



DİKEY EKSENLİ ÇALIŞAN PELET YAKIT MAKİNELERİNDE DİSK YAYLARIN
KULLANILMASI VE BASINÇ REGÜLASYONU

Ebubekir Can GÜNEŞ

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül – 2016

DİKEY EKSENLİ ÇALIŞAN PELET YAKIT MAKİNELERİNDE DİSK YAYLARIN
KULLANILMASI VE BASINÇ REGÜLASYONU

Ebubekir Can GÜNEŞ

Dumlupınar Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca

Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman : Doç. Dr. İsmet ÇELİK

Eylül - 2016

KABUL VE ONAY SAYFASI

Ebubekir Can GÜNEŞ'İN YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı DİKEY EKSENLİ ÇALIŞAN PELET YAKIT MAKİNELERİNDE DISK YAYLARIN KULLANILMASI VE BASINÇ REGÜLASYONU başlıklı bu çalışma, jürimizce Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

27/09/2016

Üye : Doç. Dr. İsmet ÇELİK (Danışman)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Agâh AYGHAHOĞLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ali Serhat ERSOYOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hasan GÖÇMEZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Bu tezin hazırlanmasında Akademik kurallara riayet ettiğimizi, özgün bir çalışma olduğunu ve yapılan tez çalışmasının bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olduğunu, çalışma kapsamında teze ait olmayan veriler için kaynak gösterildiğini ve kaynaklar dizininde belirtildiğini, Yüksek Öğretim Kurulu tarafından kullanılmak üzere önerilen ve Dumlupınar Üniversitesi tarafından kullanılan İntihal Programı ile tarandığını ve benzerlik oranının % 0 çıktığını beyan ederiz. Aykırı bir durum ortaya çıktığı takdirde tüm hukuki sonuçlara razı olduğumuzu taahhüt ederiz.

Doç.Dr. İsmet ÇELİK

Ebubekir Can GÜNEŞ

DİKEY EKSENLİ ÇALIŞAN PELET YAKIT MAKİNELERİNDE DİSK YAYLARIN KULLANILMASI VE BASINÇ REGÜLASYONU

Ebubekir Can GÜNEŞ

Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2016

Tez Danışmanı: Doç. Dr. İsmet ÇELİK

ÖZET

Günümüzde insanlığın enerji ihtiyacının karşılanmasında birincil olarak kullanılan yakıtlar fosil enerji kaynaklarıdır. Ancak bu rezervin gün geçtikçe azalması ve çevresel etkileri, insanları alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarına artan bir hızda yöneltmektedir.

Alternatif enerji kaynaklarından önemli birisi de biyokütledir. Biyokütlenin katı yakıt olarak kullanılabilmesi için hacimsel yoğunluğunun artırılması gereklidir. Bunun için kullanılan en yaygın ve temel yöntem peletlemedir.

Peletleme yönteminde, öğütülmüş biyokütle delikli bir kalıptan, üzerinde dönen ruloların yaptığı sıkıştırma basıncı ile çıkarılma zorlanır. Peletleme makinelerinde çalışma koşullarının değişkenliğinden kaynaklanan, basınç düzensizliği, aşırı yük altına girme ve tıkanma, kalıp/rulo deformasyonu gibi kullanım sorunları oluşmaktadır. Bu çalışmada peletleme makinelerine disk yaylar ilâve edilerek bu sorunun çözümü incelenmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılan, dikey ekseninde çalışan peletleme sistemine ilk durumda tek bir disk yay sonrasında paralel olarak iki disk yay ilâve edilmiştir. Her iki durumda disk yayların kuvvet-deformasyon, gerilme-deformasyon ilişkileri ve buna bağlı oluşan peletleme basınçları, disk yayların hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan Almen-Laszlo hesaplaması ve sonlu elemanlar analizi yöntemleriyle tespit edilmiştir.

Dış çapı 125 mm, iç çapı 71 mm, koni yüksekliği 2,9mm ve kalınlığı 8 mm olan disk yaylar peletleme makinesinde kullanılmıştır. Montajda koni yüksekliğinin 0,25 katı kadar deforme edilen disk yaylar, çalışma koşullarında koni yüksekliğinin en çok 0,75 katı kadar deforme olabileceği öngörülmüştür. Disk yayların pres rulolarına uyguladığı kuvvet üzerinden Hertz basınç değerleri hesaplanmıştır. Tek disk yay kullanıldığı durumda ortalama peletleme basıncı yaklaşık 153-265 MPa, paralel iki disk yayda 222-390 MPa aralığında olduğu bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Biyokütle, Peletleme, Disk Yay, Almen-Laszlo Hesaplaması, Sonlu Elemanlar Analizi

UTILIZING DISC SPRINGS IN VERTICAL AXIS OPERATED PELLET MILLS AND PRESSURE REGULATION

Ebubekir Can GÜNEŞ

Mechanical Engineering, Master's Thesis, 2016

Thesis Instructor: Doç. Dr. İsmet ÇELİK

SUMMARY

Primary fuels used in meeting energy needs of humanity are fossil energy sources. However, decreasing reserve in time and environmental effects impel people alternative and renewable energy sources at an increasing rate.

One of the important kind of alternative energy sources is biomass. Biomass needs to be volumetrically densified for solid fuel usage. Most common and basic technique used in this process is pelletizing.

In pelletizing technique, ground biomass is extruded through a perforated die by the compression of rotating rollers on. Due to the instability of working conditions of pelletizing machines, operating issues as pressure irregularity, overloading, choking, and deformation of die/roller occur. In this study, solution of this problem is examined by integrating disc spring to pelletizing machines.

Firstly a single disc spring, subsequently parallel stacked two disc springs are integrated to vertical axis operated pelletizing system used in this study. In both cases force-deformation, stress-deformation relations and accordingly resulting pelletizing pressures are determined utilizing commonly used Almen-Laszlo algorithm and finite element analysis methods.

Disc springs with 125 mm outer diameter, 71 mm inner diameter, 2,9 mm cone height and 8mm thickness are utilized in the pelletizing machine. When mounting, disc springs are deformed 0,25 times as its cone height and expected to deform maximum 0,75 times as its cone height in working conditions. Hertz pressure values are calculated via forces applied to press rollers by disc springs. In the case a single disc spring used approximately 153-265 MPa, when parallel two springs used 222-390 Mpa interval of pelletizing pressure occurring determined.

Key Words: Biomass, Pelletizing, Disc Spring, Almen-Laszlo Algorithm, Finite Element Analysis

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında, her aşamada danışmanlığına başvurup desteğini gördüğüm, bana yeni ufuklar kazandıran değerli danışman hocam Doç. Dr. İsmet ÇELİK'E; çalışmanın uygulama kısmında kullandığımız peletleme makinesinin Sanayi Bakanlığı bütçesiyle üretilmesinde proje başvuru sahibi olan Makine Müh. Sercan BÜLENT'E; makinenin imalat, kurulum, işletme faaliyetleri sırasında emeği geçen herkese; eğitim hayatım boyunca sahip olduğum birikimin ortaya çıkmasında pay sahibi tüm hocalarıma ve aziz devletimize; hayatım boyunca bütün çalışmalarında maddi ve manevi desteğini esirgemeyen başta annem ve babam, Ayşen ve Mustafa GÜNEŞ, olmak üzere aileme teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
SUMMARY	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. BİYOKÜTLE YOĞUNLAŞTIRMA ÇALIŞMALARI.....	5
2.1. Biyokütle Briketlenmesi Üzerine Çalışmalar	5
2.2. Biyokütle Peletlenmesi Üzerine Çalışmalar	7
2.3. Biyokütle Üzerine Diğer Yakıt Çalışmaları	12
2.4. Biyokütle Yoğunlaştırma/Presleme Makineleri	12
2.4.1. Briketleme makineleri.....	13
2.4.2. Peletleme makineleri.....	13
2.4.2.1. Pelet makinelerinin kullanım sorunları.....	16
3. DİSK YAYLAR.....	20
3.1. Disk Yayların Kullanım Alanları	20
3.2. Disk Yayların Sınıflandırılması.....	25
3.3. Disk Yayların Hesaplamaları.....	26
3.4. Disk Yayların Birlikte Kullanımı	29
3.5. Disk Yay Uluslararası Standartları	31
3.6. Disk Yayların Mukavemet Kontrolü	33
3.7. Disk Yaylar Üzerine Güncel Çalışmalar	34
4. YAPILAN ÇALIŞMA	38
4.1. Disk Yay Seçimi ve Hesaplama	41
4.1.1. Tek disk yay için hesaplamalar	43
4.1.2. Paralel iki disk yay için hesaplamalar	45
4.2. Sonlu Elemanlar Analizi.....	47
4.2.1. Ağ yapısı (Mesh oluşturma).....	49

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.2.2. Sınır koşullarını tanımlanması	50
4.2.2.1 Tek disk yay sınır koşulları.....	50
4.2.2.2. Paralel iki disk yay sınır koşulları	52
4.3. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları	53
4.3.1. Tek disk yay için analiz sonuçları.....	53
4.3.2. Paralel iki disk yay için analiz sonuçları.....	55
 5. HESAPLAMA ve SONLU ELEMANLAR ANALİZİ SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI VE BULGULAR.....	 58
5.1. Hertz Basıncı Hesaplanması	64
 6. SONUÇ, DEĞERLENDİRME ve ÖNERİLER.....	 67
KAYNAKLAR DİZİNİ	69
 EKLER	
Ek-1: Çizelge 1. DIN 2093 Standardı Disk Yay Özellikleri Tablosundan Bir Kesit	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Geçmişten günümüze dünya geneli toplam enerji tedariki.	1
1.2. Dünya geneli birincil enerji kaynaklarının kullanım oranlarının geçmişi, bugünü ve geleceği.....	2
2.1. Briketleme makinesi kesiti ve üretilmiş briketler.	13
2.2. (I) Disk kalıplı (Dikey eksen dönüşlü) Pelet presi, (II) Halka kalıplı (Yatay eksen dönüşlü) Pelet presi, (a) Rulolar (b) Delikli kalıp (c) Pelet çıkışı.	14
2.3. Örnek bir pelet presi.....	14
2.4. Pelet Preslerinde Kullanılan Çeşitli (a)Kalıp ve (b)Rulolar.	15
2.5. Kalıp kanalı içindeki biyokütlenin sıkışması sırasında etkili olan kuvvetler.....	15
2.6. (a) Pelet makinesinin kırılan rulo dişi, (b) İçine kaçan deforme olmuş pullar.	18
3.1. M4 Anti-Tank mayınının fünye mekanizmasında disk yay kullanımı.....	21
3.2. Yarış aracı ve motosiklet süspansiyon sisteminde disk yay kullanımı.	21
3.3. Hidrolik kontrol ünitesinde disk yay kullanımı.....	22
3.4. Torna makinesinde disk yay kullanımı.	22
3.5. Basınçlı boruların desteklenmesinde disk yay kullanımı.	23
3.6. CNC pens sisteminde disk yay kullanımı.	24
3.7. Mekanik frenleme sisteminde disk yay kullanımı.....	24
3.8. Bir disk yay ve önemli ölçüleri: d : iç çap, D : dış çap, s : kalınlık, h :koni yüksekliği, $h+s$: toplam yükseklik.	25
3.9. Disk yaylarda kuvvet iletimi.	26
3.10. Disk yayda kuvvet altında oluşan gerilmeler: σ_c : çekme gerilmesi, σ_b : basma gerilmesi..	27
3.11. Disk yay karakteristikleri.	29
3.12. Disk yayların birlikte kullanım çeşitleri; F : tek yayın taşıdığı yük, δ : tek yayın deformasyonu; n : paralel istifli yay sayısı, i : seri istifli yay/yay grubu sayısı.	30
3.13. Farklı dizilimlerdeki disk yayların kuvvet-deformasyon davranışları.	30
3.14. Seri olarak istif edilmiş farklı paralel paketlerin kuvvet-deformasyon davranışları.	31
3.15. Disk yayların smith sürekli mukavemet diyagramları.	34
4.1. Peletleme sistemine disk yayların eklenmesi.	40
4.2. Çalışmamızda kullanılan traktör kuyruk mili tahrikli kombine mobil pelet makinesi.....	40
4.3. Kombine pelet makinesi bileşenlerinin gösterimi.	41
4.4. (a) tek (b) paralel (c) seri düzendeki disk yaylar.....	42
4.5. Tek disk yay için hesaplanan (a) kuvvet-deformasyon (b) gerilme-deformasyon değerleri.45	

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.6. Paralel iki disk yay için hesaplanan (a) kuvvet-deformasyon (b) gerilme-deformasyon değerleri.....	47
4.7. Optik tarayıcıdan elde edilen disk yay tarama verisi ve parametrik CAD modeli.....	49
4.8. Disk yayın ağ yapısı görünümü.....	49
4.9. Hex20 tipi ağ yapısı elemanı.....	50
4.10. Disk yay tabanı hareket kısıtlaması: X ve Y eksenini serbest, Z eksenini 0 mm.	51
4.11. Disk yayın üst kısmında tanımlanan deformasyon: Z ekseninde -0,725 mm (0,25h için).	51
4.12. Disk yayların (a) taban hareket kısıtlaması (b) üst kısmında tanımlan deformasyon.	52
4.13. Disk yaylar arasındaki yüzeyde tanımlanan sürtünme.....	52
4.14. Tek disk yay için sonlu elemanlar analizi (a) kuvvet-deformasyon ve (b) gerilme-deformasyon değerleri.....	54
4.15. Tek disk yay üzerinde oluşan eşdeğer (von-mises) gerilmelerin sonlu elemanlar analizi sonuçları: (a) 0,25h (b) 0,5h (c) 0,75h (d) h çökme miktarları için.....	55
4.16. Paralel iki disk yay için sonlu elemanlar analizi (a) kuvvet-deformasyon ve (b) gerilme-deformasyon ilişkisi.	56
4.17. Paralel iki disk yay üzerinde oluşan eşdeğer (von-mises) gerilmelerin sonlu elemanlar analizi sonuçları: a) 0,25h b) 0,5h c) 0,75h d) h çökme miktarları için.....	57
5.1. Tek disk yay için A-L yöntemi ve SEA (a) kuvvet-deformasyon ve (b) gerilme-deformasyon ilişkisi sonuçlarının karşılaştırmalı grafiği.	60
5.2. Paralel iki disk yay için A-L yöntemi ve SEA (a) kuvvet-deformasyon (b) gerilme-deformasyon ilişkisi sonuçlarının karşılaştırmalı grafiği.	61
5.3. Sürtünmeli ve sürtünmesiz paralel disk yay koşulları için (a) kuvvet deformasyon ve (b) gerilme-deformasyon karşılaştırması.	62
5.4. Paralel iki disk yayda sürtünme etkisiyle oluşan kuvvet ve gerilme değerlerinin yüzde farklarının deformasyon miktarına bağlı gösterimi.	64
5.5. Rulo-Kalıp temasında hertz basıncı hesabı için parametrelerin tanımlanması: b: temas yüzeyi yarı-genişliği, d_1 : silindir çapı, l:silindir uzunluğu, F: uygulanan kuvvet.....	65
5.6. Kalıp üzerinde oluşan Hertz basınç dağılımı ve ortalama değerinin gösterimi.....	66

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Pelet ve Briket özellikleri karşılaştırması.....	4
3.1. DIN 2093 Standardı disk yay çap ve eşmerkezlilik toleransları.	33
3.2. DIN 2093 Disk yay kalınlık, yükseklik ve kuvvet toleransları	33
4.1. Kullanılan disk yayın ölçüleri ve ilişkili parametreleri.....	42
4.2. Tek disk yay için sonlu elemanlar analizi sonuçları	53
4.3. Paralel iki disk yay için sonlu elemanlar analizi sonuçları.	56
5.1. Tek bir disk yay için A-L yöntemi ve sonlu elemanlar analizi sonuçları.....	59
5.2. Paralel iki disk yay için A-L yöntemi ve sonlu elemanlar analizi sonuçları.....	59
5.3. Paralel iki disk yay için sonlu elemanlar analiziyle sürtünmeli ve sürtünmesiz durumdaki sonuçlar	59

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simge

kJ	Kilojoule
kcal	Kilokalori
μm	Mikrometre
mm	Milimetre
m^3	Metreküp
MPa	Megapascal
N	Newton
kN	Kilonewton
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
μ	Sürtünme katsayısı
P	Basınç
F	Kuvvet
λ	Radyal/eksenel basınç oranı
d	Disk yay iç çapı
D	Disk yay dış çapı
s	Disk yay kalınlığı
h	Disk yay koni yüksekliği
E	Elastisite(Young) Modülü
δ	Deformasyon miktarı
ν	Poisson oranı
k	Yay rijitlik katsayısı
σ	Gerilme
m, m_1, m_2	Disk yay hesabında yardımcı katsayılar

Kısaltma

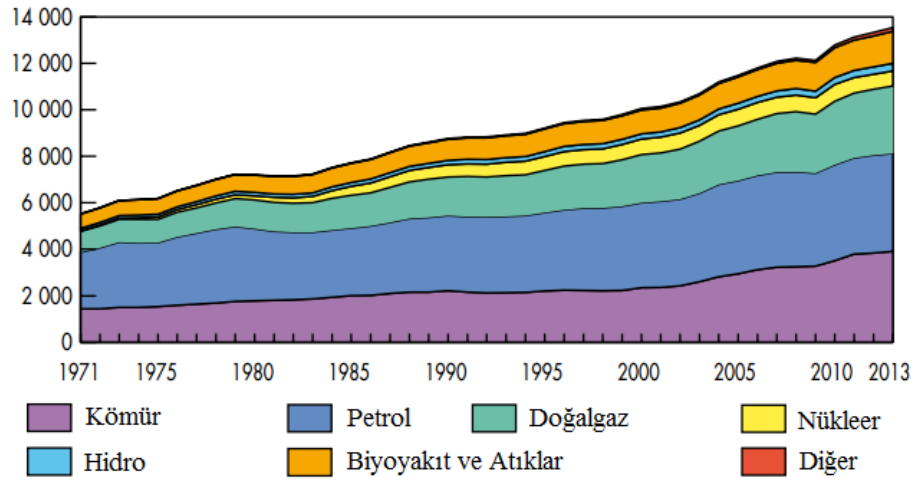
ENplus	Avrupa Pelet Standartı
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
DIN	Deutsches Institut für Normung(Alman Standartları Enstitüsü)
PTO	Power take-off(Güç çıkışı)
HP	Horse power(Beygir gücü)
CAD	Computer Aided Drawing(Bilgisayar Destekli Çizim)
A-L	Almen-Laszlo

1. GİRİŞ

Enerji, günümüz dünyasında insanlığın refahının devamı için gerekli en önemli ihtiyaçlardan birisidir. İnsanlığın enerji ihtiyacı, artan nüfus, değişen ve gelişen yaşam standartları nedeniyle her geçen gün daha fazla artış göstermektedir. Şekil 1.1'de görüldüğü gibi son 40 yıllık süreçte her türlü enerji kaynağının tedariki genel olarak sürekli artmaktadır.

Söz konusu enerjinin karşılanmasında kullanılan en önemli kaynaklar, fosil yakıtlardır. Fosil yakıt rezervinin her geçen gün azalması ve çevreye yaptığı etkiler bu kaynakların dezavantajlarıdır.

Yakıt Cinsine Göre Dünya Üzerindeki Toplam Enerji Tedariki, 1971-2013 Arası
(Milyon Ton Eşdeğer Petrol)



Şekil 1.1. Geçmişten günümüze dünya geneli toplam enerji tedariki (Key World Energy Statistics 2015, International Energy Agency).

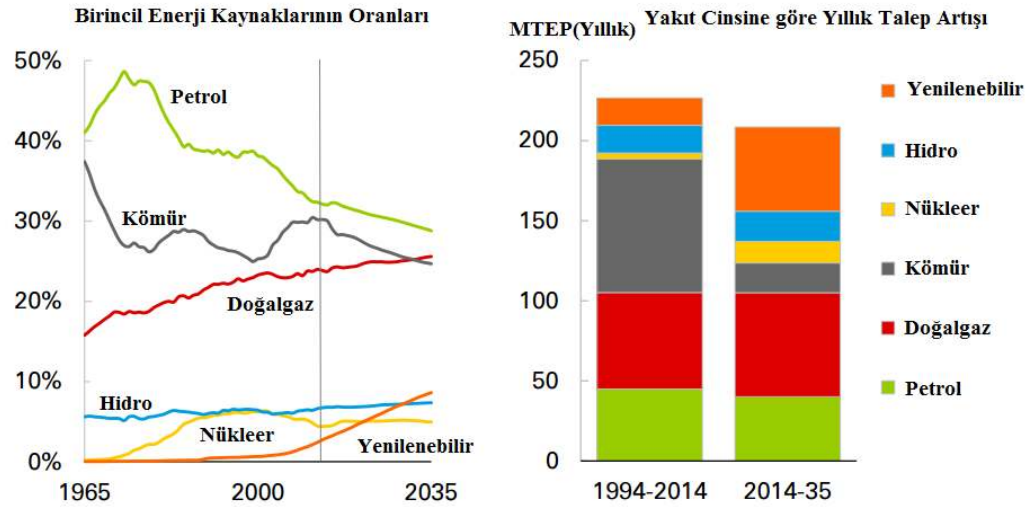
Günümüzde fosil yakıtlar yerine geçebilecek yakıtlar daha çok yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Bu kaynakların çevreyi koruması ve rezerv sorunu olmaması fosil yakıtlar karşısındaki üstünlüğüdür.

Fosil yakıtlar, hâlen hızlı bir şekilde tüketilmekte ve yenilenebilir enerji kaynakları istenilen seviyede kullanılmamaktadır. Bunun nedenleri olarak yenilenebilir enerji kaynaklarından alınan verimin daha düşük olması, kurulum maliyetleri ve küresel şirketlerin pazar paylarını koruma eğiliminde olması şeklinde sıralanabilir.

Son yıllarda fosil enerji kaynaklarından yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru bir kayma gözlenmektedir (Şekil 1.2). Önümüzdeki süreçte de bu geçişin giderek artması beklenmektedir. Bu sayede fosil enerji kaynaklarına olan bağımlılığın azaltılması ve çevreye zarar vermeyen enerji kaynaklarının kullanıma sokulması hedeflenmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından en önemlilerinden birisi biyokütledir. Biyokütle, ağaç, bitki, gübre ve kanalizasyon çamuru gibi kaynaklardan elde edilebilen ve biyolojik kaynaklı maddelerden oluşan, yakıt olarak kullanılma kapasitesi olan yenilenebilir enerji kaynaklarına verilen isimdir (Chiew vd., 2011).

Biyokütlenin yanması sonucu oluşan karbondioksit atmosferden bitkiler tarafından fotosentez amacıyla geri emilerek doğal döngüsüne girmiş olur. Bu bakımdan biyokütle karbon nötrallitesi olan bir yakıt olarak tanımlanmaktadır (Jones, 2015). Ayrıca kömür gibi fosil yakıtların aksine atmosfere kükürt ve azot tabanlı gazların salınımı yok denecek kadar azdır (Herbert ve Krishnan, 2016).



Şekil 1.2. Dünya genelinde birincil enerji kaynaklarının kullanım oranlarının geçmişi, bugünü ve geleceği (2016 Energy Outlook, BP p.l.c., 2016).

Biyokütlenin enerji elde etmede etkili bir şekilde kullanılabilmesi için hacimsel yoğunluğunun artırılması gereklidir. Bunun için biyokütlenin yoğun bir sıkıştırma işleminden geçirilmesi gerekir (Jackson vd., 2016). Yoğunlaştırma işlemi için kullanılan temel yöntemler; peletleme, briketleme, kalıptan çıkarma (ekstrüzyon) olarak sıralanabilir.

Söz konusu yöntemler arasında peletleme işlemi, son ürünün kullanım kolaylığı ve yanma verimi açısından en etkili olarak öne çıkmaktadır.

Peletleme yönteminde, öğütülmüş biyokütle delikli bir kalıptan, üzerinde dönen ruloların yaptığı sıkıştırma basıncı ile çıkartılmaya zorlanır. Bu sayede silindirik şekilli, yoğunlaştırılmış ve birbirine çok yakın büyüklükteki parçalar halinde yakıt elde edilmiş olur.

Peletleme işleminde üretilen peletlerin kalitesini etkileyen birçok faktör bulunur. Bu faktörler; nem miktarı, hammadde parçacık boyutu, sıkıştırma basıncı, biyokütlenin cinsi ve bağlayıcı ilavesi olarak sıralanabilir.

Peletleme işlemi sonucu üretilen granüller pelet yakıt olarak isimlendirilmektedir. Pelet yakıtlar birçok farklı biyokütle çeşidi ve katkıları kullanılarak üretilmektedir.

Biyokütleden üretilen pelet yakıtlar, cinsine göre otsu ve odunsu olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Her iki cins pelet yakıt olarak kullanılabilen özellikte olmasına rağmen otsu peletlerin daha çok yem sanayinde, odunsu peletlerin ise enerji elde etmede yakıt olarak kullanımı yaygındır.

Biyokütleden elde edilen peletlerle ilgili birçok güncel çalışma mevcuttur. Farklı malzeme cinslerine göre değişen üretim parametrelerine bu çalışmalardan ulaşmak mümkündür.

Biyokütlenin yoğunlaştırılarak kullanılmasında bir diğer önemli yöntem de briketlemedir. Bu yöntemde peletlemeye nazaran daha büyük boyutlu, yoğunlaştırılmış farklı geometrilerde (prizmatik, küresel, oval yüzeyli, silindirik) briket yapıları elde edilir. Briketleme yönteminde, briketler belirli şekildeki bir kalıp içinde preslenerek veya çıkartılma (ekstrüzyon) yapılarak üretilir.

Pelet ve briket biyokütle yakıtlarının özelliklerinin karşılaştırması Çizelge 1.1'de verilmiştir. Peletleme yönteminde daha yoğun, dayanıklı, pürüzsüz (tozsuz) ve küçük yapıda parçacıklar elde edildiği için bu yöntemde elde edilen ürünlerin otomatik kullanıma uygun olması öne çıkan bir avantajdır. Briketlemede nihai ürün peletlemeye göre daha büyük olduğu için taşıma, depolama ve yanma performansı peletleme kadar iyi değildir. Ancak büyük boyutlu yoğunlaştırılmış parçalar elde edilip kullanılmak istenildiği zaman daha avantajlı olduğu görülür.

Avrupa pelet standartlarına göre (ENplus) peletler kalitelerine göre A1, A2 ve B sınıfı olmak üzere üç kalite sınıfına ayrılmıştır. Her üç sınıfta da pelet çapı 6 ± 1 veya 8 ± 1 mm, uzunluğu 3,5-40 mm aralığında, nem miktarı ağırlıkça %10'un altında ve kül oranının A1'de

ağırlıkça %0,7'den az, A2'de %1,2'den az ve B sınıfında %2'den az olması gerektiği belirlenmiştir (ENPlus Handbook, Part 3).

Çizelge 1.1. Pelet ve Briket özellikleri karşılaştırması

	Pelet	Briket
Görünüm		
Hammadde	Kurutulmuş (belirli nem miktarına sahip) ve öğütülmüş biyokütle	Kurutulmuş (belirli nem miktarına sahip) ve öğütülmüş (tane büyüklüğü peletlemeye göre daha büyük olabilir) biyokütle
Form	Silindirik (ϕ 6-12mm, uzunluk çapın 4-5 katı)	Silindirik (ϕ 80-90mm, uzunluk çapın 4-5 katı) ya da prizmatik (150x70x60 mm)
Yapısı	Dayanıklı, sert, tozsuz	Nispeten dayanıksız, kolay ufalanabilir
Yığın Yoğunluğu	En az 600 kg/m ³	600-700 kg/m ³
Görünüm	Pürüzsüz	Genelde pürüzlü
Nakliye	Yığinsal, poşet/çuval	Birimsel, istif olarak
Kullanım	Elle veya otomatik olarak	Elle kullanım

Briketleme yönteminin, kömür tozlarının yoğunlaştırılmasında da kullanımı yaygındır. Güncel çalışmalarda, biyokütle ve kömür tozlarının karıştırılarak briketlenmesi konusu ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Sözü edilen çalışmalarda, biyokütlenin kömür tozları için bağlayıcı görevi yapması ve nihai üründe kömür sayesinde ısı değeri artışı hedeflenmiştir. Ayrıca biyokütle ve kömürün birlikte yanması sonucu SO_x, NO_x ve zehirli metal (çinko, kurşun, cıva, kadmiyum vb.) emisyonlarında azalma gözlenmesi (Ross vd., 2002) bu çalışmaların öne çıkan dayanak noktaları olmuştur.

Biyokütleyi yoğunlaştırarak yakıt yapma konusunda geçmişte yapılan akademik araştırmalar incelendiğinde aşağıdaki çalışmaların ön plana çıktığı görülmektedir.

