DEBRİYAJ SİSTEMLERİNDE YASTIKLAMALI YAY ÜRETİM PROSESİNİN ARAÇ KONFORUNA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ahmet DÜNDAR

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEBRİYAJ SİSTEMLERİNDE YASTIKLAMALI YAY ÜRETİM PROSESİNİN ARAÇ KONFORUNA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ahmet DÜNDAR
0000-0001-5946-3374

Doc. Dr. Gökhan SEVİLGEN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DEBRİYAJ SİSTEMLERİNDE YASTIKLAMALI YAY ÜRETİM PROSESİNİN ARAÇ KONFORUNA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ahmet DÜNDAR

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doc. Dr. Gökhan SEVİLGEN

Motorlu taşıtlarda sürüş konforu sürücüler için başlıca önemli kriterlerden biridir. Bu nedenle araç üreticileri araçta konfor sağlayan parçaların üretim süreçlerinde yaşanan değişimleri ve bunların ürün üzerindeki etkisini minimize ederek tüm parçaları en iyi seviyede üretmek istemektedirler.

Çalışma prensibi kuru sürtünme yüzeyli debriyaj sistemlerinde vites geçişi sırasında ayırma durumunda motordan gelen torkun vites kutusuna aktarımının kesilmesi ve tekrar kavrama sırasında bu torkun sorunsuz aktarılması gerekmektedir. Bu sırada sürücünün vites geçişlerinde motordan gelen titreşim, vuruntu, sürüş sırasında sarsıntı gibi konfor önleyici durumları yaşamaması için ayırma ve kavrama sırasında yastıklama etkisi sağlayan yastıklama yayı bulunur. Bu yastıklama yayının formlu yapısı sayesinde sürüş konforu kesintisiz sağlanmış olur.

Yastıklama yayı, formlu yapısı nedeniyle ayırma ve kavrama sırasında baskı komplesi tarafından gelen eksenel yük artışına bağlı olarak debriyaj diskindeki eksenel yer değiştirme de artar. Ancak bu değişim lineer olarak değil progresive bir şekilde yastıklama yayı iki balata arasında sıkışana kadar devam eder. Buradaki hedef yastıklama eğrisi sınırları, araçtaki sürüş konforu bölgesini temsil etmektedir.

Bu tez çalışmasında araçta konfor sağlayıcısı olan yastıklama yayı parçasının üretim proseslerinden sıcak formlama işleminde parçanın hedef fonksiyonel yastıklama eğrisinin sınırları içerisinde kalması için sıcak formlama proses parametrelerinin etkileri deneysel bir bir metodla incelenmiş ve ortaya çıkan bulgular yorumlanarak bu parametrelerdeki değişimin hedef eğriye etkileri ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Debriyaj, Konfor, Proses Parametresi, Sıcak Formlama, Yastıklama Etkisi

2022, xii + 32 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CUSHION SPRING PRODUCTION PROCESS IN CLUTCH SYSTEM ON VEHICLE COMFORT

Ahmet DUNDAR

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Doc. Dr. Gokhan SEVILGEN

Driving comfort in motor vehicles is one of the most important criteria for drivers. For this reason, vehicle manufacturers want to produce all parts at the best level by minimizing the changes in the production processes of the parts that provide comfort in the vehicle and their effect on the product.

In clutch systems with a dry friction surface, the transmission of the torque from the engine to the gearbox should be interrupted and this torque should be transferred smoothly during the clutch again. Meanwhile, there is a cushioning spring that provides a cushion effect during separation and clutching so that the driver does not experience comfort-preventing situations such as vibration, knocking, jolting while driving during gear shifts. Thanks to the formy structure of this cushion spring, driving comfort is ensured without interruption.

Due to the cushion spring, its shaped structure, the axial displacement in the clutch disc increases due to the increase in axial load from the thrust assembly during release and engagement. However, this change continues progressively, not linearly, until the cushion spring is compressed between the two facings. The target cushion curve limits here represent the driving comfort zone in the vehicle.

In this thesis, the effects of hot forming process parameters in order to keep the part within the target functional cushion curve of the part in the hot forming process, which is one of the production processes of the cushion spring part, which is a comfort provider in the vehicle, were examined with an experimental method and the results were interpreted and the effects of the changes in these parameters on the target curve were revealed.

Key words: Clutch, Comfort, Cushion Effect, Process Parameter, Warm Forming
2022, xii + 32 pages.

TEŞEKKÜR

Akademik hayatım boyunca bana desteklerini esirgemeyen başta kıymetli hocalarım, Prof.Dr Ferruh ÖZTÜRK, Doc.Dr Gökhan SEVİLGEN ve Dr.Ögr.Üyesi Erol SOLMAZ'a, çalışmalarımda her zaman yardımcı olan Valeo Otomotiv San. Tic. A.Ş ve burada bulunan mesai arkadaşlarıma ve her zaman yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet DÜNDAR
10/01/2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iii
ABSTRACT iv
TEŞEKKÜR v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vii
ŞEKİLLER DİZİNİ viii
ÇİZELGELER DİZİNİ ix
1. GİRİŞ 1
1.1. Debriyaj Sistemini Oluşturan Parçalar 3
1.2. Yastıklama Yayı 6
1.2.1. Yastıklama Yayının Tork Kapasitesine Etkisi 7
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 10
3. MATERYAL ve YÖNTEM 15
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 21
4.1. Kalıp Sıcaklığı Etkisinin İncelenmesi 21
4.2. Sıcak Formlama Prosesinde Formlanan Şarj Adeti Etkisinin İncelenmesi 24
4.3. Sıcak Formlama Pres Süresinin Etkisinin İncelenmesi 27
5. SONUÇ 30
KAYNAKLAR 31
ÖZGEÇMİŞ 32

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
C	Celsius
Fa	Uygulanan Kuvvet
HRC	Rockwell Sertliği
mm	Milimetre
N	Newton
P	Basınç
r_{ort}	Ortalama Sürtünme Yarıçapı
S	Yüzey Alanı
TK	Tork Kapasitesi
u	Yer Değiştirme
z	Sürtünme Yüzey Sayısı
μ	Balata Sürtünme Katsayısı
°	Derece

Kısaltmalar	**Açıklama**
Bknz.	Bakınız
ÇKV	Çift Kütleli Volan
TKV	Tek Kütleli Volan

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Debriyaj Sistemi Elemanları....1
Şekil 1.2. Debriyaj Sistemi Elemanları....2
Şekil 1.3. Debriyajda Kavrama Durumu....2
Şekil 1.4. Debriyajda Ayırma Durumu....3
Şekil 1.5. Çift Kütleli Volan(ÇKV)....3
Şekil 1.6. ÇKV'li Debriyaj Kiti (Solda) ve Tek Kütleli Konvansiyonel Kit (Sağda).....4
Şekil 1.7. Motordan Şanzımana Burulma Titreşiminin Aktarılması(LUK)....4
Şekil 1.8. Baskı Komplesi Elemanları....5
Şekil 1.9. Damperli Disk Komplesi Elemanları....5
Şekil 1.10. Rijit disk Komplesi Elemanları....6
Şekil 1.11. Yastıklama Eğrisi....6
Şekil 1.12. Disk Komplesi Tork İlişkisi....7
Şekil 1.13. Yastıklamasız Tork Aktarımı....9
Şekil 1.14. Yastıklamasız Tork Aktarımı....9
Şekil 2.1. Yastıklamalı Yay Geometrik Modellemeleri (E. Bellenger)....10
Şekil 2.2. Deneysel ve Teorik Sonuçlara Göre Yastıklama Eğrisi (E. Bellenger)....11
Şekil 2.3. Yastıklama Yayı Parametrik Modeli (Vivek Thacker 2018)....11
Şekil 2.4. İlk Tasarım Yastıklama Yayı Rijitlik Eğrisi (Vivek Thacker 2018)....12
Şekil 2.5. Hedeflenen Yayı Rijitlik Eğrisi (Vivek Thacker 2018)....13
Şekil 2.6. Tekrarlı Çalışmalardan Sonra Balata ve Yastıklama Yayı Sıcaklıkları....13
Şekil 2.7. Sıcaklık Değişiminin Yastıklama Eğrisine Etkisi(Capetti)....14
Şekil 3.1. Yastıklama Yayı....15
Şekil 3.2. Yastıklama Eğrisi Sınırları....16
Şekil 3.3. Yastıklama Yayı Üretim Süreçleri....17
Şekil 3.4. Yastıklama Yayı Isıl İşlem Basamakları....17
Şekil 3.5. Meneviş Yapılmış Formsuz Parça....18
Şekil 3.6. Sıcak Formlanmış Parça....19
Şekil 3.7. Göbeği Boşaltılmış Parça....19
Şekil 3.8. Hedef Yastıklama Eğrisi....20
Şekil 4.1. Kalıp Sıcaklığındaki Değişimin Yastıklama Eğrisine Etkisi....22
Şekil 4.2. Kalıp Sıcaklığındaki Değişimin Kalınlık ve Paralelsizliğe Etkisi....23
Şekil 4.3. Kalıp Sıcaklığındaki Değişimin Parça Sertliğine Etkisi....23
Şekil 4.4. Sıcak Form Kalıbına Yüklenen Parçalar....24
Şekil 4.5. Tek Seferde Formlanan Parça Adetinin Yastıklama Eğrisine Etkisi....25
Şekil 4.6. Tek Seferde Formlanan Parça Sayısının Kalınlık ve Paralelsizliğe Etkisi....26
Şekil 4.7. Tek seferde Formlanan Parça Sayısının Parça Sertliğine Etkisi....26
Şekil 4.8. Sıcak Formlama Pres Süresinin Yastıklama Eğrisine Etkisi....28
Şekil 4.9. Sıcak Formlama Pres Süresinin Parça Kalınlık ve Paralelsizliğine Etkisi....28
Şekil 4.10. Sıcak Formlama Pres Süresinin Parça Sertliğine Etkisi....28

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Tasarım Sınır Değerleri....12
Çizelge 3.1. C67S Kimyasal Özellikler (%) 16
Çizelge 3.2. C67S Malzeme Mekanik Özellikler 17
Çizelge 3.3. Hedef Yastıklama Sınır Değerleri Tablosu....20
Çizelge 4.1. Kalıp Sıcaklığı Analizi Proses Parametreleri....21
Çizelge 4.2. Farklı Kalıp Sıcaklıklarında Üretilen Parça Ölçümlerinin Ortalama Değerleri 21
Çizelge 4.4. Formlama Adeti Etkisi Analizinde Kullanılan Proses Parametreleri 24
Çizelge 4.5. Formlanan Parça Adetinin Parça Ölçüm Sonucuna Etkisi 24
Çizelge 4.4. Sıcak Formlama Süresi Etkisi Analizinde Kullanılan Proses Parametreleri 27
Çizelge 4.5. Sıcak Formlama Pres Süresinin Parça Ölçüm Sonucuna Etkisi 27
Çizelge 4.6. Proses Parametresinin Parça Fonksiyonu Üzerine Etkisi 29

1. GİRİŞ

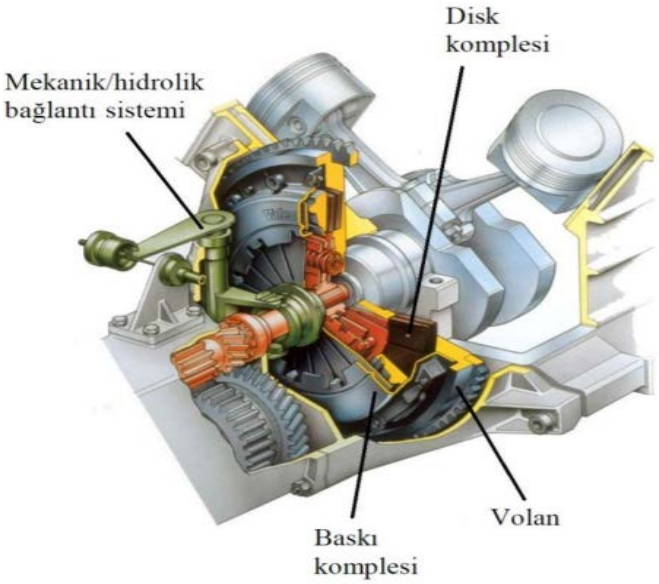
Otomotiv endüstrisi, terim anlamı olarak, motorlu taşıtları tasarlayan, geliştiren, üreten ve pazarlayan iş sektörüdür. Otomotiv sanayi, tüm sanayileşmiş ülkelerde ekonominin lokomotifi olarak kabul edilmektedir. Ülkemizde de en çok ihracat yapan sektör olan otomotiv sektöründe firmalar, gelişen teknolojiye paralel olarak fiyat, performans ve özellikle konfor üzerine bir rekabet içerisinde bulunmaktadır.

Bu yüksek lisans tezinde manuel şanzımanlı araçlarda bulunan kuru sürtünme debriyaj sistemlerinde tork iletimi ve ayırma sırasında konfor sağlayıcısı görevinde bulunan yastıklamalı yayların endüstride üretimi sırasında, üretim sürecindeki parametrelerin yay rijitliğine etkisi deneysel ve karşılaştırmalı analizler ile değerlendirilmiş ve bu parametrelerin çalışma sırasında optimum seviyede etki edeceği aralıklar belirlenmiştir.



