

Batarya Taşıyıcı Final Kontrol Sisteminde Parça Cıvatalarındaki Boya Hata Tespit Sürecinin İyileştirilmesi

Improvement of the Paint Error Detection Process on Part Screws in a Battery Carrier Final Inspection System

Berk ERCOŞKUN^{1*} 

Öz

Otomotiv endüstrisinin, özellikle elektrikli araçların yükselişiyle birlikte hızla evrilmesi, güvenilir ve hassas kalite kontrol sistemlerine olan ihtiyacı artırmıştır. Bu çalışma, katodik elektro-kaplama süreci sırasında tork bütünlüğü ve elektriksel iletkenliğin korunabilmesi amacıyla boyasız kalması gereken batarya taşıyıcı cıvatalarının denetimine odaklanmaktadır. Konvansiyonel denetim yöntemleri, genellikle konik aynalı sistemlere dayanmakta olup, alt diş bölgelerinde sınırlı görüş alanı ve kaplama özelliklerindeki değişkenlik nedeniyle cıvata yüzeyindeki boya hatalarını tespit etmede yetersiz kalmaktadır. Bu sınırlamaları aşmak amacıyla, robot destekli bir kamera, düz ayna konfigürasyonu ve lazer tabanlı konumlandırmayı içeren yeni bir denetim sistemi geliştirilmiştir. Söz konusu sistem, mekanik çarpışma riski olmadan 360 derecelik görüntüleme sağlamakta ve gerekli tüm eksenlerde hassas hizalama olanağı sunmaktadır. Geliştirilen sistem, kaplama hataları simüle edilmiş M6 ve M8 cıvatalar üzerinde test edilmiştir. Boyanmış alanların (parlaklık < 60) ve boyanmamış yüzeylerin (parlaklık 60–120) ayrımında parlaklık temelli analiz yöntemi kullanılmıştır. İlk sonuçlar, farklı cıvata boyutlarında tespit tutarlılığının arttığını göstermiştir. Ancak sistemin dayanıklılığının doğrulanması için farklı üretim koşullarında ilave testlere ihtiyaç duyulmaktadır. Elde edilen bulgular, batarya taşıyıcı montajlarında ve benzeri yüksek hassasiyet gerektiren otomotiv uygulamalarında görsel denetimin otomatikleştirilmesi adına umut vadeden bir yaklaşımı ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Otomotiv endüstrisi, Batarya taşıyıcı, Kamera sistemi, İnsan-makine etkileşimi, Boya tespiti, Kalite kontrol.

Abstract

The rapid evolution of the automotive industry, particularly with the emergence of electric vehicles, has increased the demand for reliable and precise quality control systems. The present study addresses the inspection of bolts used in battery carrier components that must remain uncoated during the cathodic electro-coating process to preserve torque integrity and electrical conductivity. Conventional inspection methods employing conical mirror systems often fall short in detecting paint defects across the entire bolt surface, especially due to limited visibility of lower threads and the variability in coating characteristics. To address these limitations, a novel inspection system incorporating a robot-guided camera, a flat mirror configuration, and laser-based positioning was developed. This configuration enables 360-degree imaging without mechanical interference and allows precise alignment in all necessary axes. The system was tested on M6 and M8 bolts with simulated coating defects. A brightness-based analysis was used to differentiate between painted areas (brightness < 60) and unpainted surfaces (brightness between 60 and 120). Initial results demonstrated improved detection consistency across varying bolt sizes. Although the system showed enhanced capability in identifying coating anomalies, further validation under different production conditions is necessary to confirm its robustness. These findings indicate a promising direction for the automation of visual inspection in battery carrier assemblies and other high-precision applications in the automotive sector.

Keywords: Automotive industry, Battery carrier, Camera system, Human-machine interaction, Paint detection, Quality control.

¹Çukurova Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Adana, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ercoskunberk@gmail.com

Geliş/Received: 23.05.2025

Kabul/Accepted: 24.11.2025

Yayın/Published: 06.03.2026

1. Giriş

Otomotiv sektöründeki başarı yalnızca ürün performansı ile değil, aynı zamanda kalite standartlarına uyumla da ölçülmektedir (Scholz-Reiter ve ark., 2010; Manoj Babu ve ark., 2019). Otomotiv sektöründe kalite yönetimi, günümüzde sadece rekabet avantajı değil, aynı zamanda kritik bir gereklilik haline gelmiştir (Gonçalves ve ark., 2023).

