

T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SONLU ELEMANLAR ANALİZİ (FEA) YÖNTEMİ İLE YENİ NESİL
LASTİK ZİNCİRİ MODELLEME VE GELİŞTİRİLMESİ**

Mahyar JAFARZADYEGANEH

**Danışman
Prof. Dr. Mesut TIĞDEMİR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA, 2017**



© 2017 [Mahyar JAFARZADYEGANEH]

TEZ ONAYI

Mahyar JAFARZADYEGANEH tarafından hazırlanan “**Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) Yöntemi İle Yeni Nesil Lastik Ziniri Modelleme ve Geliştirilmesi**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Süleyman Demirel Üniversitesi **İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Prof. Dr. Mesut TIĞDEMİR
Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN
İstanbul Üniversitesi

Jüri Üyesi

Yard. Doç. Dr. Mehmet AVCAR
Süleyman Demirel Üniversitesi

Enstitü Müdürü

Prof.Dr.Yasin TUNCER

.....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Mahyar JAFARZADYEGANEH



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Trafik Kazaları	1
1.1.1. Soğuk mevsimlerde kaza istatistikleri	1
1.1.1.1. Diğer ülkelerde oluşan kaza istatistikleri	1
1.1.1.2. Türkiyede oluşan kaza istatistikleri	3
1.2. Lastiğin Tarihçesi	4
1.2.1. Normal basınç	5
1.2.2. Kış tekerleği	7
1.3. Tekerlek Zinciri ve Kar Paleti	7
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ	10
2.1. Tekerlek Modellemesi ve Deneysel Çalışmalar	10
2.2. Kar Modellemesi ve Deneysel Çalışmalar	19
3. MATERYAL VE METOT	26
3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Adımları	26
3.1.1. Modelin sonlu eleman ağı oluşturmaları ve eleman tipinin seçimi	27
3.1.2. Yer değiştirme fonksiyonunun belirlenmesi	29
3.1.3. Deformasyon-yer değiştirme ve gerilme-şekil değiştirme bağlantılarının tanımlanması	29
3.1.4. Eleman rijitlik matrisi ve denklemlerin oluşturulması	30
3.1.4.1. Doğrusal denklik veya rijitlik yöntemi	30
3.1.4.2. Enerji yöntemleri	30
3.1.4.3. Ağırlıklı kalıntı yöntemi (weighted residuals)	31
3.1.5. Eleman denklemlerin birleştirilip toplam denklemlerin elde edilmesi ve sınır koşullarının tanımlanması	31
3.1.6. Bilinmeyen serbestlik derecelerine göre analiz	32
3.1.7. Elemanların gerilme-şekil değiştirmesine göre analizi	32
3.1.8. Sonuçların yorumlanması	32
3.2. Malzeme Özellikleri	33
3.2.1. Lastik (Rubber)	33
3.2.1.1. Tekerlek lastiğinde kauçuk kullanımı	33
3.2.1.2. Tekerleğin bileşenleri	36
3.2.1.3. Tekerlek ebat bilgileri	37
3.2.2. Polilaktik asit kar paleti	40
3.2.3. Kar	40
3.3. Modelin Hazırlanması	41
3.3.1. Düz tekerlek modeli	43
3.3.2. Dört mevsim tekerlek modeli	46

3.3.3. Kar palet modelleri	47
3.3.3.1. Kar paleti Model 1	48
3.3.3.2. Kar paleti Model 2	48
4.ARAŞTIRMA BULGULARI	50
4.1. Temel Bilgiler	50
4.2. Gerilmeler ve Şekil Değişiklikleri	57
4.2.1. Düz tekerlek için tekerlek-kar gerilme ve şekil değişiklikleri	57
4.2.1.1. Karda batma	58
4.2.1.2. Karda oluşan kayma gerilmesi	59
4.2.1.3. Karda oluşan şekil değişikliği	61
4.2.1.4. Karda oluşan gerilme	63
4.2.2. Dört mevsim tekerlek için tekerlek-kar gerilme ve şekil değişiklikleri	65
4.2.2.1. Karda batma	66
4.2.2.2. Karda oluşan kayma gerilmesi	67
4.2.2.3. Karda oluşan şekil değişikliği	69
4.2.2.4. Karda oluşan gerilme	71
4.2.3. Kar paleti Model 1 için palet-kar gerilme ve şekil değişiklikleri	73
4.2.3.1. Model 1- 5 mm dişli palet	74
4.2.3.1.1. Karda batma	74
4.2.3.1.2. Karda oluşan kayma gerilmesi	75
4.2.3.1.3. Karda oluşan şekil değişikliği	77
4.2.3.1.4. Karda oluşan gerilme	79
4.2.3.2. Model 1-10 mm dişli palet	81
4.2.3.2.1. Karda batma	81
4.2.3.2.2. Karda oluşan kayma gerilmesi	82
4.2.3.2.3. Karda oluşan şekil değişikliği	84
4.2.3.2.4. Karda oluşan gerilme	86
4.2.3.3. Model 1-15 mm dişli palet	88
4.2.3.3.1. Karda batma	88
4.2.3.3.2. Karda oluşan kayma gerilmesi	90
4.2.3.3.3. Karda oluşan şekil değişikliği	92
4.2.3.3.4. Karda oluşan gerilme	94
4.2.4. Kar paleti Model 2 için palet-kar gerilme ve şekil değişiklikleri	95
4.2.4.1. Model 2-5 mm dişli palet	96
4.2.4.1.1. Karda batma	96
4.2.4.1.2. Karda oluşan kayma gerilmesi	97
4.2.4.1.3. Karda oluşan şekil değişikliği	99
4.2.4.1.4. Karda oluşan gerilme	101
4.2.4.2. Model 2-10 mm dişli palet	103
4.2.4.2.1. Karda batma	103
4.2.4.2.2. Karda oluşan kayma gerilmesi	105
4.2.4.2.3. Karda oluşan şekil değişikliği	106
4.2.4.2.4. Karda oluşan gerilme	108
4.2.4.3. Model 2-15 mm dişli palet	110
4.2.4.3.1. Karda batma	110
4.2.4.3.2. Karda oluşan kayma gerilmesi	112
4.2.4.3.3. Karda oluşan şekil değişikliği	114

4.2.4.3.4. Karda oluşan gerilme	115
4.3. Grafikler	118
4.3.1. Düz tekerlek ile dört mevsim tekerlek kar referansı değerlendirilmesi.....	118
4.3.1.1. Karda batma derinliği açısından değerlendirme	118
4.3.1.2. Karda oluşan kayma gerilmeler açısından değerlendirme	119
4.3.1.3. Karda oluşan gerilmeler açısından değerlendirme.....	120
4.3.1.4. Karda oluşan şekil değiştirmeler açısından değerlendirme	121
4.3.2. Model 1 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) kar paleti değerlendirilmesi.....	122
4.3.2.1. Karda batma derinliği açısından değerlendirme	122
4.3.2.2. Karda oluşan kayma gerilmeler açısından değerlendirme	123
4.3.2.3. Karda oluşan gerilmeler açısından değerlendirme.....	124
4.3.2.4. Karda oluşan şekil değiştirmeler açısından değerlendirme	125
4.3.3. Model 2 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) kar paleti değerlendirilmesi.....	126
4.3.3.1. Kar batma derinliği açısından değerlendirme	126
4.3.3.2. Karda oluşan kayma gerilmeler açısından değerlendirme	127
4.3.3.3. Karda oluşan gerilmeler açısından değerlendirme.....	129
4.3.3.4. Karda oluşan şekil değiştirmeler açısından değerlendirme	129
4.4. Değerlendirme	130
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	133
5.1. Sonuç	133
5.2. Tartışma.....	138
KAYNAKLAR	140
ÖZGEÇMİŞ	145

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SONLU ELEMANLAR ANALİZİ (FEA) YÖNTEMİ İLE YENİ NESİL LASTİK ZİNCİRİ MODELLEME VE GELİŞTİRİLMESİ

Mahyar JAFARZADYEGANEH

**Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mesut TİĞDEMİR

Soğuk mevsimlerde veya soğuk bölgelerde meydana gelen trafik kazalarının çoğunluğu lastiklerin yola tutunamaması sonucunda frenleme mesafesinin uzamasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle trafik kuralları gereği hava sıcaklığı 7 °C'nin altına düştüğünde kış lastiği kullanmak zorunlu hale gelmiştir. Bununla birlikte yaz veya kış lastiği ayırt etmeksizin tüm araçlarda kar zinciri bulundurma zorunluluğu vardır.

Mevcut kar zincirleri lastiğe ve aynı zamanda yol yüzeyine zarar vermektedir ve aynı zamanda kullanımı zordur. Yeni nesil polilaktik asitten imal edilen paletler yola tutunması ve pratik takılması sebebiyle üstünlük sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında farklı iki modelde tasarlanan kar paleti, lastiğe takıldığında meydana gelen deformasyon ve gerilmeler incelenecektir.

Anahtar Kelimeler: ANSYS®, lastik, deformasyon, kar paleti, sonlu elemanlar, lastik zinciri.

2017, 145 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

MODELING AND DEVELOPING A NEW GENERATION TIRE CHAIN WITH FINITE ELEMENT ANALYSIS (FEA)

Mahyar JAFARZADYEGANEH

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Mesut TIĞDEMİR

In cold seasons or cold regions mostly the car accident is a result of the wheel not reaching the road which take its source from braking distance extension. Therefore, due to the traffic regulations, it became compulsory to use winter tires when the air temperature fell below 7° C. for all that, without discriminating between summer and winter tires. It is imperative to keep snow chains on all vehicles.

Existing snow chains damage the wheel as well as road surface and at the same time they are difficult to use. The new generation poly lactic acid pallets are superior due to the road closure and practical installation. In this study deformation and stress will be examined when snow pallets designed in two different models are fitted.

Keywords: ANSYS®, Wheel, Deformation, Snow chain, Finite element analysis, Tire chain.

2017, 145 pages

TEŞEKKÜR

Bu tezi hazırlamamda çok büyük emeği olan, her zaman bana destek veren ve yanımda olan danıőmanım, değerli hocam Sayın Prof. Dr. Mesut TIĞDEMİR'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Bana her zaman yardımcı olup yol gösteren, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet AVCAR'a ve Sayın Okt. Mehmet Çağrı BAYRAK'a teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Mahyar JAFARZADYEGANEH
ISPARTA, 2017

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Poliizopren	4
Şekil 1.2. Düz (a) ve çapraz (b) tekerlek modelleri	5
Şekil 1.3. Dururken tekerlekte normal basınç dağılımı.....	6
Şekil 1.4. Hareket halinde tekerlekte oluşan normal basınç dağılımı	6
Şekil 1.5. Harry D. WEED tekerlek zinciri.....	8
Şekil 1.6. Tekerlek zinciri	9
Şekil 1.7. Kar palet çeşitleri	9
Şekil 2.1. Sürtünme ve mesafe arasındaki ilişki	15
Şekil 3.1. Basit iki düğümlü çubuk elemanı	28
Şekil 3.2. Basit iki boyutlu elemanlar	28
Şekil 3.3. Basit üç boyutlu elemanlar.....	29
Şekil 3.4. Frekansa bağlı histerezis	34
Şekil 3.5. Sıcaklığa bağlı histerezis	34
Şekil 3.6. Tekerlek kesiti.....	37
Şekil 3.7. Tekerlek bilgileri.....	38
Şekil 3.8. Explicit çözüm döngüsü.....	43
Şekil 3.9. SOLIDWORKS’de tasarlanan düz tekerlek modeli	44
Şekil 3.10. Tekerlekte kullanılan ipler	45
Şekil 3.11. Tekerlekte gövde ve topukta kullanılan teller.....	46
Şekil 3.12. SOLIDWORKS’ta tasarlanan dört mevsim tekerlek.....	47
Şekil 3.13 Model 1 paletli tekerlek	48
Şekil 3.14 Model 2 paletli tekerlek	49
Şekil 4.1. Hazırlanan modellerin sistem dosyaları.....	50
Şekil 4.2. Modelin hazırlanması.....	51
Şekil 4.3. Düşey kuvvetin tekerleğe uygulanması	52
Şekil 4.4. Sonlu elemanlarla tasarlanan tekerleğin mesh yapılması	53
Şekil 4.5. Yer çekim ivmesi	53
Şekil 4.6. Ötelenme hızı ve yönü	54
Şekil 4.7. Açısal hızın yönü	55
Şekil 4.8. Basınç.....	56
Şekil 4.9. Sabit mesnetler.....	57
Şekil 4.10. Düz tekerleğin karda batması.....	58
Şekil 4.11. Düz tekerleğin karda batma değerleri	59
Şekil 4.12. Düz tekerlek modelinin karda kayma gerilmesi	60
Şekil 4.13. Düz tekerlek modelinin kardaki maksimum kayma gerilmesi değerleri	60
Şekil 4.14. Düz tekerlek modelinin kardaki minimum kayma gerilmesi değerleri	61
Şekil 4.15. Düz tekerlek modelinin karda şekil değiştirmesi.....	62
Şekil 4.16. Düz tekerlek modelinin karda maksimum şekil değiştirmesi değerleri.....	63
Şekil 4.17. Düz tekerlek modelinin kardaki gerilmesi.....	64
Şekil 4.18. Düz tekerlek modelinin kardaki maksimum gerilme değerleri.....	65
Şekil 4.19. Dört mevsim tekerleğin karda batma değerleri.....	66
Şekil 4.20. Dört mevsim tekerleğin karda batma değerleri.....	67
Şekil 4.21. Dört mevsim tekerlek modelinin karda kayma gerilmesi.....	68

Şekil 4.22. Dört mevsim tekerlek modelinin kardaki maksimum kayma gerilmesi değerleri.....	68
Şekil 4.23. Dört mevsim tekerlek modelinin kardaki minimum kayma gerilmesi değerleri.....	69
Şekil 4.24. Dört mevsim tekerlekğin kardaki şekil değiştirmesi	70
Şekil 4.25. Dört mevsim tekerlek modelinin kardaki maksimum şekil değiştirmesi değerleri.....	71
Şekil 4.26. Dört mevsim tekerlek modelinin kardaki gerilmesi.....	72
Şekil 4.27. Dört mevsim tekerlek modelinin kardaki maksimum gerilme değerleri	73
Şekil 4.28. Model 1-5 mm dişli paletin karda batma değerleri.....	74
Şekil 4.29. Model 1-5 mm dişli paletin karda batma değerleri.....	75
Şekil 4.30. Model 1-5 mm dişli paletin kardaki kayma gerilmesi	76
Şekil 4.31. Model 1-5 mm dişli paletin kardaki maksimum kayma gerilmesi değerleri ..	76
Şekil 4.32. Model 1-5 mm dişli paletin kardaki minimum kayma gerilmesi değerleri ...	77
Şekil 4.33. Model 1-5 mm dişli paletin kardaki şekil değiştirmesi.....	78
Şekil 4.34. Model 1-5 mm dişli paletin kardaki maksimum şekil değiştirmesi değerleri.....	79
Şekil 4.35. Model 1-5 mm dişli paletin kardaki gerilmesi.....	80
Şekil 4.36. Model 1-5 mm dişli paletin kardaki maksimum gerilme değerleri	80
Şekil 4.37. Model 1-10 mm dişli paletin karda batma değerleri.....	81
Şekil 4.38. Model 1-10 mm dişli paletin karda batma değerleri.....	82
Şekil 4.39. Model 1-10 mm dişli paletin kardaki kayma gerilmesi	83
Şekil 4.40. Model 1-10 mm dişli paletin maksimum kardaki kayma gerilmesi değerleri.....	83
Şekil 4.41. Model 1-10 mm dişli paletin kardaki minimum kayma gerilmesi değerleri ..	84
Şekil 4.42. Model 1-10 mm dişli paletin kardaki şekil değiştirmesi.....	85
Şekil 4.43. Model 1-10 mm dişli paletin kardaki maksimum şekil değiştirmesi değerleri.....	86
Şekil 4.44. Model 1-10 mm dişli paletin kardaki gerilmesi.....	87
Şekil 4.45. Model 1-10 mm dişli paletin kardaki maksimum gerilme değerleri	88
Şekil 4.46. Model 1-15 mm dişli paletin karda batma değerleri.....	89
Şekil 4.47. Model 1-15 mm dişli paletin karda batma değerleri.....	90
Şekil 4.48. Model 1-15 mm dişli paletin karda kayma gerilmesi	91
Şekil 4.49. Model 1-15 mm dişli paletin maksimum karda kayma gerilmesi değerleri ..	91
Şekil 4.50. Model 1-15 mm dişli paletin minimum karda kayma gerilmesi değerleri.....	92
Şekil 4.51. Model 1-15 mm dişli paletin karda şekil değiştirmesi.....	93
Şekil 4.52. Model 1-15 mm dişli paletin maksimum karda şekil değiştirmesi değerleri.....	94
Şekil 4.53. Model 1-15 mm dişli paletin karda gerilmesi	94
Şekil 4.54. Model 1-15 mm dişli paletin kardaki maksimum gerilme değerleri	95
Şekil 4.55. Model 2-5 mm dişli paletin karda batma değerleri.....	96
Şekil 4.56. Model 2-5 mm dişli paletin karda batma değerleri.....	97
Şekil 4.57. Model 2-5 mm dişli paletin karda kayma gerilmesi	98
Şekil 4.58. Model 2-5 mm dişli paletin maksimum karda kayma gerilmesi değerleri	99
Şekil 4.59. Model 2-5 mm dişli paletin minimum karda kayma gerilmesi değerleri.....	99
Şekil 4.60. Model 2-5 mm dişli paletin karda şekil değiştirmesi.....	100
Şekil 4.61. Model 2-5 mm dişli paletin karda maksimum şekil değiştirmesi değerleri.....	101
Şekil 4.62. Model 2-5 mm dişli paletin karda gerilmesi	102

Şekil 4.63. Model 2-5 mm dişli paletin maksimum karda gerilme değerleri.....	103
Şekil 4.64. Model 2-10 mm dişli paletin karda batma değerleri.....	104
Şekil 4.65. Model 2-10 mm dişli paletin karda batma değerleri.....	104
Şekil 4.66. Model 2-10 mm dişli paletin karda kayma gerilmesi	105
Şekil 4.67. Model 2-10 mm dişli paletin kardaki maksimum kayma gerilmesi değerleri.....	106
Şekil 4.68. Model 2-10 mm dişli paletin kardaki minimum kayma gerilmesi değerleri.....	106
Şekil 4.69. Model 2-10 mm dişli paletin karda şekil değiştirmesi.....	107
Şekil 4.70. Model 2-10 mm dişli paletin kardaki maksimum şekil değiştirmesi değerleri.....	108
Şekil 4.71. Model 2-10 mm dişli paletin kardaki gerilmesi.....	109
Şekil 4.72. Model 2-10 mm dişli paletin kardaki maksimum gerilme değerleri	110
Şekil 4.73. Model 2-15 mm dişli paletin karda batma değerleri.....	111
Şekil 4.74. Model 2-15 mm dişli paletin karda batma değerleri.....	111
Şekil 4.75. Model 2-15 mm dişli paletin kardaki kayma gerilmesi	112
Şekil 4.76. Model 2-15 mm dişli paletin kardaki maksimum kayma gerilmesi değerleri.....	113
Şekil 4.77. Model 2-15 mm dişli paletin kardaki minimum kayma gerilmesi değerleri.....	113
Şekil 4.78. Model 2-15 mm dişli paletin kardaki şekil değiştirmesi.....	114
Şekil 4.79. Model 2-15 mm dişli paletin kardaki maksimum şekil değiştirmesi değerleri.....	115
Şekil 4.80. Model 2-15 mm dişli paletin kardaki gerilmesi.....	116
Şekil 4.81. Model 2-15 mm dişli paletin kardaki maksimum gerilme değerleri	117
Şekil 4.82. Düz tekerlek ile dört mevsim tekerleğe ait karda batma derinlikleri.....	118
Şekil 4.83. Düz ile dört mevsim tekerleğin maksimum karda kayma gerilmesi değerleri.....	119
Şekil 4.84. Düz ile dört mevsim tekerleğin minimum karda kayma gerilmesi değerleri.....	120
Şekil 4.85. Düz ile dört mevsim tekerleğin maksimum karda gerilme değerleri.....	121
Şekil 4.86. Düz ile dört mevsim tekerleğin maksimum karda şekil değiştirmesi değerleri.....	122
Şekil 4.87. Model 1 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletine ait karda batma derinlikleri..	123
Şekil 4.88. Model 1 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletin maksimum karda kayma gerilmesi değerleri.....	124
Şekil 4.89. Model 1 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletin minimum karda kayma gerilmesi değerleri.....	124
Şekil 4.90. Model 1 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletin maksimum karda gerilmesi değerleri.....	125
Şekil 4.91. Model 1 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletin maksimum karda şekil değiştirmesi değerleri	126
Şekil 4.92. Model 2 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletine ait karda batma derinlikleri...	127
Şekil 4.93. Model 2 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletin maksimum karda kayma gerilmesi değerleri.....	128
Şekil 4.94. Model 2 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletin minimum karda kayma gerilmesi değerleri.....	128

Şekil 4.95. Model 2 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletin maksimum karda gerilmesi değerleri.....	129
Şekil 4.96. Model 2(5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletin maksimum karda şekil değiştirmesi değerleri	130
Şekil 4.97. Temas bölgeleri.....	131



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. ABD'de hava koşullarına göre kaza durumu	2
Çizelge 1.2. Aylara göre ölümlü yaralanmalı kaza, ölü ve yaralı sayısı	3
Çizelge 3.1. Tekerlek malzemeleri ve kullanım oranları.	35
Çizelge 3.2. Tekerlek malzemelerinin fiziksel özellikleri	36
Çizelge 3.3. Hız endeksine göre tekerlek tipleri	38
Çizelge 3.4. Yük endeksi	39
Çizelge 3.5. Polilaktik asit (PLA) özellikleri	40
Çizelge 3.6. Düşük yoğunluklu kar için Drucker-Prager model parametreleri.....	41
Çizelge 3.7. ANSYS'te lastik için Mooney-Rivlin modeli.....	44
Çizelge 3.8. İplerin özelliği.....	45
Çizelge 3.9. Tellerin özelliği.....	46
Çizelge 4.1. Paletler ve dört mevsim tekerlek maksimum değerlerin karşılaştırılması .	132

SİMGELER DİZİNİ

[K]	Toplam yapısal rijitlik matrisi
{d}	Bilinen ve bilinmeyen yapısal düğümlerin serbestlik derecesi
{F}	Toplam düğümlerin kuvvet vektörü
μ	Sürtünme katsayısı
$^{\circ}\text{C}$	Santigrad derece
E	Elastisite modülü
ε	Uzama oranı
kg	Kilogram
kPa	Kilo Pascal
m	Metre
m^3	Metre küp
Mpa	Mega Pascal
n	Modelde toplam bilinmeyen düğümlerin serbestlik derecesi
N	Newton
P	Basınç
Pa	Pascal
r_0	Tekerlek yarıçapı
sn	Saniye
V_z	Doğrusal hız
$\delta U^{(e)}$	Oluşan şekil değiştirme enerjisi
ρ	Yoğunluk
σ_x	Gerilme
ω	Açısal hız
δ	Deformasyon miktarı

1. GİRİŞ

1.1. Trafik Kazaları

2013 yılında Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) istatistiklerine göre 1.25 milyon kişi trafik kazalarından dolayı hayatını kaybetmiştir ve milyonlarca kişi yaşamlarını zorlaştıracak ciddi sağlık sorunlarına maruz kalmıştır. Trafik kazaları, DSÖ verilerine göre en çok ölümün gerçekleştiği listenin 9. sırasında yer almaktadır. 2030 yılına kadar ise yedinci sıraya geleceği tahmin edilmektedir. Bu istatistiklere göre en yüksek kayıp oranı 15 ile 29 yaşları arasındadır (WHO, 2017).

DSÖ'nün bölgesel istatistiklerine göre düşük ve orta gelirli ülkelerde kaza oranı yüksek (her 100000 kişide %18.4-24.1) olup gelişmiş ülkelerde bu oran daha düşük seviyelerdedir (%9.2). En yüksek kaza oranı (%26.6) Afrikada ve en düşük kaza oranı (%9.3) ise Avrupadadır (WHO, 2017).

Araç tipine göre en yüksek kaza oranları, en düşük koruma sistemleri olan araç tiplerine yani yayalar, bisikletler ve motorsikletlere aittir. Dünyanın yaya ve iki tekerlekli araç tiplerinin %43'ü Afrikada bulunmaktadır (WHO, 2017).

1.1.1. Soğuk mevsimlerde kaza istatistikleri

1.1.1.1. Diğer ülkelerde oluşan kaza istatistikleri

Amerika Birleşik Devletlerinde her sene 5 milyon 760 bin adet kaza meydana gelmektedir. Bunların 125900 adedi kötü hava koşulları ile alakalıdır. Kötü hava koşulları, hava durumunun müsait olmadığı (yağmur, sis, rüzgar, kar, vb.) veya yol yüzeyinin araçlar için kullanılmasının zor olduğu durumlar (çamurlu, buzlu, nemli, vb.) olarak tanımlanmaktadır. Bu kazalarda ortalama olarak her sene altı bin kişi hayatını kaybetmekte ve 445 bin kişi yaralanmaktadır (RWMP, 2017).

Kötü hava koşullarında kazaların oluşmasında en önemli etkenlerden biri yağışlı hava durumu ve ıslak yol yüzeyidir. Buna göre kazaların %73'ü ıslak yol yüzeyi ve %46'sı yağmurlu hava koşullarında oluşmuştur. Çizelgede 1.1'de ABD'de hava koşullarına göre kaza istatistikleri verilmiştir (RWMP, 2017).

Çizelge 1.1. ABD'de hava koşullarına göre kaza durumu (RWMP, 2017)

Yolların hava koşullarına göre durumu	Hava koşulları ile trafik kazaları bağlantısı			
	On yıllık ortalama(2004-2013)		On yıllık yüzdesi %	
Islak yüzey	Kaza sayısı	907,831	Araba kazalarının 16%'ı	Hava koşulları bağlantılı kaza oranı %73
	Yaralı sayısı	352,211	Yaralı kazaların 15%'i	Hava koşulları bağlantılı yaralı oranı %80
	Ölü sayısı	4,488	Ölümlü kazaların 13%'ü	Hava koşulları bağlantılı ölü oranı %77
Yağmur	Kaza sayısı	573,784	Araba kazalarının 10%'u	Hava koşulları bağlantılı kaza oranı %46
	Yaralı sayısı	228,196	Yaralı kazaların 10%'u	Hava koşulları bağlantılı yaralı oranı %50
	Ölü sayısı	2,732	Ölümlü kazaların 8%'i	Hava koşulları bağlantılı ölü oranı %47
Kar/Sulu kar	Kaza sayısı	210,341	Araba kazalarının 4%'ü	Hava koşulları bağlantılı kaza oranı %17
	Yaralı sayısı	55,942	Yaralı kazaların 3%'ü	Hava koşulları bağlantılı yaralı oranı %13
	Ölü sayısı	739	Ölümlü kazaların 2%'si	Hava koşulları bağlantılı ölü oranı %13
Buzlu yüzey	Kaza sayısı	151,944	Araba kazalarının 3%'ü	Hava koşulları bağlantılı kaza oranı %13
	Yaralı sayısı	38,770	Yaralı kazaların 2%'si	Hava koşulları bağlantılı yaralı oranı %9
	Ölü sayısı	559	Ölümlü kazaların 2%'si	Hava koşulları bağlantılı ölü oranı %10
Kar/Çamurlu kar	Kaza sayısı	174,446	Araba kazalarının 4%'ü	Hava koşulları bağlantılı kaza oranı %14
	Yaralı sayısı	41,597	Yaralı kazaların 2%'si	Hava koşulları bağlantılı yaralı oranı %10
	Ölü sayısı	538	Ölümlü kazaların 2%'si	Hava koşulları bağlantılı ölü oranı %10
Sis	Kaza sayısı	28,533	Araba kazalarının 1%'i	Hava koşulları bağlantılı kaza oranı %3
	Yaralı sayısı	10,448	Yaralı kazaların 1%'i	Hava koşulları bağlantılı yaralı oranı %3
	Ölü sayısı	495	Ölümlü kazaların 2%'si	Hava koşulları bağlantılı ölü oranı %9
Hava koşulları ile trafik kazaları bağlantısı	Toplam kaza sayısı	1,258,978	Araba kazalarının 22%'i	
	Toplam yaralı sayısı	445,303	Yaralı kazaların 19%'i	
	Toplam Ölü sayısı	5,897	Ölümlü kazaların 16%'si	

1.1.1.2. Türkiyede oluşan kaza istatistikleri

Türkiye karayolu ağında 2014 yılında toplam 1 milyon 199 bin 10 adet trafik kazası meydana gelmiştir. Bu kazaların 1 milyon 30 bin 498 adedi maddi hasarlı, 168 bin 512 adedi ise ölüm ve yaralanma ile sonuçlanan trafik kazalarıdır. Yıl içerisinde meydana gelen trafik kazalarının %75.1'i yerleşim yeri içinde %24.9'u ise yerleşim yeri dışında, ölüm ve yaralanma meydana getirmiştir (TÜİK, 2014).

Türkiye karayolu ağında 2014 yılında gerçekleşen trafik kazalarında ölen kişilerin %42.7'si sürücü, %40.3'ü yolcu ve %17'si yayadır. Trafik kazalarında ölenler ve yaralananlar cinsiyetlerine göre incelendiğinde ise ölenlerin %76.8'inin erkek, %23.2'sinin kadın ve yaralananların ise %70.2'sinin erkek, %29.8'inin kadın olduğu tespit edilmiştir(TÜİK, 2014).

Türkiye'de 2014 yılında meydana gelen 168 bin 512 ölüm ve yaralanma ile sonuçlanan kazaların aylara göre dağılımına bakıldığında, Ağustos ayı %10.8 pay ile en fazla kazanın meydana geldiği ay olurken Şubat ayı %6 pay ile en az kazanın meydana geldiği ay olmuştur (Çizelge 1.2). Haftanın günlerine göre bakıldığında ise ölüm ve yaralanma sonuçlu kazaların %14.8 pay ile en fazla Cuma günü ve %13.7 pay ile en az Salı günü gerçekleştiği görülmüştür (KGM, 2015).

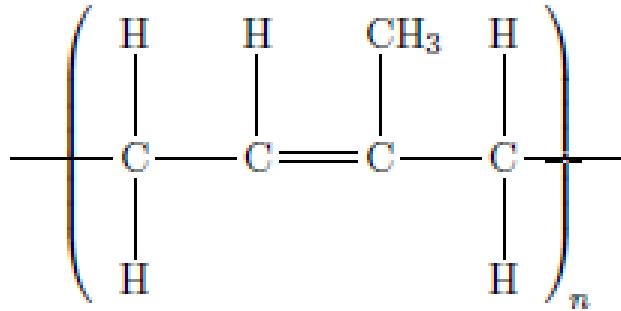
Çizelge 1.2. Aylara göre ölümlü yaralanmalı kaza, ölü ve yaralı sayısı (TÜİK,2014)

Ay	Ölümlü yaralanmalı kaza sayısı	(%)	Ölü sayısı	(%)	Yaralı sayısı	(%)
Toplam	168 512	100	3 524	100	285 059	100
Ocak	10 443	6.2	221	6.3	17 191	6.0
Şubat	10 057	6.0	195	5.5	16 440	5.8
Mart	12 352	7.3	243	6.9	20 173	7.1
Nisan	13 309	7.9	248	7.0	21 463	7.5
Mayıs	14 365	8.5	309	8.8	24 036	8.4
Haziran	15 603	9.3	302	8.6	26 916	9.4
Temmuz	16 872	10.0	440	12.5	30 399	10.7
Ağustos	18 249	10.8	428	12.1	32 781	11.5
Eylül	15 855	9.4	337	9.6	26 666	9.4
Ekim	15 380	9.1	342	9.7	26 902	9.4
Kasım	13 155	7.8	222	6.3	21 261	7.5
Aralık	12 872	7.6	237	6.7	20 831	7.3

1.2. Lastiğin Tarihi

Kauçuk, 18. yy öncesi Avrupa'da kullanılmazken, Amerika'da kullanılan bir malzemedir. 18. Yüzyılda Charles Marie De La Condamine tarafından ilk defa Avrupaya getirmiştir. İşlenmemiş kauçuk sıcak havalarda yapışkan ve soğuk havalarda sert olduğundan dolayı yaygın olarak kullanılmamıştır. Daha sonra İskoç kimyacı Charles Macintosh (1766-1843) kauçuğu, petrol türevlerinden elde edilen mineral yağ ile karıştırıp, sıvı haline dönüştürmenin yolunu bulmuştur. Bu sayede kauçuktan ilk su geçirmez elbise yapılmıştır. Yıllar sonrasında bilimsel eğitimi olmayan Charles Goodyear kauçuk üzerinde deney yaparken tesadüf eseri kauçuğu kükürt ile kaynattıktan sonra elde edilen maddenin elastik özelliğine sahip olduğunu görmüştür. Daha sonra bu işleme vulkanizasyon (vulcanization) adı verilmiştir. 19. yüzyılın ortalarında işlenmiş kauçuk kullanımı yaygın hale gelmiştir. Bu senelerde İskoç mucit Robert William Thomson bu karışımdan bir katman tekerlek üzerine kullanıldığında at arabalarının daha kolay hareket ettiğini keşfetmiştir. John Boyd Dunlop bu teoriyi, oğlunun üç tekerlekli bisikletini tamir ederken kullanarak, günümüzde kullanılan tekerlek lastiğini icat etmiştir (Omark, 2014).

Kauçuk, doğal ya da sentetik olabilir. Doğal kauçuk birçok farklı bitkiden özütlenmektedir. En önemli kullanılan bitki *Hevea brasiliensis* ağacıdır. Kimyasal olarak bilinen sentetik kauçuk, poliizopren polimerinden oluşmaktadır. Şekil 1.1'de poliizopren (Polyisoprene) polimerinin molekül yapısı verilmiştir (Omark,2014).

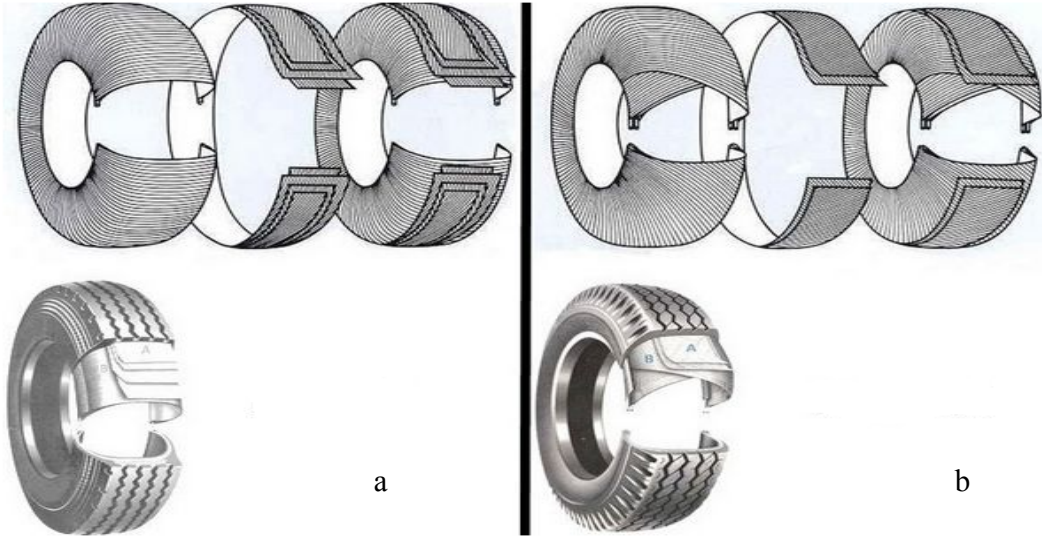


Şekil 1.1. Poliizopren (Omark,2014)

1.1.1.1. Düz ve çapraz tekerlekler

Tekerlek, dayanıklı bağ yapılarıyla güçlendirilmiş, iki kenarında demir kablolar ile donatılmıştır. Tekerlek düz (radyal) ve çapraz (diyagonal) olmak üzere iki asıl çeşide ayrılır. Çapraz tekerlek modeli, eski nesil tekerleklerde sıklıkla görülmektedir. Çapraz tekerleklerde, teller iki taraftaki kablolardan çapraz olarak geçmektedir (Şekil 1.2).

Düz (radyal) tekerlekler ilk olarak Michelin fabrikasında üretime başlamıştır. Bu tekerleklerde teller dik olarak iki kenardaki demirlere bağlanmaktadır. Bu özellik sayesinde düz tekerlekler, daha konforlu sürüş sağlamaktadır.

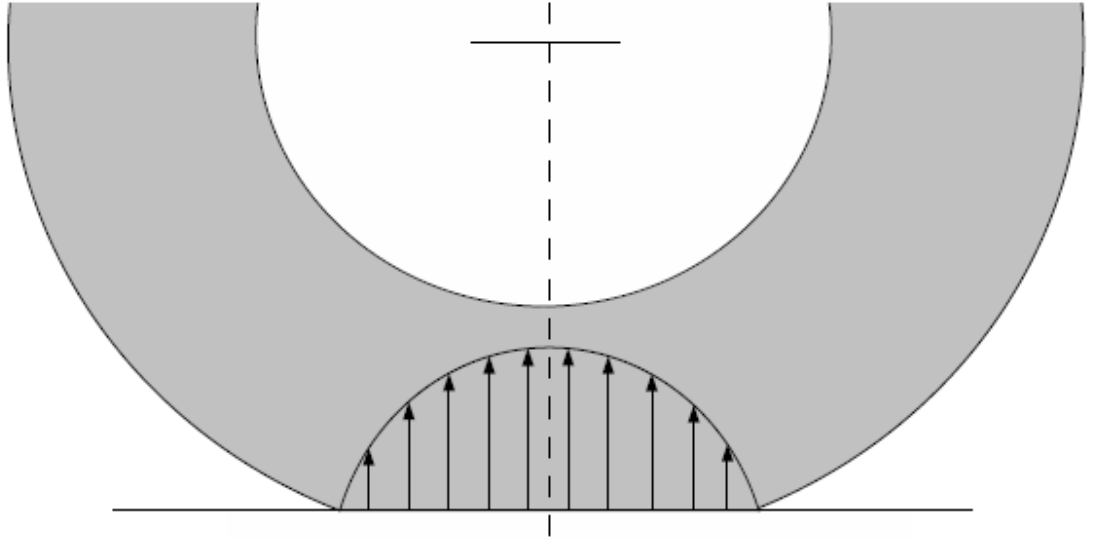


Şekil 1.2. Düz (a) ve çapraz (b) tekerlek modelleri (Omark,2014)

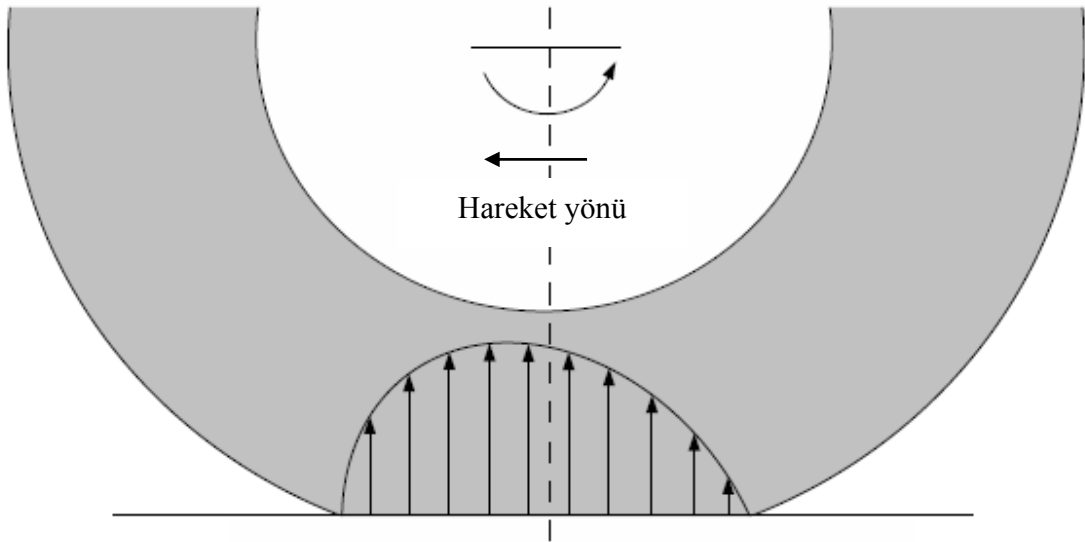
1.2.1. Normal basınç

Basınç etkisiyle lastiğin temas kısmı yassılaştır ve toplam kuvvet belirli bir bölgede dağılır. Dururken, Şekil 1.3'te görüldüğü gibi basınç iki tarafta simetrik olarak dağılmaktadır. Hareket halinde ise ön yarı taraftaki lastik sıkıştırılmış hale gelir, diğer tarafta ise gevşemiş halde bulunmaktadır (Şekil 1.4). Viskoelastik malzemede gevşeme süresi, sıkışma

süresinden daha uzundur. Bu durum basıncın ön tarafta yoğun olmasına neden olmaktadır (Omark, 2014).



Şekil 1.3. Dururken tekerlekte normal basınç dağılımı



Şekil 1.4. Hareket halinde tekerlekte oluşan normal basınç dağılımı

1.2.2. Kış tekerleği

Kış tekerleği ilk defa 1934 yılında Nokian Tires şirketi tarafından üretilmiştir. Başlangıçta kamyonetlerde zincir yerine kullanılması amacıyla üretilmiştir. 1936 yılında sedan araçlar için aynı şirket tarafından üretime geçilmiştir ve Hakkapeliitta tekerleği olarak adlandırılmıştır (Omark, 2014).

Kış tekerleğini, yaz tekerleğinden ayıran temel özellikler kullanılan malzeme ve desenleridir. Kış tekerleği soğuk havalarda, yaz tekerleği ise sıcak havalarda yüksek histerezis sergilemektedir. Kış tekerlekleri, kendi arasında çivili ve çivisiz tekerlekler olmak üzere ikiye ayrılır. Buzlu yol koşullarında hava sıcaklığının 0 °C'ye yakın olduğu durumlarda çivili tekerlekler daha iyi yol tutuşu sağlamaktadırlar.

Çivili tekerleklerin dezavantajları azdır, bunlardan en önemlisi 10 µm'den küçük yol üstü malzemesini koparmaları ve bununda hava kirliliğine sebep olmasıdır. Yol trafiği, PM10 (10 µm'den küçük parçalar) oluşmasında %59 katkı sağlamaktadır ve bunun %87'si çivili tekerleklerin kullanılmasıyla oluşur. Bu durum büyük şehirlerde önemli sorunlara yol açar (Omark, 2014).

1.3. Tekerlek Zinciri ve Kar Paleti

Otomotiv sanayi geliştikten sonra ilk defa Harry D. WEED tarafından 1904 yılında tekerlek zinciri New York'ta üretilmiştir (USPO, 1904). şekil 1.5'te tekerlek zincirinin patenti bilgileri ve kullanım şekli gözükmektedir.

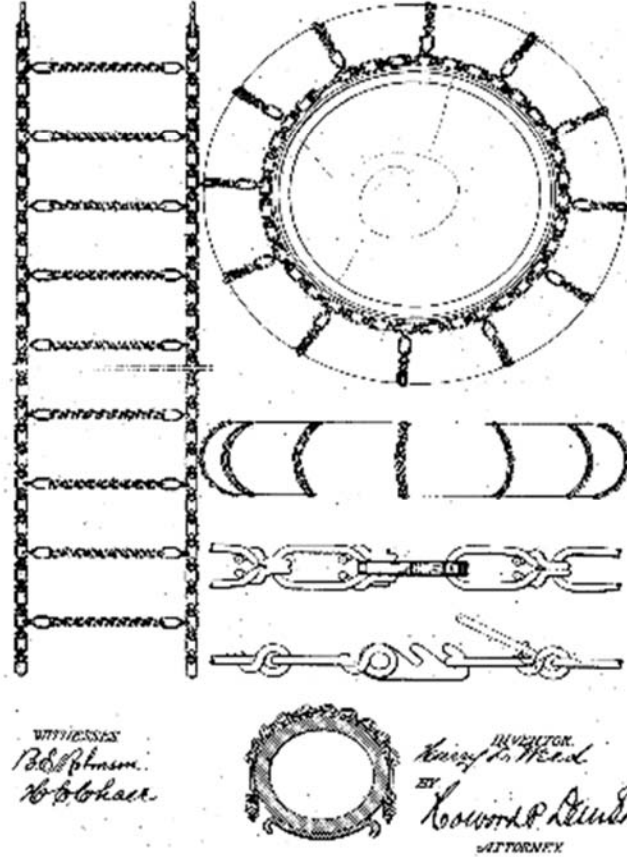
No. 760,496.

PATENTED AUG. 23, 1904.

H. D. WEED.

GRIP TREAD FOR PNEUMATIC TIRES.

APPLICATION FILED FEB. 9, 1904.



Şekil 1.5. Harry D. WEED tekerlek zinciri (USPO, 1904)

Soğuk havalarda kış tekerleği takmak zorunlu olup, özellikle karlı günlerde ve buzlu zeminlerde güvenli sürüşü sadece kış tekerleği ile sağlamak mümkün değildir. Sürücülerin direksiyon hakimiyetini sağlamakta güçlük çektiği bu aşamada güvenlik sağlayıcı unsur olarak kar zinciri (Şekil 1.6) ve kar paletleri (Şekil 1.7) kullanılmaktadır. Paletler farklı ebatlarda ve desenlerde üretilmektedir. Bunlar, hava sıcaklıkları düştüğünde tekerleğin boşa dönmesini engellemekte ve istemsiz kaymalara karşı en iyi koruma sağlamaktadır.

Kar zincirinin çeşidini sürücü belirlemektedir. Fakat kar zincirinin kullanılması yasal bir zorunluluktur.



Şekil 1.6. Tekerlek zinciri



Şekil 1.7. Kar palet çeşitleri

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1. Tekerlek Modellemesi ve Deneysel Çalışmalar

Mousseau ve Hulbert (1994) çalışmalarında, engelli yüzey üzerinde modellenen iki boyutlu tekerleğin aldığı darbelerden kaynaklanan, deformasyonları analiz etmişlerdir. Tekerlek dişleri için lineer olmayan kiriş elemanları ve tekerleğin yan duvarları için dairesel kaplama kullanılmıştır. Ayrıca tekerlek modelinin analizi için model, yüz elemana bölünmüştür. Bu analizde iki boyutlu analizin, yapılan üç boyutlu analizlerden daha etkin sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak elastik yaylı ve dairesel kaplamalı lastik kenarlarından oluşan modelin gerçek modele daha yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Ayrıca hazırlanan bu modelin, araç modelleme yapan programlarda kullanılabileceği öngörülmüştür.

Danielson, vd., (1995) çalışmalarında dijital resim tarama ile modellenen tekerleğin kaplama ile teması için sayısal yöntemler geliştirmişlerdir. “*Space Shuttle*” uzay aracının tekerleği, sürtünmeli ve sürtünmesiz olarak modellenmiştir ve tekerlek-kaplama arası ilişkinin, sonlu elemanlarda modellenmesinin kolaylaştırılması için üç yeni farklı yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler, farkı yaklaşım seviyesi ve bilgisayar kaynaklarına sahiptir. Bu modellerde, yüklemelerden dolayı oluşan iz düşümlerin, kaplama temas noktasındaki tekerlek tepkilerini çoğu zaman etkilemediği gözlemlenmiştir. İlk yöntemde, tekerleğin temas noktasına yakın olan yapıyı ele alarak tüm tekerleğin davranışı analiz edilmiştir ve bunun için tekerleğin temas noktasında olan yarım daire yeterli olmuştur. Bu yöntem, tekerlek modelleme için kullanılan sonlu elemanlar yönteminde kolaylık sağlamıştır. İkinci yöntemde sadece gerekli hesaplamaların yapılması için bir model kullanılmıştır. Sistem denklemlerinin tümünü tamamlamak için Newton-Raphson iterasyon yöntemi kullanılmıştır ve daha sonra yanlış denklemler ihmal edilmiştir. Üçüncü yöntemde tekerlek modelinin çok sayıda elemana bölünmesi ile elde edilen sonuçların hassasiyetini arttırdığı gözlemlenmiştir. Tekerlek-kaplama arasında olan sürtünmeli ve sürtünmesiz sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri kıyaslandığında, sürtünmeli analizin daha masraflı

olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kullanılan üç yöntemde, ikinci ve üçüncü yöntemler ilk yönteme göre daha doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Allen, vd., (1996) çalışmalarında ısı oluşumunun en önemli etkenlerinden biri, dönmekte olan tekerleğin viskoelastik deformasyonları olduğu bulgusuna ulaşmışlardır. Bu çalışmada uçak tekerleğinin ısı oluşumundan sorumlu olan deformasyonları araştırmışlardır. Aynı zamanda ısı oluşumundan elde edilen sonuçlar, ısı transfer analizinde kullanılmıştır. Model olarak hava ile dolu (iç basınçlı) bir tekerlek aksisimetrik olarak analiz edilmiştir. Merkezi yükler Hoop gerilmesinden elde edilmiştir. Deformasyon analizi için sabitlenmiş ve periyodik sınır koşullarında, iki boyutlu şekil değiştirme düzlemi kullanılmıştır. Uçuş fazına geçişte tekerlek analizi için merkezi yükler ve yol yüzey çökmeleri gerekli görülen noktalarda kaldırılmıştır. Yol yüzeyinin tekerleğe temas ettiği anda merkezi yükler aniden azaltılmıştır. Ancak bu üç boyutlu modellemenin hesaplama kısıtlamalarının olması, sonuçların elde edilmesini engellemiştir.

Liu ve Wong (1997) çalışmalarında Marc sonlu elemanlar programı ile tekerlek-toprak modellemesi yaparak, bu modelleme için sayısal analizleri yapmışlardır. Tekerlek-toprak temasında kayma durumunu analiz etmek için lineer olmayan sürtünme denklemi kullanılmıştır. Normal basınç ve kayma gerilmesi sonuçlarının sürtünme denklemine bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Yan (2001) çalışmasında sonlu elemanlar yöntemi ile bir tekerlek modeli yapmıştır. Bu tekerlek modelinde, tekerleğin kauçuk malzemesi lagrange çarpanlar yöntemine göre analiz edilmiştir. Bu analizde tekerleğin kauçuk malzemesi rijit bir malzeme olarak tanımlanmıştır. Elastomer malzemelerin lineer olmayan mekanik özellikleri Mooney-Rivlin modeli ile modellenmiştir. Bu modellemede; tekerlek dokusu ve tekerleklerin iç yapısında kullanılan çelik tel, kauçuk ve ipler, Halpin-Tsai denklemlerinde belirlendiği gibi eşdeğer ortotropik malzeme olarak tanımlanmıştır. Radyal tekerleğin ve rijit jantın temas sınırları değişken sınırlar yöntemi ile belirlenmiştir. Bu modelin deformasyonları lagrange yöntemi ile hesaplanmıştır. Bu analizin sonuç değerleri, deneysel sonuçlara yakın olduğu tespit edilmiştir.

Nakajima (2003) çalışmasında kar üzerindeki tekerlek izdüşümü için bir yöntem geliştirmiştir. Bu yönteme göre tekerleğin kar üzerindeki izdüşümü; frenleme kuvveti, karda kesme kuvveti, sürtünme kuvveti ve kazma kuvveti olmak üzere dört kuvvetten etkilenmektedir. Frenleme kuvveti, kar sıkışmasında etki sağlarken kar kesme kuvveti tekerlek bloklarındaki boşlukları etkilemektedir. Sürtünme kuvveti ve kazma kuvveti ise lameller ve blokların kenarlarından oluşmaktadır ve bu kuvvetlerin bulunması için karın mekanik özellikleri kullanılmıştır. Statik izdüşümünde (tekerleğin kar üzerinde kaymasından önce) sürtünme kuvveti ve desen boşlukları katkı sağlamaktadır. Kazma kuvveti ve sürtünme kuvveti, yüksek kayma durumlarında etki sağlamaktadır. Sürtünme katsayısı bire eşit olduğunda, sürtünme kuvveti maksimum değere ulaşmaktadır. Kar kesme kuvveti, karın mekanik özelliklerine bağlı olarak tekerleğin maksimum batmasında en yüksek değere ulaşmıştır.

