KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29(3), 2026
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 29(3), 2026
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 25.06.2025
Kabul Tarihi : 06.08.2026

Received Date : 25.06.2025
Accepted Date : 06.08.2026

KAUÇUK KALIPLARINDA KALIPLAMA PERFORMANSI AÇISINDAN EN UYGUN KAPLAMA YÖNTEMİNİN TOPSIS ALGORİTMASI İLE SEÇİMİ

SELECTION OF THE MOST SUITABLE COATING METHOD IN TERMS OF MOLDING PERFORMANCE IN RUBBER MOLDS WITH TOPSIS ALGORITHM

Ahmet TOSUN[1] (ORCID: 0009-0006-3912-8687)
Levent Fevzi PEKMEZCİ[1] (ORCID: 0009-0002-8447-4336)
Ünal ÇEVİK[1] (ORCID: 0009-0004-9469-330X)
Necmettin KAYA[2*] (ORCID: 0000-0002-8297-0777)

[1] Haksan Otomotiv A.Ş., Bursa, Türkiye

[2] Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Necmettin KAYA, necmi@uludag.edu.tr

ÖZET

Kauçuk ve plastik malzemelerden ürün üretiminde kalıplama önemli bir yer tutar. Kalıplardan beklenen performansların sağlanması için kalıp iç yüzeylerinin farklı yöntemler ile ince film şeklinde kaplanması kalıp performansını artırmada önemi rol oynar. Özellikle PVD ince film kaplama yöntemi bu alanda öne çıkmaktadır. Bu yöntemde farklı kaplama malzemeleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada kauçuk kalıplarının kaplanması için seçilen dört farklı kaplama türü, maliyet bilgisini de içeren beş farklı kritere göre değerlendirilmiştir. Test sonuçlarına göre, TiCrN (Titanyum Krom Nitrür) kaplama malzemesi en iyi yapışma durumu ve en düşük sürtünme katsayısı ile öne çıkarken aşınma açısından Krom Nitrür (CrN) kaplama malzemesi en iyi performansı göstermiş ve aynı zamanda maliyet olarak da en düşük olanıdır. Ancak bu kaplama malzemelerinden hangisinin seçileceği birçok kritere bağlıdır. Birçok seçenek arasından çok kritere göre ve önceliklere göre seçim yapılması durumunda TOPSIS algoritması öne çıkan yöntemlerden birisidir. Bu çalışmada en uygun kaplama türü, TOPSIS algoritmasında sıralanarak en uygun olanı seçilmiştir. Algoritmada kriterler oransal olarak önceliklendirilmiş ve dört farklı kaplama türü sıralanmıştır. Algoritma Python programlama dilinde kodlanmış ve seçim işlemi gerçekleştirilmiştir. Algoritma sonunda ilk sırada çıkan kaplama türü TiCrN'dür. Bu kaplama türü gelecekte kauçuk ürünlerin üretileceği kauçuk kalıplarında kullanılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Kaplama, kalıp kaplama, PVD, TOPSIS algoritması

ABSTRACT

Molding plays a significant role in the manufacturing of products made from rubber and plastic materials. To ensure the expected performance of molds, coating the inner surfaces of molds with a thin film using different methods plays an important role in improving mold performance. The PVD thin film coating method, in particular, stands out in this field. Different coating materials are used in this method. In this study, four different coating types selected for coating rubber molds were evaluated according to five different criteria, including cost information. According to the test results, the Titanium Chromium Nitride (TiCrN) coating material stood out with the best adhesion and the lowest friction coefficient, while the Chromium Nitride (CrN) coating material showed the best performance in terms of wear and was also the lowest in cost. However, the choice of which coating material to use depends on many criteria. When selecting from many options based on multiple criteria and priorities, the TOPSIS algorithm is one of the prominent methods. In this study, the most suitable coating type was selected by ranking it using the TOPSIS algorithm. In the algorithm, the criteria were prioritized proportionally, and the four different coating types were ranked. The algorithm was coded in the Python programming language, and the selection process was carried out.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

The coating type that came out on top in the algorithm is TiCrN. This coating type will be used in rubber molds for the production of rubber products in the future.

Keywords: Coating, mold coating, PVD, TOPSIS algorithm

GİRİŞ

Kauçuk ürünlerin üretiminde en yaygın kullanılan yöntemlerden biri kalıplamadır. Kalıplama süreci, kauçuk malzemenin belirli sıcaklık, basınç ve süre koşulları altında şekillendirilmesini sağlayarak hedeflenen geometri ve mekanik özelliklerin elde edilmesine imkân tanır. Kapalı hacim kalıpçılığında en fazla uygulanan üç yöntem; enjeksiyon, kompresyon ve transfer kalıplamadır. Bu yöntemlerin her biri, belirli ürünler ve ürün ihtiyaçlarına göre avantajlar sunar ve bu nedenle kauçuk üretiminde geniş bir yelpazede kullanılırlar. Kalıplama sürecinde aynı zamanda vulkanizasyon işlemi de gerçekleştirilir. Kalıba yerleştirilen kauçuk hammaddesi, kontrollü sıcaklıklarda ısıtılır, bu da kauçuk molekülleri arasında kükürt bağlarının oluşumunu kolaylaştırır ve vulkanizasyon işlemi gerçekleştirilmiş olur. Bu işlemin sonunda malzemenin mekanik özellikleri iyileşir ve çalışma şartlarında ürün performansını korumaya yardımcı olurken aşınmaya ve çevresel faktörlere dayanmasını sağlar. Kauçuk üretim yöntemlerinden en çok kullanılan enjeksiyon yöntemi ile kalıplamada karmaşık geometride birçok ürün üretilebilir. Bu üretim yönteminde, eriyik malzeme kalıp boşluğuna gönderilir ve malzeme kalıbın şeklini alır. Kalıp daha sonra açılarak ürün dışarıya çıkarılır. Ürün üzerinde yapılan son işlemler ile üretim süreci tamamlanmış olur. Enjeksiyon sürecini etkileyen birçok proses parametresi vardır, bunlardan en önemlileri yolluk tasarımı, enjeksiyon sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon süresi, enjeksiyon hızı, kalıp sıcaklığı, kalıpta bekleme zamanı sayılabilir. İstenen kalitede ürün için tüm proses parametrelerinin çalışılıp optimizasyonu gerekir. Aksi takdirde birçok ürün hatası ile karşılaşılabilir. Kalıbın eksik dolması, deformasyon, akış izleri, birleşme izleri bu problemlerden öne çıkanlardır. Aynı zamanda kalıpta zamanla malzemenin birikmesi, kalıp iç yüzeylerinin aşınması, kalıp içinde akmaya karşı direnç, parçanın kalıba yapışarak kalıptan çıkmaması veya zor çıkması söz konusu olabilir. Bu çalışmada bu problemlerden aşınma, parçanın kalıptan zor çıkması, kalıba yapışması, kalıp yüzey pürüzlülüğü dolayısı ile eriyiğin kalıp içinde kolayca akmaması gibi problemlere çözüm olabilecek kalıp yüzeylerinin ince film tabakası ile kaplanması için en uygun kaplama yönteminin seçilmesi üzerinde çalışılmıştır. Bu problemleri etkileyen parametreler araştırılmış ve kalıp kaplaması ile problemlerin giderilmesi çalışılarak alternatifler arasında en uygun ince film kaplama malzemesi seçilmiştir.

