OTEKON'14
7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi
24-26 Mayıs 2014, BURSA

ARAÇLARIN VİRAJ DENGE ÇUBUĞU BURÇLARINDA SONRADAN YAPIŞTIRMA YÖNTEMİNİN METAL-KAUÇUK BİRLEŞİMİNE ETKİSİ

Ali Kamil Serbest[a], Murat Yazıcı[b*], Ali Bayram[c]

[a] Laspar Angst Pfister A.Ş. [b] Uludağ Ü.Müh. Fak, Otomotiv Müh. Böl. [c] Uludağ Ü. Müh. Fak. Makine Müh. Böl., Nilüfer/Bursa/Türkiye.

ÖZET

Bu çalışmada, metal-kauçuk malzeme çiftinin bir arada kullanıldığı parçaların, fiziksel bağlantısında kullanılacak bir yapıştırma yöntemi geliştirilmiş ve bu yapıştırmaya etki eden parametreleri incelenmiştir. Deney ve araştırmaların yapılabilmesi için pilot uygulama olarak otomotiv sanayide üretilen sistemlerden viraj denge çubuğu (VDÇ) sistemi seçilmiştir. Sistemde bulunan kauçuk burçların tasarlanması için hedef mekanik özellikler belirlenmiş ve bu özelliklere cevap verecek model, sonlu elemanlar yazılımı MSC Marc ve bilgisayar destekli tasarım yazılımı CATIA V5 R19 kullanılarak bir en uygun duruma getirme döngüsü içinde hazırlanmıştır. Tasarlanan modellerin doğrulama işlemi için raydal katılık ölçüm deneyleri ve kopma deneyleri yapılmıştır. Geliştirilen yeni yapıştırma yöntemindeki parametrelerin etkilerinin değerlendirilmesi için Taguchi deney tasarım metodu kullanılarak, doğrulanan modeller üzerinde deneyler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, sonradan yapıştırma yöntemi için parametrelerin kendi aralarındaki etkileşimleri incelenmiş ve en iyi durum ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Kauçuk- metal yapıştırma, vulkanizasyon, viraj denge çubuğu, Taguchi Metodu, Sonlu Elemanlar Yöntemi

An Investigation On Parameters Of Adhession Between Metal-Rubber Material Couple in Post-Bonding Application for Vehicle Anti-Roll Bars Bushes

ABSTRACT

In this study, a new post-bonding application for the parts, which includes bonded rubber-metal components together, has been developed and the parameters of this new post-bonding application has been investigated. To complete the experiments and researches, a sub-system of automobile suspension, which calls anti-roll bar system, has been selected as a pilot application. Mechanical requirements of rubber bushes, which exist in this sub-system, has been determined and according to determined specifications a virtual model has been modeled in an optimization loop between CAD software CATIA V5 R19 and FEA Software MSC Marc. Radial stiffness measurements and tensile tests have been done to verify modeled virtual designs. With the help of Taguchi design of experiments method, an experiment system organized to investigate the bonding parameters of new post-bonding technique. Results are compared to evaluate new post-bonding technique outputs. As a result, the interactions of parameters have been investigated to each other and better cases are selected.

Keywords: Finite Element Analysis, Rubber-Steel Bonding, Vulkanisation, anti-roll bar system, Taguchi Design Of Experiments

*Sorumlu Yazar

1.GİRİŞ

Günümüz otomotiv sanayisinde, kauçuk içerikli bileşenlerden beklenen konfor şartlarının değişmesi, ömür beklentilerinin artması ve kalite standartlarının yükselmesi nedenleriyle, metal-kauçuk malzeme çiftinin kullanıldığı parçalarda tasarım kısıtlarını azaltmak ve mevcut yapıyı iyileştirmek adına farklı üretim metotlarının geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Kauçuk, titreşim konusunun önemli olduğu uygulamalarda en fazla tercih edilen mühendislik malzemesi olarak öne çıkmaktadır. İşlenmemiş kauçuk, elastiklik özelliği zayıf, üzerine uygulanan kuvvetle şekil alan ve kuvvet kaldırıldığında ilk haline dönemeyen bir yapıya sahiptir. 1939 yılında Charles Goodyear, şans eseri kauçuğu sülfür ile pişirmesinin ardından günümüzde kullanılan kauçuk ortaya çıkmıştır. Sülfürle pişirilme işlemine vulkanizasyon denmektedir [1].

Kauçuk parçalar titreşim sönümleme gibi uygulamalarda metal alaşımları, alüminyum ve plastik içeren parçalarla desteklenerek montaja uygunluk ve uzun ömür sağlayacak şekilde tasarlanırlar. Birden fazla mühendislik malzemesi kullanılarak üretilen ve bütünsel olarak tek parça olarak anılan uygulamalarda malzeme çiftini bir arada tutmak için çeşitli fiziksel bağlama yöntemleri kullanılmaktadır. Malzemelerin birbirlerine yapıştırılarak birleştirilmesi bu yöntemlerin başında gelmektedir.

Klasik üretim yöntemi olarak adlandırabilecek yapıştırma uygulamalarında, birleştirilmesi yapılacak olan mühendislik malzemeleri, çeşitli ön işlemlerden sonra vulkanizasyon presleri kullanılarak birleştirilmektedir. Bu aşamada hem kauçuk malzemeye elastiklik özelliği kazandırılmakta, hem de kullanılan malzemelerin birbirlerine yapıştırılması yapılmaktadır.

Kauçuk malzeme ve diğer mühendislik malzemelerinin yapıştırmasıyla ilgili olarak çeşitli araştırmalar ve sanayide hayata geçirilmiş uygulamalar bulunmaktadır. Kauçuk-metal yapışmasının üzerine birçok araştırma yapılmış ve makaleler yayınlanmıştır [2-10] Uygulama bölgelerine göre farklılık gösteren bu yapıştırma teknikleri ile üretimi yapılacak yapıştırmalarda, yapıştırma bölgesi parça boyutuna göre çok küçük olduğu durumlarda bile parçanın vulkanizasyon kalıbı içerisine konmasının gerekir. Bu nedeniyle kalıp ve üretim maliyetleri çok yükselmektedir.