2. BİYOKÜTLE YOĞUNLAŞTIRMA ÇALIŞMALARI

2.1. Biyokütle Briketlenmesi Üzerine Çalışmalar

Biyokütle, sürdürülebilir, düşük SO_x/NO_x emisyonuna sahip ve CO_2 nötralitesi olan bir enerji kaynağı olmasına rağmen hâlen dünyada ve ülkemizde yeterli kullanım düzeyinde değildir. Biyokütle tüketimindeki artışın ekonomik ve pratik olarak bazı sorunları vardır. Bunlar; düşük enerji yoğunluğu, yüksek nakliye maliyeti, yüksek parçacık emisyonu, mevsimsel elde edilebilirlik, depolama sorunları ve gerekli kullanım ekipmanlarının yatırım maliyeti olarak sıralanabilir. Benzer sorunlar kömür madenlerinde bulunan atık durumdaki toz kömürde de mevcuttur. Atık durumda bulunan toz kömürün biyokütle ile briketlenmesi işlemi sonucunda, düşük nemli ve yüksek yoğunluklu, nakliye edilmek için elverişli nihai ürünler elde edilmiş olur.

Taulbee ve arkadaşları yaptıkları briketleme çalışmasında üretilen briketlerin kalitesinin, bağlayıcı yoğunluğu, talaş (biyokütle) yoğunluğu ve çeşidi, kömür nem miktarı ve toz kömürün kül oranı ile alakalı olduğunu belirtmişlerdir. Briketlemede bağlayıcı önemli unsurlardan birisidir. Üretilen ürünün sağlamlığına, kalori değerine, yanma verimine ve kül oranına etki eder. Bu açıdan briketlenmek istenilen biyokütle çeşidine ve özelliklerine göre doğru bağlayıcıyı seçmek önemlidir. Taulbee ve arkadaşları yaptıkları çalışmada bağlayıcı olarak guar gamı, jelatinize nişasta ve lignin-kireçtaşı bileşimini kullanmışlardır. Ürettikleri briketler %90 kömür ve %10 talaş içermekte ve kalori değeri yaklaşık 3200 kJ/kg'dır (Taulbee vd., 2012).

Tarımsal atıklardan elde edilen biyokütlenin kömürle birleştirilerek briketlenmesi kaliteli bir yakıt üretmek için verimli bir yöntemdir. Atık konumunda bulunan bu malzemeler sahip oldukları enerjinin yanı sıra kömürün briketlenmesi için bağlayıcı özellik de göstermektedir. Bu yöntem geleneksel kömür kullanımına ekonomik ve ekolojik bir çözüm olarak geliştirilebilir. Bu yöntemle hem kalori değeri yüksek yakıtlar elde etmek hem de atık durumunda bulunan malzemeleri değerlendirmek mümkündür.

Zanjani ve arkadaşları odun talaşı ve pancar posasını kömürle karıştırarak briketlenmesi üzerinde çalışmışlardır. Bağlayıcı olarak katran ve kalsiyum karbonat kullanmışlardır. Katran, su çekme eğiliminde olan talaşın suya dayanımını arttıracığından dolayı tercih edilmiştir. Kalsiyum karbonat ise briketlerin yanmasında SO_x emisyonunu azaltır ve kömür ile biyokütle arasında bir bağlayıcı işlevi görür. Sonrasında üretilen briketlerin kalitesinin belirlenmesi amacıyla basma dayanımı ve suya dayanım indisleri ölçülmüştür. Çalışma sonucunda fiziksel

kararlılıktaki en iyi bileşimde, talaşın katrana kütle oranı 15/8, su içeriği %3 ve kalsiyum karbonat içeriğinin ise %2.5 oranında olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada biyokütlenin kömürle karıştırılması sonucunda elde edilen briketlerin kömüre göre kalori değerinde büyük bir düşüş olmamasının yanında biyokütlenin sahip olduğu doğal bağlayıcılar sayesinde atık sülfür ve kül miktarında düşüş sağlandığı öne sürülmüştür (Zanjani vd., 2014).

Yaman ve arkadaşları linyit kömürünü %0-30 aralığında biyokütle ile briketleyerek elde edilen briketlerde düşme ve basma dayanımını arttırarak mekanik özelliklerde iyileştirme yapmayı hedeflemişlerdir. Çalışmalarında şeker melası, zeytin endüstrisi atıkları, çam kozalağı, odun talaşı, kâğıt fabrikası atıkları ve pamuk endüstrisi atıkları gibi çeşitli biyokütle örnekleri kullanmışlardır. Kâğıt fabrikası atıkları briketlerin düşme ve basma dayanımında iyileşme sağlarken, odun talaşı basma dayanımında artış sağlamıştır. Briketlerin suya olan dayanımı zeytin/pamuk atıkları, kozalak ve kâğıt atıkları katılmasıyla arttığı gözlenmiştir (Yaman vd., 2001).

Hiçyılmaz ve arkadaşları 0-6.35 mm aralığındaki parçacık boyutunda, orta kalori değerine sahip, yüksek kül ve kükürt içerikli kömür numunesini briketleme çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada briketlerin mekanik dayanımını arttırmak ve SO₂ emisyonu değerini düşürmek için briketlemede melas, kireç ve su karışımı kullanılmıştır. En iyi sonuç %10 melas, %15 kireç ve %10 su ile sağlanmıştır. Ancak kireç ilavesi SO₂ emisyonunu düşürmesine rağmen briketlerde yanma sonunda oluşan kül miktarını arttırmış ve yanma kalitesini olumsuz etkilemiştir (Hiçyılmaz vd., 2004).

Pandey ve Dhakal çam ağacı iğnelerini briketlerini bağlayıcı olarak %20 oranında kil kullanarak briketlemişlerdir. Fiziksel testlere ve yanma testlerine tâbi tutulan briketlerden elde edilen sonuçlara göre yanma verimi %27 bulunmuştur. Bu değer odunsu peletlerde %15.55'dir. Ayrıca sadece ilk yanma esnasında küçük bir duman oluşumu gözlenmiştir. Bu özellikler ürünlerin, ısıtma ve yemek pişirmede yakıt olarak kullanılabilirliği göstermektedir. 5230 kcal/kg ısı değere sahip olan briketler emisyon açısından da (0.570 mg/m³) çevresel standartlara uyum sağlamaktadır (Pandey ve Dhakal, 2013).

Yaman ve arkadaşları zeytin işleme artıklarını kâğıt fabrikası artıklarıyla briketleme yaparak fiziksel olarak dayanıklı briketler elde etmeyi hedeflemişlerdir. Öncelikle her iki biyokütleyi de 250 µm boyutuna getirip 150 ve 250 MPa arasındaki basınç değerlerinde oda sıcaklığında briketlemeye tabi tutmuşlardır. Yapılan fiziksel testlerde sadece zeytin artıklarından üretilen briketler yeteri kadar sağlam olmadığı görülmüştür. Kâğıt artıklarıyla harmanlanarak üretilen briketler lifli yapıda olması sayesinde yeterli sağlamlığa ulaşmıştır.

Ayrıca elde edilen yakıtın yanma karakteristiğinde (termogravimetrik analiz) büyük bir değişim olmamakla birlikte karıştırılan biyokütlelerin ortalaması şeklinde gözlemlenmiştir. Briketlemede kullanılan kağıt artıkları için en uygun nem oranı %9 olduğu belirlenmiştir; daha yüksek ve düşük nem oranlarında istenilen fiziksel sağlamlık oluşmamıştır (Yaman vd. 2000).

Mahidin ve arkadaşları hurma çekirdeği kabuğu ve hint fıstığı bitkisi biyokütlelerini, düşük ısı değerli kömürle briketleyerek yanma sonucu oluşan CO, NO_x ve SO_x gibi zararlı gazların emisyonunu azaltmayı hedeflemişlerdir. Ayrıca briket yapısına CaO tabanlı malzemeler ilave ederek hem bağlayıcı etkisi sağlanması hem de kömürdeki sülfürün tutulmasını öngörmüşlerdir. Biyo-briket ismini verdikleri bu ürünlerde kömürün biyokütleye ağırlıkça oranı %50:50, 60:40, 70:30, 80:20 değerlerinde tutulmuştur. İlave edilen kalsiyum, sülfür miktarına mol bazında (Ca/S) 1:1, 1.25:1, 1.75:1 ve 2:1 oranlarında tutularak briketleme yapılmıştır. Üretilen briketler fiziksel karakterizasyon ve yanma testlerine tâbi tutulmuştur. Elde edilen briketlerden kömür/biyokütle oranı %90:10 ve Ca/S oranı 1:1 (yaklaşık ağırlıkça %15 kireç içeren briketler) olanlar en iyi yanma veriminde olduğu tespit edilmiştir (Mahidin vd., 2013).

Demirbaş ve Şahin buğday samanı ve atık kâğıtları birlikte briketlemişlerdir. Farklı basınçlarda yaptıkları bu işlem sonucu elde edilen briketler yoğunluk, nem miktarı, eğilme ve basma gerilimi özellikleri bakımından incelenmiştir. Basma gerilmesi dayanımları ve en uygun nem oranları sırasıyla kağıt artıkları için 38.2 MPa ve %18, buğday samanı için 22.4 MPa ve %22, ağırlıkça %20 kağıt atığı içeren buğday samanı karışımı için 32 MPa ve %18 bulunmuştur. Bu çalışmayla kağıt atıklarının buğday samanı ve benzeri biyokütlenin briketlenmesinde veya peletleme gibi yoğunlaştırma işlemlerinde bağlayıcı olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Ayrıca buğday samanının tek başına briketlenmesinin oldukça zor olduğu, sıkıştırma işlemi öncesi 77-157 °C aralığına kadar ısıtıldığı belirtilmiştir. Bağlayıcı olarak kullanılan kâğıt atığı sayesinde, briket kalitesini belirleyen yoğunluk, nem oranı ve basma dayanımı değerlerinde iyileşme sağlandığı belirtilmiştir (Demirbaş ve Şahin, 1998).

2.2. Biyokütle Peletlenmesi Üzerine Çalışmalar

Serrano ve arkadaşları yaptıkları çalışmada arpa samanından üretilen peletler üzerinde hammadde nem oranı, parçacık boyutu ve çam odunu talaşı katkısının etkilerini incelemişlerdir. Peletlerin mekanik davranışları, yoğunluğu, uzunluğu ve üretim sonrası nem oranı, farklı özelliklerdeki saf ve katkılı hammaddeler için ölçülmüştür. Yoğun arpa samanından üretilen peletler için en uygun hammadde nem oranı %19-23 olarak belirlenmiş ve bu koşullarda %95,5 sağlamlık oranına ulaşılmıştır. %2, 7, 12 oranlarında çam odunu talaşı ilave edilerek %97-98

sağlamlık oranına ulaşılmıştır. Bu çalışmada otsu hammadde kullanılarak üretilen peletlerin kalitesi odunsu hammadde ilavesiyle arttırılmıştır. Ayrıca otsu hammaddeler yüksek kül oranları ve içerdikleri potasyum ve klorinden dolayı kaliteli yanma sağlayamazlar. Otsu hammaddelerden yanmaya elverişli peletler elde edilmek istenildiğinde odunsu hammadde ile harmanlamak tercih edilen bir yöntemdir (Serrano vd., 2011).

Gilbert ve arkadaşları peletleme basıncı ve sıcaklığının peletlerin yoğunluk ve mekanik dayanımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında buğday samanı ve çimen kullanarak farklı sıcaklık ve basınç değerlerinde hidrolik pres kullanarak peletleme yapmışlardır. Otsu bitkilerin peletlenmesinde biyokütle içerisindeki mevcut lignin yüksek sıcaklıklarda yumuşayarak bağlayıcı görevi gördüğü tespit edilmiştir. Ligninin en büyük potansiyel yumuşamasının 70 °C'de olduğu, bundan sonraki sıcaklıklarda nemin uçmasından dolayı peletlerde sertleşme olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklığın peletlerin yoğunluğuna etkisi sadece 14-50 °C aralığında gözlemlenmiştir. Ayrıca peletleme basıncının 55'ten 550 bar'a yükseltilmesi peletlerin yoğunluğunu ve mekanik dayanımını arttırmıştır. Sonuç olarak, 166 bar ve 70 °C'de üretilen peletin, 552 bar ve oda sıcaklığında üretilen peletten daha sağlam ve dayanıklı olduğu belirlenmiştir. Pelet kalitesi üzerinde sıcaklığın basınçtan daha etkili olduğu tespit edilmiştir (Gilbert vd., 2009).

Mani ve arkadaşları peletlemede parçacık boyutu küçülmesinin etkisini, laboratuvar presinde buğday ve arpa samanı, mısır koçanı ve dallı darı bitkisi kullanarak 100 °C' de gözlemlenmişlerdir. 0.8, 1.6 ve 3.2 mm boyutlarında öğütme elekleri kullanarak sırasıyla ortalama 0.31, 0.38, 0.69 mm parçacık boyutu elde edilmiştir. Arpa samanı ve diğer otsu bitkiler için daha küçük boyutlu değirmen eleği kullanmanın daha yoğun peletler elde etmeye yaradığı tespit edilmiştir. Ancak nem oranı ve peletleme basıncı parçacık boyutundan daha önemli parametrelerdir. Nem oranının %12'den 15'e çıkarılmasıyla ve uygulanan basıncın arttırılmasıyla pelet yoğunluğunun arttığı gözlemlenmiştir (Mani vd., 2006).

Mani ve arkadaşları diğer bir çalışmalarında pelet hammaddesi öğütülmesinde kullanılan çekiçli değirmendeki birim enerji sarfiyatını ölçmüşlerdir. Nem oranı %8 olan hammadde, 0.8 mm boyutunda değirmen eleği kullanılarak öğütüldüğünde 3.2 mm elek boyutuna göre 2 kat fazla enerji harcandığını ölçmüşlerdir. Daha yüksek nem oranlarında enerji sarfiyatının özellikle en büyük elek boyutunda arttığı belirlenmiştir (Mani vd., 2004).

Relova ve arkadaşları 32 farklı çam odunu talaşı kullanarak yaptıkları peletleme testlerinden elde ettikleri istatistiksel verilere dayanarak üretilen peletlerin düşme dayanımını belirleyen en önemli faktörün uygulanan peletleme kuvveti olduğunu bulmuşlardır. Nem miktarı

ikinci önemli faktördür ve parçacık boyutu bu konuda daha az etkilidir. Hammaddesindeki nem miktarı %6-20 arasında olan peletler içerisinde hammadde parçacık boyutu 1 ve 2 mm arasında olanlar 1 mm' den küçük olanlara göre daha yüksek kırılabilirlik gösterirler; yani düşmeye karşı dayanımları daha azdır (Relova vd., 2009).

Larsson ve arkadaşları yem kanyası bitkisinden elde edilen biyokütlenin peletlenmesi üzerinde, öğütülmüş hammadde nem oranının, ön sıkıştırma işlemi sonrası yığın yoğunluğu, buhar eklenmesinin ve kalıp sıcaklığının etkisini gözlemlemişlerdir. Peletlerin sağlamlık ve yoğunluğunu etkileyen en önemli faktörün nem miktarı olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca ön sıkıştırma sürekli üretimin yapılmasına olanak sağlamıştır (Larsson vd., 2008).

Mediavilla ve arkadaşları asma sürgünleri ve mantar karışımından oluşan farklı karışımları endüstriyel bir pelet makinesinde 20 mm'lik düz bir kalıp ile peletlemişlerdir. Pelet presi girişindeki en uygun nem oranının %15 ve 25 arasında olması gerektiğini belirlemişlerdir. Endüstriyel mantar artıklarının karışıma katılması peletleme için gereken enerji miktarında düşüş ve elde edilen peletlerin yanması sırasında daha az kül oluşmasını sağlamıştır (Mediavilla vd., 2009).

Biyokütlenin peletlenmesi işleminde uygun bağlayıcı maddelerin kullanılması nihai ürünün sağlamlığını ve çevre koşullarından etkilenmemesini sağlar. Organik ve inorganik birçok bağlayıcı peletleme işleminde kullanılabilir. Bağlayıcılar peletleme işlemi için bazı koşullarda zorunlu olarak katılması gerekse de bazı koşullarda üstün özelliklerin elde edilebilmesi için pelet hammaddesine eklenir. Bağlayıcılar sahip oldukları özelliklere göre üretilen peletlere üstün özellikler eklerler.

Kong ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ladin çamı talaşını önce piroliz işleminden geçirip daha sonra bu işlem sonucu elde edilen kömürsü biyokütleyi, lignin bağlayıcısı ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH, CaCl_2 , CaO sertleştiricileri kullanarak, 6 MPa basınç altında ve atmosferik sıcaklıkta (25 °C) peletlemişlerdir. Üretilen peletlerde aşınma ve darbe dirençleri, basma mukavemetleri ve yanma karakteristikleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, piroliz işlemi sonucunda talaşın üst ısı değeri %95 arttığını ve azot içeren uçucu bileşenlerin buharlaşması sonucunda NO_x emisyonunda düşüş olduğunu göstermiştir. Yapılan bağlayıcı katkıları arasında, kütle %5 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -%10 Lignin bileşimi üretilen peletlerde bağlarda oluşan nem miktarını artırarak suya olan dayanım üzerinde olumlu etki yapmıştır. Ayrıca hidroksitin katalizör olarak görev yapmasıyla üç boyutlu çapraz bağlanmalarda polimer zinciri büyümesi desteklenerek pelet içindeki yapısal bağlar kuvvetlenmiştir. Bu sayede üretilen peletlerin direkt nakliye ve fırına yüklenmesi için gerekli mekanik dayanım sağlanmış olur (Kong vd., 2013).

Puig-Arnavat ve arkadaşları yaptıkları çalışmada altı farklı bitki türünü (çayırotu, yonca, süpürge darısı, miskantus, tritikale) tekli pelet presinde peletleyerek elde ettikleri sonuçların daha büyük ölçekli pelet makinelerinde uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Tekli pelet presinde ideal nem oranı ve kalıp işletme sıcaklığı incelenmiştir. Bu sonuçlar küçük ölçekli bir pelet makinesinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Peletlenen tüm bitkiler için ideal nem oranı %10 civarında bulunmuştur. Daha yüksek nem oranları pelet kalitesinde düşüşe neden olduğu belirtilmiştir. Kalıp sıcaklığı oda sıcaklığından 60-90 °C aralığına çıkınca kalıpta sürtünme artışı gözlenmiş ancak daha yüksek sıcaklıklara çıkınca sürtünmede düşüş olmuştur. Küçük ölçekli pelet makinesinden elde ettikleri sonuçlara göre sürtünmenin kalıp sıcaklığıyla birlikte azaldığı bölgede iyi kalitede peletlerin üretildiğini kaydetmişlerdir. Bu çalışmada tekli pelet presinden elde edilen sürtünme sıcaklık değerlerinin daha büyük ölçekli pelet makinelerinde kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır (Puig-Arnavat vd., 2016).

Biyokütlenin peletlenmesinde işlem parametrelerinin üretilen peletlerin yoğunluğu ve kalitesi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla Tumuluru, yüksek nemli mısır koçanı örneği üzerinde çalışmıştır. Tumuluru %28-38 oranında nem içeren mısır koçanlarını, 30-110 °C aralığında ön ısıtmaya tabi tutarak 4.8mm elek boyutu kullanılarak öğütmüştür. Daha sonra 8mm çapındaki düz kalıpla ürettiği peletlerin nem oranı, birim/yığın yoğunluğu ve sağlamlık değerlerini ölçmüştür. Ön ısıtma sıcaklığı 110 °C'ye kadar artırılırken ve hammadde nem yoğunluğu %28'e kadar azaltılırken üretilen peletlerin nem oranında düşüş (%15'e kadar) gözlenmiştir. Peletlerin birim yoğunluğunun en yüksek değeri 1180 kg/m³'e, nem oranı %30-33 olduğu aralıkta ve ön ısıtma sıcaklığı 90 °C'den büyük olduğunda ulaşmıştır. En yüksek sağlamlık değerine %33-34 nem oranında ve ön ısıtma sıcaklığının 70 °C'den büyük olduğu süreçlerde ulaşılmıştır. Bu çalışma sayesinde, mısır koçanı örneğinde üretilen peletlerin yoğunluk, nem ve sağlamlık değerlerini etkileyen en önemli faktörün hammadde nem oranı, daha sonra ön ısıtma ve sonrasında ise kalıp dönme hızı olduğu anlaşılmıştır (Tumuluru, 2014).

Yancey ve arkadaşları biyokütlenin öğütülmesi konusunda iyileştirmeler yapma amacıyla çekiçli değirmen ve elek seçimini incelemişlerdir. İşlenecek hammaddenin cinsi ve sahip olduğu özellikler, örneğin nem oranı, öğütme değirmeni için belirlenmesi gereken elek boyutu, çalışma hızı ve çekiç geometrisi gibi parametreler üzerinde etkilidir. Değirmen parametrelerinin işlenecek hammaddeye göre en uygun koşullara getirilmesiyle öğütmeden elde edilen verimde %400'e kadar artış sağlanabilir (Yancey vd., 2013).

Biyokütlenin peletlenmeden önce tabi tutulduğu ön işlemlerden birisi de atıl gaz ortamında yüksek sıcaklıklara (200-300 °C) kadar çıkarılmasıdır. Bu sayede düşük nemli, uçucu

maddelerden arındırılmış ve yüksek enerji yoğunluklu biyokütle peletleri elde edilebilir. Ayrıca bu işlemde geçirilen biyokütlenin öğütülme özellikleri de daha iyidir (Prins vd., 2006). Yaptıkları çalışmada bu yöntemi kullanan Larsson ve arkadaşları Norveç ladin ağacını yüksek sıcaklarda (270 ve 300 °C’de) ön ısıtmaya tabi tutarak küçük ölçekli preste peletlemişlerdir. Bu işlemde kalıp sıcaklığı kontrol edilemeyen bir değişken olarak 50-105 °C arasında seyretmiştir. Diğer yumuşak ağaçlardan elde edilen ticari peletlere göre daha düşük dayanımlı (%80-90) peletler elde edilmesine rağmen yoğunluk değeri (630-710 kg/m³) istenilen düzeyde olmuştur. Diğer yumuşak ağaç türlerine göre peletlemede harcanan enerji %100 daha fazla olmuştur ve buna rağmen peletlerin toz üretme oranı %10-30 daha fazla olmuştur. Pelet üretim hızıyla kalıp sıcaklığının doğru orantılı olduğu görülmüştür. Hammadde nem oranının pelet kalitesi ve üretim hızını çok etkilemediği ancak su ilavesi yapılmasının akış özelliklerini kötüleştirerek pelet üretimine katkı sağlamadığı belirlenmiştir (Larsson vd., 2013). Aynı etkinin kömür tozlarında da olduğu Abou-Chakra ve arkadaşları tarafından tespit edilmiştir (Abou-Chakra vd., 2000). Su ilavesi yapılan kömür tozlarında akışkanlık azalır ve serbest kalan su parçacıkları bu etkiyi artırır.

Kömür ve biyokütlenin birlikte yakıt olarak kullanılmasında briketleme işlemi yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Ancak bu iki yakıtın daha küçük boyutlarda sıkıştırılarak peletler haline getirilmesi bugüne kadar çok yaygın kullanılan bir yöntem değildir. Bu konuda yapılmış çalışmalar günümüzde oldukça sınırlıdır. Ryu ve arkadaşları atık mantar kompostu ve kömür tozu artıklarını birlikte peletleyerek bu atıkların yakıt olarak geri kazanımın amaçlamışlardır. Kömür tozlarının peletlenmeden önce %10, mantar kompostunun ise %20 nem oranına sahip olması gerektiği belirlenmiştir. Bu sayede malzemelerin birbirine bağlanma kuvveti en yüksek seviyede olur. Peletleme basıncı, 41.37 Mpa üzerindeki değerlerde üretilen peletlerde yoğunluk ve dayanım artışı sağlamamıştır. Peletlerin çekme dayanımı mantar kompostu oranıyla doğru orantılıdır. Bunun nedeni kompostun lifli yapıda olmasıdır. Mantar kompostunun peletlerin sağlamlığına etkisi yoktur. Pelet sağlamlığı peletlerin aşınma ya da darbeler karşısında gösterdiği direnç ile ölçülür. Kömür tozu ve kompost arasında bir bağlayıcı kullanılmasıyla yeterli sağlamlık değerlerine ulaşılabilir (Ryu vd., 2008).

Biyokütle ve kömür tozlarının birlikte peletlenmesi gelecekte üzerinde daha fazla çalışılması gerekli bir konudur. Her ne kadar briketleme yönteminde, bu iki yakıt türü birlikte kullanılarak sıkıştırılmış yakıt parçaları üretilbilse de peletleme yönteminin bu yöntemle göre sahip olduğu üstünlükler bulunmaktadır. Peletleme işleminde daha yüksek basınçlar kullanıldığı için daha yoğun ve daha küçük parçacıklar elde edilebilir. Bu sayede yanma verimi daha yüksek

yakıtlar elde edilmiş olur. Ayrıca peletler sahip oldukları küçük taneli yapı dolayısıyla nakil, depolama ve yanma sistemlerinde iletim avantajları bulunmaktadır.

2.3. Biyokütle Üzerine Diğer Yakıt Çalışmaları

Kömür ve biyokütlenin peletleme ya da briketleme yapılmadan birlikte yakılması bu alanda yapılan çalışmaların bazılarında araştırma konusu olmuştur. Biyokütlenin tek başına yanmada kullanılmasındaki karşılaşılan engeller kömürle birlikte yakılmasının daha avantajlı olacağı görüşünü kuvvetlendirmiş ve bu yönde çalışmalar yapılmıştır.

Hein ve Bemtgen Avrupa Birliği Projesi kapsamında yaptıkları “Temiz Kömür Teknolojisi” adlı çalışmalarında bu amaç doğrultusunda, yüksek ve düşük değerli kömürler ile biyokütle ve şehir kanalizasyonu çamurunun endüstriyel seviyede birlikte yakılmasını incelemişlerdir. Bu çalışmayla kömürün yanması sonucu oluşan CO₂ emisyonun azaltılması ve kontrol edilmesi, fosil yakıt bağımlılığının azaltılarak alternatif enerji kaynaklarına yönelim, tarımsal ve orman artıklarının değerlendirilmesi, tarım yapılmayan elverişli alanlarda enerji bitkilerinin yetiştirilmesi, şehirsal atıkların dönüştürülmesi hedeflenmiştir. Biyokütle temininde yaşanan mevsimsel ve bölgesel dalgalanmaların, yakılan kömür/biyokütle oranının duruma göre uyarlanmasıyla telafi edilebilir olduğu öne sürülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalar sonucu bu iki enerji kaynağının birlikte yakılmasında bir engel bulunmadığı, hem akışkan yataklı sistemde hem de pulverize yakıt olarak yanmaya uygun olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bölgesel biyokütle temininden kaynaklanan biyokütle/kömür oranlarındaki değişimin yanmaya olumsuz bir etki yapmadığı gözlemlenmiştir. Ancak yüksek alkalın ve klorin içeren biyokütlenin yanması sonucu açığı çıkan korozyonun ve ısı transferi yüzeylerinde cürufişmanın neden olduğu olumsuz etkilerin daha detaylı çalışma sonucu açığı çıkacağı belirtilmiştir. Yanma sonucu açığa çıkan zararlı gaz konsantrasyonlarında artış gözlenmemiş, çoğu durumda biyokütlenin bileşimine ve yanma tipine bağlı olarak önemli emisyon düşüşleri gözlemlenmiştir. Özellikle NO_x emisyonlarında meydana gelen düşüş bu gözlemi desteklemiştir (Hein ve Bemtgen, 1998).

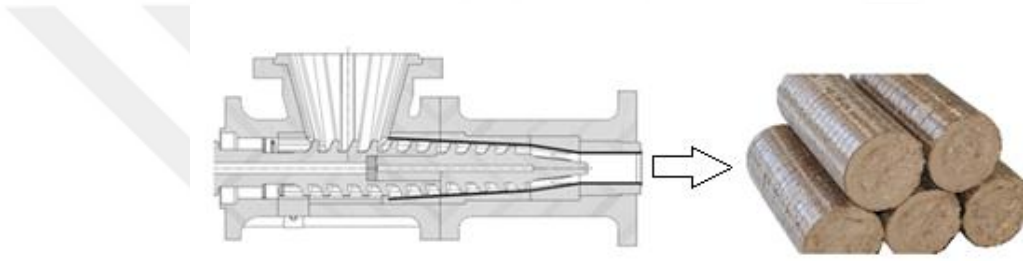
2.4. Biyokütle Yoğunlaştırma/Presleme Makineleri

Biyokütle, yenilebilir ve çevreci bir yakıt olmasına rağmen ham halde kullanımı genelde zordur. Bunun nedeni yığın yoğunluğunun düşük olmasıdır. İstenilen miktarda enerji elde etmek için ham haldeki büyük hacimlerde biyokütleyi yakmak gerekir. Bu ise gerek depolama gerekse nakliye ve yanma ortamı beslemesinde büyük zorluklar ortaya çıkarmaktadır.

Biyokütle, etkili bir şekilde yakıt olarak kullanabilmesi için genellikle yoğunlaştırma/presleme işlemine tâbi tutulur. Günümüzde kullanılan iki temel biyokütle presleme yöntemi bulunmaktadır. Bunlar, briketleme ve peletlemedir.