Kalıp kirlenmesi olayı genellikle elastomer ürünler kalıplandığında meydana gelir. Kürleme aşamasının sonunda ve ürün çıkarılmasından sonra, malzemenin ince bir tortusu kalıp yüzeyinde kalabilir ve tekrarlanan üretim döngüleriyle bu tortu giderek artar. Bu etkinin büyüklüğü, kauçuğun hamur reçetesi, kalıp yüzeyi kalitesi, kaplama gibi bir dizi faktöre bağlıdır. Literatürde enjeksiyon ile kalıplanan parçanın kalıba yapışmasının nedenlerini araştıran çalışmalar mevcuttur. Hornsby vd. (2006) yaptıkları çalışmada enjeksiyon kalıplama sırasında nitril kauçuk ve floroelastomer kalıp kirlenmesinin gözlemleri sunulmuştur. Özellikle nitril kauçuk kullanım durumunda, kalıp kirlenmesinde oksijenin rolü de vurgulanmıştır. Heideman vd. (2004) kalıp kirlenmesinde çinko oksitin etkili olduğunu vurgulamışlardır. Çinko oksit (ZnO), kükürt vulkanizasyonununu aktive etmek ve böylece vulkanizasyon süresini azaltmak için kauçuk hamur reçetesine eklenen bir bileşiktir. Çinko oksit diğer taraftan çevrimsel yüklemeler altında çalışan parçalardaki ısı üretimini azaltır ve mekanik özelliklerini iyileştirir. Bu çalışmada çinko oksit miktarını azaltmanın kauçuğun kalıba yapışmasını azaltacağını vurgulamışlardır. Bu nedenle birçok çalışmada çinko oksitin kauçuk karışımı içinden azaltma yöntemleri çalışılmıştır. Alam vd. (2022), çinko oksitin, kauçuğun kükürt bazlı vulkanizasyonunda en iyi kürleme aktivatörü olarak işlev gördüğünü, ancak sucul organizmalar için oldukça toksik bir malzeme olarak kabul edildiğini belirtmişlerdir. Bu nedenle çinko oksit miktarının azaltılarak magnezyum oksitin de (MgO) kullanılabileceğini önermişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde, kürleme süresi, kopma uzaması ve kırılma tokluğu gibi özelliklerdeki bazı ilerlemeler göz önüne alındığında, magnezyum oksitin kürleme aktivatörü olarak geleneksel olarak kullanılan çinko oksit ile rekabet edebileceğini ortaya koymuştur. Çinko oksit miktarının azaltılması ile ilgili çalışmalar, Habeeb vd. (2019), Pysklo vd. (2007) ve Heideman vd. (2006) tarafından da gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, çevreye zararlı olan çinko oksit miktarının azaltılabileceği ve magnezyum oksit ve kalsiyum oksitin (CaO), çinko oksitin alternatifi olabileceği önerilmiştir.

Liu vd. (2021) kalıp kirlenmesine karşı kalıp temizliğinde mekanik temizleme için partikül püskürtme (kum, seramik vb.) kullanılabileceğini, Novan vd. (2022) ise kalıbın güçlü asitlere veya güçlü alkali sıvılara daldırılarak kimyasal temizlik yöntemlerinin endüstride sıklıkla kullanılan geleneksel yöntemler olduğunu vurgulamıştır. Ancak hem

mekanik hem de kimyasal temizleme yöntemlerinin, sökme ve temizleme için duruş süresi olarak ek maliyetlere yol açması ve kalıp yüzeyinde ciddi hasarlara neden olması söz konusudur.

Kauçuk ile kalıplamada, yüksek sıcaklık ve basınç altında gerçekleşen tekrarlı vulkanizasyon döngüleri kalıp yüzeylerinde zamanla aşınmaya yol açmaktadır. Bu aşınma genellikle mekanik sürtünme, kauçuk bileşiğinde bulunan dolgu maddelerinin (örneğin karbon siyahı veya silika) aşındırıcı etkisi ve kimyasal degradasyonun birleşimi sonucu ortaya çıkar. Yüzeyde meydana gelen mikro çatlaklar ve pürüzlülük artışı, kalıp yüzey enerjisini değiştirerek kauçuk ürünün yapışma eğilimini artırmakta, bu da hem kalıp kirlenmesini hızlandırmakta hem de ürün kalitesini olumsuz etkilemektedir (Jiang ve Kong, 2023).

Kalıp kirlenmesi nedeniyle parçanın kalıba yapışmasının engellenmesi ve parçanın kalıptan kolayca çıkarılması için önerilen bir diğer yol ise, kalıp iç yüzeylerinin uygun yöntemler ile kaplanarak zamanla kirlenmeyi azaltma ve kalıp ömrünü artırma amaçlı kaplama yapılmasıdır. Kalıp kaplama ile beraber kalıbın içine belli peryotlar ile sıkılan kalıp ayırıcı kimyasallar da sıklıkla kullanılmaktadır.

