	0,12	74,14533	42,5	50	5	520,8333333	37.201,39		
kt5	1293,95	35,22	0,14	65,99145	42,5	50	5	520,8333333	28.380,25		
BP2	1409,13	36,84	0,13	71,89094371	42,6	50,1	5	521,875	33.452,52		
BP2	1454,1	38,02	0,11	74,18522156	42,6	50,1	5	521,875	40.796,48	1.532,22	38.684,12
BP2	1497,22	41,92	0,12	76,38511617	42,6	50,1	5	521,875	38.505,74		
BP2	1768,41	49,52	0,13	90,22067784	42,6	50,1	5	521,875	41.981,76		
BP3	1790,37	49,46	0,15	91,9534032	42,8	50	5	520,8333333	37.431,98		
BP3	1498,67	41,4	0,11	76,9716912	42,8	50	5	520,8333333	42.727,22	1.595,41	41.050,91
BP3	1356,11	36,96	0,11	69,6498096	42,8	50	5	520,8333333	38.662,82		
BP3	1736,48	47,32	0,12	88,1856128	42,8	50	5	520,8333333	45.381,60		
KT6	1204,68	31,11	0,16	62,03741317	43	50,1	5	521,875	23.897,33		
KT6	1490,26	38,49	0,18	76,74392814	43	50,1	5	521,875	26.277,69	1.409,14	29.009,67
KT6	1406,7	38,68	0,12	72,44083832	43	50,1	5	521,875	37.206,42		
KT6	1534,92	42,2	0,17	79,04378443	43	50,1	5	521,875	28.657,25		
BP4	1388,23	36,91	0,11	71,8221988	43,2	50,1	5	521,875	40.617,41		
BP4	1761,36	46,83	0,12	91,1266491	43,2	50,1	5	521,875	47.240,05	1.571,36	39.986,57
BP4	1527,74	43,72	0,14	79,03996168	43,2	50,1	5	521,875	35.120,84		
BP4	1608,09	46,02	0,14	83,19699162	43,2	50,1	5	521,875	36.967,99		
BP5	1382,18	41,94	0,12	71,67472335	43,3	50,1	5	521,875	37.328,40		
BP5	1388,44	42,13	0,15	71,99934371	43,3	50,1	5	521,875	29.997,97	1.506,32	35.735,04
BP5	1803,46	54,83	0,16	93,52074012	43,3	50,1	5	521,875	36.529,40		
BP5	1447,2	44,006	0,12	75,04641916	43,3	50,1	5	521,875	39.084,38		
BP6	1367,22	38,6	0,16	72,189216	44	50	5	520,8333333	29.116,32		
BP6	1537,34	43,5	0,13	81,171552	44	50	5	520,8333333	40.294,39	1.526,94	34.975,18
BP6	1602,17	45,88	0,15	84,594576	44	50	5	520,8333333	36.394,47		
BP6	1601,03	45,85	0,16	84,534384	44	50	5	520,8333333	34.095,53		
BA2	1596,1	49,16	0,16	86,1894	45	50	5	520,8333333	36.361,15		
BA2	1634,77	50,35	0,13	88,27758	45	50	5	520,8333333	45.836,44	1.646,26	42.922,06
BA2	1502,61	42,39	0,11	81,14094	45	50	5	520,8333333	49.791,03		
BA2	1851,56	52,23	0,17	99,96424	45	50	5	520,8333333	39.699,62		
BA3	1471,6	39,5	0,12	82,99824	47	50	5	520,8333333	50.928,64		
BA3	1725,63	46,32	0,16	97,325532	47	50	5	520,8333333	44.790,02	1.597,86	47.625,23
BA3	1490,23	41,67	0,13	84,048972	47	50	5	520,8333333	47.606,20		
BA3	1703,96	47,64	0,15	96,103344	47	50	5	520,8333333	47.176,06		
BA4	1617,24	45,13	0,14	91,99868263	47,5	50,1	5	521,875	49.421,91		
BA4	1550,29	43,26	0,16	88,1901497	47,5	50,1	5	521,875	41.463,96	1.553,86	41.342,80
BA4	1467,13	41,17	0,17	83,45949102	47,5	50,1	5	521,875	36.922,64		
BA4	1580,78	44,36	0,18	89,92461078	47,5	50,1	5	521,875	37.572,67		
BA5	1545,43	41,8	0,14	89,016768	48	50	5	520,8333333	48.832,06		
BA5	1628,83	44,06	0,16	93,820608	48	50	5	520,8333333	45.033,89	1.622,41	46.005,17
BA5	1550,31	41,25	0,18	89,297856	48	50	5	520,8333333	38.100,42		
BA5	1765,08	46,96	0,15	101,868608	48	50	5	520,8333333	52.054,33		
BA 6 TEK	1730,71	44,54	0,15	100,0080928	48,25	50,1	5	521,875	51.738,91	1.600,75	53.404,85
BA 6 TEK	1470,79	37,85	0,12	85,158741	48,25	50	5	520,8333333	55.070,80		

3.2.2 Numunelerin Bası Deneyi Kuvvet-Deplasman Grafik Örnekleri

Bası deneyinin tamamlanmasının ardından deney cihazı bilgisayarından alınan F_{max} ve max gerilme dayanımı değerleriyle Şekil 2.49 nolu grafik çizilmiş, ortalama F_{max} ve max gerilme dayanımı değerleri gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 2.50’ de 10 mm boyutlarındaki 6 grup numuneye ait kuvvet-deplasman grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler numunelerin F_{max} ve max gerilme dayanımı değişimine göre dayanımlarını tespit edebilme ve bu durumları karşılaştırabilme imkanı sağlamıştır.



Şekil 3.9 Bası deneyi sonuçlarını gösteren örnek grafik



Şekil 3.10 Eğme testi sonuçlarını gösteren örnek grafik

Bu sonuçları bütün olarak tabloya yansıtırsak aşağıdaki sonuç çıkmaktadır

Tablo 3.6 Eğme testi yapılmış olan 16 grup numunenin kuvvet-elastisite değerleri

Malzeme Türü	F Max (N)	Elastisite Modülü (Gpa)
KT1	1.597,73	32,44
KT2	1.762,11	33,24
KT3	1.692,18	28,48
KT4	1.721,30	36,48
KT5	1.444,94	31,15
KT6	1.409,14	29,00
BP2	1.532,22	38,68
BP3	1.595,41	41,05
BP4	1.571,36	39,98
BP5	1.505,32	35,73
BP6	1.526,94	34,97
BA2	1.646,26	42,92
BA3	1.597,86	47,62
BA4	1.553,86	41,34
BA5	1.622,41	46,00
BA6 TEK	1.600,75	53,40

Bu sonuçları bütün olarak tabloya yansıtırsak aşağıdaki sonuç çıkmaktadır

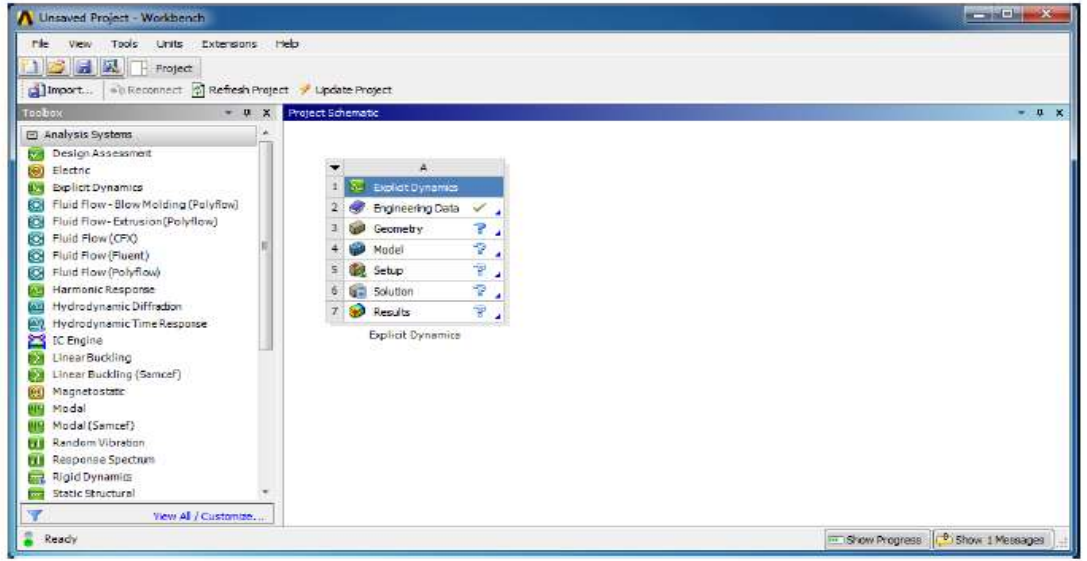
Tablo 3.7 Numunelerin ortalama kuvvet, bası gerilmesi değerleri

Malzeme Türü	Ortalama F Max (N)	Ortalama Bası Mukavemeti (N/mm²)
KT1	34.421,15	223,51
KT2	29.581,50	155,29
BP3	11.985,63	66,05
BP6	28.080,15	145,34
BA5	12.643,29	67,46

BÖLÜM DÖRT

ANSYS ANALİZ ADIMLARI

Ansyes (WorkBench_R15) programının Explicit Dynamics modülü kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Çünkü çalışılan problem bir çarpma problemi olup darbeli yükleme söz konusudur.





Şekil 4.1 Explicit Dynamics modülü başlangıç vaziyeti



4.1 Malzeme Özelliklerinin Girilmesi

Bu bölümde modeli oluşturulan parçaların malzeme atamaları yapılır. Bu analiz kapsamında seramik plaka ve vurucu olmak üzere 2 farklı malzeme olup bunlara ait elastisite modülü, poisson oranı ve yoğunluk değerleri bu aşamada programa girilmiştir.

- Vurucu kütle fiziksel ve mekanik özellikleri:
- Malzeme: Yapı çeliği
- Yoğunluk: 7850 kg/m^3
- Elastisite Modülü: 200 GPa –
- Poisson Oranı: 0,3
- Kütle Ağırlık: 3,31 kg

- Seramik Plaka fiziksel ve mekanik özellikleri:
- Malzeme: Teknik seramik
- Yoğunluk: 2500 kg/m³
- Elastisite Modülü: 55 GPa
- Poisson Oranı: 0,27
- Kritik bası mukavemeti: 338 MPa
- Kritik çeki mukavemeti: 240 MPa

Outline of Schematic A2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data	<input checked="" type="checkbox"/>	Source	Description
2	Material			
3	 kutie2	<input type="checkbox"/>	General_Mate	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4	 karo	<input type="checkbox"/>		
*	Click here to add a new material			

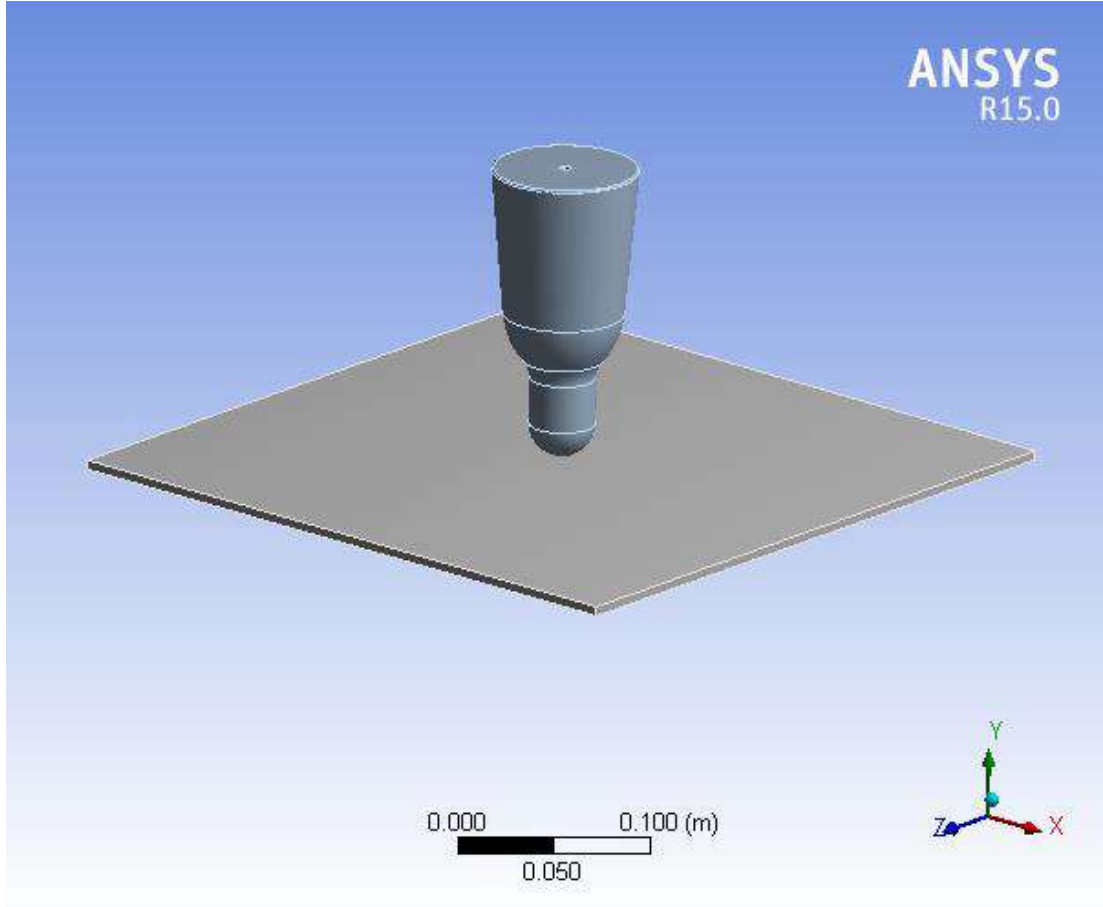
Properties of Outline Row 4: plaka					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	 Density	2500	kg m ⁻³	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	 Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Derive from	Young's M...			
5	Young's Modulus	5.5E+10	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Poisson's Ratio	0.27		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Bulk Modulus	3.9855E+10	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Shear Modulus	2.1654E+10	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Şekil 4.2 Malzeme özelliklerinin programa girilmesi

Bu aşamada program içerisinde henüz bir model yoktur. Burada sadece kullanılacak olan malzeme özellikleri girilmektedir. Model oluşturulduktan veya içeri aktarıldıktan sonra her bir malzemeye buradaki malzemeler atanmalıdır.

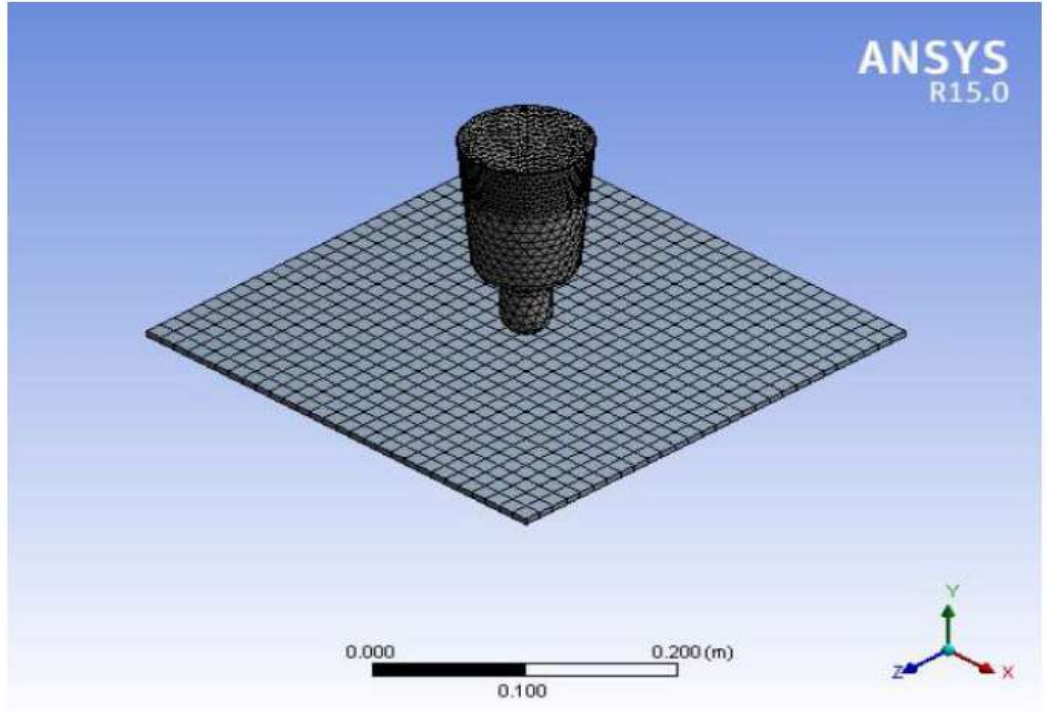
4.1.1 Analiz İçin Katı Modelin Hazırlanması

Ansys programı içerisinde yer alan tasarım oluşturucu aracıyla her ne kadar istenilen model oluşturulabilse de harici herhangi bir 3B tasarım programıyla da model yaratılıp Ansys içerisine sonradan aktarılabilir. Bu projede kullanılan katı model, Solidwork programında oluşturulmuş ve sonradan Ansys içerisine aktarılmıştır.



Şekil 4.3 Solidworks'te oluşturulan modelin Ansys içine aktarılmış hali

Üzerinde çalışılan model karmaşık bir geometride olmadığından dolayı standart mesh işlemi yapılmıştır. Programın otomatik oluşturduğu mesh'e müdahalede bulunulmamıştır.



Şekil 4.4 Mesh atıldıktan sonra modelin görünüşü

Yaklaşık olarak eleman sayısı 15000'dir. Bir önceki aşamada programa girilen malzeme özellikleri, modelin programa aktarılmasının ardından her bir katı kütle için artık atanabilir. Bunun için proje ağacında, geometri başlığı altında görülen tüm kütlelere ayrı ayrı sağ tıklanıp istenilen malzeme seçilebilir. İlk adımda malzeme özellikleri girildiği için sağ tuşla açılacak kutucukta malzemeler otomatik olarak tanımlanmaya uygun olarak sunulacaktır.

4.2 Ayarlar

Analizin en önemli aşamasıdır; zira başlangıç şartları, etkiyen kuvvetler-ivmeler, mesnet noktaları, analizin sürdürüleceği zaman vs. bu aşamada sisteme girilir. Öncelikle Explicit Dynamics üzerinde sağ tuş menüsünden yerçekimi ivmesi eklenir. Program rastgele bir eksen doğrultusunda bu ivmeyi ekleyecektir; bu yönün aşağı doğru olduğunun kontrolü muhakkak yapılmalıdır. İkinci olarak ise yine aynı yerden mesnet özellikleri girilir. Söz konusu problemde analizi yapılacak seramik numunenin genel kullanımı göz önüne alındığında alt taraftan sabit mesnetleme yapılmasının doğru olacağı düşünülmüştür.