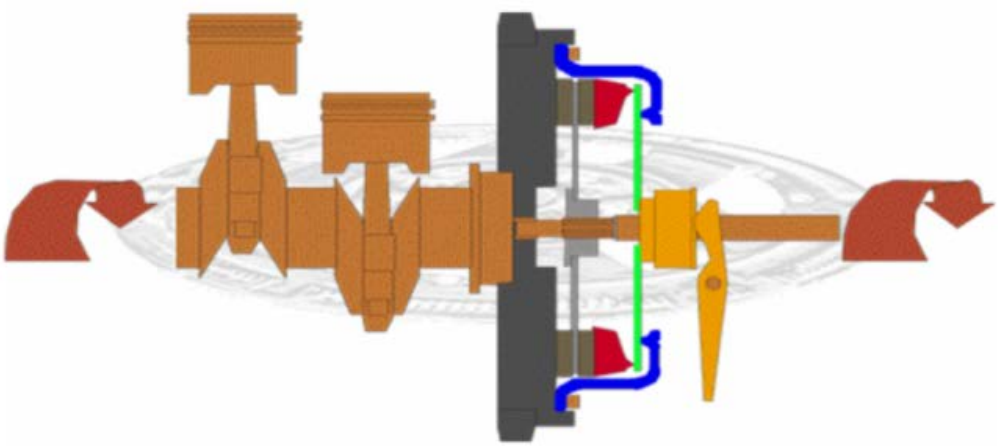
Şekil 1.1. Debriyaj Sistemi Elemanları

Debriyaj sistemi manuel araçlarda motor ile vites kutusu arasında ayırma ve kavramayı sağlayan sistemdir.Kavrama sırasında motordan gelen düzensiz titreşimlerin de sönümlenmesini ve vites kutusuna aktarılmasını engelleyerek vites kutusunu koruyan debriyaj sisteminde yer alan parçaların kendi içerisinde farklı görevleri bulunmaktadır. Sistemi oluşturan ana parçalar Volan , Baskı komplesi ve Disk komplesi olarak adlandırılır.

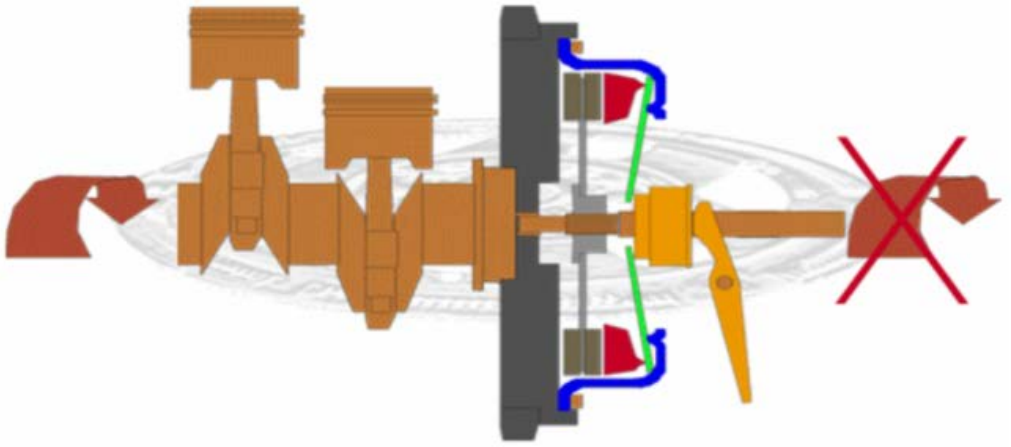


Şekil 1.2. Debriyaj Sistemi Elemanları

Kuru sürtünmeli debriyaj sisteminin çalışma prensibi, debriyaj pedalına basıldığında mekanik veya hidrolik aktüatör tarafından eksenel yönde baskı komplesi üzerindeki diyafram yayı üzerine kuvvet uygulanır. Bu uygulanan kuvvet neticesinde diyafram parmakları eksenel olarak hareket eder ve baskı plakası langetler vasıtasıyla geriye çekilir. Böylelikle disk komplesi üzerinden tork aktarımı kesilir ve ayrılma gerçekleşir. Debriyaj pedalından ayağınızı kaldırdığınızda mekanik veya hidrolik aktüatör tarafından eksenel yöndeki kuvvet geriye çekilir. Disk komplesi, baskı plakası ve volan arasında sıkışarak balatalar üzerinden şanzıman miline tork aktarımı tekrar sağlanmış olur.



Şekil 1.3. Debriyajda Kavrama Durumu

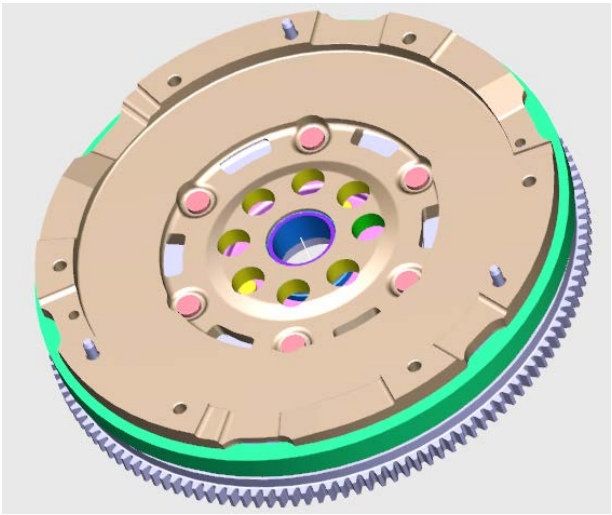


Şekil 1.4. Debriyajda Ayırma Durumu

1.1. Debriyaj Sistemini Oluşturan Parçalar

Volan, marş motoru vasıtasıyla araçta motora ilk hareketi veren parça olarak adlandırılır. Motordaki krank milinden gelen dönme momentinin vites kutusuna aktarılmasını sağlayan silindir şeklindeki kütledir. Teknolojisine göre tek veya çift kütleli olabilen Volanın başlıca fonksiyonları,

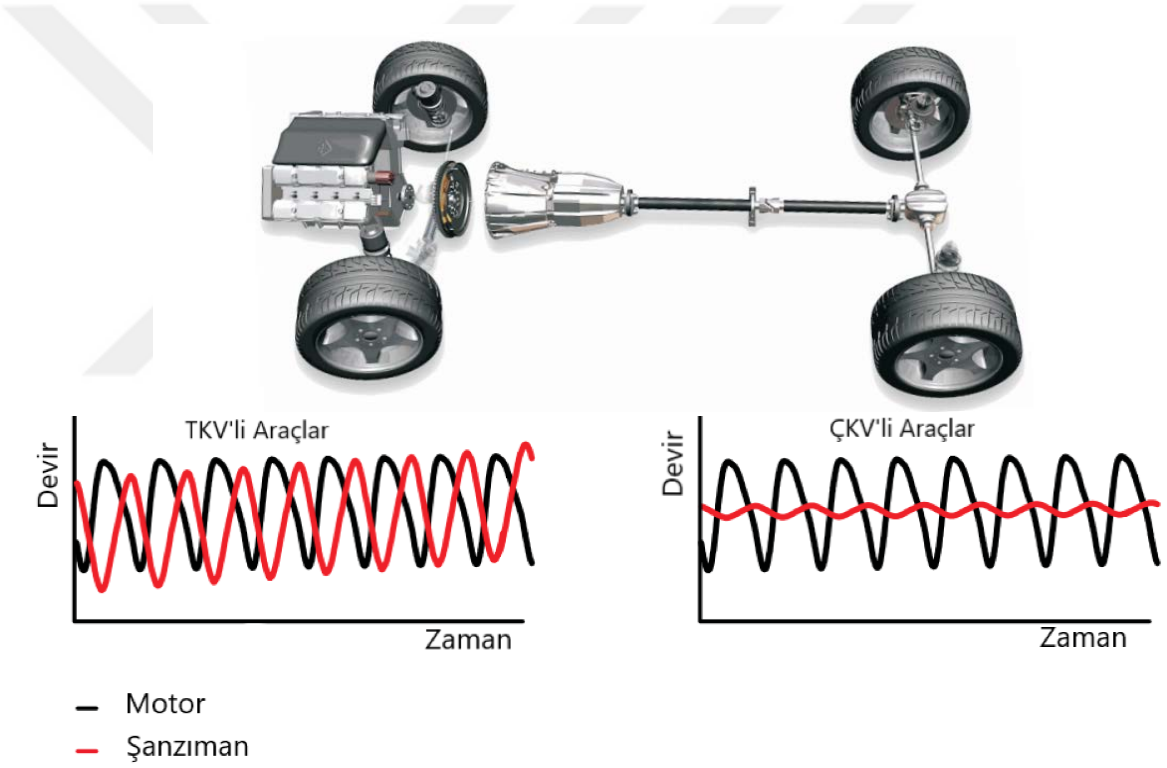
- Sahip olduğu kütle ve atalet sayesinde, motordan gelen düzensizlikleri filtrelemede görevlidir.
- Motor torkunun şanzımana iletilmesinde görevlidir.
- Ayırma\kavrama sırasında açığa çıkan enerjiyi absorbe eder.
- Motordan gelen titreşimi filtrelemede görevlidir.(Çift kütleli volan)



Şekil 1.5. Çift Kütleli Volan(ÇKV)

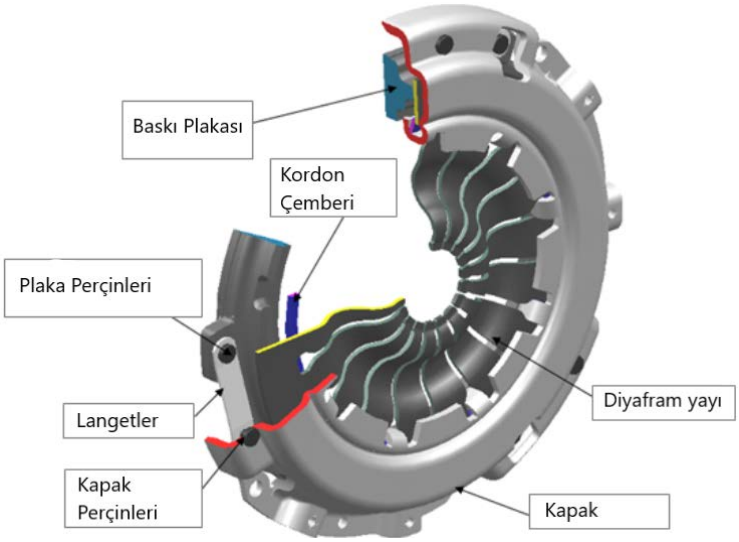


Şekil 1.6. ÇKV'li Debriyaj Kiti (Solda) ve Tek Kütleli Konvansiyonel Kit (Sağda)



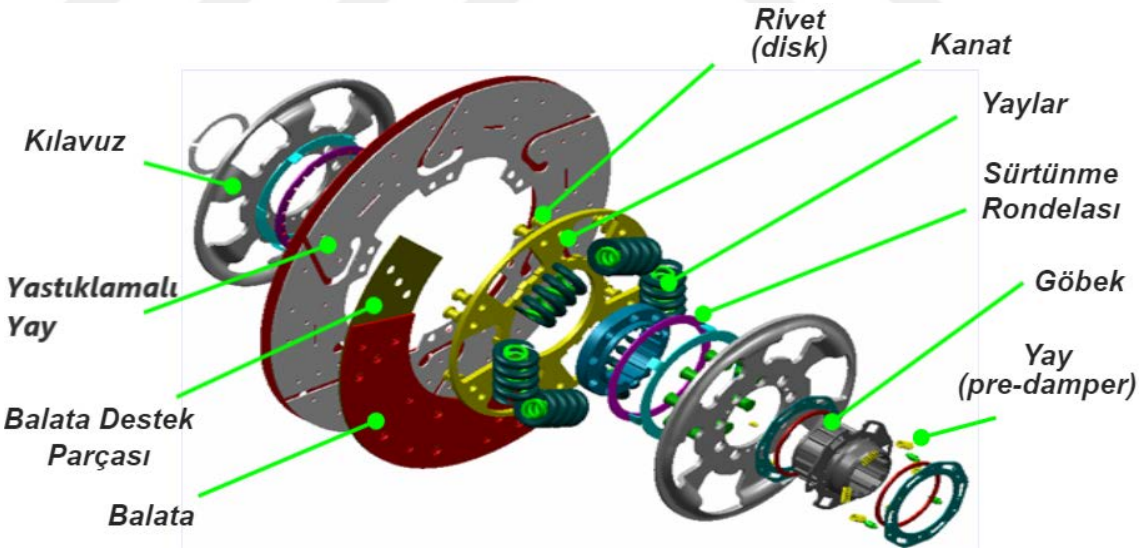
Şekil 1.7. Motordan Şanzımana Burulma Titreşiminin Aktarılması(LUK)

Baskı komplesi, volana bağlıdır ve motor döndüğü sürece sürekli döner. Üzerinde bulundurduğu diyafram ve baskı plakası komponentleri sayesinde ayırma\kavrama ve tork aktarımını sağlar. Araçta debriyaj pedalina basıldığında mekanik ve hidrolik ekipmanlar üzerinden gelen eksenel yük ile diyafram yayı vasıtasıyla baskı plakası ve volan arasındaki tork aktarımı kesilerek ayırma sağlanmış olur. Debriyaj pedalından yük geri çekildiğinde tekrar kavrama gerçekleşir ve baskı plakası üzerinden tork aktarımı devam eder.