Kalıp iç yüzeylerinin ince film tabaka ile kaplanması konusunda literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. D'Avico vd. (2018) örnek bir test numunesini beş farklı fiziksel buhar biriktirme (Physical Vapor Deposition - PVD) yöntemi ile kaplayarak korozyon, kaplama yapışma, sertlik ve yüzey pürüzlülüğü açısından testlere tabi tutmuşlardır. Titanyum Nitrür (TiN) tabanlı PVD kaplamanın testler sonucunda diğer kaplama yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Zhang vd. (2022) araç lastiği kalıplarında altı farklı kaplama tekniği uygulamış, kaplamasız kalıplara göre %24 daha az yapışma tespit etmişlerdir. Fluorinated Ethylene Propylene (FEP) ve perfloroalkoksi (PFA) kaplamaların kalıp kirlenmesi ve parçanın kalıba yapışmaması açısından en uygun kaplama çeşitleri olduğu sonucuna varmışlardır. Yine lastik tekerlek endüstrisinde kullanılan kalıplarda polytetrafluoroethylene (PTFE) malzemesi ile 20-25 µm kalınlıkta kaplanan kalıplarda kalıpta birikmenin önlendiği ve kalıpların temizlenmeden üretim döngüsünde %400 artış sağlandığı ifade edilmiştir. Yang vd. (2024) kauçuk sektöründe kullanılan kalıp ayırıcı ajanların çevre dostu formlarının geliştirilmesindeki güncel araştırmaları incelenmişlerdir. Çevre dostu kalıp ayırıcı ajanlar arasında, su bazlı sistemler, biyolojik kökenli bileşenler, yenilenebilir hammaddeler, doğada kolay parçalanabilen kimyasal yapıdaki bileşenlerin öne çıktığı vurgulanmıştır. D'Avico vd. (2020) yaptıkları çalışmada, dört farklı PVD kaplanmış kalıp ve üç farklı kalıp ayırıcı spray kullanmışlar ve kalıbın nemlendirilebilmesi durumunu incelemişlerdir. PVD kaplamaları ile kalıp ayırıcı spreylar arasındaki etkileşimin, kalıp kirlenmesini önlemede ve üretim verimliliğini artırmada kritik bir rol oynadığı ortaya konmuştur. Özellikle Alüminyum Titanyum Nitrür (AlTiN) ve TiN kaplamaları, yüksek yüzey enerjileri sayesinde kalıp ayırıcı spreylar ile daha uyumlu bulunmuştur. Sasaki vd. (1999) kalıp yüzey pürüzlülüğü ve farklı termoplastik malzemelerin parça çıkarma kuvvetleri üzerindeki etkisini deneysel olarak değerlendirmiştir. Bu çalışma, enjeksiyon kalıplamada kalıp yüzey pürüzlülüğünün ve kullanılan malzemenin, parça çıkarma kuvvetleri üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Tillman vd. (2019) yaptıkları çalışmada kalıptan çıkma kuvveti açısından PVD kaplamaları incelemişlerdir. CrN ve Alüminyum Krom Nitrür (AlCrN) PVD kaplamalarının, uygun mekanik son işlemlerle birlikte, enjeksiyon kalıplama işleminde ejeksiyon kuvvetlerini azaltmada etkili bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Literatürde genel olarak kauçuk kalıplama proses parametrelerinin optimizasyonu ile ilgili birçok çalışma mevcut olmakla beraber, proses sonunda parçanın kalıba yapışarak çıkmaması, zor çıkması veya çıkarken yüksek çekme kuvveti nedeniyle parçanın hasar görmesinin engellenmesi ile ilgili çalışmaların az sayıda olduğu göze çarpmıştır. Bu problemin giderilmesi için bazı çözümler önerilse de sistematik bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Kalıp kaplama ile kalıbın ömrünün artmasının yanında parçanın kalıba yapışma durumunu veya kalıptan çıkarma kuvvetini inceleyen çalışmalarda genellikle PVD kaplamaların öne çıktığı görülmektedir. Kaplama seçimi için farklı kaplamalar denenerek testler ile en uygun kaplama önerilerinin yapıldığı görülmektedir. Farklı kaplamaların farklı performans kriterlerine göre ve önceliklendirilerek en uygun yöntemin seçilmesi için bu çalışmada TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Çok kriterli karar verme tekniklerinden birisi olan TOPSIS yöntemi literatürde birçok çalışmada kullanılmıştır. Çamaşır makinesi kalitesinin yükseltilmesi için ürün kalitesine etki eden faktörlerin hangi seviyelerinde en iyi sonuca ulaşıldığının belirlenmesi (İç ve Yıldırım, 2011), klima seçimi (Ertuğrul ve Özçil, 2014), biyogaz üretimindeki en iyi enerji bitkisinin seçilmesi (Yıldırım ve Karadöl, 2025), bor karbür katkılı epoksi esaslı nanokompozitlerin seçimi (Özakın vd. 2023), otobüs tasarımında koltuk modeli seçimi (Özmen ve Antmen, 2024), yük vagonu bojisi malzeme seçimi (Çetin ve Alvalı, 2020), rüzgar türbini kule seçimi (Yiğit ve Akpınar, 2021), güneş enerjisi sistemlerinde panel seçimi (Aslay, 2021), sarsma tablası test modeli seçimi, 2023), hava aracı seçimi (Kiracı

ve Bakır, 2017) bu çalışmalara örnek gösterilebilir. Çok farklı alanlarda çok kriterli bir durum için en iyinin seçilmesi gerekiyor ise TOPSIS yöntemi öne çıkan bir yöntemdir.

Bu çalışmada, kauçuk kalıplarında kalıp ömrünün artırılması ve parçanın kalıptan çıkmasını zorlaştıran faktörlerin etkisinin azaltılması için en uygun kalıp kaplama yönteminin seçimi için çok kriterli karar verme tekniği kullanılmıştır. Dört farklı PVD ince film kaplama işlemi dairesel test numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiş ve beş farklı kriter üzerinden TOPSIS yöntemi ile en uygun kaplama yöntemi seçilmiştir. Literatürde farklı kalıp kaplama yöntemlerinin birbiri arasında karşılaştırmalarını içeren çalışmalar az sayıda olmakla beraber sistematik ve çok kriterli bir yöntem ile en uygun kaplama yönteminin seçildiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. Kaplama maliyeti de karar verme aşamasında önemli bir parametre olup, bu çalışmada kriterler arasına bu parametre de dahil edilmiştir. Kalıplarda zamanla kalıbın kirlenmesi ve iş parçasının kalıba yapışarak kalıptan zor çıkması problemine çözüm olarak sunulan hamur reçetesinin değiştirilmesi ve kalıp ayırıcıların kullanılması hem parçanın mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemekte, hem de proseste durmalara ve zaman kaybına neden olabilmektedir. Bu çalışmada ise daha kalıcı çözüm sunabilecek, kalıp iç yüzeylerinin ince PVD film tabakası kaplama yöntemlerinden CrN, TiN, krom karbon nitrür (CrCN) ve TiCrN seçilmiş ve kaplamalar kalınlık, aşınma, sürtünme katsayısı, kaplamanın kalıba yapışması ve fiyat kriterleri açısından değerlendirilmiş ve en uygun kaplama yöntemi seçilmiştir.

KAUÇUK KALIPLAMA İLE PARÇA ÜRETİMİ

Kalıplama ile kauçuk ürünlerin üretimi endüstride oldukça yaygındır. Parçanın geometrisine bağlı olarak en uygun kalıplama yöntemi ile parçalar üretilebilir. Kompresyon kalıplama ile üretimde kauçuk hamuru, bir kalıbın içerisine yerleştirilir ve üzerine ısı ve basınç uygulanarak istenilen şekle getirilir. Bu yöntem, düşük maliyetli ve basit kalıplar kullanılarak düşük hacimli üretimler için idealdir. Transfer kalıplama ise kauçuğun bir transfer odasına yerleştirilmesi ve buradan kalıba enjekte edilmesi ile gerçekleştirilir. Bu yöntem, kompresyon kalıplamaya göre daha karmaşık ve detaylı parçaların üretiminde tercih edilir. Malzeme kaybını azaltır ve daha çok hassas parçaların üretiminde kullanılır. Kauçuk enjeksiyon üretim yöntemi ise en çok kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Bu proseste, makineye beslenen kauçuk karışım, belli bir sıcaklığa sahip vida haznesinden geçerken yarı akışkan kıvamlı bir yapıya doğru yumuşatılır. Belli bir basınç ve hız altında makinenin püskürtme memesinden kalıp içerisindeki kapalı hacim içine enjekte edilir. Kapalı hacimde eriyik malzeme kalıbın şeklini alır ve aynı zamanda vulkanize olur (kürlenir). Kürlenme bittikten sonra kalıp açılır, parça kalıptan çıkarılarak son ürün elde edilir. Yüksek hacimli üretim ve karmaşık geometrilere sahip parçalar için uygundur. Bu yöntem, hızlı üretim sağlar ve otomasyon için elverişlidir. Boru, hortum ve profil gibi ürünlerin üretimi için ise ekstrüzyon kalıplama kullanılır.

Enjeksiyon ile üretim yönteminde kauçuk karışımı, kalıp gözünü doldurmak için basıncın etkisiyle hareket eder. Kauçuk karışımın iyi akabilmesinde kalıp yüzeyinin etkisi büyüktür. Örneğin yüzey parlaklığı arttıkça kauçuk karışımın kalıp gözü içerisinde akma performansı da artar. Aynı zamanda kauçuk karışımın içeriği nedeniyle zamanla kalıp çeliğini aşındırabilir. Kalıbın ömrü olumsuz etkilenir ve istenmeyen bir durumdur. Kalıp ne kadar geç aşınırsa o kadar az bakım maliyeti oluşur. Aynı zamanda ölçüsel ve geometrik olarak da negatif yönde etkilenir. Parlatma ve kaplamayla birlikte çelik yüzeyi pürüzsüzleşir.