Petrovic (2003) çalışmasında buzun ve karın mekanik özelliklerini incelemiştir. Buna göre hava sıcaklığının $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu zaman buzun gerilme direnci $0.7\text{-}3.1\text{ MPa}$ arasında ve basınç dayanımı $5\text{-}25\text{ MPa}$ arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Buzun basınç dayanımı sıcaklığın düşüşüyle arttığı gözlemlenmiştir. Gerilme dayanımı ise buz yapısının hacmi ile ters orantılı olduğu belirlenmiştir.

Nackenhorst (2004) çalışmasında serbest lagrange euler yaklaşımı (ALE) ile dönmekte olan tekerleğin temas problemlerini analiz etmiştir. Hareket fonksiyonları ile temel kinematik ilişkiler türetilmiştir. Temas noktalarını lagrange yönteminde analiz etmek için “master-slave” konsepti kullanılmıştır. Burada ana model konvektif koordinatlar ile belirtilmiştir. Büyük deformasyonları hesaplamak için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Bu modellemeden net bir sonuç alınabilmesi için hareketli eleman deforme olabilen, sabit eleman ise rijit olarak kabul edilmiştir. Bu uygulama, basit üç boyutlu analiz ile test edilmiştir. Algoritmik yaklaşımın sayısal sonuçlarının ve yakınsaklık davranışının olasılığı tartışılmıştır. Bu analizlere göre kuadratik yakınsaklık (quadratic convergence) yaklaşımı temas problemi için uygun bulunmuştur. Fakat dönmekte olan sürtünmeli temas için sadece lineer yaklaşım algoritmasının uygun olduğu gözlemlenmiştir.

Cho, vd., (2006) çalışmalarında ıslak yol üzerinde desenli tekerleğin hidrolik pülverizasyon (hydroplaning) karakterlerini analiz etmişlerdir. Bunun için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Lastik malzemesi ortotropik Mooney-Rivlin kabuk olarak tanımlanmıştır. Tekerlek dişleri ve su akışında oluşan akışkan-yapı ilişkisi genel bağ yöntemi ile modellenmiştir. Bu analizde su, tekerlek dişlerinin arasından drene olmuştur, bu durum için hidrodinamik basınç ve temas alanında kuvvet sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlar, üç kanallı tekerlek modeli ile kıyaslanmıştır. Sayısal verilere göre desenli tekerlek, üç kanallı tekerleğe göre daha düşük hidrodinamik kuvvet oluşturmuştur. Sayısal model; hidrodinamik kuvvetin, hızın karesi ile orantılı olduğunu göstermiştir.

TS 663/Mayıs 2007 Mecburi standart tebliğine göre, karayolları taşıtları tekerleklerine takılan, karlı, buzlu, çamurlu, çakıllı veya gevşek yapılı yol ve arazi yüzeyini kavrayarak aracın hareketini kolaylaştıran kaymasını önleyen, frenleme mesafesini kısaltan ve zincir elemanlarından oluşan bir tertibat olarak tanımlanmıştır.

Chang ve Yang (2009) çalışmalarında araç tekerleği için lineer olmayan dinamik sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme yapmışlardır. Tekerlek, başlangıç hıza sahip ve yatay düzlem ile 13° açısı olan bir elastoplastik malzeme olarak tanımlanmıştır. Tekerlek üzerindeki etkileri tespit etmek için esnek kırılma mekaniği kullanılmıştır. Esnek kırılma mekaniğinin plastik deformasyon kavramı, tekerlek yetmezliği (failure) tahmini için kullanılmıştır. Basınç altında olan tekerleğin, şekil değiştirme enerji yoğunluğunu ve tekerlek malzemesinin toplam plastik deformasyonuna bağlı olan kritik şekil değiştirme enerji yoğunluğunu bulmak için üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemi doğrulamak için deneysel testler yapılmıştır ve analizler ile kıyaslanmıştır. Bu analizde sonlu elemanlar yöntemi ile çözümlenen modelin deney sonuçlarına yakın olduğu ve tekerlekte plastik deformasyon tespit edilmesi için bu yöntemin kullanışlı olduğu tespit edilmiştir.

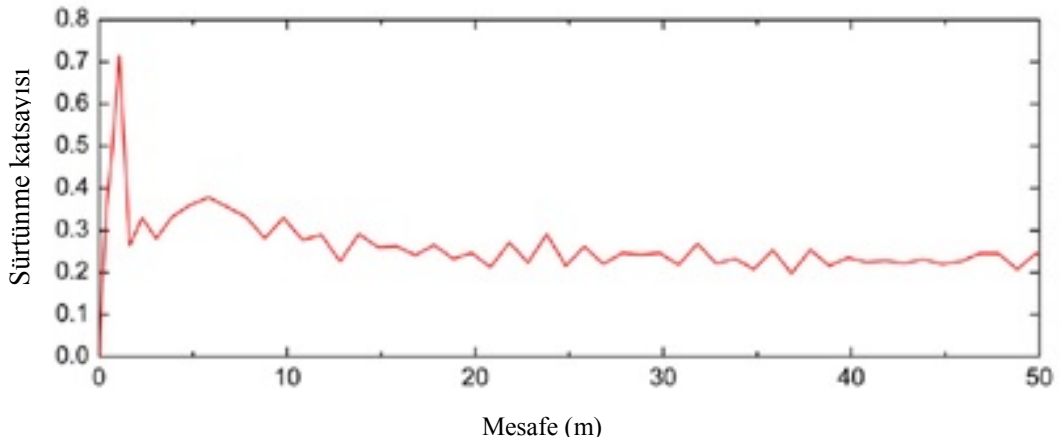
Karaytuğ (2009) çalışmasında 195/60R15 otomobil tekerleğini, yere basma alanının farklı tekerlek hava basınç koşullarında deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmiştir. Deneysel çalışmada tekerleğin üzerine gelen yük sabit tutulmuş ve hava basınçları

değiştirilerek tekerleğin yere basan toplam alanı ve birim alana düşen yük hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar yönteminde ANSYS programı kullanılmıştır. Tekerleğin ANSYS programı ile çizimleri yapılmış ve malzeme özellikleri tahmini olarak tanımlanmıştır. Sabit yük ve farklı basınçlar altında tekerlek modellenerek deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalara göre tekerlek izdüşümünün, tekerlek hava basıncına bağlı olduğu bulunmuştur, yani basınç arttığında ve şişme meydana geldiğinde tekerlek izdüşüm alanı azalmıştır. Yeterli şişme basıncı 32 psi olarak bulunmuştur ve 30 ile 42 psi değerlerindeki basınçta, sonuçların birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.

Şengöz, vd., (2010) çalışmalarında İzmir şehir içi yollarında Dinamik Sürtünme Ölçer (DFT) cihazı ile kayma direnç ölçümleri yapmışlar ve trafik kazaları ile ilişki kurmaya çalışmışlardır. Çalışma sonucunda, DFT değerinin, kazaların engellenmesinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. DFT değerinin düşük ve hız değerlerinin yüksek olduğu Mustafa Kemal Sahil Bulvarı Asansör Durağı gibi bölgelerde kaza sayılarının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, yol kaplamada iyileştirme çalışmalarının trafik güvenliği açısından büyük önem taşıdığını göstermiştir.

Skouvaklis, vd., (2011) çalışmalarında buz üzerindeki tekerleğin sürtünme katsayısını bulabilmek için lineer tribometre kullanmışlardır. Bu yöntemde $0.9 \times 0.4 \times 0.03$ m buz kütlesi üzerine tekerlek konulmuştur ve bu tekerleğin üzerine demir tutucular yerleştirilmiştir. Bu demirler test makinasına rijit olarak bağlanmıştır. Deney makinası soğuk bir odaya ($-15-0^{\circ}\text{C}$ arası) konulmuştur ve makina titreşimlerinin hatalara neden olmaması için beton duvara sabitlenmiştir. Tekerleğin hızı, $0.01-2$ m/s arasında kullanılmıştır. Hareket mesafesi 530 mm olarak belirlenmiştir. Deneyde buz yüzeyinin düz olması için buz yüzeyinden 2mm kalınlığında bir tabaka alınmıştır. Buz kütlesinin kırılmaması için -3.5°C sıcaklıkta hazırlanmıştır ve $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ortam sıcaklığı sabit tutulmuştur. μ sürtünme katsayısı, z yönündeki yüklerden (normal yük) ve x yönündeki yüklerden türev alınarak hesaplanmıştır. Tekerlek sürtünme kuvveti, tekerleğin farklı hava şartlarında performansını etkilediği gözlemlenmiştir. Genellikle tekerlekte yüksek sürtünme kuvveti gözlemlenmiştir fakat bu sürtünmenin, kar yüzeyinde kaygan özelliğinden dolayı düştüğü tespit edilmiştir. Buzun yüzeyindeki hareketli sürtünme

katsayısı (μ) bu yüzeyin üzerinde oluşan kaygan yüzeye bağlı olarak farklılık göstermiştir. Buzlu yüzeylerin üzerinde oluşan kaygan yüzeyin kalınlığının artması ve buna bağlı olan kinetik sürtünme katsayısının değeri (μ); hız, sıcaklık ve yüke bağlı olduğu belirlenmiştir. Etkili diğer bir parametre ise temas noktalarıdır. Düşük hız ve sıcaklıkta buz yüzeyinde az miktarda erimiş su mevcut olduğu saptanmıştır ve katı-katı arasındaki sürtünme kuvvetinin, sürtünme katsayısına bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Hız ve yüklemelerden dolayı oluşan ince kaygan tabaka yükseldikçe eriyen tabaka kalınlığı artar, bu sebeple sürtünme katsayısında büyük bir düşüş meydana gelir. Buna göre sürtünme katsayısı-mesafe arasındaki ilişki Şekil 2.1'deki gibidir.



Şekil 2.1. Sürtünme ve mesafe arasındaki ilişki

Choi, vd., (2011) çalışmalarında karlı zeminlerde tekerleğin izdüşümü ve deformasyonlarını hesaplamak için lagrange sonlu elemanlar yöntemi kullanmışlardır. Tekerlek bloklarının arasındaki etkileşimden dolayı oluşan kar deformasyonunun bulunması için açık euler-lagrange bağlantısı kullanılmıştır. Karın; yumuşaması, esnemesi ve kullanılan malzemenin tanımlanması için çok yüzeyli modelleme yöntemi kullanılmıştır. MSC/Dytran programında kar sertliği, blok derinliği ve tekerlek desen değerleri kullanılarak kar çekiş özellikleri analiz edilmiştir. Bu çalışmada, kar sertliği, blok derinliği ve tekerlek deseninin; brüt iz düşümünde, dönme dayanıklılığında, net iz düşümünde ve iz düşüm veriminde etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca desenli tekerleğin kar üzerinde çekiş gücü, kar sertliği ile orantılı olduğu gözlemlenmiştir.

Tekerlek, yumuşak yolda sert yola göre dört kat daha yüksek performans sergilemiştir. Blok derinliği 5-8 mm arasında olduğunda, çekiş verimliliğinin iki buçuk kat arttığı gözlemlenmiştir.

Cho, vd., (2012) alışmalarında üç boyutlu tekerlekte dönme direnci ve sıcaklık dağılımı için sayısal yöntem geliştirmeye çalışmışlardır. Devirli olarak desenlenen tekerlek modelleri, bir yapının dairesel dönmesi ile oluşturulmuştur. Histerezis kayıpları, Şekil değiştirme elemanlarından ve ısı transferi analizlerden elde edilmiştir. Bu çözümlemede dönme direncinin bilgisayarda analizi ile deneysel analiz arasında %13'ten daha düşük hata olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca tekerlek dişlerinin dönme direncinde %40 katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Hız artması sonucunda ısı oluşum oranı ve pik sıcaklık, doğrusal orantıda artmaktadır, ancak bu durum toplam histerezis kayıp ve dönme direncinde düşüş göstermiştir. Tekerlek dişlerinin deseni dönme direncinin, pik sıcaklık ve dağılımlarında önemli rol aldığı gözlemlenmiştir.

Omark (2014) alışmasında temas modelleme yöntemi ile tekerlek ve yol arasında sürtünmeyi hesaplamıştır. Temas modellemede sadece normal ve teğet kuvvet bilindiğinde tekerlek ve yol arasındaki sürtünme katsayısı bulunabilir. Bu yöntemin frenli tekerlek veya sabit kayma açısı teknikleri gibi ölçümlerde sürtünme katsayısını bulmakta faydalı olduğu gözlemlenmiştir.

Wei ve Olatunbosun (2014) alışmalarında dönme hızının ve kaplama prz boyutunun tekerleğin eksenel dinamiğinde etkisini incelemişlerdir. Bunun için gerçek tekerlek parametreleri kullanılarak sonlu elemanlar modeli, ABAQUS sonlu elemanlar programı ile tasarlanmıştır ve deneysel veriler ile kıyaslanmıştır. Bu analize göre tekerleğin yüksek engelden geçtiğinde boyuna dinamik rijitliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Yol engelinin yüksekliği arttığında, eksenel kuvvet (spindle force) tepkisinin rezonant genliğinin boyuna ve enine arttığı grlmştir. Ayrıca deformasyonun tekerlek hızına çok az bağlı olduğu gözlemlenmiştir.

Barbosa ve Magalhaes (2014), çalışmalarında tekerleğin diş desenlerinin tekerlek üzerinde aynı zamanda gerilme dağılımı ve toprak sıkışmasında etkilerini incelemişlerdir. Bunun için benzer iki ticari tekerleğe, statik testleri yapılmıştır. Testler laboratuvar şartlarında hazırlanmış, sert ve yumuşak zeminlerde dişli ve pürüzlü tekerlekler ile yapılmıştır. Dişli ve pürüzlü tekerleklerin asıl farkı kullanılan kauçuk et kalınlığıdır, yani dişli tekerlekte dişlerinin arasında daha ince kauçuk tabakası vardır. Tekerleğin deformasyonu ile tekerleğin rijitliği, lineer olmayan ve lineer iki kademe de değişir; ilk (lineer olmayan) olarak tekerlek dişlerin yapısal rijitliğinden dolayı ve ikinci (lineer) kenarların güçlü rijitliğinden etkilenir. İlk kademe dişli tekerlek düşük rijitlik göstermiştir, buna rağmen ikinci kademe her iki tekerlek aynı sonuçlar göstermiştir. Sert yüzeyde dişli tekerleğin dişlerinde gerilmelerin yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Yumuşak toprakta, her iki tekerlekten gelen 29 kN kuvvet etkisi ile yüzey toprağında büyük sıkışma olduğu gözlemlenmiştir.

Xiong ve Tuononen (2015) çalışmalarında sensörler ile kamyon tekerleklerin dönme direnç kuvvetini hesaplamışlardır. Çalışmada dönme direncini iyileştirmek için tekerlek yapısı, malzemesi ve diş desenlerinin modellenmesi yapılmıştır. Jant deformasyonu, tekerleğin yan profil deformasyonu ve tekerlek dişlerinin deformasyonunu ölçmek için tekerleğin jantına bağlı optik sensör kullanılmıştır ve ölçümler analiz edilmiştir. Ayrıca yüklemeye ve şişme basıncının tekerlek dişlerindeki etkisi, test edilerek analiz edilmiştir. Yüksek yüklemeye ve düşük şişme basıncı altında yeni tekerlekte ölçümler; tekerlek kenarlarının deformasyonu, dönme direncinin artmasına neden olduğu fakat düşük yüklemeye ve yüksek şişme basıncında bu değerlerin daha yüksek olduğu görülmüştür. Buna göre kenarlardaki deformasyonun dönme direncinde etkisi yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Botha ve Els (2015) çalışmalarında sürtünme katsayısını bir kamera ile çekilen dijital fotoğraf bağıntısı kurarak yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Kamera, temas noktasını kaydedecek bir şekilde monte edilmiştir. Böylece tekerlek izi ve hızı ölçülmüştür. Sürtünme katsayısı ölçümlerinin değerlendirilmesi ile hesaplanmıştır.

Steyn ve Ilse (2015) çalışmalarında kaplama yüzey pürüzlülüğünü, tekerlek yüzey alanını ve gerilmelerini incelenmiştir. Beş farklı yüzey modelinde, tekerlek iç basınç farklılıkları için pürüzlülük derinlikleri ve tekerlek yüzey gerilmeleri hesaplanmıştır. Buna göre pürüzlülük derinliği tekerlek temas gerilmelerine etkisi olmadığı fakat tekerlek iç basıncının temas gerilmesinde önemli rol aldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yakıt tüketim açısından araç masraflarının kaplama tabakasının pürüzlülüğüne bağlı olduğu görülmüştür.

Hoever ve Kropp (2015) çalışmalarında tekerlekteki dönme kaybını tahmin etmek için teker-yol ilişkisinde denge durumunda dönen tekerlekten hesaplanmış temas kuvvetleri ve tekerlek titreşimleri kullanılmıştır. Bu çalışmada üç farklı tekerlek, ondokuz farklı yol yüzeyi ve beş kauçuk bileşenli modern yol modelleri kullanılmıştır. Benzeşimde kaplama deseninin dönme direncindeki etkisi, deneylerdeki sonuçlara benzer olduğu tespit edilmiştir. Dönme direnci; ilk olarak büyük ölçüde tekerlek yapısındaki deformasyon ve ikinci olarak küçük ölçüde tekerlek dişleri çukurlarından oluşmuştur. Tekerlek yapısının genel dönme direncindeki etkisi yaklaşık tüm yüzeylerde aynı olduğu tespit edilmiştir. Küçük ölçüde tekerlek dişlerinin deformasyonlarından dolayı oluşan kayıp, yüksek derecede kaplama yapısına bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Buna göre pürüzsüz yüzeylerin %0-%25'inde ve pürüzlü yüzeylerin %50'sinde kayıp oluşmuştur. Pürüzsüz yüzeylerde dönme direncini tekerlek yapısındaki deformasyonlar etki ederken, pürüzlü yüzeylerde pürüzlerden dolayı tekerlek dişlerinde oluşan bölgesel deformasyonlar etken olarak gözlemlenmiştir.

Krmela ve Krmelova (2015) çalışmalarında sonlu eleman analizi ile çalışan ANSYS programındaki araçlar için radyal tekerlek modellemiştir. Tekerleğin kompozit yapıları (tekerleğin gövde yapısı, demir kenarlar ve tekerlek dokusu), sonlu elemanlar sayısının arttığı ve bu sebepten analizin uzun sürdüğü için modellenmemiştir, bu yapıların yerine farklı rijitlik özellikleri kullanılmıştır. Bu modellemede, tekerleğin kompozit malzemesinin yapısal analizi yapılmıştır.

Gray, vd. (2016) çalışmalarında tekerlek dinamik yüklemeleri, üniform arazide tutunma, dönme direnci ve arazi değişikliğinde geçici deformasyonlarına göre tekerlek-toprak tepkilerini geliştirmek için yeni modelleme yapmışlardır. Bu modelleme sonucunda tekerlek kayması, arazi değişikliklerinde ve üniform arazide oluşan kaymaların hesabında sadece tekerlek kayması kullanılması yetersiz olduğu ve bunun için ek olarak anlık tekerlek yarıçapı ve jantın kinematik dönme parametrelerinin de gerekli olduğu sonucuna varılmıştır. Harekette olan tekerleğin kayma dinamik modeli dikkate alındığında, arazi değişim değerlerinin, boyuna dinlenme değerlerinden daha uzun olduğu sonucuna varılmıştır. Model tekerleğin geçici fazlarında kaymasını kontrol ederek aracın arazilerde hareket etmesinin geliştirilmesinde katkı sağlayabileceği sonucuna varılmıştır.

2.2. Kar Modellemesi ve Deneysel Çalışmalar

Lang, vd. (1996) çalışmalarında Batı Yellowstone/Montana'da kar yolu yapımı için kar işlem teknikleri araştırmışlardır. Bunun için dört farklı bölgede oniki haftalık sürede kar sertliği gözlemlenmiştir. Her hafta bu bölgelerdeki kar yapısının birim hacim ağırlığı ve mekanik özelliklerini saptamak için yüzeysel örnekler alınmıştır. Aynı zamanda mikro yapısal özellikleri bulmak için resim analizleri yapılmıştır. Sıcaklık verileri ve gerilme ilişkileri analiz edilmiştir. Kar basınç dayanımı; elemanların temasları ve taneler arasındaki bağlar fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Bağ sayıları arttıkça, kohezyon ve mukavemetin arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum sıkışma elde etmek için kar tanelerinin küçük olması sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada sıcaklık fonksiyonunun gerilmeye bağlı olduğu belirlenmiştir. Ortam sıcaklığı arttığı zaman gerilme kuvvetinin düştüğü gözlemlenmiştir. Gerilme değerlerinin analizi için resim analizinin güvenilir ve etkili olmadığı gözlemlenmiştir.

Buhl, vd., (2001) çalışmalarında polietilenin kar yüzeyinde kaymasını laboratuvar ortamında analiz etmişlerdir. Laboratuvar ortamı yarış ortamına göre ayarlanarak, sürtünme katsayısı soğuk haznede tribometre kullanarak ölçülmüştür. Deneysel, ortam sıcaklığı -25-0 °C ve yük 50-300 kPa arasında yapılmıştır. Sıcaklık arttığında, yüklemelerin sürtünme katsayısında etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Ortam sıcaklığı

-4 °C ve -3 °C olduğunda sürtünme katsayısının minimum olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklık -3 °C ile 0 °C arasındaki kar erimesinden dolayı oluşan suyun kapilar tutunma etkisi artmıştır, sonuç olarak sürtünme katsayısının arttığı gözlemlenmiştir. Bu deneydeki kuvvet ve sürtünme arasındaki lineer ilişkinin toplam sürtünme kuvveti teorisiyle uyumlu olduğu kanıtlanmıştır. Buna göre yüksek kuvvet etkisinde sürtünme sıcaklığının arttığı gözlemlenmiştir.

Norheim, vd., (2001) çalışmalarında uçak tekerleğinin buzlu yüzeyde hareketi tribosistem yöntemi ile araştırılmıştır. Tribosistem; tekerlek, kaplama, kar ve atmosferden oluşmaktadır. Kar veya buz deformasyonu, üç eksenli elastik deformasyon ile hesaplanmıştır.

Haehnel ve Shoop (2004) çalışmalarında Drucker-Prager benzeşim modeli ile birim hacim ağırlığı 150-250 kg/m³ olan karın araç yükleri altında -10 °C ile -1 °C sıcaklıkta deformasyonunu analiz etmişlerdir. Modelde kullanılan değerler, deneysel verilerden elde edilmiştir. Kar modelleri tek eksenli basınç deneyi, plaka batma ve dönen tekerlek testleri ile kıyaslanmıştır. Plaka batma testi ve tekerlek-kar modelinden, sıkışmış karın birim hacim ağırlığı tespit edilmiştir.

Lever, vd. (2005) çalışmalarında Bekker hareket teorisini kullanarak 1400 kilogramlık araç için küçük ölçekte 24 kg ağırlığındaki bir robot tasarlayarak derin ve ince tabakalı kar yüzeyinde hareket performansını incelemişlerdir. Bu çalışmada, derin kar tabakasında on test ve ince kar tabakasında dört test yapılmıştır. Lineer batma izi ve ölçülen Bekker parametreleri için ortalama tahmin edilen batma ve kar sıkışma direncinin ortalama deney sonuçlarına yakın olduğu tespit edilmiştir. Ancak günlük tahmin edilen ve ölçülen değerler arasında önemli bir fark olduğu gözlemlenmiştir. Derin kar tabakalarında, basınç ve batma mesafesinin doğrusal orantılı olduğu tespit edilmiştir.

Klein, vd., (2006) çalışmalarında uçak tekerleğinin kardaki izdüşümünden ince kesit olarak mikroskop altında incelemişlerdir. Kar birim hacim ağırlığı, yüzey yapısı ve tane/hacim özelliklerini belirlemek için resim analizi yapılmıştır. 20 ile 30 mm arasında

yağmış karın birim hacim ağırlığı yaklaşık 150 kg/m³ olarak tespit edilmiştir. Yağıştan otuz dakika sonra 15 km/sa hız ile kar üzerinden geçilmiştir. Sıkışmış karın birim hacim ağırlığı 400 kg/m³ olarak tespit edilmiştir. Daha sonra 60 saniye içerisinde kar numuneleri alınmıştır. Bu numuneler katı halde incelenmek için -20 °C de saklanılmıştır. Kar numunesinin mikroskop altında renkli görünümü için kar numunesine dimetil ftalat ilave edilmiştir ve dimetil ftalat gri renkte gözlemlenmiştir. Kar numunesinin polarize ışık altında renkli görünmesi, numunenin inceliğine ve kristal yapısına bağlıdır. Daha sonra dijital kamera ile fotoğraflar çekilmiştir ve 140 piksel/mm çözünürlükte incelenmiştir. Piksel/mm hesaplaması, 2.1'deki formül referans alınarak belirlenmiştir. Fotoğraf analizi sonucunda bu formül kullanılarak kar birim hacim ağırlığı 374 kg/m³ olarak tespit edilmiştir ve önceki ölçümler (400 kg/m³) ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

$$\rho_s = \frac{\sum \text{buz pikselleri}}{\sum \text{pikseller}} \times \rho_{\text{buz}} \quad (2.1)$$

Kar yüzey yapısının resim analizinde, en üst pikselin yüzeye mesafesi 2.01 mm olduğu tespit edilmiştir. Bu analiz ile birim hacim analizi karşılaştırıldığında yüzeyden bir milimetre derinliğe kadar olan kar tabakasının, alt tabakaya göre daha düşük yoğunluğa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Kar tabakasının sıkıştığı zaman, kar tanelerinin karmaşık yapılar oluşturduğu ve kar tanelerinin büyüdüğü gözlemlenmiştir. Tane çaplarına göre kar tabakası iki bölüme ayrılmıştır. İlk tabakada, alt tabakaya göre daha büyük taneler olduğu gözlemlenmiştir.

Navarre, vd., (2007) çalışmalarında karın mikro özelliklerini dikkate almadan çok katmanlı karın üç boyutlu deformasyonlarını, sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmişlerdir. Ayrıca bu analizi doğrulamak için elekten geçirilmiş kar deneyleri yapılmıştır. Kar, sıcaklık ve birim hacim ağırlığına bağlı lineer olmayan viskoelastik malzeme olarak tanımlanmıştır. Deneysel analizde, kara 1 ile 100 µm/s arasında hız ile basınç deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmada, karın deformasyonunun belirlenmesi için kar modelinin hazırlanması ve kar modelinin Flac3D koduna çevrilmesi yapılmıştır. Sayısal benzeşimde mekanik testleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarının deneysel sonuçlara yakın olduğu tespit edilmiştir.

Klein-Paste ve Sinha (2010) çalışmalarında tekerlek-buz ve kum-buz arasında sürtünme kuvveti ölçümlerini -22-0 °C sıcaklıkta yapmışlardır. İlk kar modeli düz bir yüzey üzerine su püskürtme ile yapılmıştır. Daha sonra donma derecesinde bekletilip model hazırlanmıştır. Buz tabakasında tanelerin çapı 0.1-2 mm arasında olduğu gözlemlenmiştir. Bu model, doğal ortamda yol üzerindeki yağıştan dolayı oluşan buzul zemin için modellenmiştir. İkinci kar modeli doğrudan katı hale getirilerek hazırlanmıştır. Bu model 500×350×300 mm hacminde bir su deposuna saf su konularak ve sıcaklığı -10 °C'ye düşürülerek hazırlanmıştır. Ayrıca kar modelini oluşturmak için bu deponun içine elekten geçirilmiş kar eklenmiştir. Daha sonra 30 mm ve 40 mm derinlikten 250×90×10 mm ebatlarında dikdörtgen kübik numuneler kesilip hazırlanmıştır. Numunelerin yüzeyine silis içeren jel kullanıldıktan sonra kırksekiz saat buharlaşmaya bırakılmıştır. Bu prosedür, buz yüzeyinin pürüzsüz ve aynı zamanda mekanik hasarların minimum seviyede olmasını sağlamıştır. Bu numunede, tane çapları 10-20 mm arasında belirlenmiştir. Pendulum test aleti kullanılarak 76×25×7 mm ebadında bir tekerlek numunesinin buz modellerinin üzerinde sürtünme katsayıları hesaplanmıştır. 152 mm²'lik temas alanına 22 N'luk kuvvet sonucunda, 140 kPa'lık basınç oluştuğu tespit edilmiştir. Başlangıç hızı 3 m/s olarak verilmiştir. Buz erime sıcaklığına yakın sürtünme katsayısının azaldığı ($0.05 < \mu < 0.09$) ve -5 °C altında da sürtünme katsayısının arttığı ($0.2 < \mu < 0.5$) gözlemlenmiştir. Kum-buz arasındaki sürtünme katsayısının sıcaklığa bağlı olmadığı belirtilmiştir.

Li, vd. (2009) çalışmalarında kar derinliği ve yoğunluğuna göre tekerlek ve kar arasındaki etkileşim için matematiksel ses yöntemini geliştirmişlerdir. Tekerlek-kar arasında basınç-gerilme ilişkisini belirlemek için polinomial karmaşık yaklaşım ile kar modeli hazırlanmıştır. Lastiğin rijit veya esnek seçilmesi tekerlek ve kar etkileşiminde yüksek etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Kar derinliğinin, harekete karşı direncin artmasında etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kar derinliğinin kuvvete etkisi, kar yoğunluğundan daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Parker, vd., (2009) çalışmalarında tekerlek benzeşimi için araç-arazi kodu geliştirmişlerdir. Bunun için SimCreator programı kullanmış olup benzeşim için kodlama geliştirmişlerdir. Bu kodlama; deneysel denklemler, dinamometre deneyleri ve NATO

referans hareket modeline göre geliştirilmiştir. Yüzey ve zemin mekaniği kodları kullanılarak kurulan bağlantılar ile tekerlek-arazi arasındaki etkileşim hesaplanmıştır. Derin ve sık kar için araç-arazi etkileşiminde batma ve hareket direnç katsayılarının benzeşim sonuçları, deneysel analiz sonuçları ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca modelleme ve deneysel çalışmada yanal kuvvet denklemlerinin, kar derinliğine bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan benzeşimde, slalom ve dairesel manevralarda eksenel hareket kuvvetinin uygun değerlerde olduğu tespit edilmiştir.

Borstad ve McClung (2011) çalışmalarında homojen doğal kar numunelerinden onyedi kırış kırılma deneyini yapmışlardır. Bu deneyler pürüzlü ve pürüzsüz olarak yapılmıştır ve buna göre malzeme özellikleri sayısal analiz için kullanılmıştır. Karda deformasyonlar, iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Deney numuneleri; 50 cm uzunluk, 10cm yükseklik ve 10 cm genişliğinde Columbia dağlarından alınarak hazırlanmıştır. Bu numunelerin -5.2 °C'de birim hacim ağırlığı 155 kg/m³ tespit edilmiştir. Deneysel verilere göre karın gevrek bir malzeme olduğu tespit edilmiştir. Pürüzlü kar numunesinin, pürüzsüz kar numunesine göre daha düşük kesme dayanıma sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Ella, vd., (2011) çalışmalarında farklı geometri ve malzeme özellikleri ile tekerleğin kar yüzeyinde sürtünme deneylerini yapmışlardır. Soğuk deney odasında, kış tekerlekli araç ile lineer tribometrede deneyi uygulanmıştır. Sıcaklık, yük ve hız değerlerini tespit etmek için doğal ortamda testler yapılmıştır. Kar malzemesinin birim hacim ağırlığı 650 kg/m³ olarak seçilmiştir. Buna göre sıcaklık, kış mevsiminde ortalama -10 °C olduğu gibi seçilmiştir. Yükleme, tekerlek-kaplama temas noktasında 0.82 kN olarak tespit edilmiştir. Bu testlerde hız 0.5 m/s olarak kullanılmıştır. Sürtünme deneylerine göre; düşük hızda (0.01 m/s) yüzeysel dişleri (sipes) olmayan tekerleğin diğer tekerleğe göre daha yüksek sürtünme kuvveti oluşturduğu gözlemlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile düşük hızda temas alanı analiz edilmiştir. Temas noktasının küçük olduğu ve buna göre temas basıncının artması sonucunda yüzeysel dişlerin eğilmesi gözlemlenmiştir. Yüzeysel dişleri olan tekerleklerin 0.5 m/s üzerindeki hızlarda sürtünme kuvvetinin daha yüksek

olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca doğal ortamdaki testler ile laboratuvar testlerinin sonuçlarının birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.

Pernas-Sánchez, vd. (2012) çalışmalarında oluşturdukları modelde, farklı gerilme ve basınç davranışlarını bulmak için Drucker-Prager plastisite kriterini kullanmışlardır. Ayrıca buzda hasar ölçümü için kayma gerilme analizi yapılmıştır. Bu analiz için lagrange analizi, serbest lagrange-euler yöntemi ve elamanların hidrodinamik analizi kullanılmıştır. Bu model, doğrulanmak için deneysel veriler ile kıyaslanmıştır. Bu analiz sonucunda kırılma enerjisinin toplam kinetik enerjisinden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan üç analiz yöntemi ile deneysel veriler kıyaslandığında, lagrange analiz yöntemi %3 hata oranı ile diğer yöntemlere göre daha yakın sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Surendar, vd., (2015) çalışmalarında sentetik açıklık radar yardımı ile kar birim hacim ağırlığını analiz etmişlerdir. Hacim parametresi, yoğunluk matrisinin çift birimsel dönüşümünden türetilmiştir. Bu parametre doğrudan kar numunesinin birim hacim ağırlığı hesabında kullanılmıştır. Bu araştırma, Himalaya dağlarında yüksek çözünürlükte üç adet Radarsat ile üç senede yapılmıştır. Ölçüm yapılan karın birim hacim ağırlığı ile tahmin edilen kar birim hacim ağırlığında ortalama mutlak hata 0.027 g/cm^3 ve kök ortalama kare hatası ise 0.032 g/cm^3 olarak tespit edilmiştir.

Huang, vd. (2016) çalışmalarında üç katmanlı kar kütlelerinde eğilme gerilme deneylerini yapmışlardır. Alt katmanda buz, orta katmanda eski kar ve üst katmanda yeni kar laboratuvar ortamında hazırlamıştır. Bu deneylerde 50° , 55° ve 60° lik koniler kullanılmıştır. Bu deneylerde eğilme gerilmesinin koni açısına bağlı olduğu tespit edilmiştir. Ölçülmüş buz kuvvetleri ISO koduna göre hesaplanmış ve buz kuvvetleri kıyaslanmıştır, bu kıyaslamada ölçümlerin uygun olduğu tespit edilmiştir.

Kaur ve Satyawali (2016) çalışmalarında 100 cm^3 lük kalıba doğal ortamdan alınan kar numunesinde, kar mikro kalemi (KMP) ile sızma direnci ölçülerek birim hacim ağırlığını hesaplamışlardır. Maksimum sızma direnci, KMP ucuyla ve kar mikro yapısal kopma kuvveti ile ölçülmüştür. Bu yöntem Himalaya'da Patdio istasyonunda yapılmıştır. Elde

edilen yöntem Dhundi ve Gulmarg istasyonlarında yapılan deneyler ile karşılaştırılmıştır. Söz konusu olan bu yöntemin uygun olduğu belirlenmiştir.

Shi, vd. (2016) çalışmalarında gemi-aysberg(buzdağı) arasında sıcaklık değişimine göre darbe analizi yapmışlardır. Bunun için sıcaklık eğimine bağlı elastoplastik buz önerilmiştir. Sıcaklığın buz üzerindeki etkisi, deneysel verilere göre modellenen kayma yüzeyleri ile tanıtılmıştır. Farklı sıcaklıklar arasındaki kayma yüzeylerini bulmak için lineer interpolasyon yapılmıştır. Yerinde deney sonuçlarına göre, üç aysberg sıcaklık profili tasarlanmıştır. Ayrıca aysberglerin şekillerine göre analiz yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre granüler buz kayma fonksiyonu, Tsai-Wu tipi kayma fonksiyonunla eşdeğer olduğu kanıtlanmıştır. Sıcaklığın kübik aysberglerde, prizmatik şekillere nazaran yüksek etkisi olmuştur.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Adımları

Sonlu elemanlar yöntemindeki temel düşünce, karmaşık bir problemi basite indirgeyerek çözüm bulmaktır. Esas problemin daha basit bir probleme indirgenmiş olması nedeni ile kesin sonuç yerine yaklaşık bir sonuç elde edilmektedir. Elde bulunan matematiksel araçların kesin ve yaklaşık bir sonucun yetersiz kalması durumunda ise sonlu elemanlar yöntemi kullanılabilir tek yöntem olmaktadır. Yapısal mekanik problemlerine uygulanan sonlu elemanlar yöntemi, kuvvet ve yer değiştirme yaklaşımları olmak üzere iki farklı yaklaşım ile çözülür;

Kuvvet veya esneklik yaklaşımında; iç yükler bilinmeyen olarak kabul edilir ve çözüm belirlenir. Ana denklemleri elde etmek için ilk olarak denge denklemleri kullanılır. Daha sonra uygunluk denklemleri yardımı ile gerekli ek denklemler bulunur. Sonuçlarda, bilinmeyen kuvvetleri bulmak için bir dizi cebirsel denklem elde edilir.

Yer değiştirme veya rijitlik yaklaşımında; düğümlerin yer değiştirmeleri bilinmeyen olarak kabul edilip, çözümlenir. Böylece sonlu elemanlar yöntemi, sürekli yapıdaki yer değiştirme niceliğini, her bir sonlu bölge veya sonlu eleman ile tanımlanan parçalı ve sürekli fonksiyonlardan oluşan ayrık bir modelle, tahmin edebilen bir yöntemdir. Daha sonra ana denklemler, denge denklemleri, kuvvet ve yer değiştirme ilkeleri kullanılarak düğüm yer değiştirmeleri bulunur (Logan, 2012).

Sonlu elemanlar yönteminin avantajları:

- Düzensiz yapıların modellenmesi basitçe oluşturulabilir;
- Yük durumları kolaylıkla tanımlanabilir;
- Eleman denklemleri tek tek çözümlendiği için farklı malzemeden oluşan yapılar kolayca modellenebilir;
- Düğüm sayıları daha kolay kontrol edilebilir;

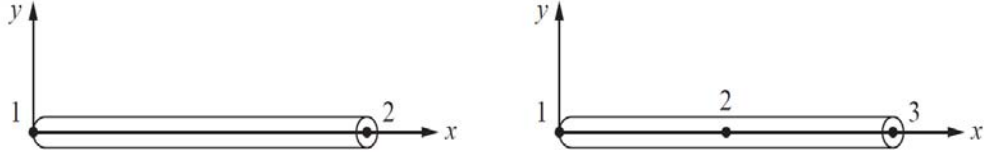
- Eleman sayısı kontrol edilebilir, böylece gerektiği zaman küçük elemanlar oluşturulabilir;
- Model kolaylıkla değiştirilebildiği için sonlu elemanlar yöntemi ekonomiktir;
- Dinamik etkiler içermektedir;
- Büyük deformasyonlar ve lineer olmayan malzemelerdeki lineer olmayan davranışlar kontrol edilebilir (Logan, 2012).

3.1.1. Modelin sonlu eleman ağı oluşturmaları ve eleman tipinin seçimi

Sonlu elemanlar yönteminde ilk basamak, yapıyı veya çözüm bölgesini alt bölümlere yani sonlu elemanlara ayırmaktır. Bu ayırımında uygun sonlu elemanlar kullanılmalı, elemanların cinsi, sayısı ve düzeni tespit edilmelidir. Basit geometriler veya az sayıdaki elemanlar için manuel olarak yapılabilecek bu modelleme işleminin, karmaşık geometriler veya çok sayıdaki eleman için bu şekilde yapılabilmesi imkansız hale gelmekte ve bu iş için ilk işlemci adı verilen programlar kullanılmaktadır.

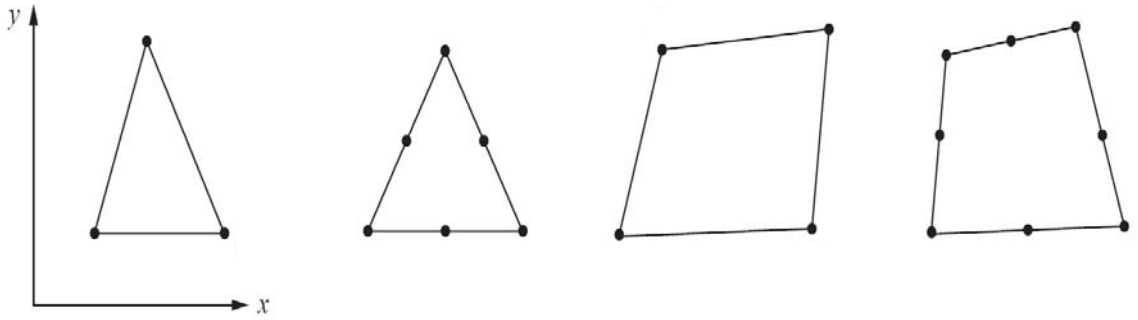
Sonlu elemanlardaki eleman seçimi, yapının gerçek yükler altındaki fiziksel davranış ve sonuçlarının, gerçek değerlere yakın olmasına bağlıdır. Elemanların seçimi, ele alınan elemanların 1, 2 veya 3 boyutlu olması dikkate alınarak yapılır.

Çubuk elemanlar (simple two-noded line element) Şekil 3.1'de görüldüğü gibi çubuk ve giriş elemanlarından oluşmaktadır. Bunlar kesit alanları olmasına rağmen çizgi elemanları ile gösterilir. Genellikle, yapıların kesit alanları değişkendir fakat sabit olarak hesaba katılır. Bu eleman modeli kafes ve basit çerçeve sisteminde kullanılmaktadır (Logan, 2012).



Şekil 3.1. Basit iki düğümlü çubuk elemanı (Logan, 2012).

İki boyutlu elemanlar (Simple two-dimensional elements), Şekil 3.2’de görüldüğü gibi bir düzlem üzerinde etkiyen kuvvetleri hesaplamak için kullanılmaktadır. En basit iki boyutlu elemanlar, köşe düğümleri ve düz kenarlardan oluşmaktadır. Aynı zamanda yüksek mertebeli iki boyutlu elemanlar, kenar ortasındaki düğümlerden ve kıvrımlı kenarlardan oluşmaktadır. Bu elemanlar farklı kalınlıkta veya sabit olabilir. Bu eleman tipi, mühendislik problemlerinde oldukça yaygın bir biçimde kullanılmaktadır.



Şekil 3.2. Basit iki boyutlu elemanlar (Logan, 2012).

En sık kullanılan üç boyutlu elemanlar (Simple three-dimensional elements) Şekil 3.3’te görüldüğü gibi dört (tetrahedral) ve altı yüzeyli (hexahedral) elemanlardır. Bu eleman tipi, üç boyutlu gerilme hesaplamalarında kullanılmaktadır. En basit üç boyutlu elemanlar köşe

düğümüleri (nodes) ve kenarlardan oluşmaktadır. Yüksek mertebedeki üç boyutlu elemanlar ise kenar ortasında, düğüme ve kıvrımlı yüzeylere sahip olmaktadır.



Şekil 3.3. Basit üç boyutlu elemanlar (Logan, 2012).

3.1.2. Yer değiştirme fonksiyonunun belirlenmesi

Her bir eleman için yer değiştirme fonksiyonu seçilir. Bu fonksiyon, elemanların düğüm değerlerini kullanarak tanımlanır. Bu fonksiyon, sonlu elemanlar formülasyonu ile uyum sağlayabilmesi için lineer, ikinci dereceden, üçüncü dereceden polinomlar veya nadiren trigonometrik serilerden biri olarak seçilir. İki boyutlu elemanlar için yer değiştirme fonksiyonu, kendi düzleminde bir fonksiyondur. Fonksiyonlar, düğümlerdeki bilinmeyenler ile tanımlanır ve bu genel yer değiştirme fonksiyonu her eleman için yazılır. Bu nedenle, sonlu elemanlar yönteminde yer değiştirme gibi sürekli değişken durumlar, her sonlu eleman veya sonlu etki alanlarında yaklaşık olarak tanımlanmaktadır (Logan, 2012).

3.1.3. Deformasyon-yer değiştirme ve gerilme-şekil değiştirme bağlantılarının tanımlanması

Şekil değiştirme/deformasyon ve gerilme/şekil değiştirme bağlantıları sonlu elemanlarda önem taşımaktadır. Bir boyutlu denklem türetimindeki şekil değiştirme bağıntısı şu şekilde tanımlanır (Logan, 2012);

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (3.1)$$

Bu denklemde, ϵ_x şekil değiştirme ve U x yönünde yer değiştirme olarak ifade edilir.

Hooke yasasına göre gerilme-şekil değiştirme bağıntısı şu şekilde tanımlanır (Logan, 2012);

$$\sigma_x = E \cdot \epsilon_x \quad (3.2)$$

Burada, x eksenini doğrultusundaki σ_x gerilmeyi ve E elastisite modülünü göstermektedir.

3.1.4. Eleman rijitlik matrisi ve denklemlerin oluşturulması

İlk olarak; rijitlik matrisi, düğümlere gelen kuvvetler ve yer değiştirmeler rijitlik etki katsayısına göre tanımlanır ve bu yapı analizinin temelini oluşturur.

3.1.4.1. Doğrusal denklik veya rijitlik yöntemi

Bu yöntemde, düğümlere gelen yükler ve düğümlerin yer değiştirmesi için rijitlik matrisi ve eleman denklemleri, kuvvet-deformasyon bağlantılarına göre elde edilir. Bu yöntem, lineer veya tek boyutlu elemanları kolay çözdüğü için yay, çubuk ve kirişlerde uygulanır.

3.1.4.2. Enerji yöntemleri

Bu yöntem; iki ve üç boyutlu elemanlarda, rijitlik matrisi ve denklem yapılandırması için kullanılmaktadır. Virtüel iş prensibi (virtüel yer değiştirmeleri kullanılarak), minimum potansiyel enerji prensibi ve Castigliano teorisi eleman denklemlerinin oluşturulmasında sıklıkla kullanılır (Logan, 2012).

Virtüel iş prensibi sadece statik sistemlerde uygulanır, fakat D'alembert prensibi dikkate alınarak dinamik sonlu elemanlarda da virtüel iş uygulanabilir. Dinamik sistemlerde virtüel iş, dengede olan ve şekil değiştirebilen elemanların virtüel yer değiştirmelerde; dış yüklerin işi, iç kuvvetlerden kaynaklanan şekil değiştirme enerjisine eşit kabul edilir. Bu prensipte, sınırlı durumlar ve süresizlik meydana gelir. Bu durumlar elemandaki

boşluklar, örtüşmeyen durumlar ve yer değiştirme olarak nitelendirilmektedir (Logan, 2012).

$$\delta U^{(e)} = \delta W^{(e)} \quad (3.3)$$

Burada, $\delta U^{(e)}$ iç kuvvetlerden dolayı oluşan şekil değiştirme enerjisi ve $\delta W^{(e)}$ dış yüklerden dolayı oluşan virtüel iştir.

Virtüel iş prensibi tüm malzeme davranışlarına uygulanabilirken, minimum potansiyel enerji prensibi ve Castigliano teorisi sadece elastik malzemelere uygulanabilir. Virtüel iş prensibinin kullanılması için potansiyel fonksiyonun olması zorunlu değildir (Logan, 2012).

3.1.4.3. Ağırlıklı kalıntı yöntemi (weighted residuals)

Bu yöntem Galerkin yöntemi ile hazırlanmış eleman denklemleri için uygun olmaktadır. Yöntemde özellikli fonksiyonlar olmadığında, potansiyel enerji denklemi gibi eşitlikler kullanılmaktadır. Ağırlıklı kalıntı yöntemi, sonlu elemanlar yöntemin diferansiyel denklemlere uygulanmasını sağlamaktadır.

3.1.5. Eleman denklemlerin birleştirilip toplam denklemlerin elde edilmesi ve sınır koşullarının tanımlanması

Bu adımda, her elemanın dördüncü adımda oluşturulan, düğüm denge denklemleri birleştirilerek toplam denge denklemleri oluşturulur. Son birleştirilmiş denge denklemi aşağıdaki matris biçimine dönüştürülür (Logan, 2012).

$$\{F\} = [K]\{d\} \quad (3.4)$$

Burada $\{F\}$ toplam düğümlerin kuvvet vektörü, $[K]$ toplam yapısal rijitlik matrisi ve $\{d\}$ yapının bilinen-bilinmeyen düğüm serbestlik derecesidir. $[K]$, toplam rijitlik matris

determinantı sıfıra yakın olduğundan tekil matristir. Bu sorunun çözülmesi için belirli sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir.

3.1.6. Bilinmeyen serbestlik derecelerine göre analiz

Sınır koşullarını tanımlayan yukarıdaki 3.4 denklemi, benzeşim için cebirsel denklemdir ve açılımı aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (3.5)$$

Burada, n modelde bilinmeyen düğümlerin serbestlik derecesidir. Bu denklemler eleme yöntemleri (Gauss yöntemi vb.) veya iteratif yöntemler (Gaus-Seidel yöntemi vb.) ile çözülebilir.

3.1.7. Elemanların gerilme-şekil değiştirmesine göre analizi

6. adımda verilen yer değiştirmeler doğrudan belirlenebildiklerinden dolayı şekil değiştirme ve gerilmelerinin (veya moment ve kesme kuvveti) ikinci dereceden nicelikleri yapısal gerilme analizi problemi için elde edilebilir. Tek boyutlu yer değiştirme için üçüncü adımdaki 3.1 denklemi ve gerilme için 3.2 denklemi kullanılmaktadır.

3.1.8. Sonuçların yorumlanması

Son hedef, sonuçları tasarım/analiz sürecinde kullanarak yorumlamak ve analiz etmektir. Geniş deformasyonların ve gerilmelerin meydana geldiği yapıdaki yerlerin belirlenmesi, genellikle tasarım/analiz kararlarında önemlidir. Bilgisayar programları, sonuçları grafik biçiminde görüntüleyerek yorumlamaya yardımcı olur.

3.2. Malzeme Özellikleri

3.2.1. Lastik (Rubber)

Tekerleğin ilk işlevi, araç ve kaplama yüzeyinin arasında temas sağlamaktır. Bu teması tekerlek yüzeyini kaplayan kauçuk (volcanized rubber) sağlamaktadır. Teması sağlayan bu kaplama ile yer arasındaki temas alanı ortalama 150 cm^2 'dir. Tekerleğin dış kaplaması ile yüzey arasındaki bu temasın görevi, aracın sürüş konforunu ve yol tutuşunu sağlamaktır.

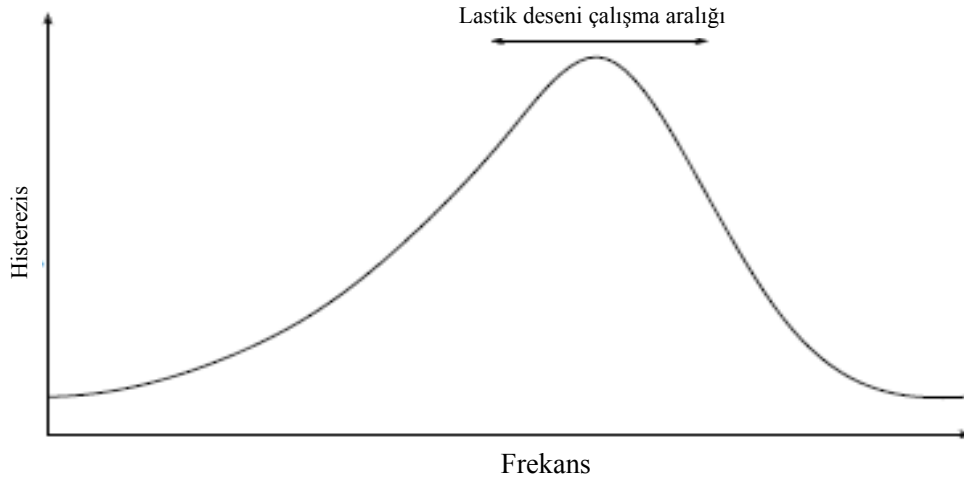
3.2.1.1. Tekerlek lastiğinde kauçuk kullanımı

Daha öncede anlatıldığı gibi kauçuk, titreşimi azaltan elaman olarak görev yapmaktadır. Kauçuk, viskoelastik bir malzemedir. Dolayısıyla viskoz ve elastik katı özellikleri göstermektedir. Kauçuğun bir kısmı deforme olduğunda, belirli bir zaman aşımından sonra önceki haline döner. Bu özelliğe histerezis denir (Omark, 2014).