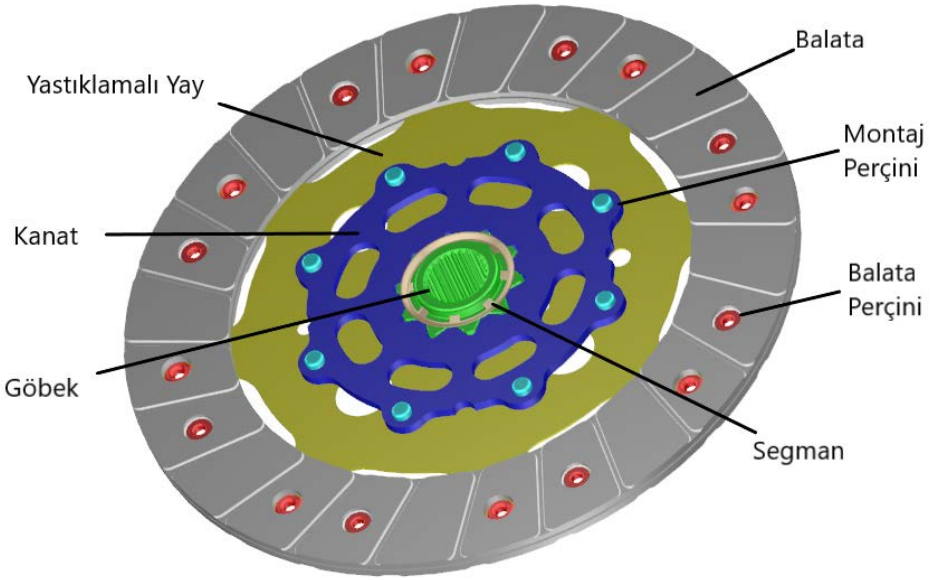


Şekil 1.8. Baskı Komplesi Elemanları

Disk komplesi, şanzıman miline bağlı olarak hareket eder. Üzerindeki sürtünme elemanı olan balatalar vasıtasıyla volan üzerinden gelen motor momentinin disk üzerinde bulunan göbeğe, oradan da şanzıman mili vasıtasıyla vites kutusuna aktarılmasını sağlar. Disk komplesi içerisinde iki balata arasında bulunan yastıklama yayı sayesinde ise ayırma kavrama sırasında yastıklama etkisi ile sürüş konforu sağlanmış olur. Yastıklama yaylarının bir diğer fonksiyonu ise tork aktarımında tork kaybının önlenmesini sağlamaktır.



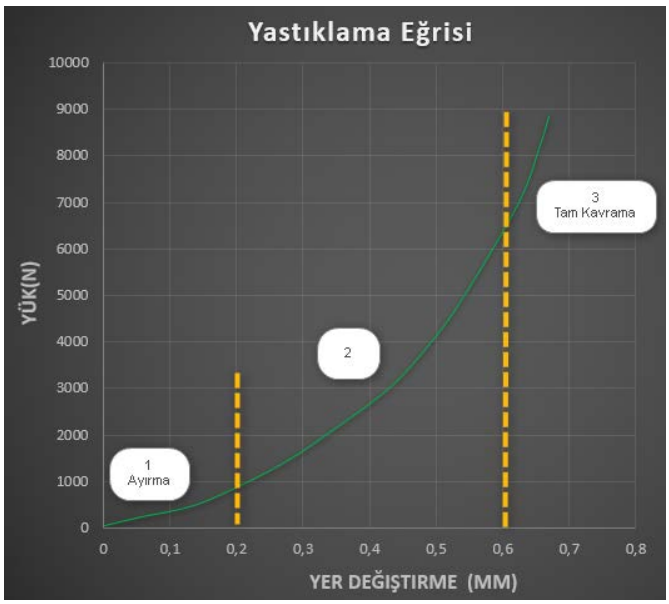
Şekil 1.9. Damperli Disk Komplesi Elemanları



Şekil 1.10. Rijit disk Komplesi Elemanları

1.2. Yastıklama Yayı

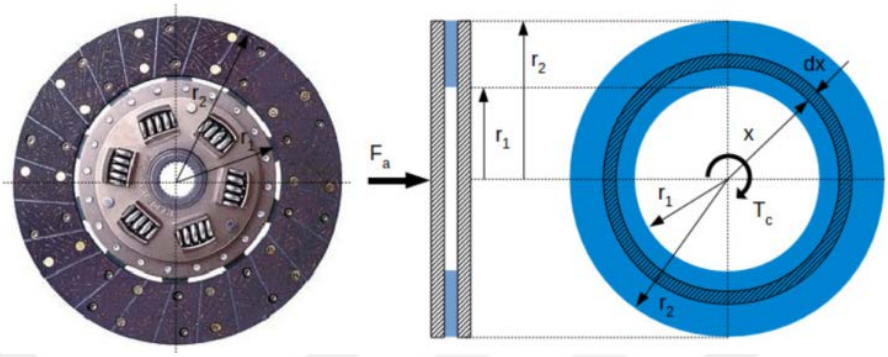
Disk komplesinin kavrama anında esnekliği yastıklama yayı tarafından karşılanır. Formlu yapısı ile iki balata arasında montajlı olan yastıklama yayı lineer olmayan bir eğri oluşturur. Bu eğri, yastıklama eğrisi olarak adlandırılır. Yastıklama eğrisinin bölümleri şekil 1.13'te gösterilmiştir. 1.Bölümde baskı plakası disk komplesine temas etmemektedir.(Ön yük bölümü) 2.Bölümde ise baskı plakası tarafından disk komplesi üzerine kısmi şekilde kuvvet uygulanmaktadır. 3.Bölümde ise disk komplesi motordan gelen torku şanzımana tamamıyla aktarmaktadır.



Şekil 1.11. Yastıklama Eğrisi

1.2.1. Yastıklama Yayının Tork Kapasitesine Etkisi

Yastıklama Yayı araçta ayırma ve kavrama sırasında sürüş konforu sağlamasının yanında debriyaj sisteminin tork kapasitesinin arttırılmasına da yardımcı olur.



Şekil 1.12. Disk Komplesi Tork İlişkisi

Sürtünen yüzey yani balata geometrisi üzerinden bir temel alan (dx) alınırsa, debriyaj sisteminin tork kapasitesi aşağıdaki formülle elde edilebilir.

Temel basınç formülü,

$$P = {}^{F}/_{A} \qquad (1)$$

Perçin yüzey alanı ihmal edilirse sürtünme yüzeyi alanı şu şekilde hesaplanır.

$$S=S2–S1=Pi\pi r_2^2–Pi\pi r_1^2=Pi\pi(r_2^2–r_1^2) \qquad (2)$$

1.denklemde yüzey alanı yerine 2. denklem yazıldığında,

$$P=Fa/Pi(r_2^2-r_1^2) \qquad (3)$$

Temel alanı(dA) şu şekilde hesaplayabiliriz.

$$DA=2PixDx \qquad (4)$$

Temel alana etki eden kuvvet dN şu şekilde hesaplanır.

$$Dn= PdA \qquad (5)$$

3 ve 4.denklem çıktıları 5.denklemde yazıldığında,

$$Dn=\frac{2FaxDx}{r_2^2–r_1^2} \qquad (6)$$

Sürtünme kuvveti şu şekilde hesaplanabilir.

$$DF=\mu Dn \quad (7)$$

7.denklem, 6.denklem kullanılarak açıldığında,

$$DF=\frac{2\mu FaxDx}{r_2^2-r_1^2} \quad (8)$$

Sürtünme torku dT şu şekilde hesaplanır,

$$DT=xDF \quad (9)$$

9.denkleme 8.denklemdeki DF yerine yazıldığında,

$$DT=\frac{2\mu Fax^2Dx}{r_2^2-r_1^2} \quad (10)$$

Kavramanın tork kapasitesi matematiksel ifadesi şu şekilde elde edilir.

$$TK=\int_{r_1}^{r_2} DT$$

$$=\frac{2\mu Fa}{r_2^2-r_1^2}\int_{r_1}^{r_2} x^2 Dx$$

$$=\frac{2}{3}\frac{\mu\, r_2^3-r_1^3}{r_2^2-r_1^2}\,Fa$$

İki sürtünme yüzeyli tek plakalı bir sistem için tork kapasitesi,

$$TK=\ 2\frac{2}{3}\frac{\mu\, r_2^3-r_1^3}{r_2^2-r_1^2}\,Fa$$

Sürtünme yüzeyinin ortalama çapı, $r_{ort}=\frac{r_1+r_2}{2}$ olarak alındığında debriyajın tork kapasitesi

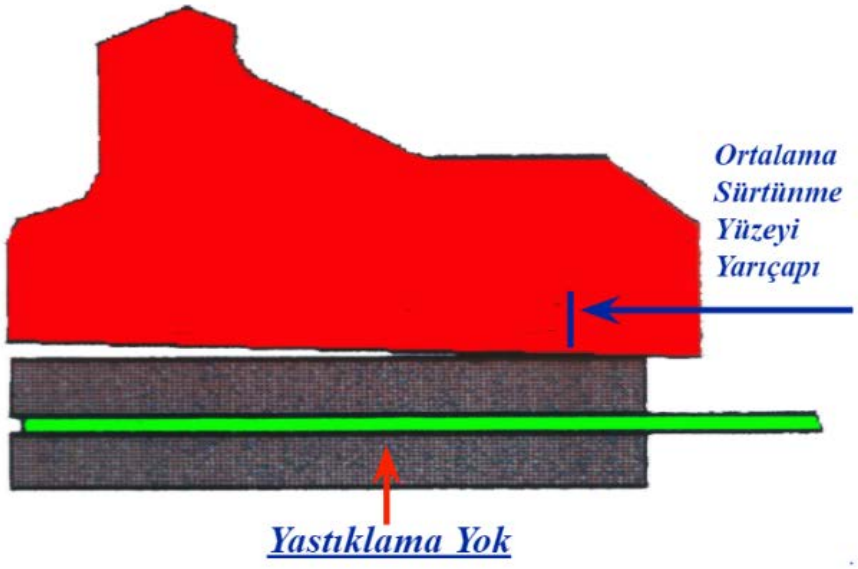
$$TK= z.\mu.Fa.r_{ort}$$

olarak hesaplanır.

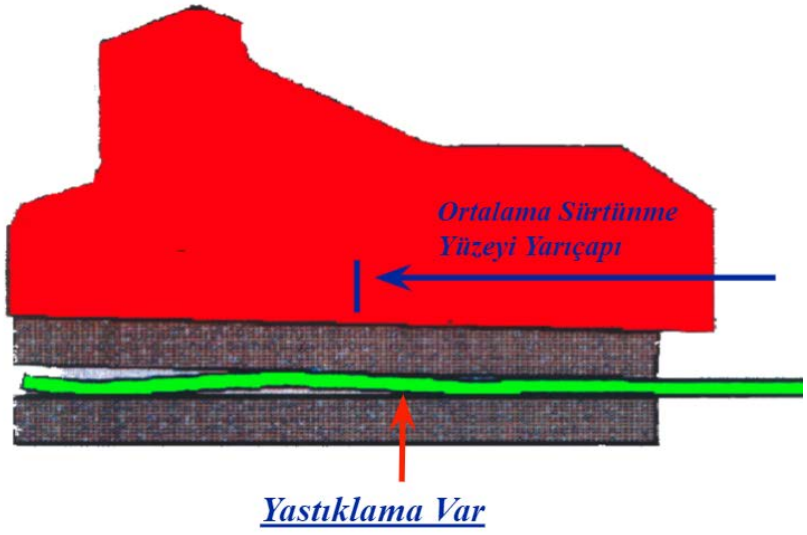
Burada tork kapasitesi(Tc); sürtünen yüzey sayısı(z), balatanın sürtünme katsayısı(μ), uygulanan kuvvet(Fa) ve debriyajın ortalama yarıçapına(r_{ort}) bağlıdır.

Debriyaj sürtünme yüzeyi ortalama yarıçapı yastıklama yayı parçasının yastıklama etkisiyle arttırılarak tork kapasitesi doğrudan arttırılmış olur.

Aşağıda, Şekil 1.14 ve Şekil 1.14'te görebileceğiniz gibi yastıklama yayı sayesinde debriyaj sisteminde sürtünme yüzeyi yarıçapı artacağından sistemin tork aktarım kapasitesi de artar.