Kürleme sonrası parçanın kalıp yüzeyine yapışması ve kalıptan zor çıkması sıklıkla yaşanan bir durumdur. Zamanla kauçuk karışımı kalıp yüzeyine yapışabilmekte ve kalıp boşluğunun belli bölgelerinde kirlilik zamanla artarak ürünün eksik/hatalı çıkmasına neden olabilmektedir. Bu durum kalıp kirlenmesi olarak isimlendirilir. Uygun parça üretimi için kalıbın belli aralıklarla temizlenmesi gerekir. Bunun için genellikle kumlama olarak tabir edilen işlemler uygulanır. Bu işlem için fındık kabuğu ve mısır koçanı vb. yüzeye az zarar verecek şekilde temizleme malzemeleri kullanılır. Kumlama dışında bir diğer yöntem de kuru buz uygulamasıdır. Kuru buz temizlik makineleri ile kalıp yerinde kalıp sıcak iken uygulama yapılabilmektedir. Ancak bu yöntemde üretime ara verilmekte ve iş gücü kaybı yaşanabilmektedir. Ayrıca kalıp iç yüzeylerine zarar verme durumu da ortaya çıkabilmektedir. Bu duruma çözüm olarak kalıp iç yüzeylerinin uygun bir şekilde ince film tabakası ile kaplanarak kauçuk karışımın kalıp yüzeyine yapışmasının azaltılması bu duruma bir çözüm olabilmektedir.

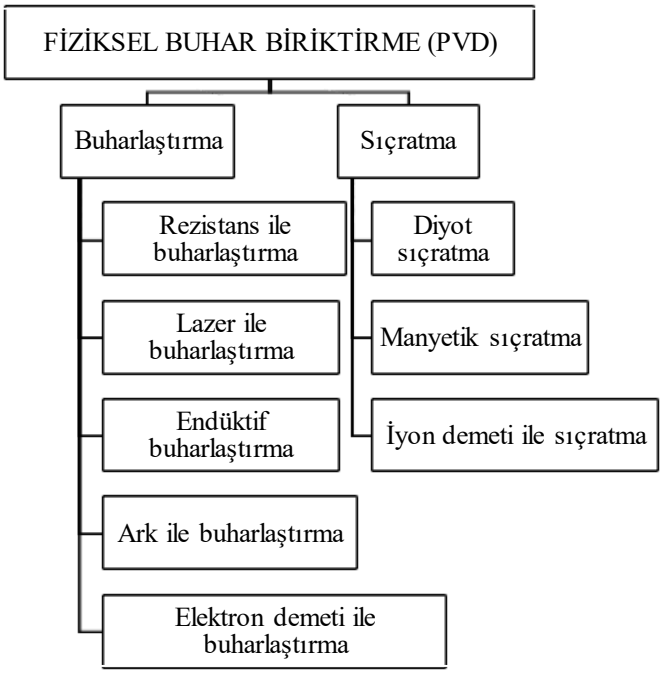
KAPLAMA YÖNTEMLERİ

Kalıplarda yüksek hızlarda ve kaliteli üretim hedefleri nedeniyle kaplama ihtiyacı kaçınılmazdır. Kaplamanın amacı bir malzemenin yüzeyinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirmektir. Sementasyon (Yamanel,2025), nitrürleme (Yamanel ve Bican, 2025) ve borlama (Yamanel vd.,2023) gibi bir malzemenin yüzeyine başka bir malzemenin difüzyonu ile yüzeyde bileşik bir tabaka oluşturmaya dayalı yöntemlere ek olarak, yüzeye başka bir malzemenin

eklenmesi veya çökeltilmesi temelli teknikler de vardır. Kimyasal buhar biriktirme (CVD), fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve sol-jel yöntemleri bunların en önemlileridir.

PVD Yüzey Kaplama

PVD yöntemi, yüksek sıcaklıkta vakum altında tutulan kaplama malzemesinin yüzeyindeki atomların buharlaştırılarak, kaplanacak yüzeye atomik veya iyonik bileşikler halinde biriktirilmesi esasına dayanır. PVD kaplama yöntemleri Şekil 1'de verilmiştir (Karakuş ve Koç, 2023).



Şekil 1. PVD Kaplama Yöntemleri

PVD yöntemi kullanılarak yüzey kaplama için kaplama proses sıcaklığı 500°C'den azdır, dolayısıyla yüksek sıcaklıkta temperlenmiş kalıp çelikleri için kalıp ölçülerinde önemli bir değişiklik olmaz. Kaplama, kalınlığı 2 ila 8 µm arasında değişen ve yüksek sertliğe sahip ince bir film tabakası üretir. Sertlik 4500 HV'ye kadar çıkar. Sonuç olarak, kalıbın aşınma ve yıpranmaya karşı direnci büyük ölçüde artar. Ek olarak, dupleks işleme olarak bilinen difüzyon işlemleriyle birleştirildiğinde, PVD kaplama kalıplarda sarma yapışma mukavemetini artırmanın yanı sıra özellikle kalıp yüzeyinde abrazif aşınma direnci artabilir. PVD kaplamasında TiN, CrN, Titanyum Karbonitrür (TiCN), Zirkonyum Nitrür (ZrN), AlTiN ve DLC (Elmas Benzeri Karbon) gibi kaplama alaşımları kullanılır.

PVD yöntemi ile kalıpların yüzey kaplanması sonucunda kalıp yüzeyi ile plastik malzeme arasındaki sürtünme en aza indirilir. Azaltılmış sürtünme, kalıplanmış parçanın daha kolay çıkarılmasını sağlar. Kauçuk kalıplama sırasında ortaya çıkan ve korozyona sebep olan gazlardan koruyan bir bariyer oluşturur ve yapışmayı azaltır. Ayrıca PVD kaplamalar, ısıyı tutarlı bir şekilde dağıtan termal bariyerler sağlayabilir, bu da uniform soğuma sürecini sağlarken kalıbın hızlı termal genleşme ve büzülme oluşumunu engeller. Azaltılmış sürtünme, kalıplanmış parçanın daha kolay çıkarılmasını sağlar.

CVD Yüzey Kaplama

CVD tekniğinin temelinde, kaplanmak istenen metalin buharlaştırılması, taşıyıcı inert veya reaktif bir gaz vasıtasıyla vakum odasına taşınması ve daha sonra sıcaklığın bir sonucu olarak oluşan kimyasal reaksiyon yoluyla önceden ısıtılmış bir alt tabaka üzerine metal veya bileşik olarak biriktirilmesi yatmaktadır.

Kaplama işlemi için parçanın 800-1000 ^{o}C arasındaki bir sıcaklığa ısıtılması gerektiği gerçeği CVD yönteminin en büyük dezavantajıdır. Yüksek sıcaklıklar nedeniyle kaplama ile kaplanacak parça arasındaki iyi bir yapışma bağı sağlanır, ancak ısıl işlem görmüş parçalarda ölçülerin değişmesi ve sertlik kaybı nedeniyle uygulama sınırlamaları mevcuttur. PVD ile daha ince kaplamalar (1-5 mikron) oluşturulurken, CVD ile ise daha kalın kaplamalar (5-50 mikron) oluşturabilir. PVD vakum, CVD ise gaz ortamında gerçekleştirilir (İlivan, 2012).