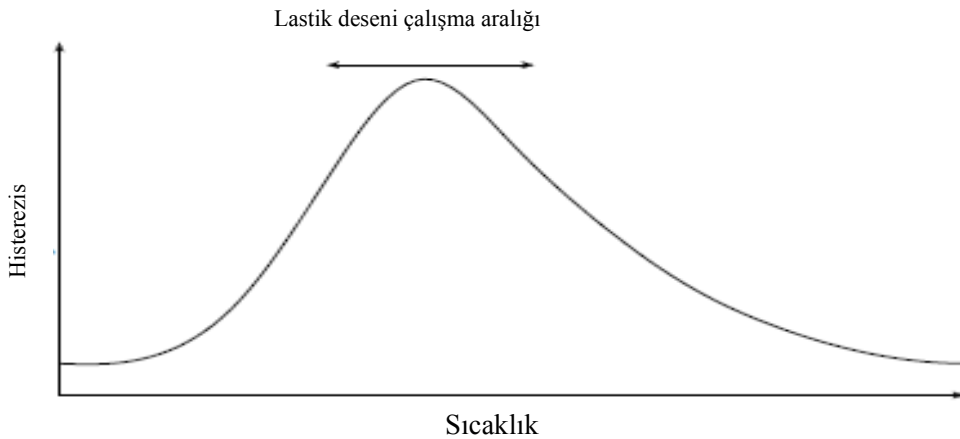
Lastiğinin bu özelliğe sahip olması yola tutunmasını ve titreşimi sönümlenmesini sağlamaktadır. Histerezis ve yol tutuşu, hava koşullarına bağlıdır. Bu yüzden kış ve yaz tekerlekleri arasında fark meydana gelmektedir. Soğuk hava, kauçuğu sert ve gevrek bir malzemeye dönüştürür. Isı arttıkça polimerlerin hareketliliği artar dolayısıyla bu hareketlilik, lastiğin her yüzeyindeki adaptasyonunu arttırır. Böylece lastik daha çok viskoz ve histerezis şekilde davranır. Ayrıca uygulanan güç frekansı da histerezis özelliğini etkilemektedir (Şekil 3.4-3.5).

Tekerlek yol yüzeyi ile temas ettiğinde histerezis-sıcaklık ilişkisinin aksine, kuvvet frekansı histerezis ile ters orantılıdır. Düşük frekanslarda tekerleğin deformasyona uğraması uzun sürer. Yüksek frekansın, eski frekansa dönmesi için yeterli zamanı yoktur, bu sebeple malzeme daha rijit davranır. Tekerlek sırtında kullanılan kauçuğun yol ile temas anındaki kuvvet frekansı, kayma hızının pürüzlü noktalar arasındaki mesafeye bölünmesiyle bulunur. (Kayma hızı; araç hızı ve tekerlek dönme hızı arasındaki farktır).

Bu yüzden yol yüzeyinin deseni frekans için çok önemlidir. Tekerlek ile yol arasındaki mesafe 1 μm ile 1 cm arasında değişmektedir. Yol pürüzlülüğü ile kavrama oluşumunun yanı sıra, tekerlek-yol temasında da moleküler adezyon kuvvetleri vardır. Adezyon, tekerlek ile yol yüzeyi arasındaki moleküller arasındaki bağlardan (Van der Waals bağlarından) oluşmaktadır. İki yüzey arasındaki oluşan bu bağlar, gerindikten sonra kırılır. Yol yüzeyi ile kauçuk arasındaki rölatif hareket ile sürtünme kuvveti meydana gelir. Adezyonun oluşumu için tekerlek, yol ile doğrudan temas halinde olmalıdır yani moleküler arası bağların oluşması için yol kuru olmalıdır. Adezyon oluşumunda histerezis önemlidir (Omark, 2014).



Şekil 3.4. Frekansa bağlı histerezis (Omark, 2014).



Şekil 3.5. Sıcaklığa bağlı histerezis (Omark, 2014).

Tekerlek deseni, tekerleğin bir bileşeni olarak tekerlek ve yol yüzeyinin arasında temas kuran bir elemandır. Tekerlek lastiğinin yola daha iyi tutunması için kauçuk veya kauçuk-kompozit malzemeler kullanılmıştır. Tekerlek deseni; kanal, tırnak, ara boşluklar ve paralel çizgilerden oluşmaktadır. Kanallar, su ve kar malzemesini dışarı atmaktır; tırnaklar, yol yüzeyine tutunmak için tasarlanmıştır; ara boşluklar, tırnakların esneklik kazanması için yapılmıştır ve paralel çizgiler ise lastiğin yola tutunmasını engelleyen ara yüzeyleri kanallara ileterek uzaklaştırılması için tasarlanmıştır.

Her tekerleğin yan tarafında kullanılan malzeme ve katman sayıları mevcuttur. Buna göre bir tekerleğin oluşum oranları Çizelge 3.1’de gösterilmiştir. Genellikle polyster, çelik ve naylon malzemeler kullanılmıştır. Bu malzemelerin özellikleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Tekerlek malzemeleri ve kullanım oranları (Karaytuğ, 2009).

PSR Tekerlek	7Kg	
	Malzeme	Kg
	Doğal kauçuk	%18-25
	Sentetik kauçuk	%26-32
	Karbon	%15-30
	Silis	%4-18
	Sülfür	%1-2
	ZnO	%1-3
	Yağ asidi	%0.5-2
	Yağ	%3-12
	Tekstil	
	PA66	%0.02-0.04
	Demir tel	%10-15
	PVA	%0.003-0.02
	PET	%0.02-0.04

Çizelge 3.2. Tekerlek malzemelerinin fiziksel özellikleri (Karaytuğ, 2009)

Malzeme	Kauçuk	Demir	Naylon	Silis
Elastisite modülü (MPa)	0.01-0.1	200	2-4	-
Birim hacim ağırlık (10^3kg/m^3)	1.1	7.7-8.03	1.16	2.1
Kayma modülü (GPa)	0.0006	79.3	-	-
Akma dayanımı (MPa)	-	690	45	-
Poisson oranı	0.5	0.27-0.3	-	-
Kopma dayanımı (GPa)	-	0.585	0.082	-

3.2.1.2. Tekerleğin bileşenleri

Tekerleğin bileşenleri Şekil 3.6' da gösterilmiştir. Bu bileşenler aşağıda verilmiştir;

İç Katman: İnce ve özel malzemelerden oluşmakta ve içsiz tekerleklerde havanın dışa sızmasını engellemeyi sağlamaktadır.

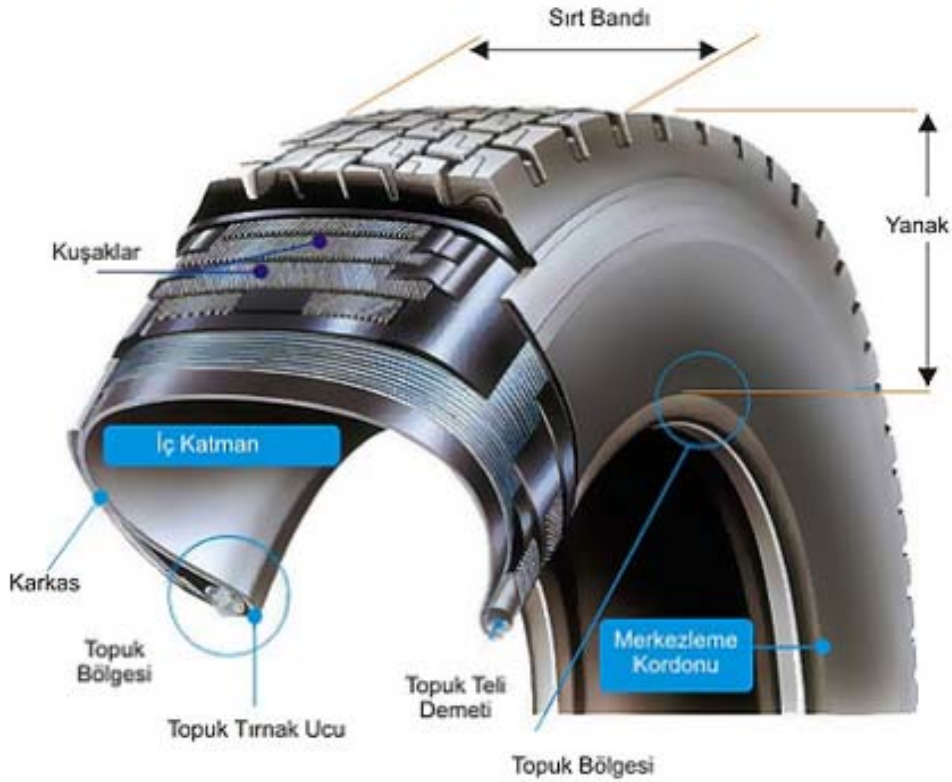
Sırt: Hareket halindeki araçta ve frenleme durumunda, tekerlek ve kaplama arasındaki tutunmayı sağlamaktır.

Kuşaklar: Tekerleğin gövdesinde bulunan iki katman çelik teller ve bir katman naylon ipten oluşmaktadır. Çelik donatılar, tekerleğin boyuna paralel bir döngü halindedir. Bu donatılar, araçtan gelen yükleri ve tekerleğin iç basıncından kaynaklanan tekerlek deformasyonlarını önlemektedir.

Topuk: Tekerleğin jant ile temas noktasında boyuna donatılmış çelik teller bulunmaktadır. Bu teller, janttan gelen yüklerin tekerleği deforme etmesini önlemektedir.

Yanak: Tekerlek gövdesi ve kenar çelik donatılar arasındaki bölge yanak olarak adlandırılmaktadır. Yanak, gövdeyi aşınmaktan, darbe ve esnek yorgunluktan korumaktadır. Yanak aynı zamanda tekerlek süslemeleri ve bilgilerini taşımaktadır.

Yanakta kullanılan malzeme ozon, oksijen ve mor ötesi ışınlarına dayanıklı olarak tasarlanmaktadır.



Şekil 3.6. Tekerlek kesiti

3.2.1.3. Tekerlek ebat bilgileri

Şekil 3.7'de görüldüğü gibi tekerleğin yanak kısmında; tekerlek bilgileri, yükleme limiti, ve kullanım yeri gibi bilgiler içermektedir. Aşağıda gösterilen tekerlek bilgilerine bakıldığında tekerlek desen genişliği 205 mm, yanak yüksekliğinin tekerlek genişliğine olan yüzdelik oranı 55, tekerleğin jant çapı 16 inç, taşıyabileceği ağırlık 615 kg ve maksimum hız sınırının 240 km/sa olduğu bilinmektedir.



Şekil 3.7. Tekerlek bilgileri (Goodyear, 2015)

Kullanım tipi; Tekerlekler, kullanım tiplerine göre sınıflandırılırken harf sistemi kullanılmaktadır. Tekerlekler için Çizelge 3.3'te gösterildiği gibi kullanılan harf, tekerleğin kullanım tipini belirlemektedir.

Çizelge 3.3. Hız endeksine göre tekerlek tipleri (Hankook Tire, 2017)

Hız simgesi	Maksimum hız (Km/Sa)	Kullanım yeri
D	50	Ziraat makineleri
L	120	Ticari araçlar
M	130	Ticari araçlar
S	180	Sedan ve hafif kamyonet
T	190	Sedan
H	210	Lüks sedan
V	240	Yüksek performans araçları
Z	270 ve üzeri	Süper performanslı araçlar

Tekerleklerin ağırlığına göre yük endeksi Çizelge 3.4'te gösterildiği gibi tekerleğe gelen ağırlığı ifade etmektedir. Örneğin, binek araçlar 91 yük endeksinde her tekerleğin 650 kg yük taşıyabileceğini göstermektedir.

Çizelge 3.4. Yük endeksi (Hankook Tire, 2017)

Yük Endeksi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Kg	46.2	47.5	48.7	50	51.5	53	54.5	56	58	60
Y.E	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Kg	61.5	63	65	67	69	71	73	75	77.5	80
Y.E	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Kg	82.5	85	87.5	90	92.5	95	97	100	103	106
Y.E	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Kg	109	112	115	118	121	125	128	132	136	140
Y.E	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Kg	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190
Y.E	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Kg	195	200	206	212	218	224	230	236	243	250
Y.E	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
Kg	257	265	272	280	290	300	307	315	325	335
Y.E	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Kg	345	355	365	375	387	400	412	425	437	450
Y.E	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
Kg	462	475	487	500	515	530	545	560	580	600
Y.E	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
Kg	615	630	650	670	690	710	730	750	775	800
Kg: kilogram										

Tekerlek genişliği, tekerlek kullanım tipini belirten harf ve yük endekslerinden sonra yazılan üç haneli sayıdır.

Kesit genişlik oranı, yanak yüksekliğinin tekerlek taban genişliğine olan oranını yüzde olarak göstermektedir. Örneğin; kesit genişlik oranı 50 olarak verilen tekerleğin, yanak genişliğinin sırt genişliğine oranı % 50'dir (Şekil 3.7).

Tekerlek iç çapı, aynı zamanda jant çapının inç biriminden ifadesidir (İnci, 2015).

3.2.2. Polilaktik asit kar paleti

Bu çalışmada tasarlanan karlı yüzeyde, tekerleğe sonradan takılacak olan paletlerin ana malzemesi polilaktik asittir. Doğal fiberler, sentetik fiberlere göre daha çok avantaja (hafif olması, geri dönüşüm sağlanabilmesi, doğada çözülebilmesi vb.) sahiplerdir. Polilaktik asit (PLA) doğada kolaylıkla çözünebilen polimerlerden biridir. PLA, mısır gibi bitkilerin fermantasyonu ile oluşur. PLA'da olan özellikler (mekanik, termal, reolojik vb.) diğer polimerlerin özelliklerine benzerdir. Çizelge 3.5'te polilaktik asit özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.5. Polilaktik asit (PLA) özellikleri (Jamshidian, vd., 2010)

Özellik	Değer	Birim
Birim hacim ağırlığı	1251.5	Kg/m ³
Elastisite modülü	1.28	Gpa
Poisson oranı	0.36	-
Kayma modülü	1.287	Gpa

3.2.3. Kar

Kar, buz kristallerinin birbirine yapıştığı hüresel form olarak kabul edilebilir. Hüresel katı formlar, kapalı hücre (örn. sabun köpüğü) veya açık hücre biçiminde (örn. sünger) olabilir. Kar, buz elemanlarının çok yüzlü yapıda doğrusal bağ oluşturduğu açık hücre şekilleridir. Çizelge 3.6'da düşük yoğunluklu karın malzeme özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.6. Düşük yoğunluklu kar için Drucker-Prager model parametreleri (Heanel ve Shoop, 2004)

Özellik	Değer	Birim
Birim hacim ağırlığı	200	Kg/m ³
Elastisite modülü	13.79	MPa
Poisson oranı	0.3	-
Drucker-Prager kohezyon	5000	Pa
Drucker-Prager sürtünme açısı	22.538	derece

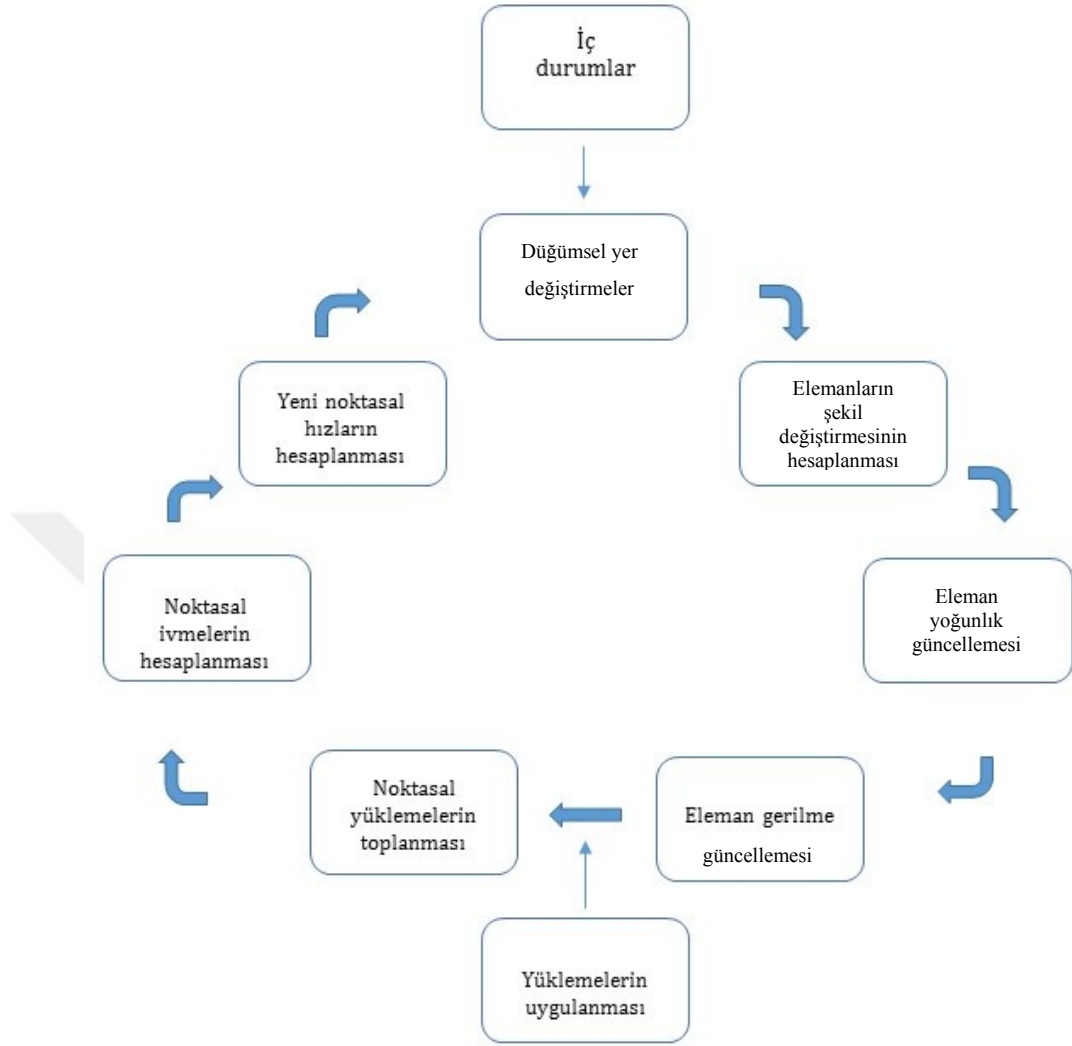
3.3. Modelin Hazırlanması

Kar palet modelleri ve tekerlek modelleri SOLIDWORKS programında tasarlanmıştır. Daha sonra ANSYS Design Modeller’da tekerlek veya palet temas yüzeylerindeki kar malzemesi 1.8×1.4×0.2 m ebatlarında hazırlanmıştır. Hazırlanan modellerin analizleri ANSYS Explicit Dynamics’te yapılmıştır. Aşağıda ANSYS programı ve Explicit Dynamics programının çalışma prensibi anlatılmıştır.

ANSYS yazılımı, mühendislerin mukavemet, titreşim, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi ile elektromanyetik alanlardaki tüm fizik prensiplerinin birbiri ile olan etkileşimini simüle etmek için kullanılan genel amaçlı bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Bu sayede gerçekleştirilen testlerin ya da çalışma şartlarının simüle edilmesine olanak sağlayan ANSYS, ürünlerin henüz prototipleri üretilmeden, sanal ortamda test edilmelerini olanak sağlar. Ayrıca sanal ortamdaki üç boyutlu benzeşimler neticesinde yapıların, zayıf noktalarının tespiti ve iyileştirilmesi ile ömür hesaplarının gerçekleştirilmesi ve muhtemel problemlerin öngörülmesi mümkün olmaktadır. ANSYS yazılımı hem dışarıdan CAD datalarını alabilmekte hem de içindeki işlemci motoru (preprocessing) imkanları ile geometri oluşturulmasına izin vermektedir. Yüklerin tanımlanmasından sonra ve gerçekleştirilen analiz neticesinde sonuçlar, sayısal ve grafiksel olarak elde edilebilir. ANSYS yazılımı ile özellikle temas algoritmalarının çeşitliliği, zamana bağımlı yükleme özellikleri ve linear olmayan (nonlinear) malzeme modelleri sayesinde, yüksek

mühendislik seviyesindeki analizler hızlı, güvenilir ve pratik bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. ANSYS Workbench, parametrik CAD sistemlerini otomasyon ve performans ile benzeşim teknolojilerini entegre eden bir platformdur. Ayrıca ANSYS Workbench'in amacı sanal ortamda ürünün kontrolünü ve iyileştirmesini sağlamaktır (ANSYS, 2016).

ANSYS açık dinamik (explicit dynamics) çözümünde; malzeme özellikleri, yükler, sınır şartları ve başlangıç koşulları atanmış mesh ile başlanır. Bu başlangıç durumu, zamana entegre edildiğinde mesh düğümlerinde hareket üretecektir. Düğümlerin hareketi, mesh elemanlarında deformasyon meydana getirir. Deformasyon, her malzemenin hacimde bir değişime neden olur. Deformasyon hızı, çeşitli eleman formülasyonlarını kullanarak malzeme şekil değiştirme oranları elde etmek için kullanılır. Yapısal yasalar, malzeme şekil değiştirme hızlarını dikkate alarak malzeme gerilmelerini türetir. Malzeme gerilmeleri, çeşitli eleman formülasyonlarını kullanarak düğümsel kuvvetlere dönüştürülür. Dış düğüm kuvvetleri; sınır koşulları, yükler ve elemanlar arası etkileşim ile hesaplanır. Düğüm kuvvetleri, düğüm ivmelerini üretmek için düğüm kütlelerine bölünür. Yeni düğümsel hızların bulunması için ivmeler zaman ile açık olarak entegre edilir, aynı zamanda noktasal pozisyonların üretimi için noktasal hızlar ve zaman da entegre edilir (ANSYS 2015). Şekil 3.8'de verilen döngü belirlenen zamana ulaşıncaya kadar hesaplanır.

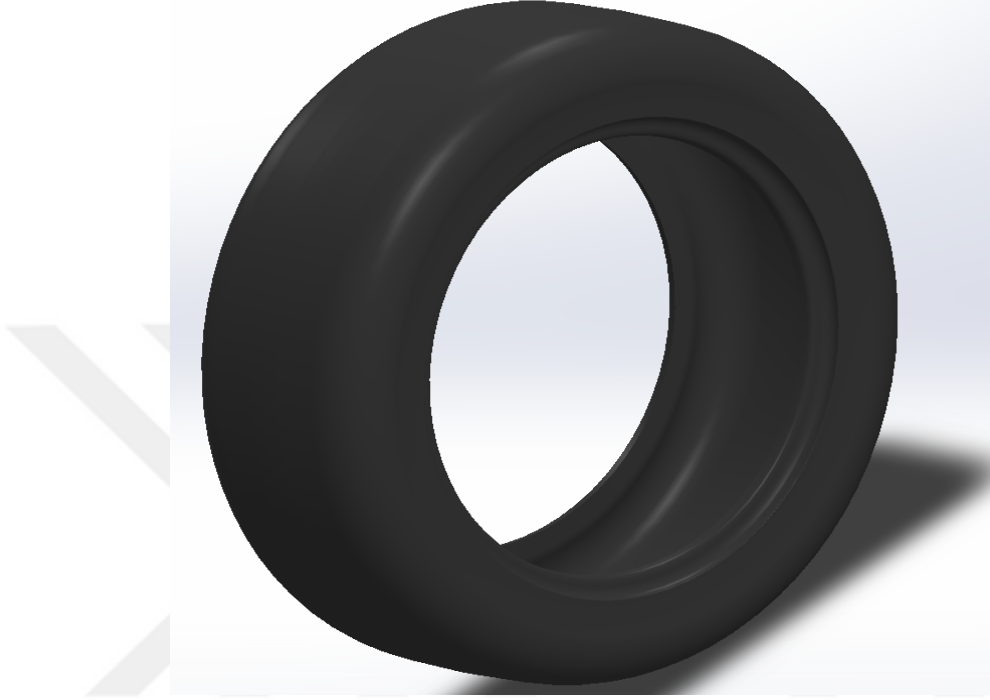


Şekil 3.8. Explicit çözüm döngüsü (ANSYS 2015)

3.3.1. Düz tekerlek modeli

Ebat özellikleri 195/60R15 olan düz tekerlek, paletlerin karda etkilerini gözlemlemek için tasarlanmıştır. Ayrıca bu çalışmanın doğruluğunu tespit etmek için düz tekerlek analiz edildikten sonra Lee'nin (2011) çalışmasında kullanılan dişsiz tekerlek ile kıyaslanmıştır. Şekil 3.10 ve 3.11'de gösterilen tekerlek bileşenleri, SOLIDWORKS programında düz tekerlek içine yerleştirilmiştir. STEP formatında ANSYS Design Modeller kısmına yüklenmiştir. Literatürdeki mevcut çalışmalarda tekerleklerin iç basıncı 200 kPa

olduğunda maksimum performans sergilediği gözlemlenmiştir, bu nedenle analiz edilen modelde tekerlek iç basıncı, 200 kPa olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.9. SOLIDWORKS’de tasarlanan düz tekerlek modeli

ANSYS programında kullanılan düz tekerlek modeli ve dört mevsim tekerlek için kullanılan Mooney-Rivlin lastik modeli, ANSYS malzeme kütüphanesinde bu özellikler mevcuttur (Çizelge 3.7).

Çizelge 3.7. ANSYS’te lastik için Mooney-Rivlin modeli

Özellik	Değer	Birim
C ₁₀	150	kPa
C ₀₁	15	kPa
Yoğunluk	1000	Kg/m ³

Radyal tekerleklerin yapısında ipler tekerlek desenine dik ve topuklardaki demir tellere bağlı bir şekilde yerleştirilmiştir (şekil 3.10). Aynı zamanda gövde ve topuk kısmında kullanılan teller, tekerlek desenine paralel olarak konulmuştur (şekil 3.11). Çizelge 3.8 ve 3.9’da ip ve tellerin özellikleri verilmiştir. Tekerlek bileşenleri, düz ve dört mevsim tekerleği yapısında, bağlı temas (bonded contact) olarak tanımlanmıştır.



şekil 3.10. Tekerlekte kullanılan ipler

Çizelge 3.8. İplerin zelliği (Lee, 2011)

Özellik	Değer	Birim
Elastisite modülü	9.87	GPa
Poisson oranı	0.3	-
Yoğunluk	1500	Kg/m ³



Şekil 3 .11. Tekerlekte gövde ve topukta kullanılan teller

Çizelge 3.9. Tellerin özelliği

Özellik	Değer	Birim
Elastisite modülü	172.2	GPa
Poisson oranı	0.3	-
Yoğunluk	5900	Kg/m ³

3.3.2. Dört mevsim tekerlek modeli

Dört mevsim tekerlek tasarımı Falken firması tarafından üretilen, ZIEX ZE-912 üretim koduna sahip olan, 195/50R15 özellikli tekerlek örnek alınarak hazırlanmıştır (Şekil3.12). Ebat özellikleri 195/50R15 olan dört mevsim tekerlek desenine 8 mm dış derinliği verilmiştir. Şekil 3.10 ve 3.11’de gösterilen tekerlek bileşenleri, SOLIDWORKS programında tekerlek içine yerleştirilmiştir ve STEP formatında ANSYS Design Modeller kısmına yüklenmiştir. Literatürdeki mevcut çalışmalarda tekerleklerin iç basıncının 200 kPa olduğunda maksimum performans sergilediği gözlemlenmiştir, bu nedenle analiz edilen modelde tekerlek iç basıncı, 200 kPa olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.12. SOLIDWORKS'ta tasarlanan dört mevsim tekerlek

3.3.3. Kar palet modelleri

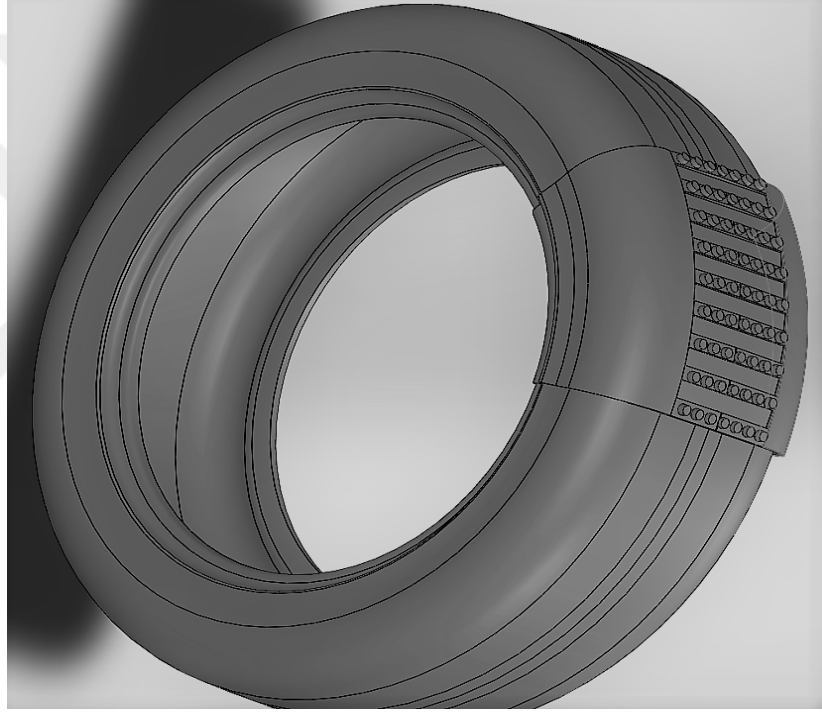
Kaygan (karlı, buzlu vb.) zemin durumunda, tekerleklerde palet veya zincir kullanımı çoğu ülkede zorunlu hale getirilmiştir. Paletler, tekerlek zincirine göre kullanımı daha pratik olduğundan daha çok tercih edilmektedir.

Kar paletleri, SOLIDWORKS'de tasarlanan 195/60R15 düz tekerleğin dış profiline göre tasarlanmıştır. Şekil 3.13 ve 3.14'te gösterilen paletler diş konum açısından farklıdır (düz ve V şeklinde konumlanan dişler). Bu iki farklı desenin tasarlanmasındaki amaç, hidrolik pülverizasyon etkisini analiz etmektir. Ayrıca her bir deseni üç farklı diş derinliğinde (5 mm, 10 mm ve 15 mm) tasarlanmıştır. Kar paletleri genellikle petro-kimyevi malzemenen

oluşan plastik ile üretilmektedir. Burada, tasarlanan kar paletlerinde çevre dostu olarak bilinen PLA malzemesi kullanılmıştır. Farklı diş derinlikleri göz önüne alınarak gerilme ve deformasyon etkileri incelenmiştir.

3.3.3.1. Kar paleti Model 1

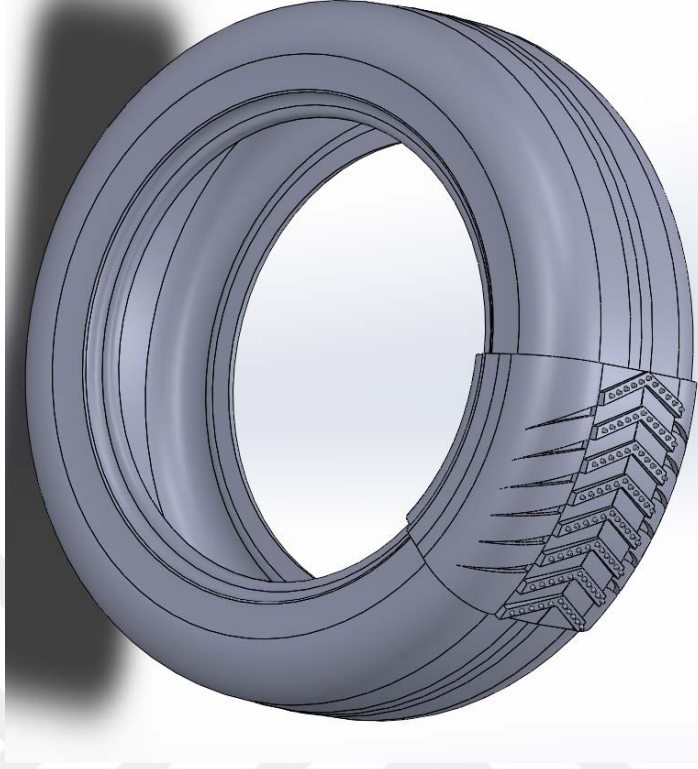
Şekil 3.13'te düz tekerleğe bağlanan 1. model gösterilmiştir. Bu palet modelinde daha önce anlatıldığı gibi dişler düz bir sıra halinde yerleştirilmiştir.



Şekil 3.13 Model 1 paletli tekerlek

3.3.3.2. Kar paleti Model 2

Şekil 3.14'te düz tekerleğe bağlanan 2. model gösterilmiştir. Bu modelin diğer modelden farkları, dişlerin V şeklinde konumlanması ve kar tanelerinin palet kenarlarından atılması için yerleştirilen kanallardır.

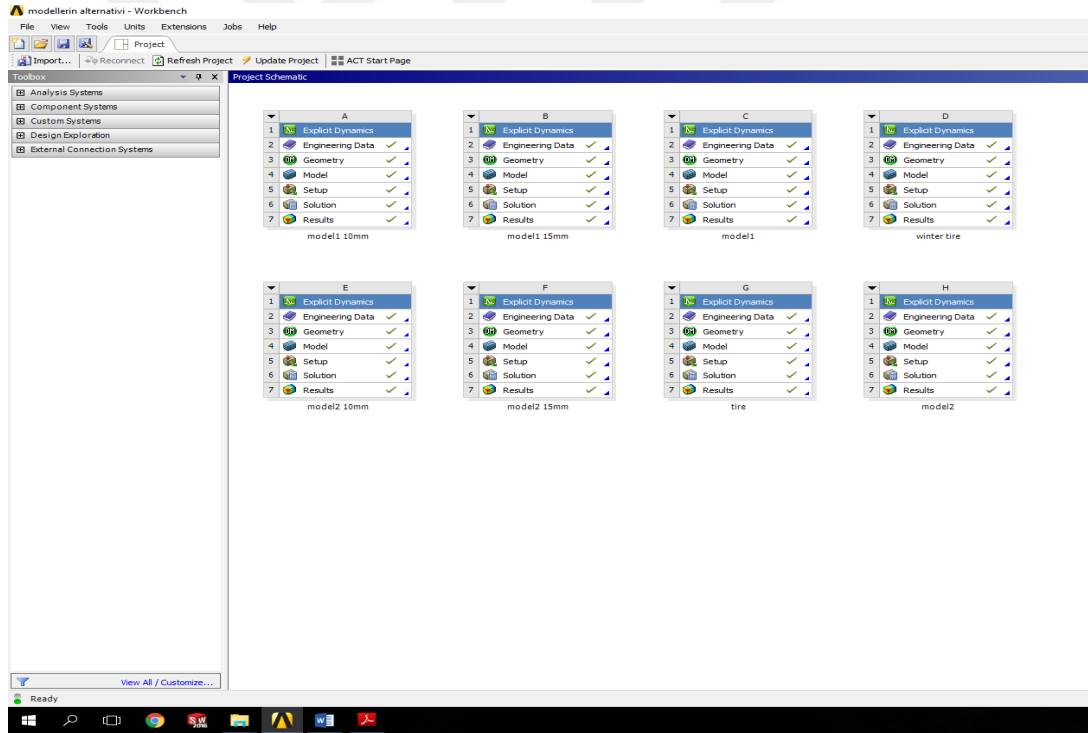


Şekil 3.14 Model 2 paletli tekerlek

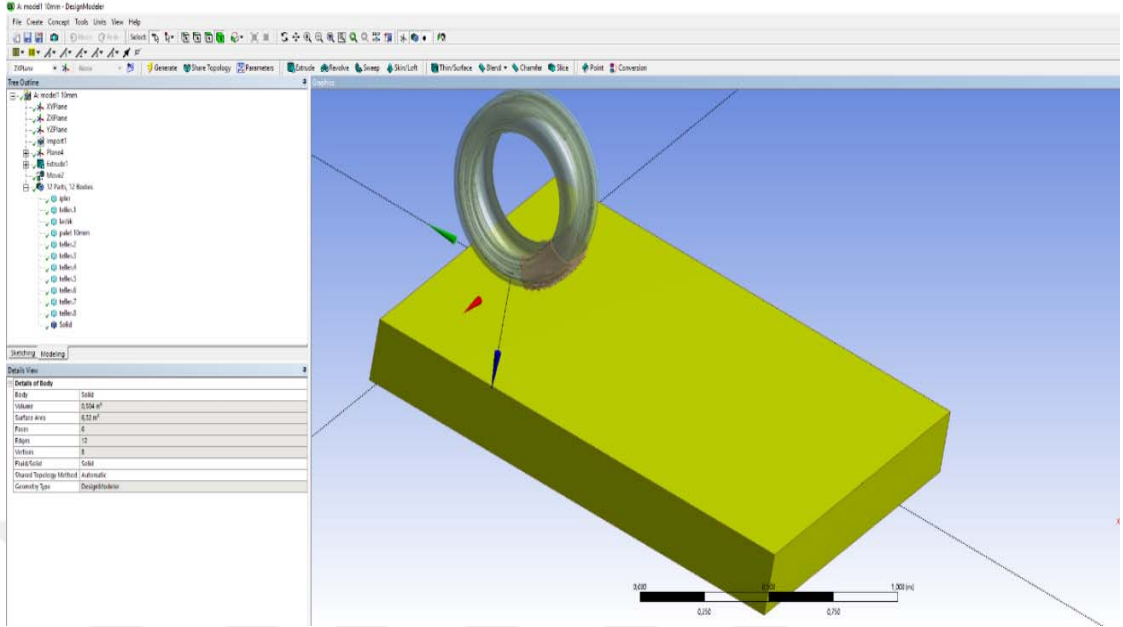
4.ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Temel Bilgiler

ANSYS' te Şekil 4.1 'de gösterildiği gibi her bir model için farklı sistemler belirlenmiştir. Tekerlek ve palet modelleri SOLIDWORKS'de tasarlanıp STEP formatında kaydedilmiştir. Daha sonra ANSYS Design Modeller kısmında STEP olarak tanımlanarak kar yüzeyi, tekerleklerin temas zemini olarak oluşturulmuştur (Şekil 4.2). Daha sonra ANSYS-Mechanical bölümünde, tekerlek ve tekerlek bileşenlerinin bağlantıları, tekerlek ve kar bağlantıları tanımlanmıştır. Tekerlek ve iç yapısı arasındaki bağlantı ve palet-tekerlek bağlantısı, bağlı (bonded) olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.1. Hazırlanan modellerin sistem dosyaları



Şekil 4.2. Modelin hazırlanması

Sürtünme: Tüm modellerde tekerlek ve kar zemini arasında sürtünmeli ilişki kurulmuştur ve ANSYS programı sürtünme katsayısını 4.1 formülünü kullanılarak elde etmiştir. Elde edilen katsayı 0.3 olarak kabul edilmiştir. Aynı zamanda Lee (2011) çalışmasında, sürtünme katsayısını aynı şekilde almıştır.

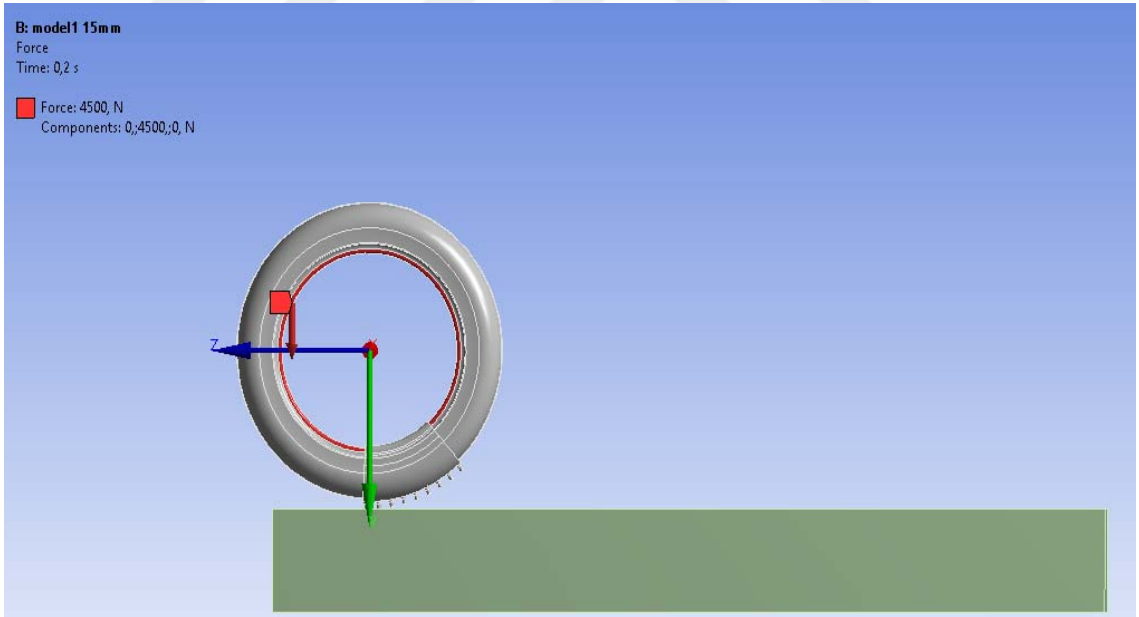
$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-\beta v} \quad (4.1)$$

Kar erozyonu ve şekil değiştirmesi: Kar erozyonu ve tekerleğin kar üzerindeki izdüşümleri ANSYS yardım dosyası içerisinde yer alan açık dinamik erozyon kontrolleri ve erozyon bölümünden alınmıştır. Kar şekil değiştirmesi, ANSYS yardımı ile Drucker-Prager doğrusal modeli kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu model zemin davranışlarını göstermek için kullanılan bir modeldir. Kar erozyonu doğrusal, stassi ve parçalı (Piecewise) olarak üç şekilde mevcuttur. Bu çalışmada doğrusal şekli kullanılmıştır.

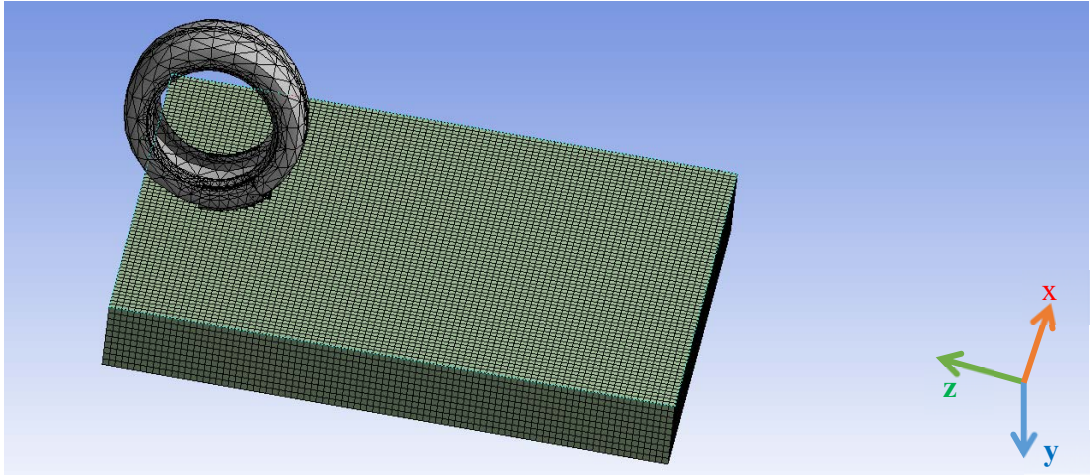
Kuvvet: Her tekerleğe 4500 N (yaklaşık 450 kg) düşey yük uygulanmıştır (Şekil 4.3).

Sonlu eleman ağı oluşturulması (Mesh): Kar yüzeyinin eleman kalitesini arttırmak için eleman büyüklüğü (sizing) 0.02 m olarak tanımlanmıştır. Elemanların sayısı çözüm için çok önemlidir, eleman sayısı arttığı zaman modelin ebatlarına yakın olduğundan dolayı sonuçlar deneysel analizlere yakın olmaktadır. Fakat eleman sayısının artması çözüm süresinde artmasına neden olmaktadır. Bu durum değerlendirilerek küçük parçalı modellerde yüksek kaliteli mesh kullanılmıştır. Çalışma için iyi sonuç vereceği düşünülerek küçük elamanlardan oluşan çok sayılı eleman sistemi kullanılmıştır. Şekil 4.4'te ANSYS programı yardımı ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak SOLIDWORKS ile tasarlanan tekerleklerin eleman ağı görülmektedir. Çalışmada, tasarlanan tüm tekerleklerin hareket yönü negatif z eksenindedir. Doğrusal hız z ekseninin negatif doğrultusunda ve yük y ekseninin pozitif yönünde uygulanmıştır.

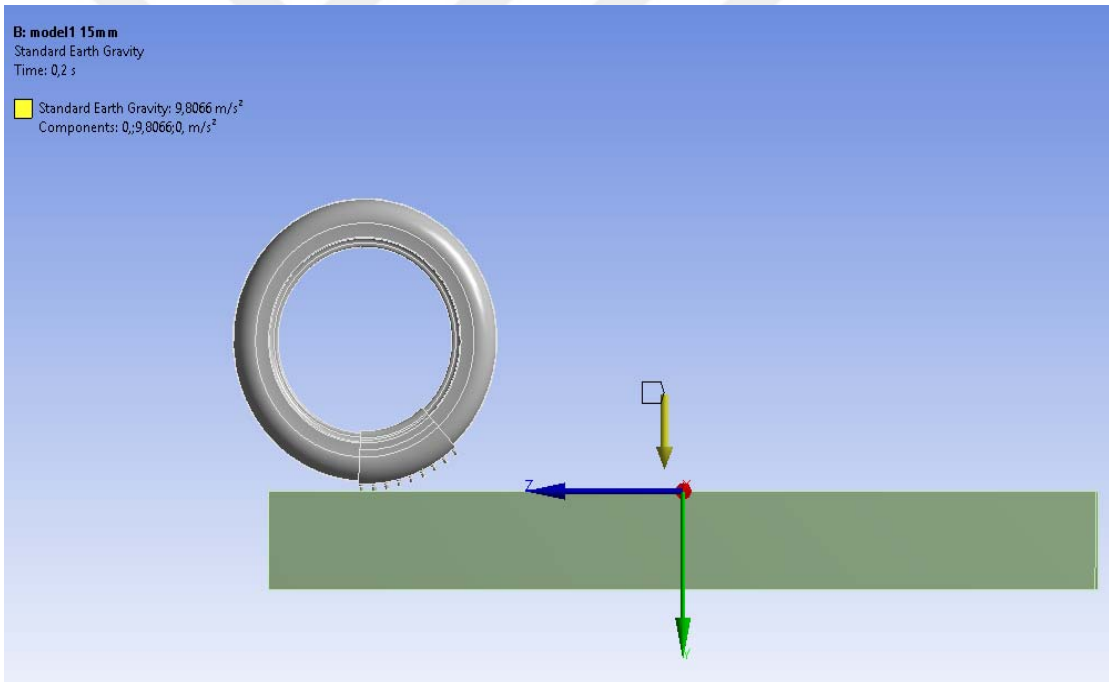
Yerçekim ivmesi: ANSYS programındaki yerçekim ivmesi standart (9.8066 m/s^2) olarak eklenmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.3. Düşey kuvvetin tekerleğe uygulanması



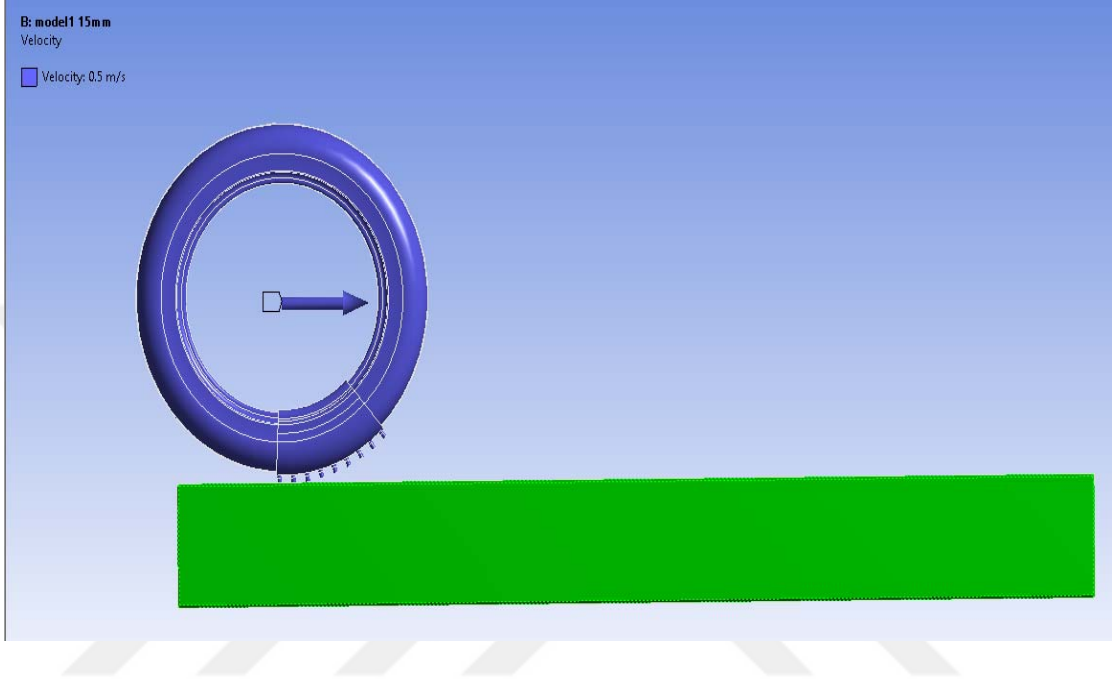
Şekil 4.4. Sonlu elemanlarla tasarlanan tekerleğin mesh yapılıması



Şekil 4.5. Yer çekim ivmesi

Hız: Tekerlekler hem dönme hem de öteleme hareketi yapmaktadır. Açısal ve öteleme hız, tekerleğin ileri hareket etmesi için jant merkezinden, tekerleğin merkezine uygulanmıştır. Bu durumda limit süre 0.2 saniye için çözüme verilmiştir. Açısal ve öteleme hızın belirlenmesi Lee'nin (2011) araştırmasındaki bağlantıya göre belirlenmiştir. Bu

bağlantıda uzunlamasına kayma katsayısı (longitudinal slip) -0.8 olarak alınmıştır. Uzunlamasına kayma adı altında daha detaylı bilgi verilmiştir. Doğrusal hız Şekil 4.6’da ve açısai hız ve yönü Şekil 4.7’de görölmektedir.