2.4.1. Briketleme makineleri

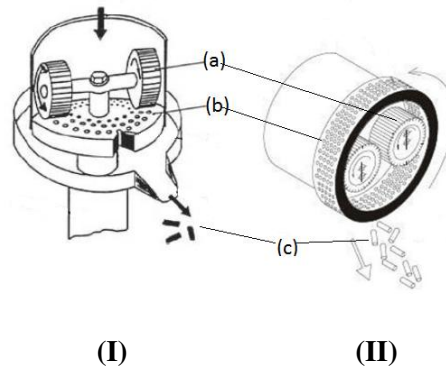
Briketleme işleminde biyokütle sürekli bir hat boyunca sıkıştırılarak küresel, silindirik, prizmatik ya da yastık şeklinde olmak üzere farklı boyut ve çeşitlilikte parçalar (briketler) halinde üretilir (Şekil 2.1). Nihai ürün olan briketler peletlemeye nispeten büyük parçalardır. Ayrıca yoğunlukları pelet yakıtlar kadar yüksek değildir.



Şekil 2.1. Briketleme makinesi kesiti ve üretilmiş briketler.

2.4.2. Peletleme makineleri

Peletleme makineleri, delikli bir kalıp üzerinde dönen kanallı yapıdaki birden fazla (genelde 2 ya da 3) silindirik metal rulonun kalıp kanalları boyunca öğütülmüş haldeki biyokütleyi sıkıştırarak ve iterek preslemesi esasına göre çalışır. Kullandıkları kalıp yapısına göre pelet presleri ikiye ayrılır; birinci grup preslerde disk şeklinde üzerinde belirli aralıkta silindirik kanallar olan kalıplar kullanılır, ikinci grup preslerde ise dairesel kesitli silindirik yapıda üzerinde silindirik kanallar olan kalıplar kullanılır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. (I) Disk kalıplı (Dikey eksen dönlü) Pelet presi, (II) Halka kalıplı (Yatay eksen dönlü) Pelet presi, (a) Rulolar (b) Delikli kalıp (c) Pelet çıkışı.

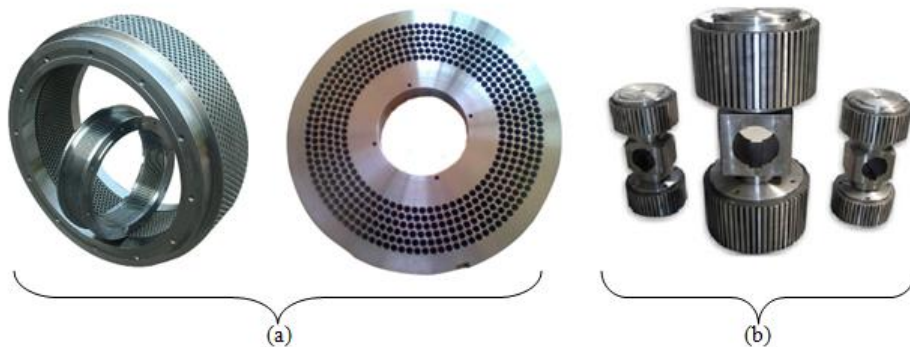
Pelet preslerini kalıp ya da rulo hareketine göre de ikiye ayırmak mümkündür; birinci grup preslerde kalıp hareket ederken rulolar konum olarak sabit kalıp sadece kendi eksenlerinde dönerler; ikinci grupta ise kalıp sabit dururken rulolar hem kendi etrafında hem de kalıp çevresinde belirli bir hızda dönerek presleme işlemi yapılır.

Günümüzde birçok farklı konfigürasyonda ve çeşitte pelet presleri üretilmekte ve kullanılmaktadır. Şekil 2.3'te örnek bir pelet presi kesit görünümüyle verilmiştir.



Şekil 2.3. Örnek bir pelet presi (www.feedandgrain.com/product/category/pellet-mills).

Pelet preslerinde peletin oluşumunu sağlayan en önemli iki eleman kalıp ve rulolardır (Şekil 2.4). Farklı şekillerde ve parametrelerde üretilebilen bu elemanlar peletlenecek hammadde cinsine göre seçilmiş olmalıdır.

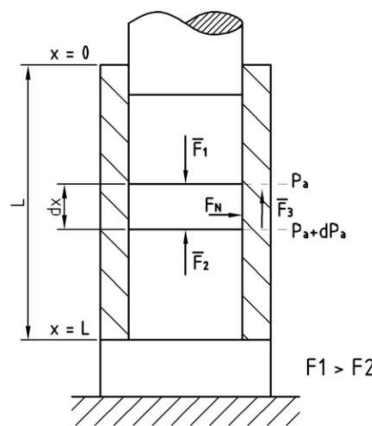


Şekil 2.4. Pelet Preslerinde Kullanılan Çeşitli (a)Kalıp ve (b)Rulolar.

Pelet makinelerinde birçok farklı cinsten hammaddenin işlenerek pelet haline getirilmesi mümkündür. Her biyokütle hammaddesinin kendine özgü peletlenme parametreleri vardır. Bu parametreler hammadde nem miktarı, öğütülmüş parçacık boyutu, sıkıştırma basıncı ve bağlayıcı kullanma gerekliliği ve miktarı olarak sıralanabilir. Bu değişkenlerin iyi ayarlanması sayesinde nihai ürün olarak dayanıklı ve yanma verimi yüksek peletler elde edilebilir. Örneğin yetersiz nem ve basınç altında, biyokütlenin pelet haline geçmeden makineden dışarı atıldığı gözlenir ya da üretilen peletler küçük darbelerde bile parçalanırlar.

Farklı biyokütle türlerine göre farklı peletleme parametrelerinin oluşması her biyokütle türünün kendine has yığın ve parçacık yoğunluğunun bulunması ve iç yapılarının farklı olmasından kaynaklanır. Örneğin odunsu biyokütlerde otsu biyokütleye oranla daha fazla lignin bileşeni bulunur. Lignin bileşeni ise peletlenmede parçacık içi bağlanmayı sağlayan en önemli unsurdur. Ayrıca kalıp içindeki kanallarda katmanlar halinde üst üste sıkışan ve aynı zamanda kalıp cidarıyla da sıcaklıklar ilişkili bir sürtünme ilişkisi içerisinde olan biyokütle hammaddesi, bu koşullar altında kendine has peletlenme karakteristiğini oluşturur.

Biyokütle, pelet presinin kalıp kanalı içerisinde sıkışarak ilerlerken üzerinde çeşitli kuvvetler etki yapar. Şekil 2.5'te silindirik bir kanalda peletleme basıncı altındaki biyokütlenin üzerinde etkili olan F_1 , F_2 ve F_3 kuvvetleri görülmektedir.



Şekil 2.5. Kalıp kanalı içindeki biyokütlenin sıkışması sırasında etkili olan kuvvetler (Kovacova vd., 2014).

Kovacova ve arkadaşlarının Şekil 2.5'teki kuvvet dengesini temel alarak yaptıkları çıkarımlar sonucunda silindirik bir kanal boyunca sıkıştırılan biyokütlenin üzerindeki basınçlar

(P_a : çıkış basıncı, P_{ap} : iç tepki basıncı) arasındaki ilişki Eşitlik (2.1) ve (2.2) de verilmiştir: (Kovacova vd., 2014):

$$P_a(L) = P_{ap} e^{-\frac{4\mu\lambda}{d}L} \quad (2.1)$$

$$P_{ap}(L) = P_a e^{+\frac{4\mu\lambda}{d}L} \quad (2.2)$$

Eşitlik (2.1) ve (2.2)'deki;

μ : biyokütle ve kalıp cidarı arası sürtünme katsayısı,

λ : sıkışan madde üzerindeki radyal basıncın eksenel basıncına oranı,

d : delik çapı ve L : kalıp uzunluğu olarak tanımlanır.

Kalıba bağlı bir parametre olan d/L oranının peletleme basıncı olan ilişkisi verilen formüllerde göze çarpmaktadır. Bu oran küçüldükçe peletleme için gerekli basınç da artmaktadır. Bu nedenle peletlenecek malzeme türüne uygun bir d/L oranına sahip kalıp seçimi önemlidir.

Kalıp kanalı içerisinde biyokütle ve cidar arasındaki sürtünmenin de sıcaklığa bağlı bir değişken olduğu Stelte ve ark. tarafından belirlenmiştir. Artan sıcaklıkla birlikte peletleme basıncında düşüş olduğunu tespit etmişlerdir. Yüksek sıcaklıkta ürettikleri peletlerin yüzeyinde aldıkları kızılötesi spektrumda hidrofobik çıkarıcılar (mumsu bileşenler ve yağlar) olduğunu görmüşlerdir. Bu maddeler peletleme sırasında pelet yüzeyine doğru hareket ederler. Bu sayede pelet ve kalıp cidarı arasında yağlayıcı görevi görüp peletleme basıncını azaltırlar. Kullanılan biyokütlenin cinsine göre cinsi ve miktarı değişen bu maddeler farklı sıcaklıklarda camsı-geçiş sıcaklığına ulaşır. Bu nedenle her biyokütle cinsinde farklı sıcaklıkta peletleme için gerekli basınç miktarında azalma olur (Stelte vd., 2011a).

2.4.2.1. Pelet makinelerinin kullanım sorunları

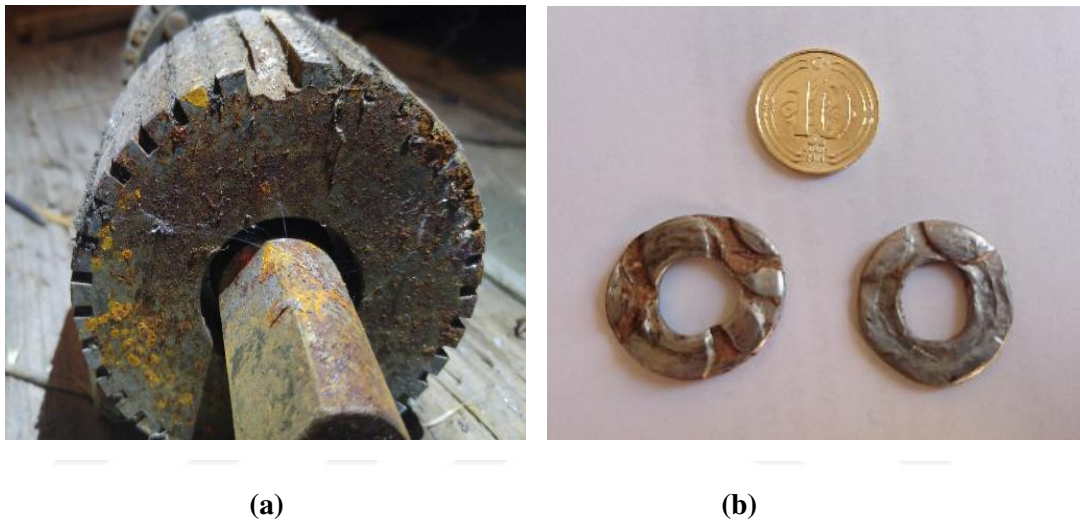
Pelet üretim süreci, kullanılan hammaddeye ve kullanılan ekipman özelliklerine bağlı olmak üzere çeşitli değişkenlere sahip olan bir süreçtir. Bu değişkenlerin her seferinde iyi ayarlanamaması ve çevresel koşulların etkisiyle, pelet makinelerinde üretimi durma aşamasına getirecek sorunların yaşanması yaygın gözlenen bir durumdur. Başlıca üretim sorunlarına ve nedenlerine bu bölümde değinilecektir.

Üretilen peletlerin dayanımının çok az olması yani gevşek yapıda olması ya da üretilen peletlerin tozlu bir yapıda olması karşılaşılan sorunlardan birisidir. Bazı durumlarda hiç pelet oluşmadığı, makineye verilen öğütülmüş biyokütlenin sıkıştırma yapılamadan dışarı çıktığı gözlemlenebilir. Hammaddenin çok ince boyutlu olması ya da biyokütle nem miktarının az olması bu durumun nedeni olabilir. Ayrıca her biyokütlenin yapısal özelliklerinin farklı olması da önemli etkidir. Örneğin bazı biyokütle çeşitlerinde, temel bağlayıcı bileşen olan lignin az miktarda bulunur. Pelet içi bağlanma sorununu çözmek için dışarıdan bağlayıcı katılması gerekebilir.

Kalıpların ve pres rulolarının uzun süre kullanımına bağlı olarak aşınmaları ve bazı durumlarda kırılmaları gözlemlenebilir. Aşınmış kalıp ve rulolarla üretim yapmaya çalışmak yoğunluğu az ve kalitesiz peletlerin üretilmesine neden olur. Peletlenmesi zor olan sert yapıdaki çam talaşı gibi biyokütle cinsleri kalıp ve rulolarda hızlı aşınmaya neden olur. Bu nedenle bu tarz sert yapıdaki biyokütlelerin daha yumuşak cinslerle harmanlanıp peletlenmesi tavsiye edilir. Pelet kalıplarının kullanım sırasında kırılması da gözlemlenebilen bir durumdur (Buchely ve Colorado, 2016). Kalıptaki delikler etrafında gerilme yığılması bölgeleri oluşur. Bu bölgelerden kalıbın hasara uğraması çok muhtemeldir. Gelecekte yapılacak kalıp tasarımlarında bu faktör göz önüne alınıp yuvarlatılmış kenarlı delikler açılabilir. Ayrıca kalıptaki deliklerin açılması sırasında oluşan talaşlı imalat izlerinin ve kalıp malzemesinde bulunan yabancı maddelerin, tanecikler arası gevrek kırılmayı hızlandırabileceği Buchely ve Colorado tarafından belirtilmiştir.

Pelet makinelerinde üretime etki eden önemli bir parametrede kalıp-rulolar arası mesafedir. Bu mesafe pratik bir kural olarak genellikle 0,5-1 mm arasında kullanılmaktadır. Ancak her üretici kendi optimum değerine üretim sürecinde deneme-yanılma yoluyla ulaşmaktadır. Kullanılan biyokütlenin türüne, parçacık boyutuna, nem miktarına ve bağlayıcı katkısına bağlı olarak kalıp-rulo arası mesafe ayarlanması gereklidir (Yehia, 2007). Kalıp ve ruloların zamanla aşınmasıyla bu mesafe değişmekte ve pelet kalitesinde de değişimler olmaktadır. Bu mesafenin çok az olması, kalıp ve rulolar arası metal-metal sürtünmesine neden olup hızlı aşınmaya ve bazı durumlarda makinenin tıkanmasına neden olmaktadır.

Biyokütle hammaddesi içerisine karışmış olabilen, küçük sert yabancı maddeler (örn: taş, metal pul vida vs.) makine içerisine girdiğinde kalıp ve rulolara önemli zararlar vereceği gibi sistemin de tıkanmasına neden olacaktır. Şekil 2.6'da dikey eksenli çalışan bir pelet makinesi içinde unutulmuş pulların ve rulonun uğradığı hasar durumu görülmektedir.



Şekil 2.6. (a) Pelet makinesinin kırılan rulo dişi, (b) İçine kaçan deforme olmuş pullar.

Pelet üretiminde sık karşılan bir sorun makinenin tıkanmasıdır. Bu durum pelet makinesi üreticisi çoğu firmanın makine bilgisi kataloglarında da belirtilmektedir. Örneğin hayvansal yem peleti makineleri üreten bir firmanın verdiği bilgiye göre pratik bir kural olarak pelet hammaddesinin neminin %18 olması makinenin tıkanma sınır bölgesi olarak görülebilir. Bu değerden fazla nemli malzemeler makinede tıkanmaya neden olmaktadır. Özellikle otsu biyokütle için peletlemeye yardımcı olması amacıyla dışarıdan ilave edilen nem her %1'lik nem artışı hammadde peletlenme sıcaklığını 20 °C artırır (www.cpm.net). Yapısı gereği fazla nem bulunduran biyokütlelerde peletlenme sırasındaki sıcaklık istenilen seviyede olmayabilir.

Pelet makinelerinde oluşan tıkanma sorununu çözmek için hammaddeye bağlayıcı katılması ve nem ilavesi gibi çözümler uygulanmaktadır. Ancak bu çözümler her durumda uygulanabilir değildir ve peletleme basıncında meydana gelen düzensiz rejim için çok fayda sağlamaz.

Literatür çalışmaları incelendiğinde biyokütlenin peletlenmesi ve briketlenmesi hakkında bağlayıcı, farklı bir madde ile (toz kömür, kağıt fabrikası atıkları gibi) birleştirilmesi, nem oranı, peletleme basıncı ve sıcaklığı, peletleme girişi hammadde boyutları, öğütmede gerekli enerji, hammaddenin ön ısıtılması, kömür peletleme, peletlenme deliği içi ve çıkışındaki basınç, sıkıştırma kalıbı ve rulosundaki aşınma (sadece bir tespit olarak), rulo ve disk arasındaki açıklık konularında yukarıda da açıklanan çalışmalar yapılmış, yapılmaktadır.

Bu tezde ise çalışan dikey eksen döndürücü, kalıbın sabit ruloların çevresel ve kendi ekseninde döndüğü bir peletleme presinde tasarım iyileştirmesi amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Pelet makinelerinde yaygın olarak meydana gelen sıkışma, tıkanma ve kalıp-rulo arası boşluk ayarlanması problemlerine çözüm olarak disk yayların kullanılması öngörülmüştür. Disk yayların özellikleri ve davranışları hakkında detaylı bilgi sıradaki bölümde verilecektir. Sistemde disk yayların nasıl kullanılacağı, hesaplamaları ve sonlu elemanlar analizi (SEA) sonraki kısımlarda anlatılacaktır.

3. DİSK YAYLAR

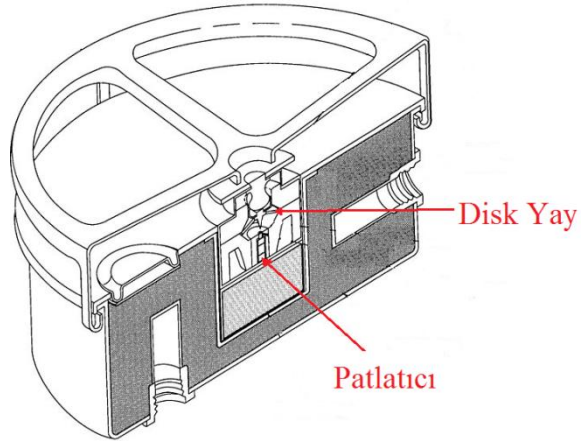
Yaylar, temel işlevi yük altında şekil değiştirip enerji depolamak olan makine elemanlarıdır. Üzerindeki yük kaldırıldığında eski haline dönebilen yani elastik davranış sergileyen yapılardır (Wahl, 1944). Yaylar, enerji depolayıcı, kuvvet sınırlayıcı, darbe sönümleyici, kuvvet ölçücü, kuvvet iletici, kuvvet dağıtıcı ve titreşim azaltıcı olarak çeşitli sistemlerde ve farklı şekillerde geniş olarak kullanım alanı bulurlar. Farklı yükleme ve çalışma koşullarına uygun birçok yay geliştirilmiştir. Helisel, kangal, spiral, yaprak, bilezik, çubuk, kovan ve disk yayları olarak adlandırılan birçok yay çeşidi bulunmaktadır.

Disk yaylar yüksek miktarda yükleme altında az miktarda deformasyon gösteren konik yapılı tabak şeklindeki yaylardır. Yay çeliği, kompozit ve plastik malzemeden üretilen disk yaylar mevcuttur. Literatürde Belleville yayı veya pulu (ing: Belleville spring/washer) olarak giren bu yaylar ismini 1867 tarihli patent sahibi Jullien Belleville'den alır (Budynas ve Nisbett, 2004).

3.1. Disk Yayların Kullanım Alanları

Disk yaylar, uygulanan kuvvet yönünde mesafe kısıtlaması olan yerlerde kullanılması avantajlı olan konik yapılı dairesel geometriye sahip yaylardır (Wahl, 1944). Bu yaylar büyük yükler altında az miktarda şekil değişimi gösterirler. Farklı rijitlik değerlerinde ve boyutsal ölçülerde üretilen bu yaylar, büyük ve darbeli yükler altında çalışan sistemlerde, havacılık ve uzay, savunma ve makine sanayisinde önemli kullanım alanları bulurlar (Zheng vd., 2014).

Şekil 3.1'de görülen sistemde disk yay, bir tank mayını sistemi içerisinde fünye mekanizmasında tahrik edici eleman olarak kullanılmıştır. Üzerinde tank gibi onlarca ton ağırlığında bir araç geçtiğinde küçük bir tahrik hareketiyle patlaması istenilen bu sistemde, disk yaylar sahip oldukları büyük yük-küçük deformasyon ilişkisi nedeniyle tercih edilmiştir.



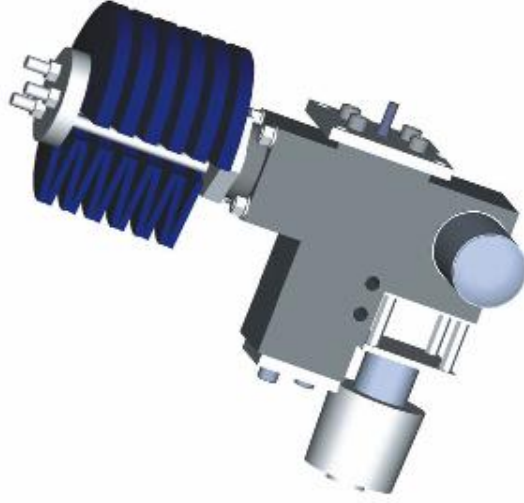
Şekil 3.1. M4 Anti-Tank mayınının fûnye mekanizmasında disk yay kullanımı (maic.jmu.edu/ordata/FullImage.asp?Image=images\H\H0887U03.JPG).

Disk yaylar sahip oldukları darbe sönümleme özelliği sayesinde çeşitli araçlarda da sönümleyici olarak kullanılır (Şekil 3.2). Özellikle yarış aracı ve motosiklet gibi çok hızlı hareket eden sistemlerde, fazla hareket genliği olmadan sönümleme yapılabilmesi için disk yaylar tercih edilir.



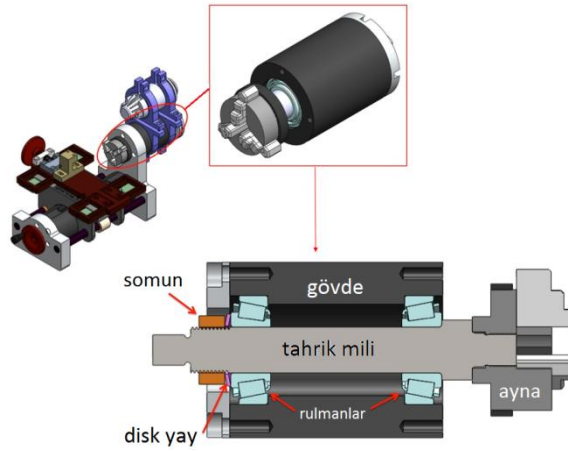
Şekil 3.2. Yarış aracı ve motosiklet süspansiyon sisteminde disk yay kullanımı.

Disk yayların kontrol sistemlerinde de kullanımı yaygındır. Şekil 3.3'de görülen hidrolik sistemde basınç altında sıkıştırılan disk yaylar sistem açık konumda iken enerji depolama durumundadır. Sistemde oluşan hidrolik basınç düşüşlerinde disk yaylar depoladığı enerji sayesinde açılarak anahtarı kapalı konuma getirirler. Genelde elektronik sistemlerde kontrolcü olarak bu tarz uygulamalara rastlanmaktadır.



Şekil 3.3. Hidrolik kontrol ünitesinde disk yay kullanımı.

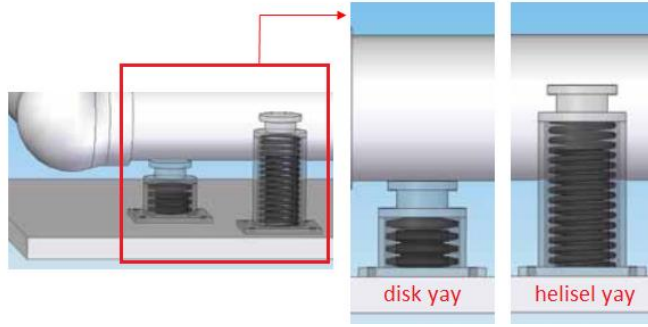
Disk yaylar ön gerilme kuvveti sağlanması istenilen yapılarda kullanıma oldukça elverişlidir. Genelde somun altında yer alacak şekilde sisteme dahil edilen disk yaylar, istenilen miktarda somunu sıkarak suretiyle deforme edilerek gerekli ön gerilme kuvvetini sağlamış olurlar. Şekil 3.4'te torna makinesinde tahrik milindeki rulmanlar için gerekli olan ön gerilme kuvveti disk yay kullanılarak sağlanmıştır. Böyle bir sistemde önyüklemeye kuvvetinin hassas bir şekilde ayarlanması gereklidir. Yüksek ön gerilme, rijitliği artırıp salgı miktarını azaltır ancak çalışma sırasında ısınma miktarını artırır. Disk yay bu sistemde istenildiği kadar çökertilerek gerekli ön gerilme kuvveti ayarlanmış olur.



Şekil 3.4. Torna makinesinde disk yay kullanımı.

Dinamik yükleme altındaki sistemlerde destek yapısı olarak disk yaylar sahip oldukları darbe sönümler ve esneme yeteneklerinden dolayı tercih edilirler. Örneğin Şekil 3.5'te görülen basınçlı boruda kısa bir mesafede gerekli yaylı destek yapısı disk yaylar kullanılarak oluşturulmuştur. Aynı yerde helisel yay kullanılmak istendiğinde daha büyük mesafeye ihtiyaç duyulur. Bu bakımdan disk yaylar yerden tasarruf sağlayarak, tasarımcıyı böyle bir sistemde rahatlatmaktadır.

Ayrıca ısı değıştiricileri gibi farklı sıcaklıklarda çalışan borularda meydana gelen çapsal genleşme ve daralmalarda, disk yay kullanılarak oluşturulan destek yapıları her sıcaklıkta boru ile dengeli bir basınçla destek durumunda kalır. Bu sayede bağlantı noktalarındaki sıvı kayıplarını engellenmiş olur.



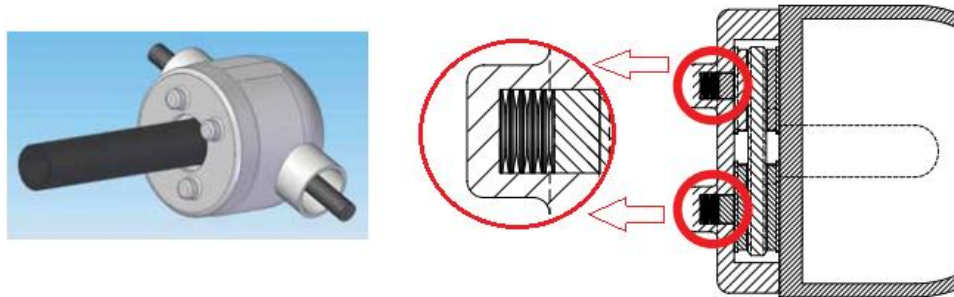
Şekil 3.5. Basınçlı boruların desteklenmesinde disk yay kullanımı.

CNC torna makinelerinde kullanılan parça tutucu kovanlarda gerekli sıkma kuvveti disk yaylar vasıtasıyla sağlanabilir (Şekil 3.6). Parçanın kovanda dengeli bir sıkma kuvvetinde durmasını disk yaylar sağlar. Parça çok gevşek olursa üretilecek ürün ölçülerinde kaymalar oluşur, çok sıkı olursa işleme sırasında hasar oluşabilir. Bu nedenle sıkma kuvvetinin çok iyi ve hassas ayarlanması gereklidir. Şekil 3.6'da görülen sistemde bu işlev 16 adet disk yay seri olarak kullanılarak sağlanmıştır.



Şekil 3.6. CNC pens sisteminde disk yay kullanımı.