Bu çalışmada metal kauçuk malzeme çiftinin yapıştırılarak birleştirildiği yeni bir yöntem geliştirilmiş ve bu yöntemi etkileyen parametrelerin birbirleri ile olan ilişkileri incelenmiştir. İncelemenin yapılabilmesi için "Araç Viraj Denge Çubukları" pilot uygulama olarak kullanılmıştır. Araç viraj denge çubuklarının araç gövdesine bağlandığı noktalarda kullanılan mevcut kauçuk burçlar, klasik vulkanizasyon ile üretilen ve sonrasında çubuk üzerine çeşitli metal braketler yardımıyla sıkıştırılarak monte edilen titreşim sönümleme elemanlarıdır. Kauçuk ile metal çubuk arasındaki bağlantı sıkıştırma ile sağlanmaktadır. VDÇ sisteminin tamamından beklenen, aracın virajlarda kararlı bir sürüş hareketi sağlamasına yardımcı olurken, tekerleklerin yol üzerindeki hareketi sırasında yoldan gelen titreşimlerin gövdeye iletilmesini engellemeye yardımcı olmaktır [11]. Çalışma kapsamında geliştirilmiş olan sonradan yapıştırma yöntemini kullanılarak üretilen parçalar, en az klasik yöntem kullanılarak üretilen parçalardan elde edilen mekanik özellikleri içermesi gerekmektedir. Ek olarak parça kalitelerinde artış, konfor şartlarında iyileşme, parçanın tasarımı aşamasında ortaya çıkan tasarım kısıtlarında azalma ve maliyet unsurlarında azalma sağlamaktadır. Geliştirilmiş olan üretim yönteminin adı "Sonradan Yapıştırma Yöntemi" olarak ifade edilmektedir. Bu yöntemde montaj gövdeleri ve viraj denge çubuğu burcu klasik yöntemde olduğu gibi ayrı ayrı üretilmiştir. Mevcut üretim yönteminden farklı olarak kauçuk parça, vulkanizasyon sırasında tam pişirilmeden vulkanizasyon işlemi sonlandırılmıştır. Tam pişirilmemiş kauçuk parçanın, viraj denge çubuğu üzerine monte edildiği bölge ile kauçuk parça arasına, yapışma sağlayacak sentetik yapıştırma ajanları uygulanmaktadır. Bu aşamada kauçuk parça, viraj denge çubuğu üzerine monte edilerek montaj gövdeleri ile sabitlenmiştir. Montajı tamamlanan viraj denge çubuğu seti işlem parametreleri belirlenmiş fırınlarda tekrar pişmeye bırakılmıştır. Vulkanizasyonu tamamlanmamış kauçuk parça, bu fırınlama aşamasında pişmesini tamamlarken, aynı zamanda kauçuk ile viraj denge çubuğu arasında kuvvetli bir bağ ile yapışmış olmaktadır. Yapıştırma yönteminde kullanılan üretim parametreleri, kendi aralarında sistemli şekilde değiştirilerek üretim denemeleri yapılmış ve yapışma üzerine olan etkileri araçlarda VDÇ üzerinde incelenmiştir.

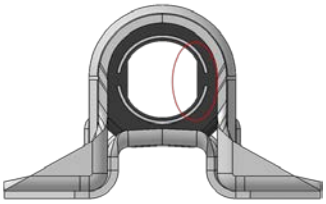
2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Viraj Denge Çubuğu Sistemi

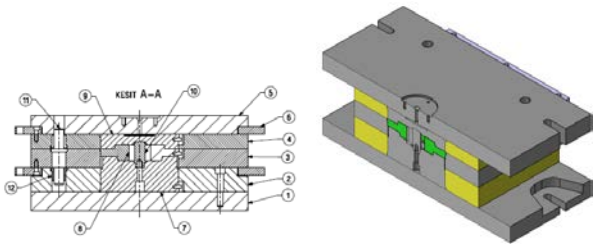
Viraj denge çubuğu sistemi, viraja giren aracın dengeli ve güvenli bir şekilde seyir etmesine yardımcı olur [11]. Çubuğun araç gövdesine bağlanması gerektiği için, yoldan gelen titreşimleri araç gövdesine iletilmesi kaçınılmazdır. Bu titreşimlerin engellenmesi için bağlantı noktalarında kauçuk burçlar kullanılmaktadır. VDÇ olarak isimlendirilen bu parçalardan sürüş sırasında

çubuğu hareketlerine etki edecek bazı mekanik özelliklere sahip olması istenmektedir. Araçtan beklenen konfor ve sürüş beklentilerinin etkilediği bu mekanik özellikler, radyal katılık (N/mm), eksenel katılık (N/mm), burulma katılığı (Nm/°) olarak tanımlanabilirler. VDÇ'nin mevcut üretim ve montaj tekniklerinin ifade edilen mekanik özellikleri verebilmesi için konfor ve sürüş beklentileri göz önüne alınarak burç tasarımları yapılır. VDÇ sisteminde mevcut üretim şartlarında, çubuk ile burç birbirine sürtünmeli temas sağlayacak şekilde monte edilirler. Araç ömrü sırasında gerek burcun eskimesi, gerek ise de tekerleklerden gelecek beklenmedik yüksek yüklemeler sebebiyle, burç ile çubuk arasında bağıl bir kayma oluşur. Bu kayma konfor şartlarını ve sürüş özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Bahsedilen kayma hareketlerini engellemek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Örneğin burcun, çubuk üzerine daha fazla sıkıştırılarak monte edilmesi farklı bir tasarım tekniğidir. Daha fazla sıkıştırmak burç üzerindeki ön gerilmeleri artıracağı için, çalışma sırasında malzemenin fazla ısınmasına sebep olur ve parça ömrünü kısaltıcı etki yapar. Bir diğer teknik ise burç iç geometrisini farklı olarak tasarlamaktır (Şekil 1). Söz konusu fazla ön gerilmeler bu teknikte de mevcuttur ve ek olarak çubuk üzerine de mevcut formun verilmesi gerekliliği sebebiyle fazla üretim maliyetleri getirmektedir. VDÇ burçlarına ait numunelerin üretimi için vulkanizasyon kalıpları tasarlanmış ve üretilmiştir (Şekil 2). Parçaların tasarımında montaj yerlerinin sabit tutulması dikkat edilen unsurlardan bir tanesi olup, montaj yuvası çapı Ø40 mm olarak tayin edilmiştir. Burçlardan beklenen mekanik özellikler aynı olmasına rağmen, kullanılma tekniğinde farklılıklar olduğu için parça geometrileri iki ayrı türde tasarlanmıştır.

VDÇ'yi temsil etmesi için kullanılacak aparatlar olarak, elektrostatik toz boya ile boyanmış Şekil 4'te gösterilen metal çubuklar kullanılmıştır. Sonradan yapıştırma yönteminin yapışma değerleri test etmek için de aynı çubuklar kullanılmıştır.



Şekil 1 Viraj Denge Çubuğu Burcu İç Geometrisi

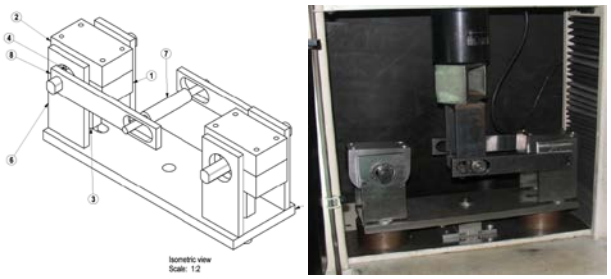


(a) **(b)**

Şekil 2 a) Teknik resimden örnek görüntüler **b)** Vulkanizasyon kalıbı yarı modelin 3D görünüşü

2.2 Test Şartnamesi ve Test Aparatları

Numune parçalar üretildikten sonra belirli şartlara göre test edilerek FEA sonuçlarının doğrulanması gerekmektedir. Parçanın çalışma koşullarını temsil eden aparatlar Şekil 3'te görülmektedir.