Şekil 1.13. Yastıklamasız Tork Aktarımı

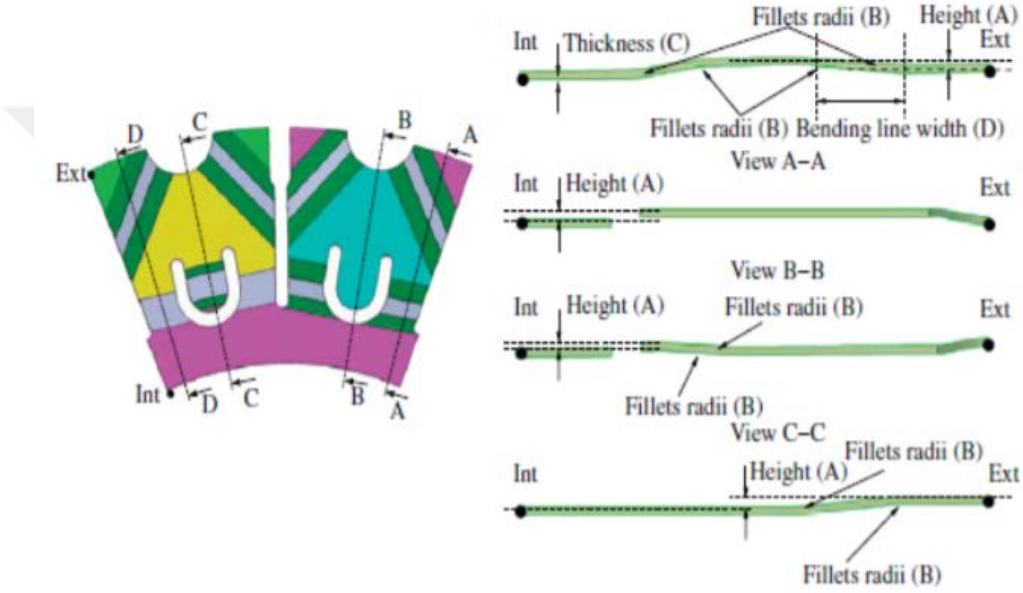


Şekil 1.14. Yastıklamasız Tork Aktarımı

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

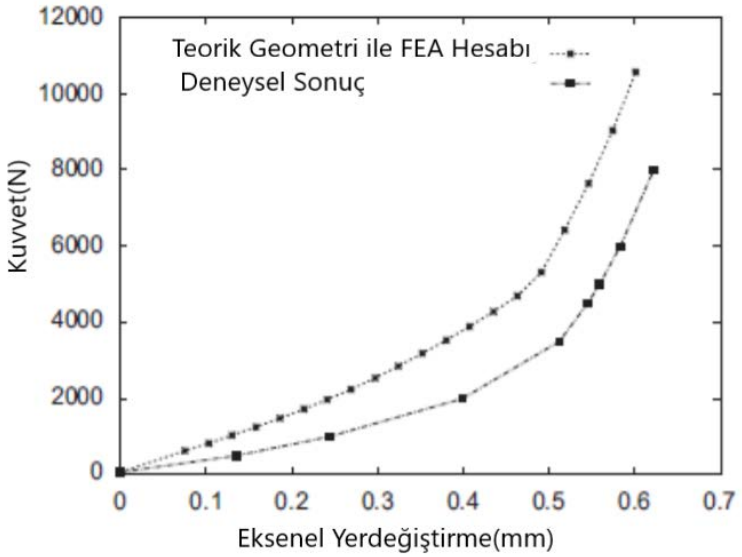
Litaratürde yastıklamalı yaylar üzerine yapılan çalışmalarda genellikle dizayn optimizasyonu , malzeme ve tasarım etkileri üzerinde incelemelerde bulunulmuş, çok az kaynakta yastıklamalı yayların üretim süreçlerine değinilmiştir. bu nedenle bu çalışmada litaratürde yer alan çalışmalardan optimum dizayn seviyesinde, değişkenler minimize edilerek deneysel çalışma ve bu çıktıların karşılaştırmalı analizleri yoluna gidilmiştir.

Yastıklamalı yayların şekil optimizasyonları üzerine çalışmalarda bulunan Bellenger ve çalışma arkadaşları yay rijitliğini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak hesaplamış ve çıkan sonuçları fiziksel ölçümlerle karşılatırmıştır.



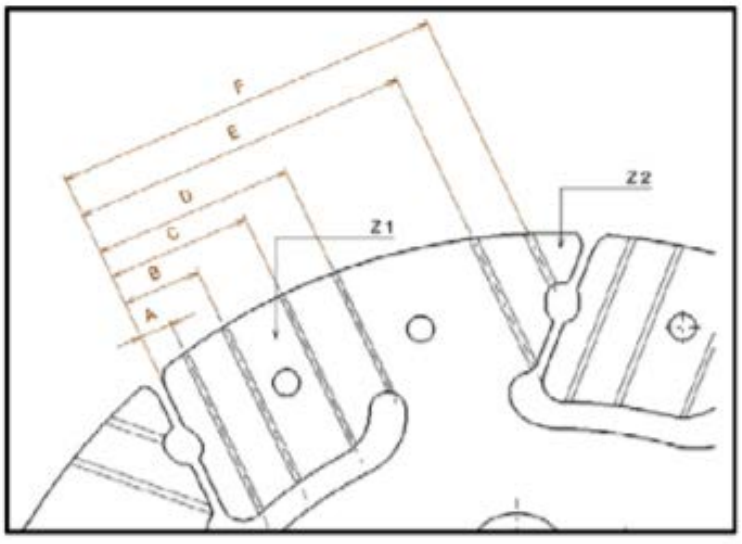
Şekil 2.1. Yastıklamalı Yay Geometrik Modellemeleri (E. Bellenger)

Yapılan analiz ve ölçüm arasındaki değişkenleri tolere edilebilir kabul ederek bu değişkenleri üretim metodu ve farklı parçalar üzerindeki üretim farklılıklarından kaynaklandığını belirtmişlerdir.



Şekil 2.2. Deneysel ve Teorik Sonuçlara Göre Yastıklama Eğrisi (E. Bellenger)

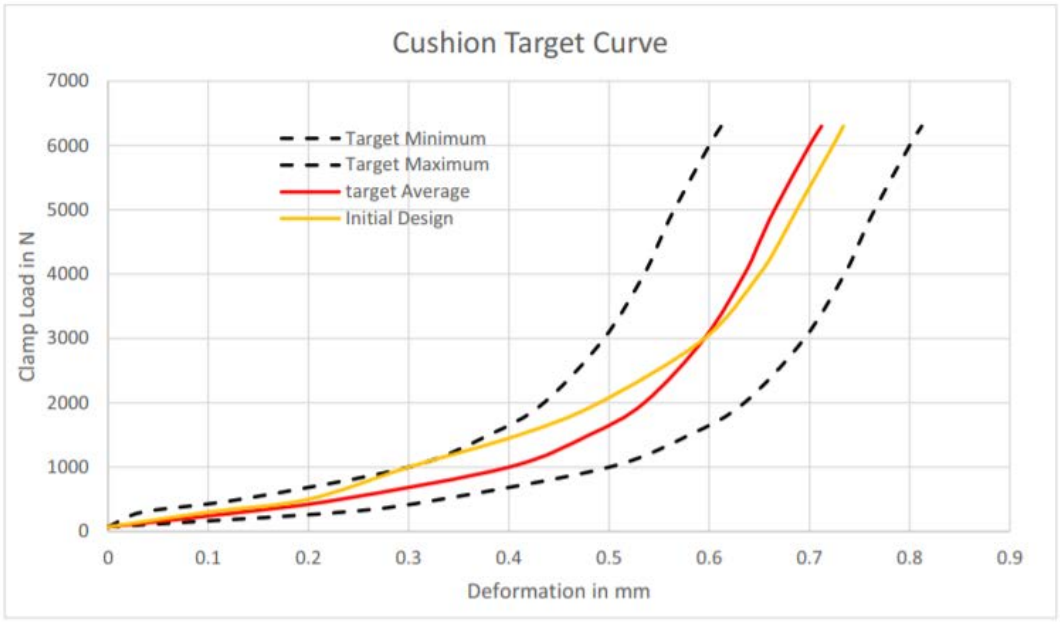
Tasarımda deneme yanılma metodu yerine optimum rijitlik ve ideal yastıklama eğrisinin nasıl elde edilebileceği yönünde çalışmalar yapan Vivek Thacker ve E Vijayaragavan, ANSY üzerinde yüzey optimizasyonu gerçekleştirerek gerekli yastıklama hedefini ve minimum stres kriterlerini karşılanabileceğini belirtmişlerdir. Deneysel tasarımın ve yüzey optimizasyonunun çözme süresi manual optimizasyondan daha kısa süreceğinden bu yöntemin uygulanabileceğini vurgulamışlardır.



Şekil 2.3. Yastıklama Yayı Parametrik Modeli (Vivek Thacker 2018)

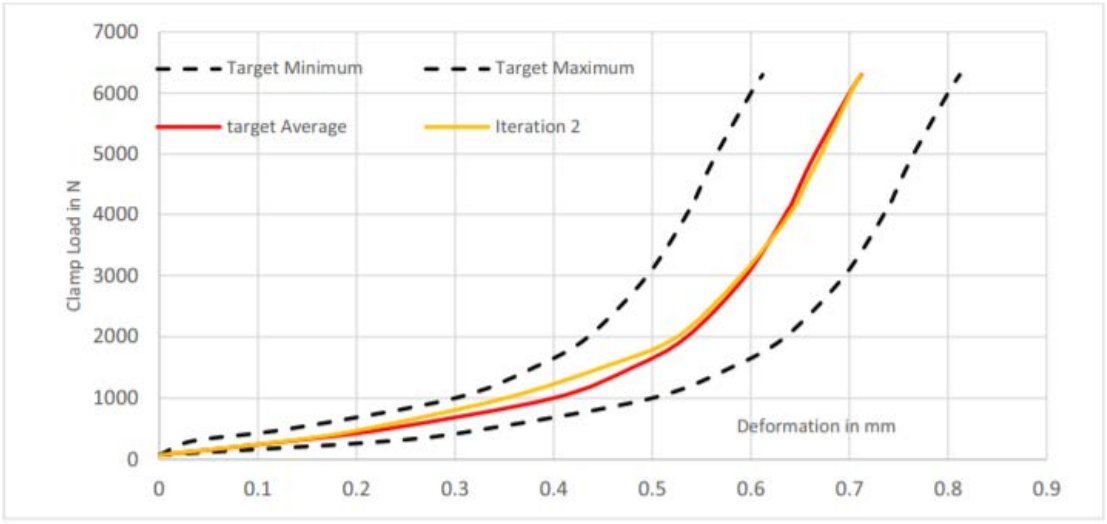
Çizelge 2.1. Tasarım Sınır Değerleri

Parameters	Initial value (mm)	Lower bound (mm)	Upper bound (mm)
P1-A	6	5	8
P2-B	17	16	19
P3-C	29	29	32
P4-D	40.8	38	42
P5-E	66.5	64	69
P6-F	76.5	74	75
P7-Z1	0.65	0.6	0.7
P8-Z2	0.85	0.8	0.9



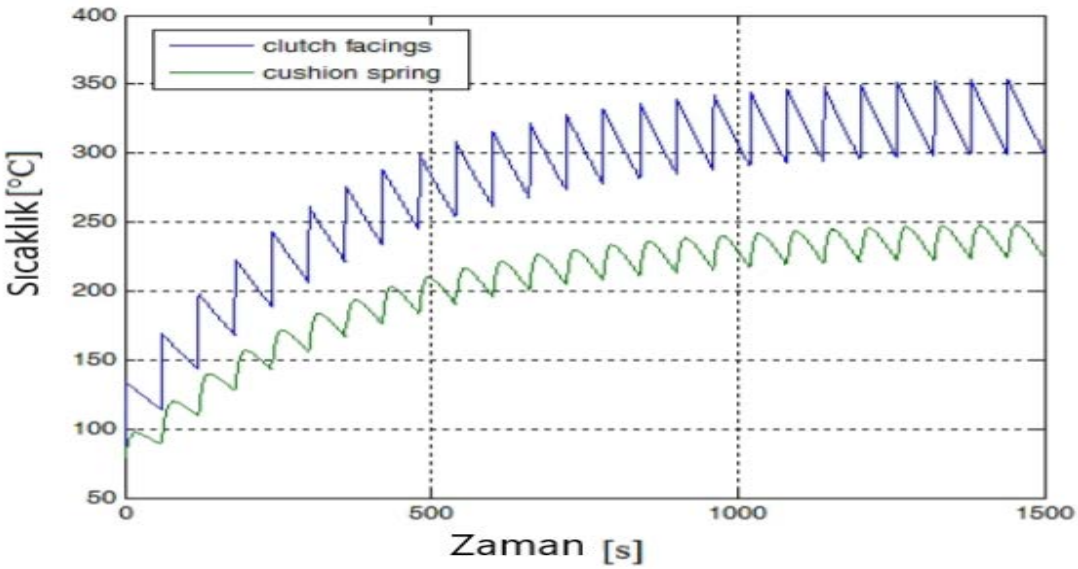
Şekil 2.4. İlk Tasarım Yastıklama Yayı Rijitlik Eğrisi (Vivek Thacker 2018)

Vivek Thacker ve E Vijayaragavan, Şekil 2.5'teki yastıklama eğrisini hedef eğriye yaklaştırmak için ANSYS üzerinde geometrinin kalınlığını sabit tutup Şekil 2.3'teki geometride bulunan A, D, F sınır ölçülerinde değişiklik yaparak Şekil 2.5'te görüldüğü gibi ideal duruma yaklaşım sağlamışlardır.