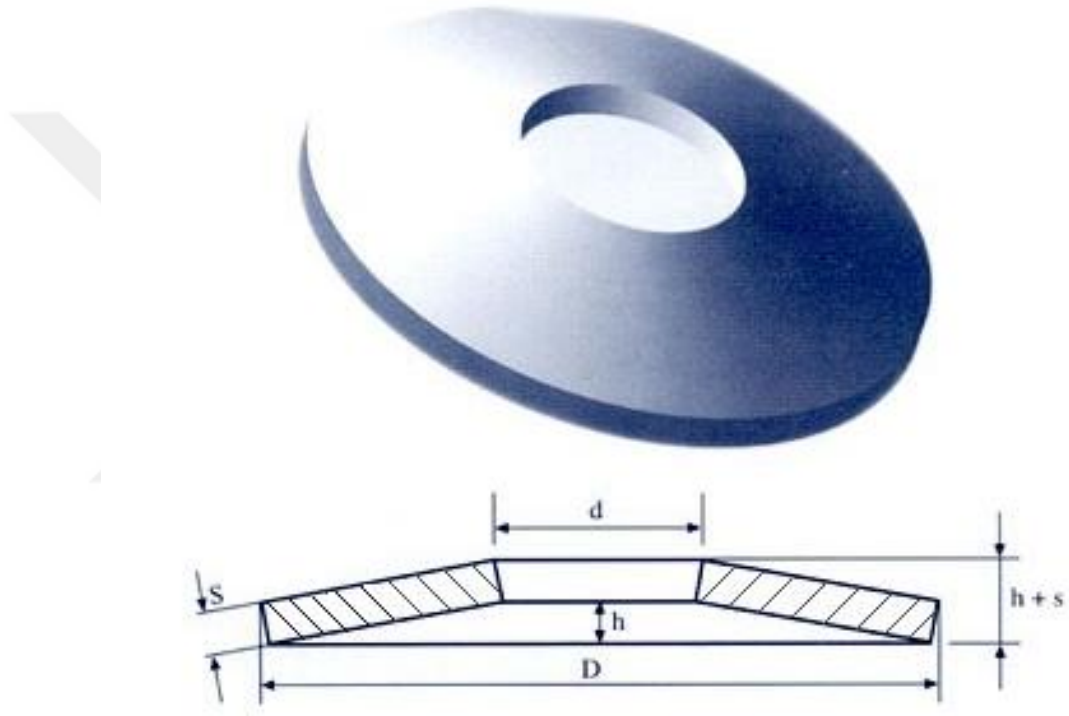
İş makinelerinde fren sistemleri genelde hidrolik sistemle çalışır. Bu sistemlerde basınçlı sıvının sürtünme diskini şaft üzerinde dönen bir plakaya bastırmasıyla fren yapılmış olur. Ancak bu sistemlerde hidrolik sıvı kaynaklı bir problemde fren sistemi işe yaramaz hale gelir. Bunun önüne geçmek için mekanik destek yapısı olarak disk yaylar kullanılabilir (Şekil 3.7). Normal koşullarda hidrolik basınç altında sabit bir basınçta duran seri bağlı disk yay sütunu oluşturulur. Hidrolik sistemde bir arıza oluştuğunda disk yaylar açılarak frenleme sistemini harekete geçirir. Böylesine kısıtlı bir alanda farklı türde herhangi bir yay kullanarak frenleme için gerekli bir kuvveti elde etmek mümkün değildir. Güvenilirliğin ön plana çıktığı bu sistemlerde disk yayların tutarlı performans sergilemesi önemlidir.



Şekil 3.7. Mekanik frenleme sisteminde disk yay kullanımı.

3.2. Disk Yayların Sınıflandırılması

Şekil 3.8'de bir disk yayın görünüşü ve önemli ölçüleri verilmiştir. Yayın taşıyabileceği yükün belirlenmesinde, bu parametrelerden hareketle hesaplamalar yapılır. Yayın koni yüksekliği olarak tanımlanan ' h ' değeri aynı zamanda yayın basma kuvveti altındaki çökebileceği en büyük değerdir. Ancak yaylarda bu yüksekliğin 0,75'inden fazla çökmeye müsaade edilmemesi, plastik şekil değiştirmeden kaçınılması amacıyla tavsiye edilmektedir.



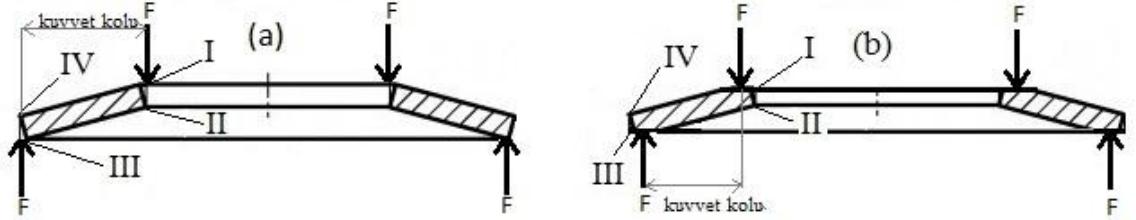
Şekil 3.8. Bir disk yay ve önemli ölçüleri: d : iç çap, D : dış çap, s : kalınlık, h :koni yüksekliği, $h+s$: toplam yükseklik.

Disk yaylar aksel yük altında eğilme gerilmesi altında çalışan elemanlardır. Kullanıldıkları yerlerde içeriden veya dışarıdan klavuzlanmaları gerekir. Genelde deliklerinden geçen bir silindirik eleman tarafından klavuzlanırlar. Standartlara göre disk yaylar üç gruba ayrılır:

- Grup 1:** Soğuk şekillendirilmiş, herhangi bir talaşlı imalat işlemine tabi tutulmamış, kalınlığı (s) 1 mm veya daha ince yaylar

- Grup 2:** Soğuk şekillendirilmiş, iç ve dış çapında talaşlı imalat yapılmış, iç ve dış köşeleri yuvarlatılmış, kalınlığı (s) 1-6 mm arası yaylar

•**Grup 3:** Sıcak şekillendirildikten sonra, talaşlı işlem görmüş, oturma yüzeyi oluşturulmuş, iç ve dış köşeleri yuvarlatılmış, Grup 2'deki yay rijitliğini elde edebilmek için kalınlıkça %6 inceltilmiş, kalınlığı 6-14 mm arası yaylar



(a): Grup 1 ve 2

(b): Grup 3

Şekil 3.9. Disk yaylarda kuvvet iletimi.

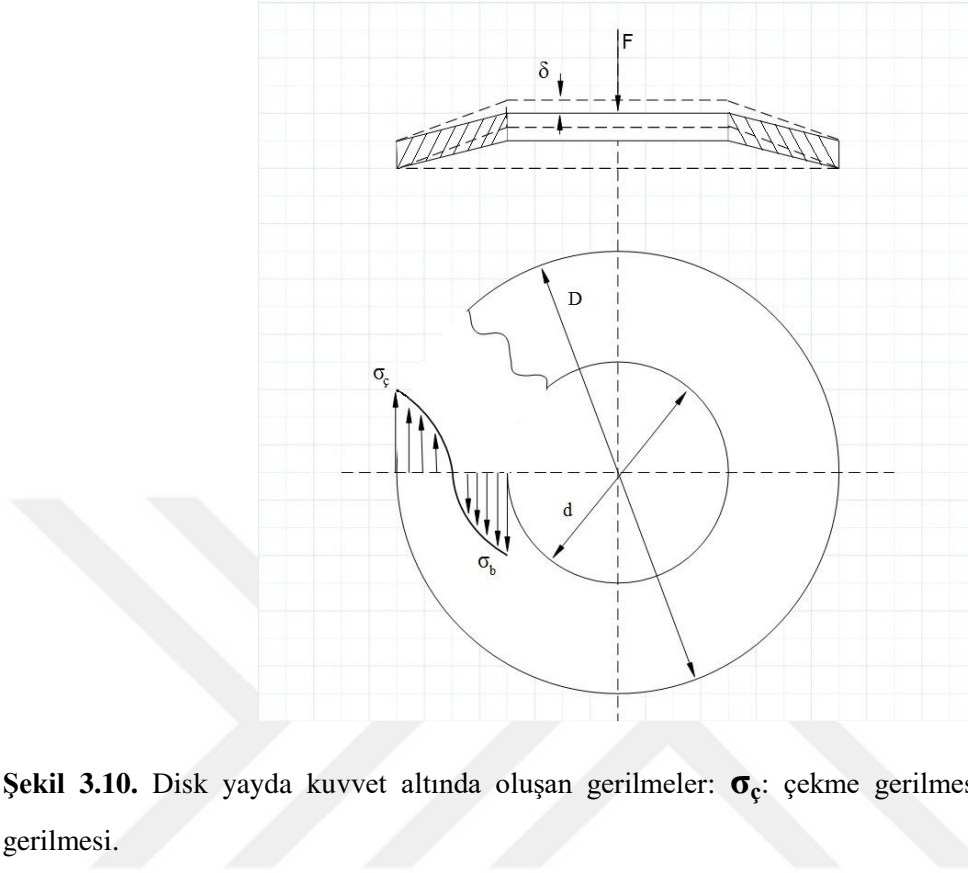
Disk yaylarda kuvvet iletimi Şekil 3.9'da gösterildiği gibi I ve III numaralı çemberlerden olur. Grup 3 yaylarında oturma yüzeyleri nedeniyle kuvvet kolu mesafesi 2. gruba göre kısalmıştır. Bu nedenle aynı miktarda yüklemeye eşit miktarda çökme sağlamak için Grup 3 yayları %6 daha ince imal edilir.

Disk yaylarda koni yüksekliği ve dış çapın disk kalınlığına oranına bağlı olarak üç ayrı dizi belirlenmiştir:

- **Dizi A:** $D / s = 18$ $h / s = 0,4$ *En Sert*
- **Dizi B:** $D / s = 28$ $h / s = 0,75$ *Orta*
- **Dizi C:** $D / s = 40$ $h / s = 1,3$ *En Yumuşak*

3.3. Disk Yayların Hesaplamaları

Disk yayların hesaplanmasında ilk olarak 1936 yılında Almen ve Laszlo tarafından ortaya çıkarılan ve günümüzde halen DIN 2093 standardı da dahil olma üzere çoğu üretici ve kullanıcı tarafından kabul görüp kullanılan yaklaşık bir hesaplama yöntemi bulunmaktadır.



Şekil 3.10. Disk yayda kuvvet altında oluşan gerilmeler: $\sigma_{\text{ç}}$: çekme gerilmesi, σ_{b} : basma gerilmesi.

Disk yayların kuvvet altındayken alt kısmı çekme gerilmesine üst kısmı ise basma gerilmesine maruz kalır (Şekil 3.10). Deformasyon ve gerilme değerleri lineer bir ilişkide değildir. Bir disk yayı tamamen düzleştirecek yani en büyük miktarda deformasyona uğratabilecek kuvvet 'Kritik Kuvvet' F_{kr} olarak tanımlanır. Disk yayda herhangi bir deformasyon oluşturacak kuvvet F ve yay rijitliği k olarak ifade edilir ve hesaplanmaları verilen formüllerle olur:

E : Young Modülü	δ : Deformasyon (çökme) Miktarı	s : kalınlık
ν : Poisson Oranı	D : Dış çap	h : koni yüksekliği
m, m_1, m_2 : Yardımcı Katsayı	d : İç çap	k : Yay rijitlik katsayısı
σ_{b} : basma gerilmesi	$\sigma_{\text{ç}}$: çekme gerilmesi	

Basma Kuvveti ve Kritik Kuvvet:

$$F = \frac{4E}{1 - \nu^2} \frac{\delta}{mD^2} \left[(h - \delta) \left(h - \frac{\delta}{2} \right) s + s^3 \right] \quad (3.1)$$

$$F_{kr} = \frac{4E}{1-\nu^2} \frac{hs^3}{mD^2} \quad (3.2)$$

Yay rijitlik katsayısı:

$$k = \frac{4E}{1-\nu^2} \frac{s}{mD^2} \left[h^2 - 3h\delta + \frac{3}{2}\delta^2 + s^2 \right] \quad (3.3)$$

İç kenardaki basma gerilmesi;

$$\sigma_b = \frac{4E}{1-\nu^2} \frac{\delta}{mD^2} \left[m_1 \left(h - \frac{\delta}{2} \right) + m_2 s \right] \quad (3.4)$$

Dış kenardaki çekme gerilmesi;

$$\sigma_{\zeta} = \frac{4E}{1-\nu^2} \frac{hs^3}{mD^2} \left[m_1 \left(h - \frac{\delta}{2} \right) - m_2 s \right] \quad (3.5)$$

m katsayıları;

$$m = \frac{6}{\pi \ln(D/d)} \left[\frac{D/d - 1}{D/d} \right]^2 \quad (3.6)$$

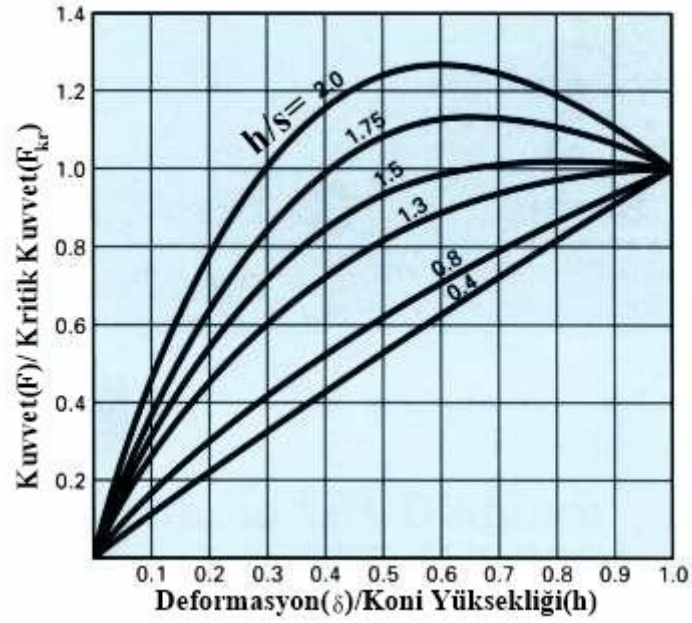
$$m_1 = \frac{6}{\pi \ln(D/d)} \left[\frac{D/d - 1}{\ln(D/d)} \right] \quad (3.7)$$

$$m_2 = \frac{6}{\pi \ln(D/d)} \left[\frac{D/d - 1}{2} \right] \quad (3.8)$$

formülleriyle hesaplanır (Almen ve Laszlo, 1936).

Disk yayın koni yüksekliğinin kalınlığına oranı değiştirilerek, kuvvet-deformasyon davranışı da değiştirilebilir (Şekil 3.11). Yükseklik/kalınlık oranı (h/s) 1,5'a kadar olan değerlerde disk yaylar kuvvet altında güvenle tamamen düzleştirilebilir ya da üst üste paralel/seri olarak istiflenebilir. 1,5 değerinin üstünde ise disk yay davranışı değişmektedir. Belirli bir deformasyon miktarından sonra disk yaya uygulanması gereken düzleştirici kuvvet azalmaktadır 2'ye yakın h/s değerlerinde, disk yay düzleşmeye yaklaştıkça ve yeterince

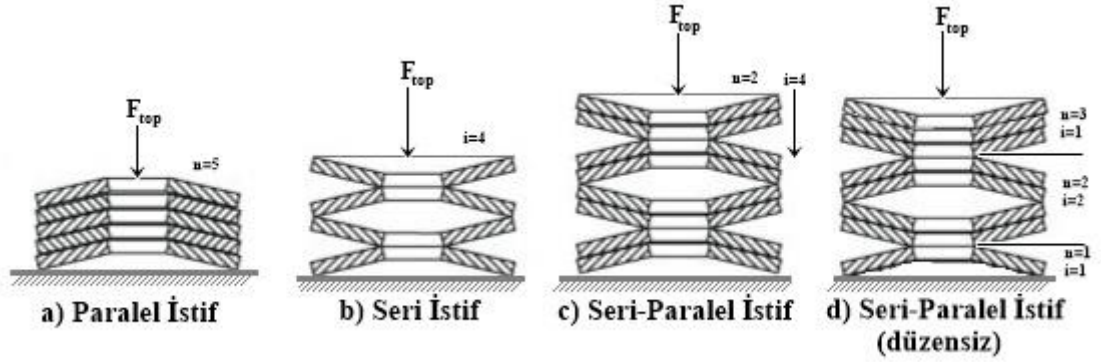
desteklenmemişse ters dönme ihtimali ortaya çıkar. Uygulamada yumuşak olması istenilen disk yaylarda h/s değeri en fazla 1,3 olarak seçilir.



Şekil 3.11. Disk yay karakteristikleri.

3.4. Disk Yayların Birlikte Kullanımı

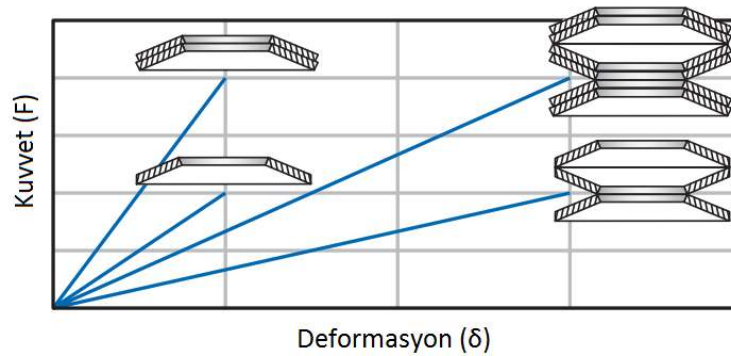
Disk yaylar tek başına kullanılabilecekleri gibi istenilen esneme miktarına ulaşmak veya yük taşıma kapasitesini arttırma amacıyla birbirini üstüne farklı şekillerde istiflenerek de kullanılabilirler. Bunun için yayların aynı boyutta olması gereklidir. Disk yayların birbirini üstüne iç içe geçecek şekilde, yani birisinin konkav kısmı diğerinin konveks kısmına değecek şekilde, istiflenmesine *paralel* kullanım denilir. Yayların dış-dış ve iç-iç çemberlerinin birbirine oturması şeklinde, yani konveks ve konkav yüzeylerin karşılıklı gelecek şekilde, istiflenmesine ise *seri* kullanım denilir.



Kullanım Şekli	(a)	(b)	(c)	(d)
Uygulanan Kuvvet (F_{top})	$n.F$	F	$n.F$	$\Sigma(n.F)$
Toplam Deformasyon (δ_{top})	δ	$i. \delta$	$i. \delta$	$\Sigma(i. \delta)$

Şekil 3.12. Disk yayların birlikte kullanım çeşitleri; F : tek yayın taşıdığı yük, δ : tek yayın deformasyonu; n : paralel istifli yay sayısı, i : seri istifli yay/yay grubu sayısı.

Şekil 3.12'de disk yayların seri, paralel ve bileşik olarak bağlanma çeşitleri görsel olarak verilmiştir. Paralel kullanımda yayların toplam deformasyonu bir yayın deformasyonuna eşit olurken, seri kullanımda her bir yayın deformasyonunun toplamına eşittir. Paralel kullanımda yayların yük taşıma kapasitesi yay sayısı ile birlikte artarken seri kullanım yük taşıma kapasitesi artmaz. Şekil 3.13'te seri, paralel ve karışık olarak istiflenmiş disk yayların kuvvet-deformasyon davranışları orantısal olarak resmedilmiştir.

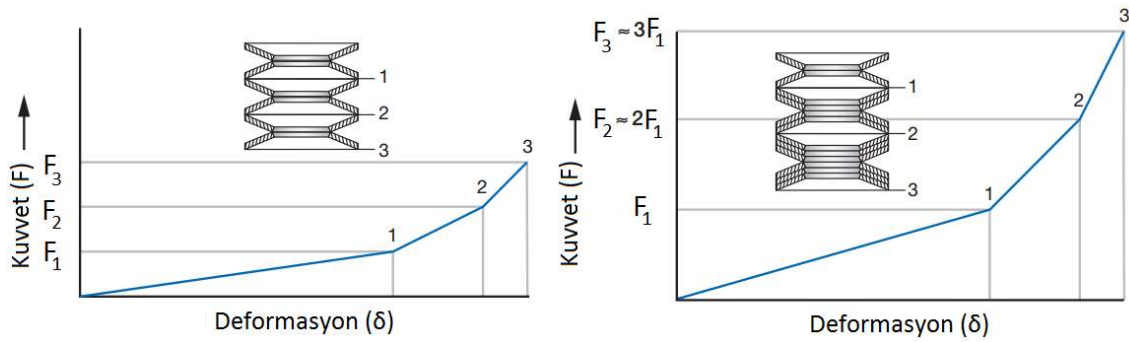


Şekil 3.13. Farklı dizilimlerdeki disk yayların kuvvet-deformasyon davranışları.

Disk yaylar seri olarak kullanılırken sürtünme etkisi de göz önünde bulundurulmalıdır. Disk yayların birbirine değen yüzeyleri arasında sürtünme kuvveti oluşur. Bu sürtünme disk yayın yüklenmesi esnasında daha fazla kuvvet yüklenmesini, yük kaldırılması sırasında ise daha

düşük kuvvet aktarımına neden olur. Bu duruma gecikme etkisi (histerezis) denilir. Bu özellik darbeli ve titreşimli çalışan sistemlerde avantaj sağlamaktadır. Gecikme etkisi paralel bağlı durumdaki disk yay sayısı ile doğru orantılı olarak değişir.

Disk yaylar farklı sayıda disk yay içeren paralel paketlerin seri olarak bağlanmasıyla kademeli olarak artan bir yükleme davranışı elde edilebilir (Şekil 3.14). Aynı davranış eşit sayıda disk yay içeren paketlerin seri bağlanmasıyla kademeli olarak daha az artan bir şekilde elde edilebilir.



Şekil 3.14. Seri olarak istif edilmiş farklı paralel paketlerin kuvvet-deformasyon davranışları.

3.5. Disk Yay Uluslararası Standartları

Disk yayların hesapları ve ölçülendirilmesi ve hakkında uluslararası yaygınlıkta kabul gören standartlar, DIN 2092 (Hesaplama), DIN 2093 (Ölçülendirme) olarak isimlendirilen Alman standartlarıdır. DIN (Deutsches Institut für Normung) tarafından belirlenen bu standartlardan ayrıca, ölçülendirme ve yükleme toleransları, birlikte kullanımdaki kısıtlamalar, statik ve çevrimli yükleme altındaki dayanım davranışı, kullanılan malzemeler, üretim sonrası yüzey iyileştirme ve ısı işlemleri ve üretilmiş ürünlerin testlerinin yapılması hakkında bilgilere de ulaşılabilir.

EK.1'de DIN 2093 standardından alınmış bir kesit görünmektedir. Bu tabloda sırasıyla; dış çap $[D_e]$, iç çap $[D_i]$, kalınlık $[t]$, indirgenmiş kalınlık (Grup3 yayları içi) $[t_1]$, toplam yükseklik $[L_0]$, koni yüksekliği $[h_0]$, koni yüksekliği/kalınlık oranı $[h_0/t]$, deformasyon (çökme) miktarı $[s]$, uygulanan kuvvet $[F]$ değişkenleri sıralanmıştır.

Ölçü özellikleri verilen disk yaylar için 4 aşamalı olarak deformasyon-kuvvet değerleri her durum için ayrı verilmiştir. Öncelikle koni yüksekliğinin 1/4'ü kadar çöken disk yay üzerindeki kuvvet miktarı, ikinci aşamada koni yüksekliğinin yarısı kadar çöken disk yay için

kuvvet miktarı, üçüncü aşamada koni yüksekliğinin $3/4$ 'ü kadar çökertilen disk yayın kuvvet miktarı (kullanımda bu sınırın aşılmaması tavsiye edilir), son olarak dördüncü aşamada koni yüksekliğinin tamamını çökertmek yani disk yayı tam düzleştirmek için gereken kuvvet miktarı bu tablodan okunabilir.

DIN 2093 ölçülerinde disk yaylar için dış çap 8-600 mm arasında, iç çap 3,2-282 mm arasında, kalınlık 0,3-24 mm arasında ve koni yüksekliği ise 0,25-22 mm arasındaki değerlerde olabilmektedir.

DIN 2092 standartlarındaki hesaplamalar Bölüm 3.4'te verilen hesaplamalarla aynıdır. Tüm dünyada kabul gören hesaplama yöntemi Almen ve Laszlo'nun 1936 yılında ortaya çıkardıkları formüllerdir. Disk yaylar üzerine daha güncel hesaplama çalışmalarına ilerideki bölümde değinilecektir.

DIN 2093 standartları içerisinde mevcut olan bir diğer önemli konu ise toleranslardır. Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de verilen tolerans değerleri yayların çap, eşmerkezlilik, kalınlık, yükseklik ve kuvvet değerleri için ayrıntılı olarak verilmiştir. Üreticilerin bu hassasiyeti gözeterek üretim yapmaları standartlara uymak açısından gereklidir.

Disk yay üretiminde malzeme olarak oldukça geniş bir yelpaze bulunur. Ancak standartlarda, elastik modülü 206 GPa olan üstün kaliteli çeliklerin kullanılması tavsiye edilir. Genelde yay çelikleri olan 50CrV4, 51CrMoV4 ve Ck67 aşırı ısı ve korozyon olmadığı müddetçe sıklıkla tercih edilen çeliklerdir.

Standartlara göre üretim yöntemi olarak soğuk zımba presleme kullanılır. Üretim sonrasında, su verme, karbürleme, bilyalı dövme gibi sertleştirme ve dayanım arttırma işlemleri uygulanabilir. Ayrıca, yüzeyi çinko ve nikelle kaplama, fosfatlama gibi korozyon önleyici işlemlerden de geçirilebilir.

Üretilmiş disk yaylar, boyutsal ölçümün yanı sıra koni yüksekliğinin $0,75$ 'ine kadar çökertilme suretiyle teste tabi tutulur. Sertlik değerleri de ölçülen disk yaylar uygun koşulları sağlama durumunda standartlara uygun görülerek piyasaya sürülür.

Çizelge 3.1. DIN 2093 Standardı disk yay çap ve eşmerkezlilik toleransları (DIN 2093, 2013).

Çap Toleransları			Eşmerkezlilik Toleransları		
D_e ve D_i mm	Tolerans D_e mm	Tolerans D_i mm	D_e mm	Tolerans mm	
>3-6	0 / -0,12	0 / +0,12	>3-6	0,15	$2 \times IT 11$
>6-10	0 / -0,15	0 / +0,15	>6-10	0,18	$2 \times IT 11$
>10-18	0 / -0,18	0 / +0,18	>10-18	0,22	$2 \times IT 11$
>18-30	0 / -0,21	0 / +0,21	>18-30	0,26	$2 \times IT 11$
>30-50	0 / -0,25	0 / +0,25	>30-50	0,32	$2 \times IT 11$
>50-80	0 / -0,30	0 / +0,30	>50-80	0,60	$2 \times IT 12$
>80-120	0 / -0,35	0 / +0,35	>80-120	0,70	$2 \times IT 12$
>120-180	0 / -0,40	0 / +0,40	>120-180	0,80	$2 \times IT 12$
>180-250	0 / -0,46	0 / +0,46	>180-250	0,92	$2 \times IT 12$
>250-315	0 / -0,52	0 / +0,52	>250-315	1,04	$2 \times IT 12$
>315-400	0 / -0,57	0 / +0,57	>315-400	1,14	$2 \times IT 12$
>400-500	0 / -0,63	0 / +0,63	>400-500	1,26	$2 \times IT 12$
>500-600	0 / -0,68	0 / +0,68	>500-600	1,36	$2 \times IT 12$

Çizelge 3.2. DIN 2093 Disk yay kalınlık, yükseklik ve kuvvet toleransları (DIN 2093, 2013).