Otomotiv firmaları, kaliteyi artırmak ve süreçlerini sürekli iyileştirmek amacıyla çeşitli stratejiler geliştirmektedir (Marin-Garcia ve ark., 2009; Bessant ve Caffyn, 1997). Sürekli iyileştirme yaklaşımlarının iş etüdü, zaman etüdü ve hat dengeleme gibi yöntemlerle birlikte uygulanması, ek iş gücü veya ekipman yatırımı gerektirmeden üretim hattı kapasitesini ve birim başına verimliliği anlamlı ölçüde artırabilmektedir (Matope ve ark., 2022). Bununla birlikte, üretim sistemlerinin dijitalleşmesi; süreç verilerinin gerçek zamanlı izlenmesi, karar alma hızının artması ve kalite güvence mekanizmalarının daha güvenilir şekilde işletilmesi açısından önemli avantajlar sağlamaktadır (Mourtzis ve ark., 2018). Özellikle IATF 16949 gibi sektör odaklı kalite standartları, dijitalleşme uygulamalarıyla birlikte ele alındığında üretim süreçlerinin izlenebilirliğini güçlendirerek üreticilere küresel ölçekte rekabet üstünlüğü kazandırmaktadır (Kesici ve Yıldız, 2022).

Modern otomotiv üretiminde en kritik kalite aşamalarından biri kaplama ve yüzey işlem süreçleridir (Akafuah ve ark., 2016). Kaplama yalnızca estetik bir işlev sunmakla kalmaz; aynı zamanda korozyon, sıcaklık değişimleri ve kimyasal etkilere karşı bileşenleri koruyan temel bir bariyer görevi görür (Louda, 2007; Kılınç ve Akyalçın, 2022). Boyama süreçlerinde büyük gövde panelleri ön planda olsa da cıvata, bağlantı elemanları ve braketler gibi küçük boyutlu bileşenler; geometrileri, malzeme türleri ve montaj hattındaki konumları nedeniyle daha fazla zorluk barındırır (Ma, 2020; Miao ve ark., 2020).

Bu küçük ölçekli parçalarda dengesiz boya dağılımı, yetersiz kaplama kalınlığı ve boşluklu kaplama gibi kusurlar sıkça gözlenmektedir (Jeong ve ark., 2025; Jones ve ark., 2021). Bu tür yüzey hataları erken aşınma, oksidasyon ve nihayetinde parça arızalarına neden olabilir (Kong ve ark., 2022; Yaman ve ark., 2021). Özellikle bağlantı elemanlarında yetersiz kaplama, pas birikimine yol açarak kritik bağlantı noktalarında tork kararlılığını ve mekanik güvenilirliği ciddi şekilde tehlikeye atabilir (Yan ve ark., 2024; Haak ve ark., 2024).

Bu sorunlarla mücadele edebilmek için üreticiler; elektrostatik spreylere boyama, katodik daldırma kaplama ve toz kaplama gibi gelişmiş kaplama yöntemlerini giderek daha fazla tercih etmektedir (Akafuah ve ark., 2016; Contri ve ark., 2020; Pilch-Pitera ve ark., 2025). Ayrıca yüksek çözünürlüklü kameralar ve makine öğrenmesi algoritmalarını kullanan otomatik görüntü işleme tabanlı kalite kontrol sistemleri, kaplama anormalliklerinin üretimin erken safhalarında tespit edilmesinde kritik bir

rol üstlenmektedir (Han ve ark., 2025; Lin ve ark., 2025; Tzampazaki ve ark., 2024). Temassız kaplama kalınlığı ölçerler ve yüzey yansıtıcılık sensörleri de kaplama homojenliğini gerçek zamanlı olarak izlemek ve kontrol etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Jones ve ark., 2021; Bračun ve Lekše, 2019).

Bu tür bileşenlerde kaplama kalitesinin iyileştirilmesi yalnızca dayanıklılığı artırmakla kalmaz; aynı zamanda arıza oranlarını ve garanti taleplerini azaltarak uzun vadeli maliyet tasarruflarına da katkı sağlar. Bu nedenle özellikle küçük ve karmaşık parçalar üzerinde hassas ve tutarlı kaplama uygulaması, otomotiv kalite güvence stratejilerinin merkezinde yer almaktadır (Muram ve ark., 2024; Chen ve ark., 2021; Nitta ve ark., 2015; Wei ve ark., 2024; Muram ve ark., 2018; Marcos ve ark., 2021; Shen ve ark., 2018; Li ve ark., 2001).