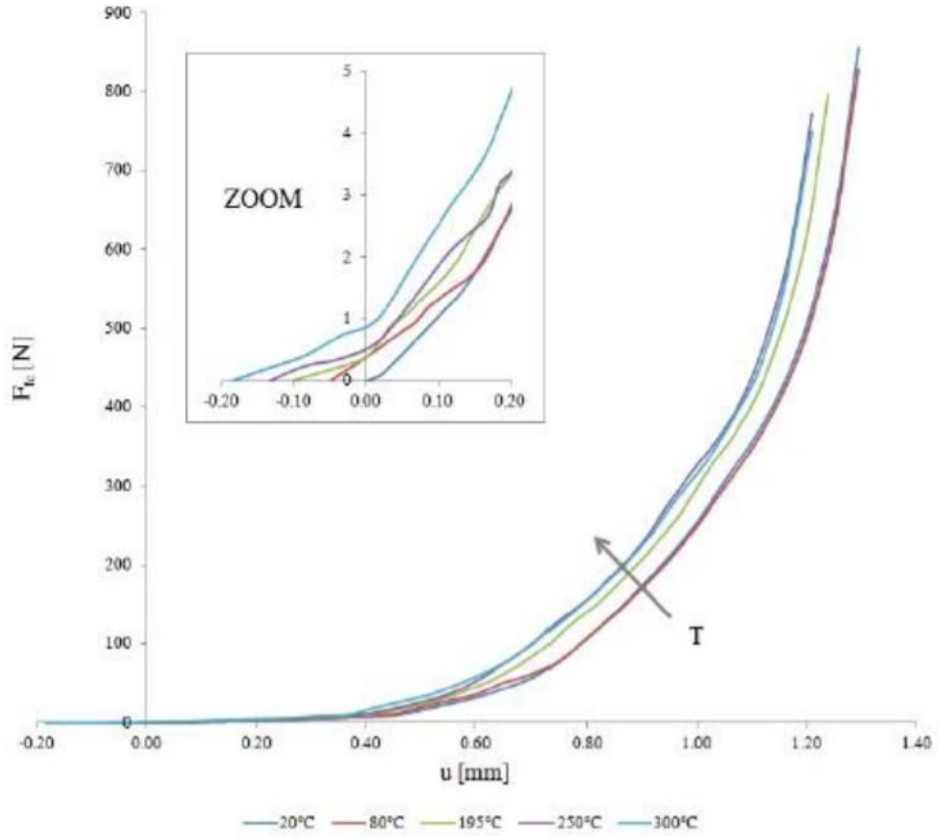
Şekil 2.5. Hedeflenen Yayı Rijitlik Eğrisi (Vivek Thacker 2018)

Yastıklamalı yaylar üzerine yapılan bir başka çalışmada ise sıcaklığın yastıklama yayına etkisi incelenmiştir. Burada Capetti yaptığı çalışmada debriyaj sisteminde çalışma koşullarına bağlı olarak sürtünmeler sonucu ortaya çıkan ısının malzeme karakteristiğini değiştirdiğini tespit etmişlerdir. Balatalar üzerindeki sıcaklığın 350°C üzerine çıkabildiğini ve bu seviyeden sonra kalıcı deformasyona maruz kaldığını tespit etmiştir. Balataların bu sıcaklık altında temas ettiği yastıklama yaylarının da sıcaklığını arttırdığı görülmüştür.



Şekil 2.6. Tekrarlı Çalışmalardan Sonra Balata ve Yastıklama Yayı Sıcaklıkları

Bu değişimi yastıklama yaylarının 20°C , 80°C , 195°C , 250°C ve 300°C sıcaklık değerleri altında yastıklama eğrilerinde oluşturduğu değişimleri yorumlamıştır.

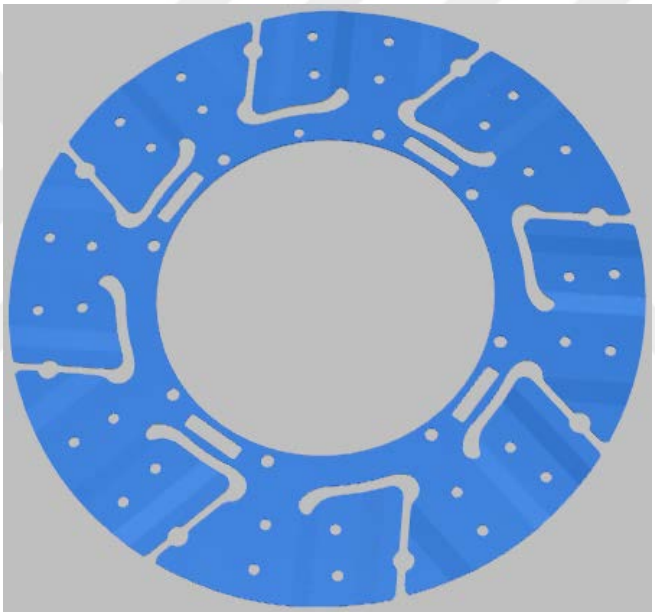


Şekil 2.7. Sıcaklık Değişiminin Yastıklama Eğrisine Etkisi(Capetti)

Farklı sıcaklıklar altında yastıklama yayı malzemesinin elastik özelliği azaldığından yastıklama yaylarındaki sıcaklık artışlarında, yük artışına bağlı yastıklama rijitliğinin azaldığı tespit etmiştir.

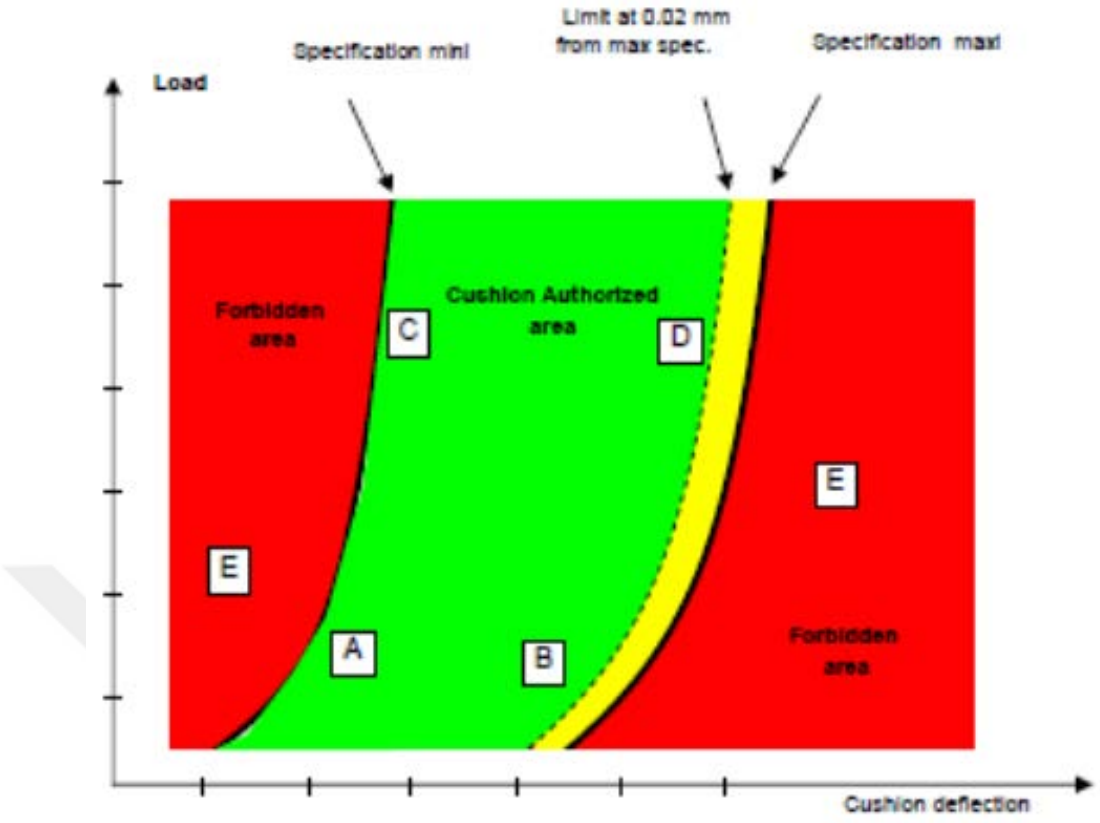
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Giriş bölümünde, yastıklama yayının baskı plakası ve balatalar arasındaki sürtünme bölüm dairesini arttırarak araçta vites kutusuna iletilen torkun düşmesini önleyici bir görevi olduğundan bahsedilmişti. Yastıklama yayı, iletilen torkun azalmadan aktarılmasını formlu yapısı sayesinde gerçekleştirmektedir. Bu formlu yapı, araçta kavrama sırasında baskı plakasının, balata ile temasa geçmesiyle birlikte sıkışmaya başlar ve buna yastıklama etkisi denilmektedir. Aynı şekilde ayırma sırasında da plakanın balatadan teması kesilinceye kadar ters yönde bir yastıklama gerçekleşir. Yastıklama yayı bu şekilde araçta doğrudan sürüş konforunu sağlamaktadır



Şekil 3.1. Yastıklama Yayı

Yastıklama yayı, baskı komplesinden gelen yük ile birlikte eksenel doğrultuda sıkışmaktadır. Baskı komplesi tarafından gelen yük ve bu yük nedeniyle gerçekleşen sıkışma sonucu doğrusal olmayan bir eğri elde edilir. Bu eğri yastıklama eğrisi olarak isimlendirilebilir. Aracı üretecek firma tarafından belirlenen konfor istekleri doğrultusunda hesaplanan pedal yükünden hareketle rijitlik eğrisi oluşturulur. Bu hesapla birlikte araç üreticisinin istediği maksimum ve minimum yastıklama eğrisinin sınırları belirlenir.



Şekil 3.2. Yastıklama Eğrisi Sınırları

Tüm yastıklama yaylarında üretim sonrası yastıklama eğrisi ölçüldüğünde A-B-C-D sınır bölgeleri içerisinde kalması istenir. Eğrinin E bölgesine taşması durumunda motorda oluşan titreşim ve vuruntuyu sürücü hissedecek ve konforsuz bir sürüş yaşayacaktır.

Yay malzemesi olarak kullanılan çeliklerde, yeterli yük dayanımı, elastisite karakteristiği, kırılmaya karşı yüksek dayanım, başlıca istenen karakteristiklerdir. Bu doğrultuda, tez çalışmasında kullanılan yastıklama yayı olarak 0.9mm kalınlığında C67S yay çeliği seçilmiştir. Alternatif olarak yastıklama yaylarında C70 ve XC68 yay çelikleri de kullanılmaktadır.

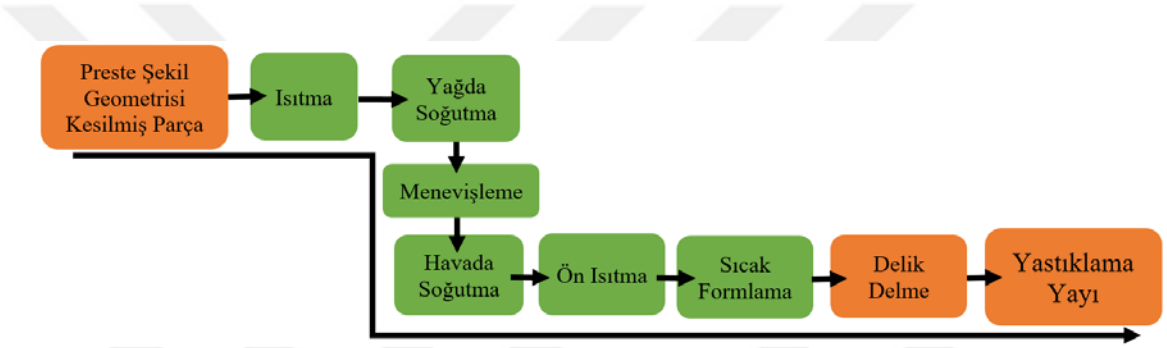
Çizelge 3.1. C67S Kimyasal Özellikler (%)

Malzeme	**DIN**	**C**	**Si**	**Mn**	**Ni**	**P**	**S**	**Cr**	**Mo**
C67S	CK67	0.65 - 0.73	0.15 - 0.35	0.6 - 0.9	max 0.4	max 0.025	max 0.025	max 0.4	max 0.1

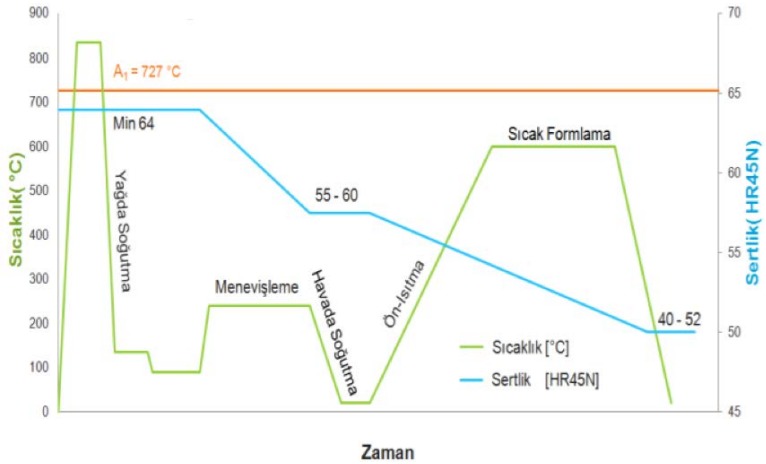
Çizelge 3.2. C67S Malzeme Mekanik Özellikler

Nominal Kalınlık (mm):	**0.3 - 3**
Malzeme Sertliği(Meneviş Öncesi)	**60-65 HRC**

Progresif kalıptan belirlenen geometride preste kesilerek üretilen parça aşağıdaki yeşil renkle gösterilen ısıl işlem proseslerinden geçirilir. Delik delme operasyonunun ardından Yastıklama yayı disk montajına hazır hale gelmiş olur. Yastıklama yayı üretiminde, üretim süreci akış şeması Şekil 3.3'te verilmiştir.