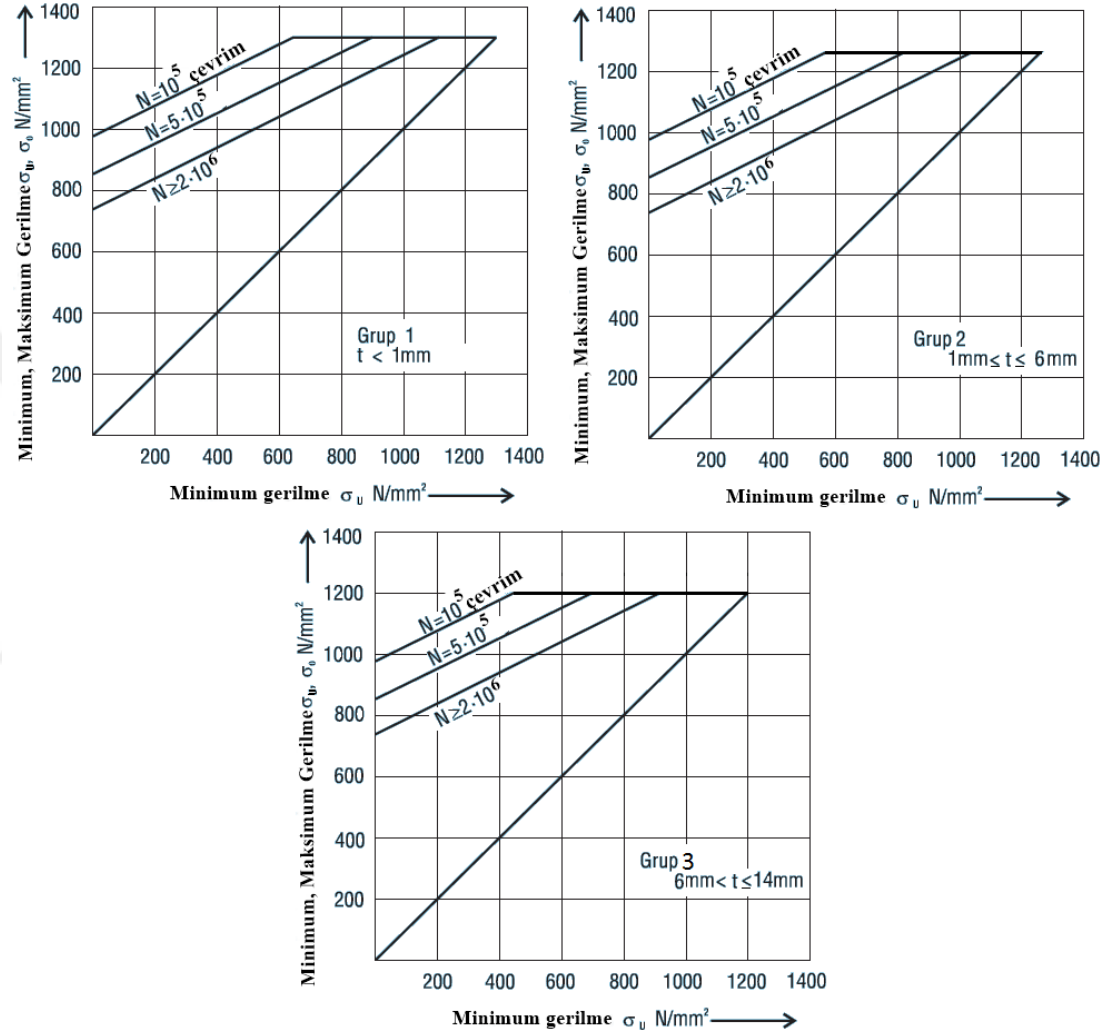
Kalınlık ve Yükseklik Toleransları				Yay Kuvveti Toleransları		
Grup	Kalınlık (t / t_1) mm	Kalınlık Toleransı (t) mm	Yükseklik Toleransı (L_0) mm	Grup	Kalınlık (t / t_1) mm	Tolerans $s = 0.75 h_0$ %
1	0,2-0,6	+0,02 / -0,06	+0,10 / -0,05	1	<1,25	+25 / -7,5
1	>0,6-1,25	+0,03 / -0,09	+0,10 / -0,05	2	1,25-3,0	+15 / -7,5
2	1,25-2,0	+0,04 / -0,12	+0,15 / -0,08	2	>3,0-6,0	+10 / -5
2	>2,0-3,0	+0,04 / -0,12	+0,20 / -0,10	3	>6,0-15	± 5
2	>3,0-3,8	+0,04 / -0,12	+0,30 / -0,15			
2	>3,8-6,0	+0,04 / -0,12	+0,30 / -0,15			
3	>6,0-15	$\pm 0,10$	$\pm 0,30$			
3	>15-25	$\pm 0,12$	$\pm 0,50^*$			
3	>25-40	$\pm 0,15$	$\pm 1,00^*$			
* $D_e / t < 20$ için geçerli						

3.6. Disk Yayların Mukavemet Kontrolü

Statik yük altında ıslah çeliklerinden üretilmiş yaylarda deformasyon miktarı, h yüksekliğinin 0.75'i kadar iken, diskin iç çemberinin üst noktasındaki gerilme $\sigma \leq 2000-2400 \text{ N/mm}^2$ olmalıdır. Yayın düz hale geldiği durumda ise $\sigma \leq 2600-3000 \text{ N/mm}^2$ olmalıdır. Dinamik yük için Şekil 3.15'teki Smith diyagramları kullanılarak kontrol yapılır (Babalık ve Çavdar, 2012).

$$2\sigma_g = \sigma_2 - \sigma_1 \leq \Delta\sigma_{em} = \sigma_0 - \sigma_u \quad (3.9)$$

Eşitlik 3.9 da ki, σ_g : gerilme genliği, σ_2 : en büyük çalışma gerilmesi, σ_1 : en küçük çalışma gerilmesi, σ_{em} : emniyet gerilmesi, σ_0 : en büyük gerilme mukavemet sınırı, σ_u : en küçük gerilme mukavemet sınırını temsil eder.



Şekil 3.15. Disk yayların smith sürekli mukavemet diyagramları (DIN 2093, 2013).

3.7. Disk Yaylar Üzerine Güncel Çalışmalar

Disk yayların analizinde iki temel yaklaşım bulunur: katı cisimler mekaniği metodu ve sonlu elemanlar metodu. Uygulanan yük ve şekil değiştirme arasındaki ilişki ilk olarak 1936 yılında Almen ve Laszo tarafından yaklaşık bir çözüm olarak ortaya çıkarılmıştır. Günümüzde de en yaygın olarak bilinen ve uygulanan yöntemdir. Daha sonra Curti ve Orlando tarafından bu teoriye alternatif olarak radyal ve teğetsel gerilmeleri birlikte esas alan bir eşitlik geliştirilmiştir.

Bu teoride her iki gerilme türü de hesaba katılmış ve en büyük radyal gerilmenin en büyük teğetsel gerilmeden çok küçük bir değer olduğu açığa çıkarılmıştır (Curti ve Orlando, 1979). Ortaya atılan bütün teorilerde Timoshenko'nun hipotezi temel alınmıştır. Bu hipoteze göre şekil değiştiren disk yayın kesitinde herhangi bir bozulma (eğilme, kayma) olmayacağı kabul edilir (Timosehsko, 1921).

Elastisite mekaniği yöntemleriyle geliştirdiği çözümde Hübner, ikinci dereceden doğrusal olmayan Reissner-Meissner konik kabuklar teorisi denklemlerini kullanmıştır. Almen-Laszo (A-L) çözümüne göre daha kesin sonuç veren bu yöntemde, çözüm sürecinin aşırı karmaşık olması mühendislik kullanımında pratik olarak uygun görülmemiştir (Hübner, 1984).

Disk yayların doğrusal olmayan karakteristikleri bazı araştırmacılar tarafından sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Analysis:FEA) kullanılarak çalışılmıştır. Ozaki ve ark. uygulanan yük-şekil değiştirme eğrilerini, enerji denkliği ve kenarlarda oluşan sürtünmeden kaynaklanan etkilerini dikkate alarak basitleştirilmiş bir şekilde tanımlamışlardır. Daha sonra bu eğrileri çeşitli koşullarda yaptıkları FEA ve deneysel metot sonuçlarıyla karşılaştırarak geçerliliklerini doğrulamışlardır (Ozaki vd., 2012).

Disk yaylar sahip olduğu geometri nedeniyle doğrusal olmayan karakteristik gösterirler. Bu davranışı analiz etmek için ince kabuk teorisi ya da sonlu elemanlar metodu kullanılarak, analitik ya da sayısal modeller oluşturulabilir. Her iki yöntem de bu analiz için etkili sonuçlar verir. Ancak FEA yönteminde birçok farklı sayısal modelin incelenmesi ve farklı ölçü ve boyutlardaki disk yaylar için bu verilerden yola çıkma zorunluluğu vardır. Yaygın olarak kullanılan Almen-Laszo algoritması koni yüksekliği küçük olan disk yaylarda doğru sonuçlar vermektedir, ancak büyük koni yüksekliği, geniş et kalınlığı ve yüksek miktardaki yüklerde bu çözümün hata oranı artmaktadır. Bunun için mühendislik tasarımında disk yayların seçimi için gerekli etkili bir analitik yöneme ihtiyaç vardır. Zheng ve arkadaşları bu ihtiyaçtan yola çıkarak enerji tabanlı bir metot geliştirmişlerdir. Bu metotta uygulanan yük altında disk yayda oluşan şekil değiştirme enerjileri dikkate alınarak eşitlikler oluşturulmuştur. Geliştirdikleri bu yöntem büyük koni yüksekliğine sahip yaylarda, A-L algoritmasına göre daha doğru sonuçlar vermiştir (Zheng vd., 2014).

Zheng ve arkadaşlarının çalışmasında disk yayların teorik çalışma yükü deneysel ölçüm değerinden her zaman daha fazla olduğu görülmüştür. Yani belirli bir yük altındaki teorik deformasyon miktarı gerçek değerinden daha azdır. Disk yayların rijitliği artan deformasyon miktarıyla azalır ve disk yayın düzleşmeye yaklaştığı mesafede ise sabitleme eğilimi

gösterirler. Disk yayların hesaplanan analitik rijitlikleri normal çalışma şartları altındaki deneysel değerlere göre daha düşüktür.

Disk yayın serbest yüksekliğinin kalınlığına oranının $[0, \sqrt{2}]$ aralığındaki değerlerinde yay rijitliği bu oranla birlikte artar. $[\sqrt{2}, 2\sqrt{2}]$ aralığındaki değerlerde ise yay üzerindeki yük belirli bir değeri aştıktan sonra negatif rijitlik bölgesi oluşmaya başlar. Bu bölgede yayın davranışı kararsızdır. Karasız bölgenin genişliği bu oranın büyümesiyle birlikte artar. Bu çalışma koşullarında yüksek miktardaki yüklerde disk yayın ters dönme yani ters koni durumuna geçme ihtimali bulunur. Bu da genellikle istenilmeyen bir durumdur (Zheng vd., 2014).

Dayanma yüzeyi oluşturulan disk yaylar daha yüksek miktarda yük taşıyabilirler. Dayanma yüzeyli yaylarda kuvvetin uygulanma noktası değişir. Bu yaylarda deformasyon miktarı azalır yani yay rijitliği artırılmış olur. Dayanma yüzeyi genişliği 0'dan 4'ye doğru yükseltildiğinde yay rijitliği önemli ölçüde artar özellikle 0-2 mm arasında önemli bir artış gösterir. Dayanma yüzeyi genişliği için 2 mm iyi bir performans sergiler ve tercih edilmesi uygun bir ölçüdür. Dayanma yüzeyli disk yaylar şekil değiştirme sonucu dikey konik düzlem kesitinde merkezde bulunan nötral bir nokta etrafında dönme hareketi yapar (Zheng vd., 2014).

Pedersen ve Pedersen yaptıkları çalışmada sabit kalınlığa sahip ve sabit olmayan kalınlığa sahip disk yayların gerilme dağılımlarını ve kuvvet-deformasyon davranışını analiz etmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yaptıkları analiz sonuçları ile analitik hesaplama yöntemiyle elde ettikleri sonuçları Poisson oranı, toplam yay sabiti ve gerilme dağılımı yönünden karşılaştırmışlardır. Sabit kalınlıktaki disk yayda düzenli olmayan bir gerilme dağılımı gözlemleyen ekip, trapez şekilli değişken kalınlıktaki disk yayda ise düzenli ve değişken olmayan bir gerilme dağılımı gözlemlemişlerdir. Ancak değişken kalınlıktaki disk yay kullanmanın dezavantajı olarak, sahip olduğu geometriden dolayı paralel istife izin vermemesi, sadece seri istif veya tek bir yay olarak kullanıma uygun olduğu belirtilmiştir.

Pedersen ve Pedersen çalışmalarında analitik hesaplama yöntemi olarak Almen-Laszo metodu kullanmışlardır. Bu yöntemde DIN standartlarınca her durumda 0,3 alınması gerektiği belirtilen Poisson oranının hesaplamalarda hataya neden olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun yerine Poisson oranını 0 alarak, yani hesaba katmadan yapılan sonlu elemanlar yöntemi ve analitik çözümleme sonuçları birbiri ile tutarlı çıkmıştır. Özellikle disk yayın dış çapının iç çapına oranının büyük olduğu durumlarda analitik çözümdeki hata oranı artmaktadır. Bunun nedeni disk yayın geometrisinin, hesaplamalarda Poisson oranının etkisini arttırmasıdır (Pedersen ve Pedersen, 2011).

Ozaki ve arkadaşları eksenel yük altındaki disk yayların statik deformasyon davranışında sürtünme sınırlarının etkileri sonlu elemanlar metodu kullanılarak incelenmişlerdir. Temel enerji eşitlikleri ve sürtünme yasası kullanılarak oluşturdukları çözümleme sayesinde disk yayların kuvvet-deformasyon grafiklerini sürtünme kaynaklı histerezis (gecikme) durumunu da göz önüne alacak şekilde oluşturmuşlardır. Ayrıca eksenel yönde zorlanmış titreşime maruz kalan disk yayların dinamik karakteristiklerini, sürtünme sınırları etkisi ve sürtünme kaynaklı sönümlenme etkisi yönünden incelemişlerdir. Geliştirdikleri çözümlemenin titreşim analizinde de kullanılabilir olduğunu doğrulamışlardır (Ozaki vd., 2012).

Disk yaylar sahip oldukları doğrusal olmayan kuvvet-deformasyon davranışları ve istif halinde seri veya paralel olarak kullanılabilmesi gibi özellikleri nedeniyle tasarımcılar için birçok alternatif ve istif durumu arasında seçim yapmak zorluk oluşturmaktadırlar. Bunu çözmek amacıyla Paredes ve Daidie, tasarımcının istekleri doğrultusunda kataloglara uygun veya özel boyutlu disk yayların seçimini otomatik olarak yapabilen bir bilgisayar algoritması geliştirmişlerdir. Bu algorithmada belirtilen kısıtlara göre (iç çap, dış çap, kalınlık, yükseklik, deformasyon) amaç fonksiyonu belirlenip en uygun disk yay seçimi yapılabilmektedir (Paredes ve Daidie, 2010).

4. YAPILAN ÇALIŞMA

Bu çalışmada, dikey eksenli çalışan, sabit disk kalıplı ve ruloları hareketli bir pelet presinin basınç regülasyonu sisteme disk yay entegre edilerek çözülmeye çalışılmıştır. Disk yaylar, küçük deformasyonlarda büyük yükler taşıyabilen makine elemanlarıdır. Genelde darbeleri ve titreşimli yükler altındaki sistemlerde meydana gelen büyük kuvvetleri az bir deformasyon miktarıyla sönümlemekte kullanılırlar. Sahip oldukları basit konik geometri ve modüler yapısı sayesinde günümüzde birçok alanda kullanılmakta ve bu çalışmada olduğu gibi yeni kullanım alanları ortaya çıkmaktadır.

Pelet üretimi sürecinde en uygun üretim koşulları, üretim başladıktan belirli bir süre sonra, özellikle kalıp diski ve ilişkili bileşenleri belirli bir sıcaklığa ulaştıktan sonra oluşmaktadır. Bunun nedeni biyokütle ve kalıp arasındaki sürtünmenin yüksek sıcaklıkta azalarak dengeli bir rejime girmesi ve ayrıca sıcaklıkla birlikte biyokütle içyapısındaki bileşenlerin peletlenme için uygun hale gelmesidir. Yüksek sıcaklıklarda biyokütleden dışarı atılan nem kalıp yüzeyi ve peletlenen malzeme arasındaki sürtünmeyi azaltır (Stelte vd., 2011a). Ayrıca bitkisel biyokütlenin temel yapıtaşlarından birisi olan ve peletlenme işleminde bağlayıcı olarak rol oynayan lignin maddesinin camsı-geçiş sıcaklığını aştıktan sonra akışkanlık kazanması daha sağlam bağlanmış, yani mekanik özelliği iyi olan peletlerin üretilmesini sağlar (Gilbert vd.,2009). Lignin polimerinin %8 nem oranında 67-75 °C sıcaklık aralığında camsı geçişe uğradığı bilinmektedir. Bu sıcaklıktan sonra biyoküttelede bulunan lignin yumuşamaya başlar ve bağlayıcılığı artar (Stelte vd., 2011b)

Peletleme sistemleri ilk çalıştırma sırasında fazladan bir zorlanmaya maruz kalmaktadır. Bu durum üretim başlamadan makinenin tıkanabilmesine ya da fazladan enerji sarfına neden olmaktadır.

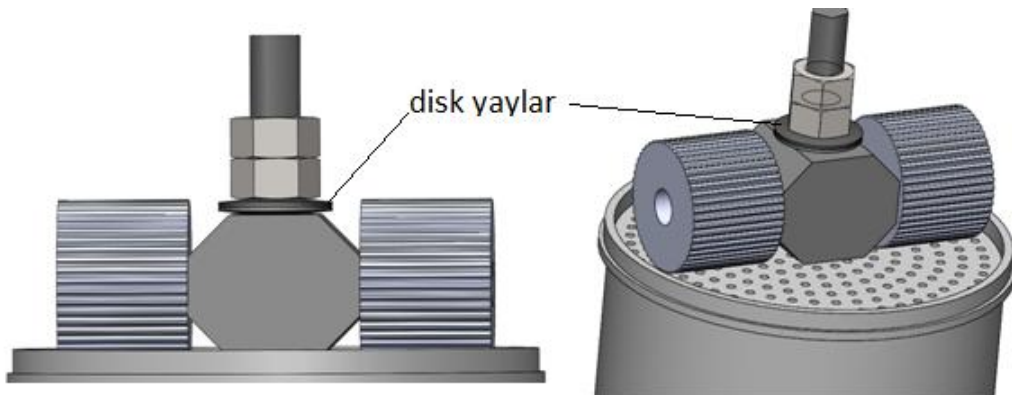
Biyokütle hammaddesinin cinsine bağlı olarak pelet makinesi farklı basınç değerlerinde çalışmaya zorlanmaktadır. Bu durum, sertlik değeri yüksek ve kalıp cidarıyla sürtünme katsayısı fazla olan biyokütle cinslerinde sistemin aşırı yük altına girmesine ve tıkanmasına neden olmaktadır.

Biyokütle doğal ortamından toplanması sırasında içerisine yabancı maddeler kaçabilmektedir. Ayrıca sisteme ait cıvata ve pul gibi küçük bileşenler peletleme makinesi içine kaçabilmektedir. Taş ve metal gibi yüksek sertlikteki bu maddeler rulolar ve kalıp arasında sıkışarak sistemde kalıcı hasarlara neden olabilmektedir. Bu durumda sisteme entegre edilen

disk yay devreye girerek yeterli esneme sağlandığında sistemin hasar görmesinin önüne geçilmiş olur.

Bu çalışmada, disk yaylar Şekil 4.1'de görüldüğü gibi ruloların kalıba baskı yapmasını sağlayan sıkma somunlarının altına koyularak sisteme dahil edilmiştir. Daha sonra somunlar belirli miktarda sıkılarak oluşturulan ön gerilme kuvvetiyle disk yaylar istenilen miktarda çöktürülmüş olur. Bu sayede rulolar üzerinden kalıba aktarılan kuvveti hesaplamak da mümkündür.

Geleneksel preslerinde rulo ve kalıp arasında 0,5-1 mm arasında boşluk bırakılarak öğütülmüş biyokütlenin bu aralıkta sıkıştırılarak peletlenmesi sağlanır. Ancak biyokütlenin sahip olduğu karakteristik değerler (sertlik, nem, lignin miktarı gibi) nedeniyle bu açıklığın farklı cinsteki malzemeler için tekrar ayarlanmasını gerektirir. Bu açıklık iyi ayarlanmadığı takdirde makinenin tıkanması veya pelet üretememesi yaygın karşılaşılan bir sorundur. Disk yay kullanılarak geliştirilen bu sistemde, yayların sahip olduğu esneme özelliği sayesinde biyokütle gerekli ve yeterli miktarda esneyen yay sayesinde rulo ve kalıp arasına girerek etkili bir şekilde peltelenebilir. Bu sayede kalıp-rulo açıklığının ayarlanması kaynaklı üretim sorunlarına etkili bir çözüm getirilmiş olur.



Şekil 4.1. Peletleme sistemine disk yayların eklenmesi.

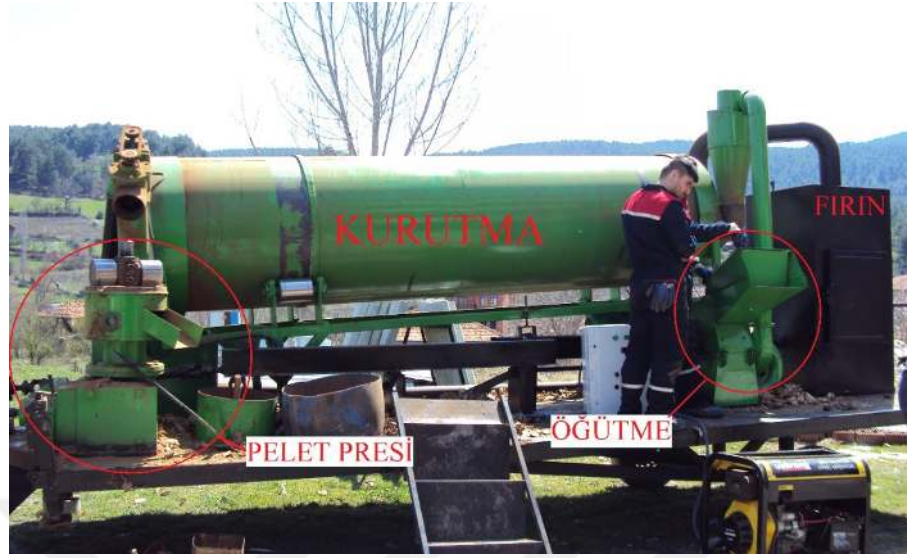
Pelet presi içerisine biyokütle arasına karışmış yabancı ve sert maddelerin (taş, pul, çivi, metal parçası) kaçması sonucu makinede hasar oluşturup üretimi durdurması da sık karşılaşılabilen bir sorundur. Geliştirilen bu uygulama sayesinde, makine içine yabancı madde kaçtığı durumda disk yaylar aşırı bir yüklemeye girerek, makinenin hasara uğramasını engelleyecek şekilde ruloların yukarı kalkmasına imkân sağlar. Böylece makinenin rulo ve kalıbında meydana gelecek kalıcı deformasyonlar önlenmiş olur.

Bu çalışmada kullanılan pelet presi Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından desteklenen ve Tekno-Girişim Programı kapsamında bir projede imalatı yapılan "Mobil Pelet Makinesi" sistemi içinde yer almaktadır. 50 HP gücündeki bir traktörün PTO (power take-off) çıkış milinden tahrik edilen sistemde ayrıca biyokütle öğütme ve kurutma üniteleri de mevcuttur (Şekil 4.2-3).



Şekil 4.2. Çalışmamızda kullanılan traktör kuyruk mili tahrikli kombine mobil pelet makinesi.

Yapılan çalışmada çam ağacı artıklarının (kabuk, talaş, kozalak, dal vb.) peletlenme koşulları incelenmiştir.



Şekil 4.3. Kombine pelet makinesi bileşenlerinin gösterimi.

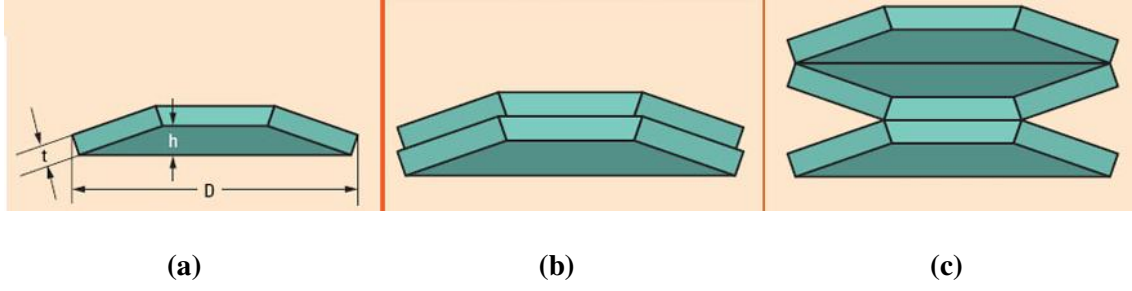
Sistemde kullanılan disk yayların deformasyon miktarı ve kuvvet hesaplamaları, analitik yöntem ve sonlu elemanlar analiziyle yapıp karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu kuvvetler altında ne kadar peletleme basıncı oluşturduğu da yaklaşık olarak hesaplanmıştır.

4.1. Disk Yay Seçimi ve Hesaplama

Disk yayların dış çapları 8-600 mm gibi geniş bir aralıkta olabilmektedir. Üretici firmalar genelde DIN 2093 standardını esas alarak kataloglar oluşturmaktadırlar ancak ihtiyaç halinde özel ölçülerde disk yaylarda üretilebilmektedir. Çalışmamızda kullandığımız peletleme makinesinin ölçülerine uygun olarak, bir firmadan alınan katalog doğrultusunda standartlar dahilinde dış çapı 125, iç çapı 71 mm olan disk yay kullanılmıştır. Disk yayın diğer parametreleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Disk yaylar tek olarak kullanılabildikleri gibi istenilen çalışma koşullarına göre birden fazla disk yay seri veya paralel olarak kullanılabilir (Şekil 4.4). Seri kullanımda disk yayları toplam deformasyon miktarı artmakta, yük taşıma kapasitesi ise sabit kalmaktadır. Paralel kullanımda ise deformasyon miktarı aynı kalmakta, yük taşıma kapasitesi ise kullanılan disk yay miktarıyla doğru orantılı olarak artmaktadır.

Çalışmamızda iki öncelikle tek bir disk yay sisteme dahil edilerek üretime başlanmıştır. Ancak tek bir disk yayın sistemde yeterli peletleme basıncı oluşturamadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle toplam yay rijitliğini arttırmak ve daha büyük peletleme kuvveti elde etmek amacıyla iki adet disk yay paralel düzende sisteme dahil edilmiştir.



Şekil 4.4. (a) tek (b) paralel (c) seri düzendeki disk yaylar.

Çizelge 4.1. Kullanılan disk yayın ölçüleri ve ilişkili parametreleri

Dış Çap (D) [mm]	İç Çap (d) [mm]	Koni Yüksekliği (h) [mm]	Kalınlık (s) [mm]	Toplam Yükseklik (h+s) [mm]	D/d	h/s
125	71	2,9	8	10,9	1,76	0,3625

Almen-Laszlo formüllerine göre disk yayın üzerindeki kuvvet ve çökme miktarı arasındaki ilişki:

$$F = \frac{4E}{1 - \nu^2} \frac{\delta}{mD^2} \left[(h - \delta) \left(h - \frac{\delta}{2} \right) s + s^3 \right] \quad (4.1)$$

olarak tanımlanır.

E: Young Modülü

δ : Deformasyon (çökme) Miktarı

s: kalınlık

ν : Poisson Oranı

D: Dış çap

h: koni yüksekliği

m, m_1, m_2 : Yardımcı Katsayı

d: İç çap

k: Yay rijitlik katsayısı

σ_b : basma gerilmesi

σ_ϵ : çekme gerilmesi

Ayrıca disk yay üzerinde oluşan en büyük gerilme olan iç kenardaki basma gerilmesi:

$$\sigma_b = \frac{4E}{1 - \nu^2} \frac{\delta}{mD^2} \left[m_1 \left(h - \frac{\delta}{2} \right) + m_2 s \right] \quad (4.2)$$

olarak önceki bölümde tanımlanmıştı.

Sisteme dahil edilen disk yayların çökme miktarlarına göre ve oluşturdıkları kuvvetlerin ve basınçların hesaplaması yapılmıştır. Disk yay üzerinde oluşan gerilmelerden en büyük ve kritik olanı iç kenardaki basma gerilmesidir. Disk yayın dayanımını belirleyen gerilme bu gerilme olduğu için hesaplamalarda dikkate alınıp analizi yapılan gerilme bu olmuştur.

Hesaplamalar yayın toplam koni yüksekliğinin 0.25, 0.50, 0.75 ve 1 katı çökme durumuna göre yapılmıştır. Bu sayede peletleme işleminin hangi basınç değerleri arasında olduğu da hesaplanacaktır. Disk yaylar için güvenli olarak kullanım sınırı genelde 0.75h çökme miktarı olarak kabul edilir. Uygulamalarımızda bu değerin aşılmadığı varsayılmıştır. Tek disk yay ve paralel iki disk yay için ayrı hesaplama yapılmıştır.

Formüllerde kullanılan bütün uzunluklar mm cinsinden, elastik modül MPa cinsinden hesaplama yapılarak Newton biriminde kuvvet, MPa birimde basınç değerleri elde edilmiştir.

4.1.1. Tek disk yay için hesaplamalar

Bu bölümde tek bir disk yay kullanılması durumunda toplam koni yüksekliğinin 0.25, 0.5, 0.75 ve 1 katı kadar çökme durumlarında uygulanan kuvvet değerleri ve disk yay üzerinde oluşan en büyük gerilme değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.5'de kuvvet-deformasyon ve gerilme-deformasyon ilişkisini ifade edecek şekilde grafik çizilmiştir.