Sol-Jel Yüzey Kaplama

Parça yüzeylerinde ince film tabakası oluşturmak için kullanılan bir diğer yöntem sol-jel yöntemidir. Bu kaplama işlemi, katı malzemelerin küçük moleküllerden üretildiği bir işlemdir. Bu işlem, monomerlerin, ayrı parçacıklardan veya ağ polimerlerinden oluşan entegre bir ağın (jel) öncüsü görevi gören kolloidal bir çözeltiye (sol) dönüştürülmesini sağlar. Homojen ve saf filmlerin düşük ısılarda hazırlanabilmesi ve enerji tasarrufu sağlanabilmesi, değişik geometrilere sahip parçaların bu metot kullanılarak homojen bir şekilde kaplanabilmesi bu yöntemin öne çıkan avantajlarıdır (Tosun vd., 2020).

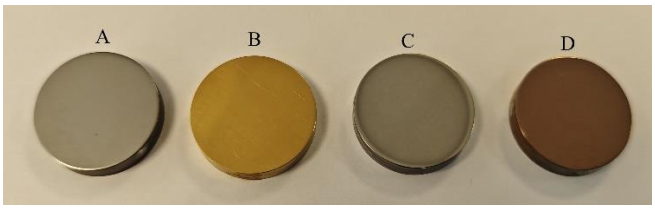
Bu çalışmada, kaplama yöntemlerinden PVD kaplama yöntemi seçilmiştir. Diğer kaplama yöntemlerine göre; düşük sıcaklıklarda uygulanabilirliği, çevre dostu bir işlem olması, homojen ve kontrollü kaplama yapılabilmesi, yüksek sertlik ve daha düşük sürtünme katsayısı elde edilebilmesi ve kaplama sonrası son işlem ihtiyacının az olması bu seçimde etkili olmuştur. Ayrıca uygulama açısından daha kolay bir prosestir ve sektörde PVD kaplama yapan birçok firma mevcuttur.

MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada kalıp kaplama yöntemlerinden PVD kaplama seçilmiş ve dört farklı uygulama üzerinde durulmuştur. Bunlar CrN, TiN, CrCN ve TiCr kaplama yöntemleridir. Parçanın kalıba yapışma durumunu ve kalıp ömrünü etkileyen dört farklı kalıp performans kriterine (kaplama kalınlığı, aşınma, sürtünme katsayısı, kaplamanın kalıba yapışması) ek olarak kaplama maliyeti de kriterler arasında yer almıştır. Beş farklı kritere göre test numunleri hazırlanarak testler gerçekleştirilmiştir. Testler test numuneleri üzerinde ilgili standartlara göre yapılmıştır.

Kaplama Testleri

Kaplamaların belirlenen kriterlere göre testlerinin yapılması için 1.2311 takım çeliği malzemesinden üretilmiş test numuneleri kullanılmıştır. 15 mm yarıçapında ve 5 mm kalınlığında 16 adet test numunesi hazırlanmıştır (D'Avico vd., 2018). Test numuneleri kaplamadan önce parlatılmış ve kaplamaya uygun hale getirilmiştir. Dört farklı kaplama yöntemi ile hazırlanan test numuneleri Şekil 2'de verilmiştir.



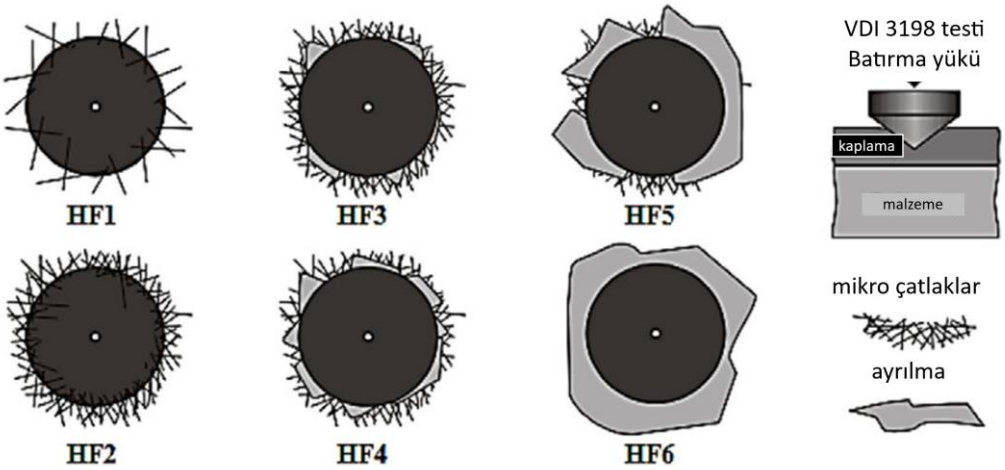
Şekil 2. Kaplanmış Test Numuneleri (**A**: CrN, **B**: TiN, **C**: CrCN, **D**: TiCrN)

Kaplama Kalınlığı ve Kalıba Yapışma Testleri

Kaplamanın numuneye yapışma derecesi ve kaplama kalınlıkları ölçülmüştür. Kaplama kalınlığı Calotest cihazında (Anton Paar, Calotest) µm biriminde ölçülmüştür. Kalınlık ölçüm cihazı Şekil 3.a'da görülebilir. Kaplamanın test numunesine yapışması (adhezyon) ise VDI 3198 standardına göre değerlendirilmiştir. Daimler-Benz tarafından geliştirilen ve VDI 3198 Alman standardına göre tanımlanan bu test yöntemi dünyada en çok kullanılan ince film adhezyon ölçüm tekniğidir. Test cihazı (Digirock, DR3) Şekil 3.b'de verilmiştir.

Şekil 3. a. Kaplama Kalınlık Ölçüm Cihazı, **b.** Kaplama Yapışma Ölçüm Cihazı

Kaplamanın yapışma derecesini ölçen yöntem, kaplama yüzeyi üzerinde Rockwell-C ucuyla 150 kg yük altında iz oluşturma prensibine dayanmaktadır. Oluşan HRc izi, optik mikroskopta x100 büyütme ile incelenir ve iz çevresindeki kaplama çatlama ve dökülmeler, standart sınıflandırılmış örneklerle (HF1-HF6) karşılaştırılarak (Şekil 4), kaplamanın taban malzemeye yapışma mukavemeti hakkında bilgiye ulaşılır. HF1 ile HF6 arası toplam 6 yapışma grubuna karşılık gelmektedir. HF1- HF4 arası yapışmalar kabul edilebilir iken, HF5 ve HF6 kabul edilemez, yetersiz kaplama adhezyonu anlamına gelmektedir.



Şekil 4. VDI 3198 Test Standardı Sınıflandırmaları

Kaplama Aşınma ve Sürtünme Katsayısı Testleri

Kaplamasız ve kaplanan numuneler üzerinde aşınma ve sürtünme katsayısı testleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri 3 N yük altında toplam kayma mesafesi 25 m ve kayma iz uzunluğu 5 mm olacak şekilde karşıt hareketli test düzeneği ile gerçekleştirilmiştir (Bruker, UMT Tribolab) (şekil 5). Aşınma test parametreleri kullanılan cihazın kapasitesi, yüzeyde iz oluşumunun olup olmaması ve daha önce benzer numunelere yapılan testlerden yola çıkılarak belirlenmiştir.