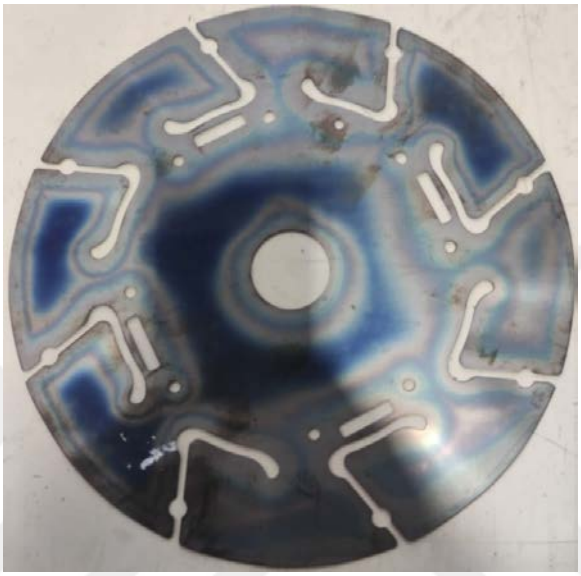
Şekil 3.3. Yastıklama Yayı Üretim Süreçleri



Şekil 3.4. Yastıklama Yayı Isıl İşlem Basamakları

Şekil geometrisi tasarıma uygun olarak preste kesilen parça, üzerindeki stresin azaltılması amacıyla ısıl işlem fırınlarında menevişleme işlemine tabi tutulmaktadır. Sertliğin azalmasına bağlı olarak malzemenin tokluğunun artmasıyla malzeme fonksiyonunu

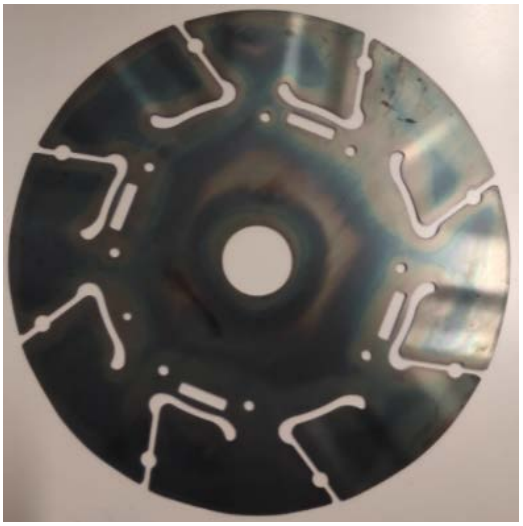
kirilmadan yerine getirir. Sertlik ile tokluk arasında ters bir ilişki vardır. 64-65 HR15N olan bir malzeme kırılganlığından dolayı kullanılamaz ve darbe enerjisini absorbe edemez. Bu nedenle parça, 400°C de yaklaşık 1 saat tutularak malzeme sertliği 64 HR15N'den 45 HR15N'e düşürülmüş olur.İşlem, meneviş fırınlarında 800 Adetlik şarjlar halinde yapılır.



Şekil 3.5. Meneviş Yapılmış Formsuz Parça

Sıcak form verme işlemi, yastıklama parçasını yay haline getiren prosesin ismidir. İşlem, ön ısıtma ve ardından 140 bar basınç altında formlama yapılarak gerçekleştirilir. İşlem sonrasında parçada aşağıdaki ölçümler gerçekleştirilerek hedef sınır değerleri içerisinde olup olmadığı kontrol edilir.

-Sertlik Sınır Değeri: 40-48 HR15,
-Kalınlık Sınır Değeri: 8830N Yük altında minimum 0,95 mm – maksimum 1,21 mm
-Paralelsizlik Sınır Değeri: Maksimum 0.185 mm
-Yastıklama Sınır Değerleri : Bknz. Çizelge 3.3.



Şekil 3.6. Sıcak Formlanmış Parça

Sıcak formlama işleminin ardında parça preste delik delme operasyonuna girip göbek deliği ve balata perçinleme delikleri delinerek disk montajı için hazır hale getirilir.

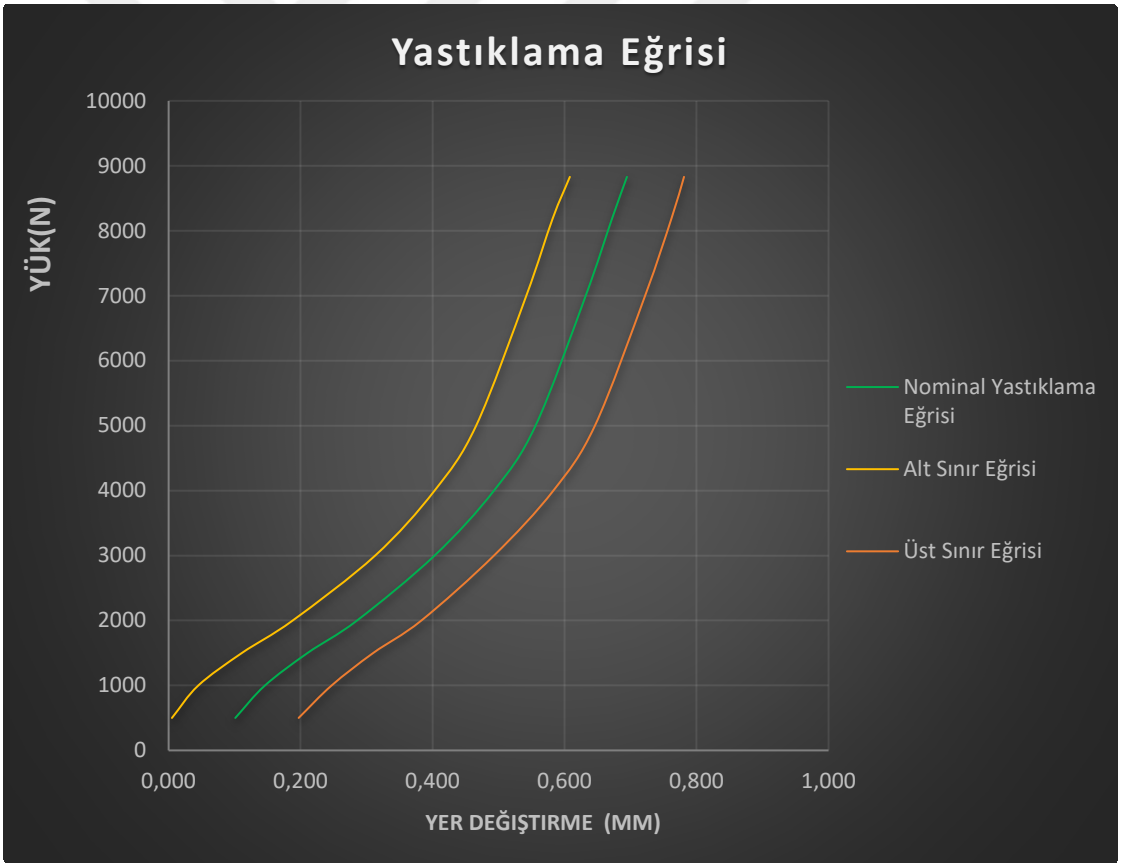


Şekil 3.7. Göbeği Boşaltılmış Parça

Çalışmada şekil geometrisi, sac kalınlığı ve malzeme cinsi sabit tutularak sıcak formlama prosesindeki kalıp sıcaklığı, ön ısıtma süresi, form süresi ve tek seferde formlanan şarj adeti parametrelerinin deneysel analiz sonuçlarının karşılaştırmaları ele alınmıştır. Analiz sonucunda yastıklama yayının Çizelge 3.3'teki müşteri pedal hesabı sonrası belirlenmiş olan hedef yastıklama eğrisi sınırları içinde üretilebilmesi için proses parametrelerinin etkileri yorumlanacaktır.

Çizelge 3.3. Hedef Yastıklama Sınır Değerleri Tablosu

Yük (N)	YER DEĞİŞTİRME(mm)		
	Minimum	Maksimum	Nominal
500	0,005	0,197	0,101
1000	0,045	0,247	0,146
1500	0,111	0,31	0,211
2000	0,188	0,383	0,286
3000	0,313	0,493	0,403
4000	0,403	0,583	0,493
5000	0,466	0,646	0,556
7000	0,542	0,722	0,632
8190	0,582	0,762	0,672
8830	0,608	0,781	0,695



Şekil 3.8. Hedef Yastıklama Eğrisi

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Sıcak formlama prosesinde kalıp sıcaklığı, parça şarj adeti ve sıcak formlama süresi parametreleri parça üzerinde fonksiyonel ve kimyasal özelliklere etkisi farklı parametreler kullanılarak üretilen numuneler üzerinden incelenmiştir.

4.1. Kalıp Sıcaklığı Etkisinin İncelenmesi

Proses parametreleri Çizelge 4.1'de yer alan değerlerde tutularak kalıp sıcaklığı 530°C, 570°C, 610°C seviyelerde üretim gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.1. Kalıp Sıcaklığı Analizi Proses Parametreleri

Kalıp Sıcaklığı (°C)	Şarj Adeti (Adet)	Form Süresi (s)
610	7	110
570	7	110
530	7	110

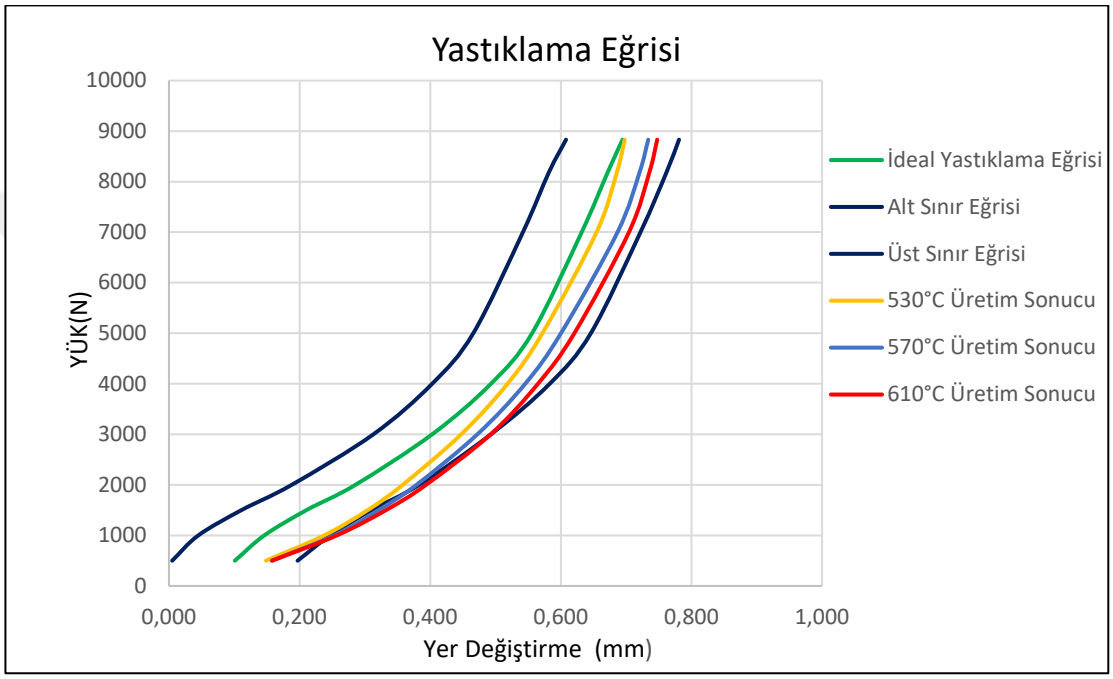
3 farklı kalıp sıcaklığında 7'şer adetlik sarjlarla 110s ön ısıtma süresi ve formlama süresi uygulanarak üretilen 21 adet parçada kalınlık, paralelsizlik, sertlik ve yastıklama ölçüm sonuçları alınmış ve her bir kalıp sıcaklığındaki üretilen parçaların ölçüm değerlerinin ortalaması Çizelge 4.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Farklı Kalıp Sıcaklıklarında Üretilen Parça Ölçümlerinin Ortalama Değerleri

Kalıp Sıcaklığı (°C)	Kalınlık	Paralelsizlik	Yastıklama Yükü(N)										
	8830 N Yük Altında		Sertlik	500	1000	1500	2000	3000	4000	5000	7000	8190	8830
530	0,981	0,164	47,563	0,149	0,238	0,304	0,358	0,448	0,518	0,572	0,655	0,686	0,698
570	1,105	0,115	45,713	0,158	0,253	0,321	0,379	0,472	0,546	0,600	0,687	0,721	0,734
610	1,099	0,027	42,813	0,158	0,257	0,332	0,394	0,493	0,565	0,621	0,704	0,736	0,748

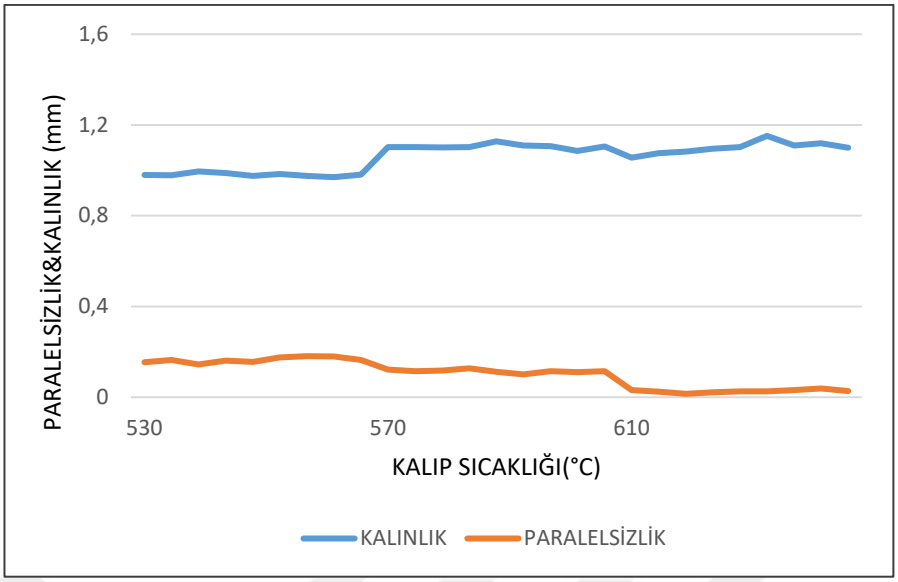
Sonuçlar incelendiğinde form kalıbını sıcaklığının parça üzerindeki fonksiyonel ve sertlik karakteristikleri doğrudan etkilediği görülmektedir. Kalıp sıcaklığı 610°C'de üretilen

parçaların, kalıp sıcaklığı 530°C ve 570°C olduğu şartlarda üretilen parçalara göre araçta disk üzerine gelen eksenel yük artışına bağlı olarak eksenel yer değiştirmesinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 4.3'teki yastıklama eğrileri gösterilen parçalardan 530°C kalıp sıcaklığında üretilmiş parçaların Şekil 3.2'de gösterilen yastıklama eğrisindeki D bölgesinden C bölgesine yaklaşarak konforsuz bölge olan E alanından uzaklaştığı gözlemlenmiştir. Eğrilerin A ve C sınırlarına yönelimi için kalıp sıcaklığının düşürülmesi gerektiği ortaya çıkmıştır.