❖ 0.25h = 0.725 mm çökme için:

$$F = \frac{4 * 206000 \text{ MPa}}{1 - 0,3^2} \frac{0,725}{0,63 * 125^2} \left[(2,9 - 0,725) \left(2,9 - \frac{0,725}{2} \right) 8 + 8^3 \right] \quad (4.3)$$

$$= 37082,10 \text{ N}$$

$$\sigma_b = \frac{4 * 206000 \text{ MPa}}{1 - 0,3^2} \frac{0,725}{0,63 * 125^2} \left[1,16 \left(2,9 - \frac{0,725}{2} \right) + 1,28 * 8 \right] = 881,78 \text{ MPa} \quad (4.4)$$

❖ 0.5h = 1.45 mm çökme için:

$$F = \frac{4 * 206000 \text{ MPa}}{1 - 0,3^2} \frac{1,45}{0,63 * 125^2} \left[(2,9 - 1,45) \left(2,9 - \frac{1,45}{2} \right) 8 + 8^3 \right] = 71640,82 \text{ N} \quad (4.5)$$

$$\sigma_b = \frac{4 * 206000 \text{ MPa}}{1 - 0,3^2} \frac{1,45}{0,63 * 125^2} \left[1,16 \left(2,9 - \frac{1,45}{2} \right) + 1,28 * 8 \right] = 1707,31 \text{ MPa} \quad (4.6)$$

❖ $0.75h = 2.175 \text{ mm}$ çökme için:

$$F = \frac{4 * 206000 \text{ MPa}}{1 - 0,3^2} \frac{2,175}{0,63 * 125^2} \left[(2,9 - 2,175) \left(2,9 - \frac{2,175}{2} \right) 8 + 8^3 \right] \quad (4.7)$$

$$= 104517,32 \text{ N}$$

$$\sigma_b = \frac{4 * 206000 \text{ MPa}}{1 - 0,3^2} \frac{2,175}{0,63 * 125^2} \left[1,16 \left(2,9 - \frac{2,175}{2} \right) + 1,28 * 8 \right] = 2476,60 \text{ MPa} \quad (4.8)$$

❖ $h = 2.9 \text{ mm}$ çökme için:

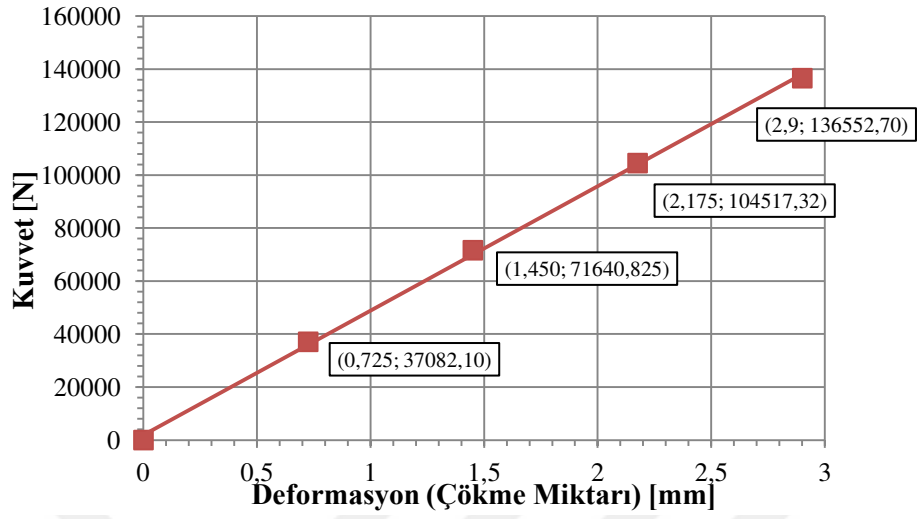
$$F = F_{kr} = \frac{4E}{1 - \nu^2} \frac{hs^3}{mD^2} = \frac{4 * 206000 \text{ MPa}}{1 - 0,3^2} \frac{2,9 * 8^3}{0,63 * 125^2} = 136552,70 \text{ N} \quad (4.9)$$

$$\sigma_b = \frac{4 * 206000 \text{ MPa}}{1 - 0,3^2} \frac{2,9}{0,63 * 125^2} \left[1,16 \left(2,9 - \frac{2,9}{2} \right) + 1,28 * 8 \right] = 3189,62 \text{ MPa} \quad (4.10)$$

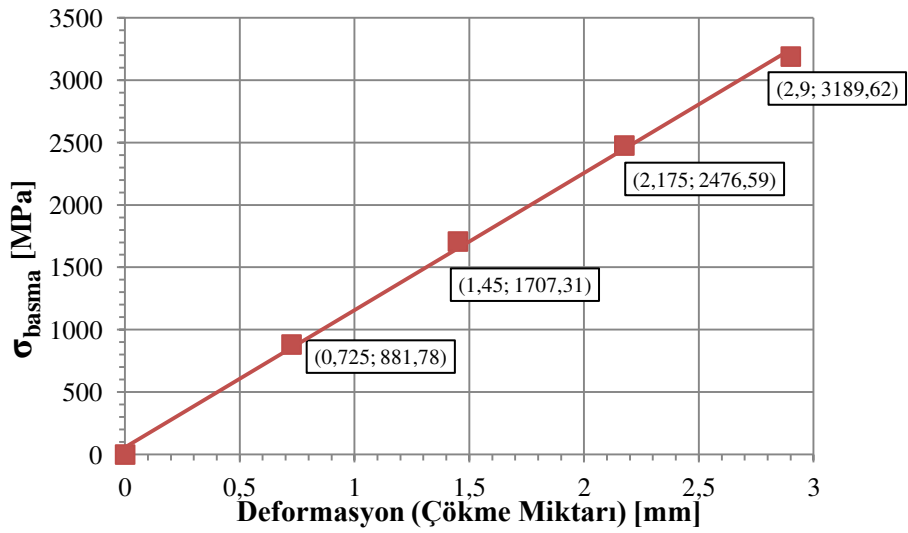
olarak bulunur.

Hesaplamalar sonucunda tek bir disk yayın dönen rulolara başlangıç durumunda 37 kN kuvvet uyguladığı, çalışma koşullarına bağlı olarak bu değerin en yüksek sınırı olan 136,5 kN'a tam düzleşme durumunda çıkabileceği belirlenmiştir. Şekil 4.5'te üstteki grafikte görüldüğü gibi kuvvet ve deformasyon arasında lineer kabul edilebilecek bir ilişki vardır. Bunun nedeni kullanılan yayın h/s (yükseklik/kalınlık) parametresinin düşük bir değerde ($2,9/8=0,3625$) olmasıdır.

Hesaplanan gerilme değerleri, yayın iç halkasının üst yüzeyinde oluşan en büyük basma gerilmesi değerleridir. Bu değerler de deformasyona bağlı olarak lineere yakın bir değişim gösterir. Yayın h/s değerinin düşük olması bunun nedeni olarak kabul edilebilir.



(a)



(b)

Şekil 4.5. Tek disk yay için hesaplanan (a) kuvvet-deformasyon (b) gerilme-deformasyon değerleri.

4.1.2. Paralel iki disk yay için hesaplamalar

Paralel düzendeki iki disk yayda teorik olarak yük taşıma kapasitesi 2 katına çıkacağı için kuvvet tek disk yay için bulunan kuvvet değerleri 2 ile çarpılarak kuvvet-deformasyon ilişkileri sayısal olarak ortaya koyulabilir.

Disk yaylar üzerinde oluşan gerilmeler her iki disk yay için aynı ve tek disk yay durumunda oluşan gerilme değerleriyle eşit olacağı öngörülmüştür. Paralel durumda disk yayların rijitlikleri iki katına çıkar. Tek disk yayla eşit miktardaki deformasyon için uygulanması gereken kuvvet de iki katına çıkar. Bu nedenle teorik olarak, her bir disk yayın taşıdığı kuvvetin ve üzerinde oluşan gerilmenin aynı olduğu söylenebilir.

Tek disk yayda olduğu gibi toplam koni yüksekliğinin 0.25, 0.5, 0.75 ve 1 katı çökme durumunda disk yay paketine uygulanması gereken kuvvetler ve disk yaylar üzerinde oluşan en büyük gerilme değerleri hesaplanmış ve Şekil 4.6'da kuvvet-deformasyon ve gerilme-deformasyon ilişkisini gösteren grafikler çizilmiştir.

❖ $0.25h = 0.725 \text{ mm}$ çökme için:

$$F = 2 * 37082,10 \text{ N} = 74164,2 \text{ N} \quad (4.11)$$

$$\sigma_b = 881,78 \text{ MPa} \quad (4.12)$$

❖ $0.5h = 1.45 \text{ mm}$ çökme için:

$$F = 2 * 71640,82 \text{ N} = 143281,64 \text{ N} \quad (4.13)$$

$$\sigma_b = 1707,31 \text{ MPa} \quad (4.14)$$

❖ $0.75h = 2.175 \text{ mm}$ çökme için:

$$F = 2 * 104517,32 \text{ N} = 209034,64 \text{ N} \quad (4.15)$$

$$\sigma_b = 2476,60 \text{ MPa} \quad (4.16)$$

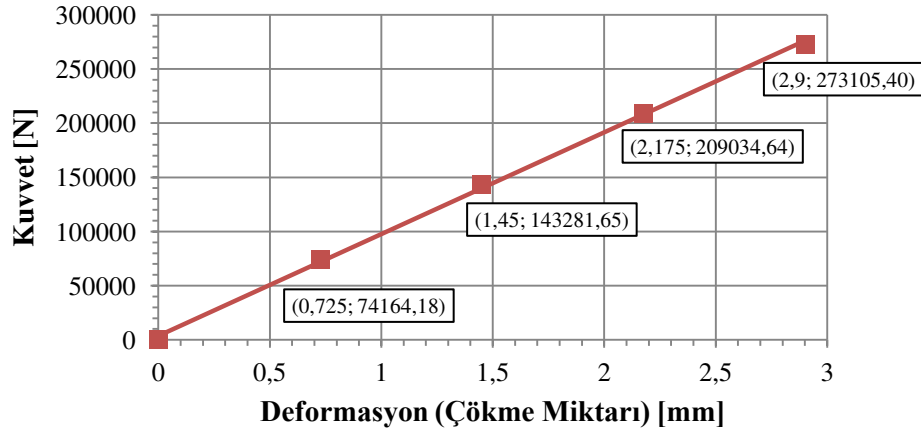
❖ $h = 2.9 \text{ mm}$ çökme için:

$$F = 2 * 136552,70 = 273105,39 \text{ N} \quad (4.17)$$

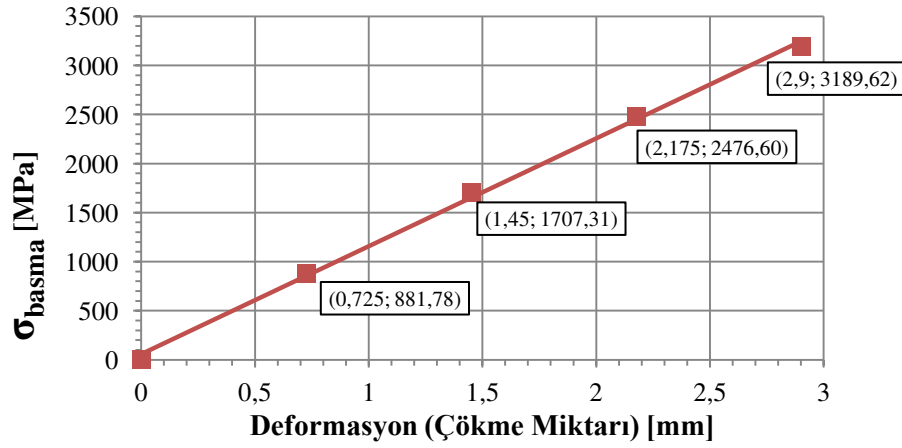
$$\sigma_b = 3189,62 \text{ MPa} \quad (4.18)$$

olarak bulunur.

Tek disk yayda olduğu gibi paralel iki disk yay için de kuvvet-deformasyon ve gerilme-deformasyon ilişkisinin lineere yakın bir ilişkide olduğu Şekil 4.6'da görülmektedir. Paralel disk yaylarda uygulanması gereken teorik kuvvetin iki katına çıkmış olması ve yaylar üzerinde oluşan gerilmelerin tek disk yaydaki durumla aynı olması bu sonucu vermiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.6. Paralel iki disk yay için hesaplanan (a) kuvvet-deformasyon (b) gerilme-deformasyon değerleri.

4.2. Sonlu Elemanlar Analizi

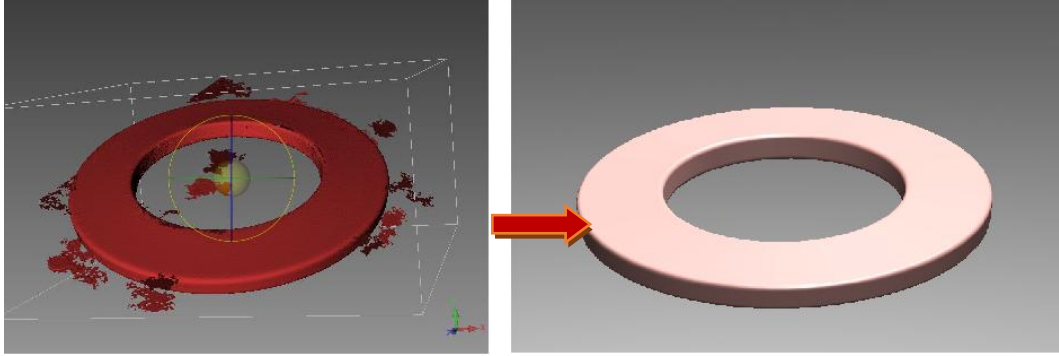
Sonlu elemanlar analizi analitik yöntemlerle hesaplanması zor ve uzun süren problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde elde edilen sonuçlar gerçek kullanım koşullarında sistem davranışları hakkında önemli bilgiler verir.

Yapısal bileşenleri küçük parçacıklara ayırarak, her bir parçacığın diğerine mekanik etkisi üzerinden yapılan bu çözümleme, gerçek koşullarda sistemde oluşacak kuvvet ve gerilme değerleri hakkında yakınsak ve kabul gören sonuçlar ortaya çıkarır.

Disk yayların analitik hesaplamalarında dünya genelinde kabul görüp, DIN 2093 standartlarında da kullanılan denklemler, Almen ve Laszlo tarafından 1936 yılında oluşturulmuştur ve literatürde A-L algoritması olarak da anılır. Bölüm 3.6'da belirtilen bu yönteme ek olarak son yıllarda disk yayların analitik çözümü üzerine farklı denklem sistemleri geliştirilmeye çalışılmış ancak hiçbirisi A-L yöntemi kadar genel-geçer ve kolay uygulanabilir olmamıştır. Ancak A-L yöntemi, hızlı sonuç vermesi ve pratik olmasının yanında belirli miktarda hata payına sahiptir. Bunun nedeni, denklemlerin çıkarılmasında, karmaşık ve uzun denklem sistemlerinden kaçınmak ve kullanışlı denklemler elde etmek adına radyal gerilmelerin ihmal edilerek, teğetsel gerilmelerin esas alınmasıdır. Sonlu elemanlar analizi yapılarak elde edilecek çözümlerde bu hata payının ne kadar olduğu gözlemlenmeye çalışılacaktır.

Paralel disk yayların analitik hesaplarında göz önünde bulundurulmayan önemli bir unsur sürtünmedir. Birinin üst yüzü diğerinin alt yüzüne tamamen temas edecek şekilde yerleştirilen, paralel konumdaki disk yaylarda oldukça geniş bir sürtünme yüzey alanı bulunur. Bu yüzeyde gerçekleşen sürtünmenin etkisi gerçek çalışma koşullarında oldukça etkili sonuçlar ortaya çıkarabilir. Bu etkinin gözlenmesi için paralel disk yayların sonlu elemanlar analizi sürtünmeli durum için gerçekleştirilecektir.

Sonlu elemanlar analizinde gerçek koşullara en yakın sonuçlar alabilmek için, bu tez kapsamında pelet makinesinde kullanılan disk yayın üç boyutlu optik tarayıcı vasıtasıyla CAD (Computer Aided Drawing/Bilgisayar Destekli Çizim) modeli oluşturulmuştur (Şekil 4.7). Optik tarayıcıdan alınan veriler tersine mühendislik yazılımı kullanılarak, sonlu elemanlar paket programında analiz edilebilir yüzeysel parametrelere sahip CAD verisine dönüştürülmüştür.



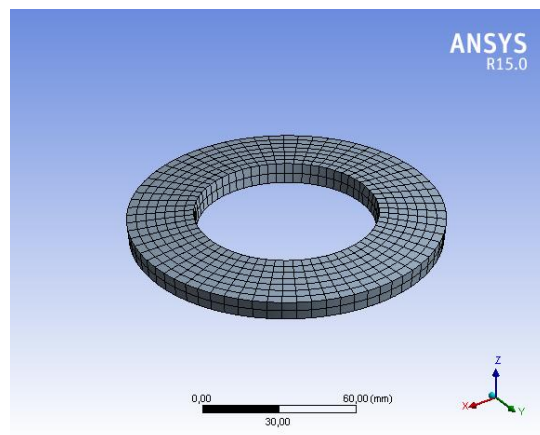
Şekil 4.7. Optik tarayıcıdan elde edilen disk yay tarama verisi ve parametrik CAD modeli.

Elde edilen model ANSYS sonlu elemanlar yazılım programında gerekli sınır koşulları ve parametreler tanımlandıktan sonra analiz edilmiştir. Öncelikle tek bir disk yay daha sonra paralel iki disk yay analiz edilmiştir.

4.2.1. Ağ yapısı (Mesh oluşturma)

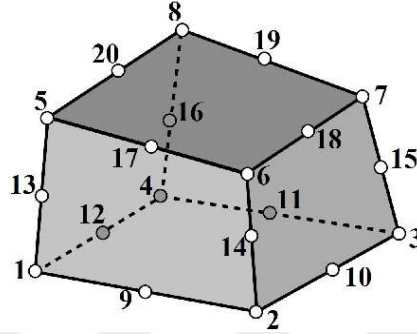
ANSYS sonlu elemanlar analizi programında analiz edilecek modellerin "mesh" adı verilen yapılara bölünmesi gerekir. Düğüm noktalarından oluşan mesh yapıları, model boyunca tutarlı ölçülerde yönelimlerde olması analiz sonucunun doğruluğuna etki yapacaktır. Bu nedenle olabildiği ölçüde düzenli ve tutarlı bir mesh (ağ yapısı) oluşturulmaya özen gösterilmiştir.

Disk yayın sahip olduğu dönel yapı ve karmaşık bir geometriye sahip olmaması, oldukça düzenli bir ağ yapısının oluşmasına izin vermiştir. Bu sayede yapılan analizlerde ağ yapısı kaynaklı hata oranları en aza çekilmeye çalışılmıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Disk yayın ağ yapısı görünümü.

Disk yayın dönel yapısına uygun bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Disk yay kalınlığı boyunca eşit kalınlıkta iki katman halinde bir yapının çözüm için yeterli olacağı öngörülmüştür. Ağ yapısındaki elemanlar, altı yüzlü prizmalar halinde, toplamda 20 düğüm noktası ihtiva eden ve 'Hex20' olarak isimlendirilen yapılar şeklinde oluşturulmuştur (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Hex20 tipi ağ yapısı elemanı.

Oluşturulan ağ yapısında toplam 5695 düğüm noktası ve 938 Hex20 tipi eleman vardır. Ağ yapısı kalitesini belirleyen önemli bir faktör ağ yapısı elemanlara ait en/boy oranıdır. Oluşturulan ağ yapısındaki 938 eleman arasında bu oranın en büyük değeri 2,09, en küçük değeri 1,08 ve ortalaması ise 1,27'dir. Bu oranın 1'e yakın bir değer olması ve büyük bir genliğinin olmaması, ağ yapısının doğru çözüme yakınsama oranını arttıracaktır. Oluşturulan ağ yapısı için kaydedilen bu değerler etkili bir çözümleme yapabilmek için yeterli görülmüştür.

4.2.2. Sınır koşullarını tanımlanması

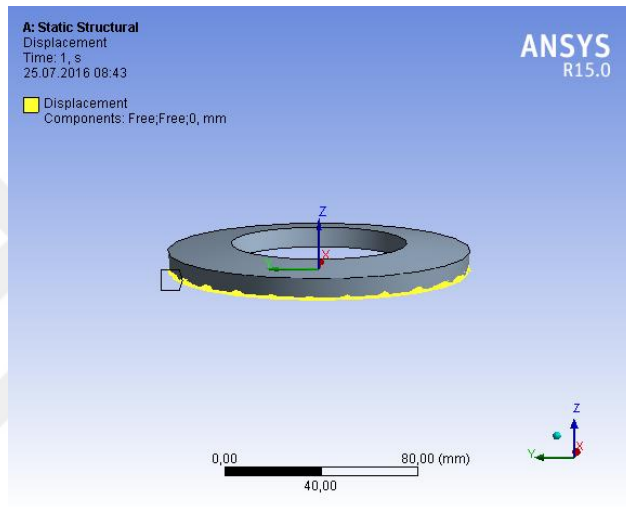
Sonlu elemanlar analizinde sonucu etkileyen önemli bir faktör de çözümlenen yapının içinde bulunduğu sınır koşullarıdır. Bu sınır koşullarının gerçek çalışma koşullarını etkili bir şekilde yansıtması beklenir. Çözümlenen yapının hangi tip desteklere sahip olduğu, deformasyon serbestliği ve üzerindeki yüklemelerin nereden ve nasıl uygulanması gerektiği gibi konular, sınır koşullarının tanımlanması içinde yer alır.

4.2.2.1 Tek disk yay sınır koşulları

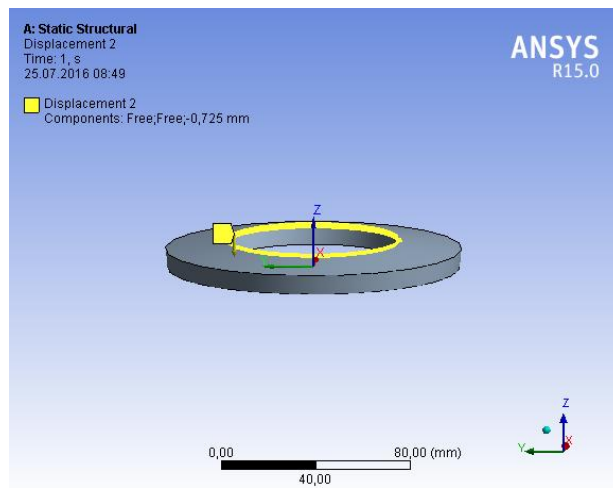
Tek bir disk yay için öncelikle tabanında Şekil 4.10'da görülen X ve Y eksenlerinde serbest Z ekseninde hareket etmesine izin vermeyecek şekilde bir kısıtlama tanımlanmıştır. Bunun nedeni disk yay gerçek koşullarda yukarıdan bastırılırken koni yüksekliği azalıp deforme olarak X ve Y eksenleri boyunca üzerinde olduğu zeminde az bir miktar da olsa hareket etmek isteyecektir. Ayrıca disk yay ile temas ettiği zemin arasında sürtünmenin olmadığı

varsayılmıştır. Bu sayede A-L yöntemi sonuçlarıyla karşılaştırma yapılması daha kolay olacaktır.

Zemindeki hareket kısıtlaması tanımlanan disk yayın, hareketini sağlayıcı bir tahrik koşuluna da ihtiyacı bulunmaktadır. Analitik yöntemde de olduğu gibi $0,25h$, $0,5h$, $0,75h$ ve h yüksekliklerindeki uygulanması gereken kuvvet değerini elde edebilmek için bu yükseklik değerlerinde disk yayın üst kısmında, Z ekseninde Şekil 4.11'de görüldüğü gibi sırasıyla 4 farklı deformasyon değeri tanımlanarak analiz yapılmıştır.



Şekil 4.10. Disk yay tabanı hareket kısıtlaması: X ve Y eksen serbest, Z eksen 0 mm.

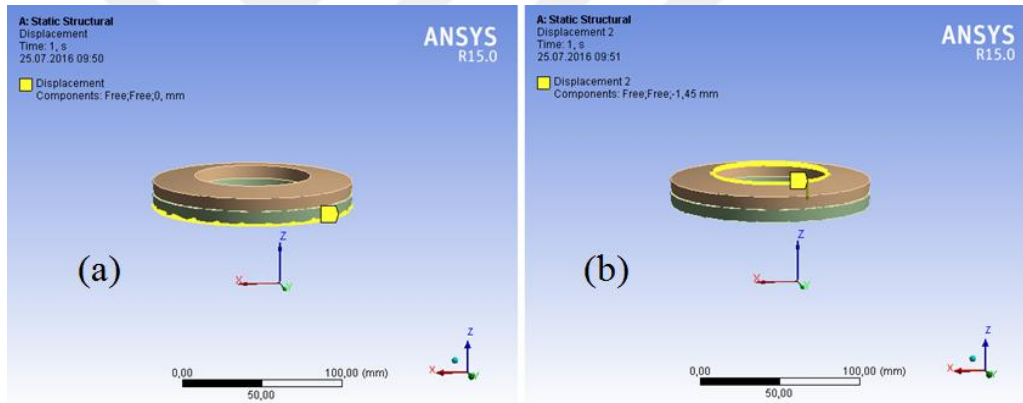


Şekil 4.11. Disk yayın üst kısmında tanımlanan deformasyon: Z ekseninde $-0,725$ mm ($0,25h$ için).

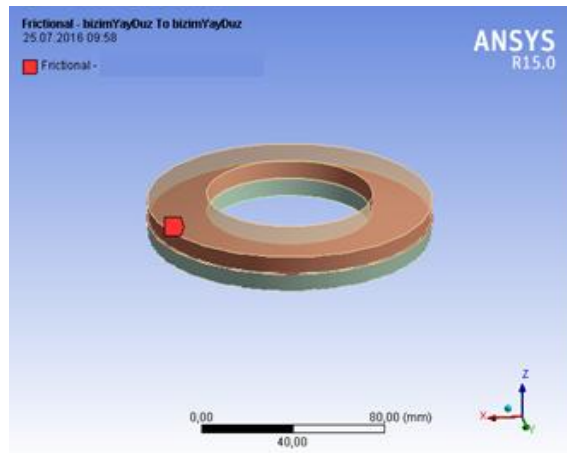
4.2.2.2. Paralel iki disk yay sınır koşulları

Disk yayın zemine bastığı taban kısmında tek disk yay ile aynı hareket serbestliğinin tanımlanması uygundur. Aynı şekilde üst kısımdan deformasyon için aynı şekilde 4 farklı değer tanımlanarak analiz yapılır (Şekil 4.12). Disk yayların temas ettikleri zeminle arasında sürtünme olmadığı varsayılmıştır. Bu sayede sadece disk yaylar arasındaki sürtünme etkisi gözlemlenmek istenmektedir.

Paralel disk yaylarda dikkate alınması gereken önemli nokta yayların birbirine temas ettikleri yüzeydir (Şekil 4.13). Bu yüzeyde sürtünme tanımlanarak sonuçlara etkisi gözlemlenmeye çalışılacaktır. Sürtünme katsayısı (μ) bu konuda yapılmış benzer bir çalışmaya bakılarak (Ozaki vd., 2012) ve genel kullanım değerlerinden elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak 0,4 olarak alınmıştır. Bu değerde yapılan analizde yakınsak sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.12. Disk yayların (a) taban hareket kısıtlaması (b) üst kısmında tanımlan deformasyon.



Şekil 4.13. Disk yaylar arasındaki yüzeyde tanımlanan sürtünme.

4.3. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

4.3.1. Tek disk yay için analiz sonuçları

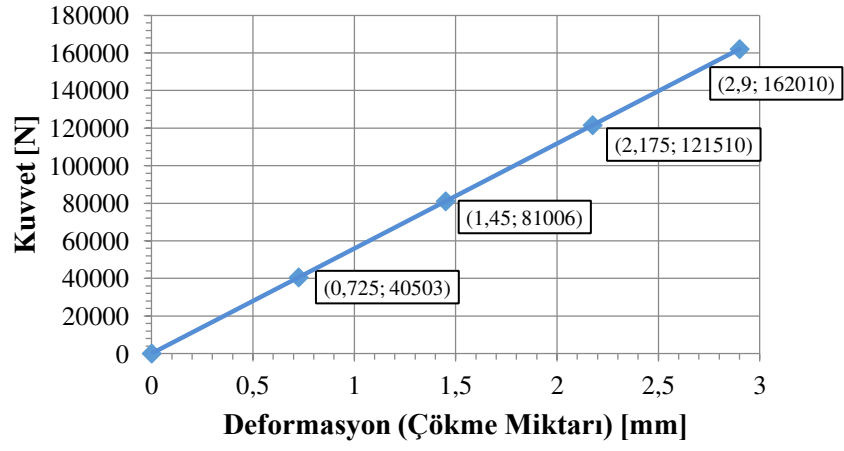
Yapılan sonlu elemanlar analizi sonucu farklı deformasyon değerlerine karşılık gelen kuvvet ve gerilme değerleri Çizelge 4.2'de, kuvvet-deformasyon ve gerilme-deformasyon arasındaki ilişkiler ise Şekil 4.14'te verilmiştir. Disk yayın iç halkasında oluşan maksimum gerilme değeri basma yükü altında kalan en büyük değer olarak kabul edilmiştir. Farklı deformasyon değerlerine karşılık gelen gerilme dağılımları renklendirme haritasıyla Şekil 4.15'te verilmiştir.