(a) (b)

Şekil 3 a) Test Aparatı 2D Model **b)**Üretilmiş Aparat

Taguchi DoE ile yapılacak testlerde kullanılacak ve parçaları sıkıştırmada kullanılacak aparatlar Şekil 4'te gösterilmiştir. Aparatlar, parçaları %5 ve %10 oranlarında sıkıştırmak üzere sırasıyla Ø39,9mm ve Ø37,8mm iç çaplara sahiptirler.

2.3 Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) Analizleri

FEM'nin uygulanabilmesi için geometri, malzeme davranış bilgileri, yükleme ve sınır şartları tespit edilmiştir. Model sonlu sayıda elemana bölünerek, eleman sayısı ve boyutu optimize edilmiştir.



a) b)

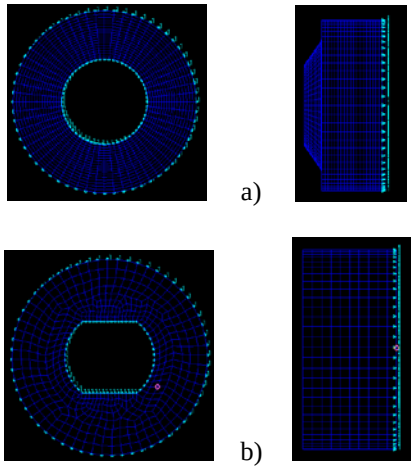
Şekil 4 a) %5 ve %10 Sıkıştırma Aparatları **b)** Sıkıştırma Aparatına Montaj

FEA çözümlerinde oluşturulan elemanların davranışları, girdi olarak yazılıma sağlanacak malzeme mekanik davranış bilgileri ile mümkün olacaktır. Seçilen malzeme modelin ve bu modelin gerektirdiği deneysel sabitlerin doğruluğu sonuca direkt etki eder. Çelik ve alüminyum gibi mühendislik malzemelerin çeşitlik yükleme şartları altında malzeme davranışını gösteren karakteristik sabitler büyük ölçüde literatürden temin edilebilmektedir. Fakat kauçuk gibi üretim reçeteleri üretici firma özel bilgisi olarak korunan ve malzeme testlerinde doğrusal olmayan karakterdeki malzemelerin mekanik özelliklerinin tayininde farklı yöntemler kullanmak gerekmektedir. Bası, çeki ve kesme yönünde uygulanacak yüklemelerle, farklı tiplerdeki numunelerden toplanacak veriler özel yöntemlerle bir araya getirilir ve FEA'da malzeme bilgisi olarak çözüme girdi yapılabilirler [10]. Sistemlerin FEA kullanılarak tasarlanması sırasında, oluşturulan sonlu elemanlara, gerçek çalışma koşullarını temsil eden yük ve sınır şartları uygulanır. Tasarım döngüsünde kullanılan FEA modelleri Şekil 5 a ve b'de görülmektedir. Parçalar simetrik olduğu için yarı simetrik olarak modellenmiştir.

Montajı modellemek için burcun dış çapı Ø40mm yuvaya monte edilir gibi düşünülmüştür. Montaj hareketinden sonra burç içindeki çubuk radyal doğrultuda hareket ettirilerek burcun tepkileri tespit edilmiştir.

2.4 Sonradan Yapıştırma Yöntemi

Sonradan yapıştırma yöntemi olarak tanımlanan yapıştırma tekniğinde, VDÇB'leri vulkanizasyon preslerinden, vulkanizasyon tam olarak bitmeden alınmaktadır. Kauçuk malzemenin elastiklik özelliklerini kazanması için vulkanizasyonun tamamlanması gerekmektedir. Bu sebeple VDÇB'lerin vulkanizasyonun tamamlanması için, çubuk üzerine montajı yapıldıktan sonra belirlenen sıcaklık ve sürede toplu olarak zaman ve sıcaklık ayarlı fırın içinde bekletilmektedir. Bekletilme



a)

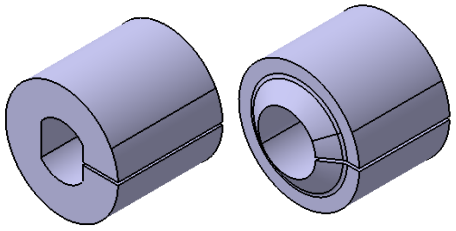
b)

Şekil 5 a) Yapıştırılan Burç FEA Modeli Ön görünüş ve sol Yan Görünüş **b**)Yapıştırılmayan Burç FEA Modeli Ön Görünüş ve sol yan görünüş

işleminden sonra VDÇB'lerin vulkanizasyonu tamamlanmış olur. Burçların istenilen özelliklere eriştiğini ancak radyal katılık testleri sayesinde ortaya konulabilmektedir.

2.5 VDÇB Mekanik Özellikleri ve Karşılaştırma Sistemi Oluşturulması

Yapıştırmanın, bahsedilen problemlerin çözümü olduğunu ortaya koymak amacıyla iki adet VDÇB tasarımı yapılmıştır. Bu modellerden bir tanesi pilot uygulama olarak belirlenen VDÇ'ye yapıştırılmadan (sıkıştırılarak monte edilen) kullanılacak olan kauçuk burç, diğeri ise VDÇ üzerine yapıştırılarak monte edilen yapıya sahip bir burç olarak tasarımı tamamlanmıştır (Şekil 6).Modellenen burçlar aynı mekanik özellikleri göstermesi, fakat yapışma faktörü göz önünde tutularak farklı geometri ve malzeme tiplerine sahip olmaları istenmiştir.



(a) (b)

Şekil 6 Tasarlanan burçlar **a)**Yapıştırılmayan, **b)**Yapıştırılan

Burçların birbirinin aynı mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermek amacıyla, burçların mekanik hedefleri olarak katılık değerleri belirlenmiştir. Burçların tasarım döngüsünde FEM yazılımı olarak MSC Marc, CAD yazılımı olarak CATIA V5 R19 kullanılmıştır. Katılık değeri hedefi olarak piyasada VDÇB'lerin çoğunlukla sahip olduğu değerler incelenmiş ve raydal katılık olarak 1500 N/mm değeri seçilmiştir. Tasarım döngüsünün sonlandırılması ve geometrilerin kesinleştirilmesinde FEA sonuçlarının hedef değere ±%15 tolerans içine girmesi hedefi gözlenmiştir.