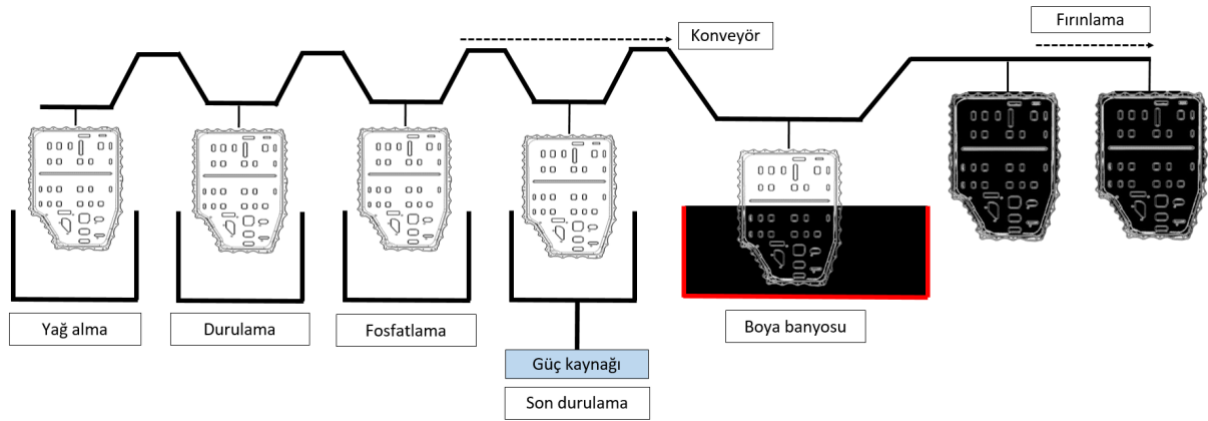
Şekil 1. Batarya taşıyıcı parçası.

Bu çalışmada incelenen batarya taşıyıcı parçası, toplam 41 alt bileşenden oluşmakta ve ultra yüksek dayanımlı çelikten üretilmektedir. Kullanılan çelik, yaklaşık 1300 megapascal çekme dayanımına ve 850 megapascal akma dayanımına sahip martenzitik yapıya sahip bir malzemedir. Bu özellikleri sayesinde parça, darbe anında yüksek enerji soğurma kabiliyeti kazanırken, düşük ağırlığı ile taşıyıcı sistemin rijitliğini koruyabilmektedir.

Parçalar soğuk şekillendirme yöntemiyle üretilmekte, üretim sonrasında yüzeyde boya altı akmalarını ve sızıntıları önlemek amacıyla özel bir yalıtım malzemesi uygulanmaktadır. Şekillendirme sırasında malzemenin yüksek dayanımı, kalıp yüzeylerinde büyük temas gerilmeleri oluşturduğundan, yüzey bütünlüğünün korunması kaplama öncesi aşamada kritik önem taşımaktadır. Yaklaşık 33 kilogram ağırlığındaki batarya taşıyıcısı, geometrik olarak karmaşık bir yapıya sahip olup kaplama kalınlığının homojenliği üzerinde doğrudan etkilidir. Bu kapsamda incelenen batarya taşıyıcı parçası Şekil 1’de gösterilmektedir.

Mevcut durumda batarya taşıyıcı bileşenlerinin son kontrolleri, katodik elektro-kaplama sürecinin ardından gerçekleştirilmektedir. Katodik elektro-kaplama, otomotiv üretimi gibi sektörlerde üstün korozyon direnci ve karmaşık geometrilere sahip parçalar üzerinde sağladığı homojen kaplama özelliği nedeniyle yaygın olarak tercih edilen bir kaplama yöntemidir (Akafuah ve ark., 2016; Braçun ve Lekše, 2019; Learner, 2000). Bu yöntemde parçalar su bazlı bir boya banyosuna daldırılmakta ve uygulanan elektrik akımı aracılığıyla yüzeye organik kaplama biriktirilmektedir (Besra ve Liu, 2007).