Çizelge 4.2. Tek disk yay için sonlu elemanlar analizi sonuçları

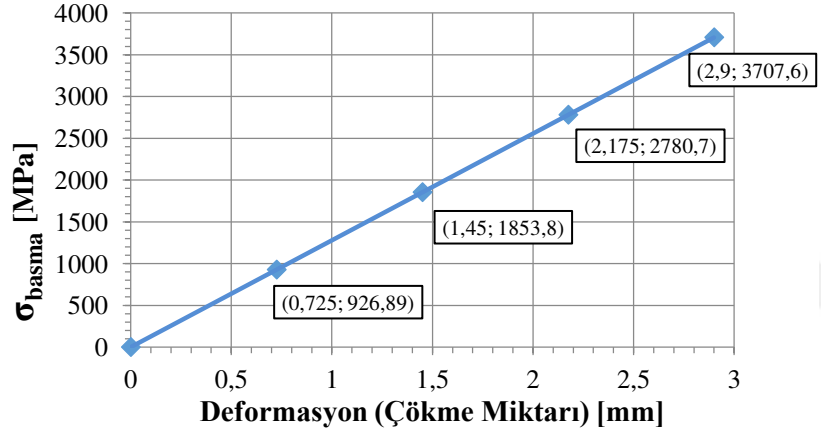
Deformasyon [mm]			Kuvvet [N]	σ_{basma} [MPa]
	0,25h	0,725	40503	926,89
	0,5h	1,45	81006	1853,8
	0,75h	2,175	121510	2780,7
	h	2,9	162010	3707,6

Sonlu elemanlar analizi sonucunda tek disk yayın 0,25h çökme durumunda 40,5 kN, tam düzleşme durumunda 162 kN kuvvet altında olması gerektiği Çizelge 4.2'den okunmaktadır. Tek disk yayın 0,25h-h kadar çökme miktarı çalışma aralığında 40,5-162 kN aralığında rulolara kuvvet ilettiği bu analiz sonucunda bulunmuştur. Bu deformasyon aralığında disk yay üzerinde oluşan en büyük gerilme olan basma gerilmesi 926,89-3707,6 Mpa aralığında olacağı tespit edilmiştir.

Şekil 4.14'te üstte yer alan kuvvet-deformasyon grafiğinden aralarındaki ilişkinin lineere çok yakın bir ilişki olduğu gözlenmektedir. Bu sonuç analitik hesaplama ile edilen ilişki ile benzerlik göstermektedir. Düşük h/s değerli yay kullanılması lineer bir ilişki ortaya çıkmasının nedeni olarak önceki bölümde de belirtilmiştir. Aynı şekilde gerilme-deformasyon ilişkisi de analitik hesaplama da olduğu gibi lineere çok yakındır.

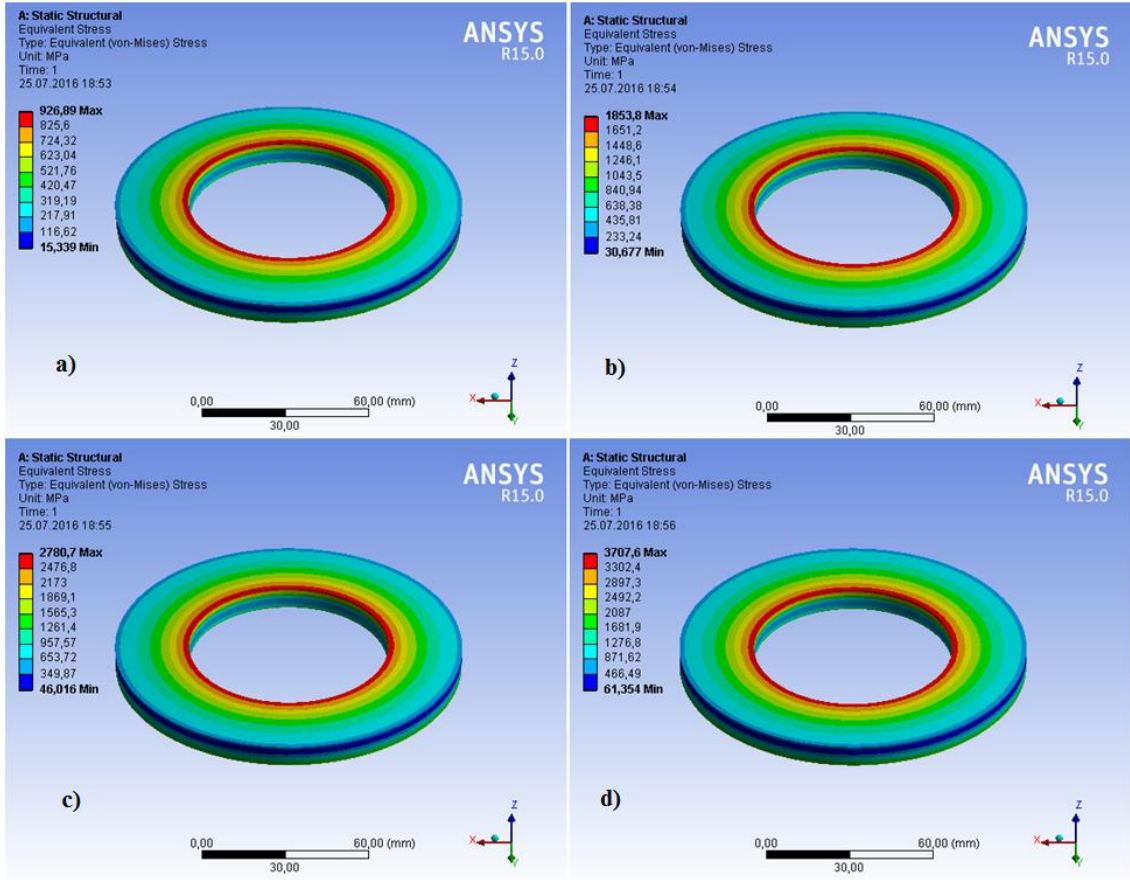


(a)



(b)

Şekil 4.14. Tek disk yay için sonlu elemanlar analizi (a) kuvvet-deformasyon ve (b) gerilme-deformasyon değerleri.



Şekil 4.15. Tek disk yay üzerinde oluşan eşdeğer (von-mises) gerilmelerin sonlu elemanlar analizi sonuçları: (a) 0,25h (b) 0,5h (c) 0,75h (d) h çökme miktarları için.

Şekil 4.15'te disk yay üzerinde oluşan en büyük gerilmenin kırmızı renk ile yayın iç halkasının üst kısmında olduğu farklı çökme miktarlarında gözlemlenmektedir. Yay üzerinde oluşan en küçük basınç ise dış halkasının üst çemberine yakın bir konumda koyu mavi renk ile gösterilmiştir. Yayın üst yüzeyinde iç halkadan dış halkaya doğru gidildikçe gerilmenin azaldığı gözlenmektedir.

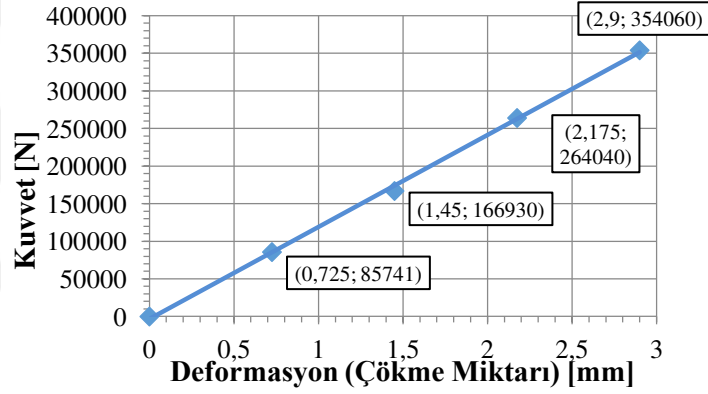
4.3.2. Paralel iki disk yay için analiz sonuçları

İki disk yayın iç içe geçecek şekilde konumlandırılmasıyla yapılan sonlu elemanlar analizi sonucu farklı deformasyon değerlerine karşılık gelen kuvvet ve gerilme değerleri Çizelge 4.3'te, kuvvet-deformasyon ve gerilme-deformasyon arasındaki ilişkiler ise Şekil 4.16'da verilmiştir. Disk yay üzerinde oluşan eşdeğer (von-Mises) gerilmelerinin dağılımı ise Şekil 4.17'de verilmiştir. Disk yayın iç halkasında oluşan maksimum gerilme değeri basma yükü

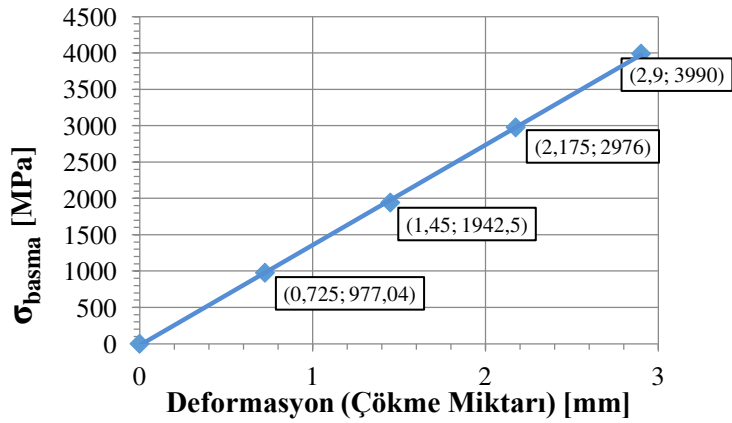
altında kalan en büyük değer olarak kabul edilmiştir. Farklı deformasyon değerlerine karşılık gelen gerilme dağılımları renklendirme haritasıyla Şekil 4.17'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Paralel iki disk yay için sonlu elemanlar analizi sonuçları.

			Kuvvet [N]	σ_{basma} [MPa]
Deformasyon [mm]	0,25h	0,725	85741	977,04
	0,5h	1,45	166930	1942,5
	0,75h	2,175	264040	2976
	h	2,9	354060	3990



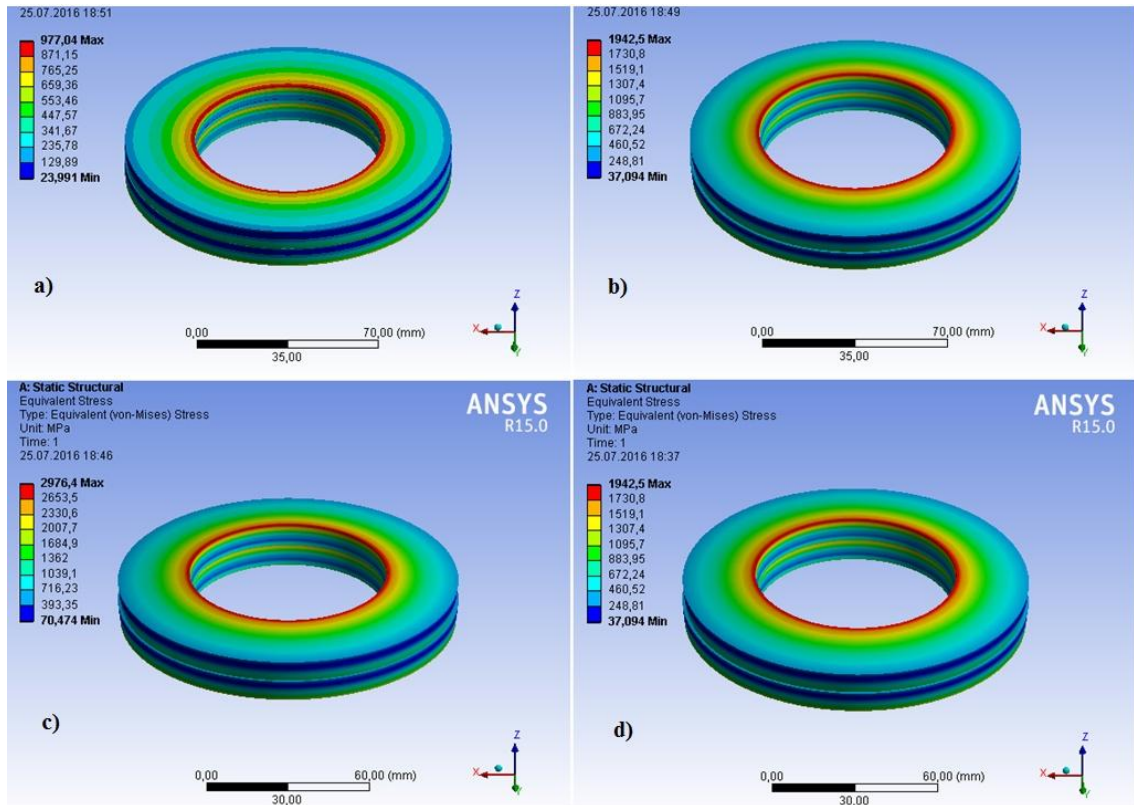
(a)



(b)

Şekil 4.16. Paralel iki disk yay için sonlu elemanlar analizi (a) kuvvet-deformasyon ve (b) gerilme-deformasyon ilişkisi.

Her iki disk yay için de benzer biçimde gerilme dağılımlarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Yayların iç halkasının üst kısmında kalan kenar boyunca en büyük gerilme değeri oluşmuştur. Her iki disk yay için de aynı değerlerin oluşması analizin sağlıklı olarak yapıldığını gösterir. Ayrıca tek disk yayda oluşan gerilme dağılımı ile, paralel olan iki disk yaydaki gerilme dağılımları benzer sonuçlar vermiştir. Bölüm 4.1.2'de öngörüldüğü gibi bu dağılımların birbirine yaklaşık çıkması beklenen bir sonuçtur.



Şekil 4.17. Paralel iki disk yay üzerinde oluşan eşdeğer (von-mises) gerilmelerin sonlu elemanlar analizi sonuçları: a) 0,25h b) 0,5h c) 0,75h d) h çökme miktarları için.

5. HESAPLAMA ve SONLU ELEMANLAR ANALİZİ SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI VE BULGULAR

Tek bir disk yay kullanılması durumunda analitik yöntem ve sonlu elemanlar metodu ile yapılan kuvvet ve gerilme değerleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.1’de ve grafik olarak Şekil 5.1’de verilmiştir. Aynı şekilde paralel iki disk yay için elde edilen sonuçlar Çizelge 5.2’de ve grafik olarak Şekil 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.3’te paralel iki disk yayın sonlu elemanlar analizi sonuçları, sürtünmenin etkisini gözlemek amacıyla sürtünmesiz durumla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada tek disk yay için elde edilen SEA kuvvet değeri ikiyle çarpılarak paralel disk yayların analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bunun nedeni olarak, sürtünmesiz ideal durumda bu paralel disk yaylarda bu değerin tam 2 katına çıkması beklenir. Disk yaylar üzerinde oluşan maksimum gerilme değeri ise her iki durum için analiz sonuçlarından elde edilen verinin direkt kullanılmasıyla karşılaştırılmıştır. Bunun nedeni tek bir disk yayda veya paralel bağlı iki disk yayda oluşan maksimum gerilme değerleri sadece bir disk yayın iç halkası üzerinde gözlemlenir.

Tek disk yay için karşılaştırılan A-L yöntemi ve FEA sonuçları arasındaki fark deformasyon miktarı arttıkça artmaktadır. Aynı şekilde disk yaylar üzerinde oluşan maksimum gerilme değerleri arasındaki fark da artmaktadır. Bu sonuçlara bakılarak A-L yönteminin küçük deformasyon miktarlarında daha etkili sonuçlar verdiğini söylemek mümkündür. Bunun nedeni A-L yöntemindeki formüller elde edilirken disk yay üzerindeki radyal gerilmelerin etkisi ihmal edilerek sadece teğetsel gerilmelerin etkisinin dikkate alınmasıdır. Disk yay üzerindeki radyal gerilmelerin etkisi deformasyon miktarı arttıkça ve disk yay düzleşmeye yaklaştıkça birikimli olarak artacaktır. Bu nedenle yüksek deformasyon miktarında A-L formülasyonundaki hata miktarı da daha fazla olacaktır.

Çizelge 5.1. Tek bir disk yay için A-L yöntemi ve sonlu elemanlar analizi sonuçları.

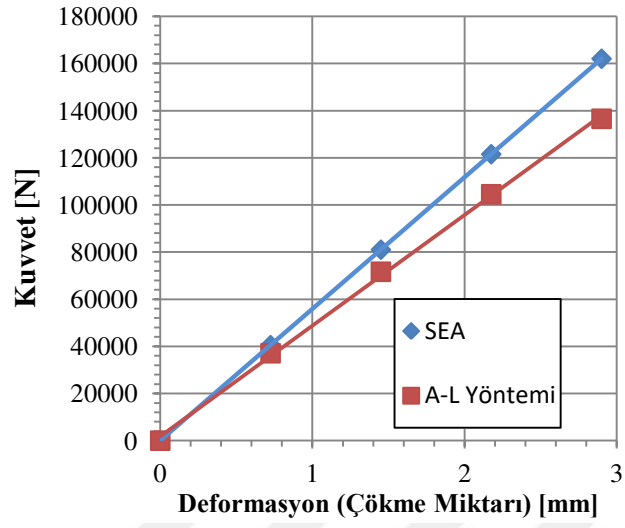
			F [N]			σ_{basma} [MPa]			
			A-L	SEA	% Hata	A-L	SEA	%Hata	k [N/mm]
Deformasyon [mm]	0,25h	0,725	37082,10	40503	%8,4	881,78	926,89	%4,8	49214,10
	0,5h	1,45	71640,82	81006	%11,6	1707,31	1853,8	%7,9	46313,70
	0,75h	2,175	104517,32	121510	%13,9	2476,60	2780,7	%10,9	44573,45
	h	2,9	136552,70	162010	%15,7	3189,62	3707,6	%13,9	43993,36

Çizelge 5.2. Paralel iki disk yay için A-L yöntemi ve sonlu elemanlar analizi sonuçları

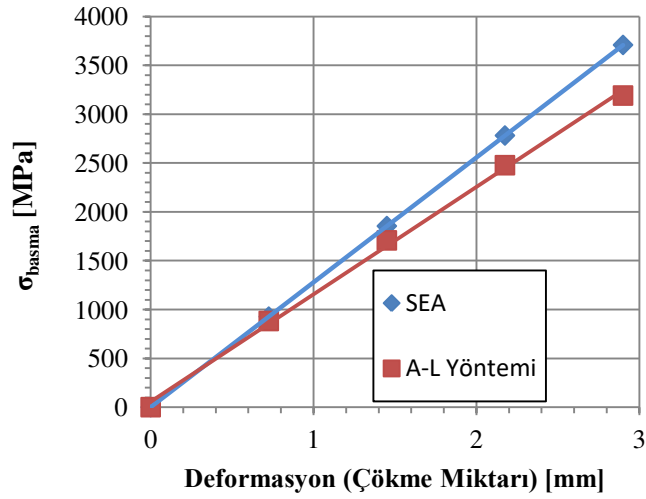
			F [N]			σ_{basma} [MPa]			
			A-L	SEA	% Hata	A-L	SEA	%Hata	k [N/mm]
Deformasyon [mm]	0,25h	0,725	74164,2	85741	%13,5	881,78	977,04	%9,7	98428,21
	0,5h	1,45	143281,64	166930	%14,1	1707,31	1942,5	%12,1	92627,39
	0,75h	2,175	209034,64	264040	%20,8	2476,60	2976	%16,8	89146,90
	h	2,9	273105,39	354060	%22,8	3189,62	3990	%20	87986,73

Çizelge 5.3. Paralel iki disk yay için sonlu elemanlar analiziyle sürtünmeli ve sürtünmesiz durumdaki sonuçlar

			F [N]			σ_{basma} [MPa]			
			Tek Yay SEA x 2 (sürtünmesiz)	Paralel SEA (sürtünmeli)	% Fark	Tek Yay SEA (sürtünmesiz)	Paralel SEA (sürtünmeli)	%Fark	k [N/mm]
Deformasyon [mm]	0,25h	0,725	81006	85741	%5,8	926,89	977,04	%5,4	98428,21
	0,5h	1,45	162012	166930	%3	1853,8	1942,5	%4,8	92627,39
	0,75h	2,175	243020	264040	%8,6	2780,7	2976	%7	89146,90
	h	2,9	324020	354060	%9,3	3707,6	3990	%7,6	87986,73

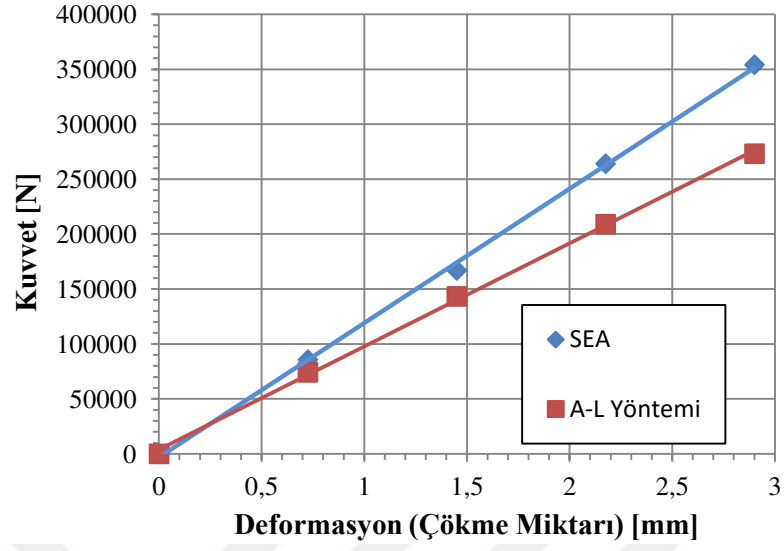


(a)

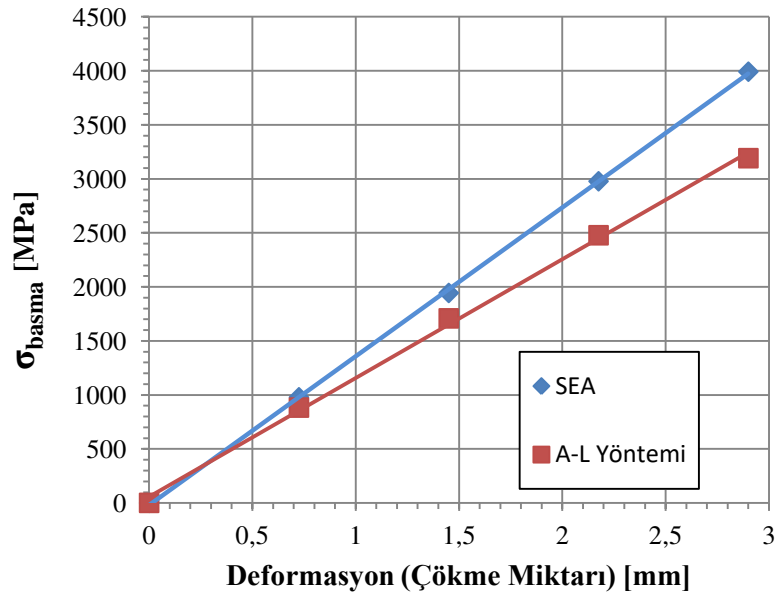


(b)

Şekil 5.1. Tek disk yay için A-L yöntemi ve SEA (a) kuvvet-deformasyon ve (b) gerilme-deformasyon ilişkisi sonuçlarının karşılaştırmalı grafiği.

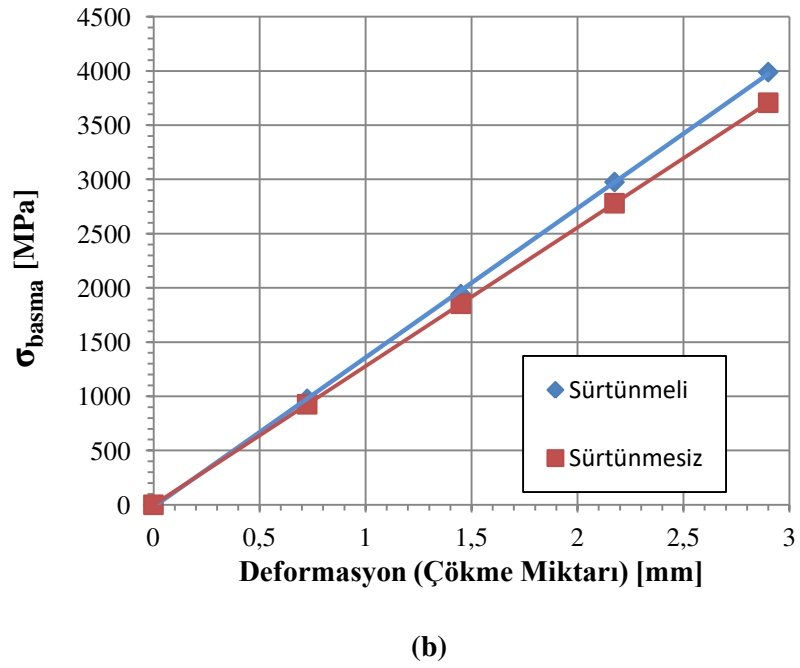
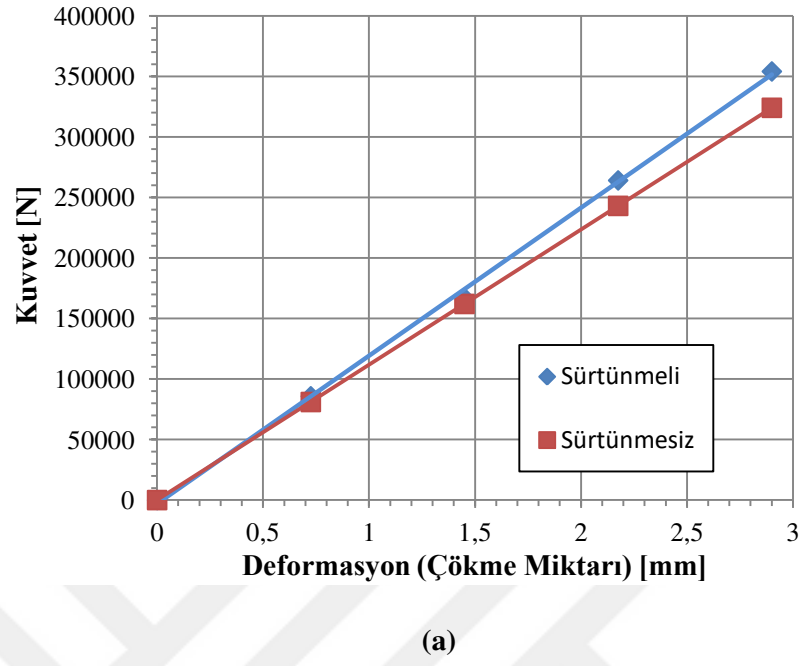


(a)



(b)

Şekil 5.2. Paralel iki disk yay için A-L yöntemi ve SEA (a) kuvvet-deformasyon (b) gerilme-deformasyon ilişkisi sonuçlarının karşılaştırmalı grafiği.

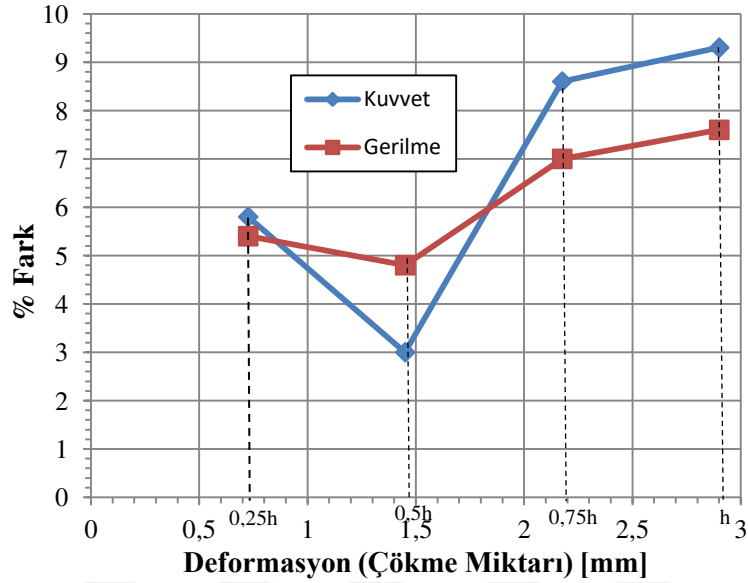


Şekil 5.3. Sürtünmeli ve sürtünmesiz paralel disk yay koşulları için (a) kuvvet deformasyon ve (b) gerilme-deformasyon karşılaştırması.

Paralel iki disk yay için elde edilen sonuçlarda, disk yaylar arasındaki sürtünmenin etkisiyle tek disk yayı göre hata miktarında artış olacağı Çizelge 5.2’de görülmektedir. Disk yaylar arasındaki sürtünme disk yaylar üzerindeki kuvveti belirli miktarda absorbe ederek hesaplanan sürtünmesiz duruma göre daha fazla kuvvet altında deforme olma davranışı gösterirler.

Çizelge 5.3’te tek disk yay ve paralel disk yay SEA analizi sonuçları, paralel disk yay davranışında sürtünme etkisinin tam olarak nasıl bir fark oluşturduğunu gözlemleme amacıyla kuvvet ve gerilme değerleri bakımından karşılaştırılmıştır. Tek disk yayın kuvvet değerinin iki katı alınarak ideal durumdaki kuvvet değeri öngörülmüştür ve maksimum basma gerilmesi değerleri de herhangi bir katlama işlemi yapılmadan karşılaştırılmıştır. Sürtünme katsayısının 0,4 alındığı analizler sonucunda, kuvvet değerleri %3-9 oranında bir artış, gerilme değerleri ise %5-7 oranları arasında bir artış göstermiştir. Elde edilen yüzde fark değerlerine bakıldığında disk yayın deformasyon miktarı arttıkça sürtünme kuvvetlerinin etkisinin daha fazla ortaya çıktığı görülmektedir. Düzleşmeye daha fazla yaklaşan disk yaylarda yüzeyler arası eğim azalmaktadır ve sürtünmeyi ortaya çıkaran normal kuvvet de büyümektedir.