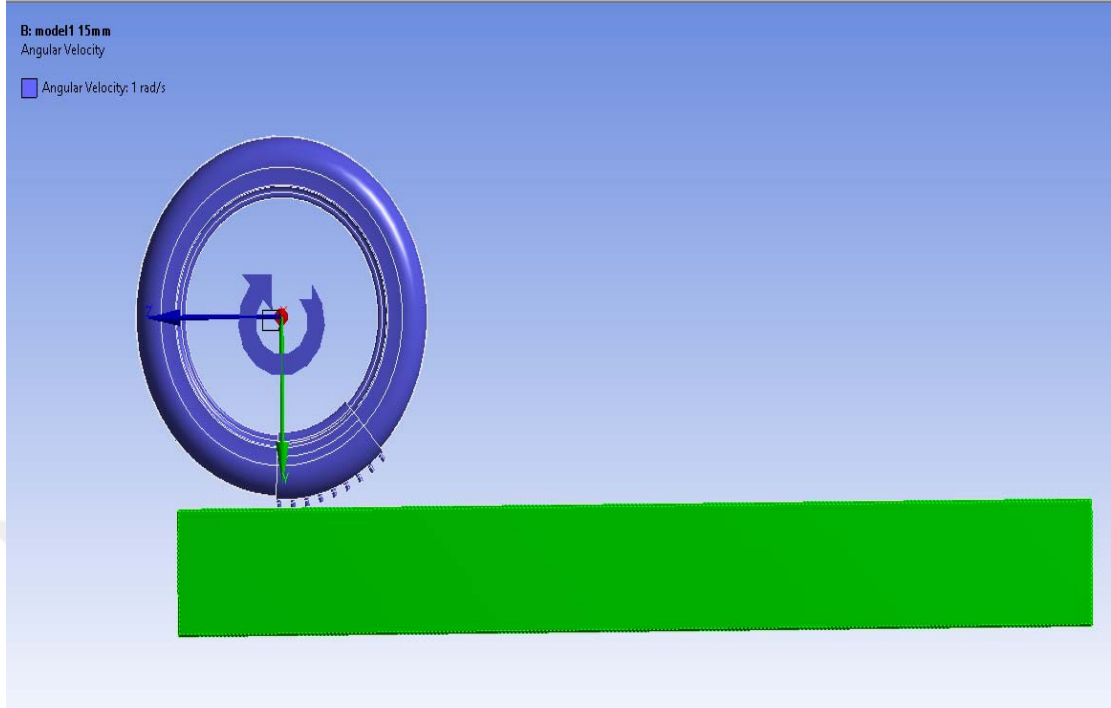
Şekil 4.6. Ötelenme hızı ve yönü

Uzunlamasına kayma: 4.2 formülünde verilmiştir.

$$i_x = 1 - \frac{v_z}{r_e \omega} \quad (4.2)$$

$$r_e = r_0 - \delta \quad (4.3)$$

Burada, v_z : doğrusal hız, r_e : etkin tekerlek yarıçapı, r_0 tekerlek yarıçapı, δ deformasyon miktarı, ve ω açısai hızı ifade eder.



Şekil 4.7. Açısal hızın yönü

Tekerleğin şekil değiştirmesi: ANSYS programının deformasyon için kullandığı temel “Mooney-Rivlin” modelidir. Bu model hiper-elastik malzemenin şekil değiştirme enerji fonksiyonunun, birinci ve ikinci devriotik temel invariantsları I_1 ve I_2 'ye göre sonsuz bir seriyle açıklanabilir. Tasarlanan tekerleklerin şekil değiştirmesini tanımlayan formül şu şekildedir;

$$\delta U^{(e)} = \sum_{mn=0}^{\infty} C_{mn} (\bar{I}_1 - 3)^m (\bar{I}_2 - 3)^n + \frac{1}{d} (J - 1)^2 \quad (4.4)$$

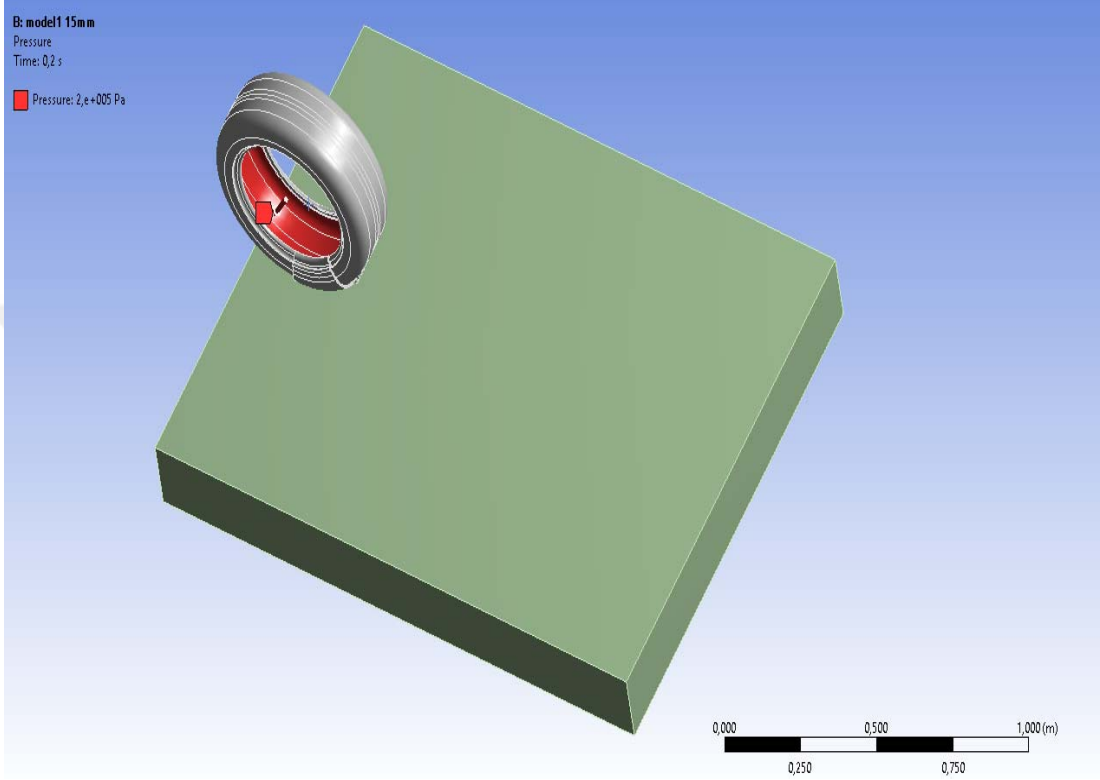
Burada \bar{I}_1 deviatorik esas sabit, J jacobian değeri, C malzeme sabitidir.

İki parametrelili olan Mooney-Rivlin modeli için aşağıdaki formül kullanılır.

$$\delta U^{(e)} = C_{10} (\bar{I}_1 - 3) + C_{01} (\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{d} (J - 1)^2 \quad (4.5)$$

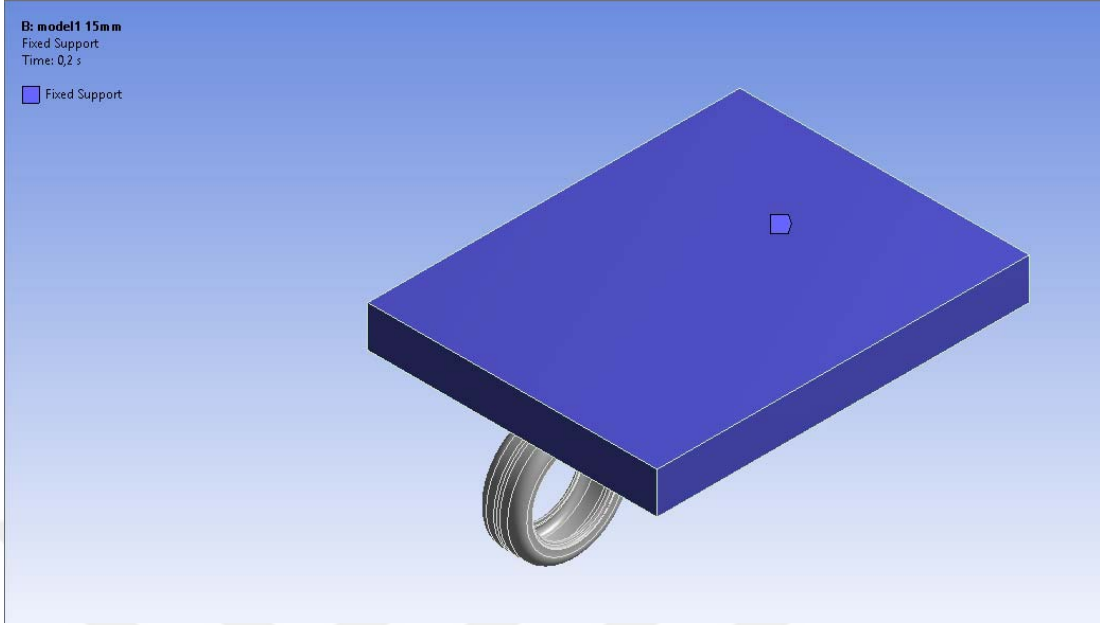
İşlem Yapılan Bilgisayar: Bu analizler Intel Core (TM) i7-6700K CPU @ 4.00 Ghz işlemci ve 32 GB RAM'i olan bilgisayarda çözülmüştür. Her bir çözüm ortalama iki gün zaman almıştır. Modelin hazırlanma aşamaları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

Basınç: Tüm tekerleklere 200 kPa basınç uygulanmış. Tekerleğe uygulanan basınç yükü Şekil 4.8’de görülmektedir.



Şekil 4.8. Basınç

Sabit mesnetler: 20 cm kar derinliğindeki, dikdörtgen prizmanın yüzeyleri için alt ve yan taraflarında toplam beş yüzeye sabit mesnet tanımlanmıştır. Sabit mesnetler Şekil 4.9’da görülmektedir.



Şekil 4.9. Sabit mesnetler

Burada mavi renkte gösterilen yüzeyler, sabit mesnet yüzeyleridir.

4.2. Gerilmeler ve Şekil Değişiklikleri

Tekerlek gerilmeleri ve deformasyonları için iki parametrelili Mooney-Rivlin modeli, kar erozyonu içinse Drucker-Prager modeli kullanılmıştır (bkz. Bölüm 4.1).

4.2.1. Düz tekerlek için tekerlek-kar gerilme ve şekil değişiklikleri

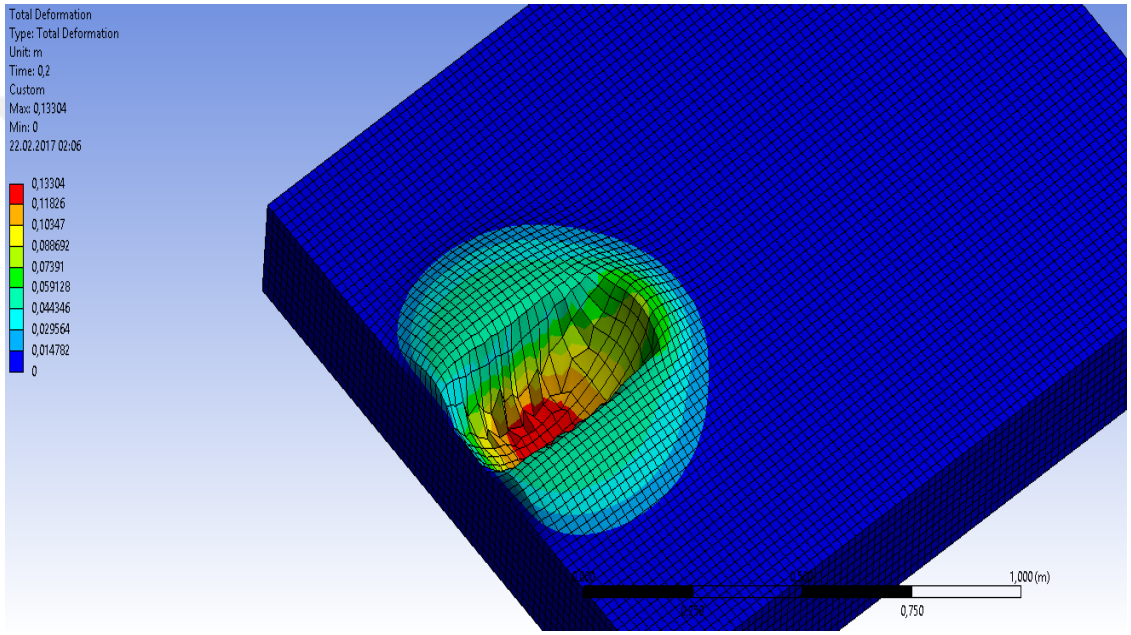
Sonlu elemanlar ile tasarlanan düz tekerleğe, ANSYS programı yardımı ile verilen parametreler aşağıdaki gibidir:

F (düşey yük)	: 4500 N
P (tekerlek basıncı)	: 200 kPa
V (öteleme hızı)	: 0.5 m/s
ω (açısal hız)	: 1 rad/s
Düğüm sayısı	: 77811

Eleman sayısı : 91745

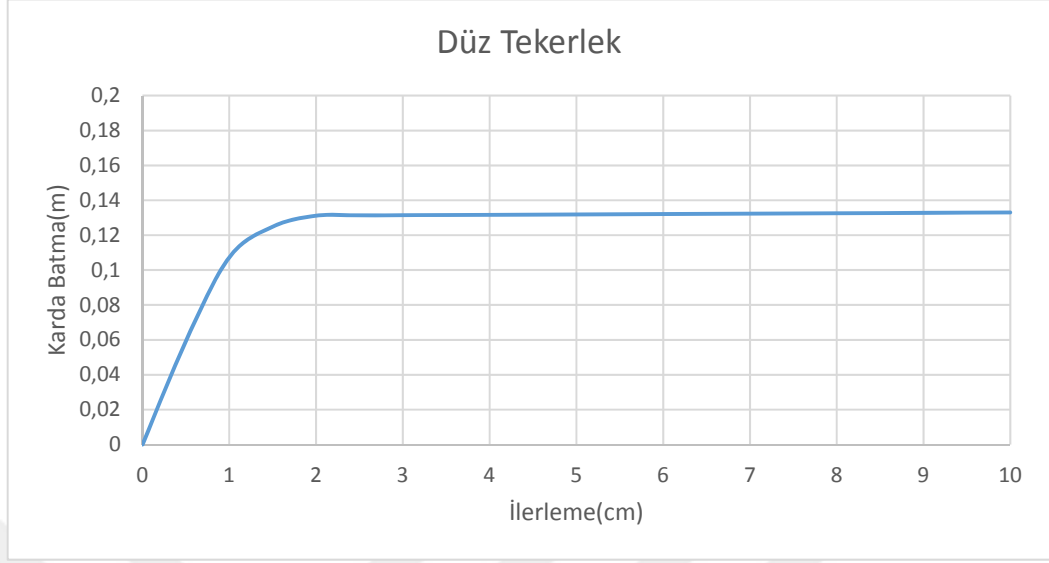
4.2.1.1. Karda batma

Sonlu elemanlarla analiz edilen düz tekerleğin 4500 N düşey yük altında, karda batması Şekil 4.10'da görülmektedir. $F=4500$ N düşey yük altında düz tekerleğin 0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda, maksimum batma derinliği 13.3 cm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.10. Düz tekerleğin karda batması

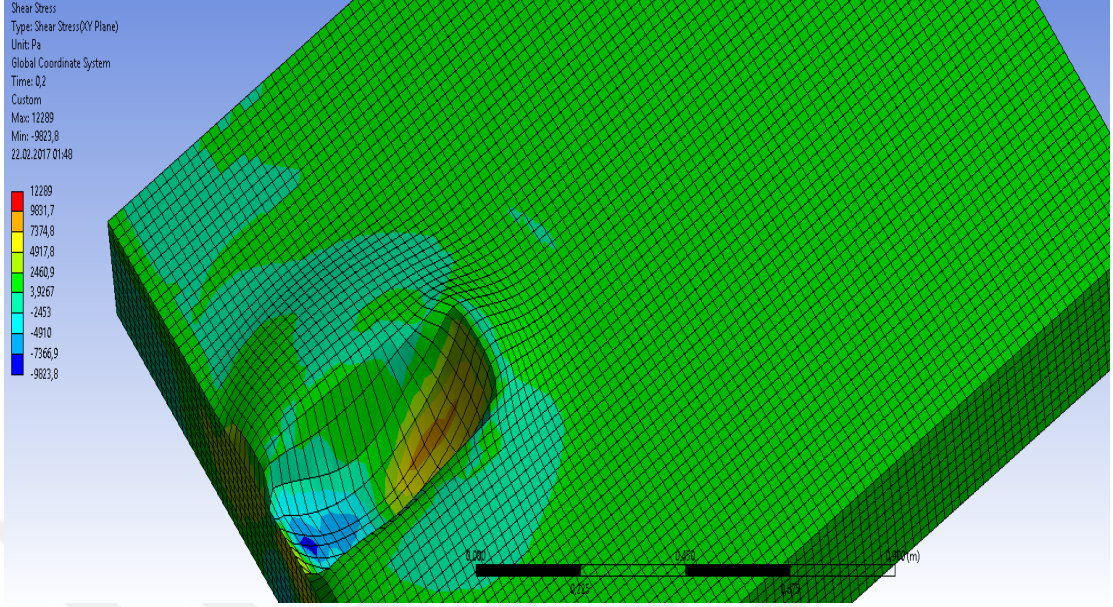
Sonlu elemanlarla analiz edilen düz tekerleğin maksimum batma değerleri Şekil 4.11'de görülmektedir. Şekil 4.11'de görüldüğü gibi kar üzerine bırakılan tekerlek 2 santimetre ilerledikten sonra sabit olarak 12-14 cm derinlikleri arasında hareket etmektedir. Lee (2011) çalışmasında, -0.8 boyuna kayma katsayısına karşılık olarak 4500 N düşey yük altında batma değerlerini 12-14 cm aralığında bulmuştur. Dolayısıyla, her iki sonuç çakıştığından tez çalışmasından elde edilen sonuçların doğruluğu onaylanmıştır.



Şekil 4.11. Düz tekerleğin karda batma değerleri

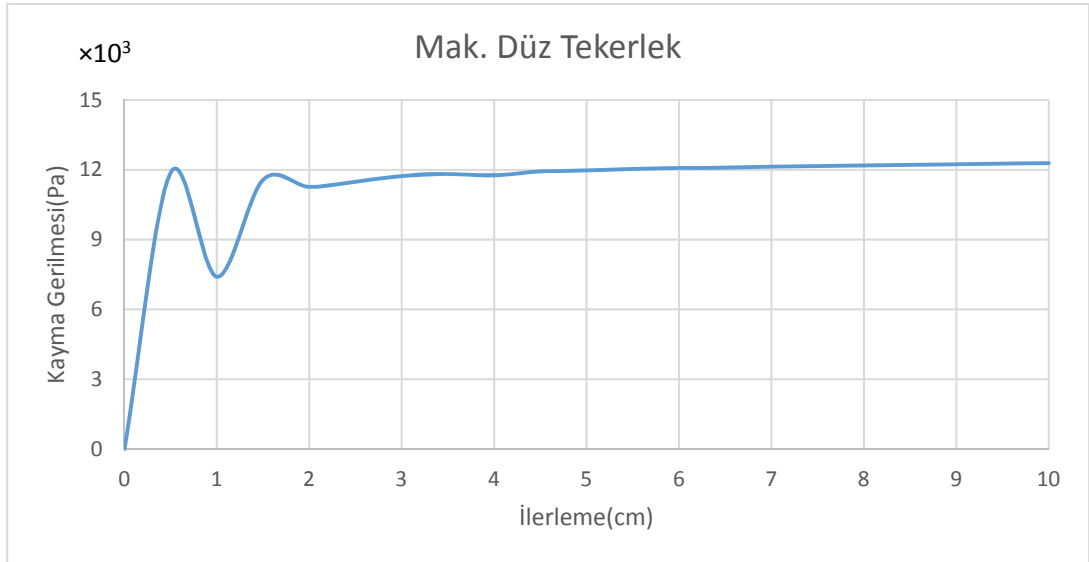
4.2.1.2. Karda oluşan kayma gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen düz tekerlek modelinde, kar kayma gerilmesi Şekil 4.12’de görülmektedir. 0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda 4500 N düşey yük altında düz tekerlek modelinde kardaki kayma gerilmesi maksimum 12289 Pa ve minimum -9823.8 Pa olarak belirlenmiştir.

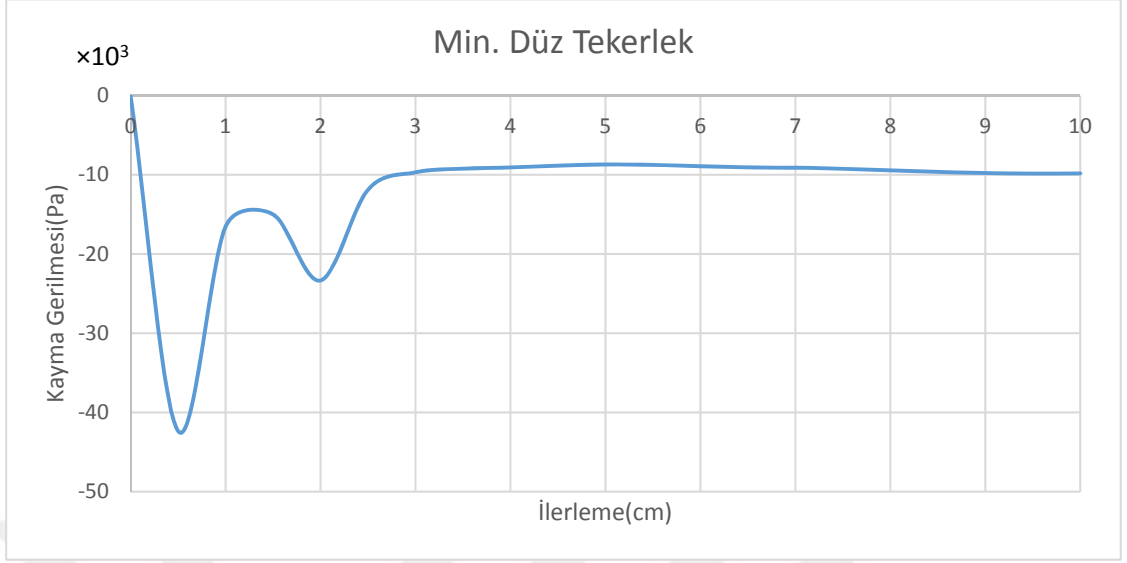


Şekil 4.12. Düz tekerlek modelinin karda kayma gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen düz tekerlek modelinde, karda oluşan minimum ve maksimum kayma gerilme değerleri Şekil 4.13-4.14'te görülmektedir.



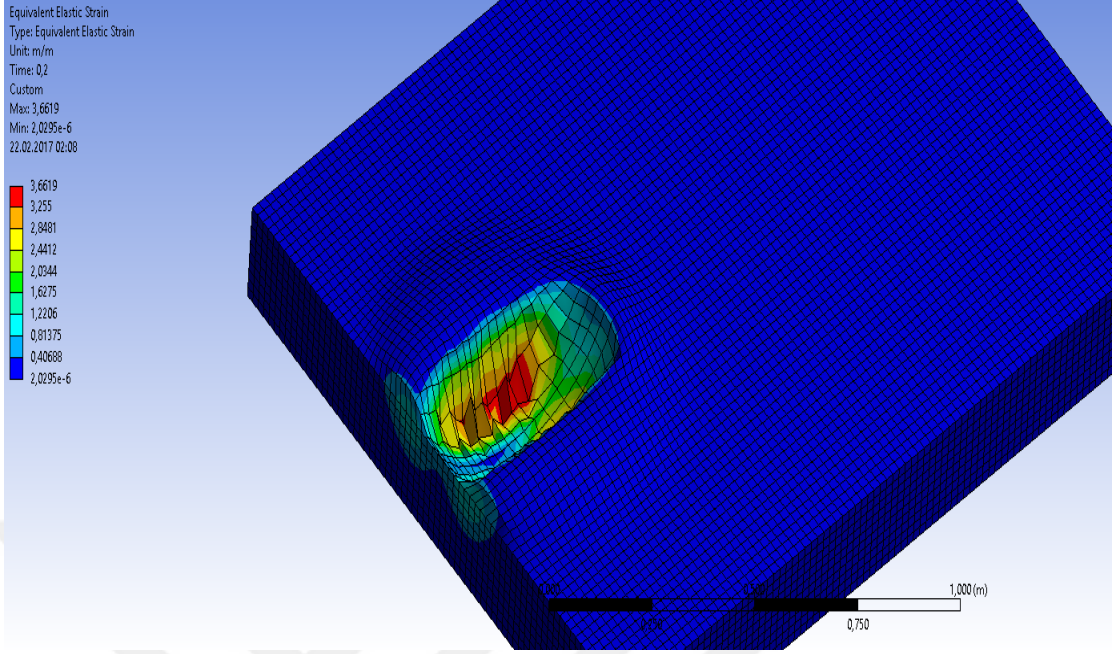
Şekil 4.13. Düz tekerlek modelinin kardaki maksimum kayma gerilmesi değerleri



Şekil 4.14. Düz tekerlek modelinin kardaki minimum kayma gerilmesi değerleri

4.2.1.3. Karda oluşan şekil değişimi

0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda ve 4500 N düşey yük altında düz tekerlek modelinde, karda oluşan maksimum şekil değişimi 3.6619 ϵ , minimum 2.0295e-6 ϵ olarak belirlenmiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. Düz tekerlek modelinin karda şekil değişimi

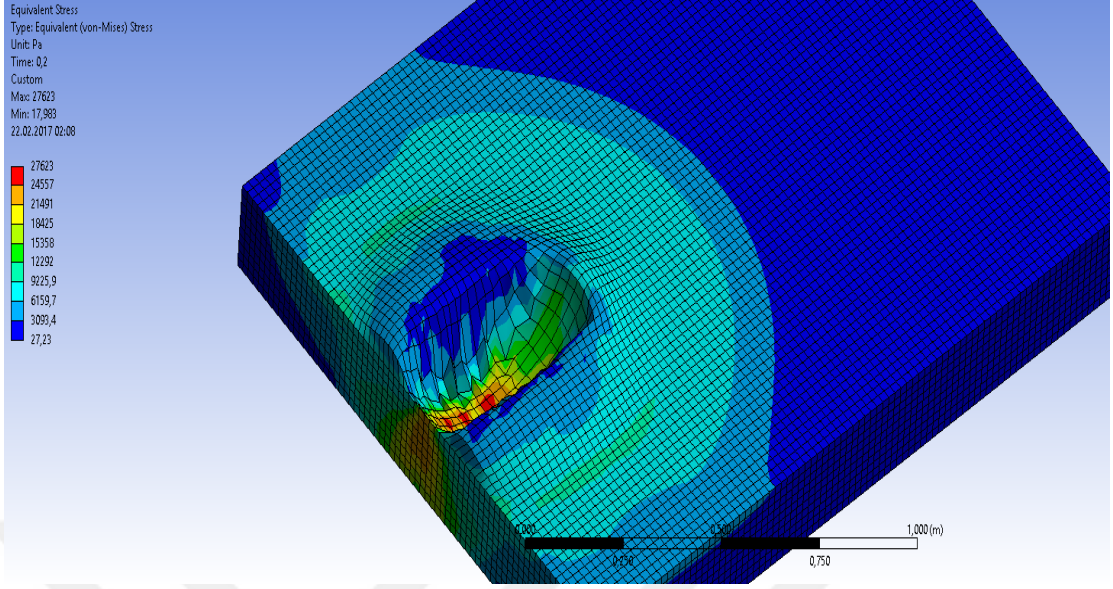
Sonlu elemanlarla analiz edilen düz tekerlekte, karda oluşan maksimum şekil değişim değerleri Şekil 4.16'da görülmektedir. Kar üzerine bırakılan düz tekerleğin ilerleme-şekil değişim eğrisi incelendiğinde, 3.4327ϵ değerine kadar doğrusal ve şiddetli değişim gözlemlenirken, 3.4327ϵ sonrası ise daha az ve düzgün bir değişim gerçekleşmiştir.



Şekil 4.16. Düz tekerlek modelinin karda maksimum şekil değişirgesi değerleri

4.2.1.4. Karda oluşan gerilme

0.2 saniye, 0.5 m/s sabit hızda ve 4500 N düşey yük altında düz tekerlek modelinde, karda oluşan maksimum gerilme 27623 Pa, minimum gerilme ise 17.983 Pa olarak belirlenmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Düz tekerlek modelinin kardaki gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen düz tekerlek modelinde, karda oluşan maksimum gerilme değerleri Şekil 4.18’de görülmektedir. Şekil 4.18’de görüldüğü gibi kar üzerine bırakılan düz tekerlek, 0-72598 Pa noktaları arasında doğrusal artış gerçekleşmiştir. 72598-37993 Pa noktaları arası kurlsız değişim ve 37993 Pa sonrası ise doğrusal azalış gözlemlenmiştir.



Şekil 4.18. Düz tekerlek modelinin kardaki maksimum gerilme değerleri

4.2.2. Dört mevsim tekerlek için tekerlek-kar gerilme ve şekil değiştirmeleri

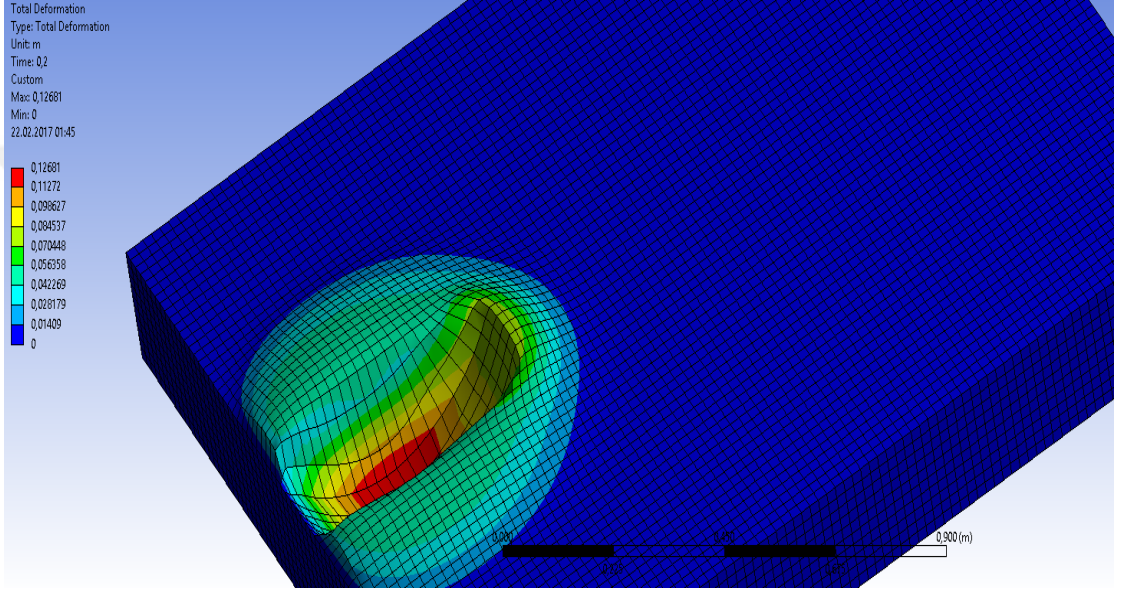
Sonlu elemanlar ile tasarlanan dört mevsim tekerleğine ANSYS programı yardımı ile verilen parametreler aşağıdaki gibidir:

F	: 4500 N
P	: 200 kPa
V	: 0.5 m/s
ω	: 1 rad/s
Düğüm sayısı	: 227827
Eleman sayısı	: 803704

Dört mevsim tekerlekte, dişler içerdiği için düz tekerleğe kıyasla daha fazla eleman kullanılmıştır.

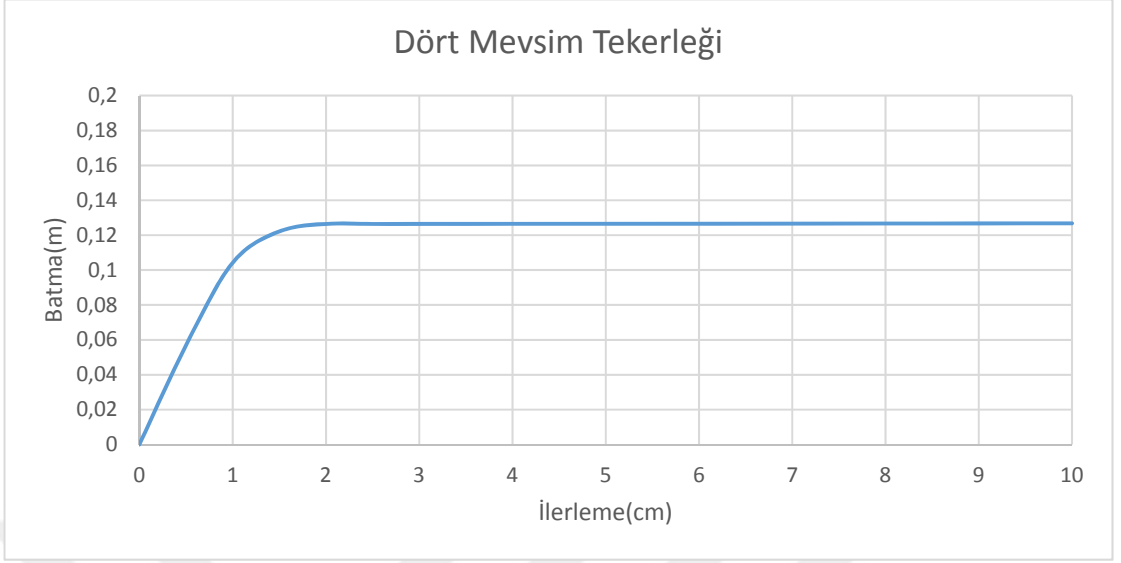
4.2.2.1. Karda batma

Sonlu elemanlarla analiz edilen dört mevsim tekerleğın 4500 N düşey yük altında kar üzerinde batması Şekil 4.19’da görölmektedir. $F=4500$ N düşey yük altında dört mevsim tekerleğın 0.2 saniye, 0.5 m/s sabit hızda ve maksimum batma 12.68 cm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.19. Dört mevsim tekerleğın karda batma değerleri

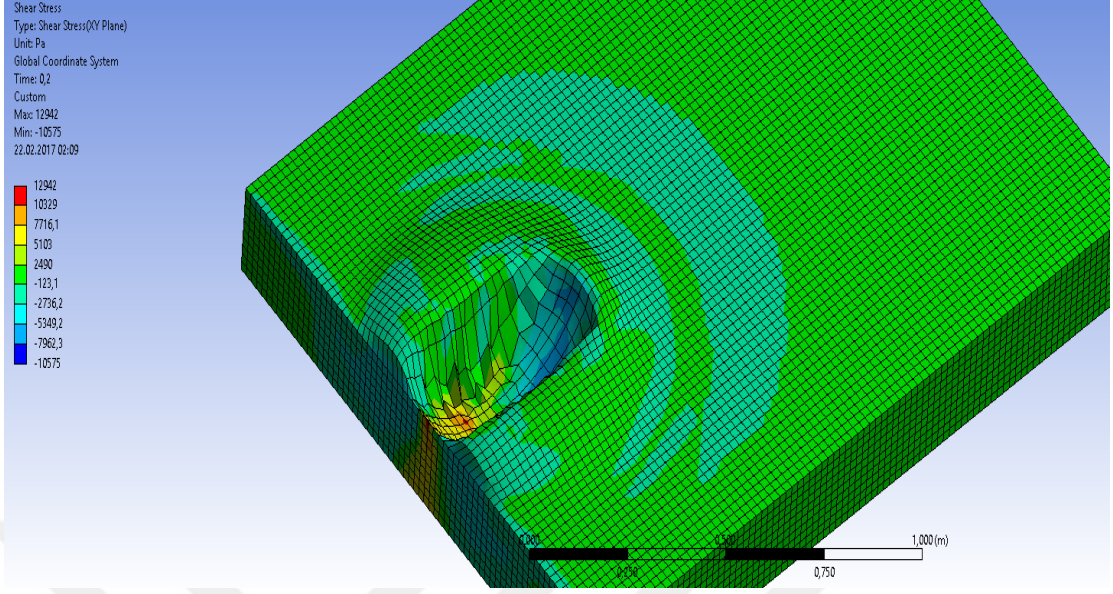
Sonlu elemanlarla analiz edilen dört mevsim tekerleğının maksimum batma değerleri şekil 4.20’de görölmektedir. Şekil 4.20’de göröldüğü gibi kar üzerine bırakılan tekerlek 2 santimetre ilerledikten sonra sabit olarak 12-14 cm derinlikleri arasında hareket etmektedir. Lee (2011) çalışmasında -0.8 boyuna kayma katsayısına karşılık olarak 4500 N düşey yük altında batma değerini 12-14 cm aralığında bulmuştur. Dolayısıyla, her iki sonuç çakıştığından tez çalışmasında elde edilen sonuçların doğruluğu onaylanmıştır.



Şekil 4.20. Dört mevsim tekerleğin karda batma değerleri

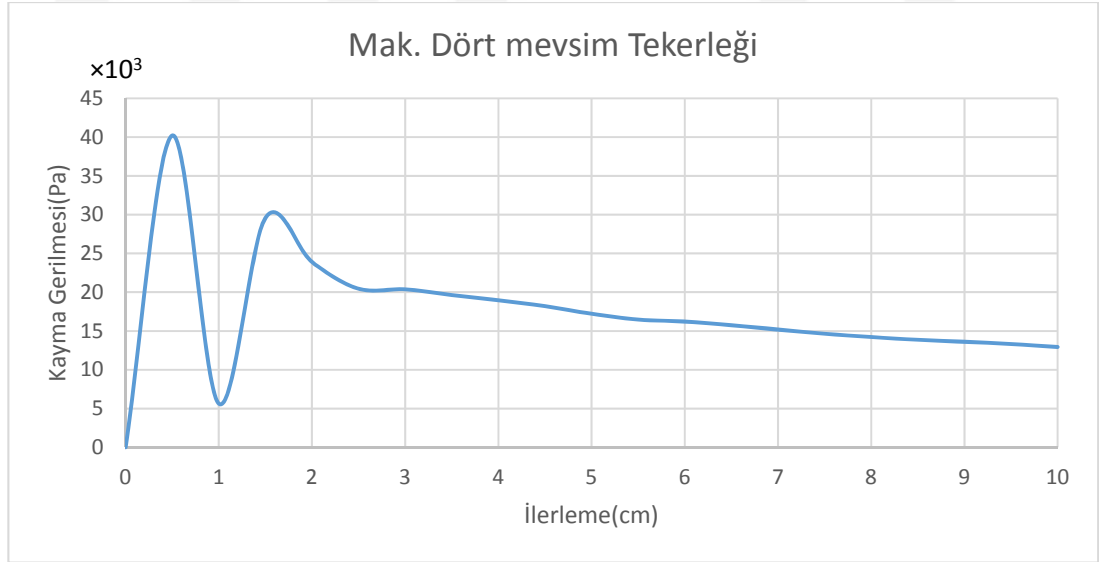
4.2.2.2. Karda oluşan kayma gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen dört mevsim tekerlek modelinde kar kayma gerilmesi Şekil 4.21’de görölmektedir. 0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda ve 4500 N düşey yük altında dört mevsim tekerlek modelinde maksimum kayma gerilmesi 12942 Pa ve minimum -10575.8 Pa olarak belirlenmiştir.

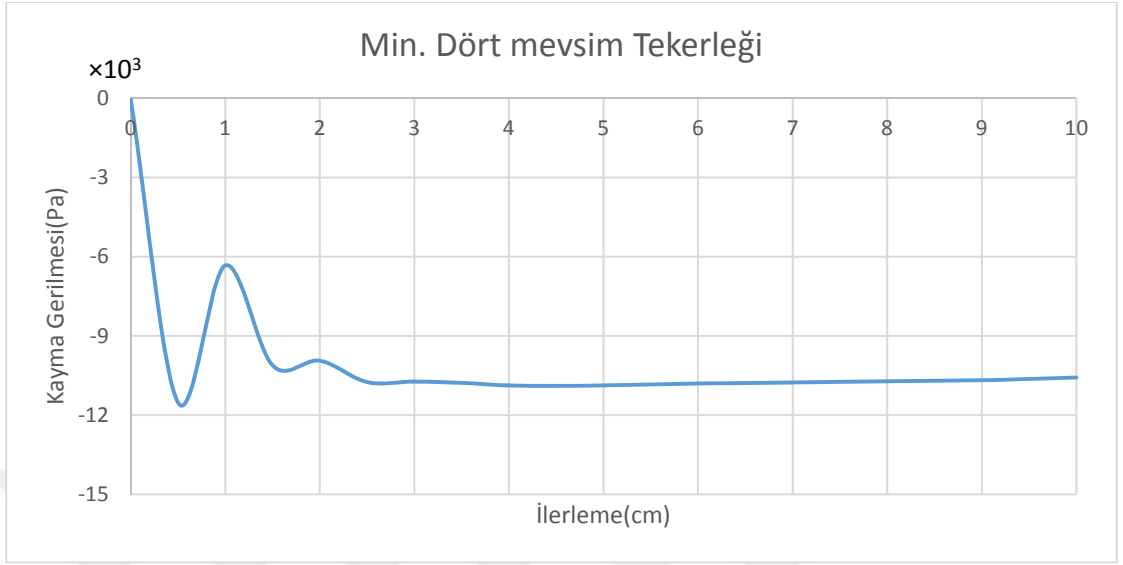


Şekil 4.21. Dört mevsim tekerlek modelinin karda kayma gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen dört mevsim tekerlek modelinde karda oluşan minimum ve maksimum kayma gerilmesi değerleri Şekil 4.22-4.23'te görülmektedir.



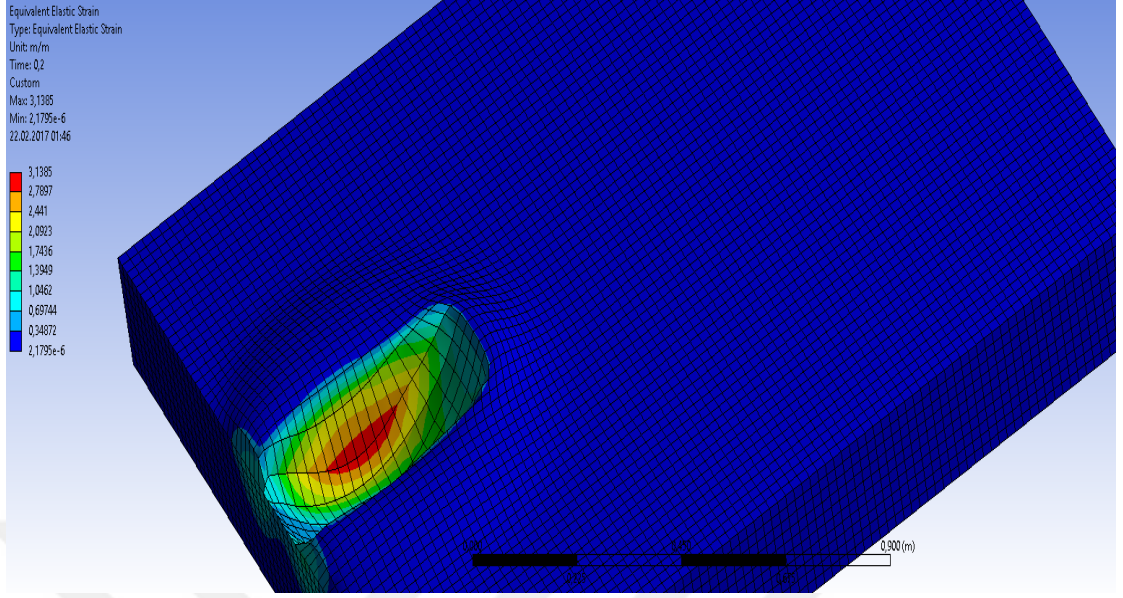
Şekil 4.22. Dört mevsim tekerlek modelinin kardaki maksimum kayma gerilmesi değerleri



Şekil 4.23. Dört mevsim tekerlek modelinin kardaki minimum kayma gerilmesi değerleri

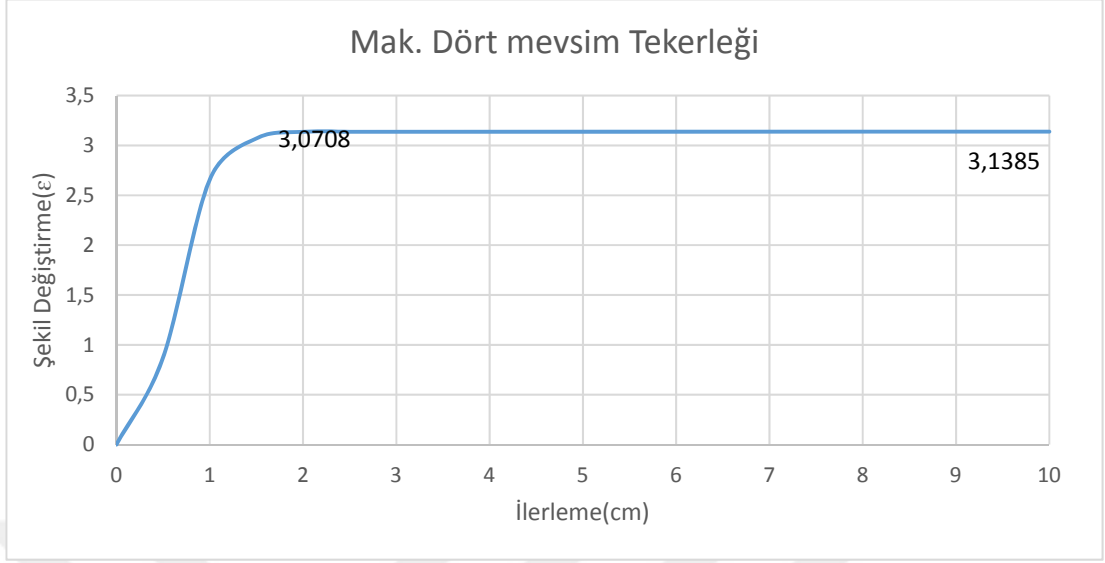
4.2.2.3. Karda oluşan şekil değişimi

0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda ve 4500 N düşey yük altında dört mevsim tekerlek modelinde, karda oluşan maksimum şekil değişimi 3.1385 ϵ , minimum 2.1795e-6 ϵ olarak belirlenmiştir (Şekil 4.24).



Şekil 4.24. Dört mevsim tekerleğin kardaki şekil değişimi

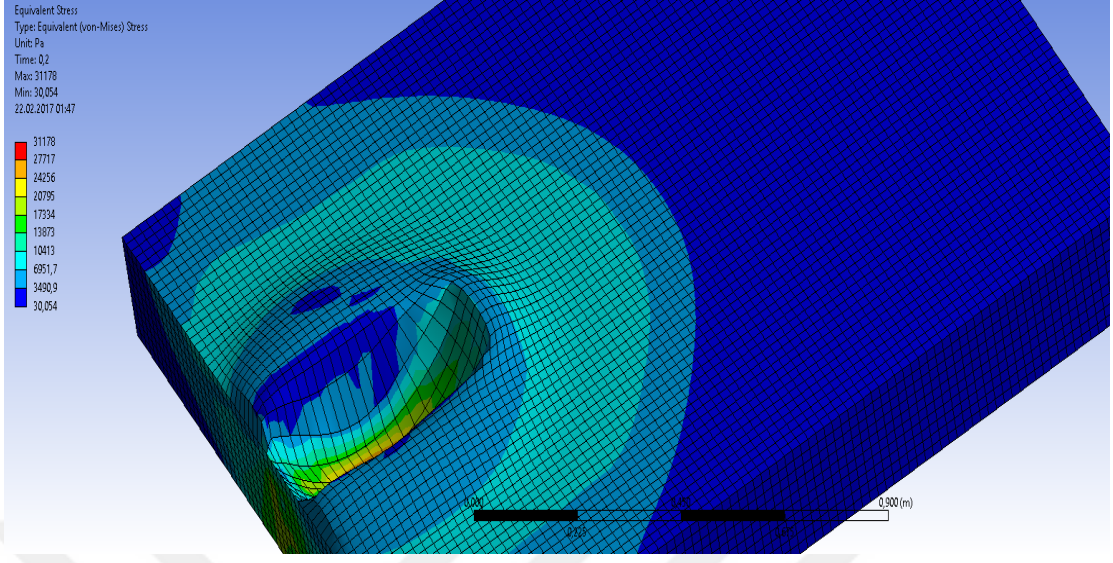
Sonlu elemanlarla analiz edilen dört mevsim tekerlek modelinde, karda oluşan maksimum şekil değişim değerleri Şekil 4.25'te görülmektedir. Kar üzerine bırakılan dört mevsim tekerleğin ilerleme-şekil değişim eğrisi incelendiğinde, 3.0708 ϵ değerine kadar doğrusal ve şiddetli değişim gözlemlenirken, 3.0708 ϵ sonrası ise daha az ve düzgün bir değişim gerçekleşmiştir.



Şekil 4.25. Dört mevsim tekerlek modelinin kardaki maksimum şekil değiştirme değerleri

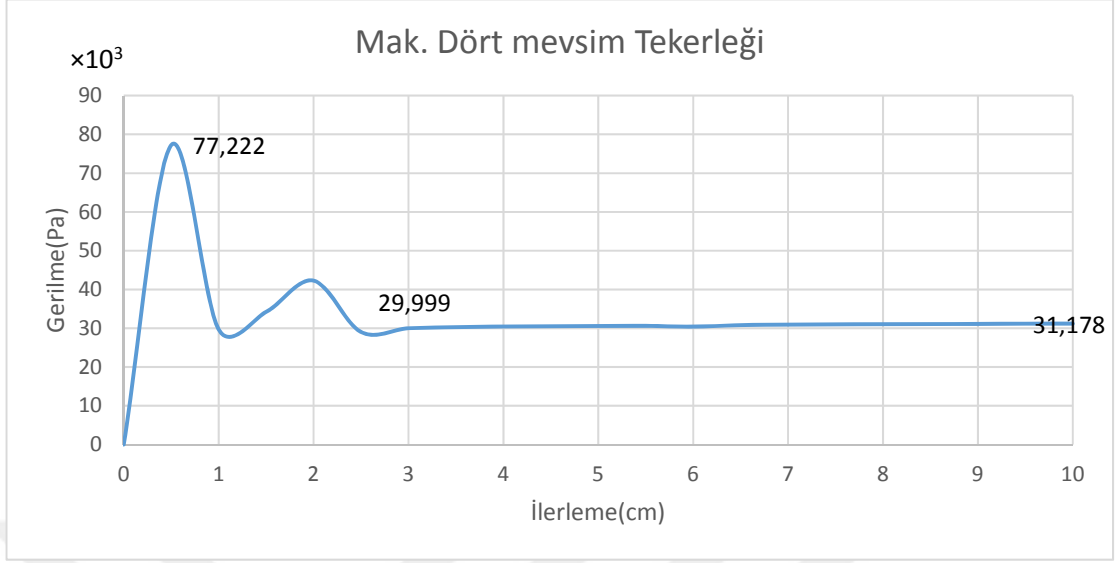
4.2.2.4. Karda oluşun gerilme

0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda ve 4500 N düşey yük altında dört mevsim tekerlek modelinde karda oluşun gerilme maksimum 31178 Pa ve minimum 30.054 Pa olarak belirlenmiştir (Şekil 4.26).



Şekil 4.26. Dört mevsim tekerlek modelinin kardaki gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen dört mevsim tekerlek modelinde, karda oluşan maksimum gerilme değerleri Şekil 4.27’de görülmektedir. Şekil 4.27’de görüldüğü gibi kar üzerine bırakılan dört mevsim tekerlek, 0-77222 Pa noktaları arasında doğrusal artış gerçekleşmiştir. 77222-29999 Pa noktaları arası kuralızsız değişim gerçekleşmiştir. 29999 Pa sonrası ise yaklaşık olarak sabit kalmıştır.