Süreç dört temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama olan ön işlem adımında metal yüzey, yağ alma, durulama, fosfatlama, pasivasyon ve deiyonize su ile son durulama gibi ardışık daldırma banyolarından geçirilerek temizlenir ve kaplamanın yüzeye daha güçlü bir şekilde tutunabilmesi için uygun hale getirilir (Yaman ve ark., 2021; Kılınç, 2019; Jeong ve ark., 2025; Kılınç ve Akyalçın, 2022). İkinci aşamada parça katot olarak görev yaparken pozitif yüklü boya banyosuna daldırılır ve elektro kimyasal reaksiyon sonucunda kaplama yüzeye çekilir. Üçüncü aşamada kaplama tamamlandıktan sonra parçanın üzerinde kalan kaplanmamış boya partiküllerinin uzaklaştırılması amacıyla durulama işlemi uygulanır. Son aşama olan kürleme adımında ise parça fırınlanarak boyanın sertleşmesi sağlanır; bu işlem sonucunda çapraz bağ yapısı gelişmiş, dayanıklı ve yüksek korozyon direncine sahip bir yüzey tabakası oluşur (Akafuah ve ark., 2016; Besra ve Liu, 2007; Contri ve ark., 2020; Pilch-Pitera ve ark., 2025). Bu işlemin genel adımları ile ön işlemi oluşturan çok kademeli banyo hattı Şekil 2’de şematik olarak gösterilmektedir.



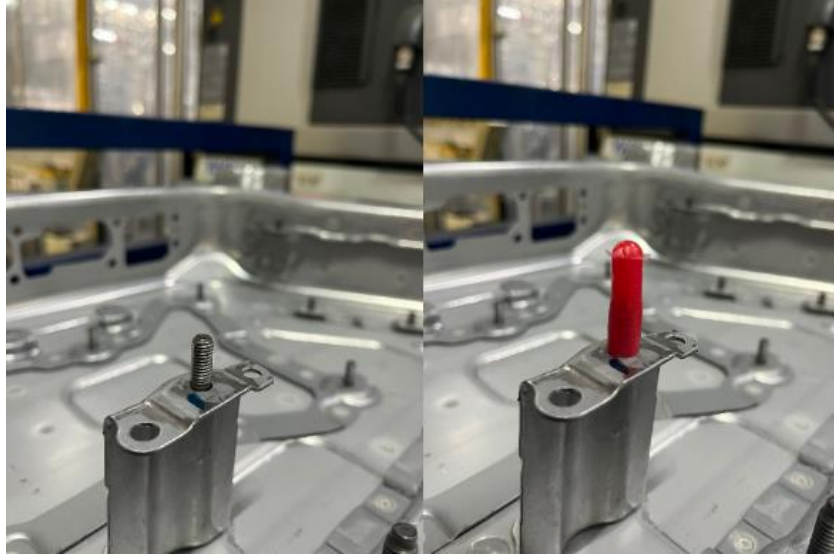
Şekil 2. Katodik elektro-kaplama sürecinin şematik gösterimi.

Mevcut durumda, kaplanmış batarya bileşenlerinin belirli kısımlarının boyanmaması gerekmektedir. Bu bölgeler arasında en kritik olanı, montaj sırasında batarya taşıyıcısını batarya paketine sabitleyen cıvatalardır (Miao ve ark., 2020; Yan ve ark., 2024). Çünkü kaplama, cıvatalarda uygulanan sıkma torkunun düşmesine ve aynı zamanda elektriksel iletkenliğin olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır (Ma, 2020; Haak ve ark., 2024; Rudnick, 2017). Bu durum, bağlantı güvenilirliğinin

azalmasına ve güvenlik açısından istenmeyen sonuçlara yol açabilmektedir (Muram ve ark., 2024; Marcos ve ark., 2021).

Cıvatalar, kaplama öncesi yalıtkan ve yapışkan bir maskeleme malzemesiyle kaplandığından, katodik elektro-kaplama sürecinde anot görevi göremezler. Bu nedenle boya yüzeye çekilemez ve cıvatalar işlem boyunca boyanmamış halde kalır.

Bu yöntem genel olarak etkili olmakla birlikte, tamamen manuel şekilde ve tek bir operatör tarafından uygulanmaktadır. Bu nedenle çok sayıda cıvata içeren parçalarda, bazı cıvataların maskelenmeden kalması veya kapakların hatalı yerleştirilmesi gibi rastlantısal hatalar meydana gelebilmektedir. Böyle durumlarda cıvataların bir kısmı kısmen boyanarak istenmeyen kaplama hataları oluşabilir. Manuel olarak yürütülen bu maskeleme yöntemi Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Cıvataların plastik kapaklarla maskelenmesi.



Şekil 4. Yanlış maskelenmiş cıvata örneği.