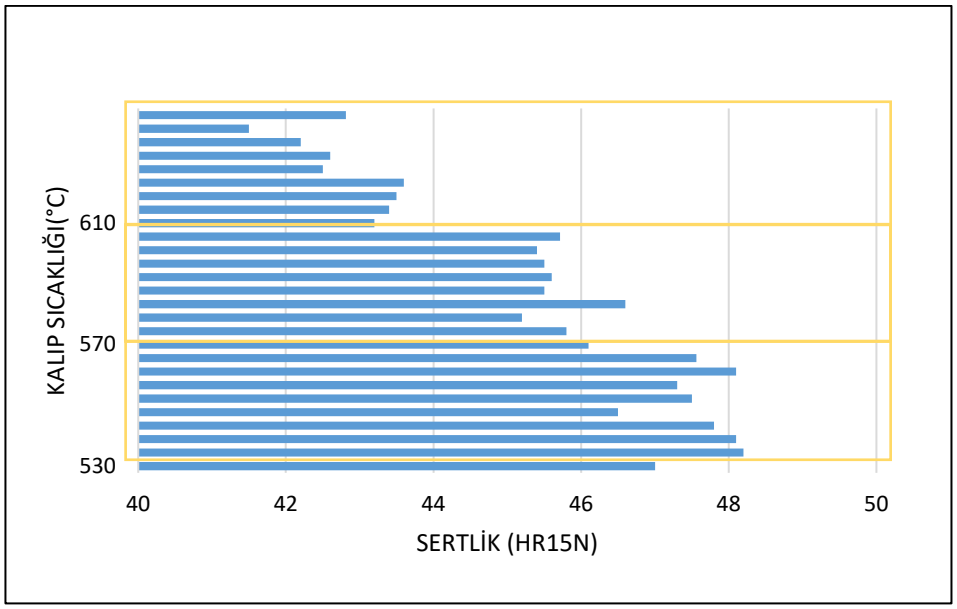
Şekil 4.1. Kalıp Sıcaklığındaki Değişimin Yastıklama Eğrisine Etkisi

Form kalıbı sıcaklığındaki artışla birlikte paralelsizliğin azalma eğilimi gösterdiği, kalınlığın ise arttığı görülmüştür. Bu nedenle kalıp sıcaklığı limitlenmektedir. Paralelsizlik maksimum hedef sınırın üzerinde kalması debriyajdaki ayırma sırasında kalıcı torka neden olabileceği için üretim sırasında kalıp sıcaklığının düşürülmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Kalıp sıcaklığı parametresinin düşürülmesini parça kalınlığı ve sertliği hedef sınırlar dışına yönelim göstermesi limitlemiştir. Kalıp sıcaklığının kalınlık ve paralelsizlik değişimine etkisini gösteren deneysel verilerin sonuçları Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Kalıp Sıcaklığındaki Değişimin Kalınlık ve Paralelsizliğe Etkisi

Parça üzerinde HR15N sertliğinin 40-48 HR15N limit değerleri arasında kalması malzeme tokluğu açısından önemlidir. Bu nedele kalıp sıcaklığı parametresi artırılırken malzemenin sertliği 48 HR15N limit değerin üzerine çıkması parça kırılganlığını artıracağından istenmeyen bir durumdur. Parça sertlik değerleri de kalıp sıcaklığı parametresini limitleyen bir niceliktir.



Şekil 4.3. Kalıp Sıcaklığındaki Değişimin Parça Sertliğine Etkisi

4.2. Sıcak Formlama Prosesinde Formlanan Şarj Adeti Etkisinin İncelenmesi

Sıcak formlama prosesinde çevrim süresi uzun olduğundan parçalar sıcak formlama kalıbına 2-10 adet arasında farklı sayıda paketler halinde yüklenebilirler. Tek seferde formlanan parça sayısı ile parçanın yastıklama rijitliğine, sertliğine, form sonrası kalınlık ve paralelsizliğine etkisi incelenmiştir. Çalışma için üretim sırasında kalıp sıcaklığı, ön ısıtma süresi ve form süresi sabit tutularak parçalar 6'lı, 7'li ve 8'li olacak şekilde formlanmıştır.



Şekil 4.4. Sıcak Form Kalıbına Yüklenen Parçalar

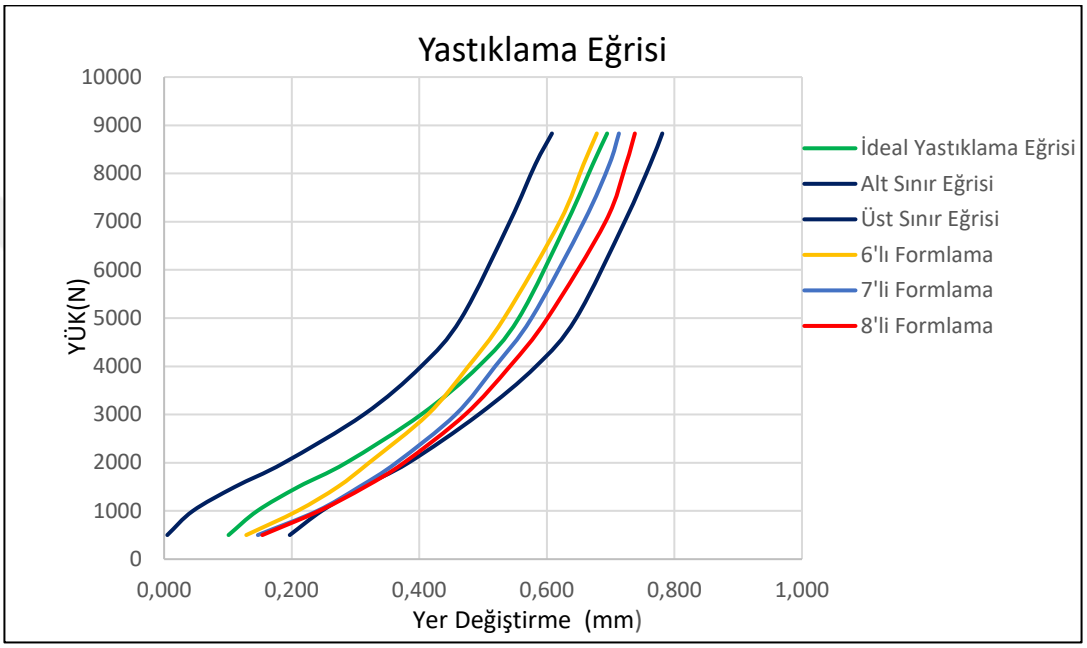
Çizelge 4.4. Formlama Adeti Etkisi Analizinde Kullanılan Proses Parametreleri

Proses Parametreleri		
Şarj Adeti (Adet)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Form Süresi (s)
6	570	110
7	570	110
8	570	110

Çizelge 4.5. Formlanan Parça Adetinin Parça Ölçüm Sonucuna Etkisi

Şarj Adeti	Kalınlık	Paralelsizlik	Yastıklama Yükü(N)										
	8830 N Yük Altında		Sertlik	500	1000	1500	2000	3000	4000	5000	7000	8190	8830
6'lı	1,156	0,032	46,2	0,129	0,209	0,272	0,321	0,413	0,477	0,533	0,620	0,658	0,678
7'li	1,128	0,030	46,4	0,147	0,240	0,306	0,364	0,457	0,519	0,576	0,658	0,698	0,713
8'li	1,097	0,013	47,2	0,154	0,243	0,315	0,376	0,472	0,542	0,601	0,692	0,724	0,738

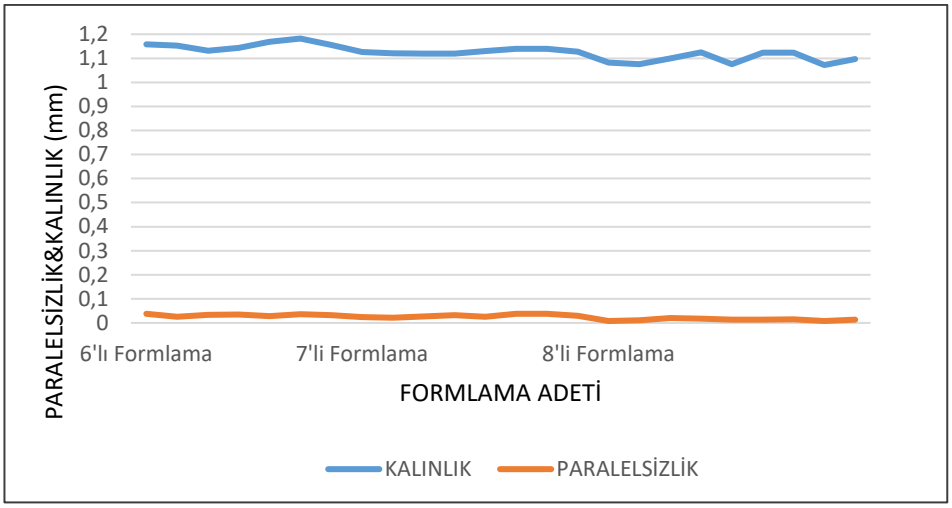
Tek seferde formlanan parça sayısı 6 olduğunda ideal eğriye yakın sonuçlar alınırken şarj adeti arttıkça parçanın yastıklama rijitliğinin üst sınır hedefi dışına doğru yönelim gösterdiği görülmektedir. Buradan yapılabilecek çıkarım ise kalıp aşınması, parça kalınlığının değişmesi gibi şartlar nedeniyle seri üretim sırasında **Şekil 3.2'de** gösterilen yastıklama eğrisindeki B ve D bölgesinden geçen bir eğri oluşmaya başlamışsa şarj adeti düşürüldüğünde konfor eğrisi ideal konfor eğrisine yaklaşacaktır.



Şekil 4.5. Tek Seferde Formlanan Parça Sayısının Yastıklama Eğrisine Etkisi

Şekil 4.8 incelendiğinde, formlama sırasında fırına yüklenen şarj adetinin parça kalınlığı üzerine kalınlığı azaltıcı etki yaptığı görülmektedir. Şarj adeti arttıkça aynı seviyedeki parçalarda kalınlık değeri azalır. Ancak bu etki kalıp sıcaklığı parametresinin parça kalınlığı üzerine yaptığı etkiden daha azdır.

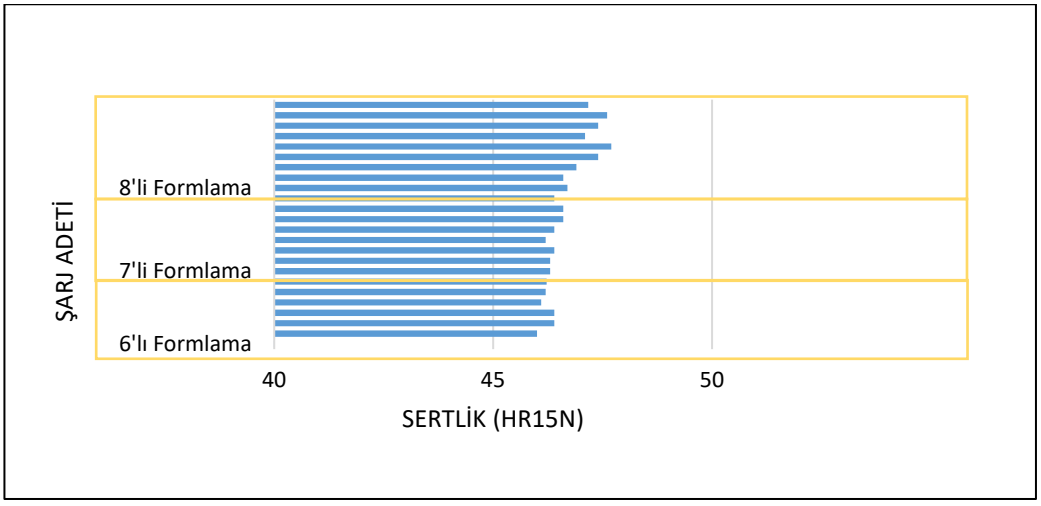
Şarj adetinin artırılması parçalar üzerindeki paralelsizlik değerinde yükseltme yönünde eğilim gösterir. Form kalıbı sıcaklığının arttırılması yeterli gelmiyorsa şarj adeti düşürülerek paralelsizlik sınır değer içerisine alınabilir.