Şekil 4.27. Dört mevsim tekerlek modelinin kardaki maksimum gerilme değerleri

4.2.3. Kar paleti Model 1 için palet-kar gerilme ve şekil değiştirmeleri

Sonlu elemanlar ile tasarlanan kar paleti Model 1'e, ANSYS programı yardımı ile verilen parametreler aşağıdaki gibidir:

Tüm modeller için

F	: 4500 N
P	: 200 kPa
V	: 0.5 m/s
ω	: 1 rad/s

5 mm için

Düğüm sayısı	: 130694
Eleman sayısı	: 330375

10 mm için

Düğüm sayısı	: 80577
Eleman sayısı	: 102631

15 mm için

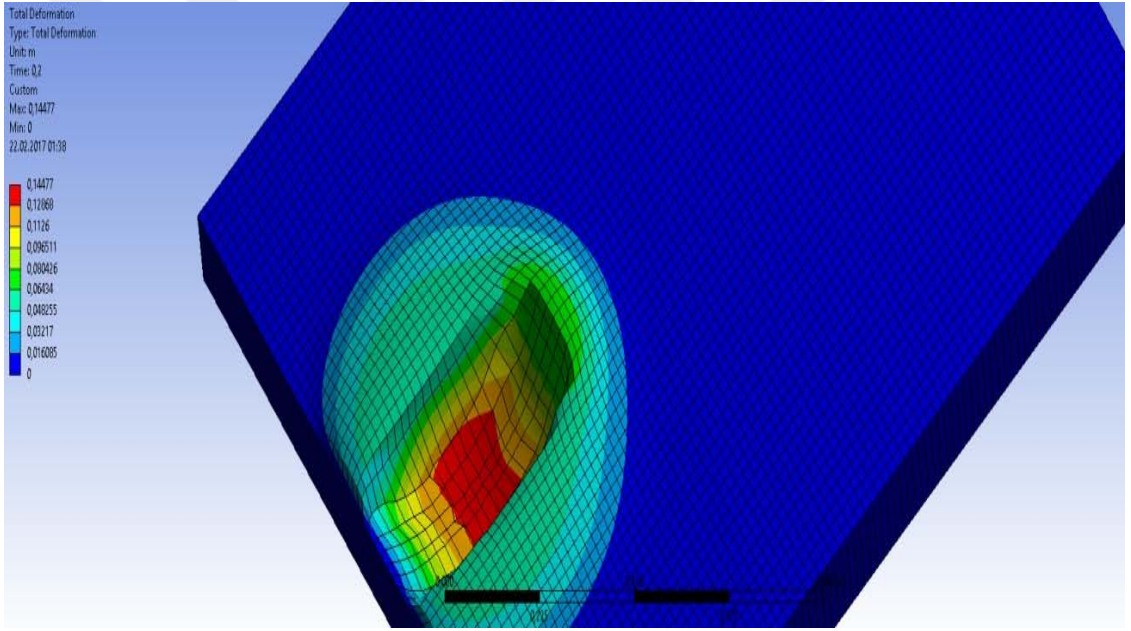
Düğüm sayısı	: 80655
--------------	---------

Eleman sayısı : 102963

4.2.3.1. Model 1- 5 mm dişli palet

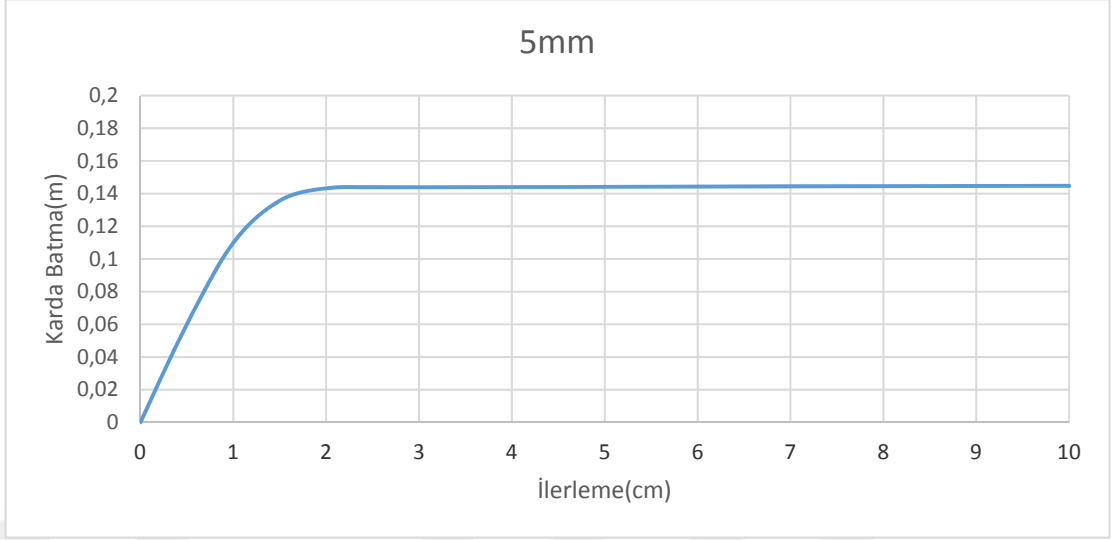
4.2.3.1.1. Karda batma

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 1-5 mm dişli paletin 4500 N düşey yük altında kar üzerinde batması Şekil 4.28’de görülmektedir. $F=4500$ N düşey yük altında Model 1-5 mm dişli paletin 0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda, maksimum batma 14.47 cm olarak bulunmuştur.



Şekil 4.28. Model 1-5 mm dişli paletin karda batma değerleri

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 1-5 mm dişli paletin maksimum batma değerleri Şekil 4.29’da görülmektedir.

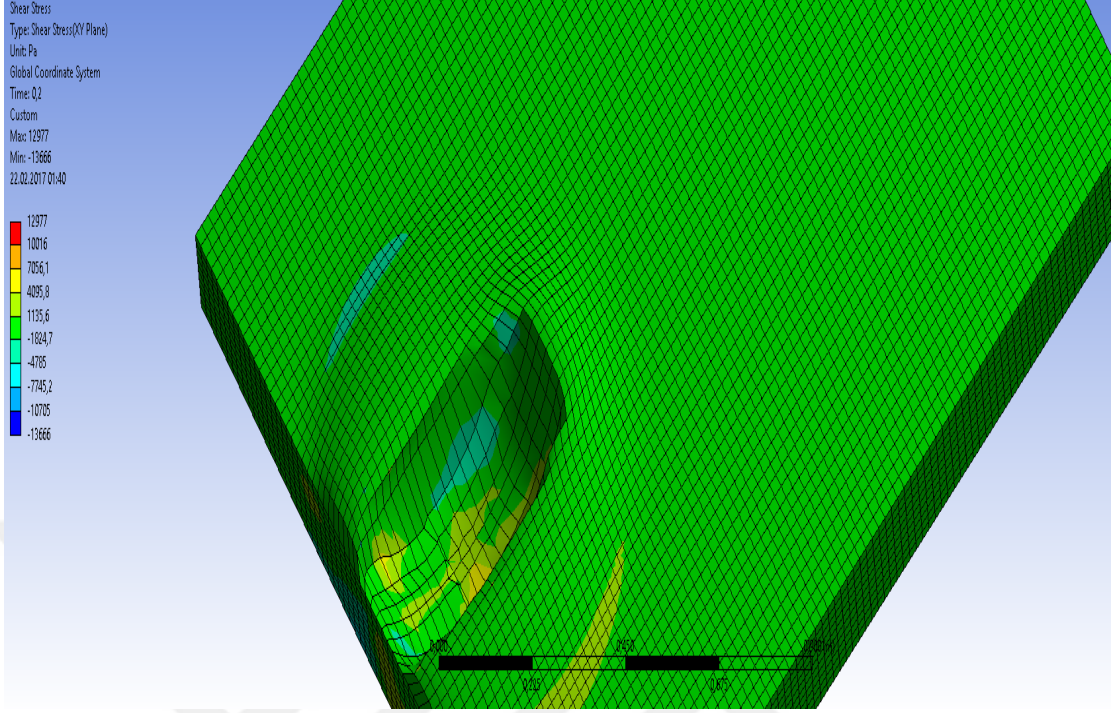


Şekil 4.29. Model 1-5 mm dişli paletin karda batma değerleri

Şekil 4.29’da görüldüğü gibi kar üzerine bırakılan palet, 2 santimetre ilerledikten sonra sabit olarak 14-16 cm derinlikleri arasında hareket etmektedir.

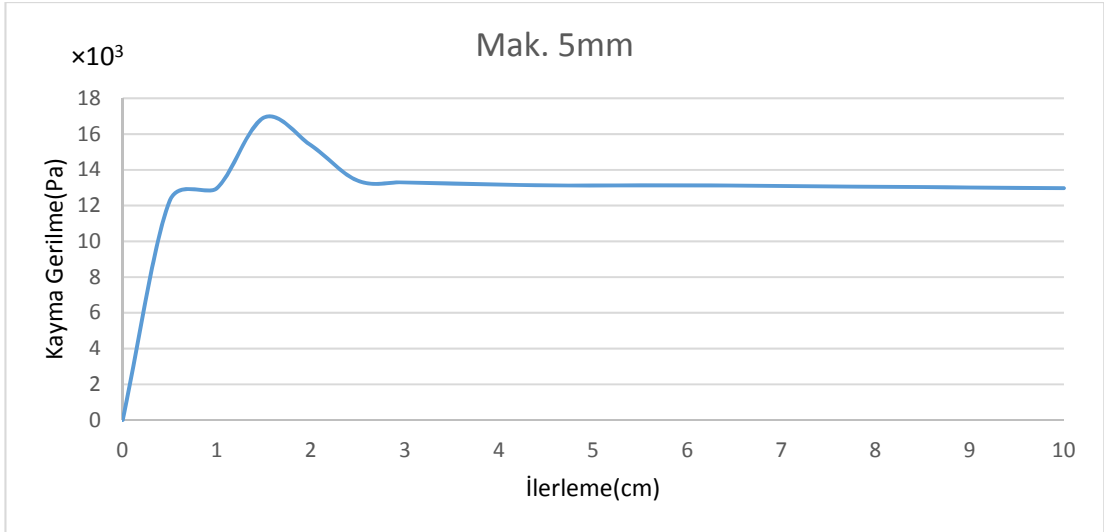
4.2.3.1.2. Karda oluşan kayma gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 1-5 mm dişli paletin kar kayma gerilmesi Şekil 4.30’de görülmektedir. 0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda ve $F=4500$ N düşey yük altında Model 1-5 mm dişli paletin maksimum karda kayma gerilmesi 12977 Pa, minimum - 13666 Pa olarak belirlenmiştir.

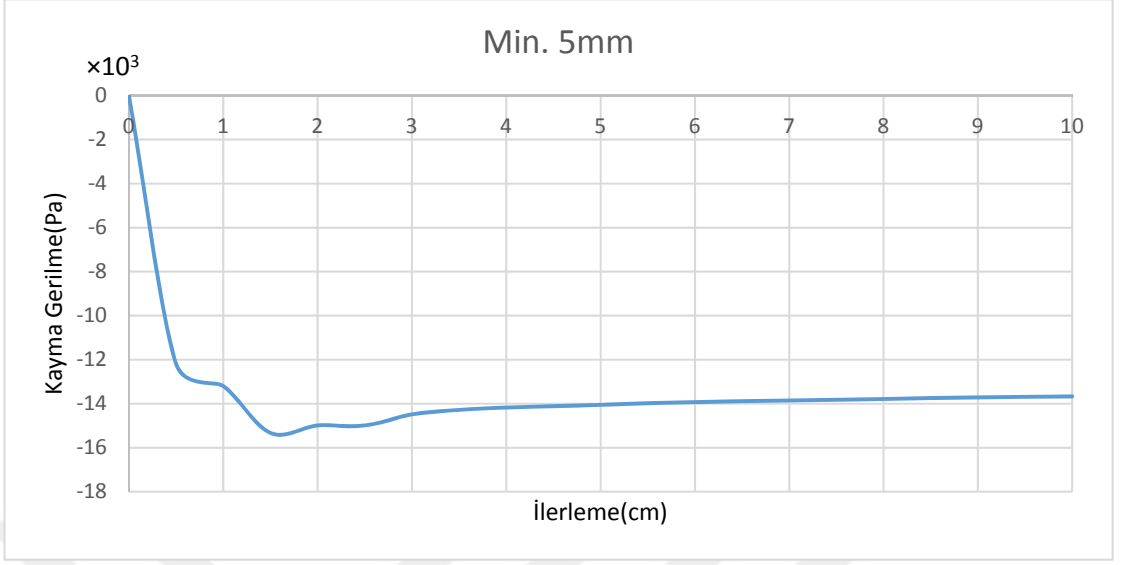


Şekil 4.30. Model 1-5 mm dişli paletin kardaki kayma gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 1-5 mm dişli paletin minimum ve maksimum kardaki kayma gerilmesi değerleri Şekil 4.31-4.32’de görülmektedir.



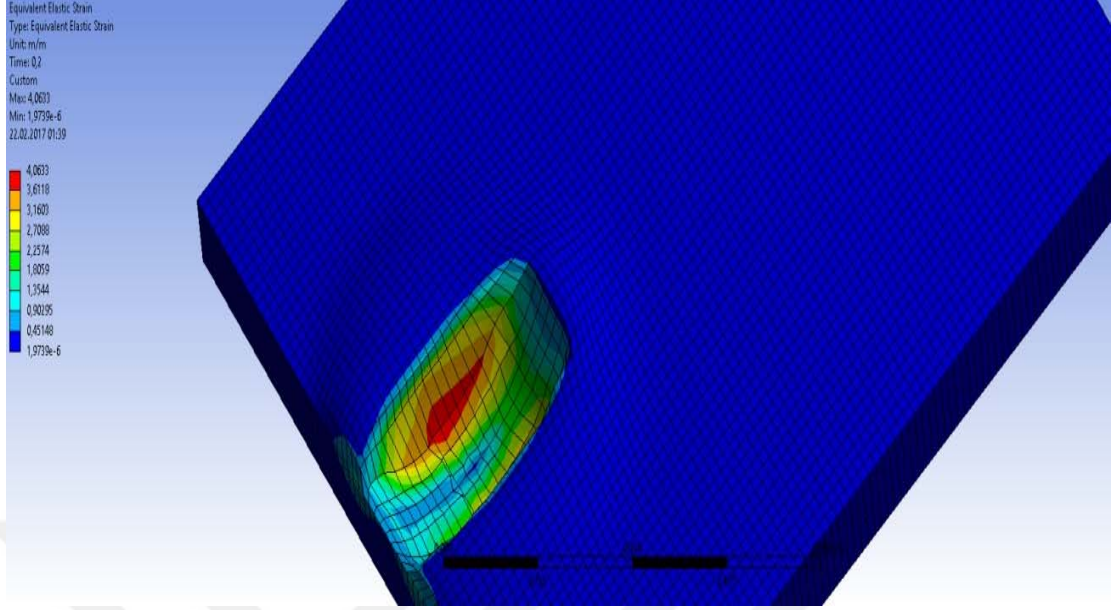
Şekil 4.31. Model 1-5 mm dişli paletin kardaki maksimum kayma gerilmesi değerleri



Şekil 4.32. Model 1-5 mm dişli paletin kardaki minimum kayma gerilmesi değerleri

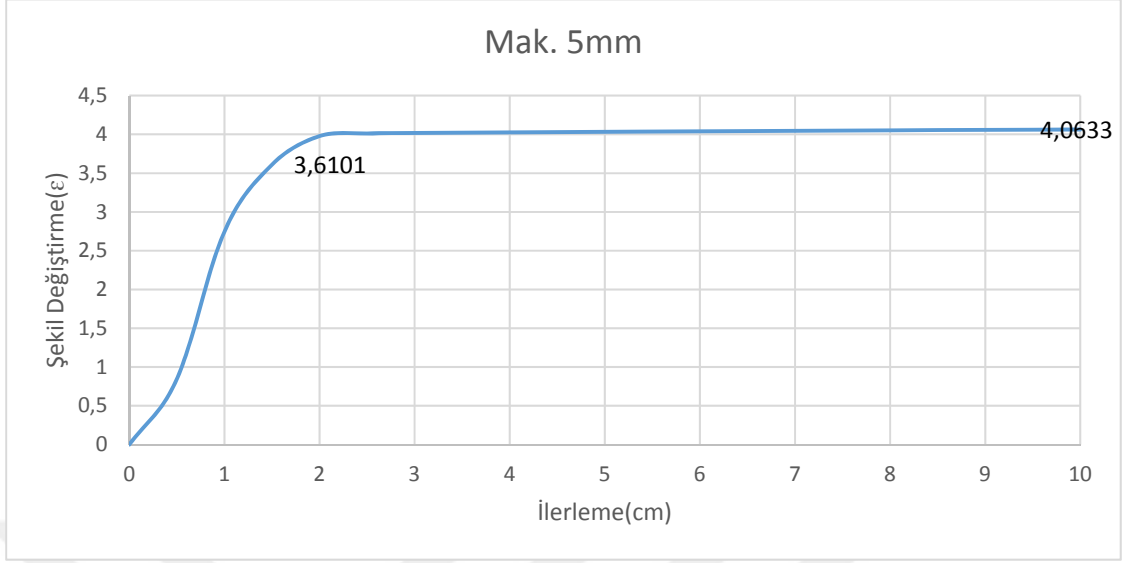
4.2.3.1.3. Karda oluşan şekil değiştirmesi

$F=4500$ N düşey yük altında Model 1-5 mm dişli paletin 0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda maksimum kardaki şekil değiştirmesi 4.0633 ϵ , minimum 1.9739e-6 ϵ olarak belirlenmiştir (Şekil 4.33).



Şekil 4.33. Model 1-5 mm dişli paletin kardaki şekil değıştirmesi

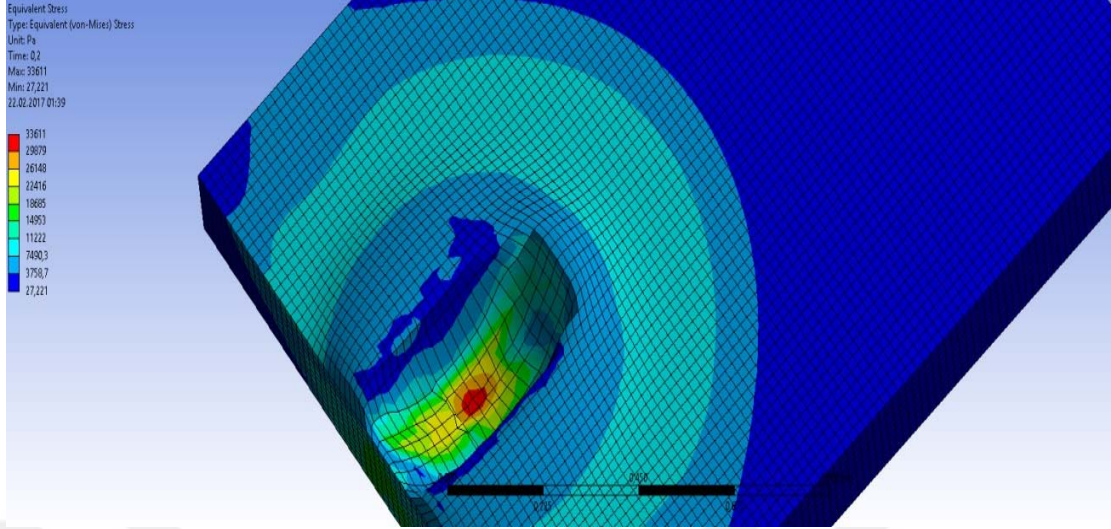
Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 1-5 mm dişli paletin maksimum kardaki şekil değıştirme değeri Şekil 4.34'te görülmektedir. Kar üzerine bırakılan Model 1-5 mm dişli paletin ilerleme-şekil değıştirme eğrisi incelendiğinde, 3.6101 ϵ değeri kadar doğrusal ve şiddetli değışim gözlemlenirken, 3.6101 ϵ sonrası ise daha az ve düzgün bir değışim gerçekleşmiştir.



Şekil 4.34. Model 1-5 mm dişli paletin kardaki maksimum şekil değıştirmesi değeri

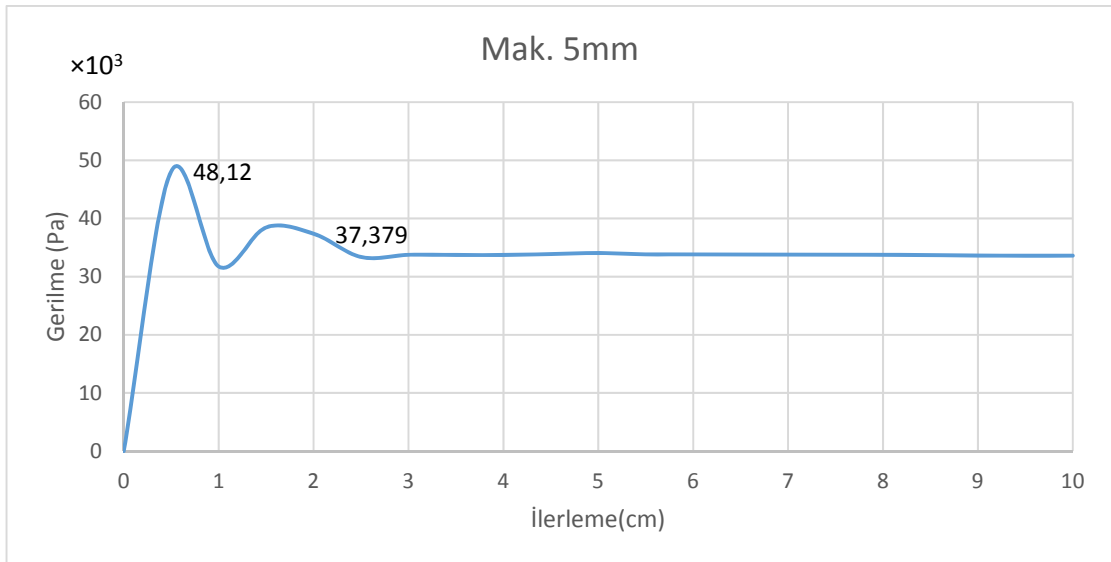
4.2.3.1.4. Karda oluşan gerilme

0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda ve $F=4500$ N düşey yük altında Model 1-5 mm dişli paletin maksimum kardaki gerilmesi 33611 Pa, minimum 27.221 Pa olarak belirlenmiştir (Şekil 4.35).



Şekil 4.35. Model 1-5 mm dişli paletin kardaki gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 1-5 mm dişli paletin maksimum kardaki gerilme değerleri Şekil 4.36’da görülmektedir. Şekil 4.36’da görüldüğü gibi kar üzerine bırakılan Model 1-5 mm dişli palet, 0-48120 Pa noktaları arası doğrusal değişim gerçekleşmiştir. 48120-37379 Pa noktaları arası kurlsız değişim gerçekleşmiştir. 37379 Pa sonrası ise yaklaşık olarak sabit kalmıştır.

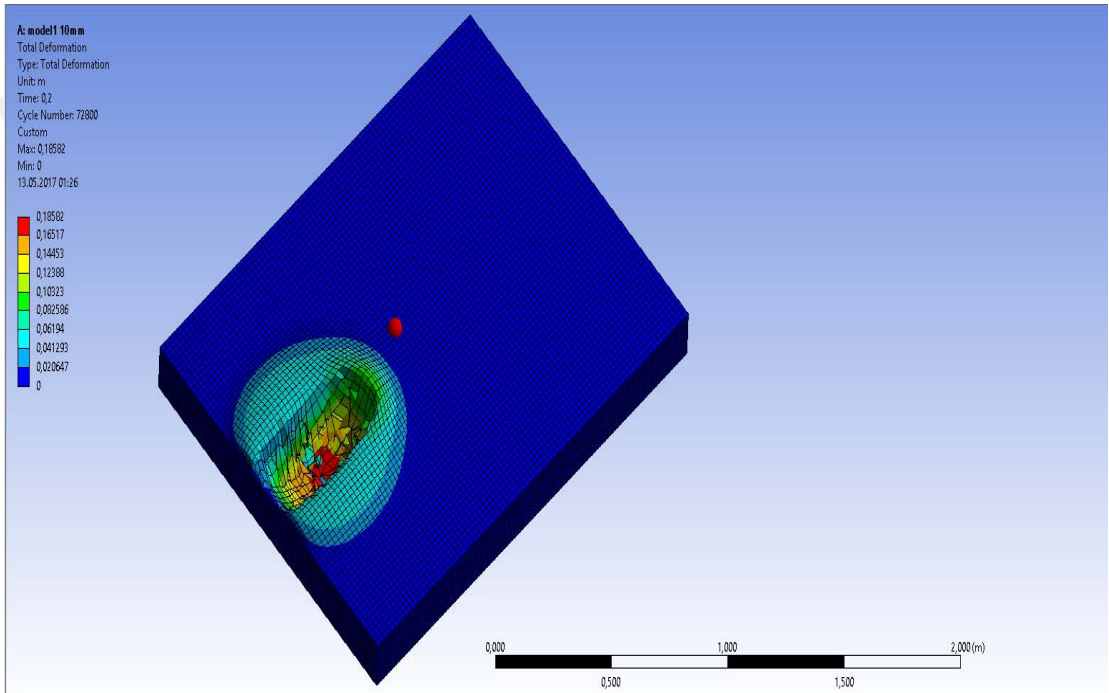


Şekil 4.36. Model 1-5 mm dişli paletin kardaki maksimum gerilme değerleri

4.2.3.2. Model 1-10 mm dişli palet

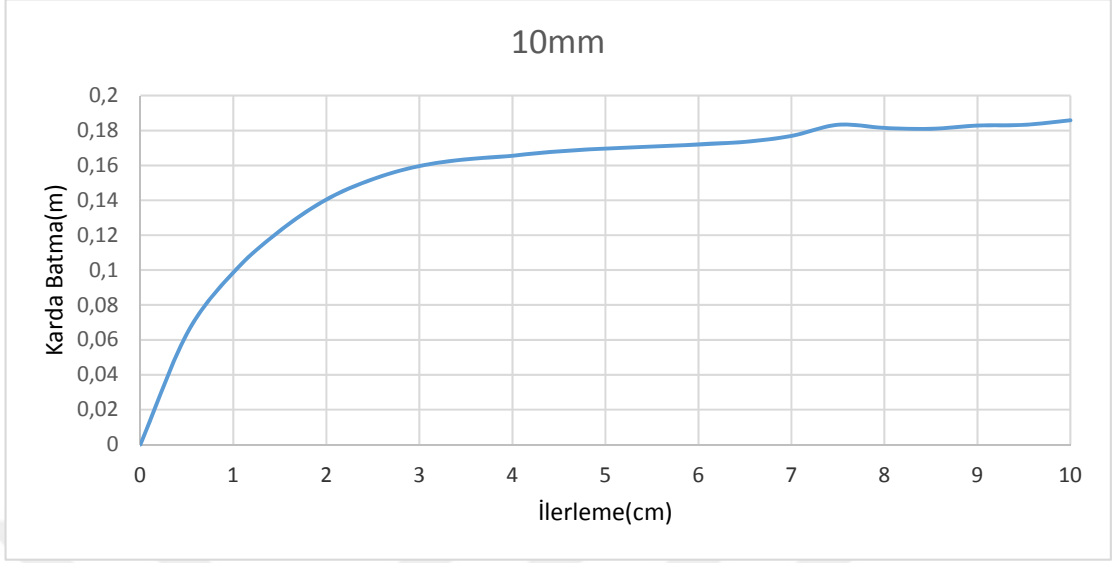
4.2.3.2.1. Karda batma

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 1-10 mm dişli paletin 4500 N düşey yük altında kar üzerinde batması Şekil 4.37’de görülmektedir. Düşey yük altında Model 1-10 mm dişli paletin 0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda, maksimum batma 18.58 cm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.37. Model 1-10 mm dişli paletin karda batma değerleri

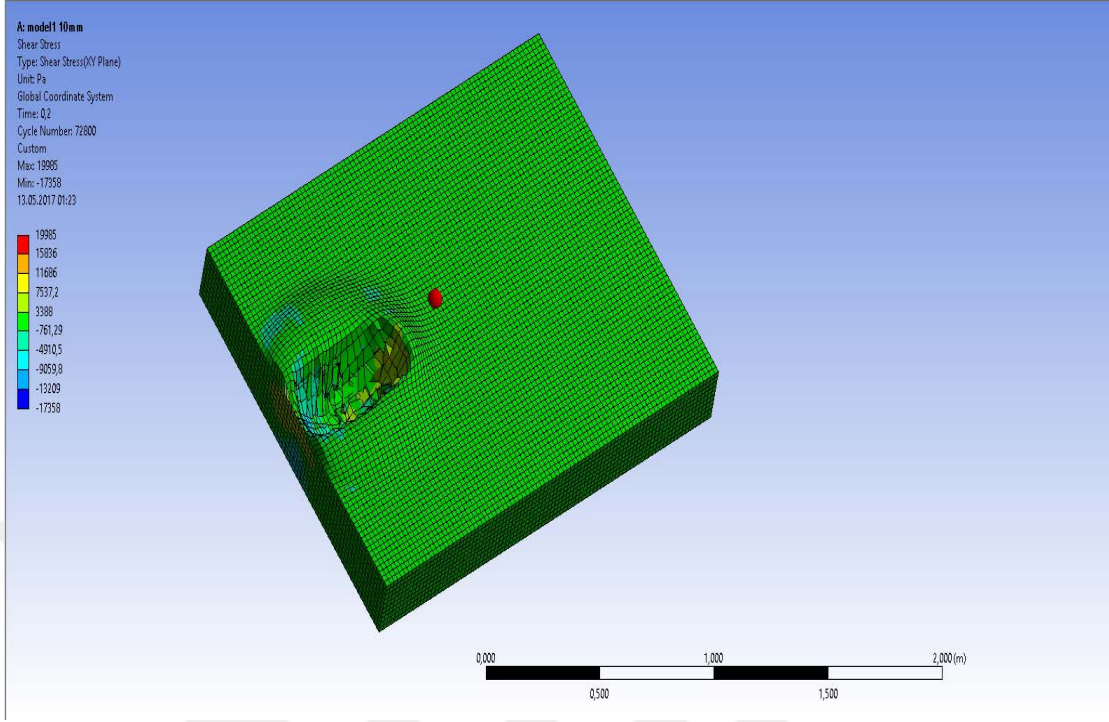
Şekil 4.38’de görüldüğü gibi kar üzerine bırakılan palet, 2 santimetre ilerledikten sonra sabit olarak 18-19 cm derinlikleri arasında hareket etmektedir.



Şekil 4.38. Model 1-10 mm dişli paletin karda batma değerleri

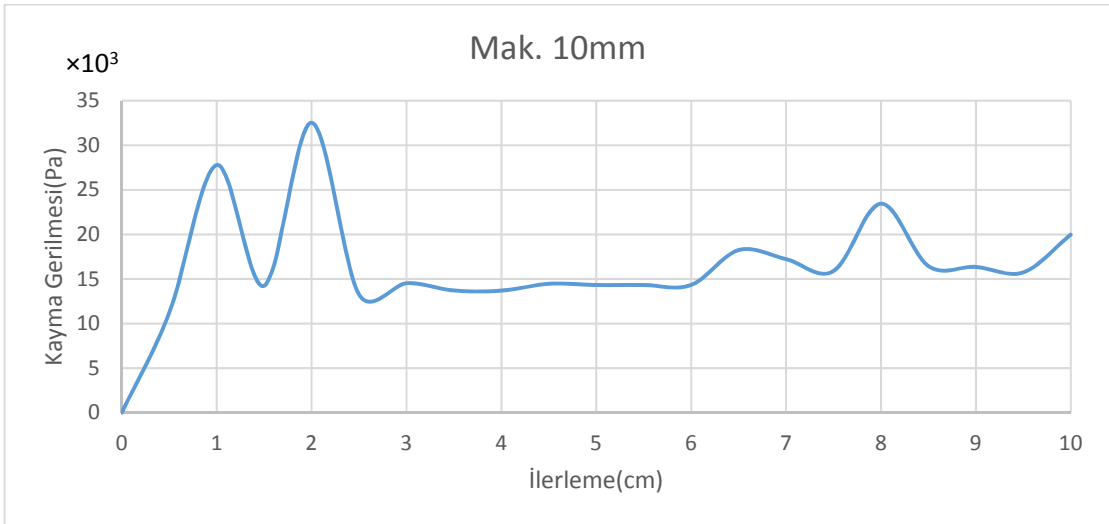
4.2.3.2.2. Karda oluşan kayma gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 1-10 mm dişli paletin kardaki kayma gerilmesi Şekil 4.39'da görülmektedir. 0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda ve $F=4500$ N düşey yük altında Model 1-10 mm dişli paletin maksimum kardaki kayma gerilmesi 19985 Pa, minimum -17358 Pa olarak belirlenmiştir.

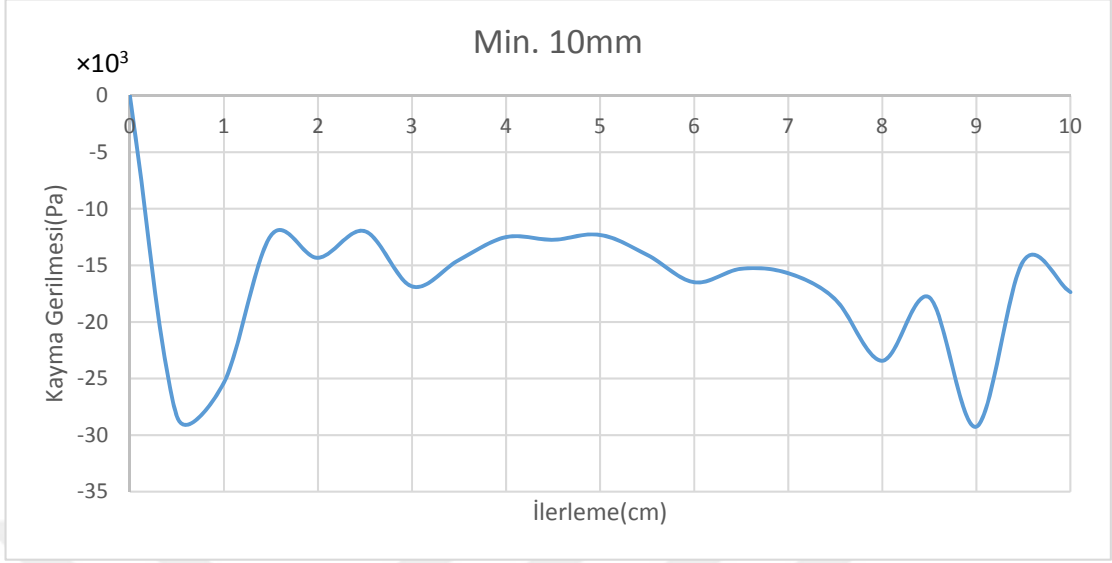


Şekil 4.39. Model 1-10 mm dişli paletin kardaki kayma gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 1-10 mm dişli paletin minimum ve maksimum kardaki kayma gerilmesi değerleri Şekil 4.40-41’de görülmektedir.



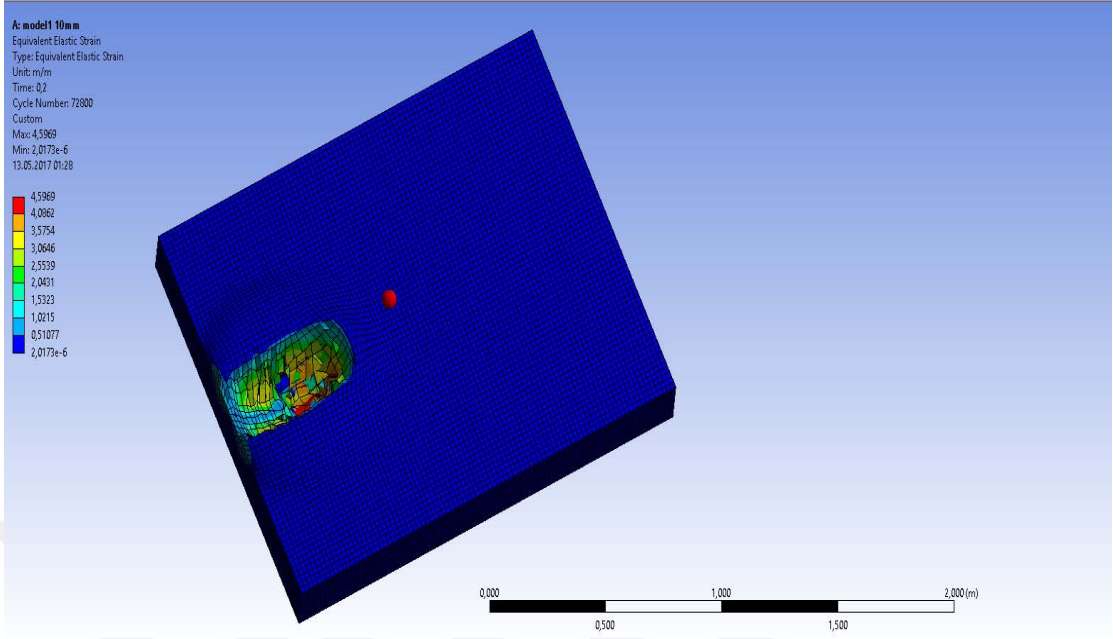
Şekil 4.40. Model 1-10 mm dişli paletin maksimum kardaki kayma gerilmesi değerleri



Şekil 4.41. Model 1-10 mm dişli paletin kardaki minimum kayma gerilmesi değerleri

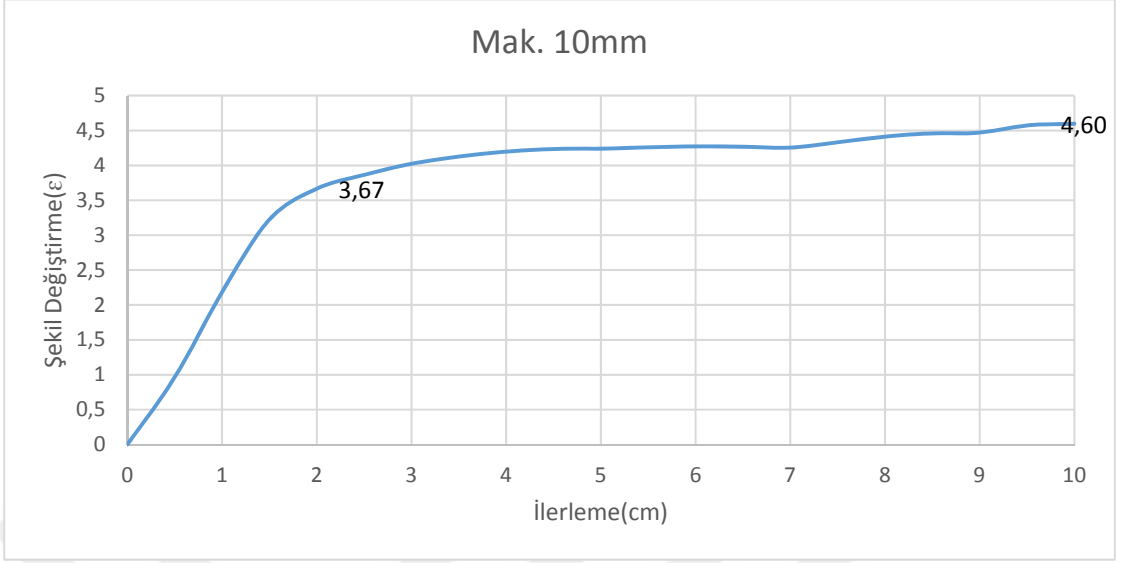
4.2.3.2.3. Karda oluşan şekil değıştirmesi

0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda ve $F=4500$ N düşey yük altında Model 1-10 mm dişli paletin kardaki maksimum şekil değıştirmesi 4.5969ϵ , minimum $2.0173e-6 \epsilon$ olarak belirlenmiştir (Şekil 4.42).



Şekil 4.42. Model 1-10 mm dişli paletin kardaki şekil değişimi

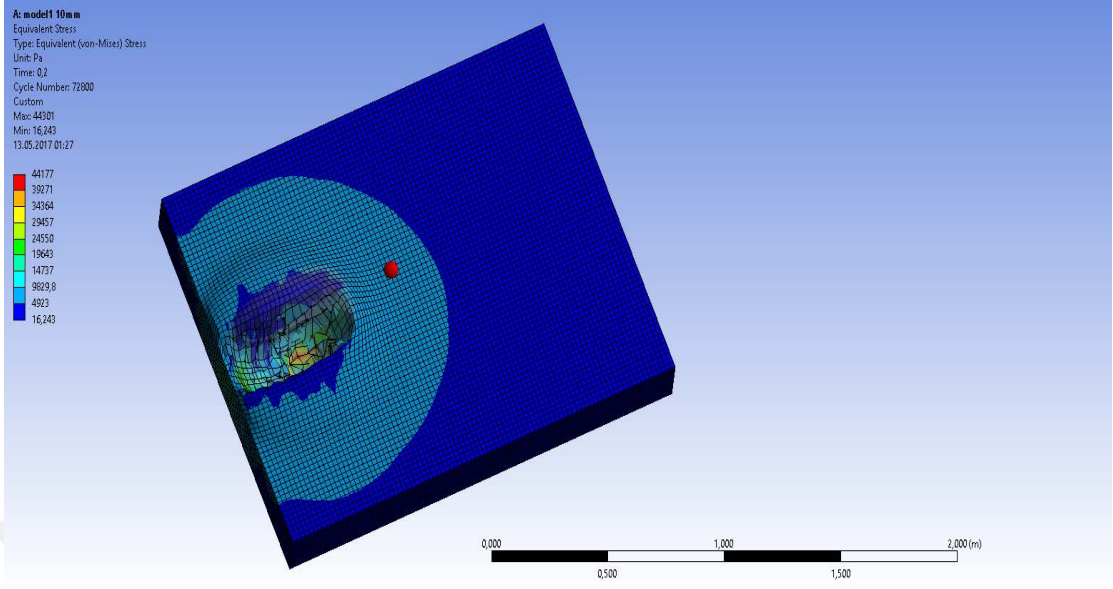
Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 1-10 mm dişli paletin maksimum kardaki şekil değişimi değerleri Şekil 4.43'te görülmektedir. Kar üzerine bırakılan Model 1-10 mm dişli paletin ilerleme-şekil değişim eğrisi incelendiğinde, 3.67ϵ değerine kadar doğrusal ve şiddetli değişim gözlemlenirken, 3.67ϵ sonrası ise daha az ve düzgün bir değişim gerçekleşmiştir.



Şekil 4.43. Model 1-10 mm dişli paletin kardaki maksimum şekil değişirgesi değerleri

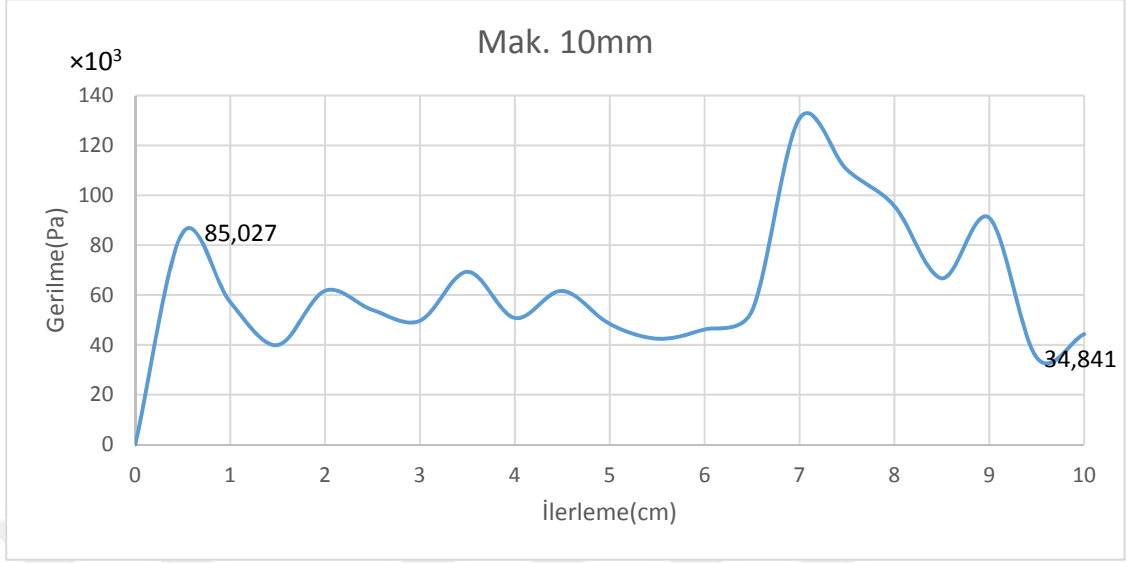
4.2.3.2.4. Karda oluşan gerilme

0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda ve $F=4500$ N düşey yük altında Model 1-10 mm dişli paletin maksimum kardaki gerilmesi 44177 Pa, minimum 16.243 Pa olarak belirlenmiştir (Şekil 4.44).



Şekil 4.44. Model 1-10 mm dişli paletin kardaki gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 1-10 mm dişli paletin maksimum kar gerilme değerleri Şekil 4.45'te görülmektedir. Şekil 4.45'te görüldüğü gibi kar üzerine bırakılan Model 1-10 mm dişli palet, 0-85027 Pa noktaları arası doğrusal değişim gerçekleşmiştir. Sonrası ise kurlsız değişim gerçekleşmiştir.

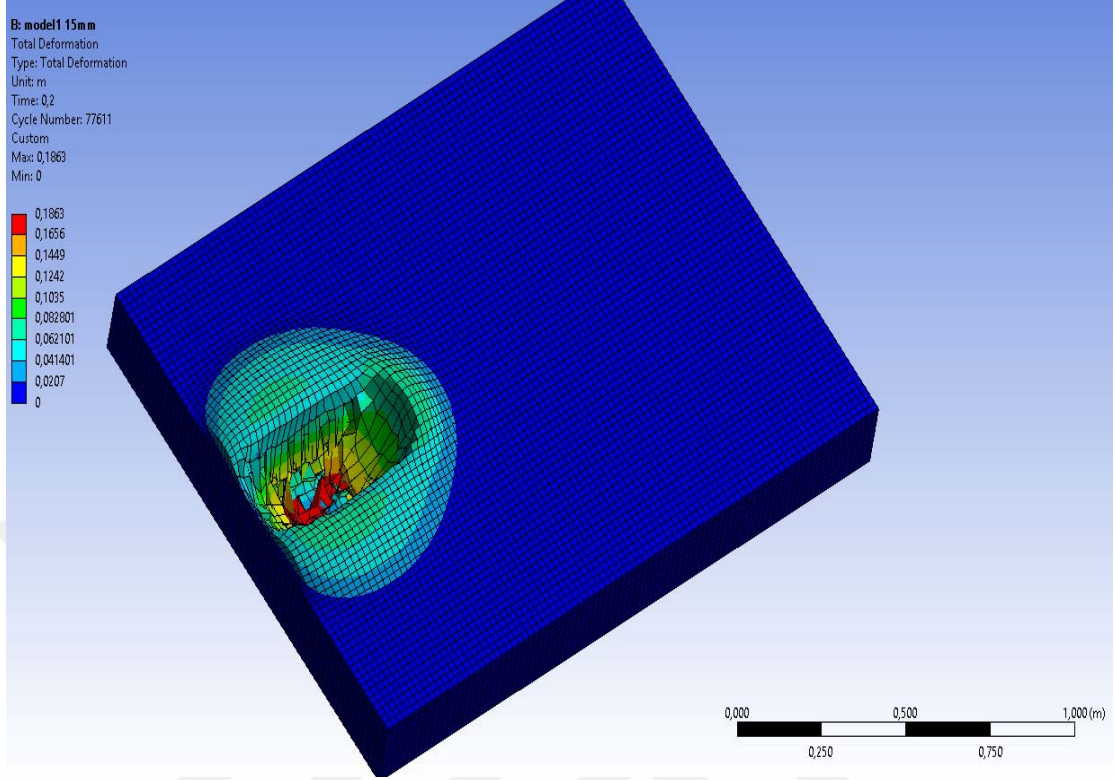


Şekil 4.45. Model 1-10 mm dişli paletin kardaki maksimum gerilme değerleri

4.2.3.3. Model 1-15 mm dişli palet

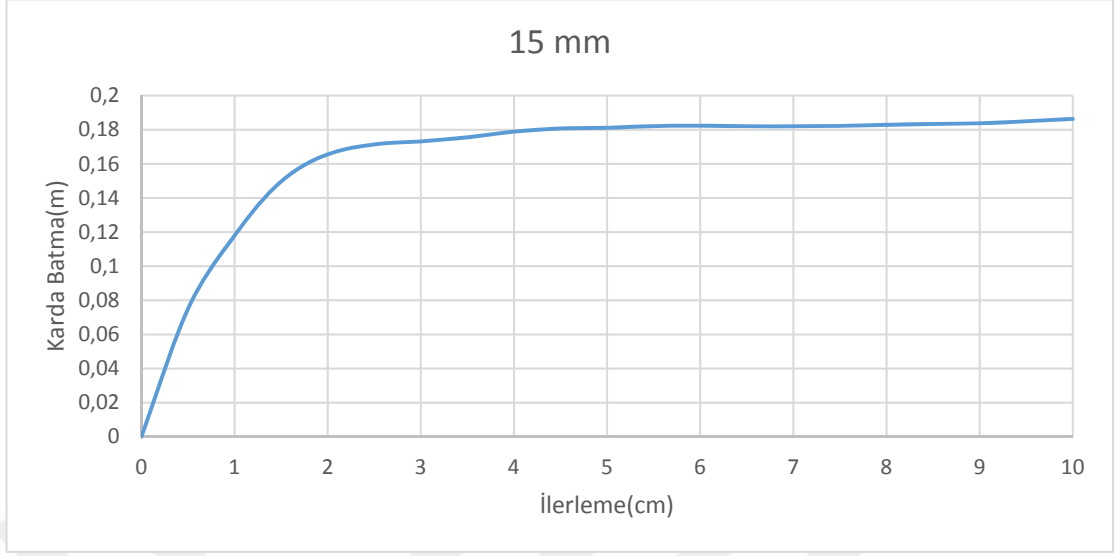
4.2.3.3.1. Karda batma

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 1-15 mm dişli paletin 4500 N düşey yük altında kar üzerinde batması Şekil 4.46'da görülmektedir. Düşey yük altında Model 1-15 mm dişli paletin 0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda, maksimum batma 18.63 cm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.46. Model 1-15 mm dişli paletin karda batma değerleri

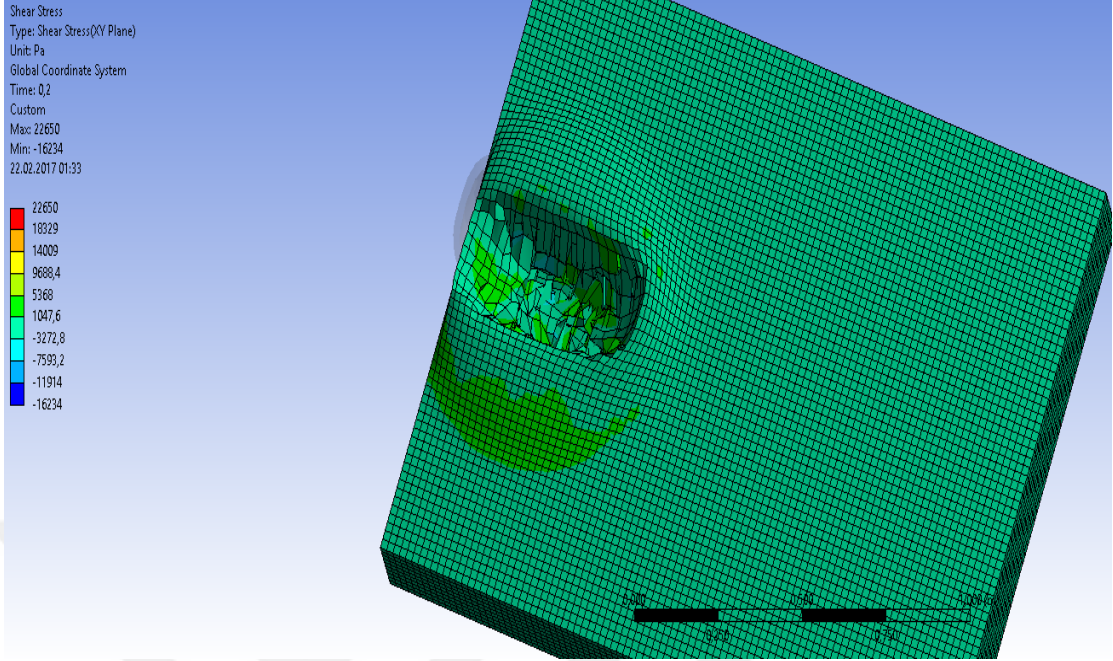
Şekil 4.47’de görüldüğü gibi kar üzerine bırakılan palet, 4 santimetre ilerledikten sonra sabit olarak 18-19 cm derinlikleri arasında hareket etmektedir.