4.2.1 Varsayım ve Kabuller

Problem, serbest düşme problemidir. Analiz süresini belirleyen temel faktörlerden bir tanesinin “end time” yani çözümün yürütüleceği zaman olduğu göz önüne alındığında yüksek konumdan düşen serbest cismin havadaki seyri boyunca Ansys’e çözüm yaptırmak lüzumsuz olmakla beraber analiz süresini ciddi anlamda uzatan bir durumdur. Öyle ki bu süre on saati aşkın olabilir. Yapılacak olan basit bir kabul, çözümü etkilemeden analiz süresini oldukça kısaltabilir. Cismin, örnek verirse, 100 cm’den serbest düşmesi yerine 5 cm’den ilk hızla fırlatılması fiziksel olarak aynı şeydir. Cisme uygulanması gereken ilk hız değeri ise kinematik bağıntılardan rahatlıkla tespit edilebilir. ($x = \frac{1}{2}at^2$) temel bağıntısıyla cismin yere düşme zamanı, $V = at$ bağıntısıyla ise bu süre sonunda cismin ulaşacağı hız değeri bulunabilir. Cisim yani vurucu, plakaya Ansys ortamında 1-2 mm gibi ihmal edilebilecek mesafeden fırlatılacağından yukarıdaki bağıntılardan elde edilen hız değeri, ilk hız olarak programa girilebilir. Bunun için; “initial conditions” sağ tuş menüsü altından hız düğmesi tıklanır ve hızın etkiye yönü ile hızın hangi kütleyle etkiyeceği tanımlanır

Tablo 4.5 Hız girdisine ait detay parametreleri

Hız Detayı	Hız Geometrisi	Girilen Hız Yönü	Hız Yönü	Uygulanan Hız
Dikey	Dikey	Dikey	Dikey Vektör	0. m/s

Burada hızın büyüklüğü 2 yöntemle tanımlanabilir. Birincisi vektör, ikincisi “component”- bileşen. Bu çalışmada hız, ikinci yönteme göre tanımlanmış olup tek bir bileşene (-y yönünde) hız büyüklüğü girilmiştir. Ayarlar aşaması altında yapılan son ayar ise “end time” süresinin ayarlanmasıdır. Buraya girilecek değer, analiz süresini ciddi miktarda etkilemektedir. Söz konusu problemde vurucu kütle, seramik

plakaya çok yakın mesafeden ilk hızla bırakıldığından seyir süresi yok denecek kadar azdır. Fakat girilen süre değerinin, çarpışmanın plaka üzerindeki etkilerini gözlemleyebilecek kadar da yeterli uzunlukta olmasına dikkat edilmelidir. Yapılan toplam 2 analizin tamamında da bu değer 1e-3 sn olması uygun görülmüştür.

Analiz neticesinde görmek istediğimiz deformasyon, gerilme vs. gibi büyüklüklerin seçimi ve tarifi yapılır. Bu çalışma kapsamında minimum asal gerilme, maksimum asal gerilme, eşdeğer gerilme ve n-emniyet katsayısı değeri (Coulomb Kriteri'ne göre) hesaplatılmıştır. Güvenlik faktörü değeri, Coulomb Kriteri Teorisi'ne göre hesaplatılacaktır. Bu bağlamda programa kritik çeki-bası mukavemet değerlerini girmemiz şarttır. Bu bilgiler aşağıdaki ekranda gözüktüğü şekliyle girilmiştir.

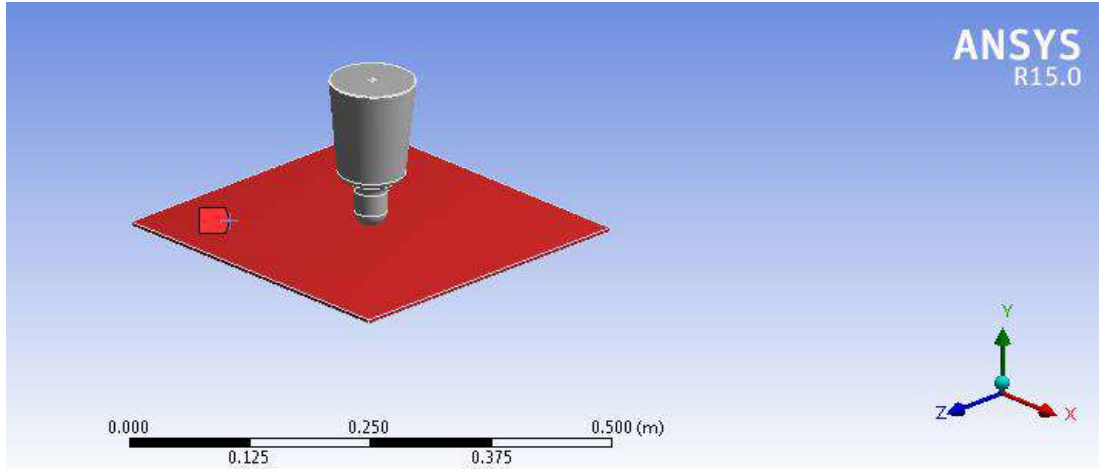
Tablo 4.6 Coulomb kriteri için girilmesi gereken bası-çeki kritik mukavemet değerleri

Uygulanan Kriter	Uygulanan Çeki Gerilmesi	Uygulanan Bası Gerilmesi
Coulomb Gerilmesi	2.4 e +008 Pa	3.38 e +008 Pa

Çözüm aşamasında önemli bir husus, analize dahil edilecek cisimlerin belirlenmesidir. Varsayılan Olarak Ansys, sistemdeki bütün cisimleri analiz eder; fakat söz konusu problemde olduğu gibi genelde sadece bir cismin analiz sonuçları merak edilir. Bu problemde vurucu kütlede oluşan gerilmelerden ziyade plaka üzerinde oluşan gerilmeler ve plakaya dair emniyet katsayısı vs. merak konusudur. Kaldı ki deney numunesi de zaten plakadır. Ansys'in istenilen kütleli analiz dışı tutma özelliği sayesinde bu sağlanabilir.

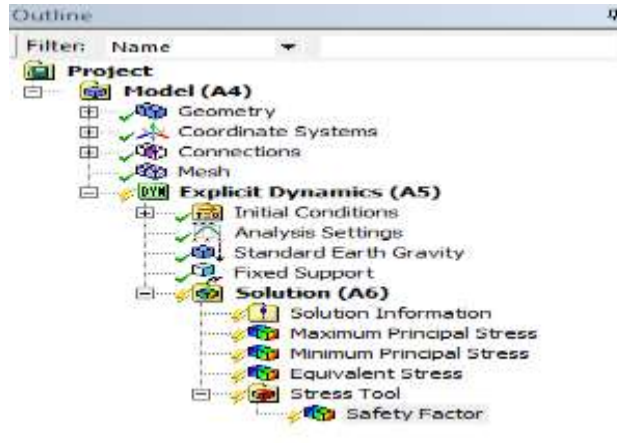
3,31 kg ağırlığı olan vurucu kütle, 2 farklı yükseklikten atılmak suretiyle toplam 2 adet analiz gerçekleştirilmiştir. Bu kütle sırasıyla 100 ve 300 cm yüksekliklerinden bırakılmıştır. Her bir analiz için maksimum asal gerilme, minimum asal gerilme, eşdeğer gerilme ve güvenlik faktörü değerleri hesaplatılmıştır. Burada bahsedilen

güvenlik faktörü grafiklerde emniyet katsayısı şeklinde gösterilmiştir. Tüm analizlerden gelen gerilme değerleri ise tabloda karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



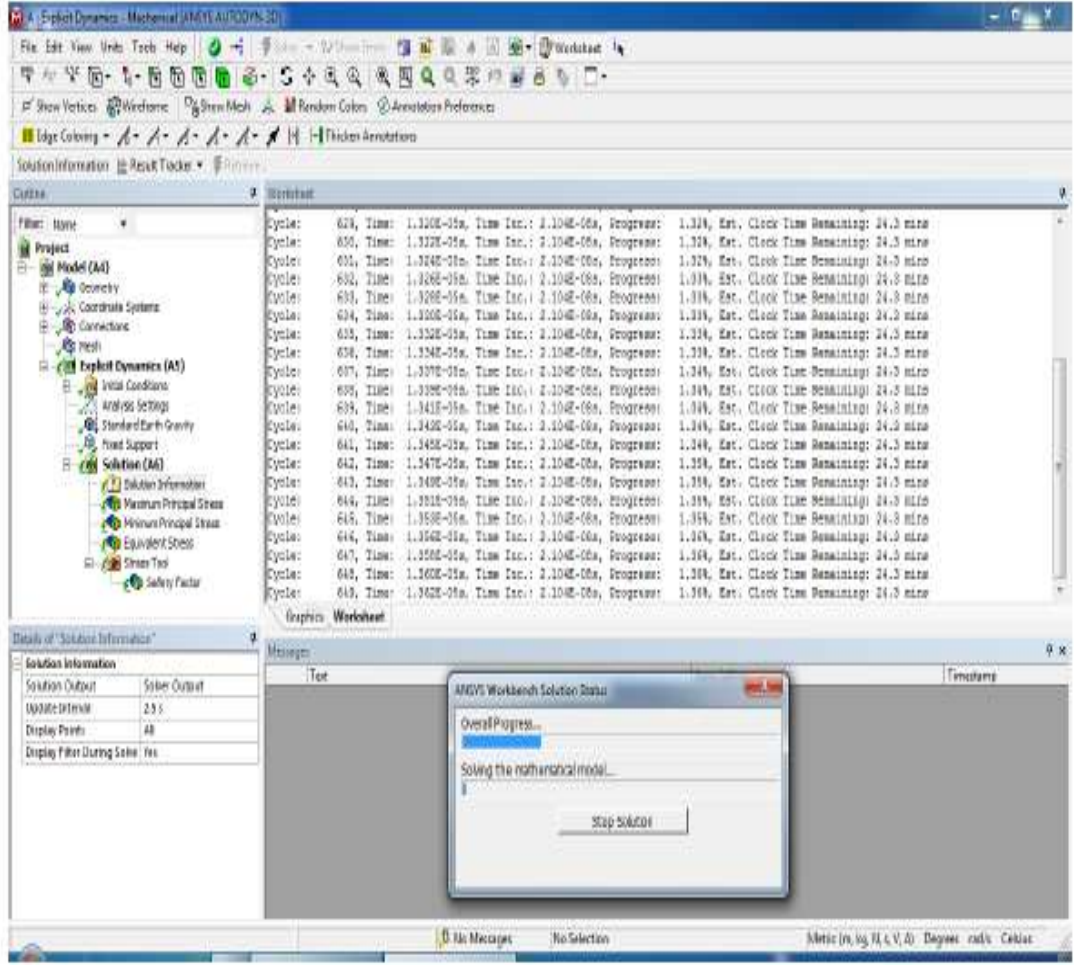
Şekil 4.5 Analiz kapsamındaki cisim- koyu renkte olan seramik plaka-

Analiz için tüm gerekli ayarlamalar yapıldıktan sonra proje ağacında görünüm şu şekilde olacaktır:



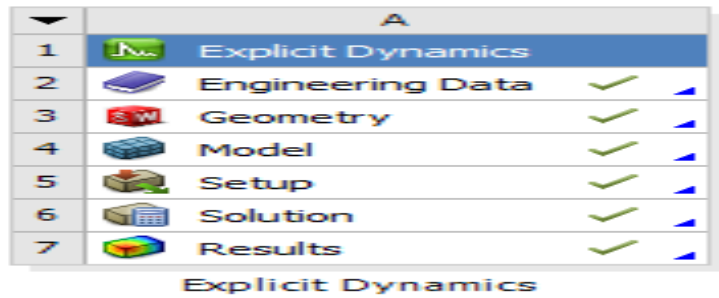
Şekil 4.6 Gerekli ayarlar sonrası proje ağacı görünümü

Bu noktada üzerinde çalışılan Ansys dosyası kaydedilir ve A6-Çözüm başlığı üzerinde sağ tıklanıp “çöz” komutu verilerek analiz işlemi başlatılır. Analiz süresinde, “çözüm bilgileri” başlığı tıklanırsa kalan süre ve diğer birtakım bilgiler anlık olarak takip edilebilir.



Şekil 4.7 Çözüm esnasında Ansys bilgi ekranı

Analiz tamamlandıktan sonra, Ansys ana paneline dönüş yapıldığında, çözümün hatasız tamamlaması durumunda Explicit Dynamics modülüne ait pencerede çözüm adımları karşısında yeşil tik işareti görülecektir. Bu dosya kaydedilip ek klasörüyle birlikte taşınırsa istenilen zamanda ve bilgisayarda dosya açılarak çözüm sonuçlarına erişilebilir.



Şekil 4.8 Analiz sonrası Explicit Dynamics modülü

BÖLÜM BEŞ

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde darbeli yükleme kapsamında 3,31 kg ağırlığındaki vurucu kütle, 2 farklı yükseklikten serbest düşmeye bırakılmıştır. Bu kütle sırasıyla 100 ve 300 cm yüksekliklerinden bırakılmıştır ve her bir analiz için maksimum asal gerilme, minimum asal gerilme, eşdeğer gerilme ve güvenlik faktörü değerleri hesaplatılmıştır.

Güvenlik faktörü eğrilerinden de görüldüğü üzere güvenlik faktörünün hiçbir zaman 1'in altına düşmediği durumlarda- yani plakanın hasara uğramadığı durumlarda- emniyet katsayısı, minimum değerini gördükten sonra vurucunun yükünü çekmesiyle beraber yavaş yavaş yükselişe geçmekte ve nihayetinde tekrar maksimum değerine ulaşmaktadır. Aksi durumlarda, yani hasarın görüldüğü durumlarda ise, güvenlik faktörü değeri tekrar asla çarpışma öncesi durumuna kadar yükselmediği tespit edilmiştir. Bunun sebebi hasar gerçekleştiğinden sonra plaka üzerinde oluşacak gerilme değerleri, ilk durumunkinden farklı olacaktır. Coulomb Kriteri'ndeki iki değişken olan max. asal gerilme ve min. asal gerilme değerleri bu tipteki gerilmelerdir.

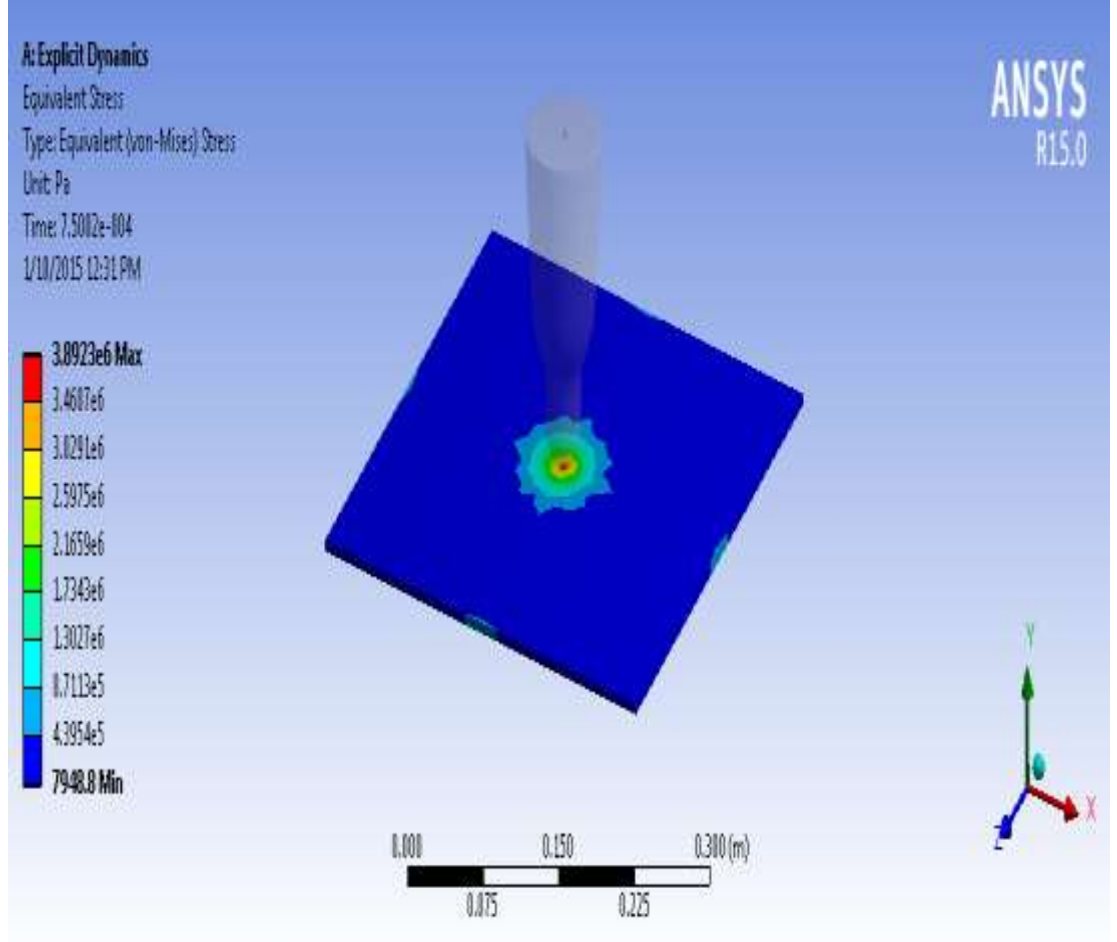
Tablo 5.1 de görüldüğü üzere 300 cm yükseklik seramik plakanın maksimum asal gerilme, minimum asal gerilme, eşdeğer gerilme ve güvenlik faktörü değerlerine olumsuz etki yapmış 100 cm yükseklik değerine göre dayanım kriterlerinin azaldığı görülmüştür.

Tablo 5.1 Ansys'te hesaplanan ortalama gerilme-güvenlik faktörü değerleri

Hesaplama Kriterleri	100 cm Yükseklik	300 cm Yükseklik
Eşdeğer Gerilme	0,01 MPa-3,89 MPa	0,01 MPa-8,92 MPa
Kırılma Anı Güvenlik Faktörü	1,24	0,39
Maksimum Asal Gerilme	-23,15 MPa	-61233 MPa
Min. Asal Gerilme	12901 MPa	27389 MPa

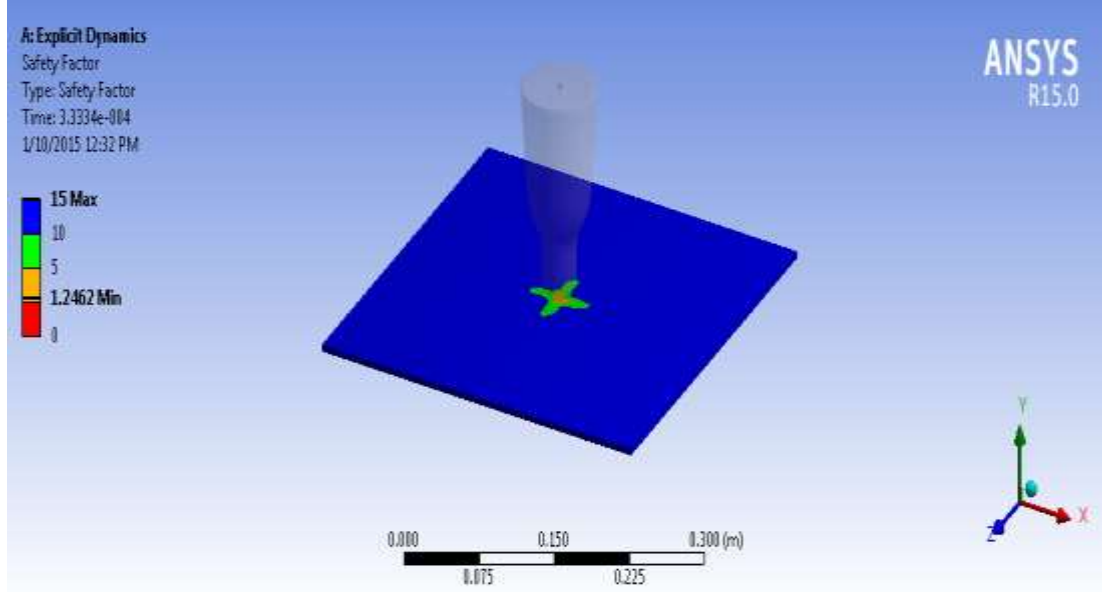
5.1 Analiz Sonuçları (1 Metre Yükseklik)

Aşağıda görülen koyu renk kısımlar gerilmenin en düşük, açık renk kısımlar ise gerilmenin en yüksek olduğu kısımları belirtmektedir. Ayrıca yatay eksen zaman, dikey eksen gerilme değerlerini göstermektedir.



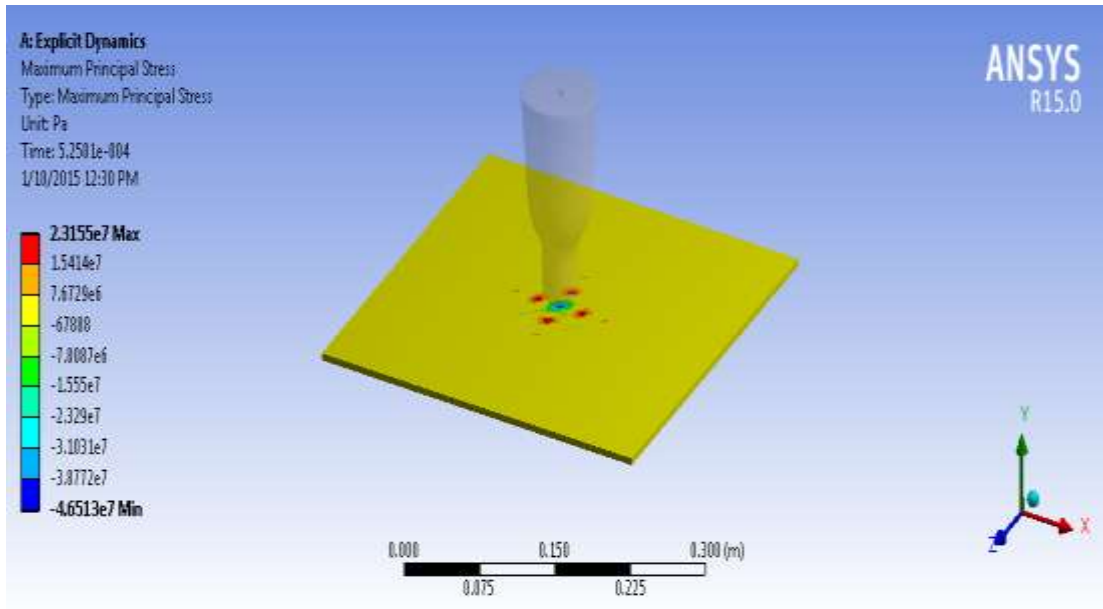
Şekil 5.1 Eşdeğer gerilme dağılımı

Aşağıda görülen koyu renk kısımlar kırılma anı güvenlik faktörünün en yüksek, açık renk kısımlar ise kırılma anı güvenlik faktörünün en düşük olduğu kısımları belirtmektedir. Ayrıca yatay eksen zaman, dikey eksen gerilme değerlerini göstermektedir.



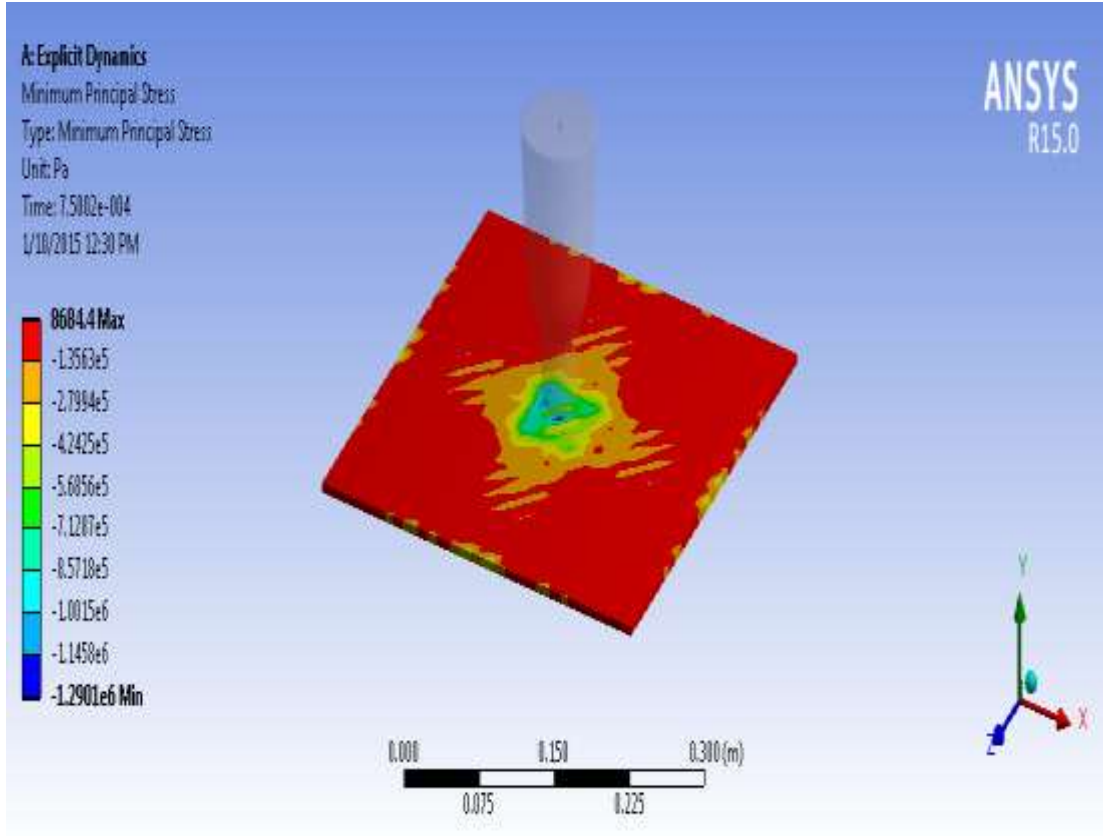
Şekil 5.2 Kırılma anı güvenlik faktörü dağılımı

Aşağıda görülen koyu renk kısımlar maximum asal gerilme değerinin düşük, açık renk kısımlar ise maximum asal gerilme değerinin en yüksek olduğu kısımları belirtmektedir. Ayrıca yatay eksen zaman, düşey eksen gerilme değerlerini göstermektedir.



Şekil 5.3 Maksimum asal gerilme dağılımı

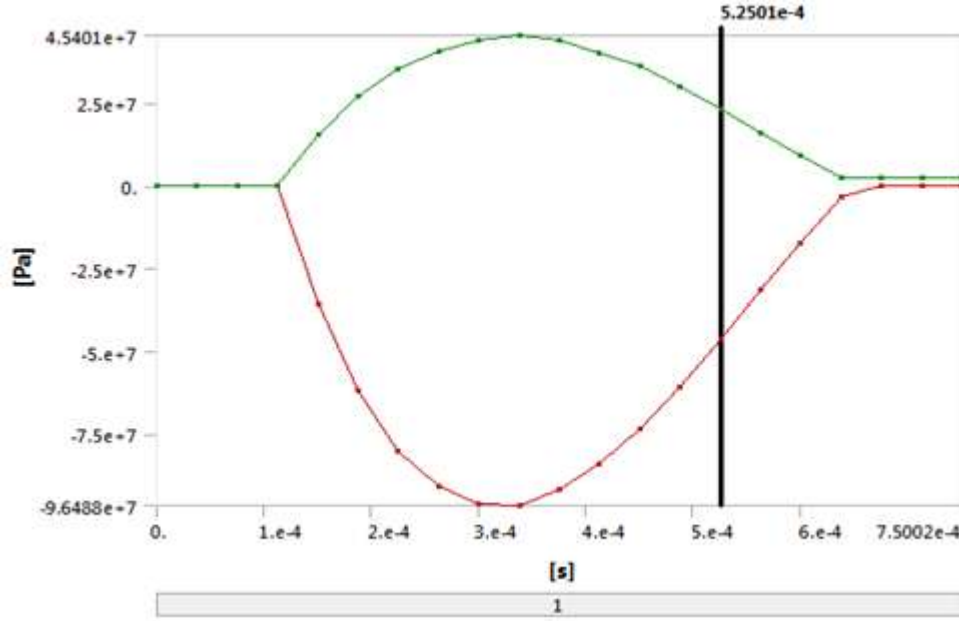
Aşağıda görülen koyu renk kısımlar minimum asal gerilme değerinin en yüksek, açık renk kısımlar ise minimum asal gerilme değerinin düşük olduğu kısımları belirtmektedir. Ayrıca yatay eksen zaman, düşey eksen gerilme değerlerini göstermektedir.