Şekil 5. Aşınma ve Sürtünme Katsayısı Test Düzeneği

Kaplama Birim Maliyetleri

Kaplama tipi seçiminde fiyat bilgisi de kaplama tipinin seçiminde önemlidir. Farklı kriterlere göre en uygun kaplama tipinin seçiminde fiyat bilgisinin de etkisi olması için kaplama birim fiyat bilgileri de dikkate alınmıştır. Kaplama tiplerinin birim fiyat bilgileri oransal olarak şu şekildedir:

Numune A: Krom Nitrür (CrN): 1 birim

Numune B: Titanyum Nitrür (TiN): 1 birim

Numune C: Krom Karbon Nitrür (CrCN): 1,35 birim

Numune D: Titanyum Krom Nitrür (TiCrN): 1,25 birim

Kaplama birim fiyatları arasında en pahalı olan Numune C (CrCN) kaplamasıdır.

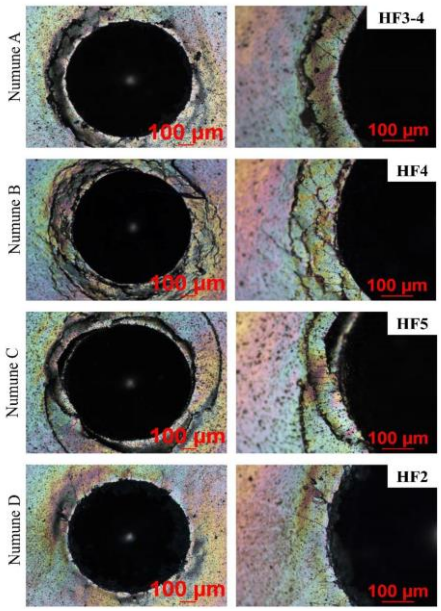
KAPLAMA TEST SONUÇLARI

Kaplama kalınlığı ve kaplamanın kalıba yapışma testleri VDI 3198 standardına göre yapılmıştır. Bu testten elde edilen optik mikroskop görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir. Bu görüntülere göre Şekil 4'te verilen standart sınıflandırılmış görüntülerle eşleştirilerek her bir kaplamanın yapışma durumu belirlenmiştir. Her bir kaplamanın kaplama kalınlığı ve numuneye yapışma durumu özetlenerek Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kaplama Kalınlık ve Yapışma Test Sonuçları

Kaplama türü	Ortalama Kaplama Kalınlığı (µm)	Adhezyon HF sınıflandırması	Sonuç
Numune A CrN	5,09	HF3	İzin belli bölgesinde çatlak ve küçük ayrılmalar var. Kabul edilebilir seviyede.
Numune B TiN	1,75	HF4	İz etrafında çatlaklar ve küçük ayrılmalar var. Kabul edilebilir seviyede.
Numune C CrCN	4,43	HF5	İz etrafında büyük çatlaklar ve büyük ayrılmalar var. Kabul edilebilir seviyede değil.
Numune D TiCrN	7,19	HF2	İz etrafında kabul edilebilir seviyede çatlaklar var, pullanma ve ayrılma yok. İyi seviyede.

Tablo 1'deki sonuçlar değerlendirildiğinde D numunesi (TiCrN) en iyi yapışma durumu ile öne çıkmıştır. Numunelere ait aşınma hacimleri (mm^3) ve sürtünme katsayıları Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 6. Kaplamaların Test Sonrası Optik Mikroskop Görüntüleri

Tablo 2. Kaplama Aşınma ve Sürtünme Katsayısı Test Sonuçları

Numune	Aşınma Hacmi (mm^3)	Sürtünme katsayısı
Kaplamasız	0,1006	0,63
Numune A CrN	0,0612	0,56
Numune B TiN	0,0785	0,62
Numune C CrCN	0,0970	0,56
Numune D TiCrN	0,0789	0,48

Tablo 2'deki sonuçlara göre en iyi aşınma direnci A numunesinde (CrN) görülmüştür, çünkü aşınma hacmi en düşük değerine sahiptir. C numunesi (CrCN), kaplamaya rağmen kaplamasız çeliğe oldukça yakın bir aşınma sergilemiştir, yani kaplamanın aşınma açısından yeterince etkili olmadığı söylenebilir. Sonuçlar sürtünme açısından değerlendirildiğinde, D numunesi (TiCrN) en düşük sürtünme katsayısına sahiptir, yani en iyi kayganlık ve sürtünme azaltma etkisi sağlamaktadır. B numunesi (TiN) neredeyse kaplamasız çelik kadar yüksek sürtünme göstermektedir, yani kaplama tribolojik açıdan çok fayda sağlamamıştır.

TOPSIS ALGORİTMASI İLE EN UYGUN KAPLAMA YÖNTEMİNİN SEÇİLMESİ

Test numuneleri üzerinde yapılan test sonuçlarına ilave olarak kaplama birim maliyeti de göz önüne alındığında her testte farklı kriterlere göre öne çıkan farklı kaplama yöntemleri bulunmaktadır. Ayrıca her bir kriterin kendi arasından önem derecesi de göz önüne alındığında mutlak açıdan en iyi kaplama yönteminin seçimi için çok kriterli bir seçim yöntemi gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılabilecek çok kriterli karar verme tekniklerinden TOPSIS yöntemi seçilmiştir. Bu yöntemin dışında GRA ve VIKOR gibi başka yöntemler de mevcuttur. TOPSIS yöntemi, kullanımının basitliği sayesinde çok kriterli problemleri çözmede yaygın olarak kullanılır. Ayrıca rasyonelliği ve kolay

kavranabilirliği, hesaplamadaki basitliği ve değerlendirme kriterlerinin ağırlıklandırılmasına imkân vermesi gibi avantajları nedeniyle literatürde en çok kullanılan tekniklerden biridir (Ertuğrul ve Özçil, 2014).

Algoritmada her bir performans kriterinin ağırlık katsayıları da kullanılmaktadır. Birçok kriter açısından uygulamaya göre ağırlıklar (w) önem derecesine göre belirlenebilir. Bu çalışmada toplam ağırlık değeri 1 olacak şekilde ağırlık dereceleri belirlenmiştir. En yüksek ağırlık aşınma kriterine, en düşük ise kaplama kalınlığına verilmiştir. Ayrıca her bir kriterin maksimum veya minimum yapılma durumu da belirlenmiştir. Buna göre;

maksimum kaplama kalınlığı, w_1= 0,10
minimum aşınma, w_2=0,30

minimum sürtünme katsayısı w_3=0,25

minimum yapışma HF derecesi, w_4=0,20

minimum birim fiyat, w_5=0,10

olarak belirlenmiştir.

TOPSIS Algoritmasının adımları şu şekildedir (Ertuğrul ve Özçil, 2014):

Adım 1: Karar matrisi (Aij) oluşturulması ve her bir kriterin önem derecesine göre ağırlık katsayılarının belirlenmesi: Başlangıç matrisinde karar vermede kullanılacak alternatifler satırlarda, karşılaştırma için kullanılacak kriterler ise sütunlarında yer alır.