Şekil 4.47. Model 1-15 mm dişli paletin karda batma değerleri

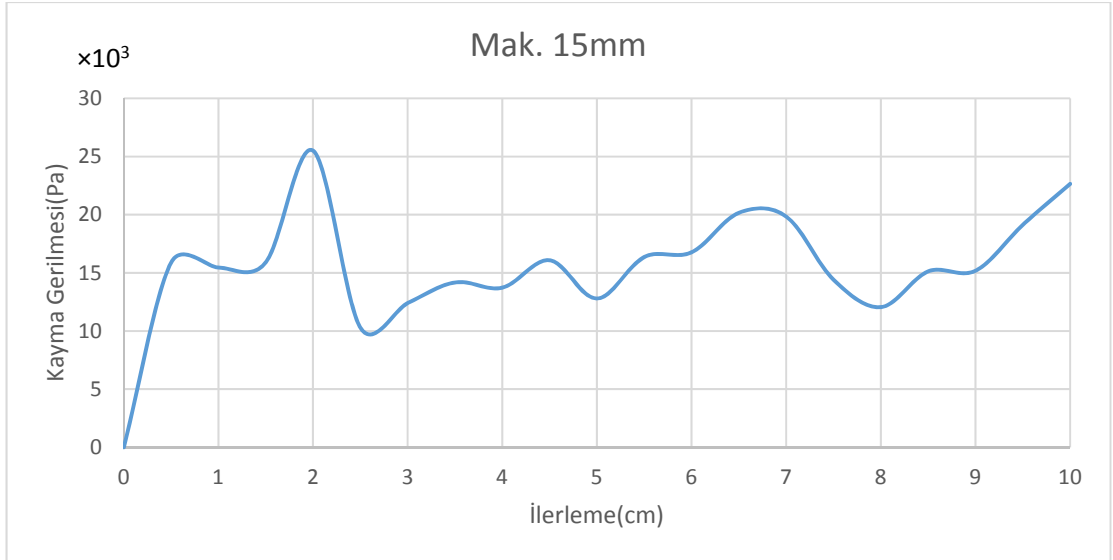
4.2.3.3.2. Karda oluşan kayma gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 1-15 mm dişli paletin kar kayma gerilmesi Şekil 4.48'da görülmektedir. 0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda ve $F=4500$ N düşey yük altında Model 1-15 mm dişli paletin maksimum kardaki kayma gerilmesi 22650 Pa, minimum -16234 Pa olarak belirlenmiştir.

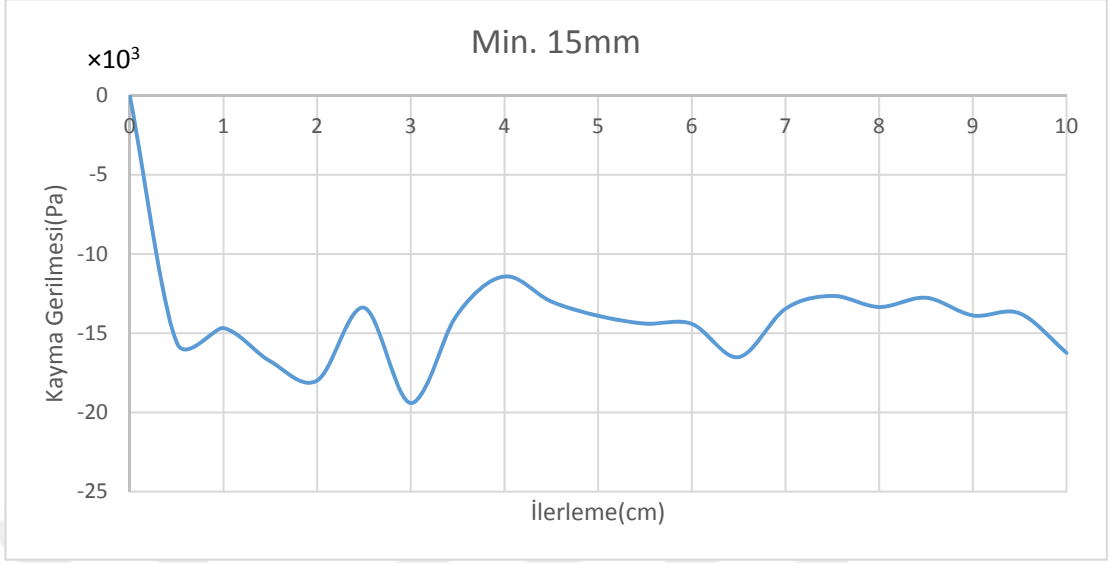


Şekil 4.48. Model 1-15 mm dişli paletin karda kayma gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 1-15 mm dişli paletin minimum ve maksimum kardaki kayma gerilmesi değerleri Şekil 4.50-51’de görülmektedir.



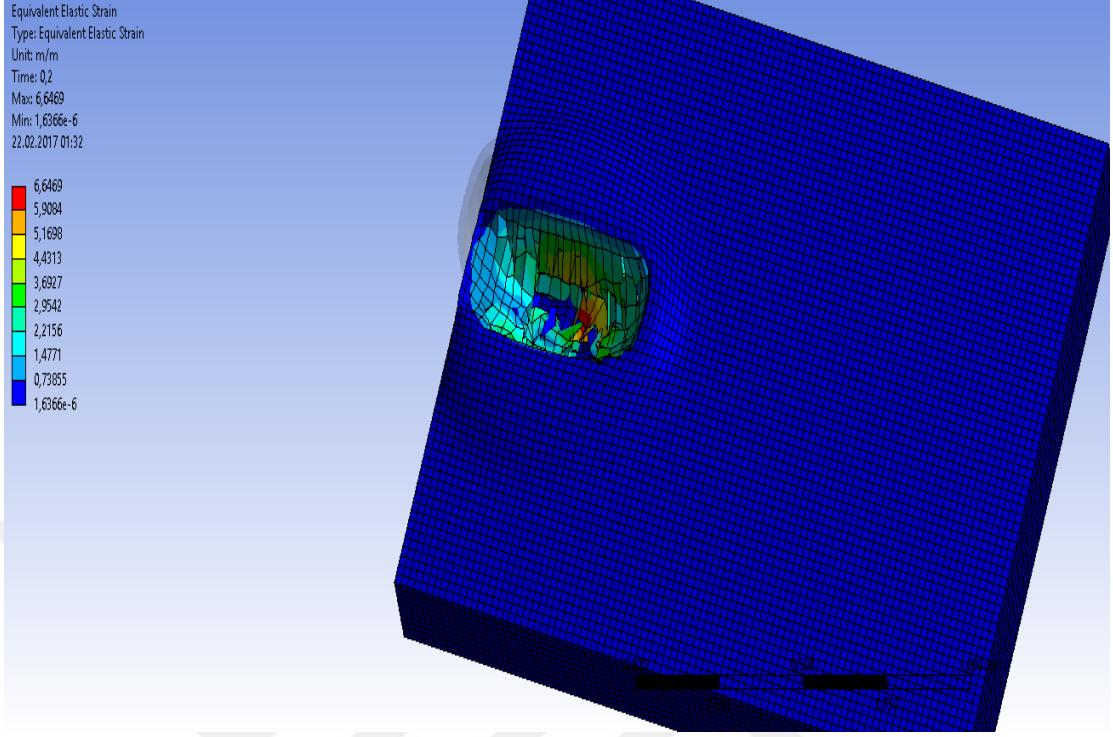
Şekil 4.49. Model 1-15 mm dişli paletin maksimum karda kayma gerilmesi değerleri



Şekil 4.50. Model 1-15 mm dişli paletin minimum karda kayma gerilmesi değerleri

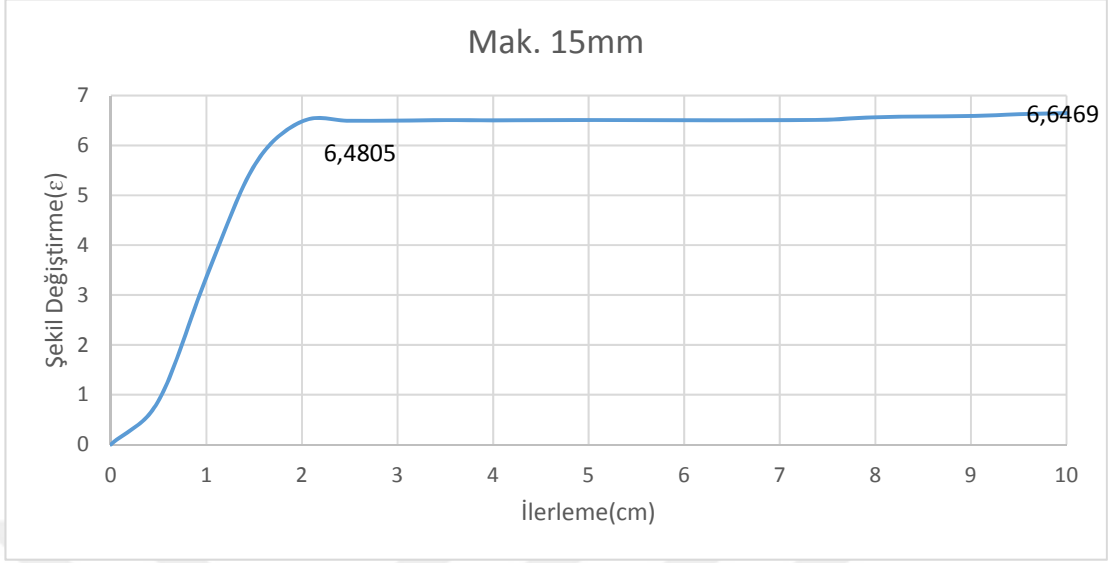
4.2.3.3.3. Karda oluşan şekil değiştirmesi

0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda ve $F=4500$ N dűsey yűk altında Model 1-15 mm dişli paletin maksimum kardakř şekil deęiřtirmesi 6.6469ϵ , minimum $1.6366e-6 \epsilon$ olarak belirlenmiřtir (Şekil 4.51).



Şekil 4.51. Model 1-15 mm dişli paletin karda şekil değişimi

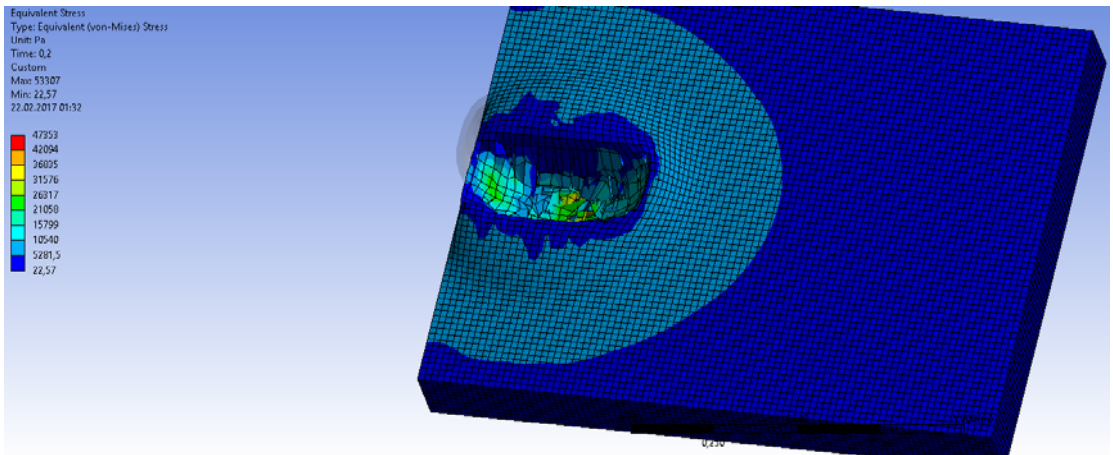
Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 1-15 mm dişli paletin maksimum kardaki şekil değişimi değerleri Şekil 4.52’de görülmektedir. Kar üzerine bırakılan Model 1-15 mm dişli paletin ilerleme-şekil değişim eğrisi incelendiğinde, 6.4805 ϵ değerine kadar doğrusal ve şiddetli değişim gözlemlenirken, 6.4805 ϵ sonrası ise daha az ve düzgün bir değişim gerçekleşmiştir.



Şekil 4.52. Model 1-15 mm dişli paletin maksimum karda şekil değişimi değerleri

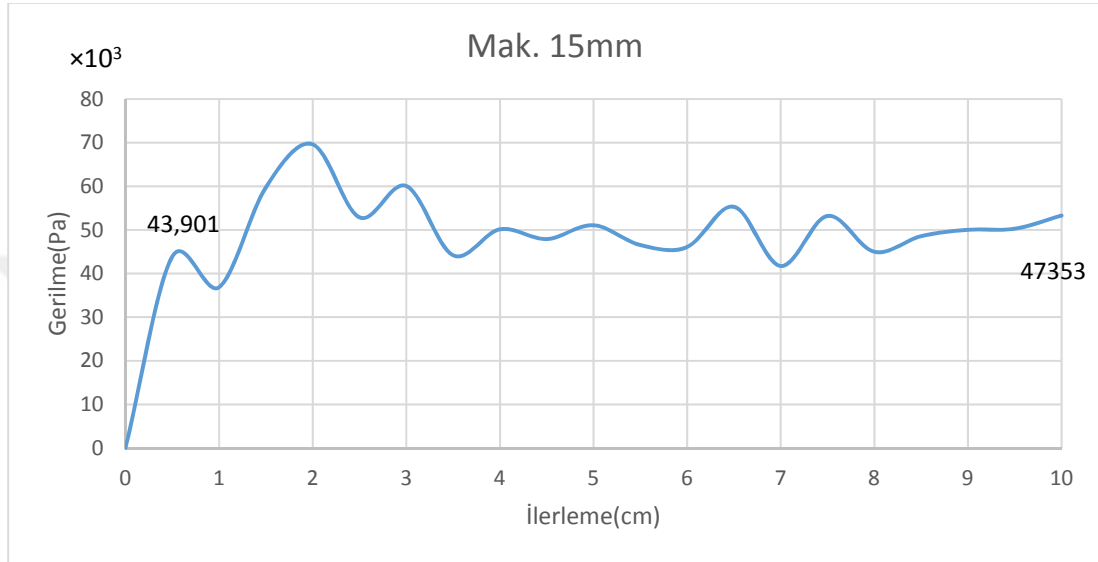
4.2.3.3.4. Karda oluşan gerilme

$F=4500$ N düşey yük altında Model 1-15 mm'lik dişli paletin 0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda karda oluşan gerilme maksimum 53307 Pa ve minimum 22.57 Pa olarak belirlenmiştir (Şekil 4.53).



Şekil 4.53. Model 1-15 mm dişli paletin karda gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 1-15 mm'lik dişli paletin maksimum kardaki gerilme değerleri Şekil 4.54'te görülmektedir. Şekil 4.54'te görüldüğü gibi kar üzerine bırakılan Model 1-15 mm'lik dişli palet, 0-43901 Pa noktaları arasında doğrusal değişim gerçekleşmiştir. 43901 Pa sonrası ise kuruksız değışim gerçekleşmiştir.



Şekil 4.54. Model 1-15 mm dişli paletin kardaki maksimum gerilme değerleri

4.2.4. Kar paleti Model 2 için palet-kar gerilme ve şekil değıştirmeleri

Sonlu elemanlar ile tasarlanan kar paleti Model 2' ye ANSYS programı yardımı ile verilen parametreler aşağıdaki gibidir:

Tüm modeller için

F : 4500 N

P : 200 kPa

V : 0.5 m/s

ω : 1 rad/s

5 mm için

Düğüm sayısı : 134709

Eleman sayısı : 348824

10 mm için

Düğüm sayısı : 134999

Eleman sayısı : 345227

15 mm için

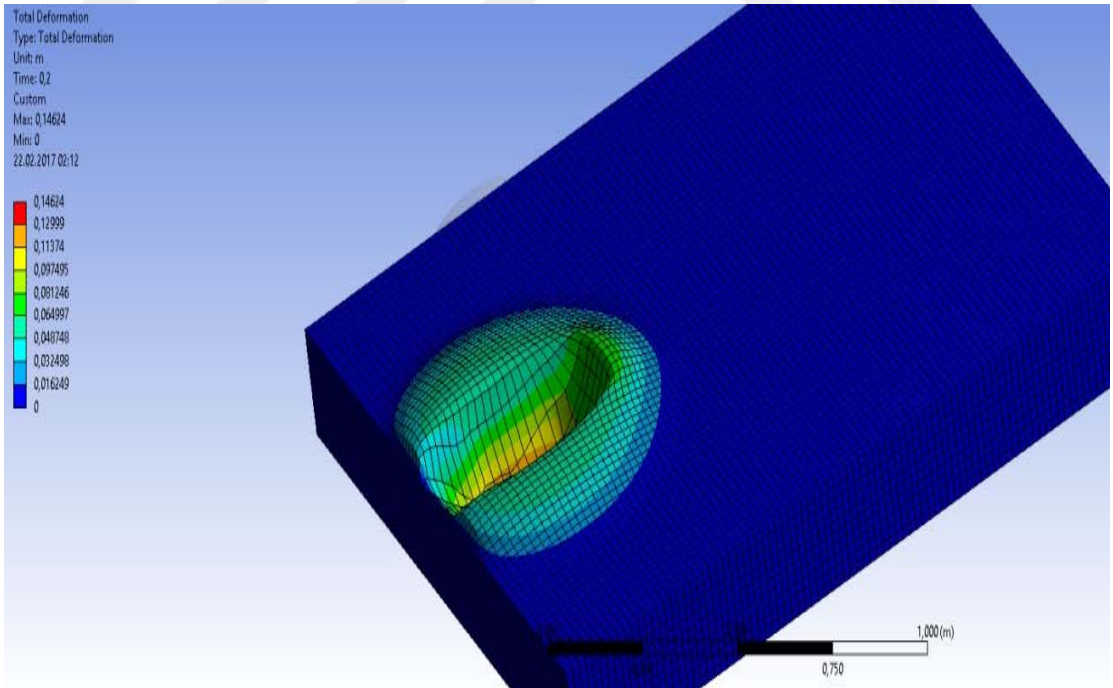
Düğüm sayısı : 135739

Eleman sayısı : 347937

4.2.4.1. Model 2-5 mm dişli palet

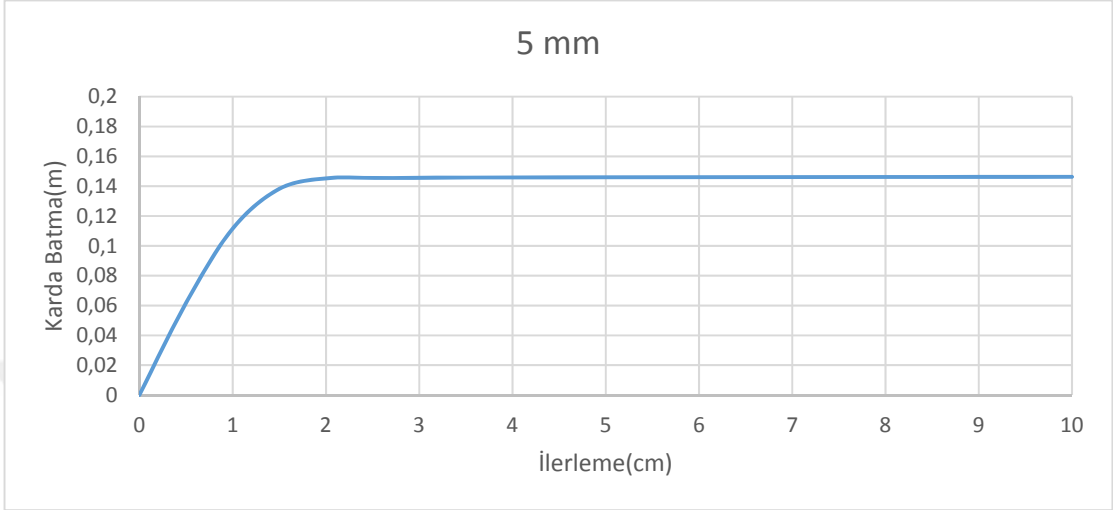
4.2.4.1.1. Karda batma

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 2-5 mm'lik dişli paletin 4500 N düşey yük altında kar üzerinde batması Şekil 4.55'te görülmektedir. $F=4500$ N düşey yük altında Model 2-5 mm'lik dişli paletin 0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda maksimum batma 14.62 cm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.55. Model 2-5 mm dişli paletin karda batma değerleri

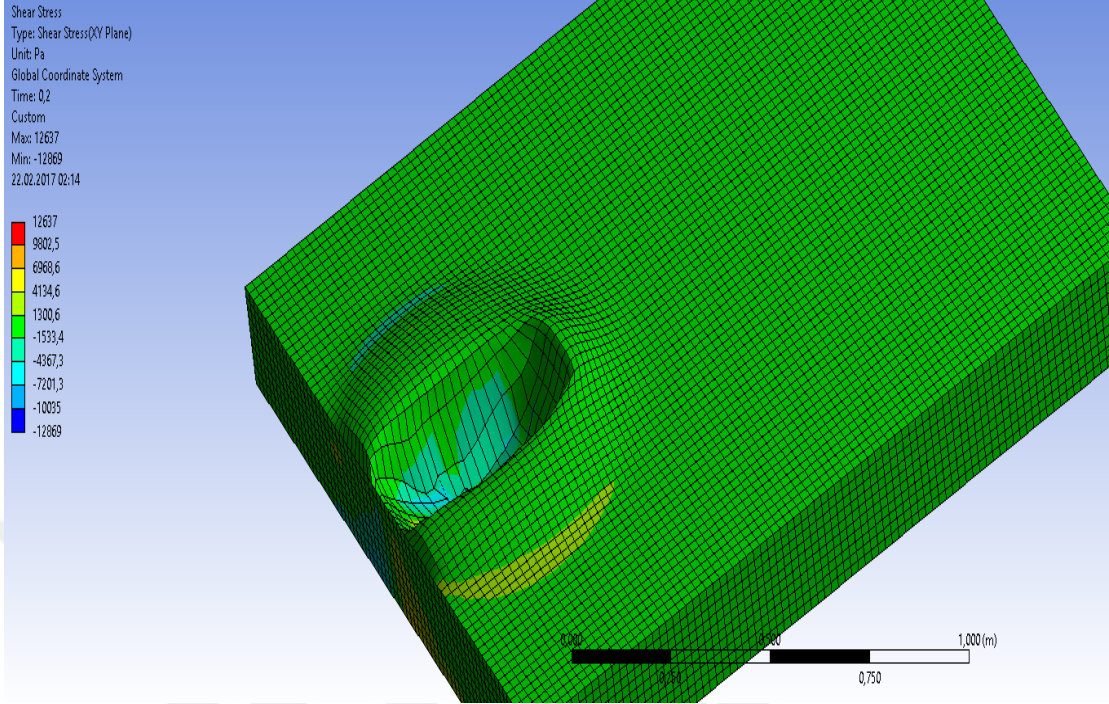
Şekil 4.56’da görüldüğü gibi kar üzerine bırakılan palet, 2 santimetre ilerledikten sonra sabit olarak 14-16 cm derinlikleri arasında hareket etmektedir.



Şekil 4.56. Model 2-5 mm dişli paletin karda batma değerleri

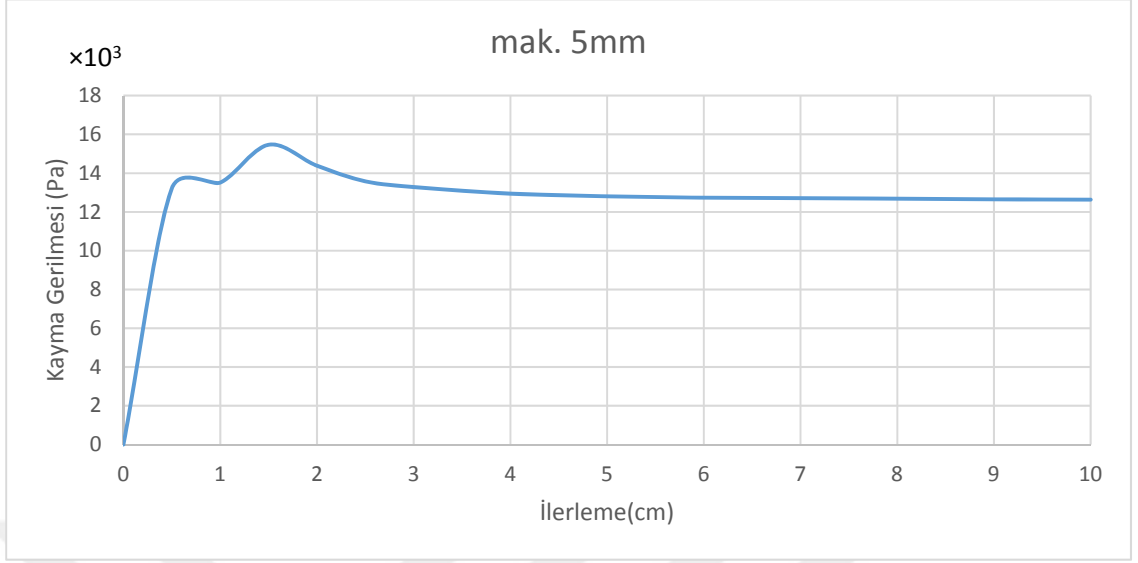
4.2.4.1.2. Karda oluşan kayma gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 2-5 mm’lik dişli paletin kardaki kayma gerilmesi Şekil 4.57’de görülmektedir. 0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda ve $F=4500$ N düşey yük altında Model 2-5 mm’lik dişli paletin maksimum kardaki kayma gerilmesi 12637 Pa ve minimum -12869 Pa olarak belirlenmiştir.

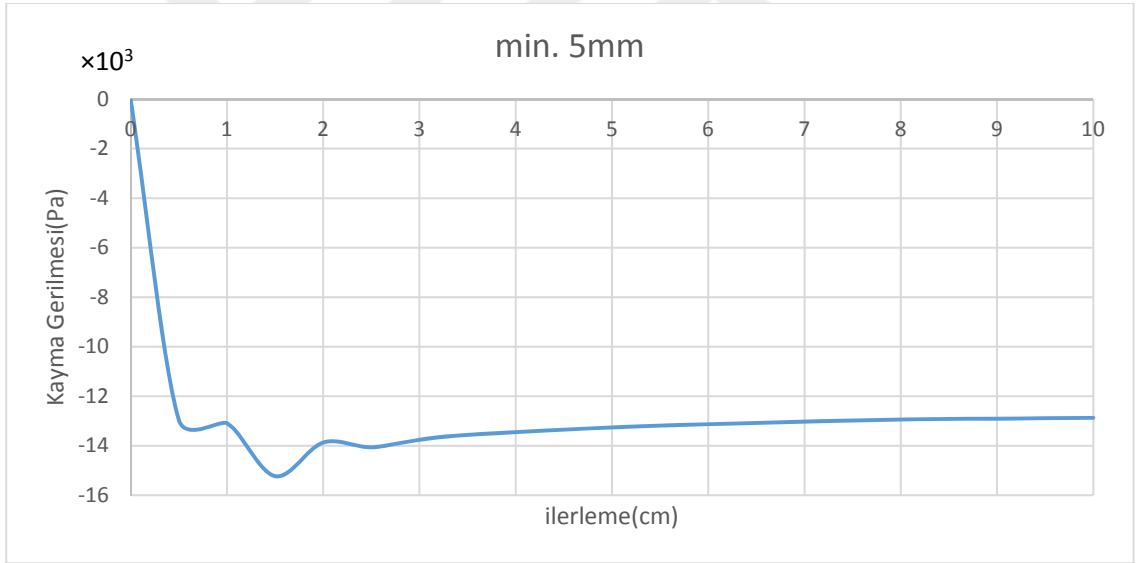


Şekil 4.57. Model 2-5 mm dişli paletin karda kayma gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 2-5 mm'lik dişli paletin minimum ve maksimum kardaki kayma gerilme değerleri Şekil 4.58-4.59'da görülmektedir.



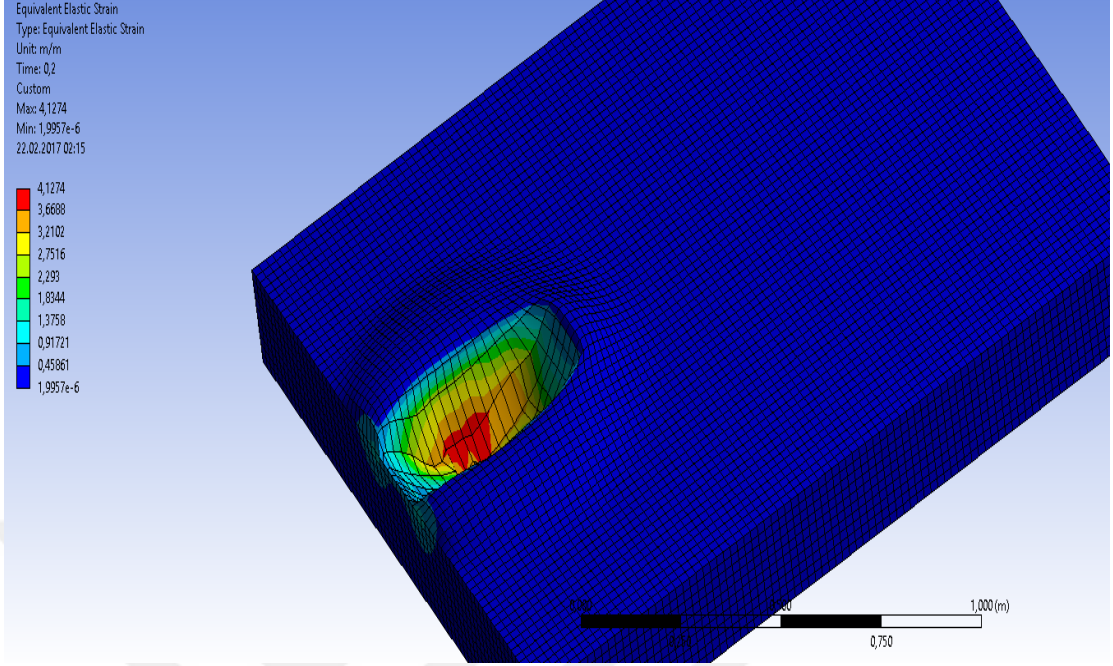
Şekil 4.58. Model 2-5 mm dişli paletin maksimum karda kayma gerilmesi değerleri



Şekil 4.59. Model 2-5 mm dişli paletin minimum karda kayma gerilmesi değerleri

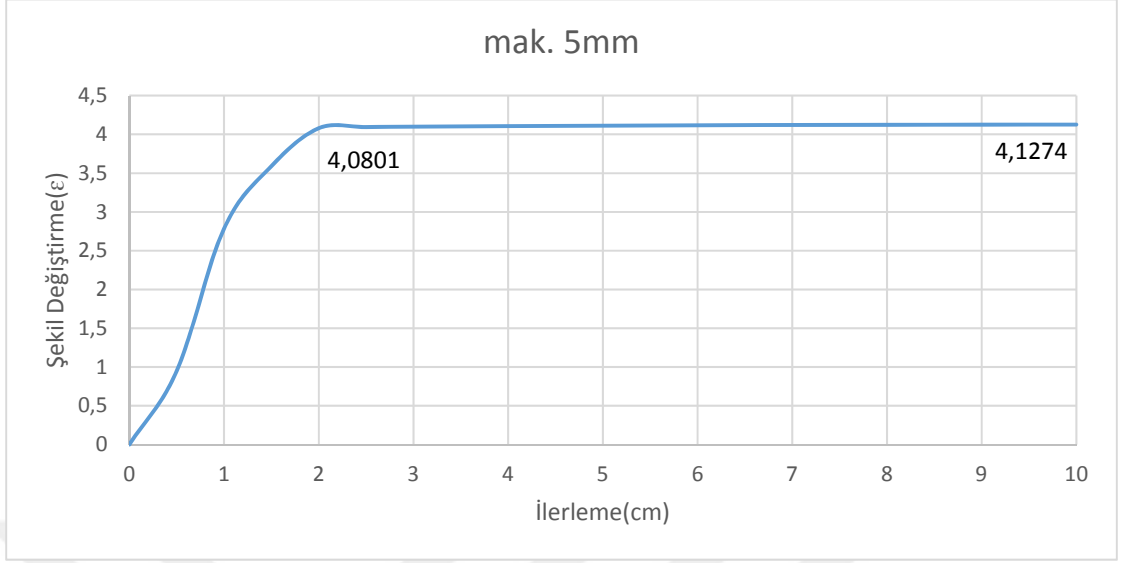
4.2.4.1.3. Karda oluşan şekil değişirmesi

0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda ve $F=4500$ N düşey yük altında Model 2-5 mm dişli paletin maksimum kar şekil değişirmesi 4.1274ϵ , minimum $1.9957e-6 \epsilon$ olarak belirlenmiştir (Şekil 4.60).



Şekil 4.60. Model 2-5 mm dişli paletin karda şekil değıştirmesi

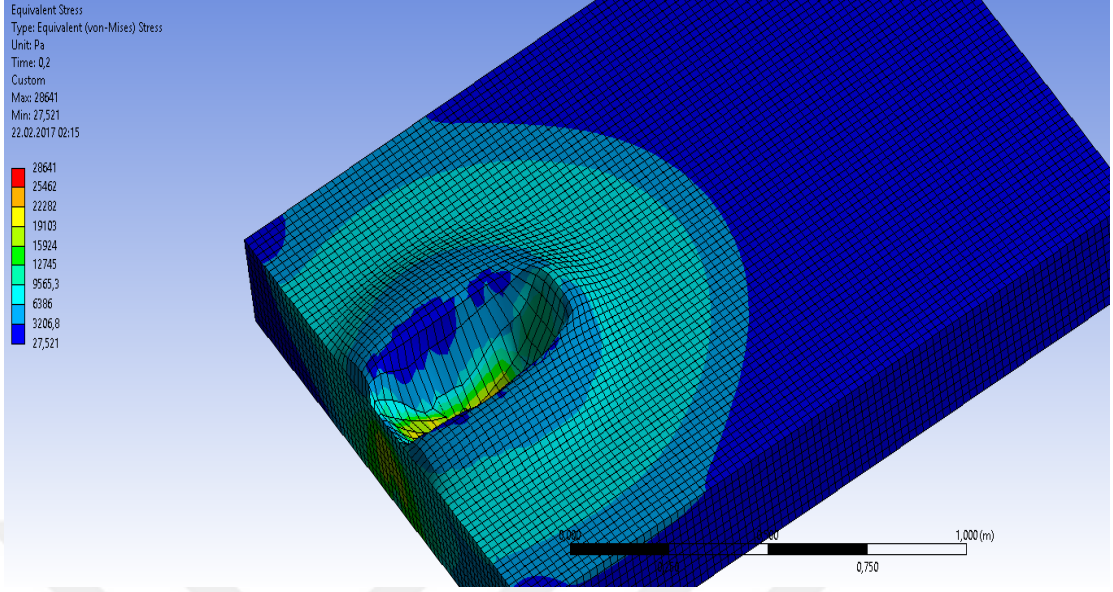
Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 2-5 mm dişli paletin maksimum kar şekil değıştirme değeri Şekil 4.61’de görülmektedir. Kar üzerine bırakılan Model 2-5 mm dişli paletin ilerleme-şekil değıştirme eğrisi incelendiğinde, 4.0801 ϵ değeri kadar doğrusal ve şiddetli değışim gözlemlenirken, 3.0801 ϵ sonrasında ise daha az ve düzgün bir değışim gerçekleşmiştir.



Şekil 4.61. Model 2-5 mm dişli paletin karda maksimum şekil değıştirmesi değeri

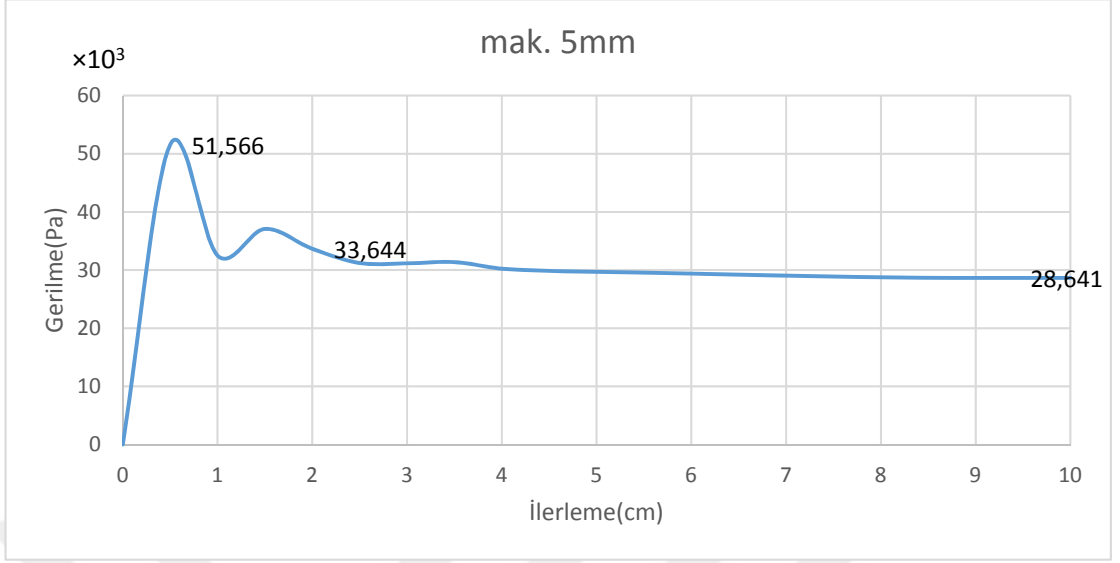
4.2.4.1.4. Karda oluşan gerilme

0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda ve $F=4500$ N dűşey yük altında Model 2-5 mm dişli paletin kar gerilmesi maksimum 28641 Pa ve minimum 27.521 Pa olarak belirlenmiştir (Şekil 4.62).



Şekil 4.62. Model 2-5 mm dişli paletin karda gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 2-5 mm dişli paletin maksimum gerilme değerleri Şekil 4.63'te görülmektedir. Şekil 4.63'te görüldüğü gibi kar üzerine bırakılan Model 2-5 mm dişli palet, 0-51566 Pa noktaları arasında doğrusal değişim gerçekleşmiştir. 51566-33644 Pa noktaları arası kurlsız değişim gerçekleşmiştir. 33644 Pa sonrasında ise yaklaşık olarak sabit devam etmiştir.

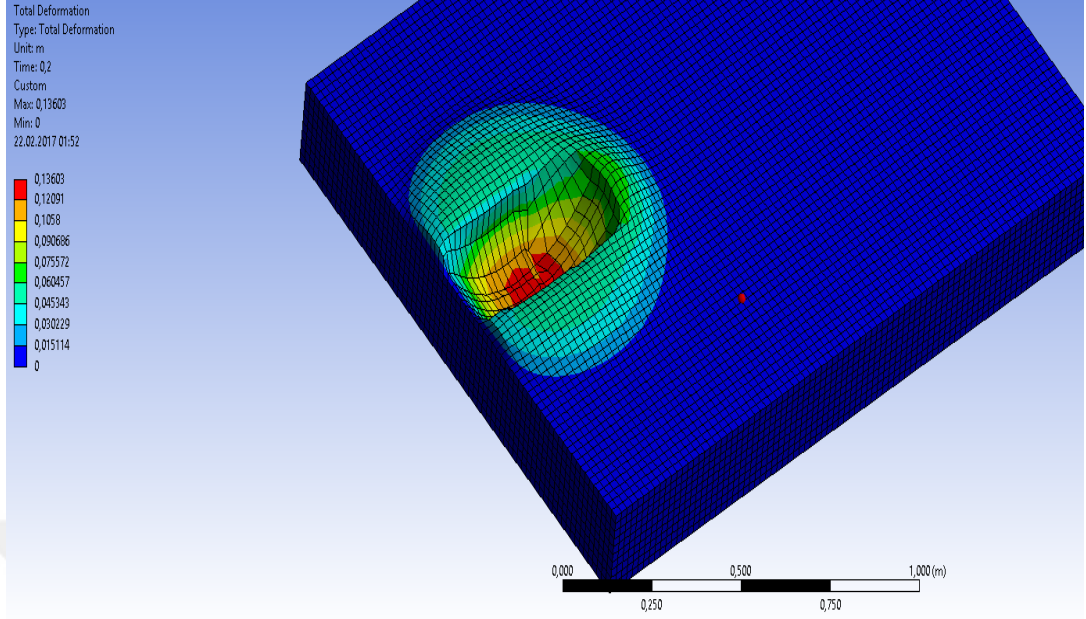


Şekil 4.63. Model 2-5 mm dişli paletin maksimum karda gerilme değerleri

4.2.4.2. Model 2-10 mm dişli palet

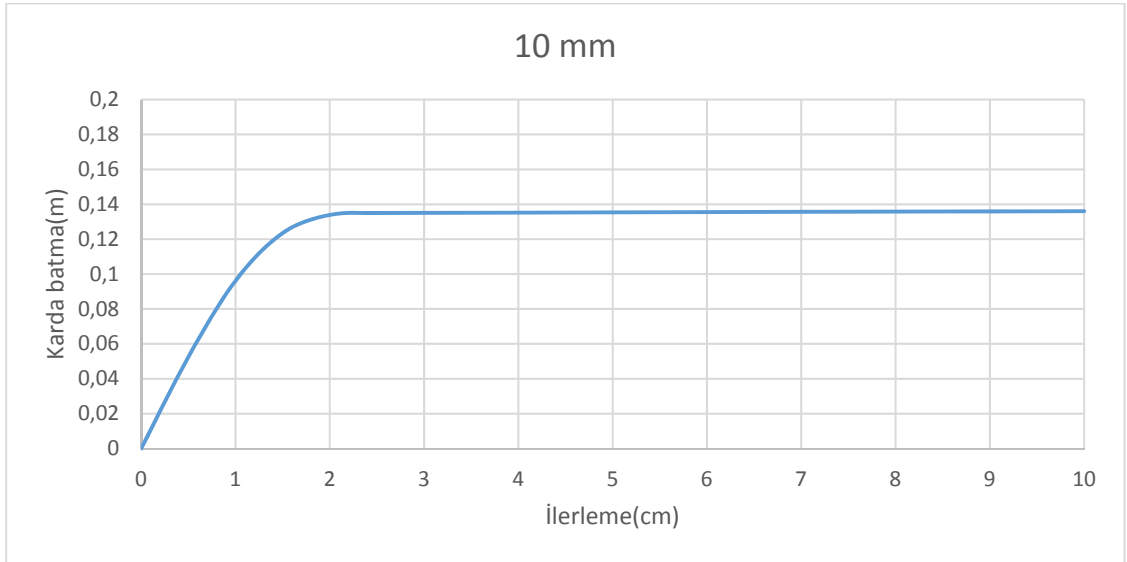
4.2.4.2.1. Karda batma

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 2-10 mm dişli paletin 4500 N düşey yük altında kar üzerinde batması Şekil 4.64'te görülmektedir. $F=4500$ N düşey yük altında Model 2-10 mm dişli paletin 0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda maksimum batma 13.6 cm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.64. Model 2-10 mm dişli paletin karda batma değerleri

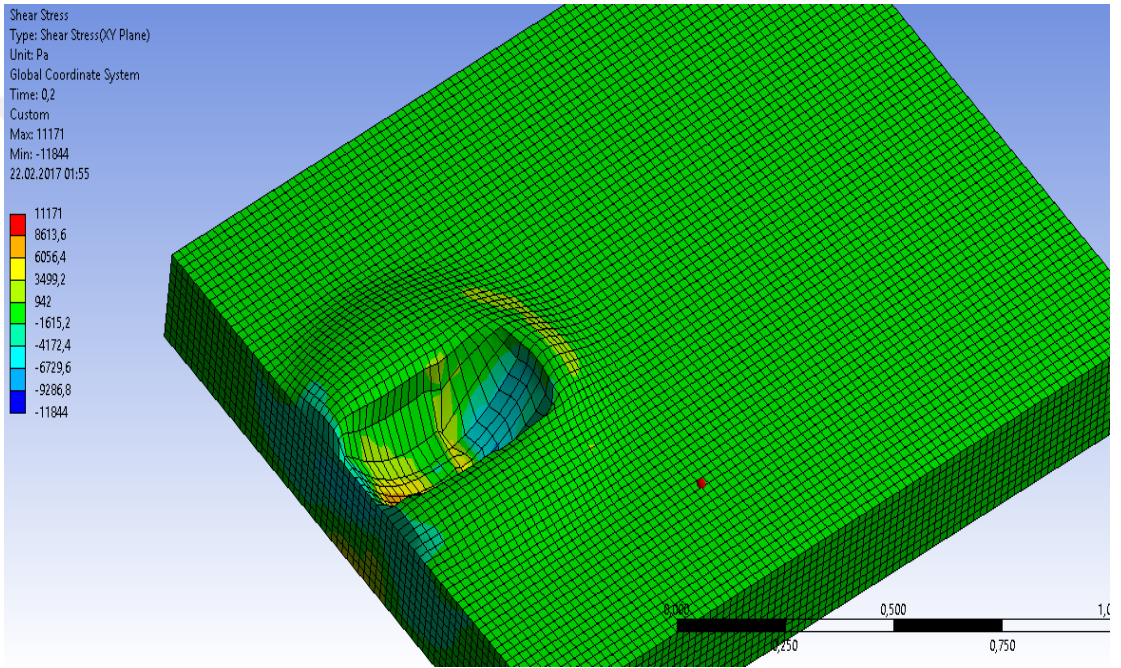
Şekil 4.65’de görüldüğü gibi kar üzerine bırakılan palet, 2 santimetre ilerledikten sonra sabit olarak 12-14 cm derinlikleri arasında hareket etmektedir.



Şekil 4.65. Model 2-10 mm dişli paletin karda batma değerleri

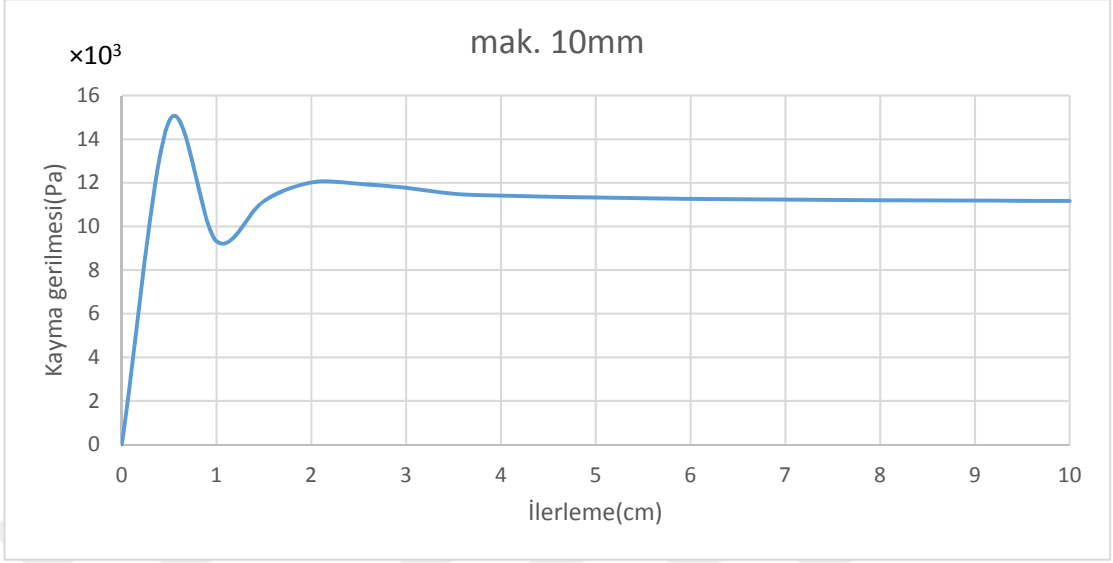
4.2.4.2.2. Karda oluşan kayma gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 2-10 mm dişli paletin kar kayma gerilmesi Şekil 4.66'da görülmektedir. $F=4500$ N düşey yük altında Model 2-10 mm dişli paletin 0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda kar kayma gerilmesi maksimum 11171Pa ve minimum -11844 Pa olarak belirlenmiştir.

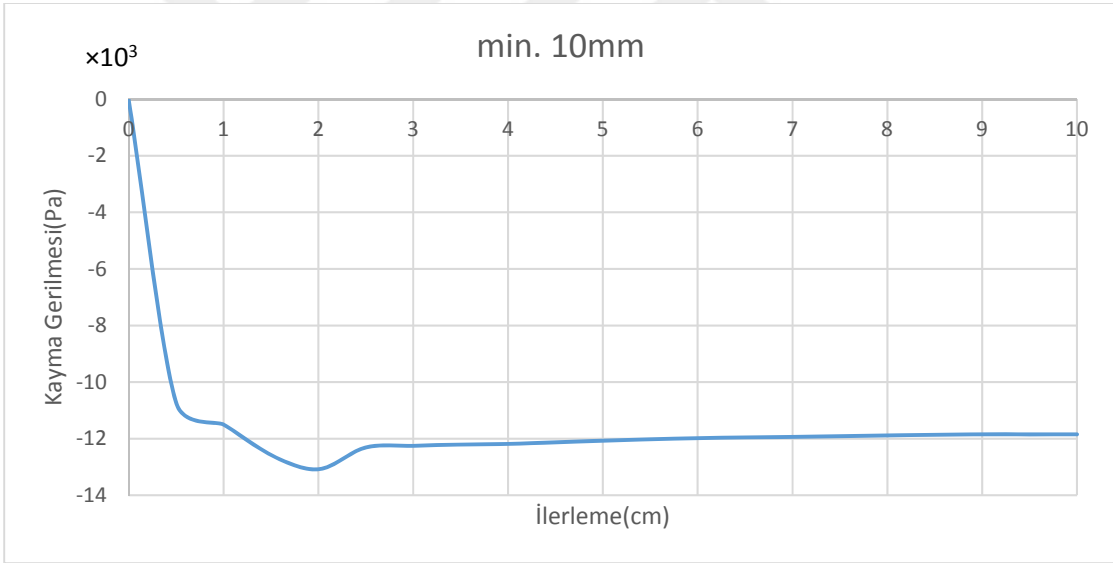


Şekil 4.66. Model 2-10 mm dişli paletin karda kayma gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 2-10 mm dişli paletin minimum ve maksimum kar kayma gerilmesi değerleri Şekil 4.67-68'de görülmektedir.



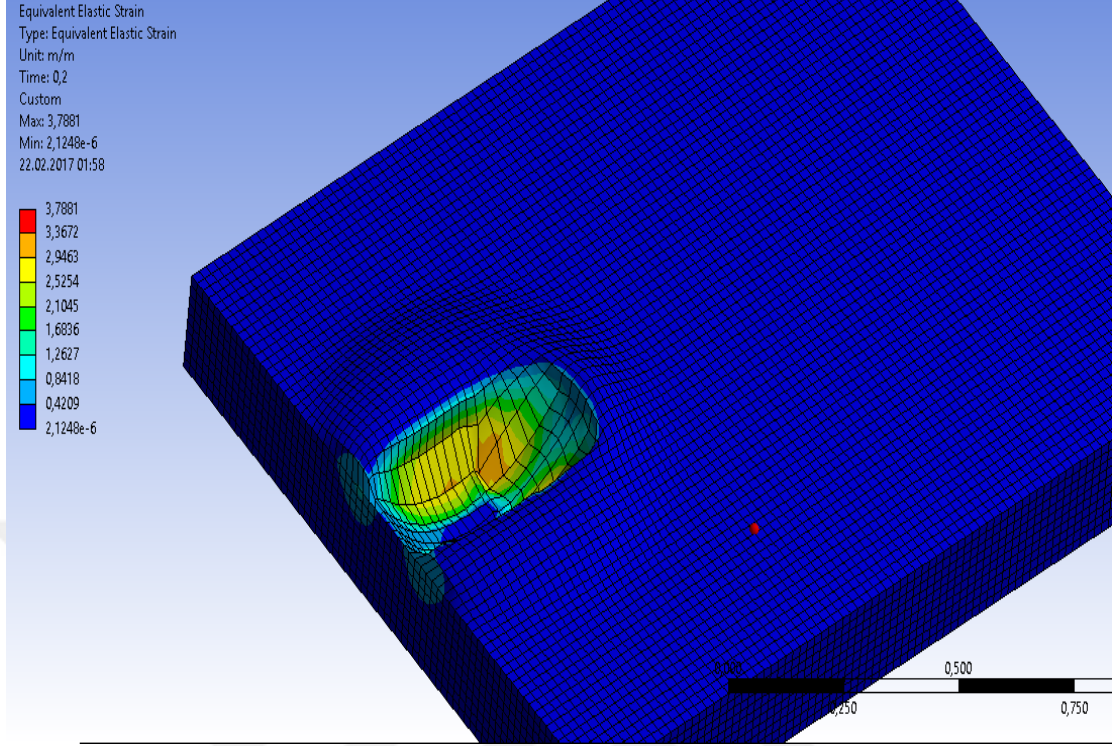
Şekil 4.67. Model 2-10 mm dişli paletin kardaki maksimum kayma gerilmesi değerleri



Şekil 4.68. Model 2-10 mm dişli paletin kardaki minimum kayma gerilmesi değerleri

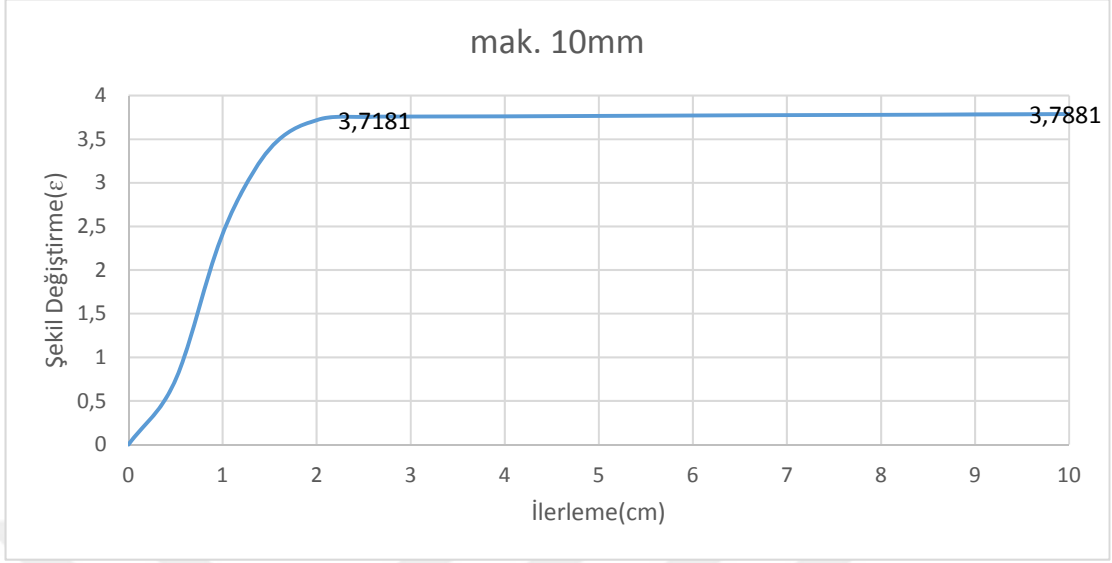
4.2.4.2.3. Karda oluşan şekil değişimi

0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda ve $F=4500$ N düşey yük altında Model 2-10mm dişli paletin kar şekil değişimi maksimum 3.7881ϵ , minimum $2.1247e-6 \epsilon$ olarak belirlenmiştir (Şekil 4.69).