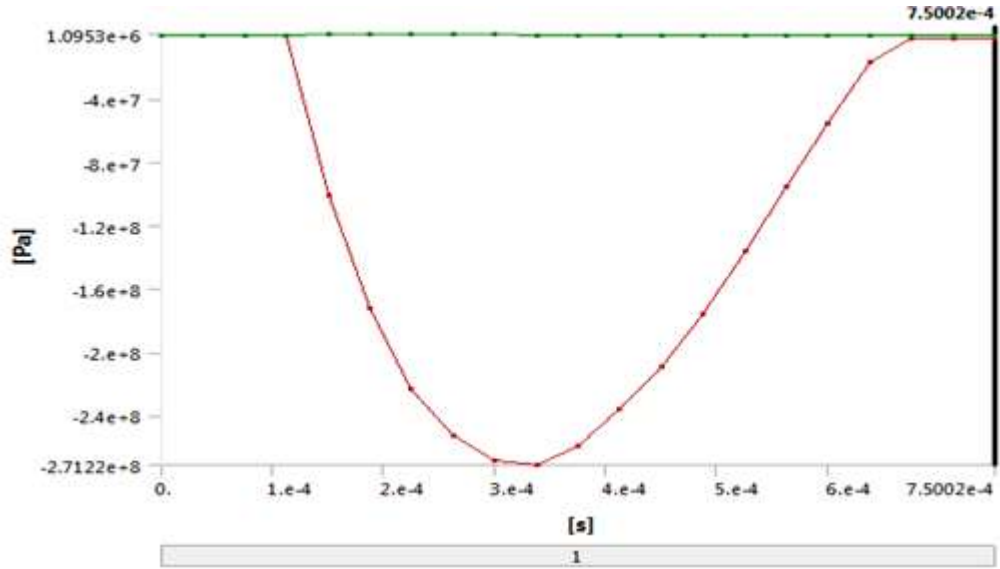
Şekil 5.4 Minimum asal gerilme dağılımı

3,31 kg kütleli vurucunun analiz sonuçları

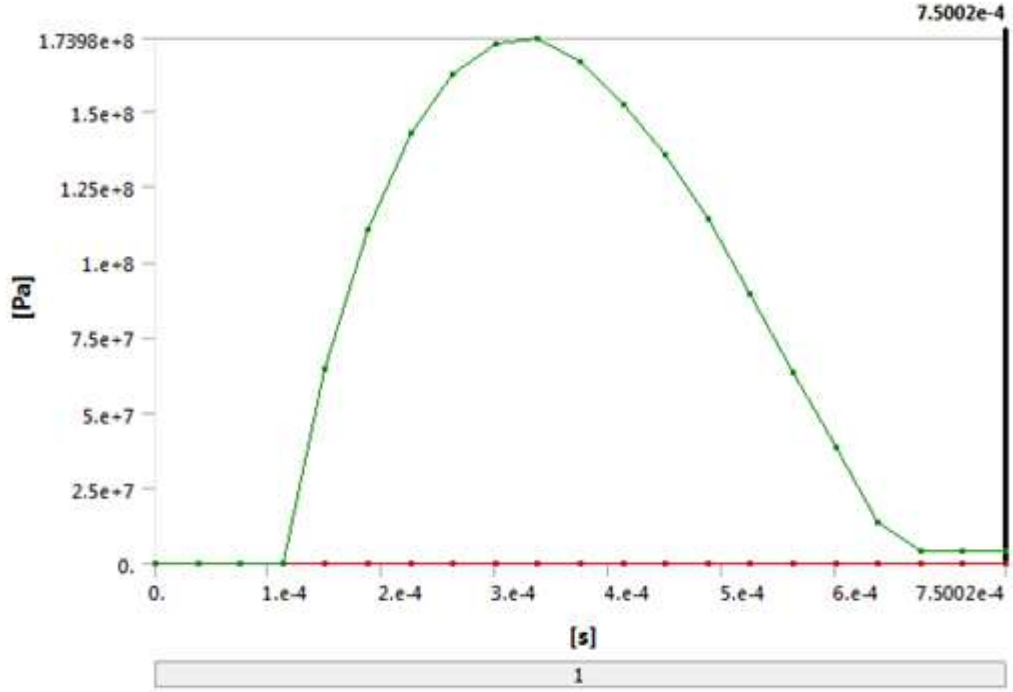
- 100 cm'den düşme durumu



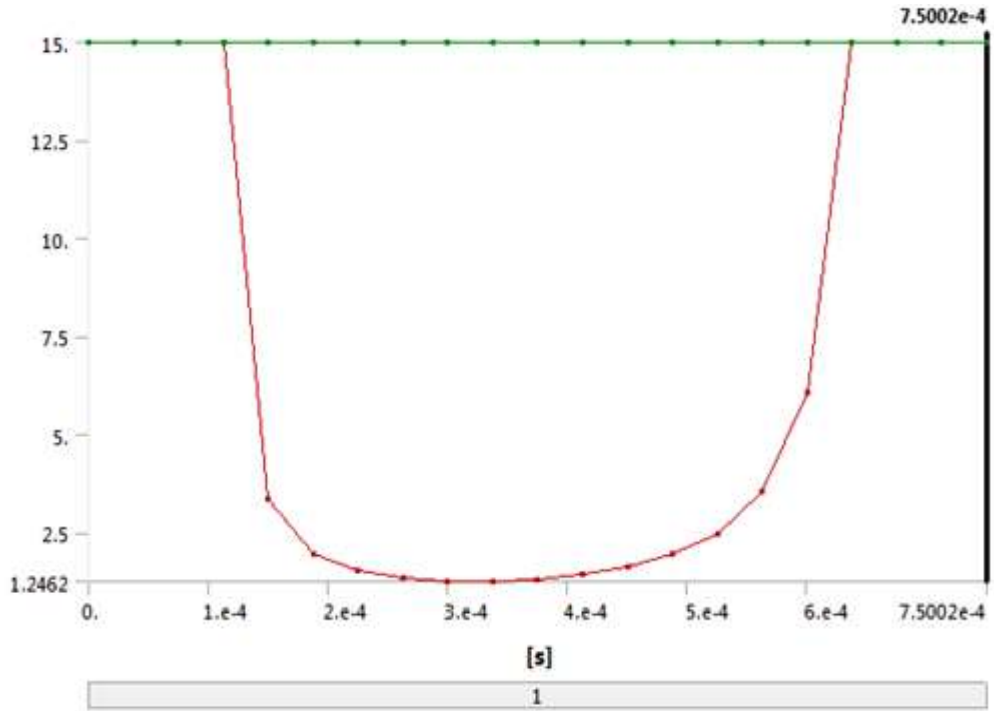
Şekil 5.5 Maksimum asal gerilme



Şekil 5.6 Minimum asal gerilme

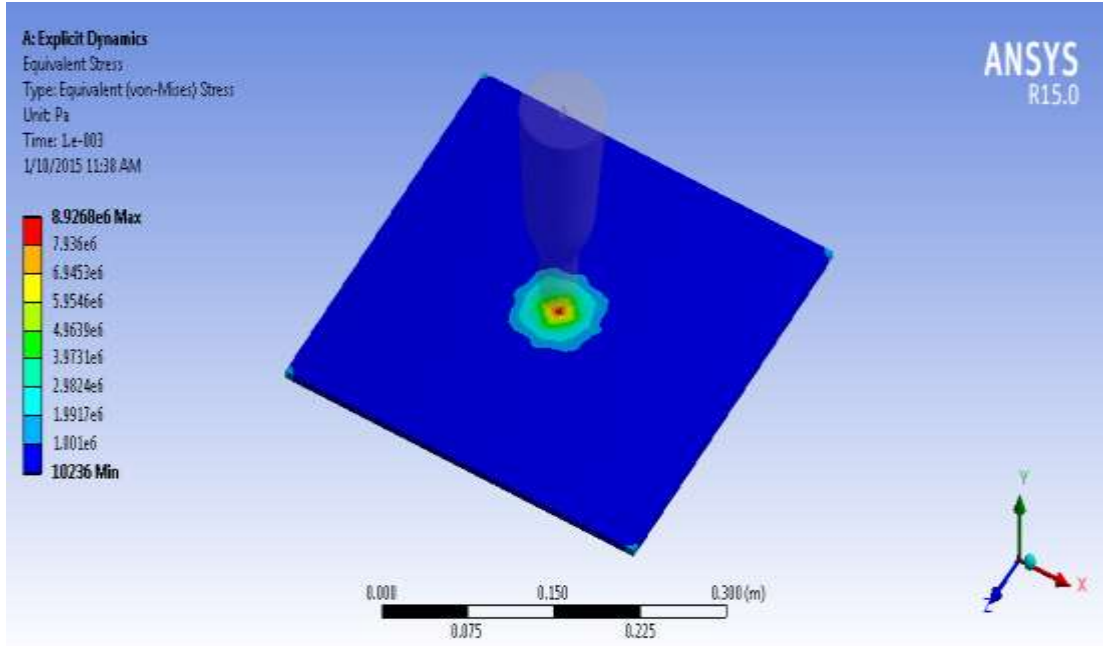


Şekil 5.7 Eşdeğer gerilme

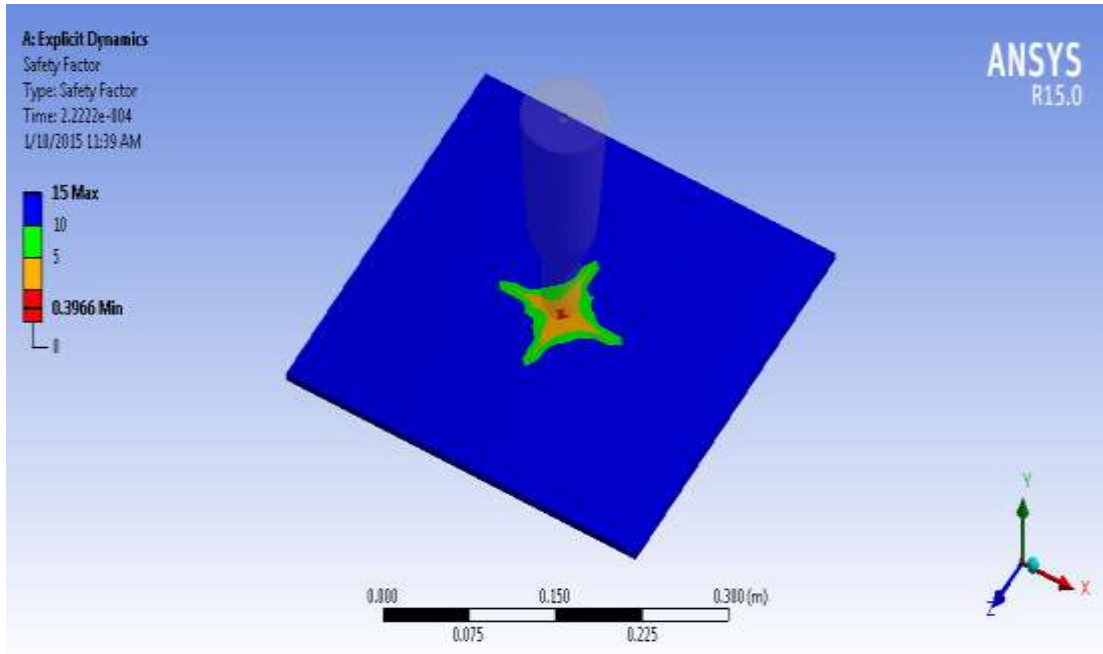


Şekil 5.8 Emniyet katsayısı (3,31 kg-100 cm için)

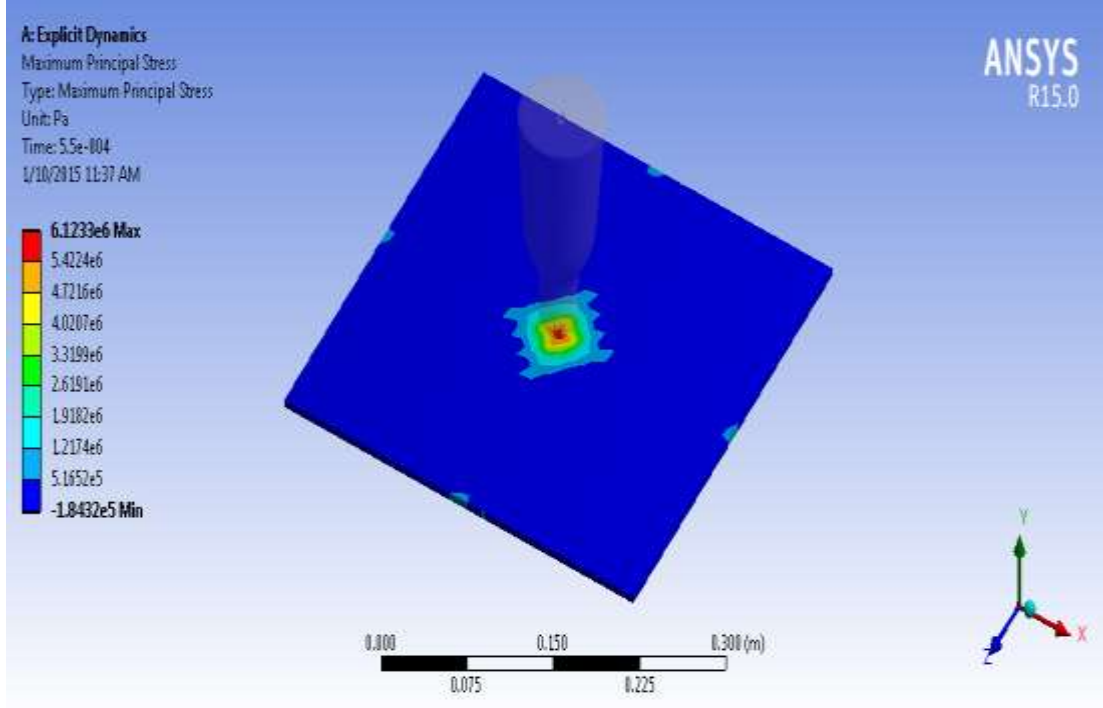
5.2 Analiz Sonuçları (3 Metre Yükseklik)



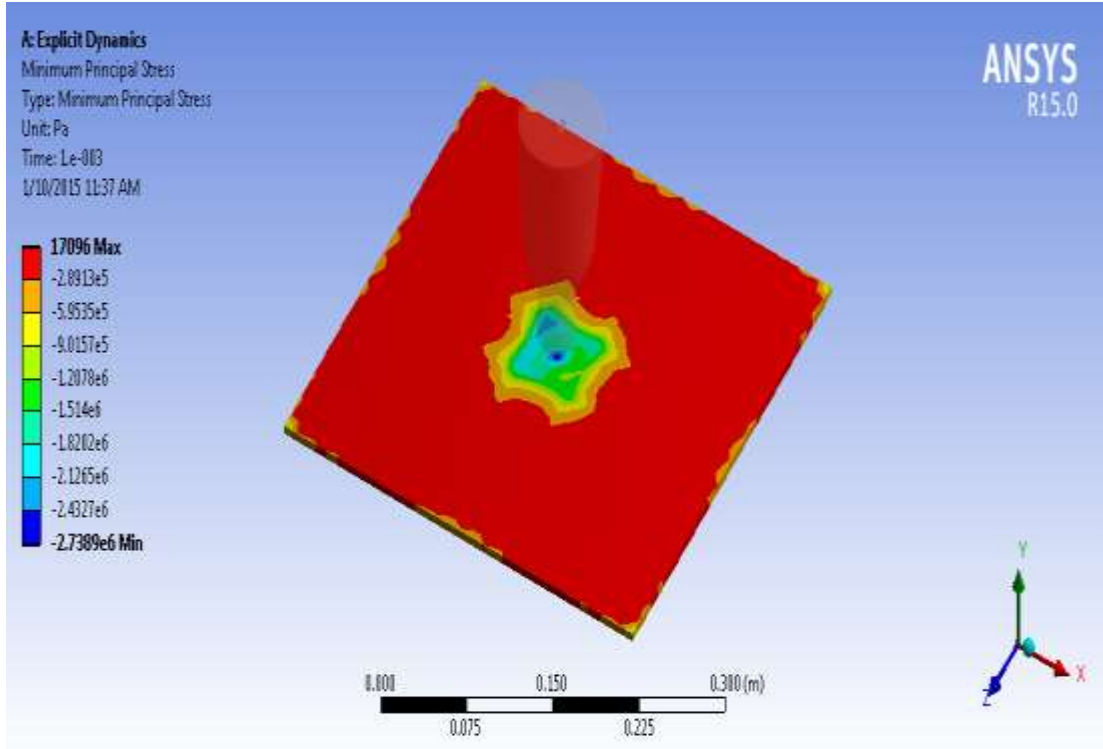
Şekil 5.9 Eşdeğer gerilme dağılımı



Şekil 5.10 Kırılma anı güvenlik faktörü dağılımı



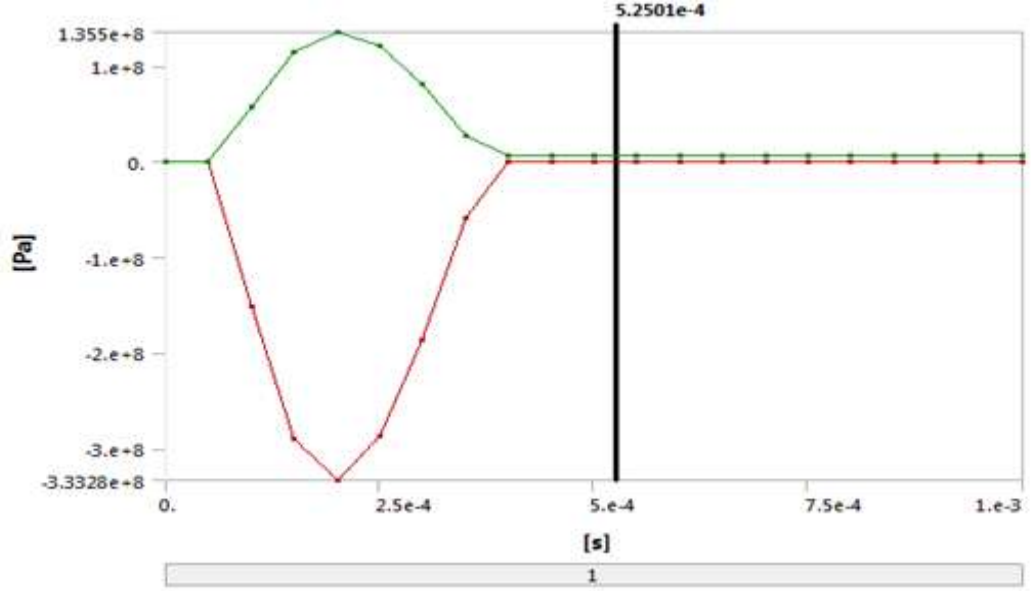
Şekil 5.11 Maksimum asal gerilme dağılımı



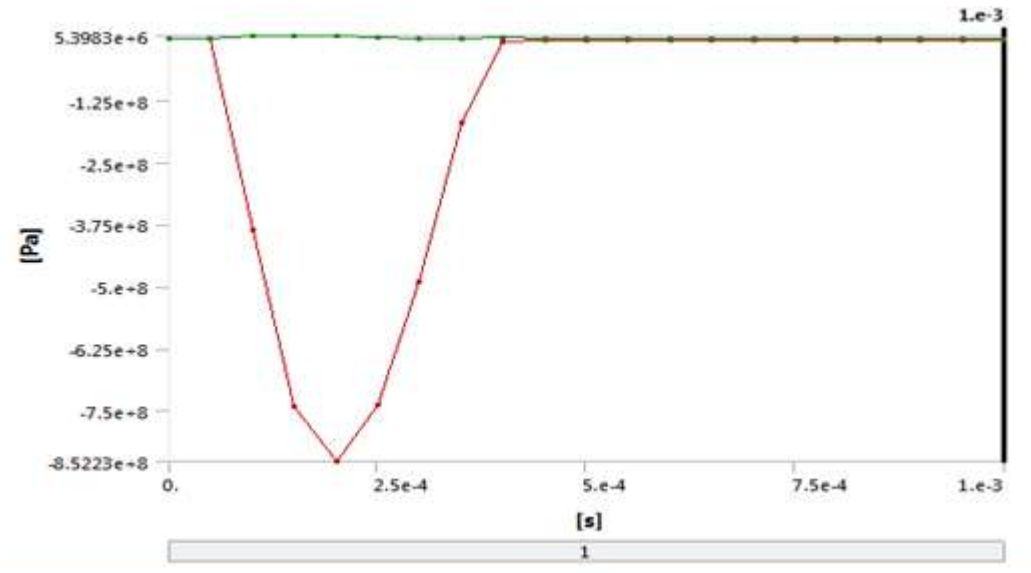
Şekil 5.12 Minimum asal gerilme dağılımı

3,31 kg kütleli vurucunun analiz sonuçları

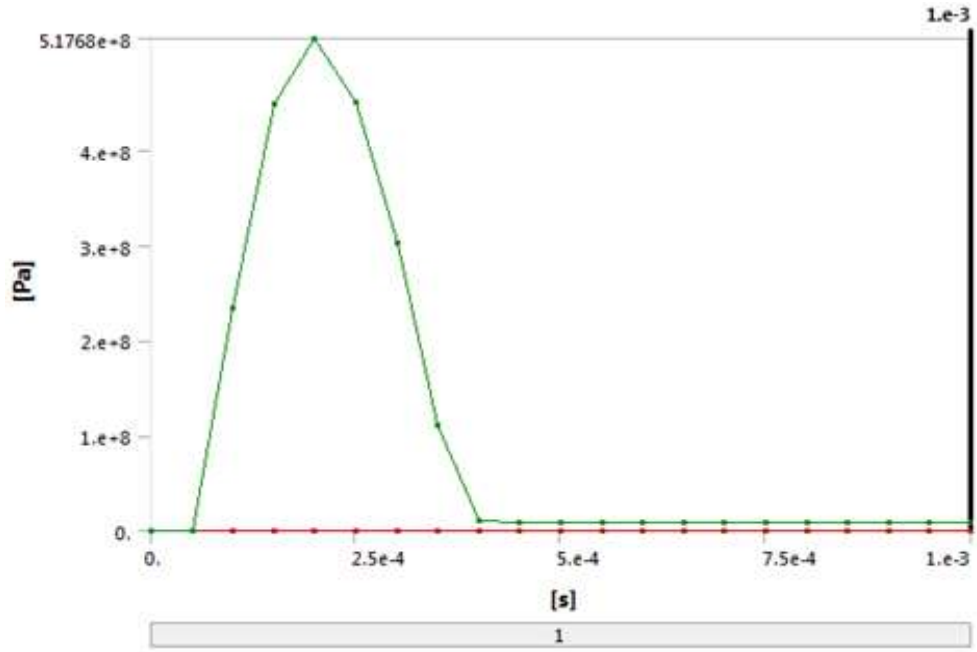
- 300 cm'den düşme durumu



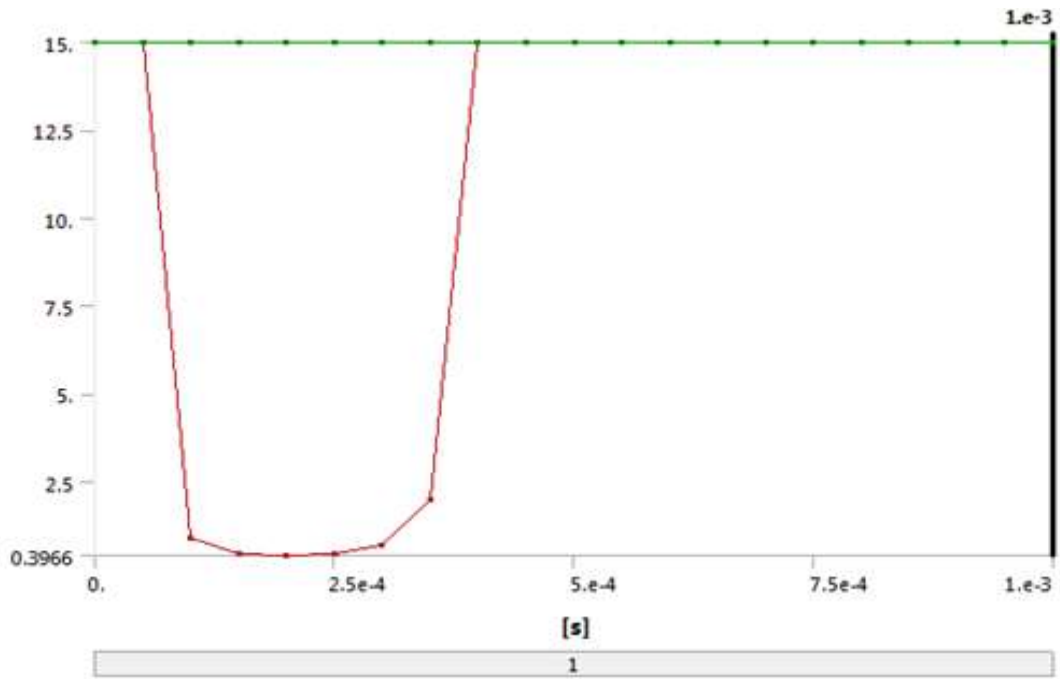
Şekil 5.13 Maksimum asal gerilme



Şekil 5.14 Minimum asal gerilme



Şekil 5.15 Eşdeğer gerilme

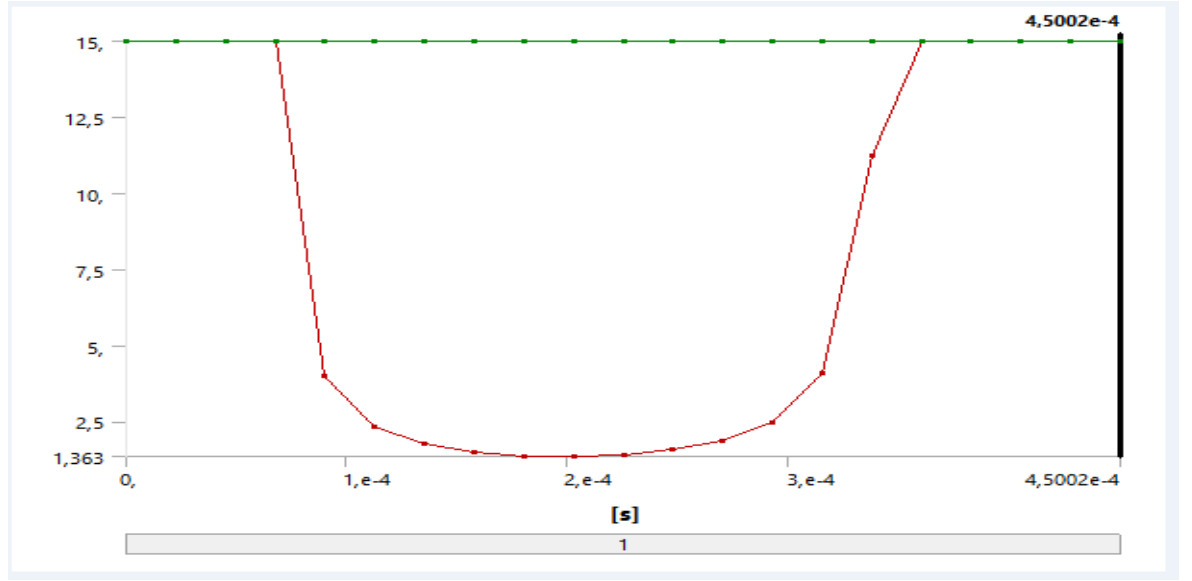


Şekil 5.16 Emniyet katsayısı (3,31 kg-300 cm için)