Karar matrisi: $A = (a_{ij})_{mxn}$ m: Seçenekler, n: Kriterler

$$A_{mxn} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ . & . & . & . \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ağırlık vektörü: $w = \{0{,}10,\ 0{,}30,\ 0{,}25,\ 0{,}20,\ 0{,}10\}$

Buna göre bu çalışmada ele alınan problemin karar matrisi şu şekilde elde edilmiştir:

Tablo 3. Başlangıç Karar Matrisi Tablosu

	Kaplama kalınlığı	**Aşınma**	**Sürtünme katsayısı**	**Kaplama yapışma**	**Birim fiyat**
CrN	5,09	0,0612	0,56	3	1,00
TiN	1,75	0,0785	0,62	4	1,00
CrCN	4,43	0,0970	0,56	5	1,35
TiCrN	7,19	0,0789	0,48	2	1,25

Adım 2: Normalize edilmiş karar matrisinin oluşturulması (R_{ij}) : Başlangıç karar matrisinin elemanları aşağıda verilen formül ile normalize edilir.

$$R_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} a_{ij}^2}} \quad (2)$$

Adım 3: Ağırlıklı standart karar matrisinin oluşturulması (Vij): Rij matrisinin her satırı ağırlık vektörü (w) ile çarpılarak ağırlıklandırılmış matris elde edilir.

$$V_{ij} = w.R_{ij} \quad (3)$$

Adım 4: İdeal ve negatif ideal çözüm değerlerinin elde edilmesi: Pozitif ve negatif ideal çözüm vektörleri elde edilir. Pozitif ideal çözüm (V^+), V matrisinin sütunlarının en büyük değerlerinden (eğer kriter maksimizasyon amaçlı ise), negatif ideal çözüm (V^+), ise V matrisinin en küçük değerlerinden (eğer kriter maksimizasyon amaçlı ise) oluşur.

Adım 5: İdeal ve ideal olmayan noktalara uzaklıkların hesaplanması: İdeal ve ideal olmayan noktalara olan uzaklık değerleri hesaplanırken, koordinat düzleminde x ve y koordinatları bilinen iki nokta arasındaki mesafenin bulunmasında kullanılan yöntem kullanılır.

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(V_{ij} - V_j^-)^2} \qquad S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(V_{ij} - V_j^+)^2} \tag{4}$$

Adım 6: İdeal çözüme göreceli yakınlık değerlerinin bulunması:

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{(S_i^+ + S_i^-)} \tag{5}$$

TOPSIS yönteminde verilen algoritma adımlarını uygulamak üzere Python programlama dilinde bir program yazılmış ve hesaplamalar bu program üzerinden gerçekleştirilmiştir. Program bilinen sonuçlar ile test edilerek doğrulanmıştır. Bu çalışmadaki veriler ile 6. adım sonunda elde edilen ideal çözüme göre yakınlık sonuç matrisi Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. TOPSIS Algoritması ile Elde Edilen Sonuç Değerleri

	S_i^+	S_i^-	C_i^*	Sıralama
CrN	0,03876	0,09636	0,71	2
TiN	0,08919	0,04958	0,36	3
CrCN	0,11303	0,02996	0,21	4
TiCrN	0,03695	0,10863	0,75	1

Tablo 4'teki sonuçlar incelendiğinde ideal çözüme göre yakınlık (Ci*) değerleri maksimum değerden minimum değere göre sıralama yapılarak tablonun son kolonundaki sıralama değerleri elde edilmiştir. Ci* değeri en yüksek olan değer en iyi, en küçük olan değer ise tercih sıralamasında en sonda kalan seçim olmuştur. Bu durumda tercih sıralamasında ilk sırada yer alan kaplama türü TiCrN' dür. Buna en yakın seçilebilecek kaplama türü ise CrN'dür. En son sırada yer alan ve değerlendirme kriterleri açısından en kötü performansı gösteren kaplama türü ise CrCN olmuştur. Böylece 4 farklı PVD kaplama seçeneği, 5 farklı kritere göre ve bu kriterlerin öncelik sırasına göre TOPSIS algoritması ile sıralanmış ve en uygun kaplama yöntemi belirlenmiştir. Bu çalışmanın devamında seçilecek bir ürün kalıbı için seçilen kaplama türü uygulanarak testler ile kalıp ömrü ve kauçuk malzemenin kalıba yapışma durumu değerlendirilecektir.

SONUÇLAR ve YORUMLAR

Bu çalışmada, kauçuk ürünlerin kalıp iç yüzeylerinin seçilen dört farklı PVD kaplama türü içinden en uygun olanının çok kriterli karar verme tekniklerinden birisi olan TOPSIS yöntemiyle seçilmesi ile ilgilidir. PVD yöntemi ile kaplama işlemi birçok endüstriyel ürünün yüzeylerinin ince film ile kaplanmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Kalıp iç yüzeylerinin kaplanması ile kalıp ömrü artmakta, kauçuk eriyik kalıp içinde kolayca akmakta, ısı kalkanı ve bariyer oluşturarak kalıp iç yüzeylerini korozyona karşı korumaktadır. Ayrıca kauçuk malzemenin kürlenme sonrası kalıptan çıkmasını da kolaylaştırmaktadır. Birçok PVD kaplama türü içinden endüstriyel olarak uygulanan dört farklı kaplama türü seçilmiş, disk şeklinde üretilen numuneler üzerine bu kaplama türleri uygulanmıştır. Kaplama maliyeti kriterinin de yer aldığı beş farklı kriter oransal olarak önceliklendirilerek TOPSIS algoritması ile en uygun PVD kaplama türü seçilmiştir. En uygun kaplama türü olarak TiCrN seçilmiştir. Bu kaplama türü, çalışmanın devamında örnek bir kalıp için uygulanarak ömür ve performans testlerine tabi tutulacaktır. TOPSIS algoritmasının uygulanmasında Python programlama dili ile bir program yazılarak en uygun seçimin yapılması sağlanmıştır. Kriterlerin önceliklendirilmesi birçok uygulama için farklı olabileceğinden kriterlerin oransal ağırlıklarının değiştirilmesi ile sıralamanın nasıl değiştiğinin gözlenmesi bu sayede mümkün olabilir. Bu çalışmanın sonuçları, kaplama seçiminde karar verme aşamasında olan araştırmacılar için referans olabilir.

Yapay Zeka Katkı Beyanı

Bu makale tamamen herhangi bir yapay zeka aracının yardımı olmadan yazılmış, düzenlenmiş, analiz edilmiş ve hazırlanmıştır. Metin, veri analizi ve şekiller dahil tüm içeriğin yalnızca yazarlar tarafından oluşturulduğunu beyan ederiz.

KAYNAKLAR

Alam, M. N., Kumar, V., & Park, S.-S. (2022). Advances in rubber compounds using ZnO and MgO as co-cure activators. Polymers, 14, 5289. https://doi.org/10.3390/polym14235289

Aslay, F. (2021). TOPSIS çok kriterli karar verme yöntemi ile güneş enerjisi sistemlerinde panel seçimi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 28, 548–551. https://doi.org/10.31590/ejosat.1008727

Çetin, M. H., & Alvalı, G. T. (2020). Yük vagonu bojisi tasarımında çok kriterli karar verme teknikleri ile malzeme seçimi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 91–104. https://doi.org/10.21923/jesd.512002

D'Avico, L., Beltrami, R., Lecis, N., & Trasatti, S. P. (2018). Corrosion behavior and surface properties of PVD coatings for mold technology applications. Coatings, 9(1), 7. https://doi.org/10.3390/coatings9010007

D'Avico, L., Beltrami, R., Pargoletti, E., Trasatti, S. P. M., & Cappelletti, G. (2020). Insight into the release agents/PVD coatings interaction for plastic mold technology. Coatings, 10(3), 281. https://doi.org/10.3390/coatings10030281

Ertuğrul, İ., & Özçil, A. (2014). Çok kriterli karar vermede TOPSIS ve VIKOR yöntemleriyle klima seçimi. Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 4(1), 267–282.