Şekil 4.69. Model 2-10 mm dişli paletin karda şekil değiştirmesi

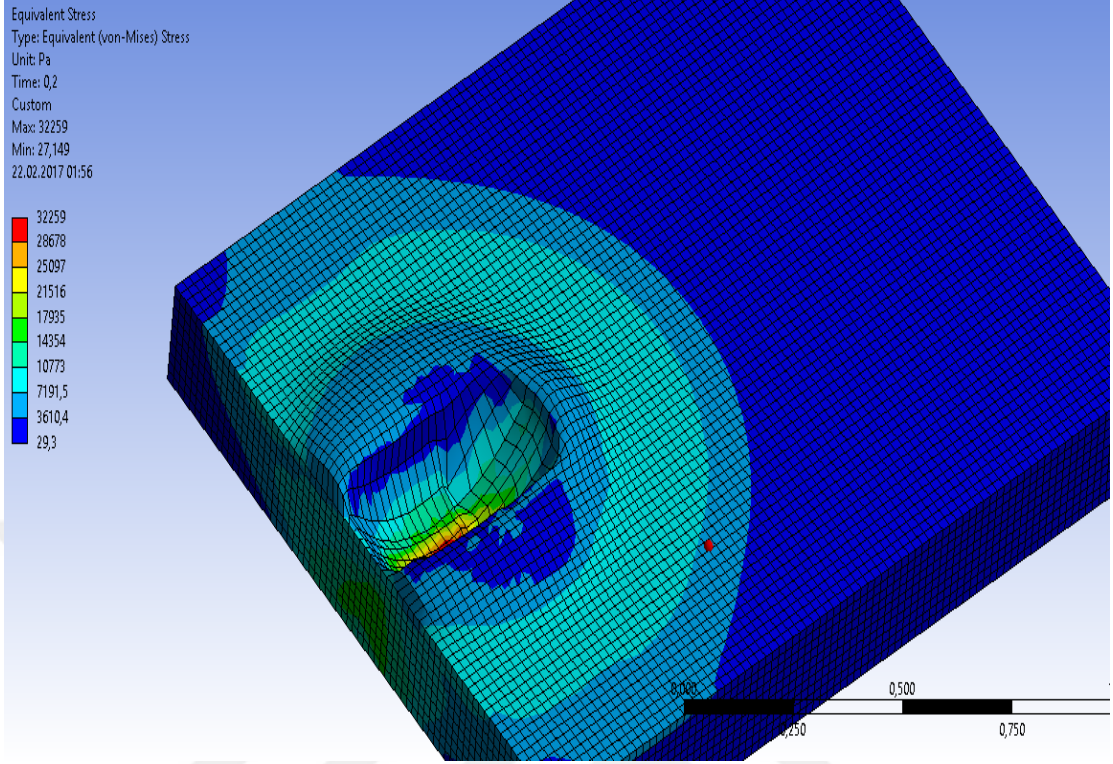
Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 2-10 mm dişli paletin maksimum kar şekil değiştirme değerleri Şekil 4.70’de görölmektedir. Kar üzerine bırakılan Model 2-10 mm dişli paletin ilerleme-şekil değiştirme eğrisi incelendiğinde; 3.7181 ϵ değerine kadar doğrusal ve şiddetli değişim gözlemlenirken, 3.7181 ϵ sonrası ise daha az ve düzgün bir değişim geręekleřmiřtir.



Şekil 4.70. Model 2-10 mm dişli paletin kardaki maksimum şekil değişirmesi değerleri

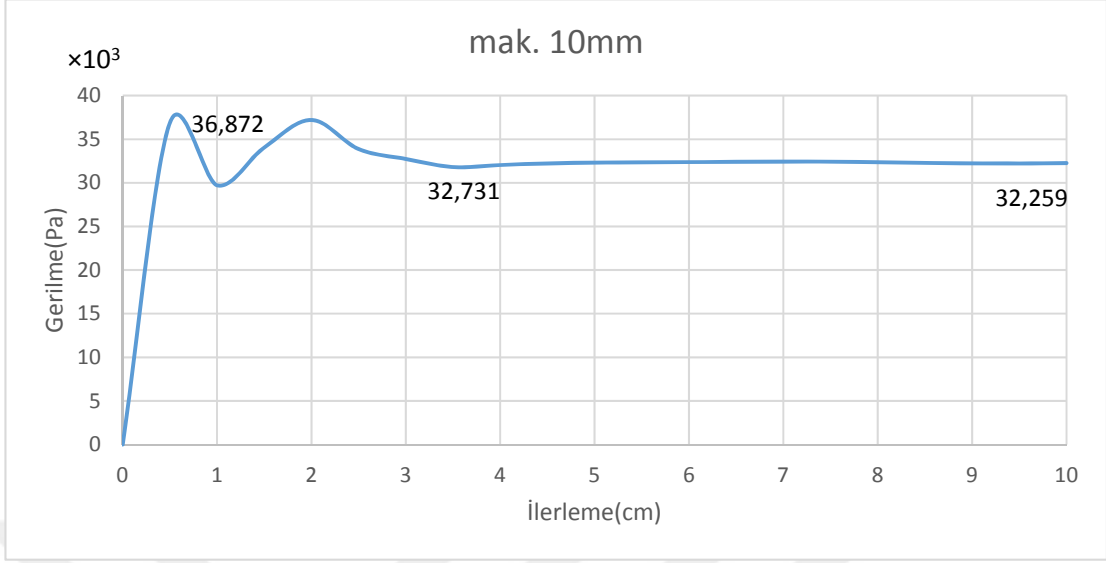
4.2.4.2.4. Karda oluşan gerilme

0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda ve $F=4500N$ düşey yük altında Model 2-10mm dişli paletin kar gerilmesi maksimum 32259 Pa ve minimum 29.3 Pa olarak belirlenmiştir (Şekil 4.71).



Şekil 4.71. Model 2-10 mm dişli paletin kardaki gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 2-10 mm dişli paletin maksimum kar gerilme değerleri Şekil 4.72’de görülmektedir. Şekil 4.72’de görüldüğü gibi kar üzerine bırakılan Model 2-10 mm dişli palet, 0-36872 Pa noktaları arasında doğrusal artış gerçekleşmiştir. 36872-32731 Pa noktaları arasında kuruksız değışim gerçekleşmiştir. 32731 Pa sonrası ise yaklaşık olarak sabit kalmıştır.

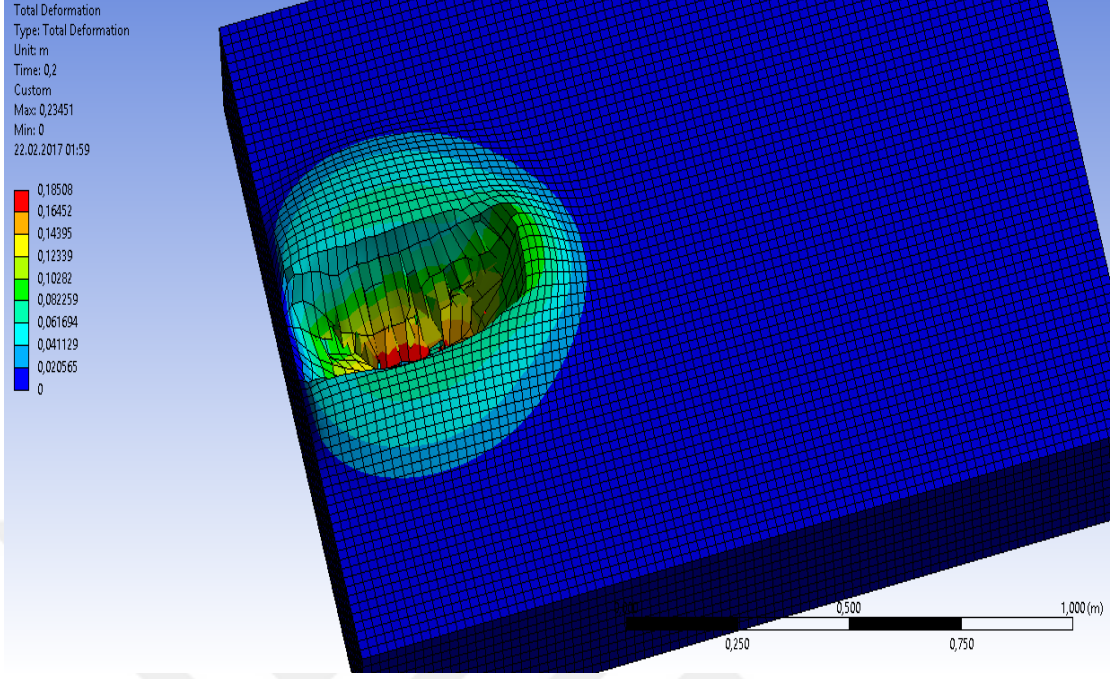


Şekil 4.72. Model 2-10 mm dişli paletin kardaki maksimum gerilme değerleri

4.2.4.3. Model 2-15 mm dişli palet

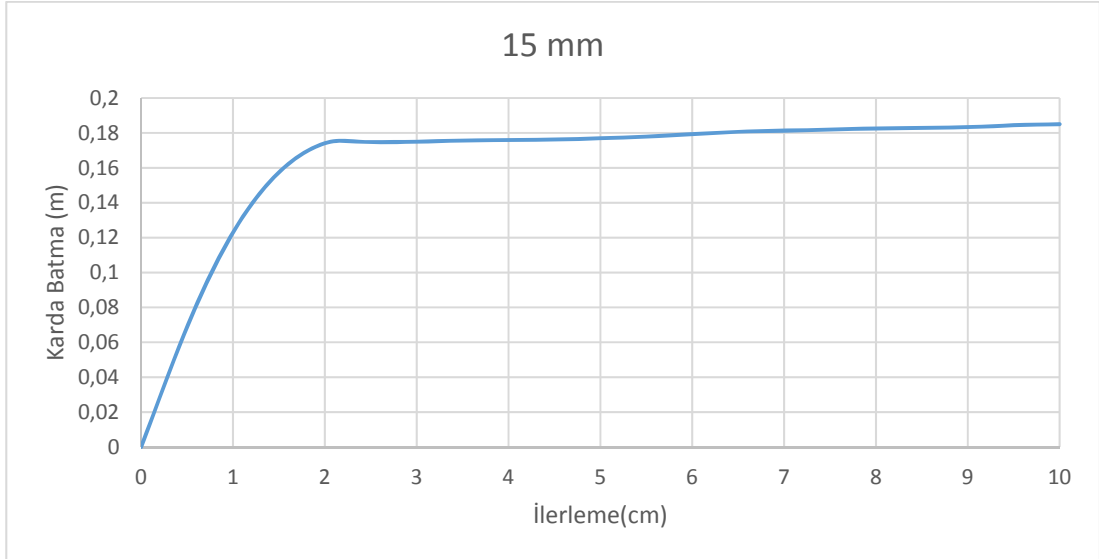
4.2.4.3.1. Karda batma

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 2-15 mm dişli paletin 4500 N düşey yük altında kar üzerindeki batması Şekil 4.73'te görülmektedir. $F=4500$ N düşey yük altında Model 2-15 mm dişli paletin 0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda maksimum batma 18.5 cm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.73. Model 2-15 mm dişli paletin karda batma değerleri

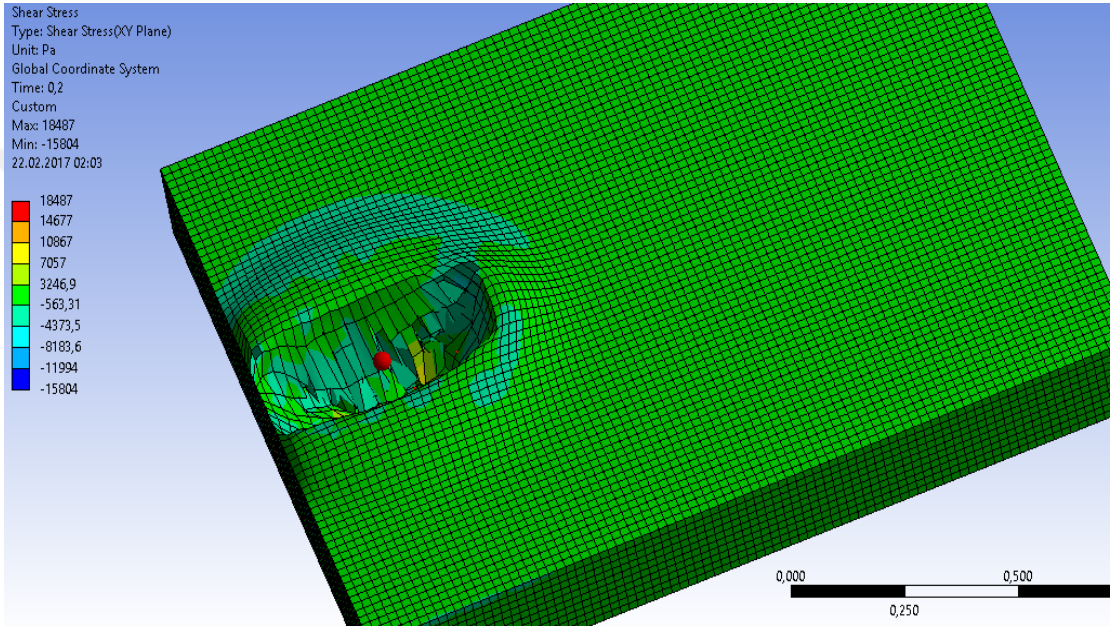
Şekil 4.74’te görüldüğü gibi kar üzerine bırakılan palet, 2 santimetre ilerledikten sonra sabit olarak 18-20 cm derinlikleri arasında hareket etmektedir.



Şekil 4.74. Model 2-15 mm dişli paletin karda batma değerleri

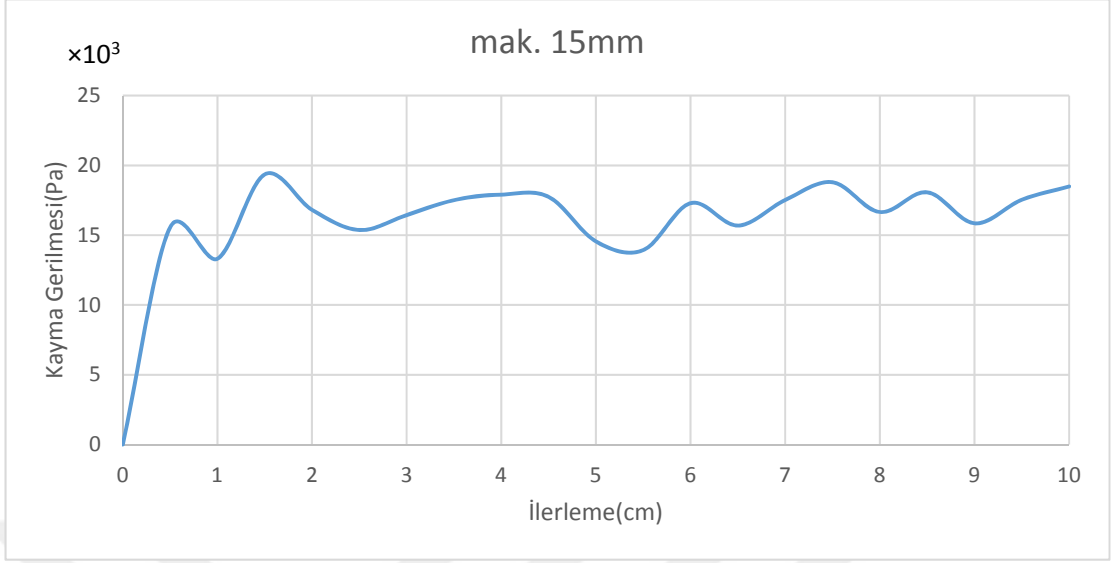
4.2.4.3.2. Karda oluşan kayma gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 2-15 mm dişli paletin kardaki kayma gerilmesi Şekil 4.75'te görülmektedir. 0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda ve $F=4500$ N düşey yük altında Model 2-1 5mm dişli paletin maksimum kardaki kayma gerilmesi 18487 Pa, minimum -15804 Pa olarak belirlenmiştir.

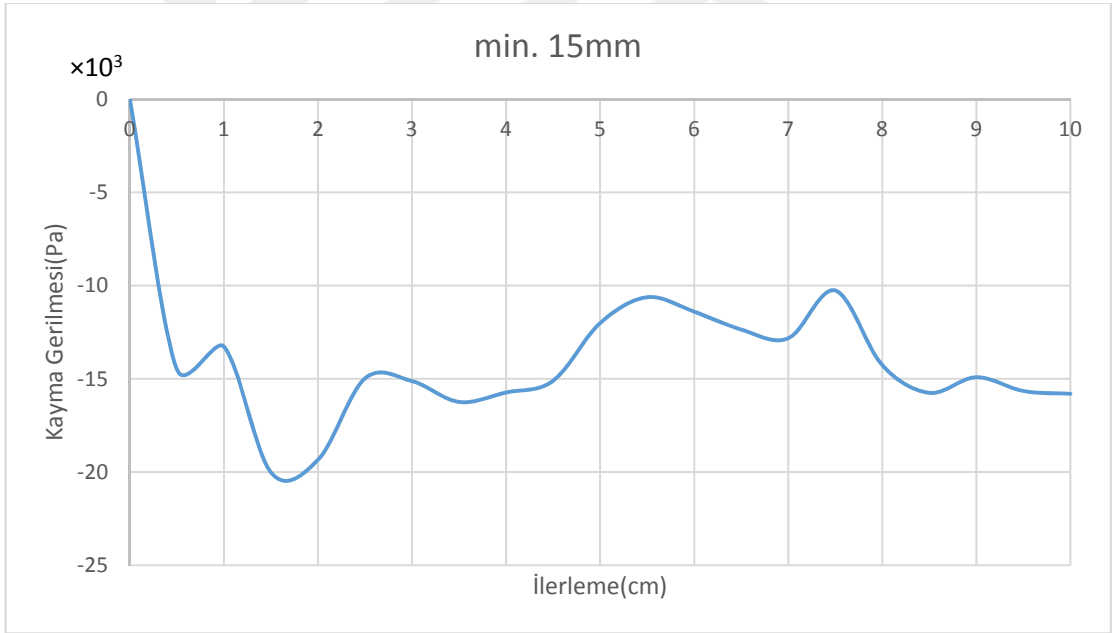


Şekil 4.75. Model 2-15 mm dişli paletin kardaki kayma gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 2-15 mm dişli paletin minimum ve maksimum kardaki kayma gerilmesi değerleri Şekil 4.76-77'de görülmektedir.



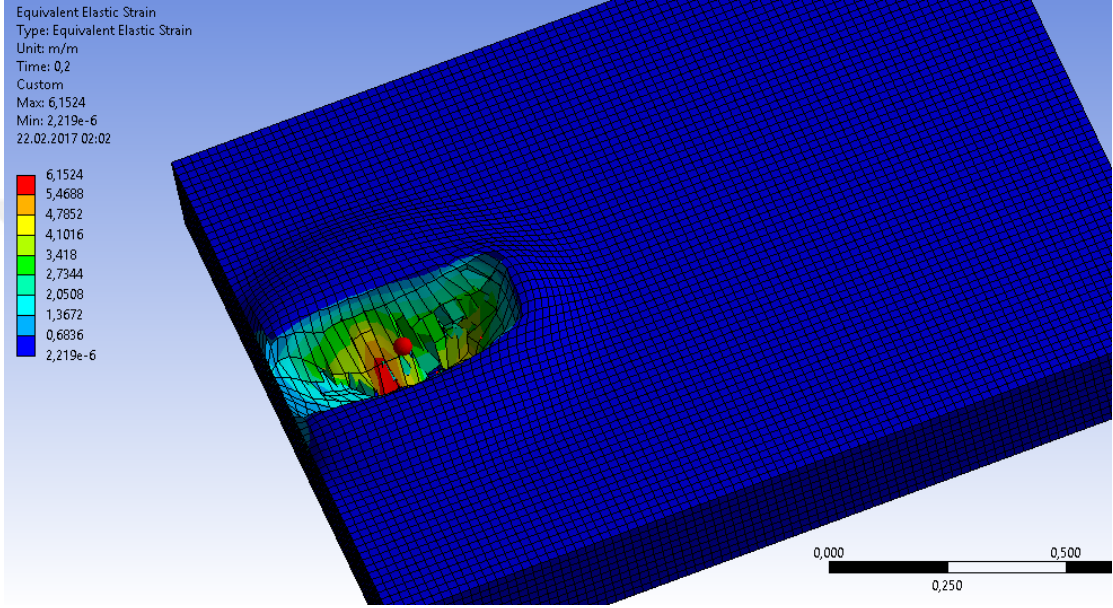
Şekil 4.76. Model 2-15 mm dişli paletin kardaki maksimum kayma gerilmesi değerleri



Şekil 4.77. Model 2-15 mm dişli paletin kardaki minimum kayma gerilmesi değerleri

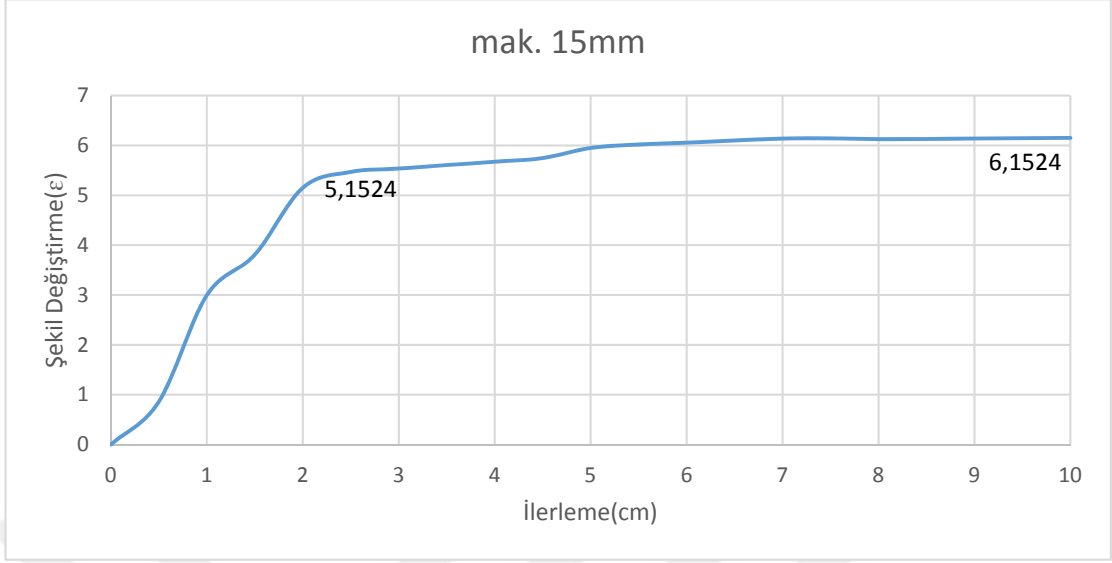
4.2.4.3.3. Karda oluşan şekil değiştirmesi

0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda ve $F=4500\text{N}$ dūřey yūk altında Model 2-15mm diřli paletin kardaki řekil deęiřtirmesi maksimum 6.1524ϵ ve minimum $2.219\text{e-}6\epsilon$ olarak belirlenmiřtir (řekil 4.78).



şekil 4.78. Model 2-15 mm dişli paletin kardaki şekil değiştirmesi

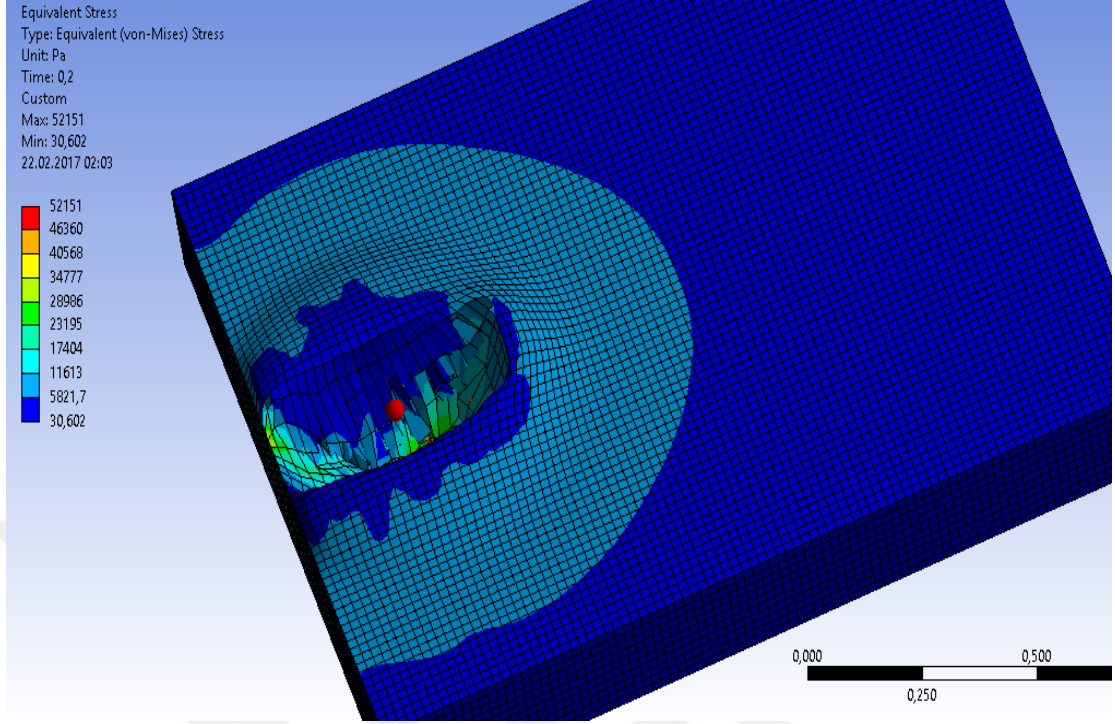
Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 2-15 mm diřli paletin kardaki, maksimum řekil deęiřtirme deęerleri řekil 4.79’da gōr÷lmektedir. Kar ūzerine bırakılan Model 2-15 mm diřli paletin ilerleme-řekil deęiřtirme eęrisi incelendięinde, 5.1524ϵ deęerine kadar doęrusal ve řiddetli deęiřim gōzlemlenirken, 5.1524ϵ sonrası ise daha az ve dūzg÷n bir deęiřim geręekleřmiřtir.



Şekil 4.79. Model 2-15 mm dişli paletin kardaki maksimum şekil değıştirmesi değeri

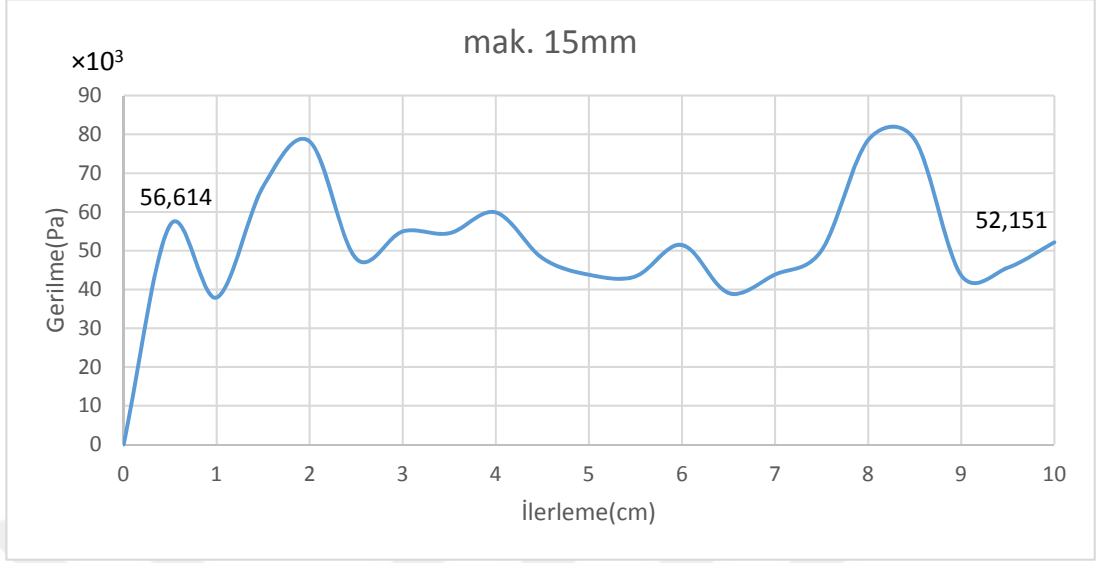
4.2.4.3.4. Karda oluşan gerilme

0.2 saniyede, 0.5 m/s sabit hızda $F=4500$ N düşey yük altında Model 2-15 mm dişli paletin kardaki gerilmesi maksimum 52151 Pa ve minimum 30.602 Pa olarak belirlenmiştir (Şekil 4.80).



Şekil 4.80. Model 2-15 mm dişli paletin kardaki gerilmesi

Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 2-15 mm dişli paletin maksimum kardaki gerilme değerleri Şekil 4.81’de görülmektedir. Şekil 4.81’da görüldüğü gibi kar üzerine bırakılan Model 2-15mm dişli palet, 0-56614 Pa noktaları arası doğrusal değişim, 56614 Pa sonrası ise kurlsız değişim gerçekleşmiştir.



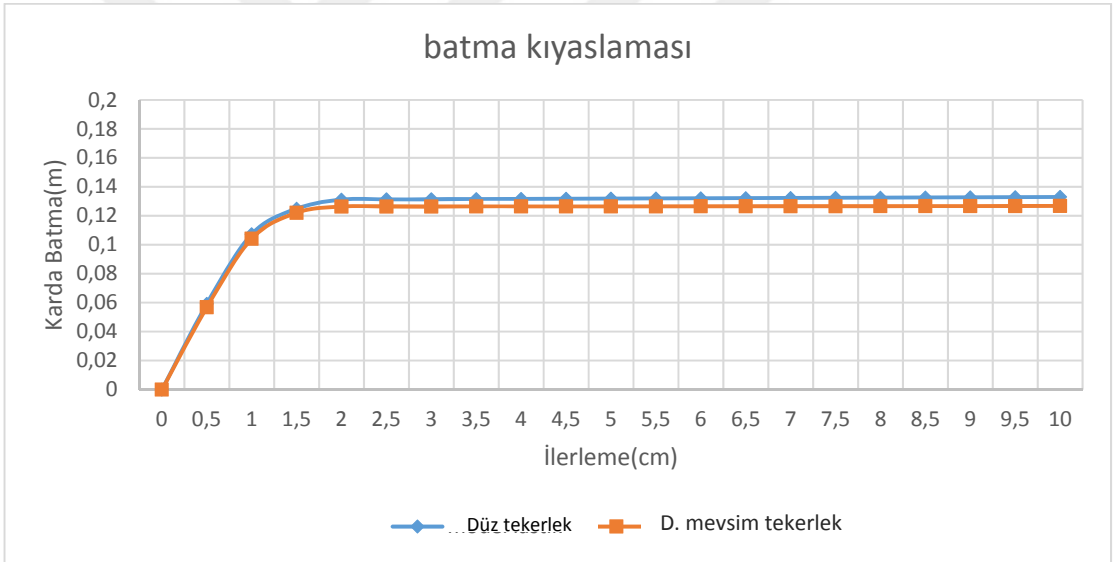
Şekil 4.81. Model 2-15 mm dişli paletin kardaki maksimum gerilme değerleri

4.3. Grafikler

4.3.1. Düz tekerlek ile dört mevsim tekerlek kar referansı değerlendirilmesi

4.3.1.1. Karda batma derinliği açısından değerlendirme

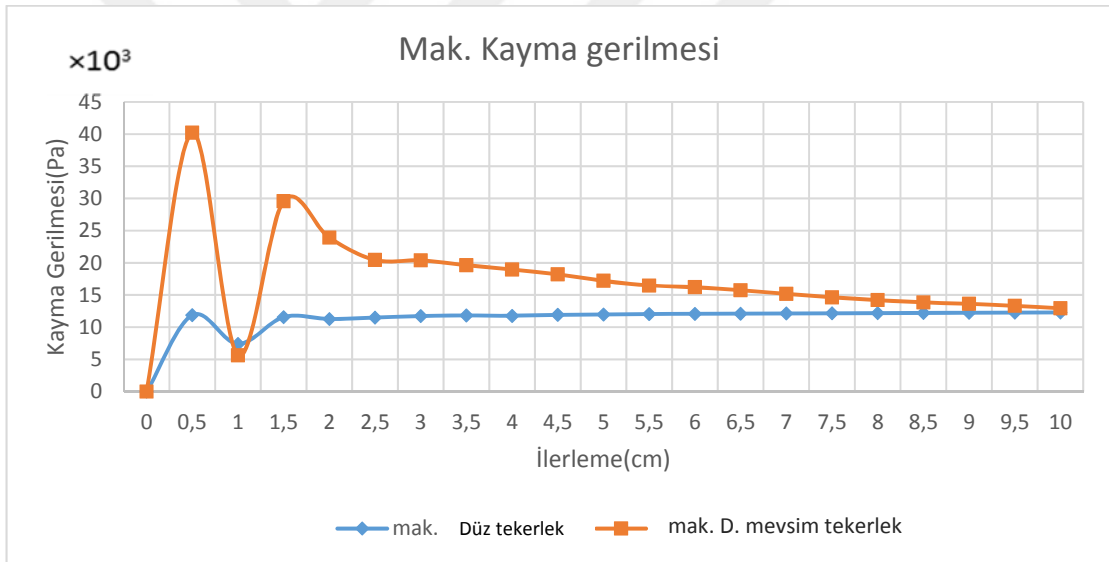
Sonlu elemanlar ile analiz edilen düz tekerlek ve dört mevsim tekerleğinin, karda batması sonucunda benzer davranışlar sergiledikleri görülmüştür. Her iki tekerlek kar üzerine bırakıldıktan sonra ilk 2 cm’de, 12-14 cm aralığına kadar batmış (Şekil 4.82), sonrasında ise 12-14 cm aralığında sabit olarak devam etmiştir. Kar ile tekerleğin temas anı maksimum deformasyon olarak tanımlanmıştır.



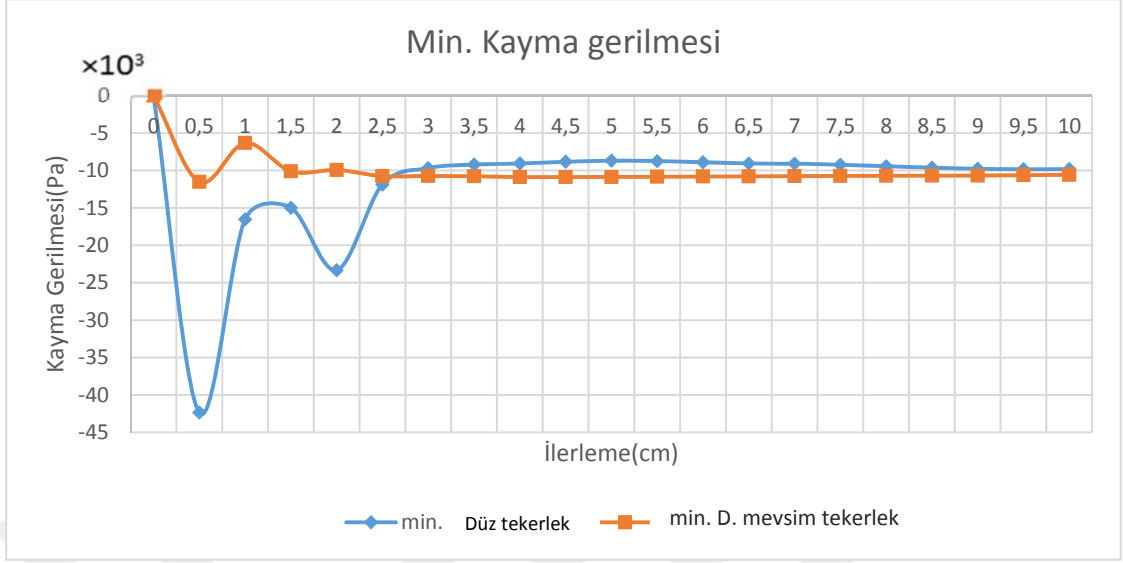
Şekil 4.82. Düz tekerlek ile dört mevsim tekerleğe ait karda batma derinlikleri

4.3.1.2. Karda oluşan kayma gerilmeler açısından değerlendirme

Sonlu elemanlar ile analiz edilen düz ve dört mevsim tekerleği kar yüzeyine bırakıldıkları son zaman kesitinde benzer davranış sergilerken, kar yüzeyine bırakıldıkları ilk anda farklı davranış sergilemişlerdir. Hareket halindeki tekerleğin ilk temas anı maksimum gerilmenin (0-2 cm) yaşandığı an olarak tanımlanabilir. Düz tekerlek 0-2 cm mesafesinde, 10-15 kPa kadar gerilme sergilerken, dört mevsim tekerleği 40 kPa'a kadar gerilme sergilemiştir (Şekil 4.83). Bu farklı davranışın sebebi dört mevsim tekerleğin dişli olmasından dolayı temasta olduğu eleman alanları söylenebilir. İki tekerlek arası aynı özellikler minimum değerler içinde geçerlidir. Şekil 4.84'de minimum değerler görülmektedir.



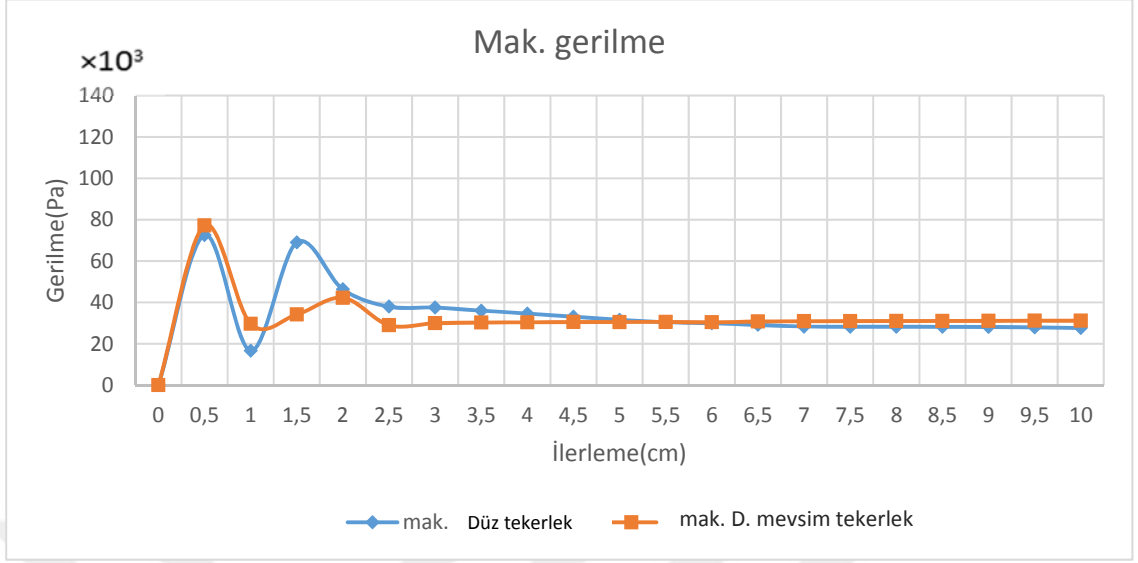
Şekil 4.83. Düz ile dört mevsim tekerleğin maksimum karda kayma gerilmesi değerleri



Şekil 4.84. Düz ile dört mevsim tekerleğin minimum karda kayma gerilmesi değerleri

4.3.1.3. Karda oluşan gerilmeler açısından değerlendirme

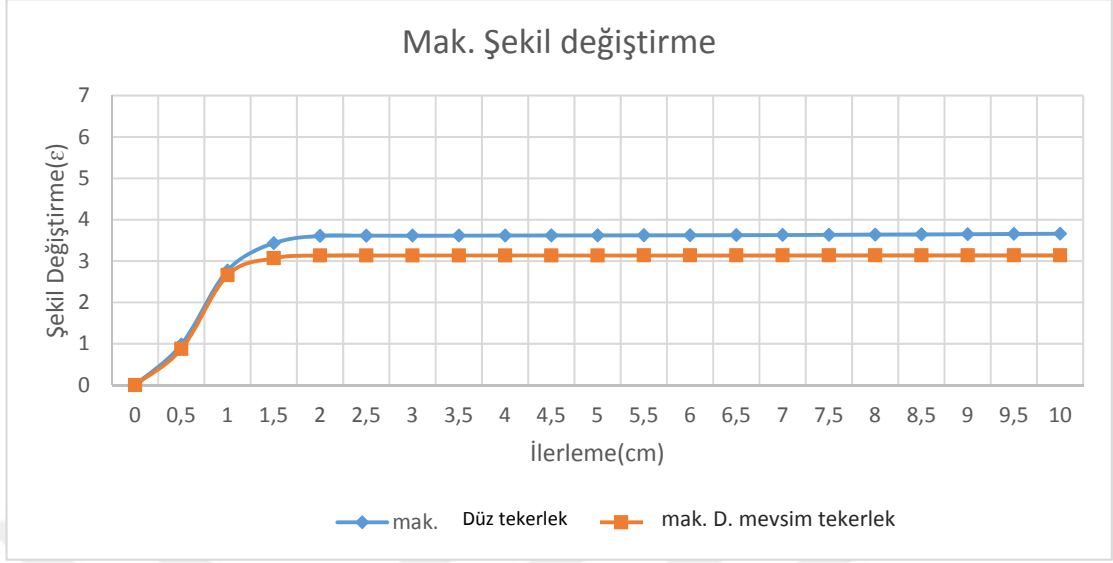
Sonlu elemanlar ile analiz edilen düz tekerlek ve dört mevsim tekerleği, kar yüzeyine bırakıldıkları andan itibaren benzer davranış sergilemişlerdir. Ancak Şekil 4.85’de görüldüğü gibi ilk andan sonra kuralsız değişim bölgesinde farklılık görülmektedir. Tekerleklerin kar ile temasta olan eleman alanlarının toplamı ve farklı davranış biçimleri arasında anlamlı bir ilişki kurulabilir.



Şekil 4.85. Düz ile dört mevsim tekerleğin maksimum karda gerilme değerleri

4.3.1.4. Karda oluşan şekil değiştirmeler açısından değerlendirme

Sonlu elemanlar ile analiz edilen düz tekerlek ve dört mevsim tekerleği, kar yüzeyine bırakıldıkları andan itibaren benzer davranış sergilemişlerdir. Ancak şekilde görüldüğü gibi şiddetli artış bölgesi ve düzgün değişim bölgeleri aynı davranışı göstermesine rağmen düz tekerlek modelinde karda şekil değiştirme değerleri daha yüksektir. (Şekil 4.86).

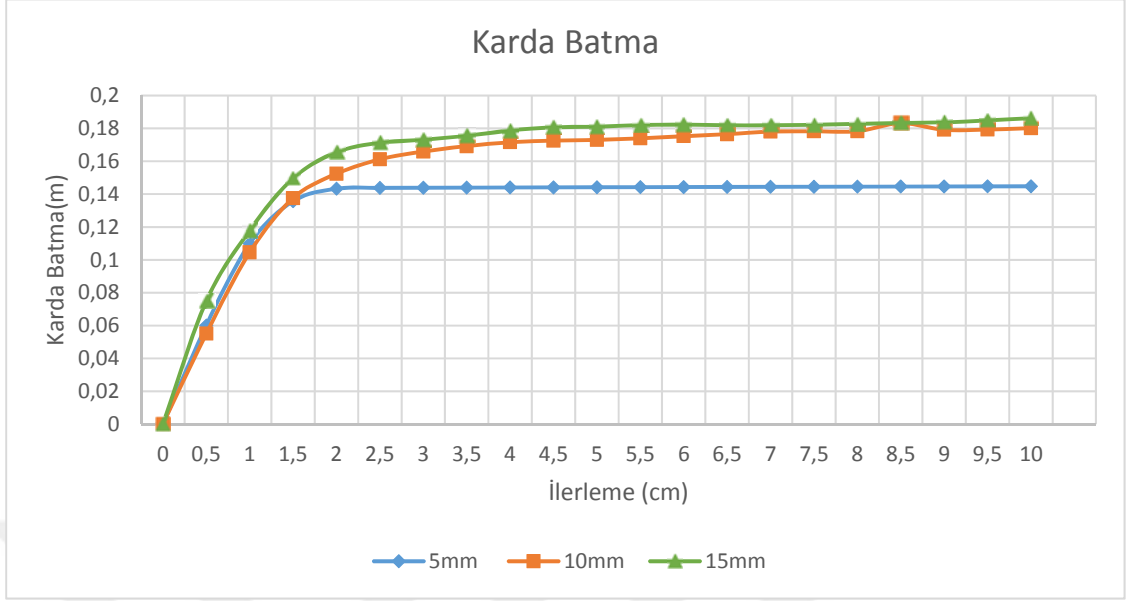


Şekil 4.86. Düz ile dört mevsim tekerleğin maksimum karda şekil değiştirmesi değerleri

4.3.2. Model 1 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) kar paleti değerlendirilmesi

4.3.2.1. Karda batma derinliği açısından değerlendirme

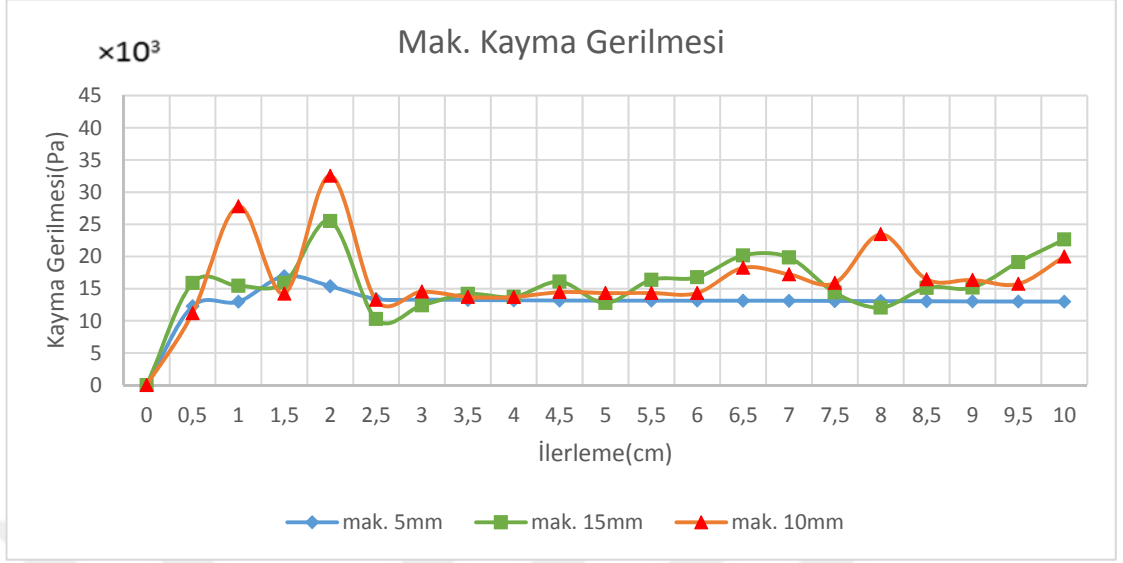
Sonlu elemanlar ile analiz edilen Model 1 (kar paletli 5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletlerinin karda batmasında benzer davranış sergiledikleri gözlemlenmiştir. Üç palette kar üzerine bırakıldıkları ilk 2 cm'de batmış, sonrasında sabit devam etmiştir. 5 mm dişli palet; 10 mm ve 15 mm'lik palete göre daha az batmıştır. 5 mm'lik palet 14-15 cm'de maksimum değer alırken 10 mm ve 15 mm'lik paletler 18 cm'nin üzerine çıkmıştır (Şekil 4.87). Karda batmanın artması tekerlek için olumlu gözükme de, paletlerin batmasının artması yol tutuşuna katkı sağlamaktadır ve palet kanalları yardımı ile hidrolik pülverizasyonu (hydroplaning) en aza indirgenirken, aynı zamanda; iyi ve kuru çekiş, düşük aşınma ve düşük gürültü gibi gereklilikler arasında denge sağlayabilir.



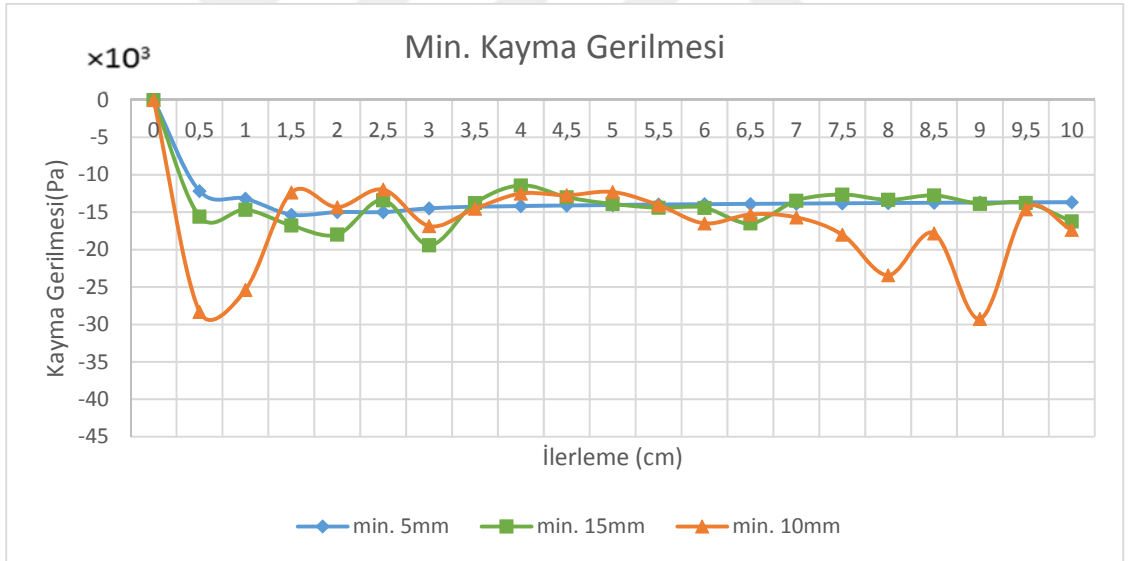
Şekil 4.87. Model 1 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletine ait karda batma derinlikleri

4.3.2.2. Karda oluşan kayma gerilmeler açısından değerlendirme

Sonlu elemanlar ile analiz edilen Model 1 (kar paletli 5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletlerin, kar yüzeyine bırakıldıkları anın ilk kesitinde ortak davranış sergilerken, devamında farklı davranışlar sergilemişlerdir. 5 mm'lik palet modelinde, maksimum karda kayma gerilmesi 0-2 cm aralığında 10-20 kPa'da gözlemlenirken aynı aralıktaki 10 mm'lik palet modelinde, 20-30 kPa'da ve 15 mm palet modelinde ise 15-30 kPa'nın kardaki kayma gerilmesi meydana gelmiştir (Şekil 4.88). Paletler arası aynı özellikler minimum değerler içinde geçerlidir. Şekil 4.89'da minimum değerler görülmektedir.