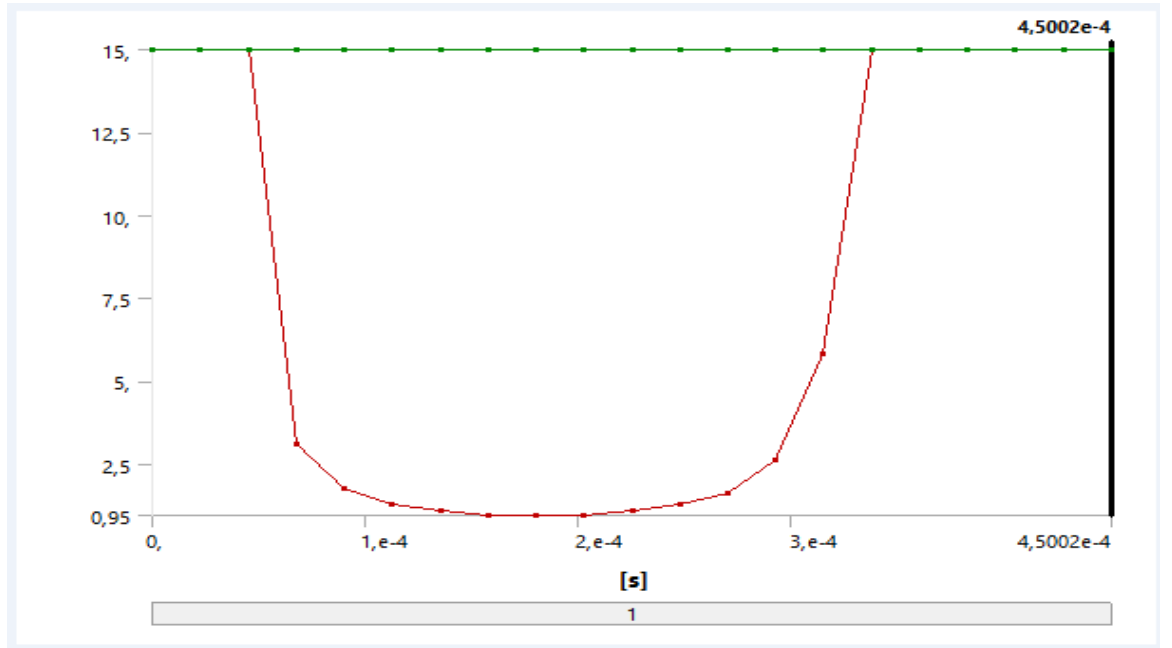
5.3 Kritik Yükseklik Değerlerinin Hesaplanması

200*200*5 (mm), 350*350*5 (mm), 400*400*5 (mm), 600*600*5 (mm) ebatlarında 4 farklı seramik boyutu için h-n grafiği çizdirilip kritik yükseklik değeri (n=1) bulundu. Bulunan kritik yükseklik değeri için bir analiz daha gerçekleştirilerek n=1 eşitliğinin doğrulama işlemi yapıldı.

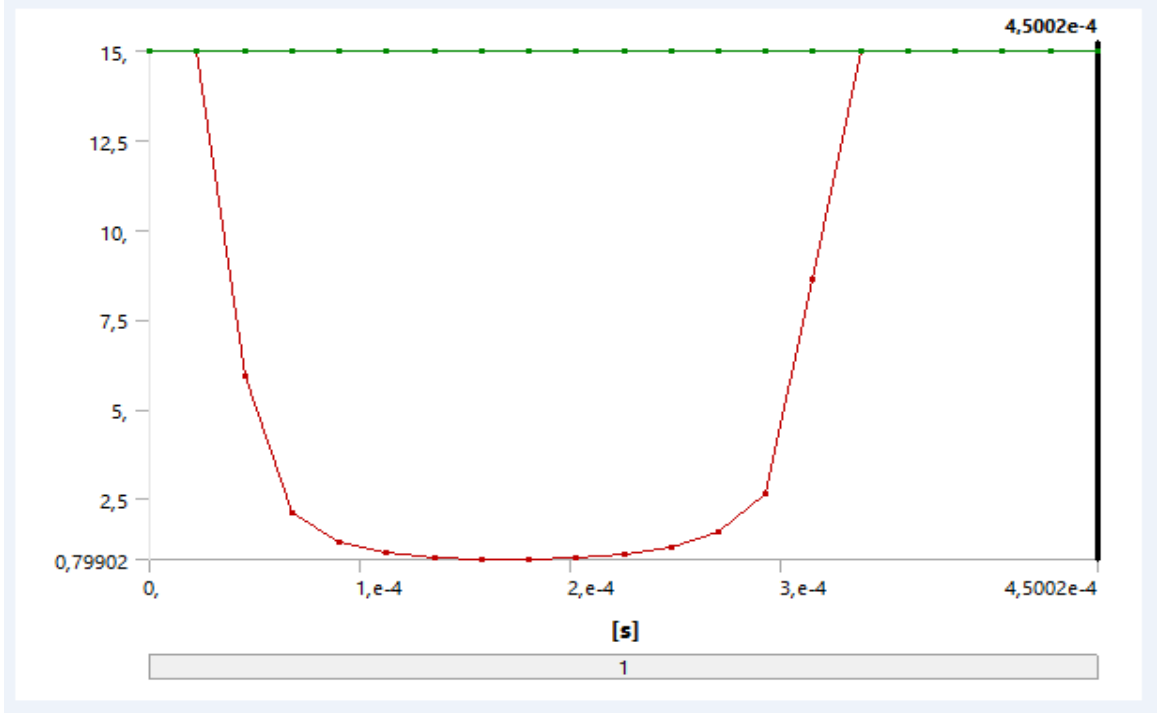
200*200*5 (mm) Seramik plaka boyutları için emniyet katsayısı



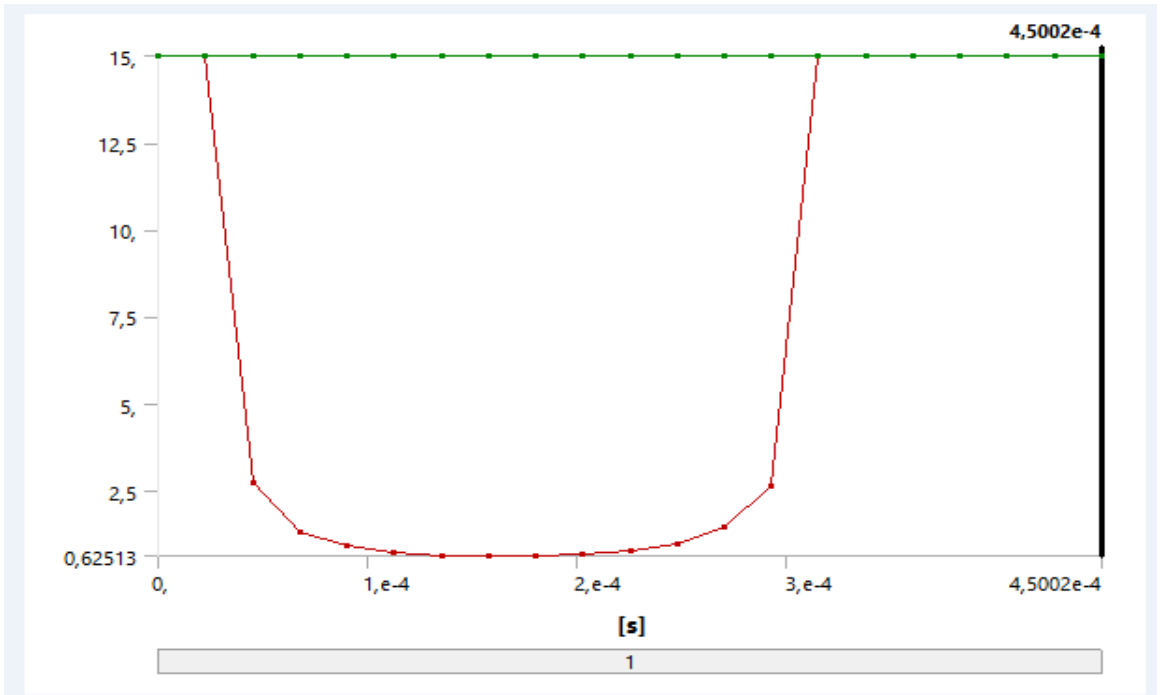
Şekil 5.17 Emniyet katsayısı (3,31 kg 10 cm yükseklik -200 mm kenar için)



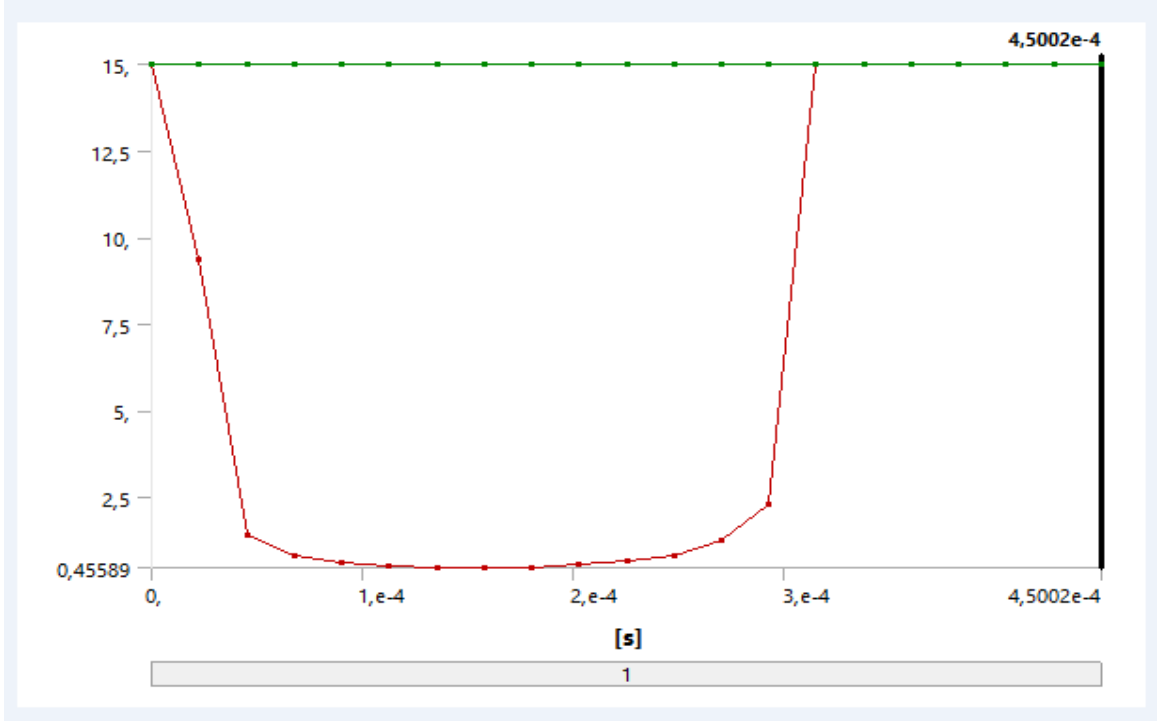
Şekil 5.18 Emniyet katsayısı (3,31 kg 21 cm yükseklik -200 mm kenar için)



Şekil 5.19 Emniyet katsayısı (3,31 kg 30 cm yükseklik -200 mm kenar için)

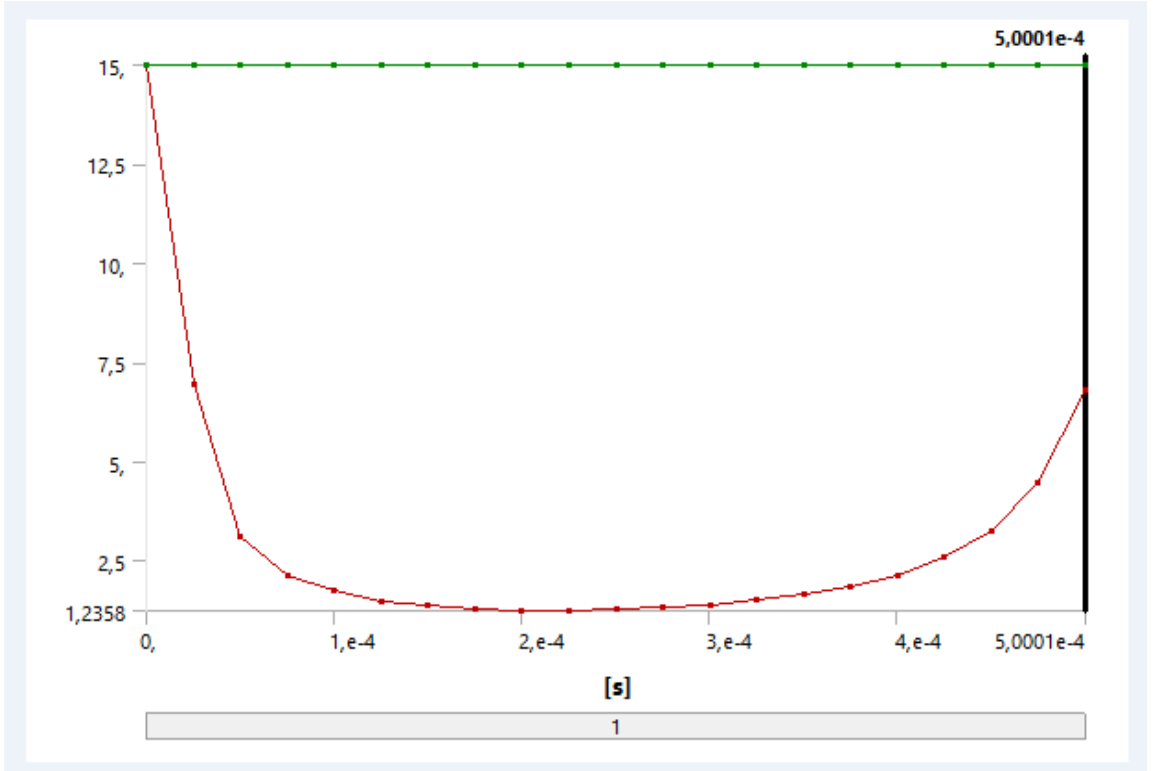


Şekil 5.20 Emniyet katsayısı (3,31 kg 50 cm yükseklik -200 mm kenar için)

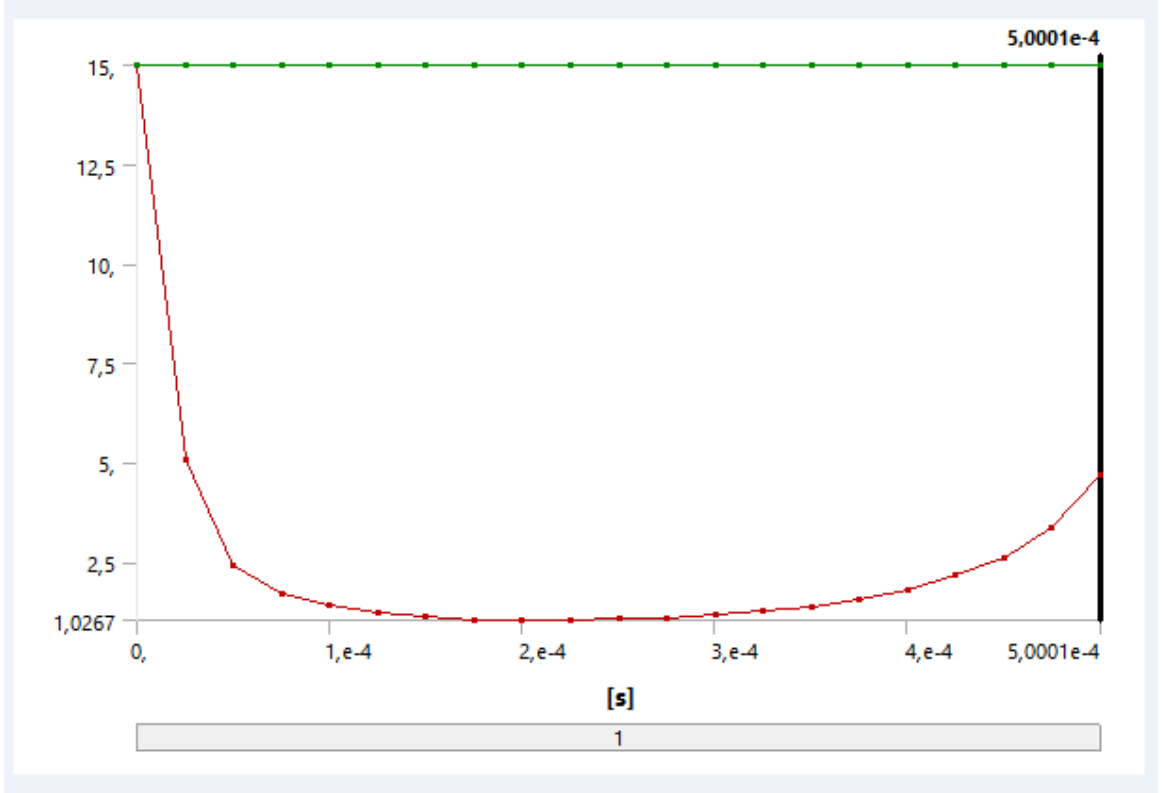


Şekil 5.21 Emniyet katsayısı (3,31 kg 100 cm yükseklik -200 mm kenar için)