2.6 Yapıştırma İşleminde Yapıştırma Ajanlarının Kullanılması

Yapıştırma için kimyasal yapıştırma ajanlarının kullanıldığı yöntemde, yapıştırma katmanının hazırlanmasında çift kat yapıştırıcı uygulaması kullanılmaktadır. Birinci kat (primer) fenolik tabanlı, ikinci kat (seconder) ise polimer çözeltisi ve diğer katkıları içeren yapıştırıcılardır. Yapıştırmada birinci kat yapıştırıcı, metal ile ikinci katı, ikinci kat yapıştırıcı ise birinci kat ile kauçuk hammaddeyi birbirine yapıştırır.
Yapıştırma ajanının seçilmesi kauçuk türüne, kauçuk sertliğine ve diğer tasarım bileşenlerine bağlıdır. Su bazlı ve solvent bazlı olmak üzere iki tip yapıştırma ajanı grubu bulunmaktadır. Uygulama farklılığı olarak su bazlı yapıştırıcı kullanılacaksa birinci kat yapıştırıcı uygulanmadan önce rijit elemanlar 60°C-80°C arasında bir ön ısıtmaya tabi tutulmalı ve ikinci kat yapıştırıcı uygulanmadan önce tekrar ısıtılmalıdırlar. Su bazlı yapıştırıcının kuruma süresi çok kısadır ve seri üretim için bir engel teşkil etmemektedir.

Rijit elemanın seçilmesi tasarımcının istediği şartları sağlaması koşuluna bağlıdır. Genellikle çelik alaşımlar kullanılır. Fakat günümüzde parça ağırlıkları az enerji kullanımına imkân sağladığı için önemli bir faktör konumuna geldiğinden, alüminyum alaşımlar ve polyamid gibi malzemeler de kullanılmaya başlanmıştır. Uygun şartların sağlanması koşuluyla her türlü malzeme kauçuk ile yapıştırılabilir.

2.7 Sonradan Yapıştırma Parametreleri

Kauçuk hammaddesinin elastiklik özelliğini kazanabilmesi için sıcaklık, vulkanizasyon süresi ve basınç temel değişkenlerdir. Sonradan yapıştırma yöntemi olarak geliştirilen yöntemde yer alan vulkanizasyonu sonradan tamamlayarak, yapışmanın vulkanizasyondan sonra yapılması hedeflendiği için vulkanizasyon süresinden türetilen pişme oranı ve cure süresi parametreleri ek olarak araştırma parametrelerine eklenmiştir. Özetle araştırma parametreleri olarak seçilen dört parametre şöyledir;

a) Sıkışma Oranı (Yüzeyler arası normal gerilme/Basınç)
b) Pişme Oranı (Vulkanizasyon Süresi)
c) Cure Süresi
d) Cure Sıcaklığı

2.8 Taguchi Deney Tasarımı Metodu (DoE)

Parametrelerin sonuca etkilerini klasik yöntemlerle incelemeye çalıştığımızda çok sayıda deney yapılması gerekmektedir. Çok sayıda deneyin yapılması maliyetin yanında zamanında israfına sebebiyet vermektedir. Taguchi DoE metodunda bu deney sayıları, parametrelerin arasında çapraz olarak etkileşimler oluşturarak azaltılmış ve sonuca daha verimli şekilde ulaşılması sağlanmıştır. Yapılan çalışmada araştırma parametreleri olarak belirlenen "Sıkıştırma oranı, Pişme Oranı, Cure Süresi, Cure Sıcaklığı" değişkenleri deney metodu kapsamında faktör olarak isimlendirilmiştir. Her faktörün kendi içinde iki seviyesi bulunmaktadır. Deneylerde kullanılan faktör ve seviyeler Tablo 1'de verilmiştir. Sonuç olarak elde edilecek değer ise "Yapışma Kuvveti" dir. Taguchi DoE'de dört faktörlü ve iki seviyeli bir deney tasarlamak için L16 ortogonal tablolar kullanılmalıdır. Bu tabloya bağlı olarak 16 adet deneyle parametrelerin etkileşimleri incelenmiştir. Tasarlanan deneyler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1 Faktör ve Seviyeler

FAKTÖR	Parametreler	Seviye 1	Seviye 2
A	Sıkıştırma Oranı	5%	10%
B	Pişme Oranı	80%	90%
C	Cure Süresi	2 saat	3 saat
D	Cure Sıcaklığı	170°C	180°C
Sonuç	Yapışma Kuvveti		

Tablo 2 Deney Listesi

Deney	Tekrar
%5 Sıkıştırma %80 pişme 2 Saat süreyle 170 °C de	2
%5 Sıkıştırma %80 pişme 2 Saat süreyle 180 °C de	2
%5 Sıkıştırma %90 pişme 3 Saat süreyle 170 °C de	2
%5 Sıkıştırma %90 pişme 3 Saat süreyle 180 °C de	2
%10 Sıkıştırma %80 pişme 3 Saat süreyle 170 °C de	2
%10 Sıkıştırma %80 pişme 3 Saat süreyle 180 °C de	2
%10 Sıkıştırma %90 pişme 2 Saat süreyle 170 °C de	2
%10 Sıkıştırma %90 pişme 2 Saat süreyle 180 °C de	2

2.9 Yapışma Testi

Yapışma fiziksel birleştirme işleminin en iyi tespiti yapışma testi ile yapılmaktadır. Yapışma sonucunda kopma yüzeylerinin en az %80 nin kauçuk-kauçuk kopması olması beklenmektedir. Test sonucunda kalitenin karşılaştırılması için kopma testinde okunan en yüksek kuvvet değerleri Taguchi metodu kullanılarak

değerlendirilmiştir. Yapışmanın en az vulkanizasyonda yapılan yapıştırmalar kadar kuvvetli olduğunu göstermek için vulkanizasyon preslerinde yapıştırılmış test numunesi Şekil 7'de gösterilmiştir. Yapışma testleri Shimadzu 100kN universal test cihazında yapılmıştır. Test düzeneği Şekil 8'de gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil 7 Vulkanizasyonda Yapıştırılmış Numune



Şekil 8 Yapışma Testi Düzeneği

3 BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1 Sonlu Elemanlar Analizi

Yapışmanın VDÇ sisteminde faydalarını ortaya koymak için izlenen yöntem sonucunda öncelikle FEA ve CAD yazılımı kullanılarak bir tasarım döngüsü oluşturulmuş ve tasarım hedefi olarak belirlenen 1500N/mm radyal katılık değerleri ±%15 tolerans değerine erişildiğinde iki adet burcun tasarımı tamamlanmıştır. Tablo 3'de FEA sonuçları göstermektedir.

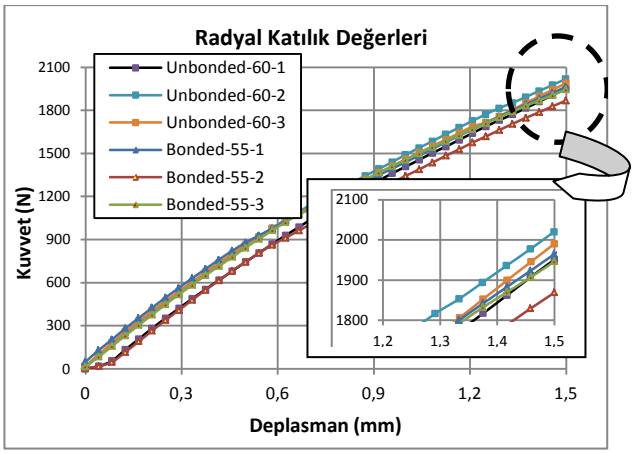
Tablo 3 Tasarım Döngüsü FEA Sonuçları

VDÇB Tipi	FEA Sonucu (N/mm)	Hedeften Sapma (%)	Kauçuk Sertliği (ShA)
Yapıştırılmayan	1603,77	+6,90	60
Yapıştırılan	1498,22	-0,10	55

Her iki tip burcun FEA ile yapılan radyal test modellinden elde edilen sonuçların tolerans içinde olduğu görülmektedir.