Şekil 4.6. Tek Seferde Formlanan Parça Sayısının Kalınlık ve Paralelsizliğe Etkisi

Formlanan parça sayısı ile parçanın formlama sonrası kalınlığı arasında ters ilişki olduğu tespit edilmiştir. Parça kalınlığı yüksek gelen üretimlerde sarj adetini artırarak kalınlık düşürülebilir.

Şekil 4.9'da üretilen parçaların HR15N sertlikleri incelendiğinde 8'li formlanan parçalarda 6'lı forma giren parçalardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu sonuç, şarj kalıp sıcaklığının daha fazla arttırılamadığı durumlarda şarj adeti arttırılarak istenen sertlik değerlerine ulaşılabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.7. Tek seferde Formlanan Parça Sayısının Parça Sertliğine Etkisi

4.3. Sıcak Formlama Pres Süresinin Etkisinin İncelenmesi

Yastıklama yayı parçaları 560°C sıcak form kalıbına 7'li şarj adeti ile yüklenip 90-110-130 saniye preslenerek formlanan parçalar üzerinden alınan ölçümler Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Sıcak Formlama Süresi Etkisi Analizinde Kullanılan Proses Parametreleri

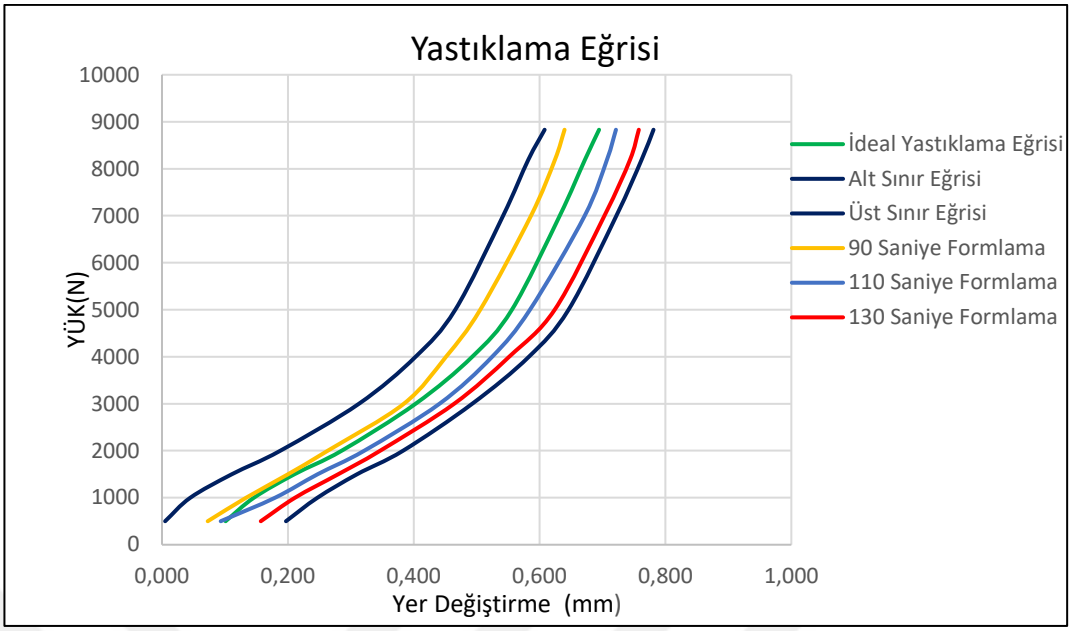
Proses Parametreleri		
Form Süresi (s)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Şarj (Adet)
90	560	7
110	560	7
130	560	7

Çizelge 4.5. Sıcak Formlama Pres Süresinin Parça Ölçüm Sonucuna Etkisi

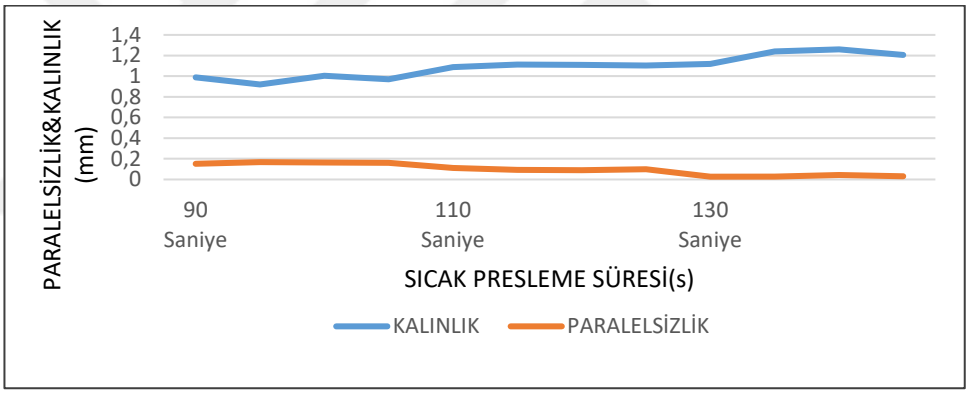
Ön Isıtma Süresi&Pres Süresi	Kalınlık	Paralelsizlik	Yastıklama Yükü(N)										
	8830 N Yük Altında		Sertlik	500	1000	1500	2000	3000	4000	5000	7000	8190	8830
90 Saniye	0,971	0,161	47,5	0,073	0,134	0,200	0,263	0,384	0,451	0,506	0,586	0,624	0,640
110 Saniye	1,104	0,098	45,6	0,093	0,180	0,247	0,321	0,441	0,525	0,585	0,672	0,707	0,721
130 Saniye	1,207	0,032	43,0	0,157	0,211	0,280	0,347	0,464	0,552	0,624	0,703	0,744	0,758

Numuneler üzerinde yapılan yastıklama eğrisi ölçümleri incelendiğinde sıcak formlama prosesinde presleme süresindeki artışın yastıklama rijitliğini arttırıcı etki gösterdiği söylenebilir. 8830N eksenel yük altında 90s preslenen parçalarda eksenel yer değiştirmenin daha az olduğu görülmüştür.

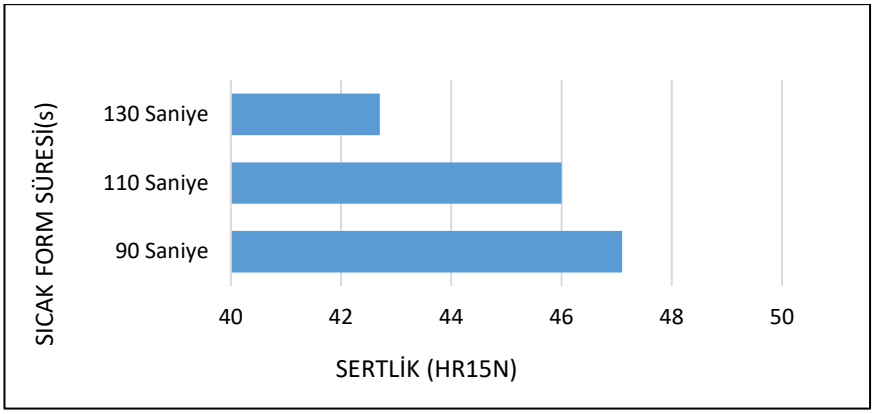
Sıcak formlama pres süresinin artırılması paralelsizliğe pozitif etki ederken kalınlığın artışına neden olduğu için kontrol altında tutulması gerekmektedir. Ayrıca pres süresinin artırılması parça sertliğini azaltacağından çok fazla değiştirilmemesi gereken bir parametredir. Seri üretim sırasında iş çevrim süresini de belirleyen sıcak formlama pres süresi azaltıldığında ise parça sertliği istenilen seviyeye düşürülemeyip, maksimum paralelsizlik değerinin üzerinde parça üretilmesine sebep olabilmektedir.



Şekil 4.8. Sıcak Formlama Pres Süresinin Yastıklama Eğrisine Etkisi



Şekil 4.9. Sıcak Formlama Pres Süresinin Parça Kalınlık ve Paralelsizliğine Etkisi



Şekil 4.10. Sıcak Formlama Pres Süresinin Parça Sertliğine Etkisi

Deneysel çalışması yapılan yastıklama yayının sıcak formlama prosesindeki parametrelerin yastıklama yayının fonksiyonel ve malzeme karakteristiğine etkileri incelendiğinde her bir parametrenin parça üzerindeki fonksiyonunun ve etkisinin sonsuz olmadığı, pozitif etkisinin yanında parçada farklı bir fonksiyon üzerinde ise negatif etkiler oluşturabileceği ve o fonksiyonda istenmeyen limit dışı değerler meydana getirebileceği görülmüştür.

Çizelge 4.6. Proses Parametresinin Parça Fonksiyonu Üzerine Etkisi

	PROSES PARAMETRESİNİN ETKİLEDİĞİ FONKSİYON								
	Sertlik (HR15N)		Kalınlık (mm)		Max Paralelsizlik (mm)	A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi	D Bölgesi
Parametreler	Limit Altında	Limit Üstünde	Limit Altında	Limit Üstünde					
Kalıp Sıcaklığı	1 ↓	1 ↑	1 ↑	1 ↓	1 ↑	2 ↑	2 ↓	1 ↑	1 ↓
Şarj Adeti	2 ↑	2 ↓	2 ↓	2 ↑	3 ↓	1 ↑	1 ↓	2 ↓	2 ↓
Form Süresi	3 ↓	3 ↑	3 ↑	3 ↓	2 ↑	↔	↔	↔	↔

Çizelge 4.6'da, yukarıda yapılan çalışmanın çıktısı olarak proseste kullanılan parametrelerin parça üzerinde kontrol altında tutulması gereken değerlere etkileri ortaya konmuştur. 1-2-3 numaralar, proseste ayarı yapılacak parametrenin öncelik sırasını belirtmektedir. Örneğin, üretim sırasında parça üzerinde ölçülen sertlik değeri limit atnında veya limite yakınsama yapıyorsa ilk olarak kalıp sıcaklığı diğer değerleri limit dışına atmayacak şekilde düşürülmelidir. Ardından istenen sertlik değeri hala yakalanamıyorsa 2. olarak şarj adeti arttırılmalı veya 3. tercih olarak yastıklama yayı sıcak form presleme süresi kısaltılmalıdır. Prosesin amacı, ideal fonksiyonel ölçülerin sağlanması olduğundan proses parametrelerinin Şekil 3.2.'de gösterilen sınır eğrisinde bulunan A-B-C-D bölgeleri içerisinde oluşan eğrileri hangi yönde etkilediği belirtilmiştir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada araçta konfor sağlayıcısı görevinde bulunan debriyaj diski içerisindeki yastıklama yayının üretimindeki sıcak formlama prosesinin deneysel optimizasyonu ile seri üretim şartlarında meydana gelen kalıp aşınması, sac karakteristiği gibi değişkenlik gösteren ve parça üzerinde fonksiyonel etkileri bulunan koşulların proses parametreleri kullanılarak kontrol altında tutulması gerektiği üzerine değerlendirmeler yapılmış ve çıktıları ortaya konulmuştur.

Geometrik tasarımın yanında prosesten gelen etkiler debriyajdaki konfor eğrisini doğrudan değiştirdiğinden, kalıp sıcaklığı, tek seferde formlanacak parça sayısı ve sıcak form presleme zamanı proses parametrelerinde yapılacak doğru ve kritik müdehaleler ideal konfor sınırlarında parça üretimi yapılmasını sağlamış olacaktır.

Literatürde şekil optimizasyonu üzerine yapılan tasarımsal çalışmaların yanında proses üzerinde yapılan bu çalışma destekleyici ve yastıklama yayı üzerine yapılacak gelecekteki çalışmalarda ilham kaynağı olacaktır. Yastıklama yayının debriyaj konforu yanında debriyaj ömrüne de katkı sağlandığı bilinmektedir. Bu çalışmadan yola çıkılarak ileride yastıklamalı yay üretim prosesi etkisinin ömür analizleri ile doğrulanması ile ilgili çalışmaları yapılabilir.

KAYNAKLAR

Cappetti, N., Pisaturo, M. ve Senatore, A. (2012). Cushion spring sensitivity to the temperature rise in automotive dry clutch and effects on the frictional torque characteristic, *Mechanical Testing and Diagnosis : Cilt 3* (s. 28-38).

Zink, M., Hausner, M., Welter, R. ve Shead, R. (2019). The clutch and the releassign of experiments. *IEEE : Cilt 7* (s. 59100-59113). doi: 10.1109/ACCESS.2019.2915280

Cappetti, N., Pisaturo, M. ve Senatore, A. (2012). Modelling the cushion spring characteristic to enhance the automated dry-clutch performance: The temperature effect. Sage Journals. doi: 10.1177/0954407012445967

Kartal, S. (2017). Kavrama Metalik Disk Elemanının Pedal Konforu ve Yorulma Dayanımı Açısından Evrimsel Algoritma ile Tasarım Optimizasyonu ve Prototip Üretimi. Yayımlanmamış yüksek lisans tezi. Uludağ Üniversitesi.

Sfarni, S., Bellenger E., Fortin, J. ve Malley, M. (2009). Finite element analysis of automotive cushion discs, *Thin-Walled Structures : Cilt 47* (s. 474–483). doi: 10.1016/j.tws.2008.08.010

Vasca, F., Iannelli, L., Senatore, A. ve Reale, G. (2011) Torque transmissibility assessment for automotive dry-clutch engagement. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics : Cilt 16* (s. 564–573). doi: 10.1109/TMECH.2010.2047509

Thacker, V., Vijayaragavan, (2018). Design optimization of clutch cushion disc with the integration of finite element analysis and design of experiments. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : Cilt 402* doi: 10.1088/1757-899X/402/1/012053