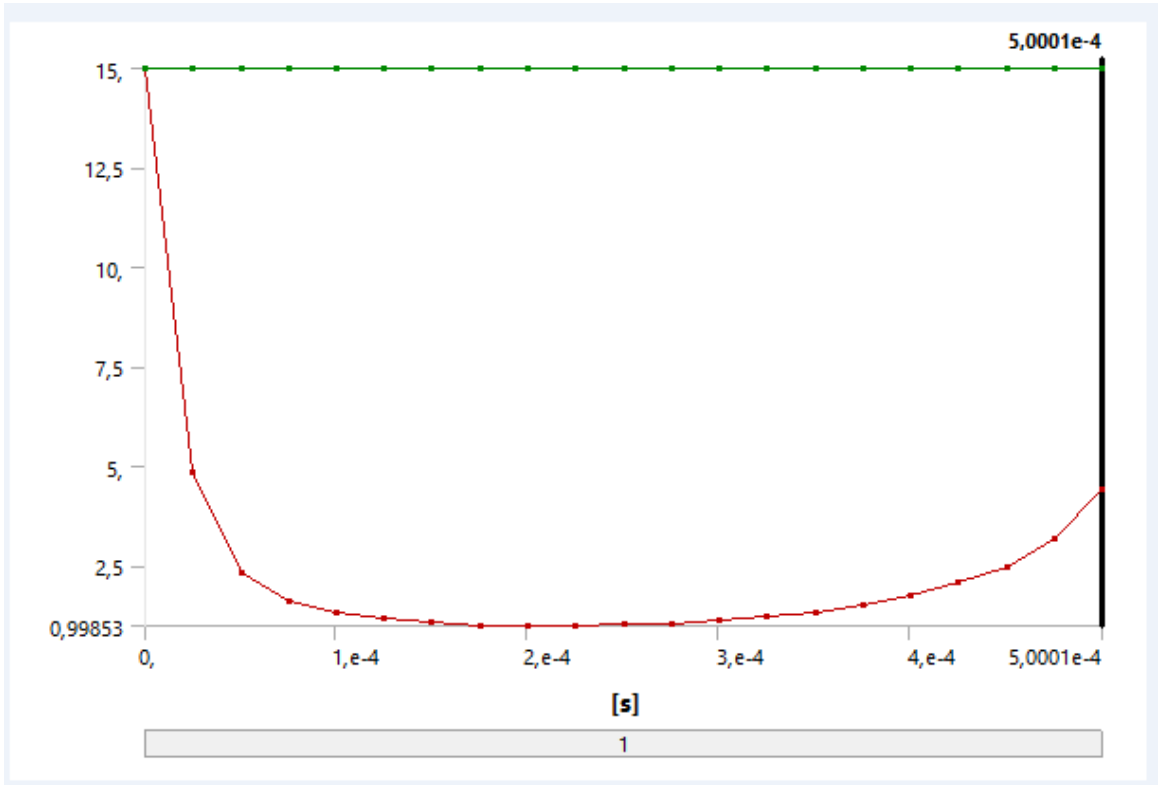
350*350*5 (mm) Seramik plaka boyutları için emniyet katsayısı



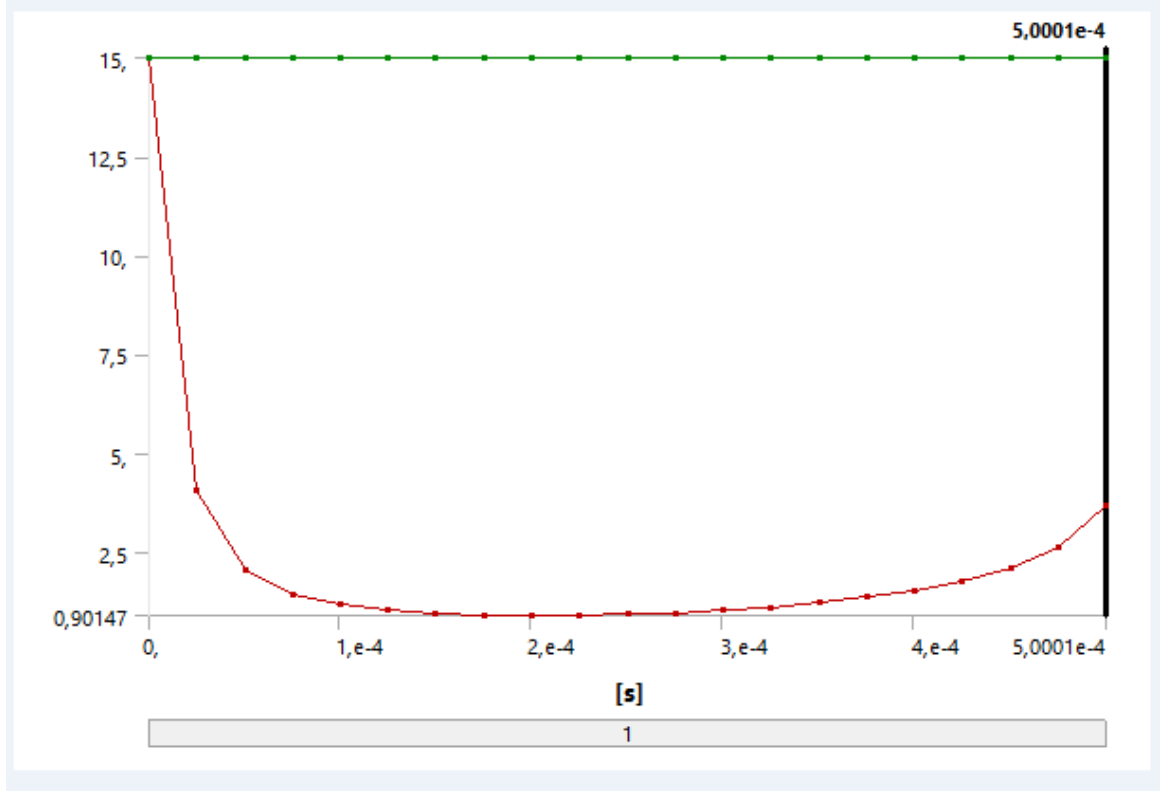
Şekil 5.22 Emniyet katsayısı (3,31 kg 100 cm yükseklik -350 mm kenar için)



Şekil 5.23 Emniyet katsayısı (3,31 kg 150 cm yükseklik -350 mm kenar için)

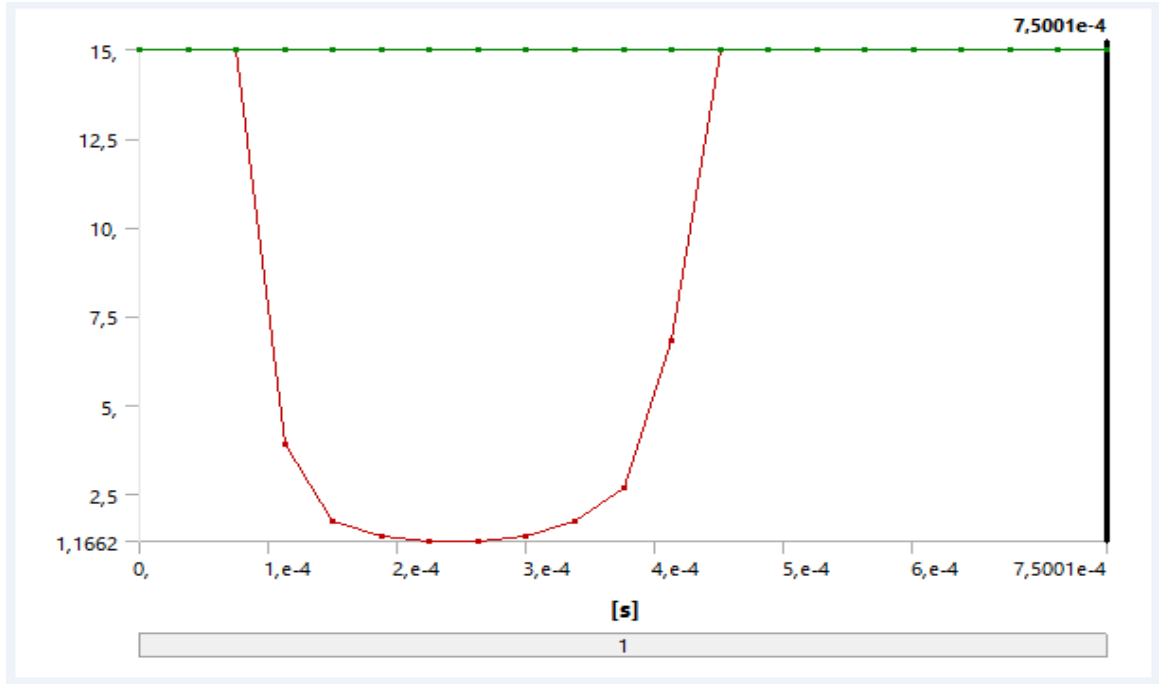


Şekil 5.24 Emniyet katsayısı (3,31 kg 159 cm yükseklik -350 mm kenar için)

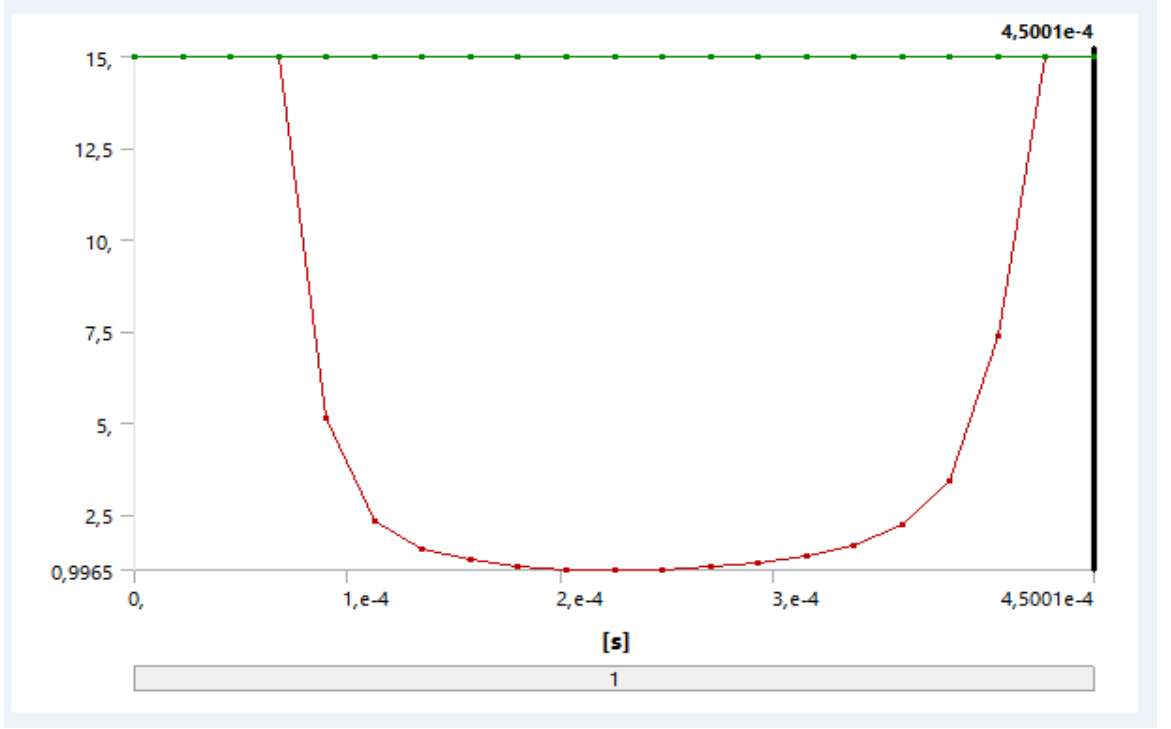


Şekil 5.25 Emniyet katsayısı (3,31 kg 200 cm yükseklik -350 mm kenar için)

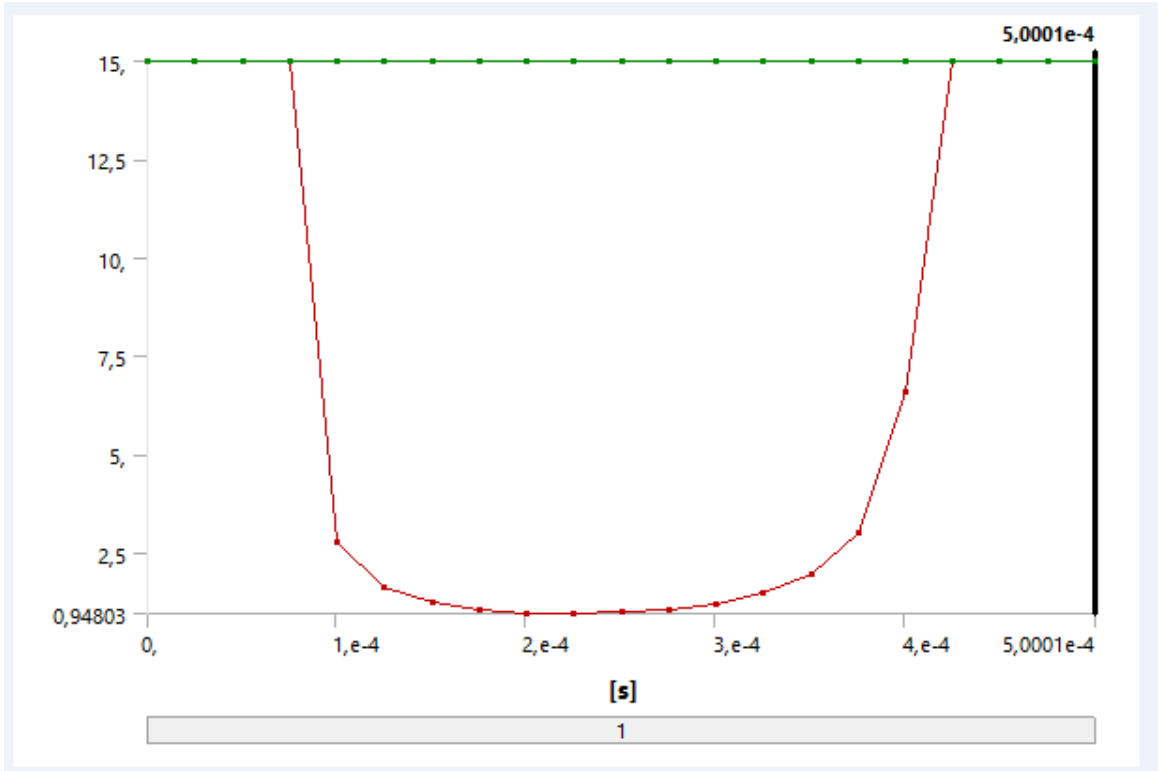
400*400*5 (mm) Seramik plaka boyutları için emniyet katsayısı



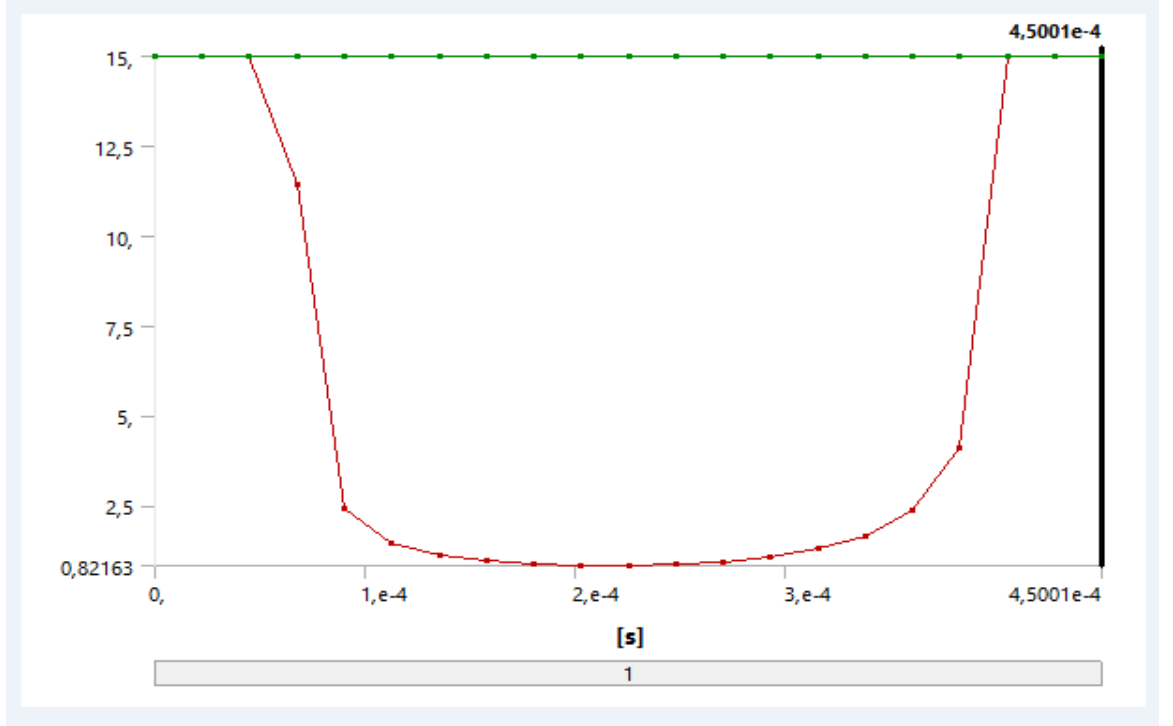
Şekil 5.26 Emniyet katsayısı (3,31 kg 100 cm yükseklik -400 mm kenar için)



Şekil 5.27 Emniyet katsayısı (3,31 kg 135 cm yükseklik -400 mm kenar için)

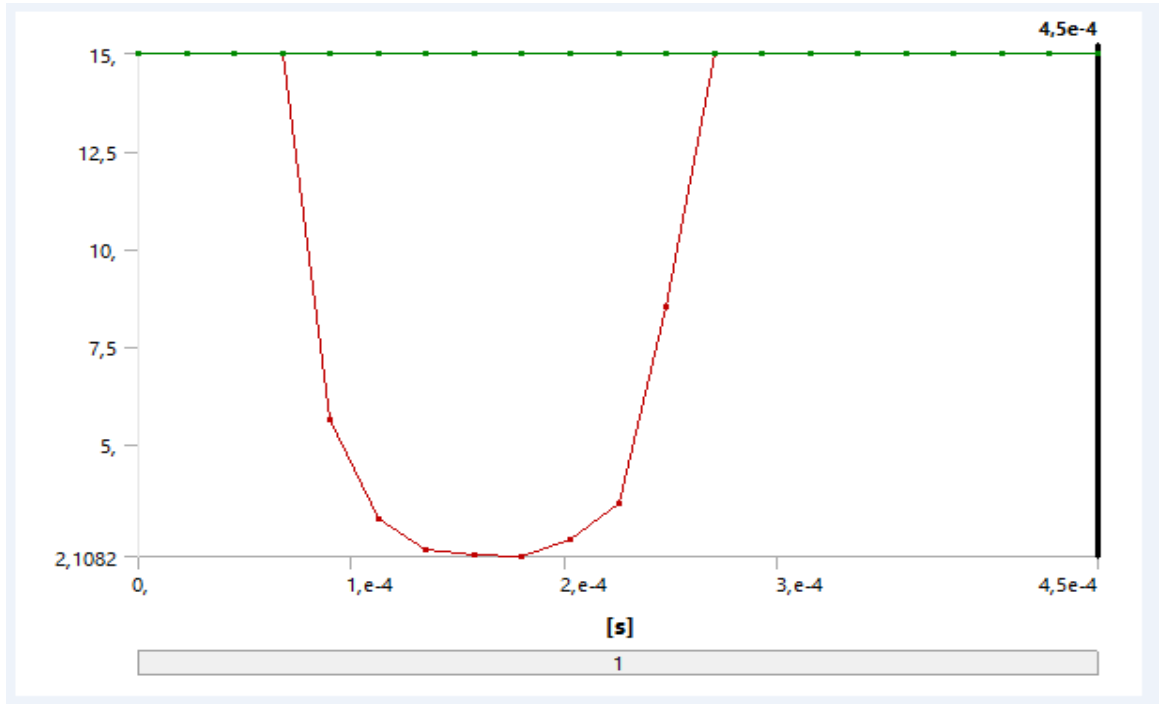


Şekil 5.28 Emniyet katsayısı (3,31 kg 150 cm yükseklik -400 mm kenar için)

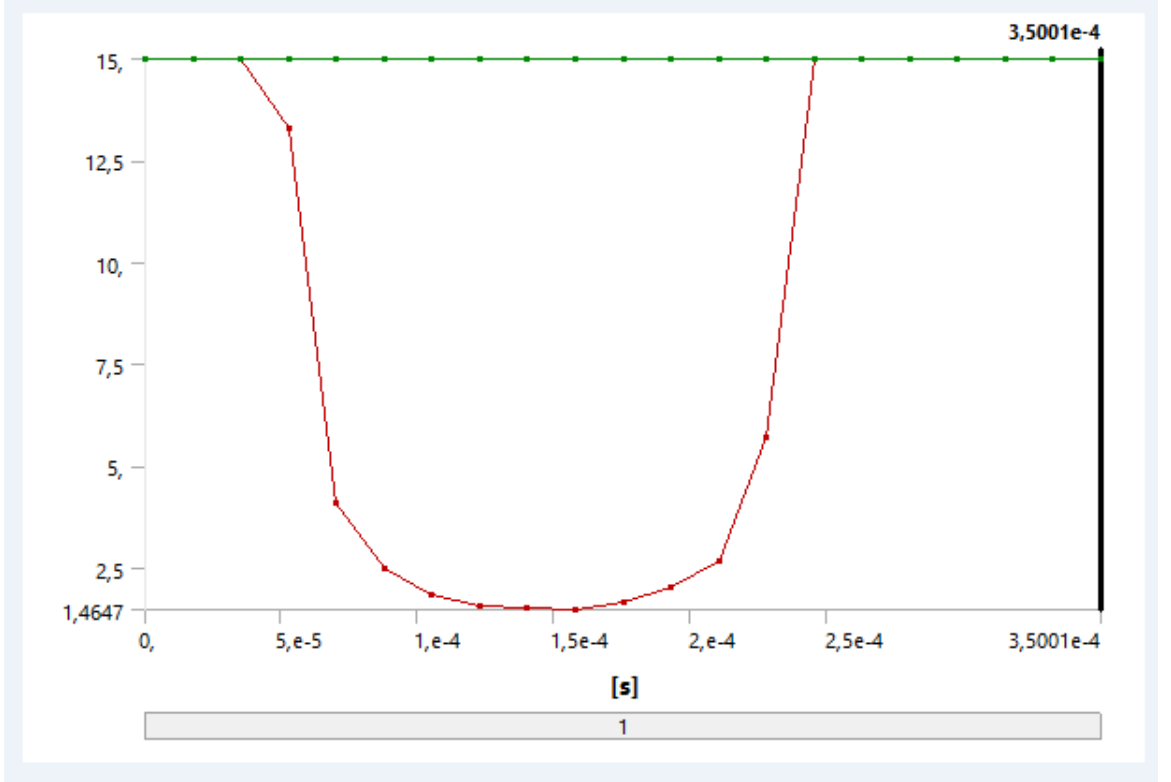


Şekil 5.29 Emniyet katsayısı (3,31 kg 200 cm yükseklik -400 mm kenar için)

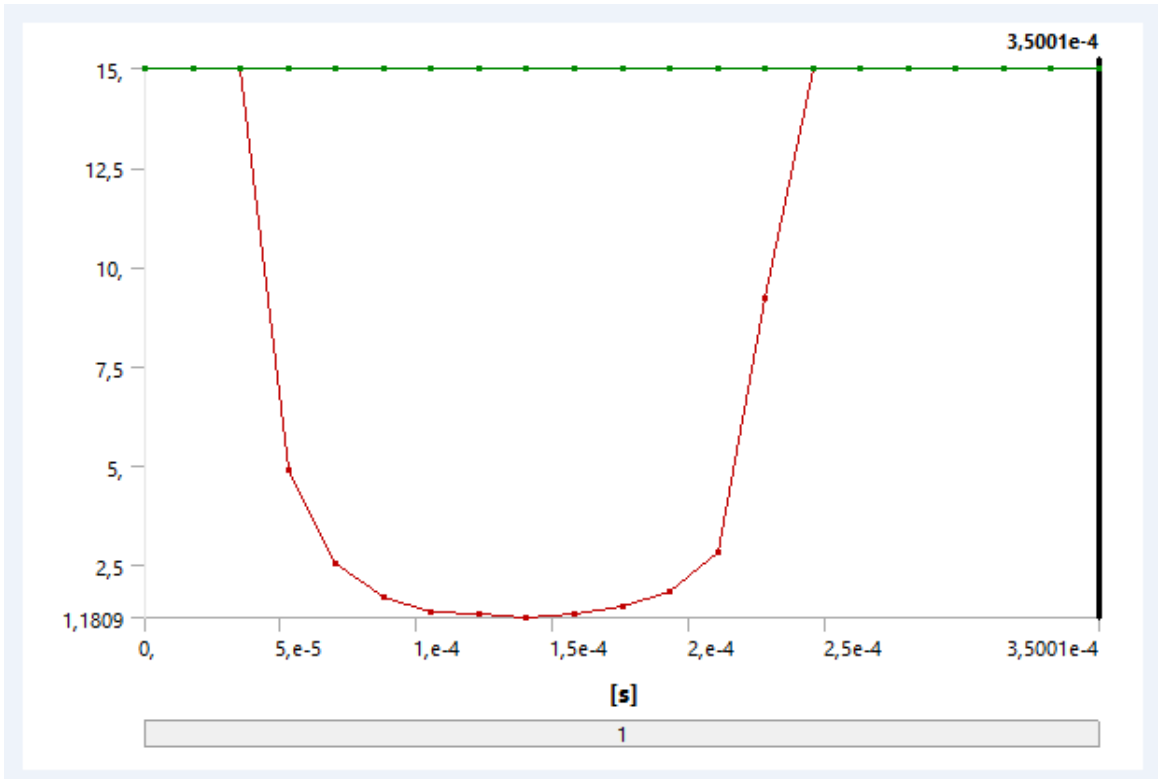
600*600*5 (mm) Seramik plaka boyutları için emniyet katsayısı



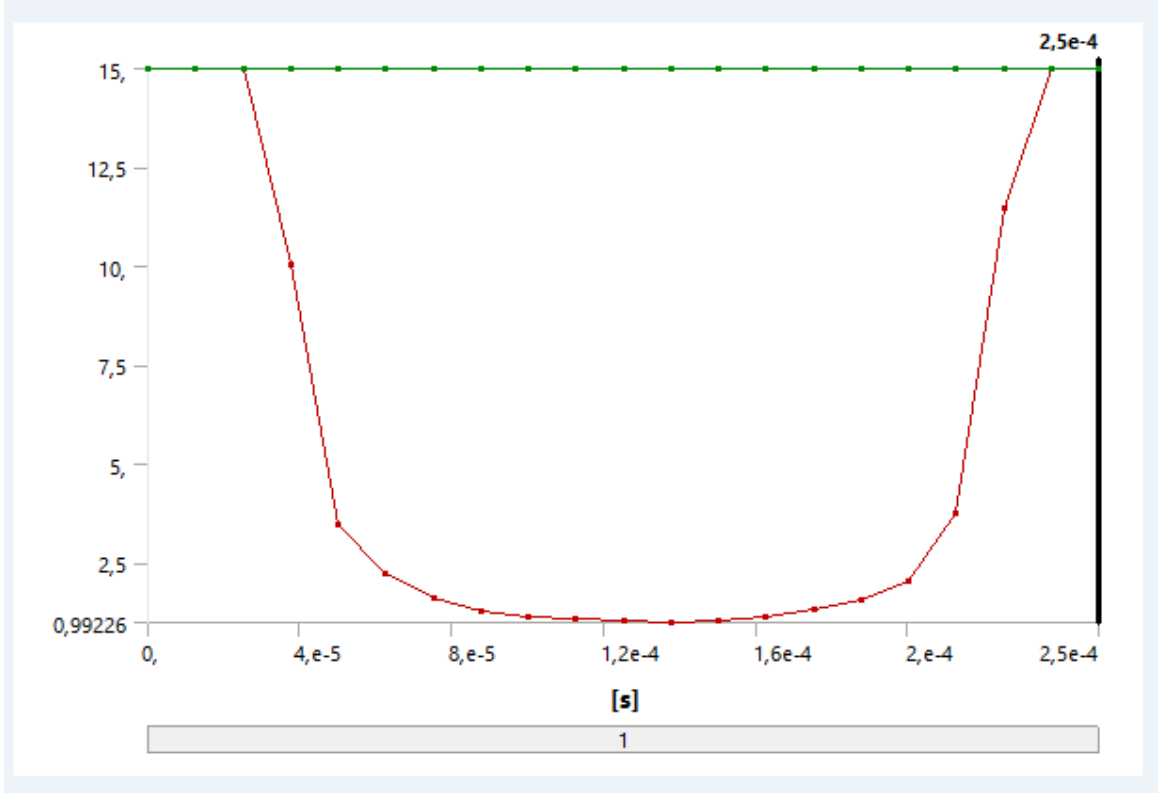
Şekil 5.30 Emniyet katsayısı (3,31 kg 100 cm yükseklik -600 mm kenar için)



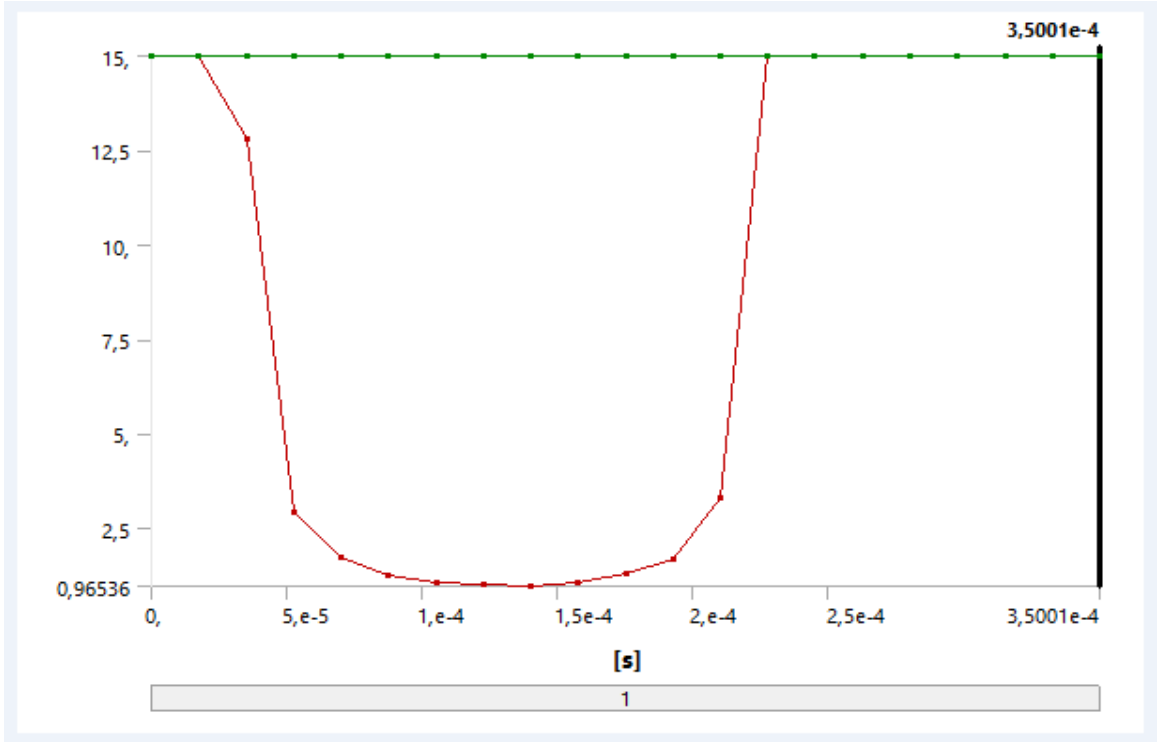
Şekil 5.31 Emniyet katsayısı (3,31 kg 200 cm yükseklik -600 mm kenar için)



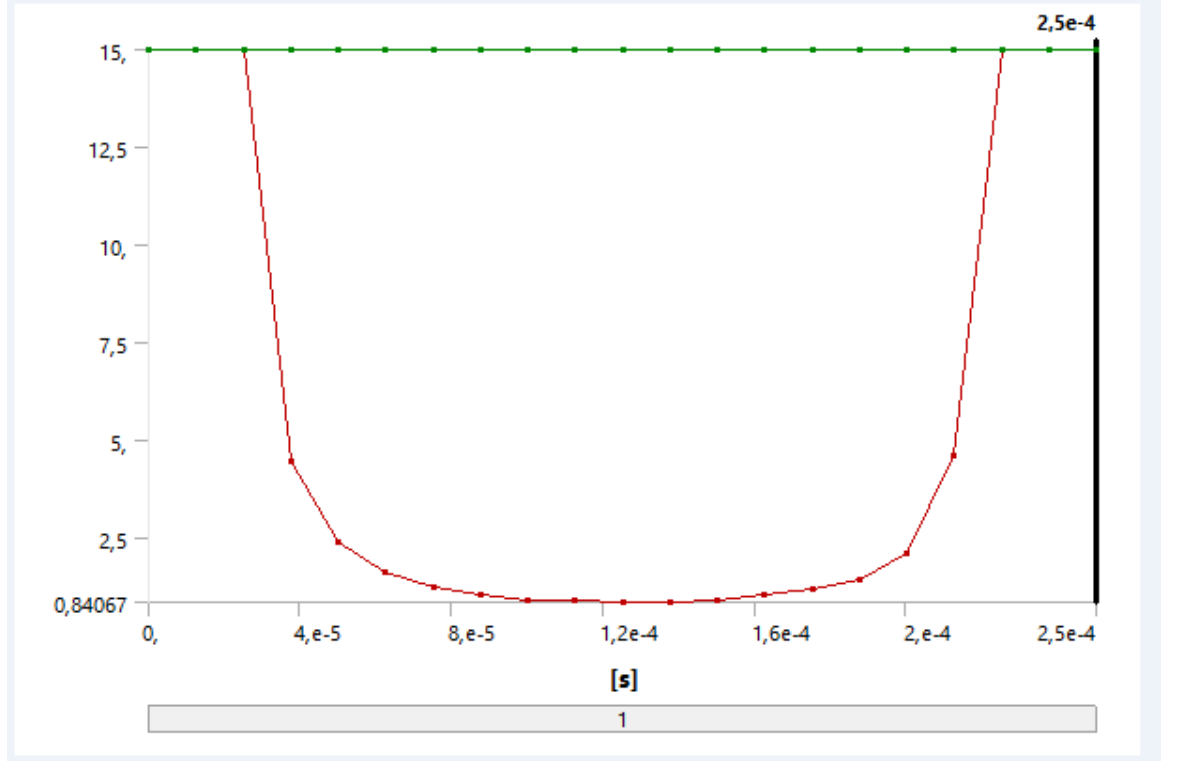
Şekil 5.32 Emniyet katsayısı (3,31 kg 300 cm yükseklik -600 mm kenar için)



Şekil 5.33 Emniyet katsayısı (3,31 kg 420 cm yükseklik -600 mm kenar için)



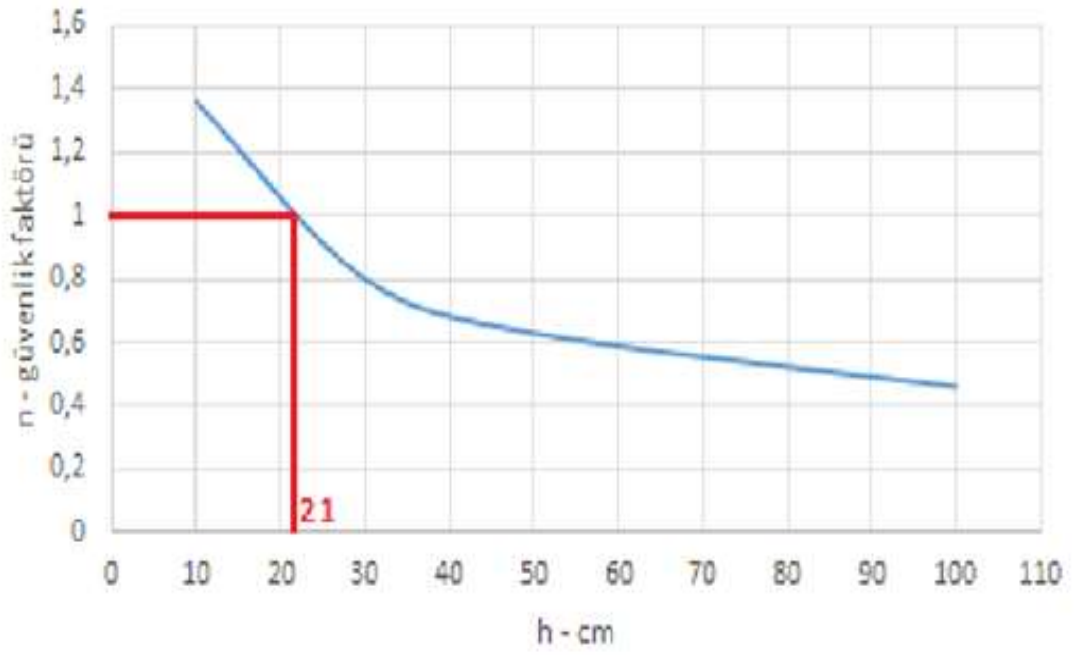
Şekil 5.34 Emniyet katsayısı (3,31 kg 450 cm yükseklik -600 mm kenar için)



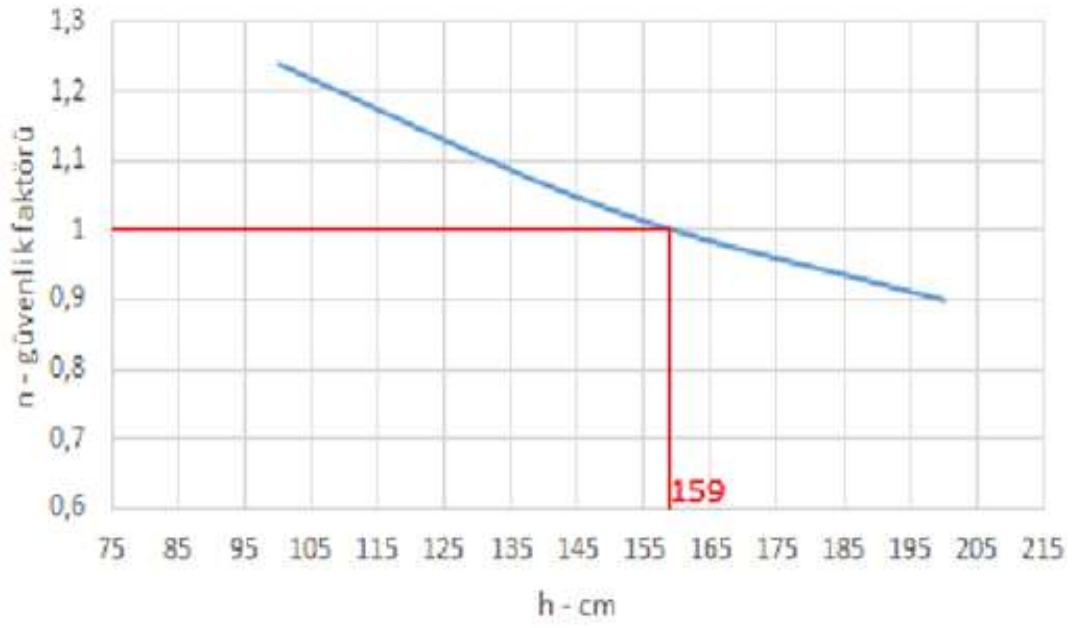
Şekil 5.35 Emniyet katsayısı (3,31 kg 600 cm yükseklik -600 mm kenar için)

Asal gerilmeler bir noktada oluşacak olan min ve max normal gerilme değerleridir. Asal gerilme düzlemlerinde kayma gerilmesi oluşmamaktadır. Analizlerde gerilme ile alakalı iki tip grafik mevcuttur. Bunlardan biri min asal gerilme, diğeri max asal gerilme grafiğidir. Min asal gerilme grafiğinde mutlak değerce küçük olan değer, min normal gerilmedir. Max asal gerilme grafiğinde ise mutlak değerce büyük olan değer dikkate alınması gerekir.

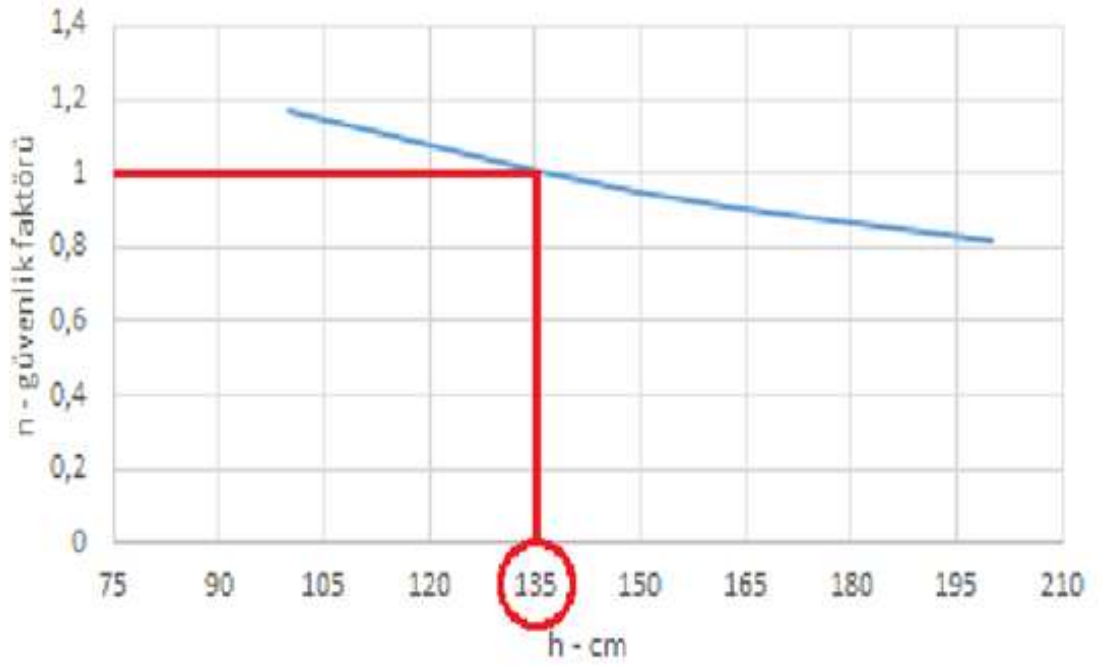
Aşağıda 3,31 kg vurucu kütle için n (emniyet katsayısı) – h (düşme yüksekliği) eğrileri farklı boyutlar için dört grafik üzerinde gösterilmektedir. Bu eğriler, Ansys'te 19 farklı analiz neticesinde elde edilen noktaların program vasıtasıyla birleştirilmesi sonucu elde edilmiştir. Bu sayede eğriler kullanılarak düşey eksen değeri 1'e karşılık gelen noktalar okunarak o kütle için kritik düşme yüksekliğinin rahatlıkla tespiti mümkündür



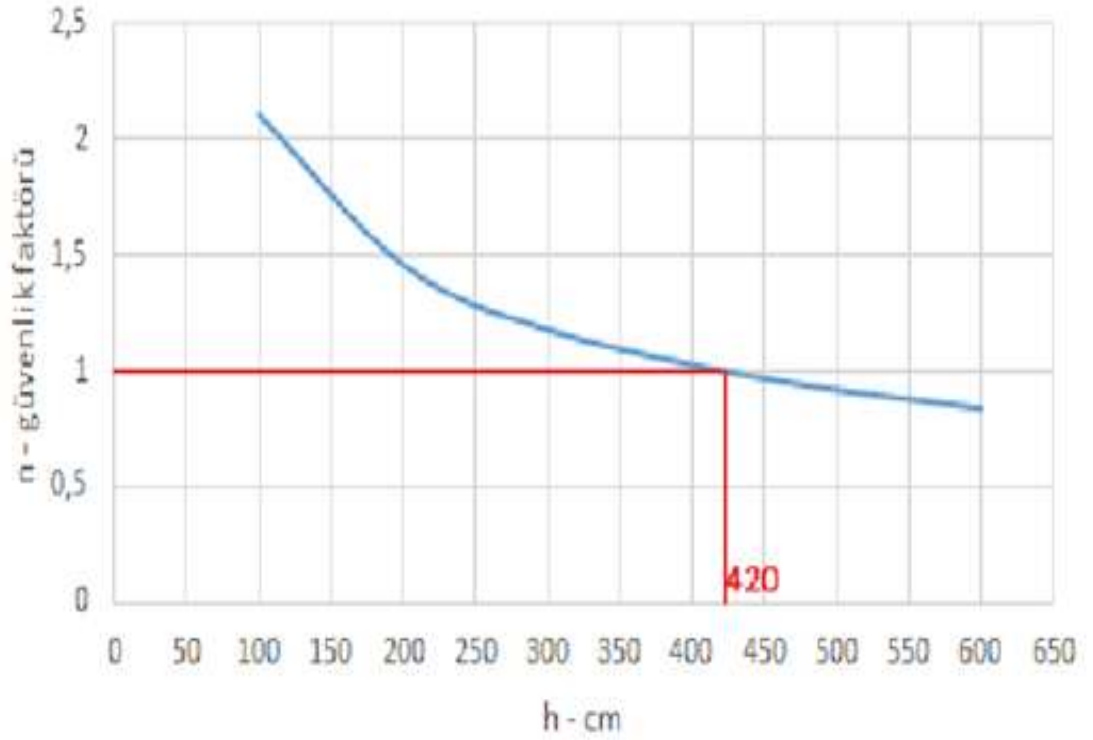
Şekil 5.36 Seramik levha : 200x200x5 mm³, vurucu :3.31 kg



Şekil 5.37 Seramik levha : 350x350x5 mm³, vurucu :3.31 kg



Şekil 5.38 Seramik levha : 400x400x5 mm³, vurucu :3.31 kg



Şekil 5.39 Seramik levha : 600x600x5 mm³, vurucu :3.31 kg

Buna göre 3,31 kg'lık kütle için kritik düşme yüksekliği tablosu aşağıdaki tablo 5.2 deki gibi çıkarılabilir

Tablo 5.2 Seramik plakaların kritik düşme yüksekliği

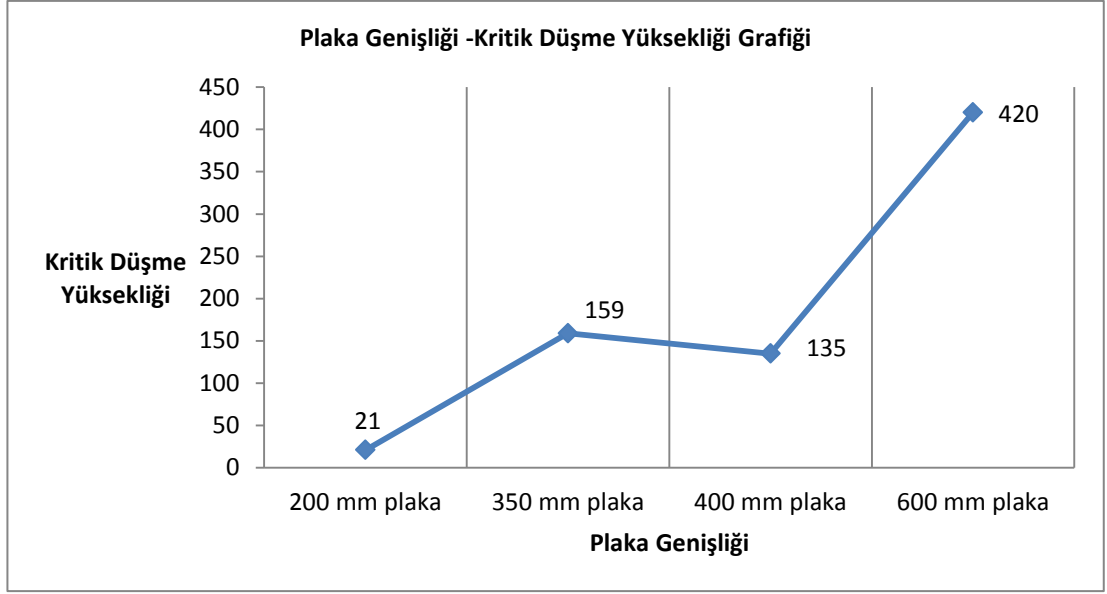
Hesaplama Kriterleri	200x200x5 mm³ plaka	350x350x5 mm³ plaka	400x400x5 mm³ plaka	600x600x5 mm³ plaka
Kritik Düşme Yüksekliği (h)	21 cm	159 cm	135 cm	420 cm

Tablo 5.2'deki gibi değerler baz alınarak aşağıda Şekil 5.40 ve 5.41'de gösterilen grafikte Seramik plakaların kritik düşme yüksekliği ve kırılma anı güvenlik faktörü eğrileri çizilmiştir. Bu grafikten 600 mm plaka için kritik düşme yüksekliğinin en yüksek değere ulaştığı 200 mm plaka için minimum değerde sonuç elde edildiği tespit edilmiştir.

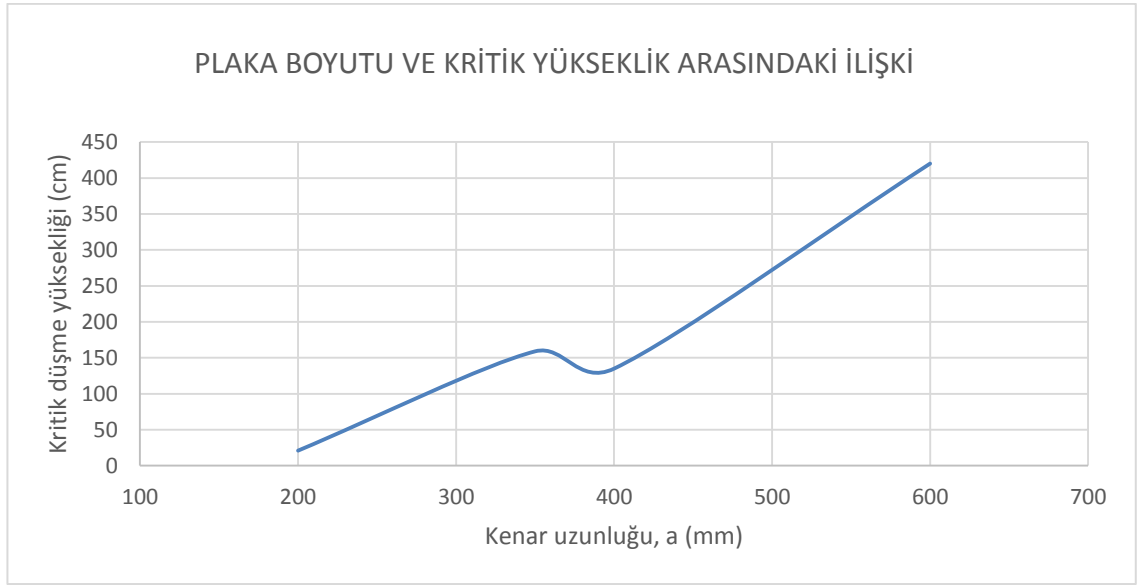
Oyacı ve Bahar, (2014) yaptıkları çalışmada teknik seramik malzeme özelliklerini baz alarak 3,31 ve 5,24 kg'lık iki vurucu kütle ile 5 farklı analiz yapmış, 3,31 kg'lık kütle için kritik düşme yüksekliğini 750 cm, 5,24 kg'lık kütle için kritik düşme yüksekliği 630 cm olarak bulmuşlardır.

Bu çalışmada ise 4 farklı boyutta alınan plakalar için deney numunesi malzeme özellikleri referans alınmış, daha sonra 3,31 kg'lık vurucu kütle kritik düşme yüksekliği hesaplatılmıştır. Bulunan değerler Tablo 5.2 deki değerlerden görüldüğü üzere 630 ve 750 cm yükseklik değerlerine göre daha düşük değer aralığında çıktığı (21/159/135/420 cm) tespit edilmiştir.

Bu çalışmada kritik yükseklik değerlerinin diğer çalışmaya göre daha düşük çıkma sebebinin girilen malzeme özelliklerinin ileri düzey seramik yada teknik seramik özelliklerine sahip olmama durumu olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 5.40 Plaka genişliği ve kritik düşme yüksekliği grafiği



Şekil 5.41 Plaka boyutu ve kritik yükseklik arasındaki eğri diyagramı

5.4 Değerlendirmeler

Bu deney ve analizler bize göstermiştir ki;

1.Eğme ve bası deneylerinde kullanılan KT-BP-BA grubu seramik numunelerden öncelikli olarak KT numuneleri içerdiği “kalsin” (numune içeriğindeki su ve gazların uzaklaştırılmasıyla elde edilen bileşim) malzemeden dolayı mukavemet, elastisite modülü ve bası gerilmesi sonuçları daha yüksek değerlerde çıkmış, BP grup malzemelerde daha düşük değerler elde edilmiş, BA grup malzemede ise standart seramik malzeme özelliklerine yakın değerler çıktığı görülmüştür.

2. Bu çalışmada bulunan kritik düşme yüksekliği değerleri Oyacı ve Bahar'ın (2014) çalışmasına göre daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebinin seramik malzeme mukavemet özelliklerinin teknik seramiklere oranla daha alt seviyede olması şeklinde yorumlanmıştır. Söz konusu seramik malzemelerin plaka genişliği ve içerdikleri alaşım miktarları değiştirildiği takdirde üst seviye seramik malzemelerin sahip olduğu mukavemet ve kritik düşme yüksekliği değerlerini yakalayabileceği, kritik düşme yüksekliği arttıkça seramik malzemeler üzerinde gerilmenin artacağı, yüzey üzerinde çatlaklar ve deformasyonlar oluşabileceği öngörülmüştür.

3. Plaka boyutu ile kritik kırılma yüksekliği ters orantılıdır. Bu sebeble uygulamalarda da bu tip vakaların sıklıkla görüldüğü göz önüne alınırsa, plakaların mümkün olduğunca küçük boyutlarda seçilmesinin faydalı olacağı sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- Alsaran, A. (2012). *Malzeme bilimi ders notları. 14 Kasım 2014*
[http://akgunalsaran.com/doc/20 seramikler-1691.pdf](http://akgunalsaran.com/doc/20%20seramikler-1691.pdf)
- Benli, S. (2010). *Darbeli yükleme altında kompozit malzemelerin davranışı.*
Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Chawla, K.K. (1987). *Composite materials science and engineering*, New York:
Spinger- Verlag.
- Chawla, K. (1993). *Ceramic matrix composites*, London: Chapman and Hall.
- Çalışkan, F. (2010). *MgF₂ içeren Si₃N₄ esaslı seramik malzemelerin geliştirilmesi.*
Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Sakarya.
- Doğan, Ş. (2000). *Seramik teknolojisi*, Birsen Yayınları
- Dowling, N.E. (1999). *Mechanical behaviour of materials* (2.Baskı), USA
- Erbil, E. (2008). *Tabakalı kompozitlerde darbeli yükleme.* Yüksek Lisans Tezi,
Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Geçkinli, E. (1992). *İleri teknoloji malzemeleri*, İstanbul Teknik Üniversitesi.
Kimya-Metalurji Fakültesi Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul
- Gogotsi, G.A. (2002). Fractur toughness of ceramics and ceramic composites
Ceramics International, 777-784
- Kılıçaslan, C. ve Odacı, İ. K. (2012). Düşük hızlarda darbeye maruz kalan 1050 H14
ve 3003 alüminyum alaşımı plakalarda hasar oluşumu ve sonlu elemanlar
simülasyonları. *Mühendis ve Makine Dergisi*,632

- Oyacı, E.Y. ve Bahar, H. (2014). *Seramik bir plaka üzerine düşme kritik yüksekliğinin ansys ile tespiti*. Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Özdemir, A. (2006). *Seramik malzemelerin kırılma tokluğu değerlerinin üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile teorik olarak belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Pençe, E. (2007). *Eğitim amaçlı ansys paket programının tanıtılması, ansys öğretimi ve uygulama örnekleri*. Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Zonguldak.
- Sarı, M. (2010). *Darbeli yüklemeye maruz kompozit borularda deniz suyunun etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Ünal, O. (2006). *Yapı malzemesi ders notları*. 14 Kasım 2014
http://teknolojikarastirmalar.com/e_education/yapi_malzemesi/icerik/seramik.htm
- Zor, M. (2006). *Ansys bilgi havuzu*, 14 Kasım 2014, [.http://web.deu.edu.tr/ansys](http://web.deu.edu.tr/ansys)
Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.