3.2 Radyal Testler

Test numunelerinin tasarım döngüsünün tamamlandığını gösteren sonuçlar, üretimi yapılan numunelerin radyal testlerinin yapılarak elde edilen sonuçlardır (Şekil 9). Test sonuçları analiz sonuçlarıyla karşılaştırıldığında sonuçlar istenilen tolerans içinde kaldığında döngü sonlandırılmış olmuştur.



Şekil 9 Yapıştırılan ve Yapıştırılmayan Numune Radyal Test Sonuçları

Tablo 4 Yapıştırılan numuneler Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması

Yapıştırılan Numune Test Sonuçları	FEA	Hedef Değer	FEA Sapma
1555,54 N/mm 1642,23 N/mm 1602,77 N/mm Ort : 1600,18 N/mm	1603,77 N/mm	1500 N/mm	%6,9

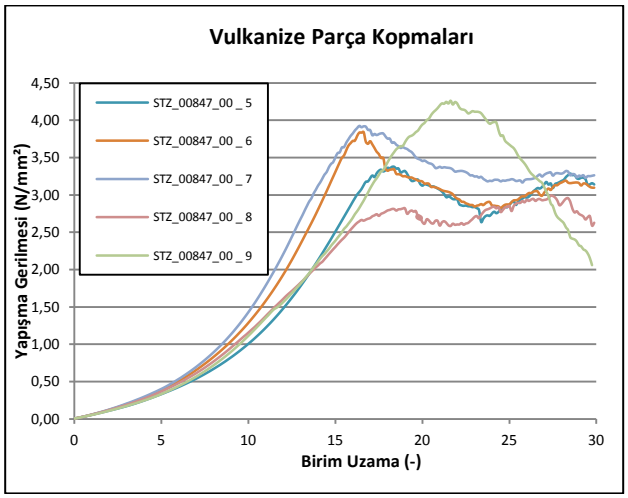
Tablo 5 Yapıştırılmayan numuneler Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması

Yapıştırılmayan Numune Test Sonuçları	FEA	Hedef Değer	FEA Sapma
1584,65 N/mm 1590,10 N/mm 1576,31 N/mm Ort: 1583,31 N/mm	1498,22 N/mm	1500 N/mm	%0,12

Tablo 4 ve 5'de görülen sonuçlar karşılaştırıldığında test ve FEA sonuçlarının tolerans dâhilinde olduğu ve kendi aralarında da tutarlı olduğu gözlemlenerek tasarım döngüsü sonlandırılmıştır.

3.3. Vulkanizasyon Presinde Yapılan Yapıştırma Sonuçları

Sonradan yapıştırma yöntemi ile yapılacak yapıştırmanın en az vulkanizasyon preslerinde yapılan yapıştırma kadar iyi sonuç verdiğini göstermek amacıyla, preslerde yapıştırılan numunelere yapışma testi uygulanmıştır. Yapışma testi sonuçları Şekil 10'da gösterilmiştir. Bulunan en yüksek kopma gerilmesi 4,25 N/mm² olarak ölçülmüştür. Test sonuçları sonradan yapıştırma yöntemi ile yapıştırılan numuneler ile karşılaştırılarak yapışmanın yeterliliği gösterilmiştir. Şekil 11'de yapışma testi sonrası bir numune gösterilmiştir.



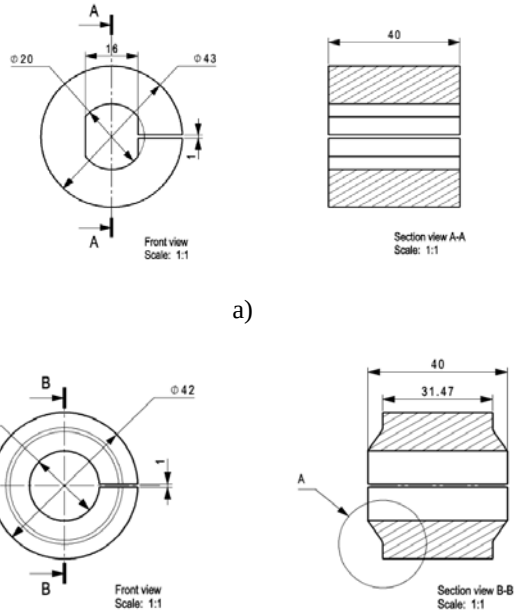
Şekil 10 Vulkanize Parça Yapışma Testi Sonuçları



Şekil 11 Yapışma Testinden Çıkmış Numune

3.4 Tasarlanan Burçlar Arasındaki Farklılıklar

Her iki burcun monte edileceği yuva çapı Ø40 mm olarak belirlenmiştir. VDÇ sistemlerinde çubuk ile burcun iç yüzeyleri arasında oluşabilecek kayma, aracın çalışması sırasında rahatsız edici sesler çıkarmasının yanında, kayma sırasında sürtünmeden dolayı oluşacak sıcaklık yükselmesi gibi durumlar kauçuk ömrünü olumsuz etkileyecektir. Bu kayma hareketinin engellenmesi için,



Şekil 12 a) Yapıştırılmadan Monte Edilen Burç **b)** Yapıştırılarak Monte Edilen Burç

montaj sırasında kauçuk malzemeyi daha fazla sıkıştırmak ve bu sıkıştırmanın yanında çoğunlukla burç iç geometrisinde değişiklikler yapmak gerekmektedir. Teknik resimler incelendiğinde ilk fark olarak dış çaplar görülmektedir. Ø42 mm ve Ø43 mm olarak tasarlanan dış çap ölçüleri, montaj sırasındaki sıkışmayı göstermektedir. Resim üzerinde geometriler incelendiğinde görülebileceği gibi yapıştırılmadan üretilen burcun içerisine burulma eksenindeki hareket sırasında burç ile çubuğun arasında kayma neticesinde oluşacak sesleri engellemek amacıyla, bir koza deliği şekli modellenmiştir (Şekil 12a). Bu koza şekli aynı zamanda çubuk üzerine de işlenmelidir. Bu işlemler hem burç hem de metal çubuk için ek bir maliyet getirmektedir. Yapıştırılarak üretilen numunede (Şekil 12 b) bu ek işlem söz konusu değildir. Yapıştırılmadan üretilen burcun sertliği 60 ShA, yapıştırılarak üretilen burcun sertliği 55 ShA olarak ölçülmüştür. Yapıştırılmadan monte edilecek burçta kullanılan hamurun sertliği daha yüksek olduğu için maliyeti de daha yüksektir.

Montaj yeri düşünüldüğünde, yapıştırılmadan üretilen burç daha fazla ön gerilmeye maruz bırakılarak yerine monte edileceği için, montajda kullanılacak sac braketlerin kalınlıkları veya çelik kalitesi de farklı olacaktır. Bu da maliyeti etkileyen bir diğer unsurdur.

Burç ağırlıkları karşılaştırıldığında yapıştırılmadan üretilen burç 55,5 gr, yapıştırılarak üretilen burç 42 gr olarak görülmektedir. %24,32 oranındaki ağırlık farkı maliyet açısından da fark doğurmaktadır.

Yapıştırılarak üretilen burç, vulkanizasyon sonrasında tekrar yüksek sıcaklık altında fırınlanarak bekletileceği için ek bir maliyet ortaya çıkaracağı düşünülebilir. Ancak yapıştırılarak üretilecek burcun vulkanizasyon süresi daha kısa olacağı ve aynı anda bir fırında çok sayıda burç fırınlanabileceği için bu maliyet unsuru ortadan kalktığı görülmektedir.

Yapıştırılmadan üretilen burcun tasarımı ve analiz süreleri burç ile metal çubuk arasında meydana gelecek kayma durumunu içerdiği için yaklaşık %25 daha uzun sürmektedir. Bu süre farkı tasarım personel maliyeti ve bilgisayar kaynaklarının maliyetinin artmasına sebep olmaktadır.

3.5 Vulkanizasyonun Tamamlanmasının Kontrolü

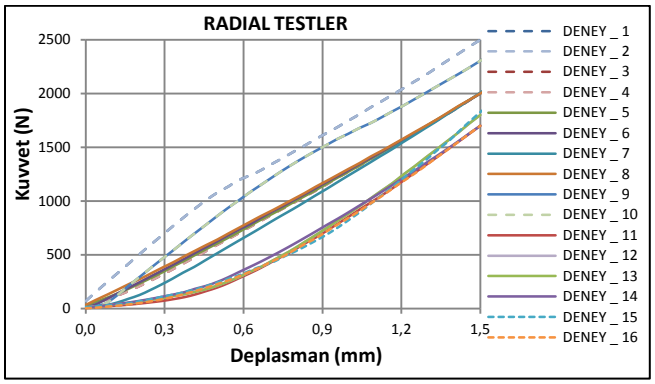
Şekil 11'de gösterilen VDÇB modeli kullanılarak deneylerde kullanılmak üzere, Tablo 2'de gösterilen deney koşullarını sağlayan 16 adet burç üretilmiştir. Üretilen burçlar cure fırınlarında bekletilmesi sonucunda deney numuneleri test edilecek hale getirilmiştir. Testlerden önce tespit edilen cure süresi ve cure sıcaklığı parametrelerin vulkanizasyonu tamamlayıp tamamlamadığı radyal testlerle kontrol edilmiştir. Radyal test sonuçları Şekil 13 ve Tablo 6'da gösterilmiştir. Test sonuçları istenilen %15 tolerans dâhilinde olduğu için vulkanizasyonun tamamlandığı görülmüştür.

Tablo 6 Vulkanizasyon Kontrolü Radyal Test Sonuçları

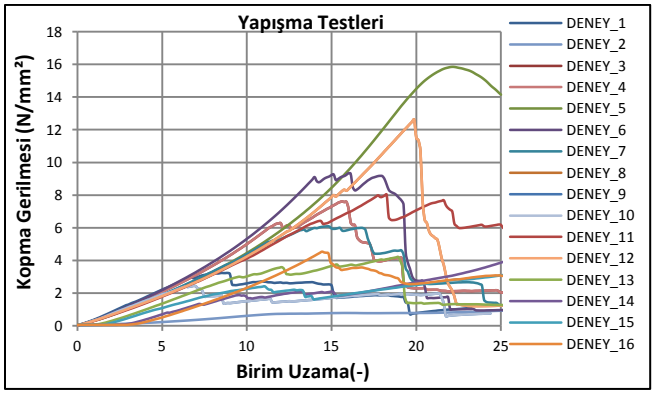
Deney No	Radyal Katılık (N/mm)	Deney No	Radyal Katılık (N/mm)
Deney 1	1396,11	Deney 9	1308,13
Deney 2	1384,48	Deney 10	1320,52
Deney 3	1381,45	Deney 11	1496,35
Deney 4	1395,84	Deney 12	1501,52
Deney 5	1370,22	Deney 13	1582,96
Deney 6	1337,90	Deney 14	1426,18
Deney 7	1486,58	Deney 15	1384,76
Deney 8	1347,85	Deney 16	1464,72

3.6 Yapışma Testleri ve DoE

Vulkanizasyonun tamamlandığı ve numunelerin sağlıklı bir şekilde üretildiği ortaya konulduktan sonra yapışma deneyleri yapılmış ve sonuçlar L16 ortogonal tabloya aktarılmıştır. Yapışma deney sonuçları Şekil 14 te gösterilmiştir.

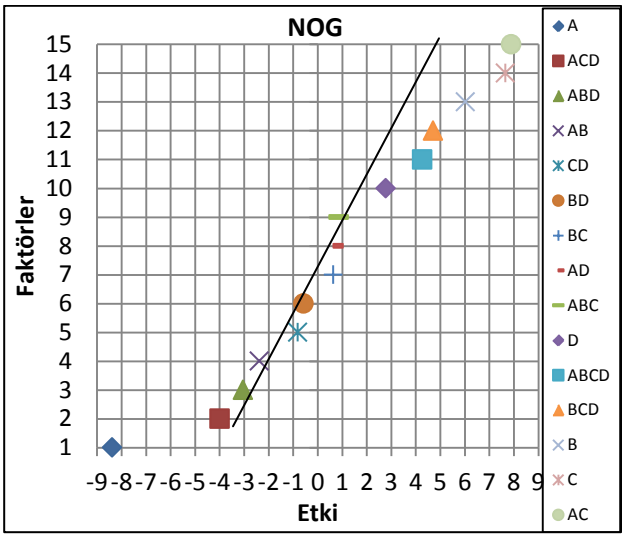


Şekil 13 Vulkanizasyon Kontrolü Radyal Test Sonuçları

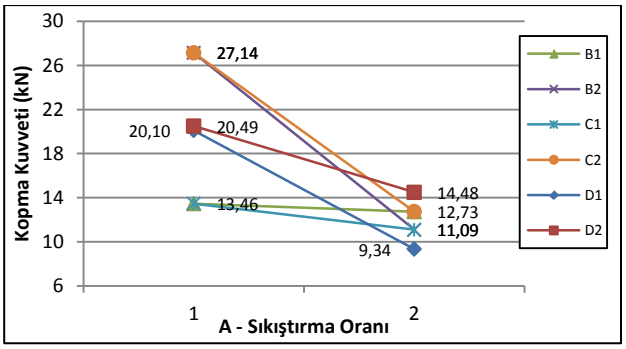


Şekil 14 Yapışma Testi Sonuçları

Yapışma testlerinin L16 ortogonal tabloya yerleştirilmesinden sonra faktörlerin etkileri hesaplanmıştır. Hesaplanan etkiler küçükten büyüğe doğru olmak üzere 1 den 15 e kadar numaralandırılmış ve Şekil 14'de gösterilen NOG a işlenmiştir. Taguchi metodunda faktörlerin etkilerinin değerlendirilmesi için NOG de merkez değerlerden en az üç tanesine yakın geçecek şekilde konumlandırılan ve merkez eğilim çizgisi olarak isimlendirilen bir çizgi oluşturulur. Etkilerin oluşturulan çizgiye normal uzaklıkları en fazla olan faktörler, sonuç değerine en fazla etki eden faktörleri göstermektedir. Fakat bu çalışmada faktörlerin her birinin etkilerini inceleme hedeflendiği için normal uzaklıkları en büyük olanlar değil tüm faktörlerin birbiri arasında etkileşimi incelenmiştir.



Şekil 15 Normal Olasılık Grafiği



Şekil 16 A parametresine göre B, C, D parametreleri değişimleri

Tablo 7 Sıkıştırma Oranı (A) – Pişme Oranı (B) Etkileşimi

	B1				B2			
A1	8,00	10,00	18,83	17,00	39,20	23,22	15,05	31,09
	13,46				27,14			
A2	6,07	7,00	19,87	18,00	10,45	13,84	8,85	11,22
	12,73				11,09			

Faktörlere ait etkiler L16 ortogonal tablosu vasıtasıyla elde edildikten sonra ana faktörlerin çapraz eşleşmesi çizelgeler haline getirilerek incelenmişlerdir.

Tablo 7 ve Şekil 16'de verilen Sıkıştırma oranı ve Pişme oranı parametrelerinin etkileşimi görülmektedir. Pişme oranı %90 olarak alınıp, sıkıştırma oranı %5 ten %10 a yükseltildiğinde yapışma kuvvetlerinde değişim olmadığı söylenebilir. Pişme Oranı %80 olarak alınıp, sıkıştırma oranı %5 ten %10 a yükseltildiğinde yapışma kuvvetinde kaydadeğer bir düşüş gözlenmektedir. Cure sıcaklığı ve süresi sabit tutulup sadece pişme oranı ve sıkıştırma oranı arasında optimizasyon yapmak gerekirse "Düşük pişme oranı" ve "Düşük Sıkıştırma Oranı" en iyi sonucu vermektedir.

Tablo 8 Sıkıştırma Oranı (A)-Cure Süresi (C) Etkileşimi

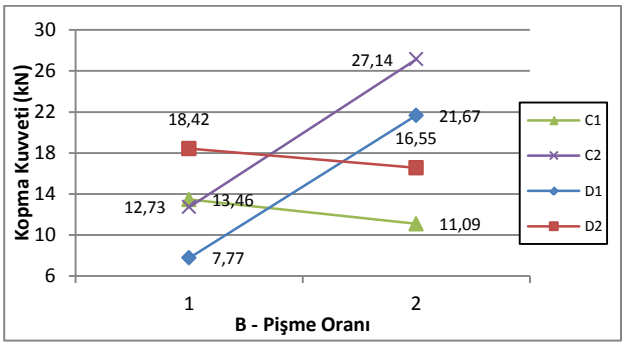
	C1				C2			
A1	8,00	10,00	18,83	17,00	39,20	23,22	15,05	31,09
	13,46				27,14			
A2	10,45	13,84	8,85	11,22	6,07	7,00	19,87	18,00
	11,09				12,73			

Cure süresi 2 saat olarak alınıp, sıkıştırma oranı %5 ten %10 a yükseltildiğinde yapışma kuvvetlerinde düşük eğimli bir azalma olduğu söylenebilir. Cure süresi 3 saat olarak alınıp, sıkıştırma oranı %5 ten %10 a yükseltildiğinde yapışma kuvvetinde kaydadeğer bir düşüş gözlenmektedir. Pişme Oranı ve cure sıcaklığı seviyeleri sabit tutulup sadece "Cure süresi" ve "sıkıştırma oranı" arasında optimizasyon yapmak gerekirse "Yüksek cure süresi" ve "Düşük Sıkıştırma Oranı" en iyi sonucu vermektedir (Tablo 8).

Tablo 9 Sıkıştırma Oranı (A)-Cure Sıcaklığı (D) Etkileşimi

	D1				D2			
A1	8,00	10,0	39,20	23,22	18,83	17,00	15,05	31,09
	20,10				20,49			
A2	6,07	7,0	10,45	13,84	19,87	18,00	8,85	11,22
	9,34				14,48			

Cure sıcaklığı 170°C ya da 180°C olarak alınıp, sıkıştırma oranı %5 ten %10 a yükseltildiğinde yapışma kuvvetlerinin her ikisinde de yüksek eğimli bir azalma olduğu söylenebilir. Pişme Oranı ve cure süresi seviyeleri sabit tutulup sadece "Cure sıcaklığı" ve "sıkıştırma oranı" arasında optimizasyon yapmak gerekirse "Yüksek cure sıcaklığı" ve "Düşük Sıkıştırma Oranı" en iyi sonucu vermektedir (Tablo 9).



Şekil 17 B parametresine göre C, D parametreleri değişimleri

Tablo 10 Pişme Oranı (B) - Cure Süresi (C) Etkileşimi

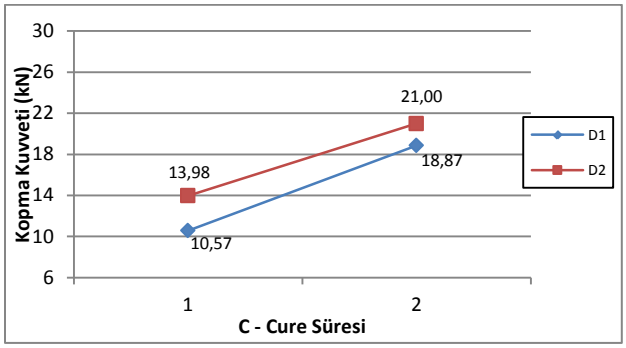
	C1				C2			
B1	8,00	10,00	18,83	17,00	6,07	7,00	19,87	18,00
	13,46				12,73			
B2	10,45	13,84	8,85	11,22	39,20	23,22	15,05	31,09
	11,09				27,14			

Şekil 17 ve Tablo 10 ve 11'de pişme oranına bağlı olarak cure süresi ve sıcaklığının etkileşimleri verilmektedir. Cure süresi 2 saat olarak alınıp, pişme oranı %80 den %90 a yükseltildiğinde yapışma kuvvetlerinde yüksek eğimli bir artma gözlemlenmektedir. Cure Süresi 3 saat olarak alınıp, pişme oranı %80 den %90 a yükseltildiğinde yapışma kuvvetinde düşüş gözlenmektedir. "Sıkıştırma Oranı" ve "Cure Sıcaklığı" sabit tutulup sadece "Cure süresi" ve "Pişme Oranı" arasında optimizasyon yapmak gerekirse "Yüksek cure süresi" ve "Yüksek Pişme Oranı" en iyi sonucu vermektedir.

Tablo 11 Pişme Oranı (B) - Cure Sıcaklığı (D) Etkileşimi

	D1				D2			
B1	8,00	10,00	6,07	7,00	18,83	17,00	19,87	18,00
	7,77				18,42			
B2	39,20	23,22	10,45	13,84	15,05	31,09	8,85	11,22
	21,67				16,55			

Cure sıcaklığı 170°C olarak alınıp, pişme oranı %80 den %90 a yükseltildiğinde yapışma kuvvetlerinde yüksek eğimli bir artma olduğu söylenebilir. Cure sıcaklığı 180°C olarak alınıp, pişme oranı %80 den %90 a yükseltildiğinde yapışma kuvvetinde düşük eğimli azalma gözlenmektedir. "Sıkıştırma Oranı" ve "Cure Süresi" seviyeleri sabit tutulup sadece "Cure Sıcaklığı" ve "Pişme Oranı" arasında optimizasyon yapmak gerekirse "Düşük Cure Süresi" ve "Yüksek Pişme Oranı" en iyi sonucu vermektedir (Tablo 11).



Şekil 18 C parametresine göre D parametresi değişimleri

Tabo 12 Cure Sıcaklığı (C) - Cure Süresi (D) Etkileşimi

	D1				D2			
C1	8,00	10,00	10,45	13,84	18,83	17,00	8,85	11,22
	10,57				13,98			
C2	39,20	23,22	6,07	7,00	15,05	31,09	19,87	18,00
	18,87				21,00			

Şekil 18 ve Tablo 12'de Cure Sıcaklığı ve Cure süresi etkileşimi verilmektedir. Cure sıcaklığı 170°C ya da 180°C olarak alınıp, Cure süresi 2 saat ten 3 saate yükseltildiğinde yapışma kuvvetlerinin her ikisinde de düşük eğimli bir artma olduğu söylenebilir. Parametreler kendi aralarında paralel bir değişim ortaya koymaktadırlar. "Sıkıştırma Oranı" ve "Pişme Oranı" sabit tutulup sadece "Cure Süresi" ve "Cure Sıcaklığı" arasında optimizasyon yapmak gerekirse "Yüksek Cure Süresi" ve "Yüksek Cure Sıcaklığı" en iyi sonucu vermektedir.

Yapılan 16 adet deney incelendiğinde 8 adet parametre kombinasyonu kullanıldığı görülmektedir. Örnek olarak 1 nolu ve 2 nolu deneylerin parametreleri aynıdır. Olası ölçüm hatalarını ortadan kaldırmak adına, yapılan iki adet aynı parametreye sahip deneyin kopma kuvveti sonuçlarının ortalamasını alınmıştır. Çıkan sonuçlara göre aşağıdaki sıralama elde edilmiştir.

1) A1, B2, C2, D1 2) A1, B2, C2, D2
3) A2, B1, C2, D2 4) A1, B2, C1, D2
5) A2, B2, C1, D1 6) A2, B2, C1, D2
7) A1, B1, C1, D1 8) A2, B1, C2, D1

(Örnek: A1, Sıkıştırma Oranı faktörü 1. Seviye olan %5 sıkıştırmayı temsil etmektedir)

SONUÇ

Büyük hacimli ve kauçuk metal malzeme çiftinin bir arada kullanıldığı parçaların üretiminde eğer kalite iyileştirmesi için metal kauçuk arasında bir fiziksel bağlantı gerekiyorsa ve bu bağlantı bölgesi küçük bir bölgede olması isteniyorsa sonradan yapıştırma yöntemi, maliyet, uygulanabilirlik ve kalite açısından avantajlı bir üretim tekniği olarak kullanılabilir.

Sonradan yapıştırma işlemine etki eden dört parametrenin kendi aralarında yapışma üzerine etkileri incelendiğinde en etkin parametre olarak Sıkıştırma Oranı (A) faktörü görülmektedir. Fakat yapışma kuvvetine etki eden en etkin faktör değil de dört adet parametrenin optimize edilmiş bileşeni değerlendirilirse düşük sıkıştırma oranı (A %5), yüksek pişme oranı (B %90), yüksek cure süresi (C 3 saat) ve düşük cure sıcaklığı (D 170°C) parametre bileşimi en iyi yapışma sonucunu temsil etmektedir.

Sonradan yapıştırma yöntemi, uygulamanın incelendiği VDÇ sistemlerinde parça kalitesini artırırken parça ömrüne de olumlu etki ettiği çıkarımı yapılabilir.

Sonradan yapıştırma yöntemi VDÇ sistemlerinde üretim maliyet ve sürelerini düşürücü yönde etki yaparken parça kalitesinde yükselme sağlamıştır.

TEŞEKKÜR:

Bu çalışmanın finansman desteği, LASPAR Angst Pfister Endüstriyel Çözümler A.Ş Bursa ve Bilim Sanayi Bakanlığı SANTEZ Programı 00847-STZ.2011-1 nolu projesi kapsamında sağlanmıştır. Desteklerinden dolayı kurumlarımıza teşekkür ederiz. Bu çalışma birinci yazarın 19/02/2013 tarihinde Uludağ Üniv. Fen Bil. Enst.'de kabul edilen yüksek lisans tezinin bir bölümüdür.

KAYNAKLAR

1) Slack, Charles. 2002. Noble Obsession: Charles Goodyear, Thomas Hancock and the Race to Unlock the Greatest Industrial Secret of the Nineteenth Century. Hyperion, Michigan Üniversitesi, 274s.

2) Hubbard, J. K. ve Koontz, F. H. 1959. 2905585 US Patent.

3) Bork, P.G. ve Roush, C.W. 1964. Vulcanization of Elastomers. Reinhold publishing Corp., Editörler: Alliger, G. ve Sjothun, I.J., New York, 366s.

4) Buchan, S. 1959. Rubber to Metal Bonding. Crosby Lockwood & Son, Newyork, 300s.

5) DeCrease, W.M. 1960., Rubber Age, Vol. 1013, s.80

6) Jazenski, P.J. ve Manino, L.G. 1978. Lord Corporation. 4119587 US Patent.

7) Elliot, D.J. 1979. Development in Rubber Technology-1.Applied Science Publishers, Editörler: Whelan, A. Ve Lee, K.S., London, s.1-44

8) Tarhini A., Hamade R.F. 2012 .Numerical simulations of the cathodic delamination of adhesive bonded rubber/steel joints. International Journal of Adhesion & Adhesives, 35,108–113.

9) Nakache M., Aragon E., Belec,L., Perrina F.X., Roux G., Le Gac P.Y. 2011 "Degradation of rubber to metals bonds during its cathodic delamination, validation of an artificial ageing test" Progress in Organic Coatings, 72 (3);279–286

10) Kayacı, S., Cevher, M., Eşiyok, Y.E. Experimental investigation on the dynamic modulus change of Natural Rubber under principal loading modes and different dynamic conditions. MSC User Conference, 2011. İstanbul

11) Theriault, Mario. 2001. Great Maritime Inventions 1833-1950. Goose Lane Editions, 94s.