Şekil 4.88. Model 1 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletin maksimum karda kayma gerilmesi değerleri

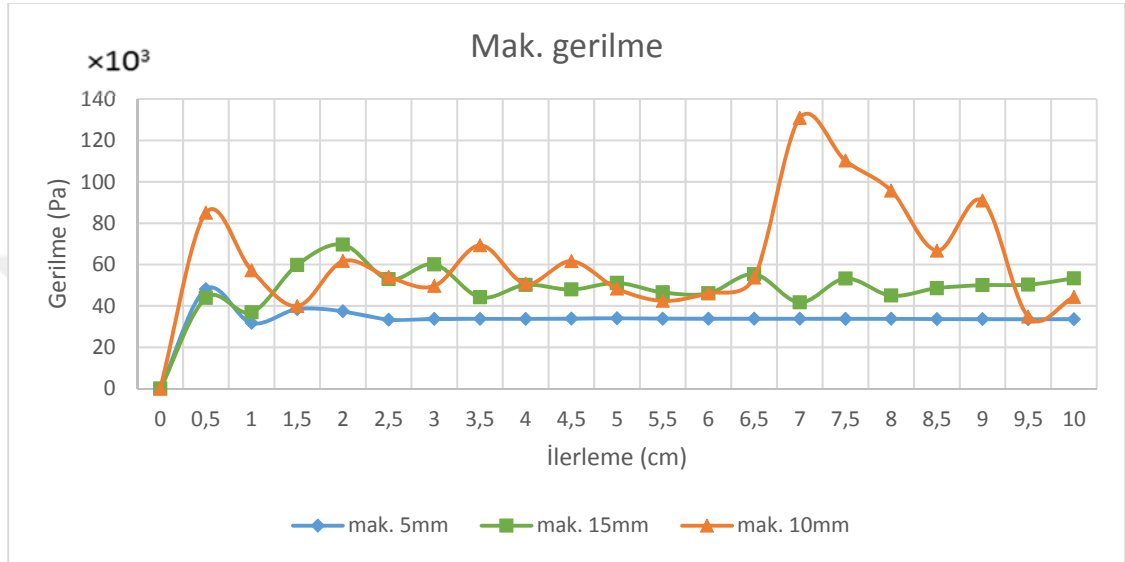


Şekil 4.89. Model 1 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletin minimum karda kayma gerilmesi değerleri

4.3.2.3. Karda oluşan gerilmeler açısından değerlendirme

Sonlu elemanlar ile analiz edilen Model 1 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletler kar yüzeyine bırakıldıkları andan itibaren farklı davranış sergiledikleri görülmüştür. Şekil 4.90'da

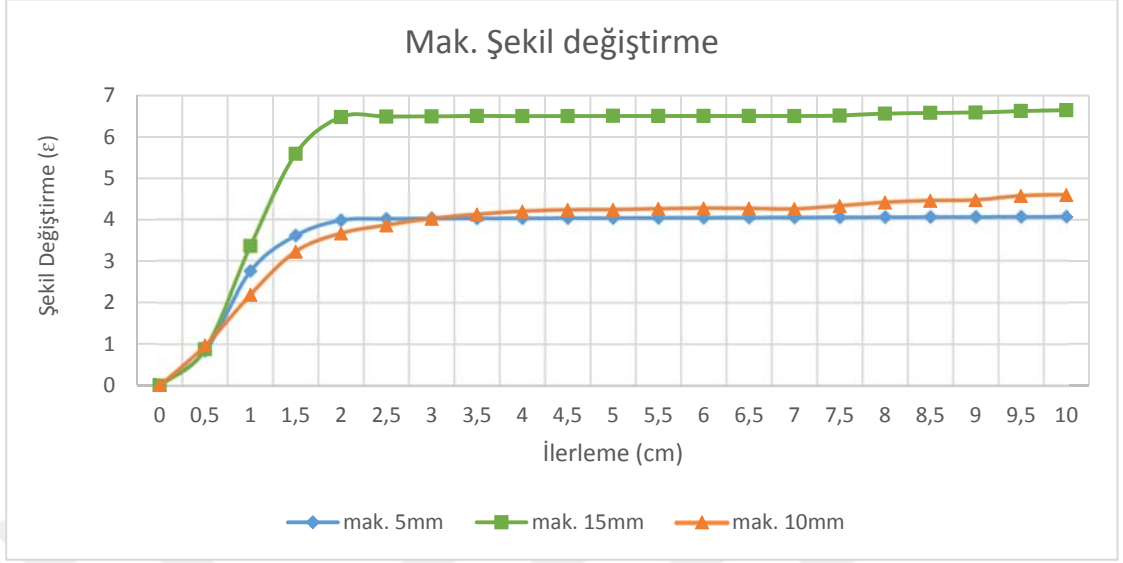
görüldüğü gibi ilk andan sonra doğrusal davranışta 10 mm'lik palet modeli, 5mm ve 15 mm'lik palet modellerinden farklı bir davranış sergiledikleri görülmüştür. Doğrusal artış sonrası, 10 mm ve 15 mm'lik palet modelleri kuralızsız davranış sergilerken, 5 mm'lik palet modelinin kardaki gerilmesi yaklaşık olarak sabit kalmıştır.



Şekil 4.90. Model 1 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletin maksimum karda gerilmesi değerleri

4.3.2.4. Karda oluşan şekil değiştirmeler açısından değerlendirme

Sonlu elemanlar ile analiz edilen Model 1'deki (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletler, kar yüzeyine bırakıldıkları andan itibaren benzer davranış sergilemişlerdir. Ancak şekilde görüldüğü gibi şiddetli artış bölgesi ve düzgün değişim bölgeleri aynı davranışı göstermesine rağmen model 1'de 15 mm'lik palet modelinin kardaki şekil değiştirme değerleri daha yüksektir (Şekil 4.91).

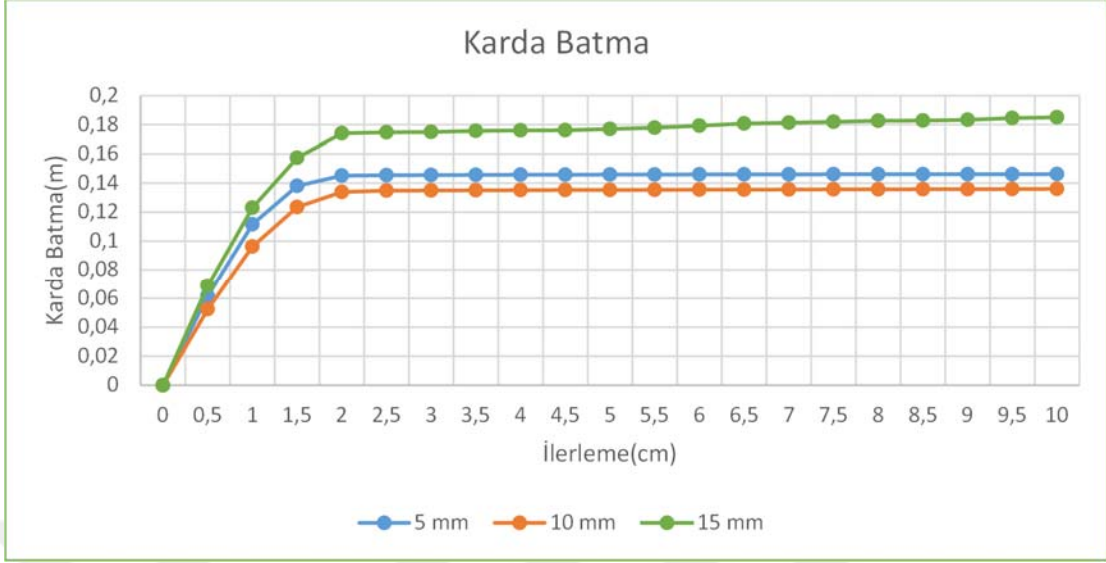


Şekil 4.91. Model 1 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletin maksimum karda şekil değıştirmesi değeri

4.3.3. Model 2 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) kar paleti değeriendirilmesi

4.3.3.1. Kar batma derinliği ağıısından değeriendirme

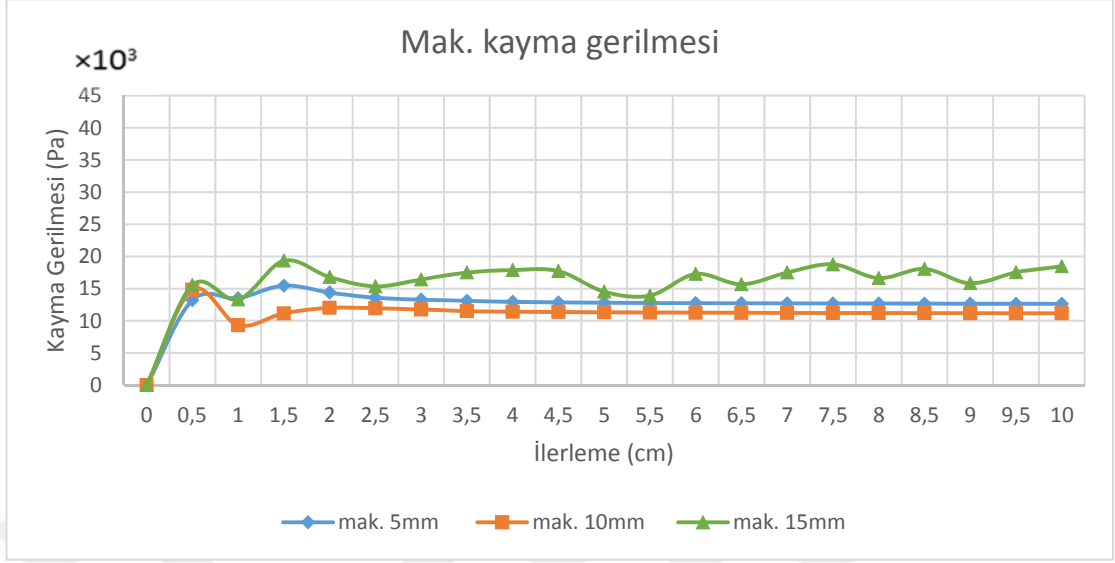
Sonlu elemanlar ile analiz edilen Model 2 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletlerinin karda batmada benzer davranış sergiledikleri görülmüştür. Paletler kar üzerine bırakıldıkları ilk 2 cm’de karda benzer batma davranış sergilerken, sonrasında 15 mm palet, 5 mm ve 10 mm paletlerden daha fazla batma davranış sergilediği görülmüştür (Şekil 4.92). Dış genişlikleri ve yükseklikleri değeriendirildiğinde bu batma değeri normal bir batma olarak değeriendirilebilir.



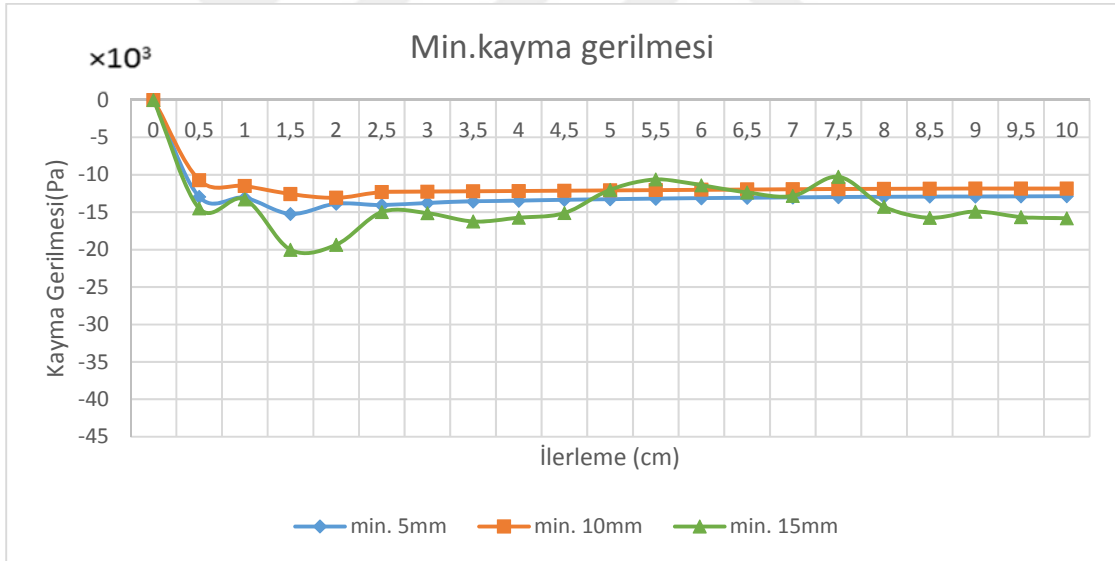
Şekil 4.92. Model 2 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletine ait karda batma derinlikleri

4.3.3.2. Karda oluşan kayma gerilmeler açısından değerlendirme

Sonlu elemanlar ile analiz edilen Model 2 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletleri kar yüzeyine bırakıldıkları anda ortak davranış sergilerken, devamında farklı davranış sergilemişlerdir. Hareket halindeki paletin ilk temas anı maksimum kardaki kayma gerilmesinin (0-2 cm) yaşandığı an olarak tanımlanabilir. 5 mm palet modeli 0-2 cm aralıkta 10-15 kPa değer sergilerken, 15 mm'lik palet modeli 20 kPa'a kadar karda kayma gerilmesi sergilemiştir. Şekil 4.93 ve 4.94'te kardaki maksimum ve minimum kayma gerilme değerleri gösterilmiştir. Paletler arası aynı özellikler minimum değerler içinde geçerlidir.



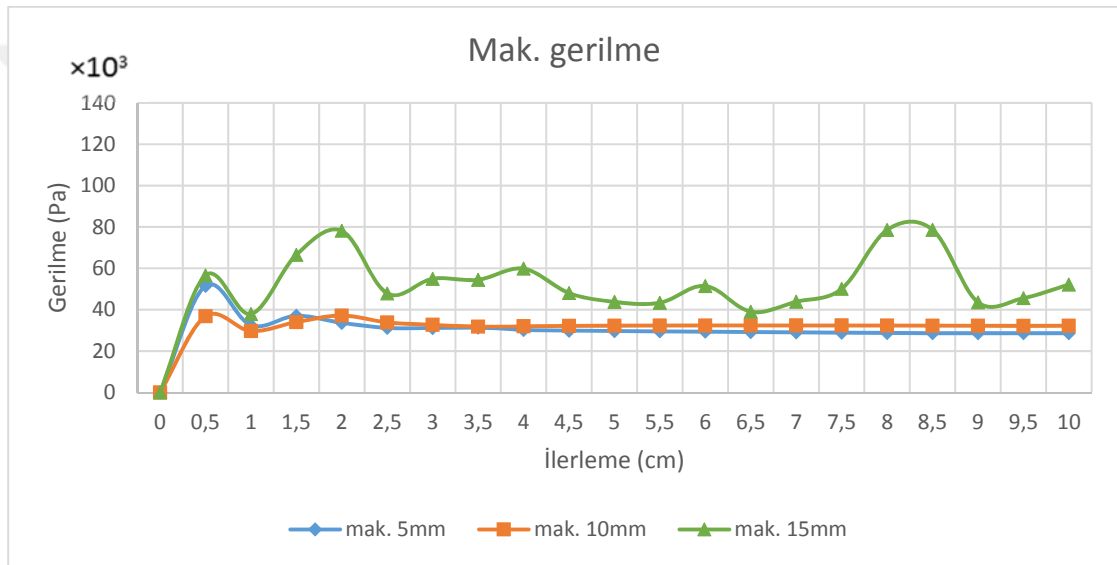
Şekil 4.93. Model 2 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletin maksimum karda kayma gerilmesi değerleri



Şekil 4.94. Model 2 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletin minimum karda kayma gerilmesi değerleri

4.3.3.3. Karda oluşan gerilmeler açısından değerlendirme

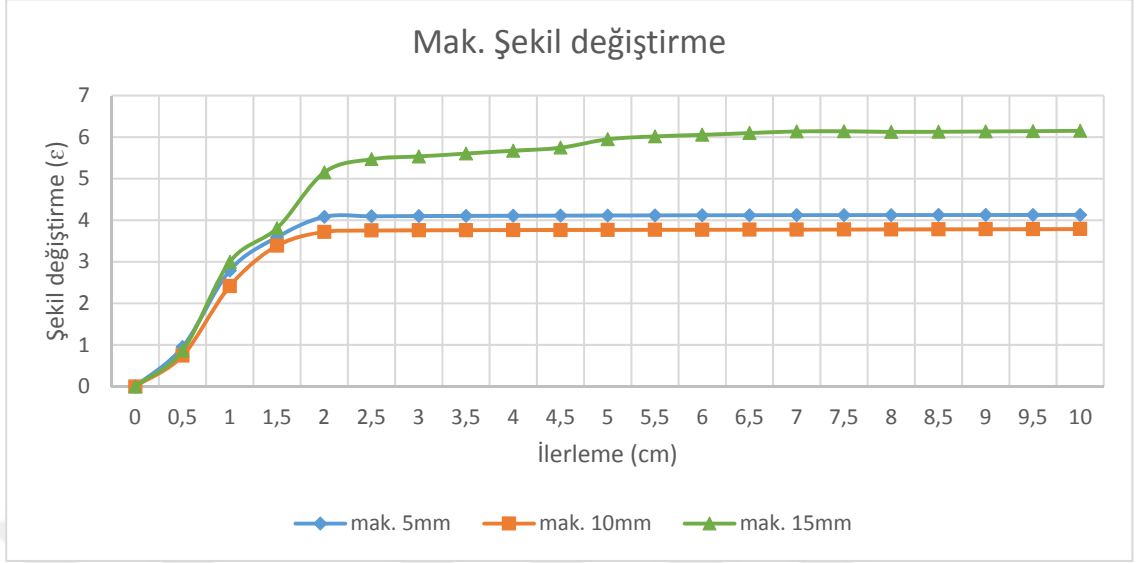
Sonlu elemanlar ile analiz edilen Model 2 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletlerinin kar yüzeyine bırakıldıkları andan itibaren farklı davranış sergiledikleri gözlemlenmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ilk andan sonra doğrusal artış bölgesinde farklılık görülmektedir. 5 mm ve 10 mm'lik paletlerin kardaki gerilmesi ilk 2 cm'den sonrası yaklaşık olarak sabit devam ederken, 15 mm'lik palet modelinin kardaki gerilmesi sabit devam etmektense, görüntü alınan son ana kadar kuralızsız değişim davranışı sergilemiştir (Şekil 4.95).



Şekil 4.95. Model 2 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletin maksimum karda gerilmesi değerleri

4.3.3.4. Karda oluşan şekil değiştirmeler açısından değerlendirme

Sonlu elemanlar ile analiz edilen Model 2 (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletleri kar yüzeyine bırakıldıkları andan itibaren benzer davranış sergilemişlerdir. Ancak şekilde görüldüğü gibi şiddetli değişim bölgesi ve düzgün değişim bölgeleri aynı davranışı göstermesine rağmen 15 mm'lik palet modelinin kardaki şekil değiştirme değerleri daha yüksektir (Şekil 4.96).



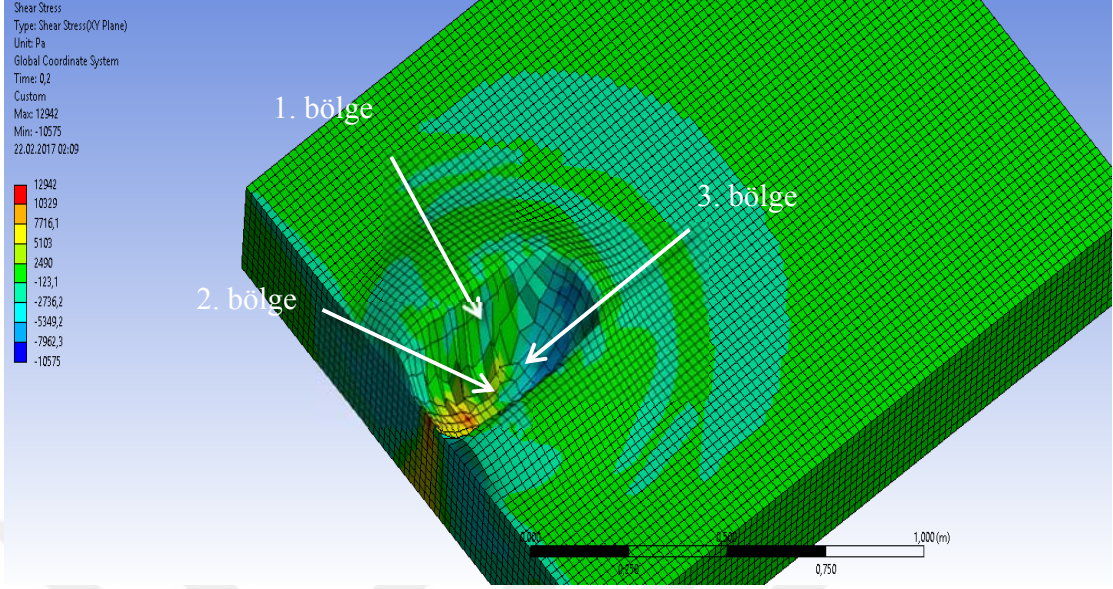
Şekil 4.96. Model 2(5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletin maksimum karda şekil değıştirmesi değeri

4.4. Değerlendirme

Bu bölümde yer alan uygulamada, çizelgeler ve şekiller yardımı ile üretilen tekerleklerin ve paletlerin değeriendirilmesi yapılmıştır. Bu değeriendirmeler, tekerlekler ve paletler arasında farklı özellikler sergilediği gibi, sonlu elemanlar ile analiz edilen tekerleklerin ANSYS programı ile üretim öncesi performans değeriilerinin bulunabileceğini göstermiştir.

Çalışmada, sadece tekerleklerin ve paletlerin özellikleri değeriştirilerek sabit hız ve sabit zemin kullanılması, farklı tasarımların karşılaştırılabilmesi için kolaylık sağlamıştır.

Öncelikli olarak tekerleklerin ve paletlerin temas yüzeyleri incelenecek olursa, Şekil 4.97’de temas yüzeyleri görülmektedir.



Şekil 4.97. Temas bölgeleri

1. Bölge: Kenar yüzeylerde kayma gerilmesi değerleri pozitifdir.
2. Bölge: Hız sabit olduğu için alt tabanda kayma gerilmesi negatiftir.
3. Bölge: Tekerleğin, açılma ve öteleme hızından dolayı boyuna kayma meydana gelmektedir. Öteleme hızının sabit olma nedeni ile bu durum tekerleğin alt kısmına etki etmektedir. Bu etki nedeni ile tekerleğin alt kısmında kayma gerilmesi negatiftir.

Üretilen tekerlek ve paletlerin dış derinliklerinin, kar tutuşunda önemli bir etkisi vardır. Bu değerler, karda batma değerlerinde anlamlı bir ilişkiye sahip olmamasına rağmen, karda oluşan gerilme, kayma gerilmesi ve şekil değiştirmesi konusunda anlamlı farklılıklara yol açmaktadır.

Çalışmada kullanılan bilgisayarda, her bir işlemin ortalama 2 gün sürmesi çalışma için bir sınırlılık oluşturmasına rağmen ANSYS programından alınan sonuçlar, Lee (2011)'nin yaptığı çalışmalar incelenerek doğrulanmıştır. Çalışmada elde edilen birçok veri (kardaki kayma gerilmesi gibi) Lee (2011)'nin ABAQUS yardımı ile yaptığı çalışma sonuçları ile uyum göstermiştir.

Düz tekerlek ve dört mevsim tekerleği, uygulanan testlerde benzer davranışlar sergilemesine rağmen kardaki batma değerleri, kayma gerilmesi değerleri ve şekil değiştirme değerleri incelendiğinde 4 mevsim tekerleğin birçok açıdan daha iyi yol tutuşu sağladığı gözlemlenmiştir. Ancak gerilme değerleri arasında anlamlı bir farklılık yoktur.

Model 1’deki 5 mm’lik kar paleti, yol tutuşu en zayıf olan palettir. Kardaki batma derinlik değerleri, gerilme değerleri, kayma gerilmesi değerleri ve şekil değiştirme değerleri 10 mm ve 15 mm’lik paletlerden daha düşük seviyelerdedir. Bu paletler, düz tekerlek üzerine takılması ile belirlenen zemin şartlarında, düz ve 4 mevsim tekerleğinden daha iyi yol tutuşu sağlayabilmektedir. Çizelge 4.1’de modellerin karşılaştırılması görülmektedir.

Çizelge 4.1. Paletler ve dört mevsim tekerlek maksimum değerlerin karşılaştırılması

	Düz tekerlek	Dört mevsim tekerlek	Model 1 (düz şeklinde)			Model 2 (V şeklinde)		
			5mm	10mm	15mm	5mm	10mm	15mm
Karda batma(m)	0.133	0.12681	0.1447	0.18582	0.1863	0.14624	0.13603	0.18508
Karda kayma gerilmesi(Pa)	12289	40052	16925	35542	25506	15467	14835	19352
Kar şekil değiştirmesi(ε)	3.6619	3.1385	4.0633	4.60	6.6469	6.6469	3.7881	6.1524
Kar gerilmesi (Pa)	72598	77222	48120	130840	69623	51566	37204	78534

Tekerlek-kar ve palet-kar etkileşimlerinin stokastik niteliği göz önüne alındığında, görüldüğü gibi dört mevsim tekerleği, düz tekerleğe göre belirlenen zeminde daha iyi yol tutuşu sunarken, paletli düz tekerleğin kardaki kayma gerilmesi değerleri dışında dört mevsim tekerlekten daha iyi yol tutuşu sağladığı ergonomik bir tasarım meydana getirmekte ve yol tutuşu ile beraber yakıt tasarrufu da sağlayacağı düşünülebilir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. Sonuç

Sonlu elemanlar yöntemi, zorlu düzensiz yapıların modellenmesinde önemli bir yardımcıdır, yük durumlarının tanımlanmasında kolaylık sağlar, ele alınan yapının her elemanını tek tek analiz ettiği için modelleme konusunda ciddi kolaylık sağlar, farklı düğüm durumları rahatlıkla çözümlenebilir, modelin değiştirilmesi kolay olduğu için ekonomik katkı sağlar, dinamik etkileri de kapsayabilir. Bu yöntemle büyük deformasyonlar ve malzemelerdeki lineer olmayan davranışlar kontrol edilebilir.

Tekerlek üretimi konusunda yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar göstermiştir ki; büyük firmalar, üretilecek tekerlekleri bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmeden ve araç üzerine deneysel analiz yaparak geliştirmektedirler. Sonlu elemanlar yönteminin bu alanda kullanılması, üretim aşamasında tekerlek üzerinde yapılan denemeler, firmaların üretim sürecine eklenerek daha verimli ve daha sağlıklı üretim yapılmasını sağlayabilecektir. Üretilen tekerleklerin, üretim öncesi sonlu elemanlar ile analiz edilmesi, oluşabilecek bir çok pürüzü ortadan kaldırdığı gibi performans arttırıcı unsurların da gözden kaçmamasını sağlayabilir.

Bu yöntem ile üretilecek tekerleklerin, düğüm sayıları, malzeme özellikleri vs. gibi özellikleri, daha üretilmeden tasarlanabilir. Sonlu elemanlar yönteminin özellikle tekerlek üretiminde kullanılması, üreticilerin hem zaman hem de ekonomik açıdan tasarruf yapmalarını sağladığı gibi performans değerleri de daha yüksek tekerlekler üretebilmelerini sağlayabilir.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre, birçok tekerlek firmasının tekerlek üretiminde sonlu elemanlar dahil bir çok yöntemi Ar-Ge çalışmalarına dahil etmelerine rağmen, üretim biçimleri arasına dahil etmedikleri görülmüştür. Fakat iletişime geçilen ve görüşülen firma temsilcilerinin verdikleri bilginin yetersizliğinden dolayı bunun kesinliği

sağlanamamıştır. Bu konuda daha detaylı araştırma yapılabilir. Ancak elde olan bilgiler bu anlamda çok kısıtlıdır.

Çalışmada modellenen tüm tekerlekler 4500 N düşey yük altında, 200 kPa iç basınçla (tekerlek hava basıncı), 0.5 m/s öteleme hızında ve 1 rad/s açısal hızda sabit olarak modellenmişlerdir. Palet ve tekerlekler karşılaştırmaları değerlendirildiğinde, Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi;

- Kardaki batma değerinin en yüksek değeri, Model 1-15 mm kar paletinde 18.63 cm, en düşük değeri ise dört mevsim tekerlekte 12.681 m olarak gözlemlenmiştir (yaklaşık 1.5 kat fark meydana gelmiştir).
- Kardaki kayma gerilmesi değerinin en yüksek değeri, dört mevsim tekerlekte 40052 Pa, en düşük değeri ise düz tekerlekte 12289 Pa olarak gözlemlenmiştir (yaklaşık 3 kat fark meydana gelmiştir).
- Kardaki şekil değiştirmesinin en yüksek değeri, Model 1-15 mm kar paletinde ve Model 2-5 mm kar paletinde 6.6469 ϵ , en düşük değeri ise dört mevsim tekerlekte 3.1385 ϵ olarak elde edilmiştir (yaklaşık 2 kat fark meydana gelmiştir).
- Kardaki gerilmenin en yüksek değeri, Model 1-10 mm’lik kar paletinde 130840 Pa iken, en düşük değeri Model 2-10 mm kar paletinde 37204 Pa olarak tespit edilmiştir (yaklaşık 3.5 kat fark meydana gelmiştir).

Aynı zamanda dört mevsim tekerleği ile diş derinliği yakın olan Model 1-10 mm ve Model 2-10 mm kıyaslandığında;

- Kardaki batma değerinin en yüksek değeri, Model 1-10 mm kar paletinde 18.58 cm, en düşük değeri ise dört mevsim tekerlekte 12.68 m olarak gözlemlenmiştir (yaklaşık 1.5 kat fark meydana gelmiştir).
- Kardaki kayma gerilmesi değerinin en yüksek değeri, dört mevsim tekerlekte 40052 Pa, en düşük değeri ise Model 2-10 mm kar paletinde 14835 Pa olarak gözlemlenmiştir (yaklaşık 2.5 kat fark meydana gelmiştir).

- Kardaki şekil değiştirmesinin en yüksek değeri, Model 1-10 mm kar paletinde 4.6 ϵ , en düşük değeri ise dört mevsim tekerlekte 3.1385 ϵ olarak elde edilmiştir (yaklaşık 1.5 kat fark meydana gelmiştir).
- Kardaki gerilmenin en yüksek değeri, Model 1-10 mm kar paletinde 130840 Pa iken, en düşük değeri Model 2-10 mm kar paletinde 37204 Pa olarak tespit edilmiştir (yaklaşık 3.5 kat fark meydana gelmiştir).

Tekerleklerin düğüm sayıları, tekerlek desenleri, palet dış uzunlukları ise farklı değerlerde modellenmiş ve aralarındaki fark incelenmiştir. Aşağıda her model için ayrı ayrı sonuçlar değerlendirilmiştir.

Düz tekerlek diğer modeller ile kıyaslandığında;

- Sonlu elemanlarla tasarlanan düz tekerlek, dişsiz bir tekerlek olarak modellenmiştir. Bu tekerleğin günlük hayatta, performansı olan bir tekerlek olduğunu söylemek zordur. Yol tutuşu bakımından çok düşük değerlere sahip olduğu gözükmemektedir. Ancak bu tekerleğin tasarlanmasındaki amaç kar palet modellerinin bu tekerleğe takılarak paletlerin değerlendirilmesini sağlamaktır.
- Düz tekerleğin karda batma değerleri, Lee (2011)'nin ürettiği tekerlekteki gibi 12 cm ve 14 cm aralığında belirlenmiştir. Düz tekerlek sadece karda batma değerleri bakımından dört mevsim tekerleğin üzerinde sonuçlar vermiştir ancak Model 1 ve Model 2'deki kar paletlerinden daha düşük değerler gözlemlenmiştir.
- Düz tekerlek, kardaki şekil değiştirmesi açısından sadece dört mevsim tekerlekten yüksek değer almıştır. Ancak Model 1 ve Model 2'deki kar paletlerinden daha düşük değer almıştır.
- Diğer değerlerde ise (kardaki kayma gerilmesi ve gerilme değerlerinde) düz tekerlek en düşük değerleri almıştır.

Dört mevsim tekerlek ve düz tekerlek kıyaslandığında;

- Sonlu elemanlarla tasarlanan, düz tekerlek ve dört mevsim tekerleğinin davranışları benzerdir. Ancak dört mevsim tekerleğin diş yapısı, ikisi arasında düğüm ve eleman farklılığına neden olmaktadır. Her iki tekerleğin karda batmalarında benzer davranış sergiledikleri görülmüştür. İki tekerlekte kar üzerine bırakıldıkları ilk 2 cm’de 12-14 cm aralığına kadar batmış, sonrasında ise 12-14 cm aralığında sabit devam etmiştir.
- Her iki tekerlek, kar yüzeyine bırakıldıkları son zaman kesitinde ortak davranış sergilerken, kar yüzeyine bırakıldıkları ilk anda farklı davranış sergiledikleri görülmüştür. Bu farklı davranışın sebebi olarak tekerleklerin diş sayısı söylenebilir. Dört mevsim tekerleğin dişli deseni ve diş derinliği 8 mm iken, düz tekerlek dişsiz ve pürüzsüz olarak tasarlanmıştır. Diş derinliği ve desen farklılığı iki tekerleğin kar yüzeyine bırakılma anlarını etkilediği söylenebilir. Hareket halindeki tekerleğin ilk temas anı maksimum deformasyon ve kardaki kayma gerilmesinin (0-2 cm) yaşandığı an olarak tanımlanabilir.
- Her iki tekerlekte de kardaki gerilme davranışları kar yüzeyine bırakıldıkları andan itibaren benzerdir. Ancak ilk andan sonra kuralsız değişim bölgesinde farklı davranış sergilemişlerdir. Dört mevsim tekerlek kuralsız değişim alanından geç çıkarken, düz tekerlek kuralsız değişim alanından daha hızlı geçiş yaparak yola daha hızlı uyum sağladığı söylenebilir.
- Her iki tekerleğin kardaki şekil değiştirme davranışları kar üzerine bırakıldıkları andan itibaren benzerdir. Ancak şiddetli değişim bölgesi ve düzgün değişim bölgeleri aynı davranışı göstermesine rağmen düz tekerlekte kardaki şekil değiştirme değerleri daha yüksektir.

Model 1 ve Model 2'deki kar paletleri kıyaslandığında;

- Sonlu elemanlarla analiz edilen Model 1 (kar paletli 5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletleri karda batmada benzer davranış sergilemişlerdir. 5 mm dişli palet, 10 mm ve 15mm palete göre daha az batmıştır. 5 mm palet 14-15c m'de maksimum değer alırken 10 mm ve 15 mm'lik paletler 18 cm'nin üzerine çıkmıştır. Model 2'deki (5 mm, 10 mm ve 15 mm) paletlerin de karda batmada benzer davranış sergiledikleri görülmüştür. Paletler kar üzerine bırakıldıkları ilk 2 cm'de benzer batma davranışı sergilerken sonrasında 15 mm palet, 5 mm ve 10 mm paletten daha fazla batmıştır. Karda batmanın artması tekerlek için olumlu gözükmese de paletlerin batmasının artması yol tutuşuna artı bir değer olarak yansıyabilmektedir. Palet kanalları yardımı ile hidrolik pülverizasyonu en aza indirirken, iyi ve kuru çekiş, düşük aşınma ve düşük gürültü gibi bazen çelişen gereklilikler arasında makul bir denge sağlanabilmektedir.
- Model 1 kar paletleri (5 mm, 10 mm ve 15 mm) kardaki kayma gerilmesi değerlerinin ilk kesitinde ortak davranış sergilerken, sonrasında farklı davranışlar sergilemişlerdir. 5 mm palette maksimum kardaki kayma gerilmesi 0-2 cm aralığında 15-20 kPa'da oluşurken aynı aralıkta 10 mm'lik palette, 25 kPa değerinde ve 15 mm palette, 15-30 kPa değerlerinde karda kayma gerilmesi meydana gelmiştir. Model 2'deki kar paletlerin, (5 mm, 10 mm ve 15 mm) kar yüzeyine bırakıldıkları anın son kesitinde ortak davranış sergilerken, devamında farklı davranış sergilemişlerdir. Hareket halindeki paletin ilk temas anı maksimum deformasyon ve maksimum kardaki kayma gerilmesinin (0-2 cm) olduğu an olarak tanımlanabilir. 5 mm ve 10 mm'lik paletlerinin kayma gerilmesi 0-2 cm aralığında 10-15 kPa sergilerken, 15 mm palet'lik 20 kPa'a kadar karda kayma gerilmesi sergilemiştir.
- Model 1'deki kar paletlerinin (5 mm, 10 mm ve 15 mm) kardaki gerilme değerleri, kar yüzeyine bırakıldıkları andan itibaren farklıdır. Doğrusal artış bölgesinden sonra 10 mm'lik palet, 5 mm ve 15 mm'den farklı bir davranış sergilediği

görülmüştür. Model 2'deki kar paletlerinin ise (5 mm, 10 mm ve 15 mm) kar yüzeyine bırakıldıkları andan itibaren benzer davranış sergilemişlerdir. Fakat kuralsız değişim bölgesinde farklılık görülmektedir. 5 mm ve 10 mm'lik paletlerin ilk 2 cm sonrası yaklaşık olarak sabit devam ederken, 15 mm'lik paletten görüntü alınan ana kadar kuralsız değişim davranışı sergilemiştir. Paletlerin dış derinlikleri ve farklı davranış biçimi arasında anlamlı bir ilişki kurulabilir.

- Model 1'deki kar paletlerinde (5 mm, 10 mm ve 15 mm) kardaki şekil değiştirme değerleri, kar yüzeyine bırakıldıkları andan itibaren benzerdir. Ancak şiddetli değişim ve düzgün değişim bölgelerinde aynı davranışı göstermesine rağmen Model 1-15'teki paletin şekil değiştirme değerleri daha yüksektir. Model 2'deki kar paletlerinin (5 mm, 10 mm ve 15 mm) kar yüzeyine bırakıldıkları andan itibaren benzer davranış sergilemişlerdir. Ancak şiddetli değişim bölgesi ve düzgün değişim bölgelerinde aynı davranışı göstermesine rağmen 2-15 mm'lik paletin kardaki şekil değiştirme değerleri daha yüksektir.

5.2. Tartışma

Çalışmada elde edilen verilerin çoğu literatür çalışmaları ile karşılaştırılmış, teorik ve uygulamalı yaklaşımlarla paralellik göstermiş ve gerçek modele yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Çalışmada elde edilen veriler arası farklılıklar vardır. Bu farklılıkların en temel nedenlerinden birisi dış derinliği ve desen farkıdır. Dış derinliği ve desen derinliğinin artışı hem temas alanında değişime neden olmakta hem de tekerleğin karda batma gerilmesine kadar tüm değerlerinde etkili olmasını sağlayabilmektedir. Çalışmada elde edilen veriler hareket halindeki tekerleklerden kesit alınarak elde edilmiştir. Özellikle grafiklerde ilk anda (temas anı) maksimum değişimler elde edilmiştir. Tekerleğin temas alanlarında ve kar yüzeyinde meydana gelen deformasyonlar ve gerilmeler literatüre uygun şekilde ve gerçek modele yakın değerler bulunmuştur.

Çalışmada elde edilen veriler literatür ile paralellik gösterip gerçek modele yakındır. Zemin değişikliği, değerlerin ve sonuçların değişmesine neden olmaktadır. Bu çalışmada belirtilen özelliklerdeki karlı zemin kullanılmıştır. Kar verileri girilirken ANSYS programının kendi parametreleri kabul edilmiştir.

Çalışmada üretilen tüm modeller aynı basınç ve kuvvet değerlerinde alınmıştır (200 kPa iç basınç, 4500 N düşey yük). Çalışmada elde edilen veriler farklı basınç ve yük değerlerinde daha farklı sonuçlar verecektir. Çalışmada kullanılan parametrelerin, palet deseni, üst yapı ve yüzey durumu gibi özellikleri (kar, buz vd.) değiştirilerek yeni çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- ANSYS, 2016. Academic Student Engineering Simulation Software, Erişim Tarihi: 04.05.2016, <http://www.ansys.com/products/academic>
- Barbosa, L.A.P., Magalhaes, P.S.G., 2014. Tire tread pattern design trigger on the stress distribution over rigid surfaces and soil compaction, *Journal of Terramechanics*, April 2015, pp. 27–38
- Borstad, C.P., McClung, D.M., 2011. Numerical modeling of tensile fracture initiation and propagation in snow slabs using nonlocal damage mechanics, *Cold Regions Science and Technology*, Volume 69, Issues 2–3, December 2011, pp. 145–155
- Botha, T.R., Els, P.S., 2014. Digital image correlation techniques for measuring tyre–road interface parameters: Part 2 – Longitudinal tyre slip ratio measurement, *Journal of Terramechanics*, October 2015, pp. 101–112
- Buhl, D., Fauve, M., Rhyner, H., 2001. The kinetic friction of polyethylen on snow: the influence of the snow temperature and the load, *Cold Regions Science and Technology*, Issues 2–3, December 2001, pp. 133–140
- Cho, J.R., 2013. Numerical estimation of rolling resistance and temperature distribution of 3-D periodic patterned tire, *International Journal of Solids and Structures*, Issue 1, 1 January 2013, pp. 86–96
- Cho, J.R., Lee, H.W., Sohn, J. S., Kim G.J., Woo, J.S., 2006. Numerical investigation of hydroplaning characteristics of three-dimensional patterned tire, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, Issue 6, November–December 2006, pp. 914–926
- Choi, J.H., Cho, J. R., Woo, J. S., Kim, K. W., 2012. Numerical investigation of snow traction characteristics of 3-D patterned tire, *Journal of Terramechanics*, Issue 2, April 2012, pp. 81–93
- Danielson, K.T., Noor, A.K., Green, J.S., 1996. Computational strategies for tire modeling and analysis, *Computers & Structures*, Issue 4, November 1996, pp. 673–693.
- Ella, S., Formagne, P., Koutsos, V., Blackford, J. R., 2013. Investigation of rubber friction on snow for tyres, *Tribology International*, March 2013, pp. 292–301
- Goodyear.CO, 2017 Erişim Tarihi: 12.03.2017. <http://www.goodyearolyardim.com/Home/Activation>
- Gray, J.P., Vantsevich, V.V., Paldan, J., 2016. Agile tire slippage dynamics for radical enhancement of vehicle mobility, *Journal of Terramechanics*, June 2016, pp. 14–37

- Haehnel, R.B., Shoop, S.A., 2004. A macroscale model for low density snow subjected to rapid loading, *Cold Regions Science and Technology*,. Issue 3, December 2004, pp. 193–211
- Hoever, C., Kropp, W., A model for investigating the influence of road surface texture and tyre tread pattern on rolling resistance, *Journal of Sound and Vibration*, 1 September 2015, pp. 161–176
- Huang, Y., Sun, J., Li, W., 2016. Experimental observations of the flexural failure process of snow covered ice, *Cold Regions Science and Technology*, September 2016, pp. 14–30
- İnci, M., 2015, Yük endeksi nedir? Farklı yük endeksi olan lastik bir arada kullanılır mı?, Erişim Tarihi: 06.12.2016 <http://www.golftutkusu.com/topic/503-y%C3%BCK-endeksi-nedir-farkl%C4%B1-y%C3%BCK-endeksi-olan-lastik-bir-arada-kullan%C4%B1l%C4%B1r-m%C4%B1/>
- Jamshidian, M., Tehrany, E. A., Imran, M., Jacquot, M., Desobry, S., 2010 Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies, Issue 5, pp. 437–599
- Karaytuğ, B., 2009. Footprint Analysis Of Radial Passenger Tire, Çukurova University, Institute Of Natural And Applied Sciences, MSc.Thesis, Adana.
- Kaur, S., Satyawali, P.K., 2016. Estimation of snow density from SnowMicroPen measurements, *Cold Regions Science and Technology*, February 2017, pp. 1–10
- KGM, 2015. Trafik Kazalari Özeti 2014, Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığı Mayıs 2015, Erişim Tarihi: 28.12.2015, <http://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Trafik/TrafikKazalariOzeti2014.pdf>
- Klein, A.K., Sinha, N. K., Loset, S., Norheim, A., 2006. Microstructural analytical techniques for snow compacted by an aircraft tire, *Tribology International*, Issue 2, February 2007, pp. 412–417
- Klein-Paste, A., Sinha, N.K., 2010. Microstructural investigation of ice surfaces after rubber–ice and sand–ice sliding friction tests, *Tribology International*, Issues 5–6, May–June 2010. pp. 1151–1157
- Krmela, J., Krmelová, 2016. Replacement of Belt Structure for FEA of Tire, *Procedia Engineering*, 2016, pp. 132-136
- Lang, R.M., Blaisdell, G. L., D’Urso, C., Reinemer, G., Leshner, M., 1997. Processing snow for high strength roads and runways, *Cold Regions Science and Technology*, Issue 1, January 1997, pp. 17-31

- Lee, J.H., 2011. Finite element modeling of interfacial forces and contact stresses of pneumatic tire on fresh snow for combined longitudinal and lateral slips, Elsevier, Journal of Terramechanics, 48/2011, pp. 171–197
- Lever, J.H., 2006. Mobility of a lightweight tracked robot over deep snow, Journal of Terramechanics, Issue 4, October 2006, pp. 527–551
- Li, L., Sandu, C., Lee, J., Liu, B., Stochastic modeling of tire–snow interaction using a polynomial chaos approach, Journal of Terramechanics, Issue 4, August 2009, pp. 165–188
- Lindemuth, B.E., 2006. An Overview of Tire Technology, In: A.N., Walter, J.D., 2006. Pneumatic Tire Gent, Part of the Mechanical Engineering Commons, National Highway Traffic Safety Administration, USA, pp. 1-27.
- Liu, C.H., Wong, J.Y., 1996. Numerical simulations of tire-soil interaction based on critical state soil mechanics, Journal of Terramechanics, Issue 5, September 1996, pp. 209-221
- Logan, D.L., 2012. A First Course In The Finite Element Method, 5th Edition, Global Engineering, Cengage Learning, USA.
- Mc Allen, J., Cuitiño, A.M., Sernas, V., 1996. Numerical investigation of the deformation characteristics and heat generation in pneumatic aircraft tires: Part I. Mechanical modeling, Finite Elements in Analysis and Design, Issues 2–4, 15 November 1996, pp. 241-263
- Mousseau, C.W., Hulbert, G.M., 1994. An efficient tire model for analysis of spindle forces produced by a tire impacting large obstacles, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Issues 1–2, 15 August 1996, pp. 15-34
- Nackenhorst, U., 2004. The ALE-formulation of bodies in rolling contact: Theoretical foundations and finite element approach, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Issues 39–41, 1 October 2004, pp. 4299–4322
- Nakajima, Y., 2003. Analytical model of longitudinal tire traction in snow, Journal of Terramechanics, Issue 1, January 2003, pp. 63–82
- Norheima, A., Sinha, N.K., Yager, T.J., Effects of the structure and properties of ice and snow on the friction of aircraft tyres on movement area surfaces, Tribology International, Issue 9, September 2001, pp. 617–623
- Omark, M., 2014. Brush-model Simulation of Tire-Road Friction, Luleå University of Technology Department of Engineering Sciences and Mathematics, Master's Thesis, Sweden.
- Parker, M.W., 2009. Verification and validation of a winter driving simulator, Journal of Terramechanics, Issue 4, August 2009, pp. 127–139

- Pernas-Sánchez, J., Pedroche, D. A., Varas, D., Puente, J. L., Zaera, R., 2012. Numerical modeling of ice behavior under high velocity impacts, *International Journal of Solids and Structures*, Issue 14, July 2012, pp. 1919–1927
- Petrovic, J.J., 2003. Mechanical properties of ice and snow, *Journal Of Materials Science*, Issue (2003), pp. 1– 6
- RWMP, 2017. How Do Weather Events Impact Roads?, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Road Weather Management Program, Erişim Tarihi: 02.01.2016, https://ops.fhwa.dot.gov/weather/q1_roadimpact.htm
- şengöz, B., Tanyel, S., Görkem, Ç., Kaçmaz, B., 2010. Evaluation Of Friction Resistance Of Urban Roads Of Izmir In Terms Of Traffic Safety, *DEÜ Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, ss. 75-85.
- Shi, C., Hu, Z., Ringsberg, J., Luo, Y., 2017. Validation of a temperature-gradient-dependent elastic-plastic material model of ice with finite element simulations, *Cold Regions Science and Technology*, January 2017, pp. 15–25
- Skouvaklis, G., Blackford, J. R., Koutsos, V., 2011. Friction of rubber on ice: A new machine, influence of rubber properties and sliding parameters, Institute for Materials and Processes, School of Engineering, King's Buildings, The University of Edinburgh, EH93JL.
- Steyn, W.J., Ilse, M., 2015. Evaluation of Tire/Surfacing/Base Contact Stresses and Texture Depth, *International Journal of Transportation Science and Technology*, Issue 1, 1 March 2015, pp. 107–118
- Surendar, M., Battacharya, A., Venkataraman, G., 2015. Estimation of snow density using full-polarimetric Synthetic Aperture Radar (SAR) data, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2015, pp. 156–165
- TS 663, 2007. Karayolu taşıtları - Patinaj zincirleri, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TÜİK, 2014. Karayolu Trafik Kaza İstatistikleri, 2014, Türkiye İstatistik Kurumu, Haber Bülteni, Erişim Tarihi: 05.12.2015, <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=18760>
- USPO, 1904. Grip-tread for pneumatic tires- Harry D. Weed, Of Canastota, New Yor, United States Patent Office, Patented August 23, 1904, Patent no: 768,495, USA.
- Vanarrea, J.P., 2007. 3D numerical model of snow deformation without failure and its application to cold room mechanical tests, *Cold Regions Science and Technology*, Issues 1–3, November 2007, pp. 3–12

- Vhang, C.L., Yang S.H., 2009. Simulation of wheel impact test using finite element method, *Engineering Failure Analysis*, Issue 5, July 2009, pp. 1711–1719
- Wei, C., Olatunbosun, O.A., 2014. Transient dynamic behaviour of finite element tire traversing obstacles with different heights, *Journal of Terramechanics*, December 2014, pp. 1–16
- WHO, 2014. Road traffic injuries, Media centre, World health organization, Erişim Tarihi: 05.04.2017, <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs358/en/>
- Xiong, Y., Tuononen, A., 2015. Rolling deformation of truck tires: Measurement and analysis using a tire sensing approach, *Journal of Terramechanics*, October 2015, pp. 33–42
- Yan, X., 2001. Non-linear three-dimensional finite element modeling of radial tires, *Mathematics and Computers in Simulation*, Volume 58, Issue 1, 19 December 2001, pp. 51–70

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mahyar JAFARZADYEGANEH

Doğum Yeri ve Yılı : Tabriz, 1993

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : mahyar.yeganeh1993@gmail.com

Eğitim Durumu

Lise : Tabriz Meshqat Lisesi, 2009

Lisans : SDÜ, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği