



Process optimisation of HMDSO polymerisation in PVD vacuum medium by numerical analysis for automotive industry

İbrahim Emrah Sözer^{1*}, Serkan Geçim², Gökmen Kıdık³, Mustafa Cemal Çakır¹

¹Department of Mechanical Engineering, Uludağ University, Bursa, 16059, Turkey

²Department of Chemical Engineering, Bursa Technical University, Bursa, 16330, Turkey

³Department of Mechanical Engineering, İstanbul Technical University, İstanbul, 34467, Turkey

Highlights:

- HMDSO monomer salınım sisteminin numerik analizi,
- CFD simülasyonuna deneysel yaklaşım,
- PVD HMDSO polimerizasyonu için proses parametre optimizasyonu.

Keywords:

- PVD
- Physical Vapor Deposition
- HMDSO Polymerization
- Thin Film Layer
- Metallization

Article Info:

Research Article

Received: 06.12.2019

Accepted: 25.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.656258

Correspondence:

Author: İbrahim Emrah Sözer

e-mail:

ibrahimemrahsozer@gmail.com

phone: +90 535 747 7251

Graphical/Tabular Abstract

In this study, HMDSO monomer releasing system that is used to form a protective film layer on the automotive headlight reflective surfaces in the PVD coating processes, has been optimized to equally distribute through the releasing pipeline in vacuum condition by using finite volumes method. In addition, for uniform distribution of the HMDSO monomer release before polymerization into the vacuum medium, the substrate's jig rotation mechanics were analyzed by CFD simulations and the results were verified by experimental applications.

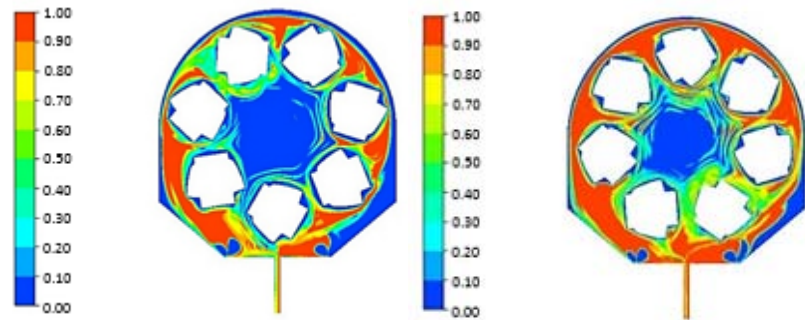


Figure A. Cross-sectional view of the vacuum chamber, at respectively $t=10$ s and $t=20$

Purpose: The aim of the study is to obtain the optimized PVD HMDSO polymerization process conditions and parameters for automotive industry

Theory and Methods:

First HMDSO pipeline were analyzed by numerical methods and equal distribution is achieved by improving the pipe dimensions. Then vacuum medium's central rotation and substrate's rotation were analyzed in order to achieve better contact duration between parts and the monomer (HMDSO). The simulation results were verified by Taguchi experimental design.

Results:

According to simulation and experimental results, low and high rotational speeds effect monomer distribution negatively. The substrates rotational speed should be 7 rev/min for better penetration of the monomers to the part surface.

Conclusion:

It is proved that the simulation studies can lead to PVD process optimization for practical process and part problems. It is significantly observed that the thickness of the thin film layer of HMDSO is increased on the part surface homogeneously after the study.



PVD vakum ortamında HMDSO polimerizasyonunun otomotiv endüstrisi için nümerik olarak incelenmesi ve proses optimizasyonu

İbrahim Emrah Sözer^{1*}, Serkan Geçim², Gökmen Kıdık³, Mustafa Cemal Çakır¹

¹Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 16059, Görükle, Bursa, Türkiye

²Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 16310, Yıldırım, Bursa, Türkiye

³İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 34467, Ayazağa, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- HMDSO monomer salınım sisteminin nümerik analizi,
- CFD simülasyonuna deneysel yaklaşım,
- PVD HMDSO polimerizasyonu için proses parametre optimizasyonu

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 06.12.2019

Kabul: 25.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.656258

Anahtar Kelimeler:

PVD,
fiziksel buhar biriktirme,
HMDSO polimerizasyonu,
ince film kaplama,
metalizasyon

ÖZET

Far yansıtıcı yüzeyleri içeren alt parçaların çevresel faktörlere dayanımının sağlanması için Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) proseslerinde alüminyum kaplama üzerine koruyucu film tabakası oluşturulmaktadır. Bu çalışmada, PVD proseslerinde koruyucu film tabakası oluşturmak için kullanılan Heksametildisiloksan (HMDSO) monomeri salınım hattının Sonlu Hacimler Yöntemi kullanılarak, vakum çanı içerisinde hat boyunca homojen salınım olacak şekilde optimizasyonu sağlanmıştır. Bununla birlikte vakum çanına salınan HMDSO monomerinin polimerizasyon öncesi eşit dağılımı için parça altlıkları dönüş mekanikleri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) simülasyonları ile analiz edilmiş ve deneysel uygulamalar ile sonuçlar doğrulanmıştır. Çalışma öncesinde vakum çanı içerisinde farklı bölgelerdeki parçaların Sodyum Hidroksit (NaOH) dayanım süreleri 350-550 saniye arasında iken, çalışma sonrasında dayanım süreleri tüm bölgeler için 1000 saniye üzerine taşınmıştır. Bu sayede parça nihai ömrü uzatılmış ve parçanın çevresel faktörlere karşı dayanımı artırılmıştır. Bu çalışma sayesinde 2,84 m³ hacmindeki vakum çanında kaplanan parçalarda istenilen kalite gereksinimi çan içerisindeki farklı bölgelerdeki tüm parçalar için sağlanmıştır. Tek altlıklı, 1,13 m³ hacme sahip vakum çanı olan yeni makinelere ihtiyaç kalmamış, büyük çana sahip makineler ile ise 2 katı fazla üretim çıktısı alınmıştır. Gerek literatürde gerekse tedarikçi firmalar tarafından yürütülen çalışmalarda bu makalede gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarına benzer bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Process optimisation of HMDSO polymerisation in PVD vacuum medium by numerical analysis for automotive industry

H I G H L I G H T S

- Numerical Analysis of HMDSO monomer releasing system
- Experimental approach to CFD simulations,
- Optimization of process parameter for PVD HMDSO polymerization

Article Info

Research Article

Received: 06.12.2019

Accepted: 25.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.656258

Keywords:

PVD,
physical vapor deposition,
HMDSO polymerization,
thin film layer,
metallization

ABSTRACT

A protective film layer is formed over aluminum coating with Physical Vapor Deposition (PVD) processes to ensure the resistance to environmental factors of the sub-components that include headlight reflective surfaces. Increasing endurance of the sub-components to environmental factors is demanded with the development of automotive quality demands. In this study, Hexamethyldisiloxane (HMDSO) monomer releasing system that is used to form a protective film layer in PVD processes, has been optimized for releasing homogeneously through the pipeline to the vacuum chamber by using finite volumes method. In addition, for uniform distribution of the HMDSO monomer release before polymerization into the vacuum medium, the substrate's jig revolution mechanics were analyzed by Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations and the results were verified by experimental applications. The Sodium Hydroxide (NaOH) resistance of parts in various regions of the vacuum chamber was between 350-550 seconds before the study. However, it has been carried to over 1000 seconds for all regions after the optimisation process. Thus, ultimate life of the part and parts' resistance to environmental factors are increased. Thanks to this study, the desired quality requirement for the sub-components that are coated in the vacuum chamber with a volume of 2,84 m³ was provided for all parts in different regions within the chamber. There is no need for new single planet machines with 1,13 m³ volume vacuum chamber and production output that was obtained with the bigger chamber machine is doubled. No similar works have been found that are carried out by suppliers or in the literature.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ibrahimemrahsozer@gmail.com, serkan.gecim@gmail.com, kidik.gokmen@gmail.com, cemal@uludag.edu.tr / Tel: +90 535 747 7251

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

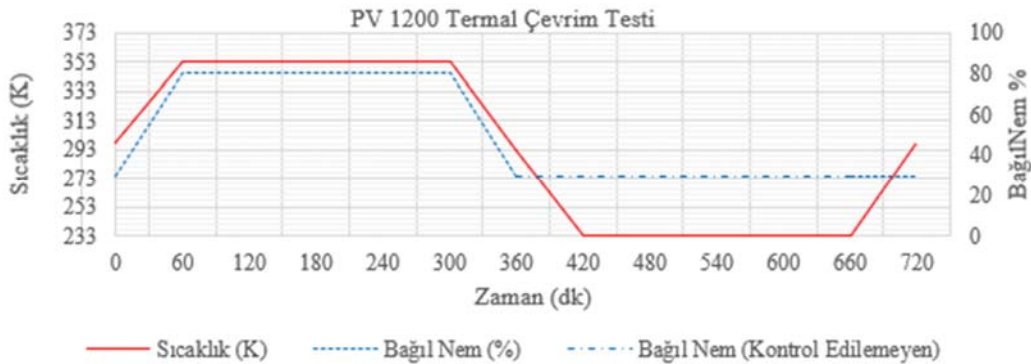
Polimerik malzemeler üretilebilirlik, düşük maliyet, düşük yoğunluk ve esnekliği açısından öne çıksa da; bazen yüzey özellikleri, parlaklık, ıslanabilirlik, çizilmeye karşı direnç ya da sürtünme direnci istenilen seviyede olmayabilir. Yüzey işlem uygulamaları ile polimerik malzemenin karakteristik özellikleri değiştirilmeksizin, yüzey özellikleri istenilen seviyeye getirilebilir [1].

Otomotiv aydınlatma sektöründe, yansıtıcı yüzey oluşturmak veya estetik zenginlik katmak için, fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemi ile alüminyum kaplanmaktadır. Alüminyum kaplama sonrası koruyucu film tabakası oluşturulmaz ise çevresel etkilere karşı alüminyum direnci müşteri beklentilerini karşılamamaktadır. Mikro-elektronik uygulamalar ve optik yüzeylerin kaplanmasında silikon oksit filmler yaygın olarak kullanılmaktadır [2-4]. Bu sebeple Tetraetoksilan (TEOS) ya da heksametildisiloksan (HMDSO) silisyum-oksit film, biriktirme amacıyla, polimerizasyon reaksiyonu için besleme hammaddesi olabilir [5]. Alüminyum kaplı parça üzerine HMDSO monomer buharının polimerizasyonu ile silikon oksit koruyucu katman buharı biriktirilerek parça ömrü ve kalitesi artırılmaktadır. Parça tasarımı, kullanılan hammadde cinsi ve ortam koşulları, optik ve ısı test sonuçlarının yanısıra kimyasal dayanım test sonuçlarını da etkilemektedir. Ancak kimyasal direnç için özellikle koruyucu film tabakasını oluşturan plazma polimerizasyon kalitesi daha önemlidir. Reaktör tipi, parça geometrisi, gaz kompozisyonu ve akışı, uygulanan gerilim miktarı, ortam sıcaklığı ve basıncı plazma polimerizasyonunu doğrudan etkilemektedir [6].

Gelişen ana sanayi ihtiyaçları sonrası yeni standartlar yayınlanmaktadır. Alüminyum kaplı parçalar için dayanım talepleri yenilenmiştir. Kaplamanın kalitesi, yeni projeler için, VW (Volkswagen - TL 207) test standartlarına ve bu standardın şart koştuğu optik, termal, kimyasal test sonuçlarına göre değerlendirilmektedir. VW şartnamesinde yer alan PV1200 termal çevrim testi bu alanda geçilmesi gereken en önemli testlerden biridir. PV1200 termal test

şartını anlatan grafikler aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 1). İklimlendirme kabineine atılan alüminyum kaplı bitmiş ürün ve alt parçalar, yaklaşık 298 K (oda sıcaklığı) ve %30 bağıl nem ortam koşulundan 60 dakika içerisinde 353 K sıcaklık ve %80 bağıl nem ortam koşuluna getirilmektedir. Parçalar 240 dakika bu şartlara maruz bırakıldıktan sonra 120 dakika içerisinde ortam koşulları 233 K sıcaklık ve %0 bağıl nem (nemsiz) ortam koşuluna getirilmektedir. Bu şartlarda 240 dakika bırakılan parçalar sonrasında 60 dakika içerisinde oda sıcaklığına soğutulurak test sonuç ölçütlerine göre değerlendirilmektedir.

6 altlıklık, 2,84 m³ hacmindeki vakum çanında kaplanan tüm parçalar PV1200 testini geçememiş, test sonrası alüminyum kaplı yüzeylerde bozulma ve oksitlenmeler meydana gelmiştir (Şekil 2). Testin geçer ölçütü alüminyum kaplı yüzeyde hiç bozulma olmamasıdır. NaOH kimyasal test sonuçlarında ise çan içerisinde farklı bölgelerdeki parçalar için değişkenlik görülmektedir (Şekil 2). Aynı dayanım sürelerinin elde edilebilmesi ancak koruyucu film tabaka kalınlıklarının eşit oluşturulabilmesi halinde gerçekleşecektir. Tabaka kalınlığındaki farklılıklar polimerizasyon esnasında homojen salınımın ve çan içerisindeki her bölgeye eşit dağılımın gerçekleşmediğini ispatlamaktadır. Çan içerisinde altlıkların konumlandırılması Şekil 2 de gösterilmiştir. Literatürde birden fazla altlıklık ve büyük hacimdeki vakum çanında homojen monomer dağılımı optimizasyonu üzerine çalışmaya rastlanmamıştır. Tedarikçi firma ile fikir alışverişinde bulunulmuş ancak önerilen deneme parametreleri ile de sonuç alınamamıştır. Bu sebeple elimizdeki makineler ile müşteri şartlarının karşılanması için analiz çalışmalarının yapılması şart olmuştur. HMDSO beslenmesi sırasında ortam basıncının 2 Pa kadar düşük olması ile birlikte HMDSO monomeri vakum çanı içerisine girer girmez gaz fazına geçmektedir. Polimerizasyon levhası ile ortamda bulunan gazlar (hava ve HMDSO monomeri) 13,56 MHz frekans RF güç kaynağı kullanılarak uyarılmış hale getirilmekte, serbest radikaller oluşturularak polimerizasyon tamamlanmakta ve sonrasında parça üzerinde biriktirilmektedir.



Şekil 1. PV1200 termal test ortam koşulları sırasıyla sıcaklık ve bağıl nem –zaman grafikleri [7]
(PV1200 thermal test conditions respectively temperature and relative humidity - time graphics [7])

Vakum çanında farklı yerlerde monomer yoğunlaşması gerçekleşebilir ya da salınan monomerin parçaya ulaşmadan vakum ağzından emilimi de söz konusu olabilir. Homojen salınım ve eşit dağılım ile monomerin parçaya yakın yerlerde yoğunlaşması ya da parça ile birlikte sürüklenmesi aktif plazma alanına girildiğinde daha fazla monomerin polimerizasyonuna fırsat sağlayacaktır. Bu da polimer uzunluğunun artmasına katkı verecektir. Bunun dışında özellikle plazma aktif alanına yakın kısımlarda monomer yoğunlaşması kaynaklı kısmi basınç artışı plazma etki alanını küçültmektedir. Uygulanan voltaj arttıkça polimer film kalınlığı artmakta, aksi hallerde voltaj düşmesi ile film kalınlığının azalması tetiklenmektedir [8]. Monomer yoğunlaşması arttıkça ortam boğulmakta, monomer başına düşen enerji miktarı azaldığı için polimerleşme sonlanarak parça üzerine birikme oranı azalmaktadır [9].

2 Pa basınçta vakum çanına monomer beslenmektedir. Monomer konsantrasyonun lokal olarak artması ve basıncın kısmi olarak 133 Pa üzerine çıkması halinde toz şeklinde polimer oluşumu tetiklenmektedir. "Gaz Faz Modeli" olarak adlandırılan bu model tercih edilmemektedir [10-12].

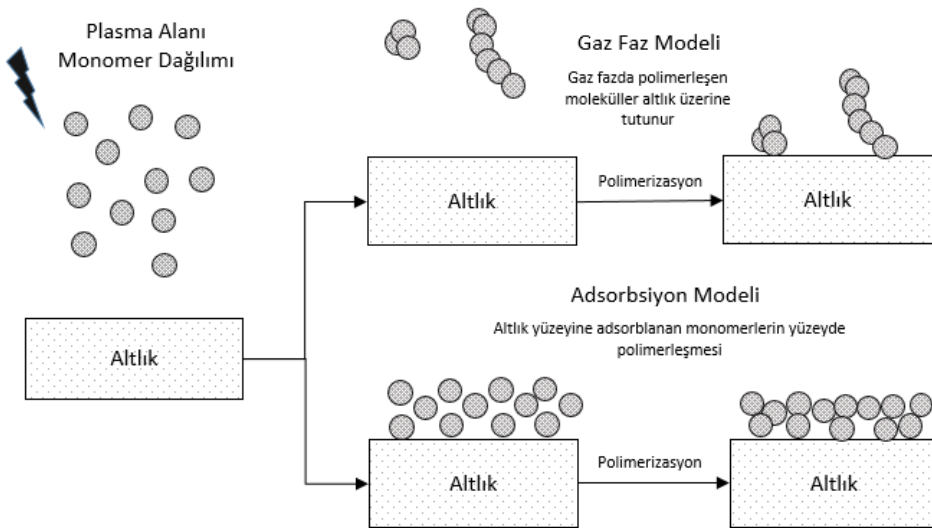
Polimerizasyonun oldukça düşük basınçlı ortamda olması; monomerin kat ettiği Ortalama Serbest Yol 'u arttırdığı ve gaz fazında daha düşük çarpışma oranları olduğu için "Adsorbsiyon Modeli" ile adlandırılan mekanizma tercih edilmektedir (Şekil 3) [13, 14]. Bu model ile daha uzun polimerizasyon zinciri oluşumu sağlanmaktadır. Yapılan çalışmada bu modele uyacak şekilde, vakum çanı içerisine, hat boyunca homojen monomer salınımı ve altlıklara polimerizasyon öncesi eşit nüfuziyet sağlanması hedeflenmiştir.

HMDSO film tabakasının kalınlığına ve polimerizasyon reaksiyon mekanizmasına göre koruyucu tabakanın kimyasala dayanımı değişmektedir. Bu çalışmada, HMDSO besleme borusu boyutları HMDSO monomerinin sisteme en homojen şekilde giriş yapmasını sağlayacak şartlarda optimize edilecektir. Proses noktasına etki edecek yukarıda belirtilmiş tüm esaslar göz önünde bulundurularak monomerin çan içerisindeki altlık hareketlerine göre davranışları incelenecektir. Monomerin parçaya yakın yerlerde yoğunlaşması ya da parça ile birlikte sürüklenmesi durumunun yakalanması hedeflenmektedir. Aktif plazma



Şekil 2. Sırasıyla PV1200 termal test - NaOH testi sonrası bozulmuş parçalar ve çan içerisinde altlıkların konumlandırılması

(Deformed part after PV1200 thermal test –NaOH test sincerely and 2 planets positioning in the PVD chamber)



Şekil 3. Plazma polimerizasyon mekanizması gaz fazı ve adsorbsiyon modeli [12]

(Gas phase and adsorption layer model for plasma polymerization)

alanında daha fazla monomeri üzerinde barındıran parça için voltaj düşümüne fırsat verilmenden uygun polimerizasyon koşullarının sağlanması ile daha uzun polimer zinciri elde edilecektir. Kimyasal direnç artışı ve neme karşı dayanımı deneysel doğrulamalar ile ispatlanacaktır.

2. DENEY DÜZENİĞİ VE KABULLER (EXPERIMENTAL SETUP AND ASSUMPTIONS)

Bu çalışma seri üretimde kullanılan 6 altlıklı, 2,84 m³ hacminde vakum çanına sahip Arzuffi MF 1700 PVD kaplama makinesinde yapılmıştır. HMDSO tank sıcaklığı 310 K olarak ayarlanmıştır. Monomer vakum çanı içerisine girer girmez gaz fazına geçmekte, bu buharlaşma sebebi ile sıcaklık 308 K 'e düşmektedir. Deneylerde ortam basıncı 2 Pa olarak ayarlanmıştır.

Çalışmada HMDSO salınımının iyileştirilmesi için birbirlerine bağlı iki farklı optimizasyon çalışması yapılmıştır. Öncelikle HMDSO salınım hattı optimizasyonu, sonrasında ise altlık devir sayısı analizi ANSYS Fluent 15.1 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir [15]. Analizi yapılacak olan HMDSO besleme boru hattı paralel bağlı iki kol üzerinden vakum çanına malzeme salınımı yapmaktadır. Çapı 1,75 mm olan 13 adet deliğe sahiptir (Şekil 4). Başlangıç koşullarında ana boru iç çapı 7,0 mm'dir.

Analizlerde kullanılan diğer kabuller ve sınır koşullar aşağıdaki gibidir;

- HMDSO monomeri boru içerisinde tamamen sıvı fazındadır ve sisteme giriş sıcaklığı 308 K'dir
- Deliklerden çıkan monomer 2 Pa basıncındaki ortama akmaktadır.
- Kullanılan monomerin sıvı fazdaki yoğunluğu 764 kg/m³'tür.
- Akışkanın kinematik viskozitesi 0,65 x 10⁻⁶ m²/s'dir.
- 120 mL/min debiyi sağlayacak şekilde sisteme kütle girişi sağlanmıştır.
- Tek fazlı zamandan bağımsız bir model kullanılmıştır.

- K-epsilon türbülans modeli kullanılmıştır [16, 17].

Sonlu hacimler yöntemi ile çözümü gerçekleştirilen süreklilik ve momentum denklemleri Eş. 1 ve Eş. 2'de belirtilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

HMDSO monomeri yaklaşık 7,64 x 10⁻⁹ kg/s debi ile vakum çanına girmektedir. Kullanılan monomerin gaz fazındaki yoğunluğu 1,2473 x 10⁻⁴ kg/m³, havanın çalışma koşullarındaki (vakum altındaki) yoğunluğu 2,225 x 10⁻⁵ kg/m³'tür. Hesaplar esnasında her iki gazın da viskozitesi standart hava viskozitesi kabul edilmiştir. Analizler problemin çözümünü daha pratik hale getirmek için çeşitli adımlarla yapılmıştır. Zamandan bağımsız tek fazlı 3D ve 2D analizler yapıldıktan sonra elde edilen bilgiler ışığında zamana bağlı çift fazlı akış analizi yapılmıştır. Zamana bağlı çift fazlı akış analizinde VOF (Volume of Fluid) modeli kullanılmıştır [18]. Sonlu hacimler yöntemi ile çözümü gerçekleştirilen süreklilik ve momentum denklemleri Eş. 3ve Eş. 4'deki gibidir;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)) + \rho \vec{g} + \vec{T} \vec{T}_\sigma \quad (4)$$

ρ : karışım yoğunluğu, $\rho = \sum a_q \rho_q$

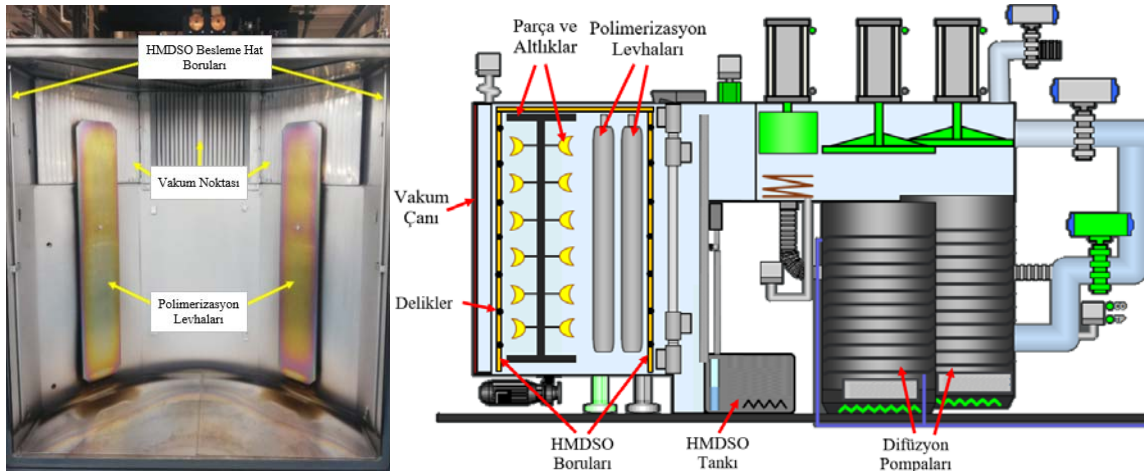
μ : karışım viskozitesi, $\mu = \sum a_q \mu_q$

\vec{v} : karışım hızı, $\vec{v} = \frac{1}{\rho} \sum_{q=1}^n a_q \rho_q \vec{v}_q$

\vec{T}_σ : faz arayüzündeki yüzey gerilim kuvveti

a_σ : q fazının hacimsel oranı

$0 < a_q < 1$ ve $\sum_{q=1}^n a_q = 1$



Şekil 4. Çan içi polimerizasyon levhası - HMDSO boru hattı gerçek ve şematik görüntüleri
(Vacuum Chamber Polymerization plate - HMDSO pipeline actual and schematic views)

μ_q : q fazının viskozitesi
 \vec{v}_q : q fazının hızı

3. GERÇEKLEŞTİRİLEN ANALİZLER VE TARTIŞMA (ANALYSIS CONDUCTED AND DISCUSSION)

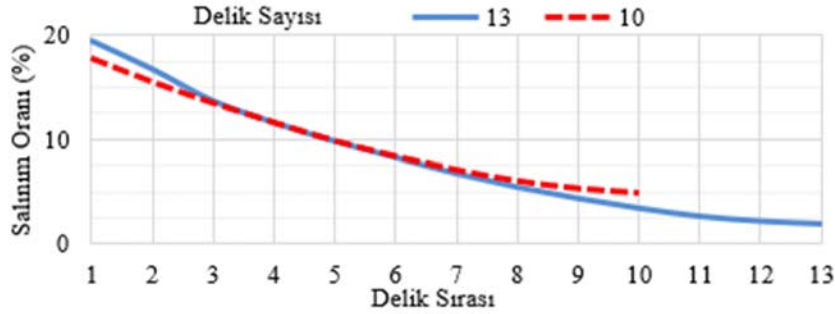
3.1. HMDSO Hattı Optimizasyon Analizi (HMDSO Line Optimization Analysis)

HMDSO vakum çanı içerisine besleme boru hattı ile salınmaktadır. Tüm deliklerden homojen salınım sağlanabilmesi için önce mevcut durumda delikler arasında oluşan salınım oranı farkı analiz edilmiştir. Mevcut durumda 1. ve 13. delik arasındaki fark %18 seviyelerindedir (Şekil 5). Delik çapları değiştirilmeden önce delik sayısının azaltılmasının, salınım oranına etkisi incelenmiştir. Delik sayısı 13'den 10'a düşürüldüğünde delikler arasında oluşan salınım oranı farkının %13'lere düştüğü tespit edilmiştir.

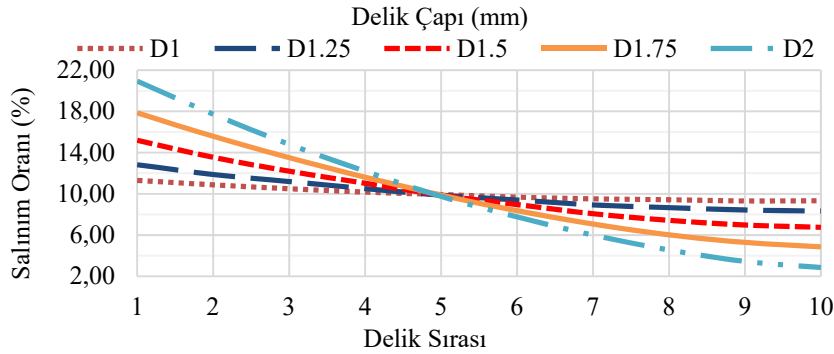
Mevcut durumda en üst ve en alt deliğin proses aktif alanında yer almaması sebebiyle iptal edilmeleri kararlaştırılmıştır. Bu delikler parça bulunan bölgede değildir, HMDSO salınım noktası parça konumlarına göre daha üstte ya da daha altta yer almaktadır. Parçaya direk ulaşmamaktadır. Kalan delikler arası mesafeler de artırılarak 1 deliğin daha iptali ile analiz sonuçlarına paralel durum sağlanmış olacaktır. Sonraki analizlerin tümü 10 delik üzerinden gerçekleştirilmiştir. Ana boru çapı değiştirilmeden önce delik çaplarının sistem üzerindeki etkisi incelenmiştir. 10

delik ve ana boru iç çapı ölçüsü 7 mm olacak şekilde sabit tutularak analizde delik çapları değiştirilmiştir. Delik çapları küçüldükçe 1. ve 10. delik arasındaki salınım oranı farkı azalmakta, fark belirgin şekilde %2'lere kadar düşmektedir (Şekil 6). Sonraki analizlerde salınım oranı farkı en az olan 3 delik çapı (1 - 1,25 - 1,5 mm) dikkate alınmış ve ana boru çapı değiştirilmiştir. Ana boru çapı 7 mm'den; sırasıyla 10 mm ve 15 mm'ye çıkarıldığında 1. ve 10. delik arasındaki salınım oranı farkının azaldığı gözlemlenmektedir. En iyi sonuç ana boru çapının 15 mm ve delik çapının 1 mm alındığı analizde alınmıştır. 1. ve 10. delik arasındaki salınım oranı farkının %0,2'nin altına düştüğü, maksimum ve minimum değerler arasındaki farkın yine en düşük seviyeye geldiği ve ayrıca dalgalanmanın da daha az seviyede olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 7).

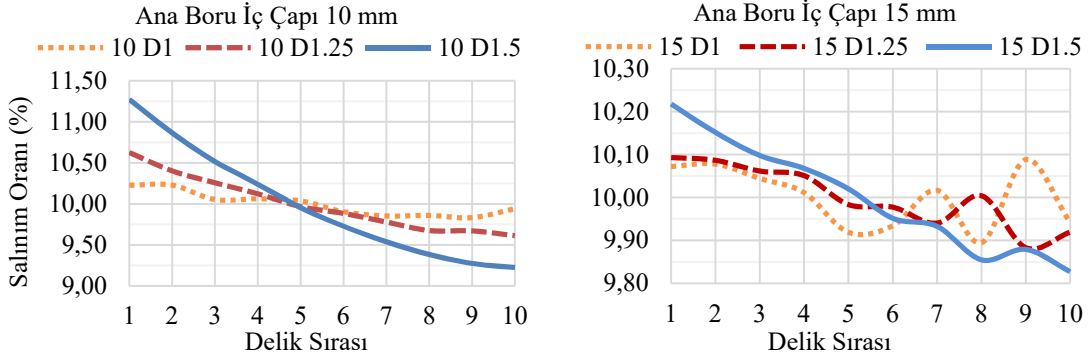
Özetle; delik sayısının azaltılması, ana hattın çapının artırılması ve delik çapının azaltılması ile boru hattı boyunca basınç kayıpları ve delikler arasındaki basınç dağılımındaki sapmalar azalmıştır. Bunun sonucunda boru hattındaki her bir delikten birbirine yakın oranda salınım sağlanabilmektedir (Şekil 8). Deneysel doğrulama faaliyetlerinin yürütüleceği makinede HMDSO boru hattı 10 delik, her delik çapı 1 mm ve boru iç çapı 15 mm olacak şekilde revize edilmiştir. 2,84 m³ hacimdeki PVD vakum çanı boru hattından eşit salınım sağlanarak kinematik analizler için olgun ortam sağlanmıştır. Bu şekilde kinematik analizler sonrasında alınan sonuçların doğrulanması ve yeterliliğin sağlanması mümkün olmuştur.



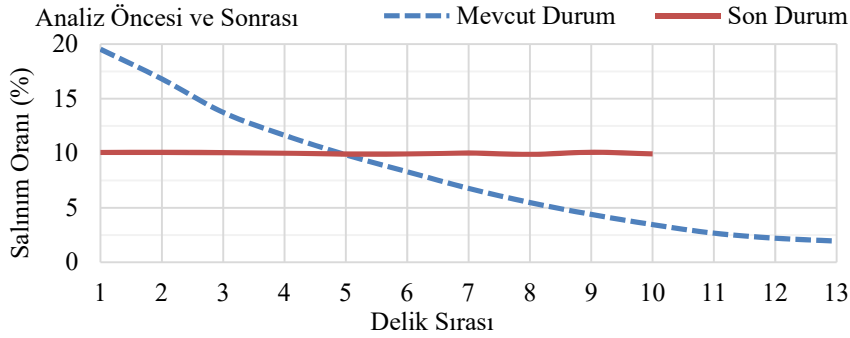
Şekil 5. 13 ve 10 delikli HMDSO hattı için salınım oranı karşılaştırması
(Flow difference comparison for 13 and 10 hole HMDSO line)



Şekil 6. Farklı delik çaplarında HMDSO hattı için salınım oranı karşılaştırması
(Flow difference comparison for HMDSO line with different hole diameters)



Şekil 7. Farklı iç çapta HMDSO hattı ve farklı delik çapları ile salınım oranı karşılaştırması
(Flow difference in comparison with different internal diameters and different hole diameters of HMDSO line)



Şekil 8. Mevcut durumun ve analizler ile gelinen son durumun karşılaştırması
(Comparison of current situation and the latest situation after analysis)

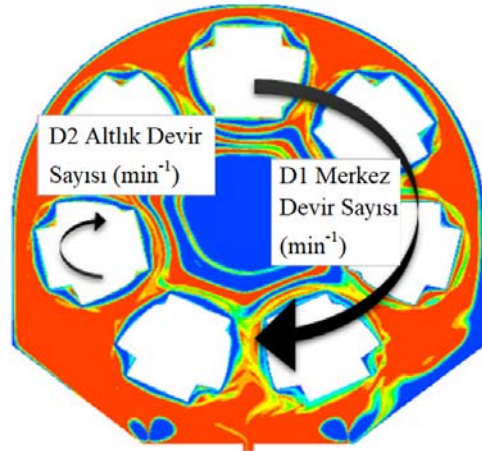
3.2. Altlık Devir Sayısı Optimizasyon Analizi (Substrate Revolution Value Optimization Analysis)

Çalışmanın ilk aşamasında HMDSO besleme hattı optimizasyonu ile akışkanın sisteme homojen şekilde giriş yapması (çan yüksekliği boyunca sabit kabul edilebilir seviyeye gelmesi) sağlanmıştır. Bu sayede parça hızının etkisinin ve optimum devir sayısının belirlenmesi için vakum çanı içerisinde 2 ve 3 boyutlu analizlerin gerçekleştirilmesi mümkün olmuştur. Parçaların takıldığı altlıkların hareketlerinin HMDSO'nun vakum çanı içerisinde kaplama uygulanacak yüzeylere ulaşmasına olan etkisi incelenmiş, yüzey temasının en fazla gerçekleşeceği devir sayısı belirlenmiştir. Analizlerde Arzuffi 1700 MF PVD makine ölçüleri birebir kullanılmıştır. Vakum çanına salınan HMDSO monomerinin parça devir hızlarına bağlı olarak ortalama yayılımı, zamandan bağımsız ve zamana bağımlı olacak şekilde incelenmiştir. D1 değeri altlıkların çan merkezinde dakikada yaptığı devir sayısını (min^{-1}), D2 değeri ise altlıkların kendi eksenleri etrafında dakikada yaptığı devir sayısını (min^{-1}) temsil etmektedir (Şekil 9).

3.2.1. Zamandan bağımsız tek fazlı 3 boyutlu analiz (Time independent single phase 3 dimensional analysis)

İlk olarak 3 boyutlu zamandan bağımsız çözüm yapılmıştır. Bu çözümde sadece tek faz kullanılmıştır. Amaç sistemdeki akış karakteristiğini ortaya koymaktır. Merkez devri (D1) ve altlık devri (D2) değerleri değiştirilerek parçaların

bağlandığı altlıkları içine alacak hayali bir silindir etrafındaki hız büyüklükleri ve bu hızların kapladığı bölgedeki hacimsel değerler hesaplanmıştır. D1 ve D2 birbirine göre zıt yönde döndüklerinden, birbirlerine göre bağlı hız D2'nin etrafındaki akışkanın hızını etkilemektedir. D2'nin artışı ile ortalama hızın arttığı görülmektedir. Bununla birlikte D1 değerinin artışı da genel olarak ortalama hızı artırmaktadır (Şekil 10).



Şekil 9. Vakum çanının yataydaki kesit görüntüsü D1 merkez - D2 altlık devir sayısı
(Horizontal cross-sectional view of vacuum chamber D1 center - D2 jig revolution)

3.2.2. Zamandan bağımsız tek fazlı 2 boyutlu analiz (Time independent single phase 2 dimensional analysis)

Bu bölümde analizlerde iki boyutlu uygun bir kontrol hacmi ele alınmış ve elde edilen sonuçlar 3 boyutlu durum ile karşılaştırılmıştır. Bu bölümde yine zamandan bağımsız tek fazlı durum ele alınmıştır. Giriş hızı olarak 100 m/s alınmıştır. 3 boyutlu analizde giriş hızı 104 m/s'dir.

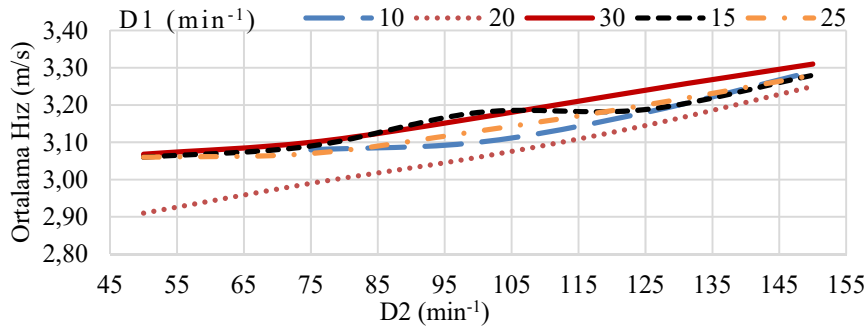
Şekil 11'de devir sayısı ile ortalama hız arasındaki ilişkiyi veren grafik görülmektedir. Üç boyutta olduğu gibi burada da devir sayılarının artışı ile ortalama hız artmaktadır. Tek fazlı analizlere göre kaplanacak parçanın bağlı hızının artması etrafındaki akışkanın daha hızlı hareket etmesine sebep olmaktadır. Bu durumun parçanın daha fazla akışkan ile temas etmesine olanak sağlaması beklenmektedir. Hava ve HMDSO monomerinin oluşturduğu aktif plazma alanında monomer ile parça arasındaki temas miktarının artması halinde polimer zincirinin uzaması sağlanacak ve parça üzerinde oluşturulan koruyucu tabaka kalınlığı, dolayısıyla parçanın dış etkenlere dayanımı artırılmıştır. Parça ile birlikte sürüklenen ya da çan içerisinde asılı halde olan ve o an yüzeye yakın diğer monomerlerin de yakalanması polimerizasyonu ayrıca kuvvetlendirecektir.

3.2.3. Zamana bağlı çift fazlı analiz (Time dependent dual phase analysis)

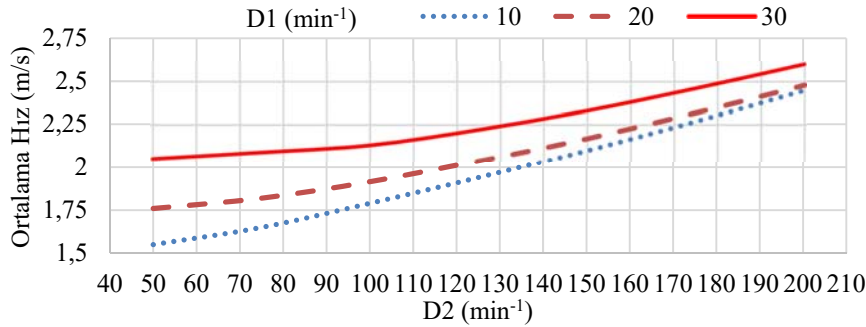
Bu bölümde zamana bağlı olarak monomer ve havanın akış karakteristiği belirlenmiştir. Bir önceki bölümde hız artışının

kaplanacak parçanın daha fazla akışkana temas etmesine imkân sağladığı ortaya konulmuştur, fakat çalışma esnasında sistem her ne kadar vakum ortamında da olsa HMDSO vakum çanına salındığı anda kaplanacak olan parçaların etrafında eser miktarda hava bulunmaktadır. Zamanla hava fazının yerini HMDSO fazı alacaktır. Bu sebepten ötürü devir sayısının artması veya azalması, HMDSO'nun hava fazının içinden geçmesi ya da yer değiştirerek proses parçasına ulaşmasında farklı etkiler yaratacaktır. Analizler ilk 20 saniyelik durum için ele alınmıştır. Yüzeye temas eden HMDSO monomerinin hacimsel oranının devir sayılarına ve zamana göre değişimi incelenmiştir.

Çan merkezinden ve parçaların takıldığı altlıkların devir sayısının, HMDSO yüzey temas oranına etkisi D1 devir hızı sabit tutularak, farklı D2 devir hızları için incelenmiştir. X eksenini zamanı, Y eksenini ise tüm yüzeye monomerin temas oranını normalize edilmiş olarak göstermektedir. Analizler farklı D1 (4-7-10 min⁻¹) hızları için tamamlanmış, 3 farklı analizden çıkan grafikler aşağıda paylaşılmıştır (Şekil 12-Şekil-14). Şekil 12'de D1'den bağımsız olarak D2 devir sayısının düşük olmasının, HMDSO yüzey temas oranını arttırdığı gözlemlenmiştir. Daha önceki tek fazlı analizlerde ise D2 devir sayısı artışı HMDSO yüzey temas oranını arttırmaktaydı. D2 devir sayısının düşük olması daha doğrudur, çünkü önce parçaya temas halinde olan havanın HMDSO ile yer değişmesi gerekmektedir. Monomerin düşük basınçta Ortalama Serbest Yol miktarının yüksek olması altlık yüzeyine tutunma olasılığını arttırmaktadır. Polimerizasyon süreci, Gaz Faz Modelinde olduğu gibi



Şekil 10. 3 boyutlu analizde merkez ve altlık devirlerinin akışkan hızı ile ilişkisi
(Relation of center and jigs revolutions with fluid velocity in 3D analysis)



Şekil 11. 2 boyutlu analizde merkez ve altlık devirlerinin akışkan hızı ile ilişkisi
(Relation of center and jigs revolutions with fluid velocity in 2 dimensional analysis)

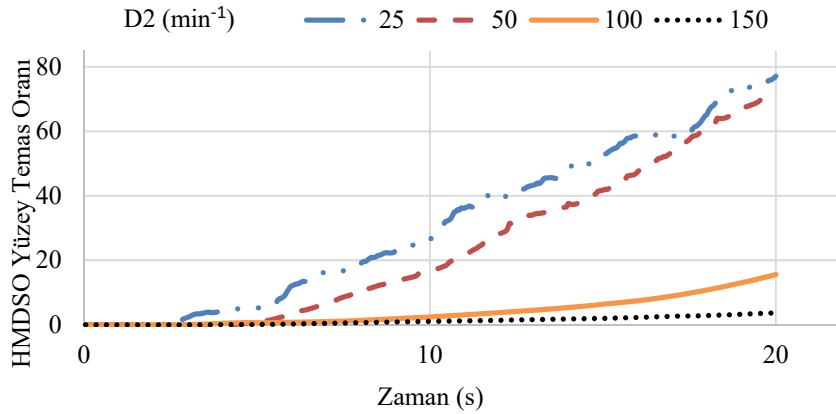
(parça yüzeyinden uzak çan içerisinde herhangi bir yerde) değil de altlık yüzeyine adsorblanan monomer kökleri üzerinden ilerler ise daha homojen ve daha uzun polimerizasyon zinciri oluşturmaktadır [19].

Sistemde ilk başta akışkan olarak havanın olması ve monomerin sisteme girmeden önce havanın bir bağıl hızının olması monomerin parça yüzeyi üzerine nüfuziyetini zorlaştırmaktadır. Monomerin parçaya difüzyonu esnasında, altlık hızının artması monomerin parçaya olan kütle transferini olumsuz yönde etkilemekte, altlık hızının difüzyon gerçekleşme hızından daha hızlı olması değişimin gerçekleşmesini engellemektedir.

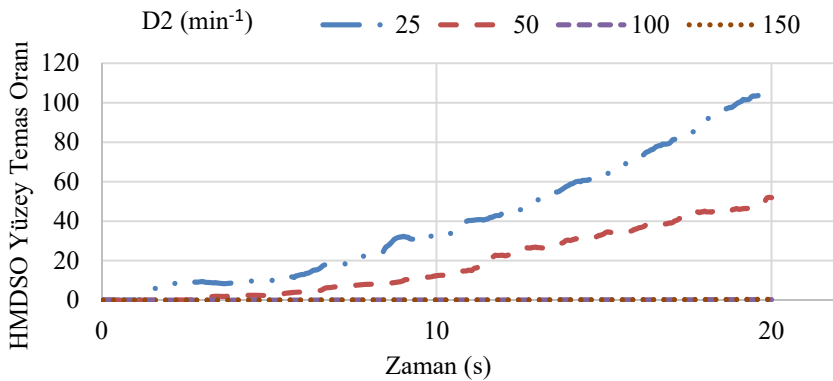
Şekil 13'te D2 devir sayısının düşük olmasının yine HMDSO yüzey temas oranını arttırdığı gözlemlenmektedir. D1'in 4 min^{-1} 'den 7 min^{-1} 'e artırılması ile daha iyi yüzey temas oranı sağlanmıştır. Sistemde ilk başta altlık etrafında bulunan hava katmanının daha çabuk kırıldığı (parça etrafında olan bağıl hızının daha çabuk azaldığı) ve monomer difüzyonunun daha hızlı sağlandığı tespit edilmiştir. Şekil 14'te de D2 devir sayısının düşük olması, HMDSO yüzey temas oranını arttırmıştır. Ancak, D1'in 7 min^{-1} 'den 10 min^{-1} 'e artırılması ile daha kötü yüzey temas

oranı sağlanmıştır. Bu ise şöyle açıklanabilir: sistemde ilk başta altlık etrafında bulunan hava katmanı daha çabuk kırılmasına rağmen girdap etkisi başlamakta ve bu etki herhangi akışkanı altlıktan uzaklaştırmaktadır. Süreç başında hava yüksek devir etkisi ile altlıktan uzaklaşmakta, sonrasında vakum çanı içerisinde konsantrasyonu yüksek monomer ile difüzyonu (yer değişimi) gerçekleşmekte, ancak yine yüksek devir etkisi ile monomerin parçaya yaklaşması engellenmektedir. Altlık bağıl hızının difüzyon gerçekleşme hızından daha yüksek olması parçaya temas oranını azaltmaktadır.

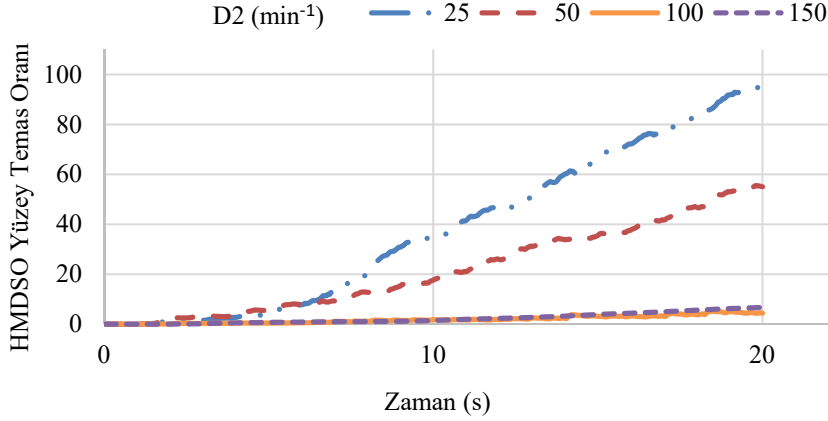
Grafiklere ek olarak akışkanın sistem içinde nasıl davrandığını göstermek amacıyla monomerin daha önce analiz edilen devir sayılarındaki gaz fazı oranları görüntülenmiştir. Y eksenindeki değer normalize edildiği için 100 değeri tüm yüzeye monomerin temas ettiği anlamına gelmemektedir. Şekiller 10. ve 20. saniyeler arasındaki yüzey temas oranlarının karşılaştırılmasıdır. Daha önce elde edilen sonuçlarda D2 devir sayısının düşük olması, HMDSO yüzey temas oranını arttırdığı için çan kesit görüntüleri yalnız D2'nin 25 min^{-1} olduğu haller için paylaşılmıştır (Şekil 15-Şekil 17). Şekil 15 kesit görüntüsü incelendiğinde hem 10. saniye hem de 20. saniye için HMDSO yüzey temas



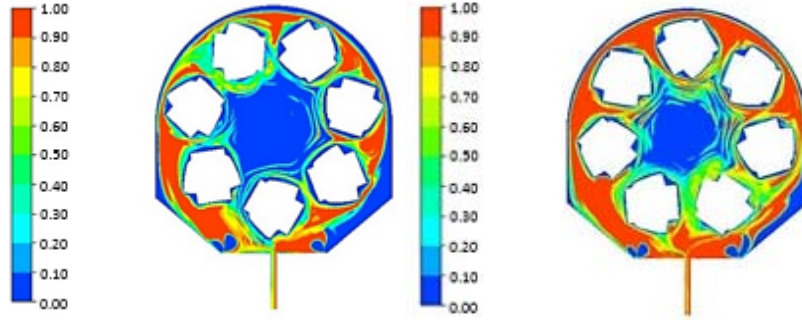
Şekil 12. D1 4 min^{-1} sabit tutularak D2 farklı devir hızlarının HMDSO yüzey temas oranına etkisi
(The effect of different revolution speeds of D2 and keeping D1 4 min^{-1} constant on HMDSO surface contact ratio)



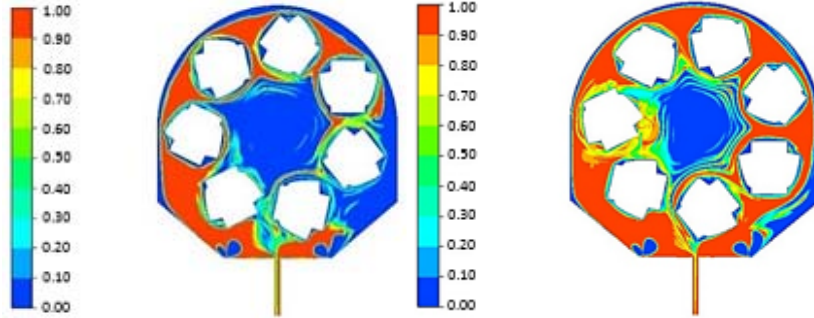
Şekil 13. D1 7 min^{-1} sabit tutularak D2 farklı devir hızlarının HMDSO yüzey temas oranına etkisi
(The effect of different revolution speeds of D2 and keeping D1 7 min^{-1} constant on HMDSO surface contact ratio)



Şekil 14. D1 10 min⁻¹ sabit tutularak D2 farklı devir hızlarının HMDSO yüzey temas oranına etkisi
(The effect of different revolution speeds of D2 and keeping D1 10 min⁻¹ constant on HMDSO surface contact ratio)



Şekil 15. D1=4 min⁻¹ D2=25 min⁻¹ için HMDSO yüzey temas oranı sırasıyla t=10 s ve t=20 s
(HMDSO surface contact ratio at D1=4 min⁻¹ D2=25 min⁻¹ for t=10 s and t=20s respectively)

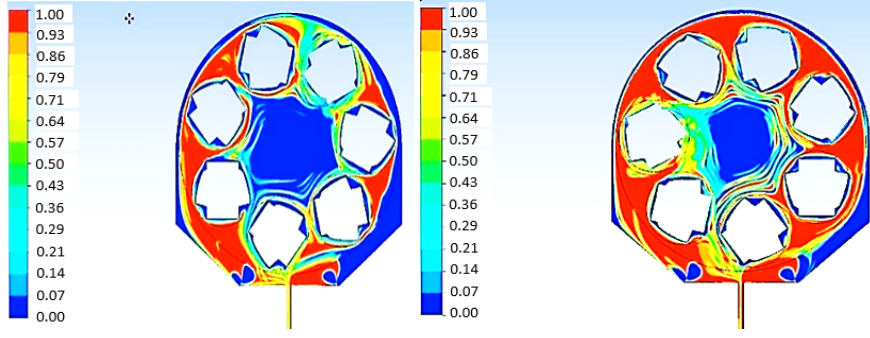


Şekil 16. D1=7 min⁻¹ D2=25 min⁻¹ için HMDSO yüzey temas oranı sırasıyla t=10 s ve t=20 s
(HMDSO surface contact ratio at D1=7 min⁻¹ D2=25 min⁻¹ for t=10 s and t=20s respectively)

oranının daha az gerçekleştiği altlıkların fazlalığı dikkat çekmektedir. Altlıklar etrafında konsantrasyonun en düşük seviyede olduğunu belirleyen mavi rengin daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 16'daki kesit görüntüsü incelendiğinde 4 min⁻¹'e göre HMDSO yüzey temas oranının 7 min⁻¹'de daha fazla gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Altlıklar etrafında konsantrasyonun en düşük seviyede olduğunu gösteren mavi renkli bölgeler mikro ölçekte incelendiğinde özellikle 20. saniye sonrasında mavi rengin sarı ve yeşile döndüğü tespit edilmiştir. Başka bir deyişle altlık çevresindeki hava ile monomer uygun şekilde harmanlanmaya başlamıştır. Monomerin yüzey teması ve

oksijen ile düzgün karışımı için uygun sonuç alınmıştır. Altlıkların ortasında bulunan çan ortasındaki kısım karşılaştırıldığında, orta kısma 4 min⁻¹'de 7 min⁻¹'e göre daha fazla monomerin eriştiği gözlemlenmiştir. Özellikle D1 devrinin artmasıyla, vakum ağzının sağ ve solundan salınan monomerin çanın orta kısmına erişimi engellenmektedir. Ancak, bu durum yüzey temas oranına olumsuz etkide bulunmamaktadır.

Şekil 17'deki kesit görüntüsü incelendiğinde HMDSO yüzey temas oranının 10 min⁻¹'de, 7 min⁻¹'e göre daha az gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Altlıklar etrafında



Şekil 17. $D1=10 \text{ min}^{-1}$ $D2=25 \text{ min}^{-1}$ için HMDSO yüzey temas oranı, sırasıyla $t=10 \text{ s}$ ve $t=20 \text{ s}$ (HMDSO surface contact ratio at $D1=10 \text{ min}^{-1}$ $D2=25 \text{ min}^{-1}$ for $t=10 \text{ s}$ and $t=20 \text{ s}$ respectively)

konsantrasyonun en düşük olduğunu gösteren mavi renklerin 4 min^{-1} 'de olduğu gibi daha fazla olduğu görülmektedir. Altlıkların ortasında bulunan çan ortasındaki kısma 10 min^{-1} 'de en az sayıda monomer erişmiştir.

Tüm analizler karşılaştırıldığında özellikle $D1$ 'in 7 min^{-1} olduğu durumda tüm altlıkların etrafında yüzey temas oranı en yüksek olmaktadır (Şekil 16).

Çift fazlı analizlerde devir sayılarının artışı sistem üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır. Bu durum bir önceki bölümde elde edilen sonuçlarla çelişki göstermektedir. Sistemde tek bir akışkan olması halinde devir sayılarını artırmak akışkanın yüzeye temas etmesi açısından pozitif etki yaratmaktadır. Diğer taraftan sistemde iki farklı akışkan olduğunda, bu etki başlangıçta hakim olan hava akışkanının belirli bir bağıl hızının olmasından dolayı farklılık göstermektedir. Sisteme salınan HMDSO monomerinin parça üzerindeki hava tabakasının yerini alması tek fazlı proseslere kıyasla daha uzun sürmektedir. Bu sebeple olabilecek en düşük $D2$ devrinin elde edilebilmesi için merkez devri ile altlıklar arasındaki hareket aktarımını sağlayan dişli oranı değiştirilerek, $D2$ devrinin $26,2 \text{ min}^{-1}$ olması sağlanmıştır. Deneysel doğrulama faaliyetlerinin yürütüleceği makinede dişli oranı değişimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca merkez devir sayısının teorik olarak optimum değeri 7 min^{-1} olarak belirlenmiş ve deneysel faaliyetler bu parametreler ile yapılmıştır.

4. ANALİZ SONUÇLARININ DOĞRULANMASI İÇİN DENEYSEL TASARIM (DESIGN OF EXPERIMENTS FOR THE VERIFICATION OF ANALYSIS RESULTS)

Analiz sonuçlarına göre imal edilen HMDSO besleme borusu, sağ ve sol 2 kol üzerinden vakum çanına besleme yapmaktadır. Boru dış çapı 16 mm, iç çapı 15 mm'dir. Üzerinde toplam 10 sağ ve 10 sol olmak üzere 20 delik bulunmaktadır. Her deliğin çapı 1 mm'dir. HMDSO tank sıcaklığı 310 K olarak ayarlanmıştır. Monomer vakum çanı içerisine girer girmez gaz fazına geçmekte, bu buharlaşma sebebi ile sıcaklık 308 K 'e düşmektedir. Doğrulama çalışmaları, belirlenen parametre değerleri ile gerçekleştirilmiştir. Vakum çanı içerisine, parça pozisyonu her çevrimde aynı olacak şekilde, en üst, orta ve en alt

yuvaya yükleme yapılmıştır. Şekil 18'de çan içerisindeki altlık konumları gösterilmiştir. Deneylerde ortam basıncı 2 Pa olarak ayarlanmıştır.



Şekil 18. Parçanın altlık üzerindeki pozisyonu (Parts positioning on the jig)

Çift fazlı analizler göz önüne alındığında optimum devir sayısı $D1$ için 7 min^{-1} iken $D2$ devir sayısı düştükçe temas oranı artmaktadır. Bu sebeple olabilecek en düşük $D2$ devri için $26,2 \text{ min}^{-1}$ değeri kullanılmıştır.

Denemeler esnasında HMDSO salınım süresi, valf açıklığı, merkez eksen devir sayısı parametrelerinde değişiklikler yapılarak 1M NaOH çözeltisinin kaplamayı aşındırma süreleri incelenmiştir. 1M NaOH çözeltisine dayanım süresinin artması kaplama kalitesinin arttığını göstermektedir [20]. Deneysel doğrulama çalışmasında Taguchi ortogonal L16 deneysel tasarımı kullanılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Proses parametreleri ve seviyeleri (Process parameters and levels)

Proses Parametreleri	Level-1	Level-2	Level-3	Level-4
Salınım Süresi (s)	30	60	90	120
Valf Açıklığı (mL/min)	40	80	120	160
Merkez Devir (min^{-1})	4	7	9	11

Yapılan çalışmada deneysel tasarım modeline bağlı kalınarak toplamda 16 deneme yapılmıştır. Test sonuçlarının güvenilirliğini arttırmak ve bölgesel değişkenliği tespit edebilmek amacıyla her parçada Şekil 19'da belirtilen 3 ayrı noktaya ve aynı planet üzerinde toplam 3 parçaya (en üst, orta ve en alt yuvalara) test yapılmıştır (Tablo 2). Her çevrim sonrasında toplam 3 parçanın belirlenen 9 farklı noktasına test uygulanmıştır. Sonuç kısmına farklı noktalara uygulanmış NaOH testinden çıkan 9 dayanım süresi değerlerinin ortalaması girilmiştir.



Şekil 19. Parça test ölçüm noktaları ve planet dönüş yönü
(Part's test measurement points and revolution direction)

4.1. Teorik beklentiler (Theoretical expectations)

HMDSO salınım süresinin artması polimerizasyon süresinin de artması anlamına gelmektedir. Bu duruma bağlı olarak, parça üzerine kaplanan PDMS (Polidimetilsiloksan) tabakası kalınlığının artmasıdır [21]. Bununla birlikte uygulanan birim zamanda salınan HMDSO monomer miktarının artması ile serbest radikal oluşum ihtimalinin yükselmesi ve PDMS film kalınlığının da artması beklenmektedir [22]. Kaplama kalınlığının artması ile NaOH çözeltisine karşı direnç artacağından dayanım sürelerinin uzaması beklenmektedir.

Monomer konsantrasyonun lokal olarak artması ve basıncın vakum çanı içerisinde kısmi olarak 133 Pa üzerine çıkması halinde toz şeklinde polimer oluşumu tetiklenmektedir. Bunun dışında kısmi basınç artışı plazma etki alanını küçültmektedir. Polimer film kalınlığı uygulanan voltaj arttıkça artmakta, aksi hallerde voltaj düşmesi ile film

kalınlığının azalması tetiklenmektedir [8]. Bu sebeple kısmi basınç artışlarından kaçınılmıştır. Korumacı film kalınlığının artması ile alüminyum kaplama üzerinde yer alan mikro çatlaklar ve gözeneklerin kapanması ve gaz permabilitesinin azalması beklenmektedir [23].

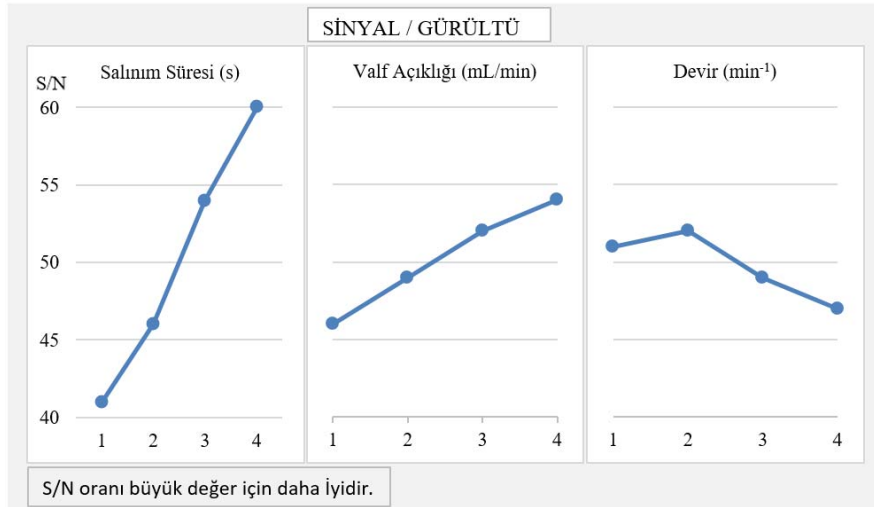
Tablo 2. Taguchi deneysel tasarım modeli ve sonuçları
(Taguchi experimental design model and results)

Deney	Salınım Süresi (s)	Valf Açıklığı (mL/min)	Merkez Devir (min ⁻¹)	Sonuç (s)
L-1	30	40	4	105,0
L-2	30	80	7	122,3
L-3	30	120	9	124,9
L-4	30	160	11	117,6
L-5	60	40	7	160,9
L-6	60	80	4	158,4
L-7	60	120	11	197,2
L-8	60	160	9	309,3
L-9	90	40	9	217,1
L-10	90	80	11	310,6
L-11	90	120	4	803,6
L-12	90	160	7	1315,1
L-13	120	40	11	418,1
L-14	120	80	9	1083,3
L-15	120	120	7	1201,2
L-16	120	160	4	1528

4.2. Taguchi deneysel tasarım sonuçlarının değerlendirilmesi

(Evaluation of Taguchi experimental design results)

Çözümleme için MiniTab analiz programı kullanılmıştır. Doğrulama sonuçları teorik beklentilerimiz ile örtüşmektedir. Sinyal/gürültü (S/N) oranı en yüksek değer en iyi değer yaklaşımı belirlenmiştir [24]. Şekil 20'de görüldüğü üzere salınım süresi ve HMDSO valf açıklık seviyelerinin artması NaOH çözeltisine karşı direnci lineer



Şekil 20. MiniTab programı yardımı ile optimum parametrelerin belirlenmesi
(Determining optimum parameters by the help of MiniTab)

olarak arttırmaktadır. Fakat merkez devir seviyesi en iyi sonucu 2. seviyede 7 min⁻¹ değerinde vermektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Otomotiv kalite taleplerinin ilerlemesi ile alt parçaların çevresel faktörlere dayanımının artırılması talep edilmektedir. Yaygın olarak kullanılan 6 altlıklı, 2,84 m³ hacmindeki vakum çanında kaplanan parçalarda istenilen kalite gereksinimi çan içerisindeki farklı bölgelerdeki parçalar için sağlanamamaktadır. Bu sebep ile tek altlıklı, 1,13 m³ hacme sahip vakum çanı olan yeni makineler tercih edilmekte, büyük çana sahip makineler 2 katından fazla üretim çıktısına rağmen atıl duruma düşmektedir. Bu çalışma sayesinde yaygın olarak kullanılan 2,84 m³ hacmindeki çan içerisinde kaplanan parçalarda istenilen kalite gereksinimi farklı bölgelerdeki tüm parçalar için sağlanmış, tek altlıklı, 1,13 m³ hacme sahip vakum çanı olan yeni makinelere ihtiyaç kalmamıştır.

Mevcut şartlarda vakum çanı içerisindeki tüm parçalar Volkswagen PV1200 dayanım testlerini geçememekte iken durumun iyileştirilmesi amacıyla bu makalede bahsi geçen optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Çalışma sonrasında belirlenen; 120 s dozaj süresi, 120 mL/min valf açıklığı, 7 min⁻¹ merkez devir, 26,2 min⁻¹ altlık devir parametreleri ve 10 delik, delik çapı 1 mm, boru iç çapı 15 mm olan HMDSO besleme hattı kullanılarak üretilen parçaların tamamı testlerden geçmiştir. Parça nihai ömrü uzatılarak, parçanın çevresel faktörlere karşı dayanımı artırılmıştır. Çalışma öncesinde vakum çanı içerisinde testi geçmeyen farklı bölgelerdeki parçaların NaOH dayanım süreleri 350-550 saniye arasında iken, çalışma sonrasında dayanım süreleri tüm bölgeler için 1000 saniye üzerine taşınmıştır.

Polimerizasyon levhaları HMDSO besleme boru hattına yakın kısımda çan gövdesi duvarında yer almaktadır. Bu haliyle aktif plazma alanı çanın yarısına hükmetmektedir. Bu levhalar çan orta kısmına konumlandırılır ise aktif plazma alanı tüm çana yayılacak ve bu sayede polimerizasyonun daha da kuvvetlenmesi sağlanacaktır. Sonraki çalışmalarda polimerizasyon levhasının konum değişikliğinin parça üzerindeki etkisi incelenecektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Hegemann D., Brunner H., Oehr C., Plasma treatment of polymers for surface and adhesion improvement, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 208, 281-286, 2003.
- Engel A.K., Yoden T., Sanui K. and N. Ogata, Synthesis of aromatic Schiff base oligomers at the air/water interface, Journal of American Chemical Society (J. Am Chem. Soc.), 107, 8308-8310, 1985.
- Kakimoto M., Suzuki M., T. Konishi, Imai Y., Iwamoto M. and Hino T., Preparation of mono- and multilayer films of aromatic polyimides using Langmuir-Blodgett technique, CSJ Journals Chemistry letters, 15 (5), 823-826, 1986.
- Kubono A., Higuchi H., Umemoto S. and Okui N. , Molecular orientation of alkyl-aromatic polyimide thin films prepared by vapour deposition polymerization, Thin Solid Films, 229 (1), 133-136, 1993.
- Ebihara K., Fujishima T., Kojyo D. and Murata M., Silicon oxide film preparation by RF plasma-enhanced MOCVD using hexamethyldisiloxane, Plasma Sources Science and Technology, 2 (1), 14, 1993.
- Hegemann D., Brunner H., Oehr C., Evaluation of deposition conditions to design plasma coatings like SiO_x and a-C:H on polymers, Surface and Coating Technologies, 174-175, 253-269, 2003.
- VW PV1200 Testing of Resistance to Environmental Cycle Test (+80/-40) °C
<https://www.testxchange.com/standard/pv-1200/> Erişim Tarihi: 04.05.2020.
- Pandiyaraj K., Kumar A.A., Ramkumar M.C., Kumar U.S., Gopinath P., Cools P., Geyter De N., Morent R., Bah M., Shah I.S., Su P., Deshmukh R.R., Effect of processing parameters on the deposition of SiO_x-like coatings on the surface of polypropylene films using glow discharge plasma assisted polymerization for tissue engineering applications, Vacuum, 143, 412-422, 2017.
- Freidrich J., Mechanisms of Plasma Polymerization – Reviewed from a Chemical Point of View, Plasma Processes and Polymers, 8 (1), 783-802, 2011.
- Vasile, M. J., Smolinsky G., Organosilicon films formed by an RF plasma polymerization process Journal of the Electrochemical Society 119 (4), 451-455, 1972.
- Yasuda H., Lamaze C. E., Polymerization in an electrodeless glow discharge. II. Olefinic monomers Journal of Applied Polymer Science, 17 (5), 1519-1531, 1973.
- Yasuda H., Lamaze C. E., Polymerization in an electrodeless glow discharge III. Organic compounds without olefinic doublebond Journal of Applied Polymer Science, 17 (5), 1533-1544, 1973.
- Mearns A. M., Insulator thin films formed by glow discharge and radiation techniques, Thin Solid Films, 3 (3) 201-228 1969.
- Hollahan J. R., Rare gas plasma polymerization of benzene at- 196°, Macromolecular Chemistry and Physics, 154 (1), 303, 1972.
- Ansys Inc., ANSYS FLUENT theory guide, Canonsburg, PA, Release 15.0, 2-6, 2013.
- Wilcox D.C., Turbulence modeling for CFD, DCW industries, Vol. 2. La Canada, CA, 137-140, 1998.
- Sobachkin, A. and Dumnov G., Numerical basis of CAD-embedded CFD, NAFEMS World Congress, 7-11, 2013.
- RanadeV., Computational Flow Modelling for Chemical Reactor Engineering, Academic Press, Ch. 20 (5), 1-108, 2001.
- Lamendola R., D'Agostino R, Fracassi F, Thin film deposition from hexamethyldisiloxane fed glow discharges, Plasmas and Polymers, 2 (3), 147-164, 1997.
- Schwarz J., Schmidt M. and Ohl A., Synthesis of plasma-polymerized hexamethyldisiloxane (HMDSO)

- films by microwave discharge, *Surface and Coating Technology*, 98 (1-3),859-864, 1998.
21. Morent R., Geyter N.D., Vlierberghe S.V., Dubruel P., Leys C. and Schacht E., Organic-inorganic behaviour of HMDSO films plasma-polymerized at atmospheric pressure”, *Surface and Coating Technology*, 203 (10-11), 1366-1372, 2009.
 22. Zajickova L., Bursikova V., Perina V., Mackova A., Subedi D., Janca J., Simirnov S., Plasma modification of polycarbonates, *Surface and Coating Technology*, 142-144, 449-454, 2001.
 23. Jamieson E.H.H. and Windle A.H., Structure and oxygen-barrier properties of metallized polymer film, *Journal of Material. Sciences*, 18 (1),64-80, 1983.
 24. İç Y.T. ve Yildırım S. ,Improvement of a product design using multi criteria decision making methods with Taguchi method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27 (2), 447-458, 2012.