Habeeb, S. A., Alobad, Z. K., & Albozahid, M. A. (2019). Effect of zinc oxide loading levels on the cure characteristics, mechanical and aging properties of the EPDM rubber. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 10(1), 133–141. https://doi.org/10.34218/IJMET.10.1.2019.013

Heideman, G., Datta, R. N., Noordermeer, J. W. M., & van Baarle, B. (2005). Influence of zinc oxide during different stages of sulfur vulcanization: Elucidated by model compound studies. Journal of Applied Polymer Science, 95, 1388–1404. https://doi.org/10.1002/app.21364

Heideman, G., Noordermeer, J. W. M., Datta, R. N., & van Baarle, B. (2006). Various ways to reduce zinc oxide levels in S-SBR rubber compounds. Macromolecular Symposia, 245–246(1), 657–667. https://doi.org/10.1002/masy.200651393

Hornsby, P. R., Singh, I., Daley, J. R., & Firth, J. (2006). Characterization of mold fouling during elastomer injection molding. Journal of Applied Polymer Science, 102, 3186–3194. https://doi.org/10.1002/app.24450

İç, Y. T., & Yıldırım, S. (2013). Çok kriterli karar verme yöntemleriyle birlikte Taguchi yöntemini kullanarak bir ürünün tasarımının geliştirilmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27(2), 447–458.

İlivan, M. (2012). Kaplamasız PVD Tekniği ile TiN ve CrN kaplanmış DIN 1.2550 soğuk iş takım çeliğinin aşınma davranışlarının deneysel incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara 132s.

Jiang, X., & Kong, F. (2023). Understanding Mold Wear Mechanisms and Optimizing Performance through Nico Coating: An In-Depth Analysis. Metals, 13(12), 1933. https://doi.org/10.3390/met13121933.

Karakuş, E., & Koç, M. M. (2023). Temel ince film üretim tekniklerine bir bakış. Kırklareli University Journal of Engineering and Science, 9(1), 213–236. https://doi.org/10.34186/klujes.1286475

Künkçü, H., Aytekin, O., & Kuşan, H. (2023). Sarsma tablası test modelinin çok kriterli karar verme yöntemleri ile seçilmesi: Bir uygulama. ESOGÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31(2), 620–629. https://doi.org/10.31796/ogummf.1248370

Liu, C., Zhuang, M., Huang, Q., Mai, Y., Zhang, L., & Jie, X. (2021). Investigation of vulcanization fouling behavior of biomimetic liquid-infused slippery surfaces. Journal of Materials Science, 56, 16290–16306. https://doi.org/10.1007/s10853-021-06303-4

Novák, M., Škrobák, A., Hausnerová, B., Pata, V., Janovský, P., & Ptošková, B. (2022). A practical approach to cleaning molds from rubber residues. In 2022 26th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC) (pp. 316–321). https://doi.org/10.1109/CSCC55931.2022.00061

Novotny, J., Michna, S., Hren, I., Cais, J., Lysonkova, I., & Svorcik, V. (2021). PTFE based multilayer micro-coatings for aluminum AlMg3 forms used in tire production. Coatings, 11(2), 119. https://doi.org/10.3390/coatings11020119

Özakın, B., Gültekin, K., & Çelik, İ. (2023). Bor Karbür (B4C) katkılı epoksi esaslı nanokompozitlerin çok kriterli karar verme yöntemleriyle seçimi. Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 13(1), 35–41. https://doi.org/10.7212/karaelmasfen.1149324

Özmen, M., & Antmen, Z. F. (2024). Çok kriterli karar verme yöntemleri ile yeni otobüs tasarımında koltuk modeli seçimi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(2), 375–384. https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1514363

Pysklo, L., Pawlowski, P., Parasiewicz, W., & Slusarski, L. (2007). Study on reduction of zinc oxide level in rubber compounds: Part I. KGK Rubberpoint, 60(10), 548–553.

Sasaki, T., Koga, N., Shirai, K., Kobayashi, Y., & Toyoshima, A. (2000). An experimental study on ejection forces of injection molding. Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 24(3), 270–273. https://doi.org/10.1016/S0141-6359(99)00039-2

Tillmann, W., Stangier, D., Lopes Dias, N. F., Gelinski, N., Stanko, M., Stommel, M., Krebs, E., & Biermann, D. (2019). Reduction of ejection forces in injection molding by applying mechanically post-treated CrN and CrAlN PVD films. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 3(4), 88. https://doi.org/10.3390/jmmp3040088

Tosun, N., Kurmi S.Z., & Tosun, G. (2020). Sol-Jel Yöntemiyle TiO2 ve HAP Kaplanan Ti6Al7Nb Alaşımının Mikroyapı ve Aşınma Davranışı, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 11(2), 653,662. https://doi.org/10.24012/dumf.650996

Yamanel, B. (2025). Farklı sürelerde kutu sementasyon uygulanan AISI 1020 çeliğinin sertlik ve aşınma özelliklerinin incelenmesi. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 15(3), 639-652. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1545074

Yamanel, B., & Bican, O. (2025). Investigation of the Mechanical and Wear Behavior of 1.0411 Steel Subjected to Gas Carburizing and Nitriding Processes. International Journal of Engineering Research and Development, 17(2), 416-431. https://doi.org/10.29137/ijerad.1608652

Yamanel, B., Bican, O., & Bayça, S. U. (2023). Baybora-2 Borlama Tozu Kullanılarak Yüzey Sertleştirme İşlemine Tabi Tutulan AISI 1020 Çeliğinin İç Yapı ve Sertlik Davranışlarının İncelenmesi. International Journal of Engineering Research and Development, 15(1), 164-171. https://doi.org/10.29137/umagd.1174515

Yang, M., Li L., Zhu Z., & Ma H. (2024). Research progress on eco-friendly rubber release agents, Colloid and Polymer Science, 303(2):163-174. https://doi.org/10.1007/s00396-024-05339-7

Yıldırım, R., & Karadöl, İ. (2025). Çok kriterli karar verme metodu ile biyogaz üretimindeki en iyi enerji bitkisinin belirlenerek Türkiye ölçeğindeki enerji potansiyelinin hesaplanması. Politeknik Dergisi, 28(1), 35–43. https://doi.org/10.2339/politeknik.1370924

Yiğit, M. E., & Akpınar, M. E. (2021). Rüzgar türbin kulesi alternatiflerinin çok kriterli karar verme yöntemleri ile değerlendirilmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 23, 386–393. https://doi.org/10.31590/ejosat.874796

Zhang, X., Liu, Z., Wang, X., Xu, X., Wu, Y., & Wu, D. (2022). Comparative study of anti-sticking properties of coatings for tire molds. Coatings, 12(11), 1740. https://doi.org/10.3390/coatings12111740