Şekil 5.4’te görüldüğü gibi, paralel iki disk yayda sürtünme etkisiyle ortaya çıkan kuvvet ve gerilmedeki yüzde fark değerleri, farklı çökme miktarlarında benzer davranışlar sergilemektedir. 0,25 h çökme durumunda %6’ya yakın fark gösteren kuvvet ve gerilme değerleri, 0,5h çökme durumunda ise azalmıştır. Kuvvet değerleri arasındaki farkın gerilme değerleri arasında oluşan farktan daha büyük olduğu ilgili grafikte gözlenmektedir. Sonraki aşamada (0,75h çökme) hem kuvvet hem de gerilme değerleri için bu farkın arttığını gözlemlenebilir. En son aşama olan tam düzleşme durumunda ise bu fark eğimi azalarak biraz daha artmıştır.

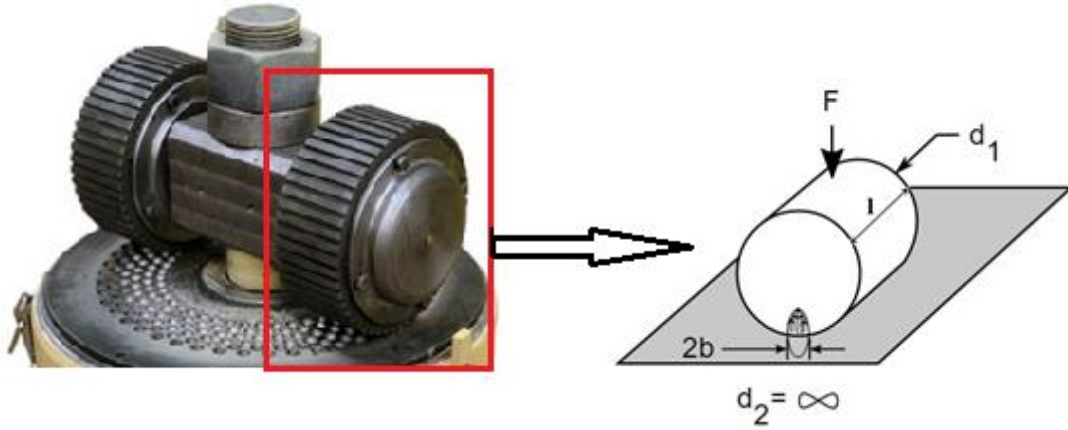


Şekil 5.4. Paralel iki disk yayda sürtünme etkisiyle oluşan kuvvet ve gerilme değerlerinin yüzde farklarının deformasyon miktarına bağlı gösterimi.

Şekil 5.4'te kuvvet ve gerilmedeki yüzde fark değerlerinin davranışını incelendiğinde, kuvvet değerlerinin gerilmeye göre sürtünmenin etkisinde daha fazla kaldığı söylenebilir. Ayrıca 0,5h durumunda meydana gelen düşmenin disk yayların birbiri üzerinde kayma hareketinin neticesinde olduğu tahmin edilmektedir. Daha sonraki aşamalarda, düzleşmeye yaklaşan disklerin birbiri üzerinde kayma hareketi azalacak ve aynı zamanda sürtünmeyi oluşturan normal kuvvetin artmasıyla da sürtünme etkisi disk yaylar üzerinde daha belirgin hale gelecektir.

5.1. Hertz Basıncı Hesaplanması

Silindirik bir yüzeyin bir düzleme teması sırasında ortaya çıkan basınç değerleri Hertz basıncı hesaplamasıyla bulunabilir. Bunun için Şekil 5.5'te görüldüğü gibi düzleme temas eden bir silindir- yüzeyin özellikleri ve uygulanan kuvvet parametrelerinden hesaplanabilir.



Şekil 5.5. Rulo-Kalıp temasında hertz basıncı hesabı için parametrelerin tanımlanması: **b**: temas yüzeyi yarı-genişliği, **d₁**: silindir çapı, **l**: silindir uzunluğu, **F**: uygulanan kuvvet.

Hertz basıncı hesaplama formülü (Budynas ve Nisbett 2004);

$$b = \sqrt{\frac{2F}{\pi l} \frac{(1 - \nu_1^2/E_1) + (1 - \nu_2^2/E_2)}{1/d_1 + 1/d_2}} \quad (5.1)$$

$$P_{max} = \frac{2F}{\pi b l} \quad (5.2)$$

ν_1 = Silindir Poisson Oranı E_1 = Silindir Young Modülü d_1 = silindir çapı

ν_2 = Kalıp poisson Oranı E_2 = Kalıp Young Modülü d_2 = düzlem çapı = ∞

P_{max} = en büyük temas basıncı

$$E_1 = E_2 = 210 \text{ GPa}, \nu_1 = \nu_2 = 0,3, d_1 = 145 \text{ mm}, l = 110 \text{ mm}$$

ifadelerinin değerleri yerine konularak;

$$P_{max} = 2,146 \sqrt{F} \text{ MPa} \quad (5.3)$$

bulunur.

Disk yaylar pelet makinesine ilk montaj sırasında belirli bir cıvata ön gerilmesiyle bastırılırlar. Bu miktar çalışmamızda disk yayda $0,25h=0,725 \text{ mm}$ deformasyona karşılık gelecek şekilde uygulanmıştır. Disk yayın $0,25h-0,75h$ aralığında yaylanması istenilmektedir. Sistemde iki adet rulo bulunduğu için disk yayın uyguladığı kuvvet ikiye bölünerek hesaplama

yapılması gerekir. Bu değerlere göre tek disk yay kullanıldığında verilen deformasyon aralığında uygulanan Hertz basınçları;

$$0,25h \text{ için } P_{max} = 2,146 \sqrt{40503/2} = 305,40 \text{ MPa} \quad (5.4)$$

$$0,75h \text{ için } P_{max} = 2,146 \sqrt{121510/2} = 528,96 \text{ MPa} \quad (5.5)$$

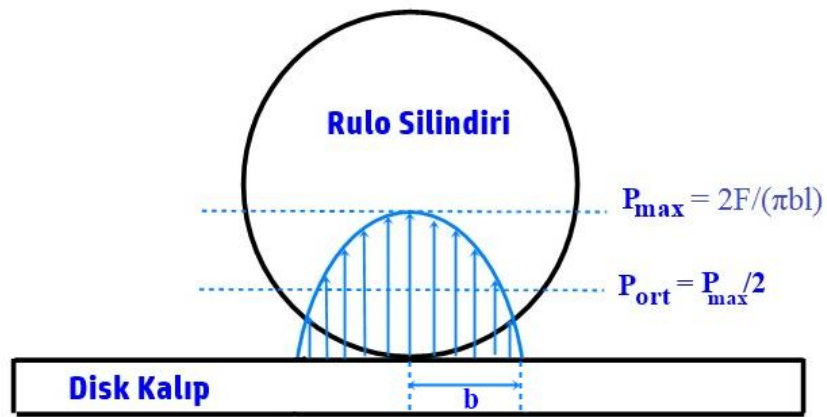
Paralel iki disk yay kullanıldığında verilen deformasyon aralığında uygulanan Hertz basınçları;

$$0,25h \text{ için } P_{max} = 2,146 \sqrt{85741/2} = 444,33 \text{ MPa} \quad (5.6)$$

$$0,75h \text{ için } P_{max} = 2,146 \sqrt{264040/2} = 779,74 \text{ MPa} \quad (5.7)$$

olarak bulunur.

Hesaplanan basınçlar, rulo silindiri ile kalıp arasında oluşan gerilmenin maksimum değeridir. Rulo silindirinin kalıp üzerinde oluşturduğu Hertz basınç dağılımı Şekil 5.6'da toplamda '2b' uzunluğunda olacak şekilde gösterilmiştir. Biyokütlenin peletlenme ortalama basıncı olarak, hertz basıncı dağılım eğrisinden bu değer yarı uygulanabilir en kolay ve yaklaşık değer olarak alınabilir. Yani tek disk yayda ortalama peletleme basıncı yaklaşık 153-265 MPa, paralel iki disk yayda 222-390 MPa aralığında olduğu kabul edilebilir.



Şekil 5.6. Kalıp üzerinde oluşan Hertz basınç dağılımı ve ortalama değerinin gösterimi.

6. SONUÇ, DEĞERLENDİRME ve ÖNERİLER

Günümüzde yenilenebilir ve çevre dostu enerji kaynakları arasında biyokütle kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır. Biyokütleyi yakıt olarak kullanmanın en verimli yollarından birisi peletleme işlemidir. Yaygın olarak kullanılan pelet presleri, delikli bir kalıp üzerinde dönen baskı rulolarından oluşmaktadır. Bu tip sistemlerde en çok karşılaşılan sorunlar makine sıkışması, basınç regülasyonu ve kalıp-rulo arası mesafenin en uygun oranda ayarlanamamasıdır. Yaptığımız çalışmada, bir peletleme sistemine disk yay entegre ederek bu sorunların çözümü hedeflenmiştir. Disk yaylar küçük deformasyon miktarlarında büyük yükler altında çalışabilen makine elemanlarıdır. Pelet presinde gerekli olan rulo baskı kuvvetinin sağlanması ve gerektiğinde yeteri miktarda deforme olarak ruloları yukarı kaldırması sayesinde sistemi hasardan koruması bakımından disk yayların pelet preslerin kullanılması oldukça etkili sonuçlar vermiştir.

Çalışmamızda dış çapı 125 mm, iç çapı 71 mm, koni yüksekliği 2,9mm ve kalınlığı 8 mm olan 2 adet disk yay paralel bağlantı şeklinde pelet presi sistemine dahil edilmiştir. Disk yayların kuvvet-deformasyon davranışları yaygın olarak kabul gören yöntem Almen-Laszlo analitik yöntemiyle ve ayrıca sonlu elemanlar analizi yöntemiyle hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılıp disk yayların karakteristikleri incelemiştir.

Sistemde gerekli olan sıkıştırma kuvveti somunların sıkılmasıyla elde edilmiş ve bu şekilde, koni yüksekliğinin 0,25 katı kadar disk yaylar deforme edilmiştir. Disk yayların çalışma sırasında koni yüksekliğinin maksimum 0,75 katı kadar deforme olabileceği öngörülmüştür. Bu kabullerle yapılan hesaplamalarda sistemde paralel olarak kullanılan iki disk yay, başlangıçta ön gerilme kuvvetiyle 0,25h kadar deforme edilmiştir. Bu durumda disk yaylar A-L metoduna göre yaklaşık 75 kN, sonlu elemanlar metoduna göre yaklaşık 85 kN kuvvet altındadır. 0,75h kadar deformasyon altında bu kuvvet A-L metodunda 209 kN, sonlu elemanlar metodunda ise 264 kN olarak hesaplanmıştır.

Bu kuvvet ruloların altında hertz basınç formülleriyle hesaplanan değerlere göre her bir rulo altında ön gerilme kuvveti altında yaklaşık 444 Mpa maksimum basınç oluşturmaktadır. Pres hareket halinde iken dış etkilere bağlı olarak bu basınç 780 Mpa değerine kadar çıkabileceği bulunmuştur. Yani ortalama peletleme basıncı olarak pratikte bu değerlerin yarısı olan 222-390 Mpa aralığı alınabilir.

Paralel disk yaylar üzerinde oluşan minimum ve maksimum basma gerilmesi değerleri ise 0,25h için 977,04 MPa, 0,75h için 2976 MPa olarak hesaplanmıştır.

Deformasyon miktarı arttıkça A-L formülasyonu ve sonlu elemanlar analizi sonuçları arasındaki fark gittikçe açılmaktadır. Bunun nedeni A-L yönteminde disk yay üzerinde radyal gerilmelerin etkisinin ihmal edilerek teğetsel gerilmelerin etkisinin ön plana çıkarılmasıdır. Ancak artan deformasyon oranlarında düzleşmeye yaklaşan disk yayda radyal kuvvetlerin etkileri ortaya çıkmaktadır. Radyal gerilmelerin artan değerleri elde edilen A-L yöntemi sonuçlarının gerçek durumdan sapmasını arttırmaktadır.

Disk yaylar paralel olarak kullanıldığında yüzeyler arası sürtünmenin etkisiyle belirli miktarda kuvvetin sönümlenmesine neden olurlar. Çalışmamızda, iki disk yay arasında bu değer ortalama olarak %6 bulunmuştur. Disk yayların bu özelliği özellikle darbeli ve titreşimli yük altında çalışan sistemlerde sönümleyici olarak kullanılmasına olanak tanır. Daha büyük miktarlarda sönümleme kapasitesine ihtiyaç duyulan sistemlerde daha fazla disk yay paralel olarak istiflenerek, sürtünen yüzey sayısının artmasıyla istenilen sönümleme değerlerine ulaşılabilir.

Disk yayların paralel bağlanması durumunda ortaya çıkan titreşim sönümleme özelliği hakkında güncel çalışmalar mevcuttur. Gelecekteki çalışmalarımızda, daha fazla sayıda yay içeren paketlerin titreşim ve darbe sönümleme analizinin yapılması planlanmaktadır. Ayrıca biyokütle peletleme sistemlerinde disk yayların yeni bir kullanım alanı bu tez ile başarılmış olup daha detaylı ölçümlerle iyileştirmeler yapılması hedeflenmektedir. Peletleme sistemine dahil edilen disk yayın çalışma sırasında hangi zaman aralıklarında ne kadar deforme olduğunun ölçülmesi, kullanım ömürlerinin belirlenmesi ve kullanılan biyokütle cinsine göre bu parametrelerin belirlenmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Abou-Chakra, H., Tüzün, U., (2000), "Microstructural blending of coal to enhance flowability" Powder Technology 111, s. 200–209

Almen, J.O., Laszlo, A., (1936), "The Uniform-Section Disk Spring", Transactions of the ASME, Research Papers 58-10, s.305-314

Babalık, F.C., Çavdar, K., (2012), "Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri", Dora Yay., Bursa

Buchely, M.F., Colorado, H.A., (2016), " Failure Analysis of a Pellet-Mill Die", Failure Analysis and Prevention 16(2), s. 285-292

Budynas, R.G., Nisbett, J.K., (2004), "Shigley's Mechanical Engineering Design", McGraw-Hill

Chiew, Y.L., Iwata, T., Shimada S., (2011), "System analysis for effective use of palm oil waste as energy resources", Biomass and Bioenergy 35, s.2925-2935

Curti, G., Orlando, M., (1979), "A new calculation of coned annular disc springs", Wire 28(5), s.199-204

Demirbaş, A., Şahin, A., (1998), " Evaluation of biomass residue1. Briquetting waste paper and wheat straw mixtures", Fuel Processing Technology 55, s. 175–183

DIN 2093, (2013), Disc springs - Quality specifications – Dimensions, Deutsches Institut für Normung e. V., Almanya

ENPlus Handbook, Part 3, Pellet Quality Requirements, 2016

Gilbert, P., Ryu, C., Sharifi, V., Swithenbank, (2009), "Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops", Fuel 88, s. 1491-1497

Hein, K.R.G., Bemtgen, J.M., (1998), " EU clean coal technology—co-combustion of coal and biomass", Fuel Processing Technology 54, s. 159-169

Herbert, G.M., Krishnan, A.U., (2016), "Quantifying environmental performance of biomass energy", Renewable and Sustainable Energy Reviews 59, s.292-308

Hiçyılmaz, C., Altun, N.E., Balcı, A.S., (2004), "Briquetting and Decreasing of SO Emission of Dadağı Coal Sample", The Journal of Ore Dressing, Cilt 7, Sayı 14, s. 8-16

<http://www.cpm.net>, California Pellet Mill

<http://www.feedandgrain.com/product/category/pellet-mills>

<http://www.maic.jmu.edu/ordata/FullImage.asp?Image=images\HH0887U03.JPG>

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Hübner, W., (1984), "Large Deformations of Elastic Conical Shells", *Flexible Shells*, s. 257–70, Berlin: Springer Verlag

Jackson, J., Turner, A., Mark, T., Montross M., (2016), "Densification of biomass using a pilot scale flat ring roller pellet mill", *Fuel Processing Technology* 148, s.43-49

Jones, J.C., (2015), "Biomass-peat blends and carbon neutrality", *Fuel* 158, s.1016

Key World Energy Statistics 2015, International Energy Agency

Kong, L., Tian, S., Li, Z., Luo, R., Chen, D., Tu, Y., Xiong, Y., (2013), " Conversion of recycled sawdust into high HHV and low NO_x emission bio-char pellets using lignin and calcium hydroxide blended binders", *Renewable Energy* 60, s. 559-565

Kováčová, M., Matus, M., Krizan, P., Beniak, J., (2014), " Design theory for the pressing chamber in the solid biofuel production process", *Acta Polytechnica* 54(1), s. 28-34

Larsson, S.H., Rudolfsson, M., Nordwaeger, M., Olofsson, I., Samuelsson, R., (2013), " Effects of moisture content, torrefaction temperature, and die temperature in pilot scale pelletizing of torrefied Norway spruce", *Applied Energy* 102, s. 827-832

Larsson, S.H., Thyrel, M., Geladi, P., Lestander, T.A., (2008), " High quality biofuel pellet production from pre-compacted low density raw materials", *Bioresource Technology* 99, s. 7176-7182

Mahidin, Y.S., Rizal, S., (2013), " Use of Biomass as Co-Fuel in Briquetting of Low-Rank Coal: Strengthen the Energy Supply and Save the Environment", *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, Cilt 7, No.12, s. 996-1001

Mani, S., Tabil, L.G., Sokhansanj, S., (2004), " Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass", *Biomass and Bioenergy* 27, s. 339–352

Mani, S., Tabil, L.G., Sokhansanj, S., (2006), " Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses", *Biomass and Bioenergy* 30, s. 648–654

Mediavilla, I., Fernandez, M.J., Esteban, L.S., (2009), " Optimization of pelletisation and combustion in a boiler of 17.5 kW_{th} for vine shoots and industrial cork residue", *Fuel Processing Technology* 90, s. 621-628

Ozaki, S., Tsuda, K., Tominaga, J., (2012), "Analyses of static and dynamic behavior of coned disk springs: Effects of friction boundaries", *Thin-Walled Structures* 59, 132-143

Pandey, S., Dhakal, P.R., (2013), "Pine Needle Briquettes: A Renewable Source of Energy", *International Journal of Energy Science (IJES)*, Cilt 3, Sayı 3, s. 254-260

Paredes, M., Daidie, A., (2010), "Optimal catalogue selection and custom design of belleville spring arrangements", *Int J Interact Des Manuf* 4, s. 51-59

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Pedersen, N.L., Pedersen, P., (2011), "Stiffness and design for strength of trapezoidal Belleville springs", *J. of Strain Analysis* 46, s.825-836

Prins M.J., Ptasinski K.J., Janssen F.J.J.G., (2006), "More efficient biomass gasification via torrefaction" *Energy* 31, s. 3458–3470

Puig-Arnabat, M., Shang, L., Sarossy, Z., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U.B., (2016), " From a single pellet press to a bench scale pellet mill — Pelletizing six different biomass feedstocks", *Fuel Processing Technology* 142, s. 27-33

Relova, I., Vignote, S., Leon, M.A., Ambrosio, Y., (2009), " Optimisation of the manufacturing variables of sawdust pellets from the bark of *Pinus caribaea* Morelet: Particle size, moisture and pressure", *Biomass and Bioenergy* 33, S. 1351-1357

Ross, A., Jones, M.D., Chaiklangmuang, S., Bartle, K., (2002), " Measurement and Prediction of the Emission of Pollutant from the Combustion of Coal and Biomass in a Fixed Bed Furnace", *Fuel* 81(5), s. 571-582

Ryu, C., Finney, K., Sharifi, V.N., Swithenbank, J., (2008), " Pelletised fuel production from coal tailings and spent mushroom compost - Part I Identification of pelletisation parameters", *Fuel Processing Technology* 89, s. 296-275

Serrano, C., Monedero, E., Lapuerta, M., Portero, H., (2013), " Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets", *Fuel Processing Technology* 92, s. 699–706

Stelte, W., Clemons, C., Holm, J.K., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U.B., Sanadi, A.R., (2011b), "Thermal transitions of the amorphous polymers in wheat straw", *Industrial Crops and Products* 34, s. 1053-1056

Stelte, W., Holm, J.K., Sanadi, A.R., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J. and Henriksen, U.B., (2011a), "Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions", *Fuel* 90, s.3285-3290

Taulbee, D.N., Hodgen, R., Aden, N., (2012), "Co-Briquetting of Coal and Biomass", (2012), International Pittsburgh Coal conference, University of Pittsburgh, Swanson School of Engineering, Ekim16-19 2012, Pittsburgh, PA, CD

Timoshenko, S. P., (1921), "On the correction for shear of the differential equation for transverse vibrations of prismatic bars", *Philosophical Magazine* 41, s. 744–746

Tumuluru, J.S., (2014), " Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stover", *Biosystems Engineering* 119, s. 44-57

Wahl, A.M., (1944), "Mechanical Springs", Penton Pub. Co., Cleveland

Yaman, S., Şahan, M., Haykiri-Açma, H., Şeşen, K., Küçükbayrak, S., (2001), "Fuel briquettes from biomass–lignite blends", Fuel Processing Technology 72, s.1–8

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Yaman, S., Şahan, M., Haykiri-Açma, H., Şeşen, K., Küçükbayrak, S., (2000), " Production of fuel briquettes from olive refuse and paper mill waste", Fuel Processing Technology 68, s.23-31

Yancey, N., Wright, C.T., Westover, T.L., (2013), "Optimizing hammer mill performance through screen selection and hammer design", Biofuels 4, p. 85-94

Yehia, K.A., (2007), "Estimation of roll press design parameters based on the assessment of a particular nip region", Powder Technology 177, s.148–153

Zanjani, N.G., Moghaddam, A.Z., Dorosti, S., (2014), " Physical and Chemical Properties of Coal Briquettes from Biomass-Bituminous Blends", Petroleum & Coal 56(2), s. 188-195

Zheng, E., Jia, F., Zhou, X., (2014), “Energy-based method for nonlinear characteristics analysis of Belleville springs”, Thin-Walled Structures 79, s.52-61

2016 Energy Outlook, BP p.l.c., 2016

EKLER

Ek-1: Çizelge 1. DIN 2093 Standardı Disk Yay Özellikleri Tablosundan Bir Kesit (DIN 2093, 2013)

D _e	D _i	t	t ₁	L _o	h _o	h _o /t	s = 0.25 h _o F		s = 0.5 h _o F		s = 0.75 h _o F		s = 1.0 h _o F	
							s		s		s		s	
80	30,5	2,5		5,3	2,8	1,12	0,7	3664	1,4	5911	2,1	7211	2,8	8039
80	31	3		5,5	2,5	0,833	0,625	4531	1,25	7847	1,875	10352	2,5	12451
80	31	4		6,1	2,1	0,525	0,525	7319	1,05	13677	1,575	19394	2,1	24791
80	31	4	3,75	6,1	2,1	0,525	0,525	7717	1,05	14049	1,575	19394	2,35	26327
80	35,5	4		6,2	2,2	0,55	0,55	8118	1,1	15083	1,65	21280	2,2	27093
80	35,5	4	3,75	6,2	2,2	0,55	0,55	8577	1,1	15512	1,65	21280	2,45	28564
80	36	3		5,7	2,7	0,9	0,675	5401	1,35	9196	2,025	11919	2,7	14106
80	41	2,25		5,2	2,95	1,311	0,737	3698	1,475	5715	2,212	6613	2,95	6950
80	41	3		5,3	2,3	0,766	0,575	4450	1,15	7838	1,725	10518	2,3	12844
80	41	4		6,2	2,2	0,55	0,55	8726	1,1	16213	1,65	22874	2,2	29122
80	41	4	3,75	6,2	2,2	0,55	0,55	9220	1,1	16674	1,65	22874	2,45	30703
80	41	5		6,7	1,7	0,34	0,425	11821	0,85	22928	1,275	33559	1,7	43952
80	41	5	4,7	6,7	1,7	0,34	0,425	12211	0,85	23296	1,275	33559	2	50035
90	46	2,5		5,7	3,2	1,28	0,8	4232	1,6	6585	2,4	7684	3,2	8157
90	46	3,5		6,0	2,5	0,714	0,625	5836	1,25	10416	1,875	14161	2,5	17487
90	46	5		7	2	0,4	0,5	11267	1	21617	1,5	31354	2	40786
90	46	5	4,7	7	2	0,4	0,5	11713	1	22035	1,5	31354	2,3	45141
100	41	4		7,2	3,2	0,8	0,8	8715	1,6	15219	2,4	20251	3,2	24547
100	41	4	3,8	7,2	3,2	0,8	0,8	9215	1,6	15683	2,4	20251	3,4	24574
100	41	5		7,75	2,75	0,55	0,687	12345	1,375	22937	2,062	32361	2,75	41201
100	41	5	4,7	7,75	2,75	0,55	0,687	13013	1,375	23561	2,062	32361	3,05	43381
100	51	2,7		6,2	3,5	1,296	0,875	4779	1,75	7410	2,625	8609	3,5	9091
100	51	3,5		6,3	2,8	0,8	0,7	5624	1,4	9823	2,1	13070	2,8	15843
100	51	4		7	3	0,75	0,75	8673	1,5	15341	2,25	20674	3	25338
100	51	4	3,8	7	3	0,75	0,75	9156	1,5	15789	2,25	20674	3,2	25555
100	51	5		7,8	2,8	0,56	0,7	13924	1,4	25810	2,1	36339	2,8	46189
100	51	5	4,7	7,8	2,8	0,56	0,7	14689	1,4	26525	2,1	36339	3,1	48503
100	51	6		8,2	2,2	0,366	0,55	17061	1,1	32937	1,65	48022	2,2	62711
100	51	6	5,6	8,2	2,2	0,366	0,55	17753	1,1	33589	1,65	48022	2,6	71153
100	51	7	6,55	9,2	2,2	0,314	0,55	27374	1,1	52454	1,65	75840	2,65	115982
112	57	3		6,9	3,9	1,3	0,975	5834	1,95	9038	2,925	10489	3,9	11064
112	57	4		7,2	3,2	0,8	0,8	7639	1,6	13341	2,4	17752	3,2	21518
112	57	4	3,75	7,2	3,2	0,8	0,8	8192	1,6	13855	2,4	17752	3,45	21468
112	57	6		8,5	2,5	0,416	0,625	15800	1,25	30215	1,875	43707	2,5	56737
112	57	6	5,6	8,5	2,5	0,416	0,625	16536	1,25	30906	1,875	43707	2,9	62863
125	51	4		8,5	4,5	1,125	1,125	10096	2,25	16265	3,375	19817	4,5	22060
125	51	4	3,8	8,5	4,5	1,125	1,125	10705	2,25	16830	3,375	19817	4,7	21268
125	51	5		8,9	3,9	0,78	0,975	13063	1,95	22931	2,925	30669	3,9	37342
125	51	5	4,75	8,9	3,9	0,78	0,975	13804	1,95	23619	2,925	30669	4,15	37492
125	51	6		9,4	3,4	0,566	0,85	17027	1,7	31514	2,55	44307	3,4	56254
125	51	6	5,65	9,4	3,4	0,566	0,85	17944	1,7	32369	2,55	44307	3,75	58923
125	61	5		9	4	0,8	1	14615	2	25526	3	33965	4,0	41170
125	61	5	4,75	9	4	0,8	1	15455	2	26305	3	33965	4,25	41217
125	61	6		9,6	3,6	0,6	0,9	19789	1,8	36336	2,7	50722	3,6	64028
125	61	6	5,6	9,6	3,6	0,6	0,9	21079	1,8	37539	2,7	50722	4	66696
125	61	8	7,5	10,9	2,9	0,362	0,725	34434	1,45	65305	2,175	93577	3,4	138144
125	64	3,5		8	4,5	1,285	1,125	8514	2,25	13231	3,375	15416	4,5	16335
125	64	5		8,5	3,5	0,7	0,875	12238	1,75	21924	2,625	29908	3,5	37041
125	64	5	4,7	8,5	3,5	0,7	0,875	13031	1,75	22661	2,625	29908	3,8	37673
125	64	6		9,6	3,6	0,6	0,9	20348	1,8	37362	2,7	52155	3,6	65836
125	64	6	5,6	9,6	3,6	0,6	0,9	21674	1,8	38599	2,7	52155	4,0	68579
125	64	7	6,55	10	3	0,428	0,75	25528	1,5	47615	2,25	67216	3,45	95795
125	64	8	7,5	10,6	2,6	0,325	0,65	31118	1,3	59520	1,95	85926	3,1	129972
125	71	6		9,3	3,3	0,55	0,825	19538	1,65	36302	2,475	51217	3,3	65207
125	71	6	5,6	9,3	3,3	0,55	0,825	20725	1,65	37411	2,475	51217	3,7	68887
125	71	8	7,45	10,9	2,9	0,362	0,725	38416	1,45	72705	2,175	103964	3,45	154927
125	71	10	9,3	11,8	1,8	0,18	0,45	42821	0,9	84082	1,35	124124	2,5	223282