Şekil 4'te, yanlış maskelenmiş bir cıvata örneği yer almaktadır. Bu tür bir hata, plastik koruyucu kapağın cıvatanın geometrisine tam olarak oturmaması sonucunda ortaya çıkar. Katodik kaplama işleminde kapakla temas etmeyen yüzeyler elektrik yükü kazanarak boyayı çeker; dolayısıyla kaplanmaması gereken bölgelerde istenmeyen boya birikimi oluşur. Görselde özellikle cıvatanın tabanında, ilk birkaç diş boyunca koyu renkli boya izleri belirgindir. Kaplama tabakasındaki bu lokal kalınlık artışı ve düzensizlikler, hem sıkma torkunu etkileyerek montaj performansını düşürebilir (Ma, 2020; Miao ve ark., 2020) hem de yüzeyin iletkenliğini bozarak bağlantının elektriksel güvenilirliğini zayıflatır (Yan ve ark., 2024; Haak ve ark., 2024). Benzer şekilde, literatürde zinc flake kaplamalarda kalınlık dağılımının homojen olmamasının saha koşullarında erken korozyona ve işlevsel performans kayıplarına yol açabildiği bildirilmektedir (Mošničková ve ark., 2021).

Bu tür rastgele hataların tespit edilmesi amacıyla, batarya taşıyıcı parça katodik kaplama işlemi tamamlandıktan ve sevkiyata hazırlanacak duruma geldikten sonra kamera sistemiyle son kontrole tabi tutulur. Bu sistem, bileşen üzerindeki her noktayı etkin ve hızlı bir şekilde denetler.

Bu çalışmada, söz konusu sistemdeki kameralardan biri, özellikle cıvataları denetleyen kamera ele alınarak, teknolojisinin ve görüntü işleme mantığının geliştirilmesine odaklanılacaktır. Daha önce de belirtildiği gibi, katodik kaplama işlemi sonrasında uygun maskeleme yapılmadığı durumlarda, cıvatalarda çeşitli hatalar oluşabilmektedir. En yaygın hata, plastik maskeleme malzemesinin cıvataya tam oturmaması nedeniyle meydana gelir; bu durumda elektriksel yük birikimi oluşur ve cıvatalar boya banyosuna daldırıldığında boya sızması görülür. Plastik kapaklar cıvata uzunluğuna tam uyacak şekilde tasarlanmış olup, hafif yapışkan içerdikleri için operatörün elle yerleştirmesi sırasında kapakla cıvata arasında küçük bir boşluk kalması olasıdır. Bu nedenle, en sık karşılaşılan sorunlardan biri, cıvatanın tabanında (ilk üç diş ve alt kısmında) boya birikmesidir. Bu hataya ilişkin bir örnek Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. Cıvatanın taban bölgesinde boya birikimi.

Operatörün plastik kapağı hatalı yerleştirme açısına bağlı olarak elektrik yükü değişebileceğinden, boya nüfuzu her cıvatada farklılık gösterecektir. Bu nedenle, cıvatanın tüm yüzeylerinin kamera tarafından görülüp incelenmesi gerekmektedir.

Bu çalışma, söz konusu boya hatalarının otomatik olarak tespit edilmesi ve ilgili görüntü işleme süreçlerinin doğruluk, tutarlılık ve hız açısından iyileştirilmesine odaklanmaktadır.

2. Materyal ve Metot

Otomotiv endüstrisinde cıvataların görüntü işleme tabanlı denetimi için farklı yöntemler geliştirilmiştir (Ali ve ark., 2012; Manoj Babu ve ark., 2019). Bu yöntemlerin temel amacı, bağlantı elemanlarının tüm yüzeylerinin olası kusurlara karşı eksiksiz biçimde incelenmesini sağlamaktır (Han ve ark., 2025). Literatürde bu hedefe yönelik üç temel yaklaşım öne çıkmaktadır (Tzampazaki ve ark., 2024).

Birinci yöntemde, yüksek çözünürlüklü tek bir kamera kullanılarak cıvatanın veya kameranın döndürülmesiyle çevresel yüzeylerin taranması sağlanmaktadır (Ali ve ark., 2012; Wiley Industry News, 2025). Bu yöntemde cıvata motor destekli bir düzeneğe yerleştirilmekte ve farklı açılardan ardışık görüntüler elde edilmektedir (Xu ve ark., 2020). Ardından bu görüntüler yazılım aracılığıyla birleştirilerek düzlemsel bir panorama oluşturulmakta ve tüm yüzey detaylı biçimde analiz edilmektedir (Manoj Babu ve ark., 2019). Bu yaklaşım, özellikle silindirik ve simetrik parçalarda yüzey kusurlarının tespitinde etkili bir çözüm sunmaktadır (Lin ve ark., 2025).

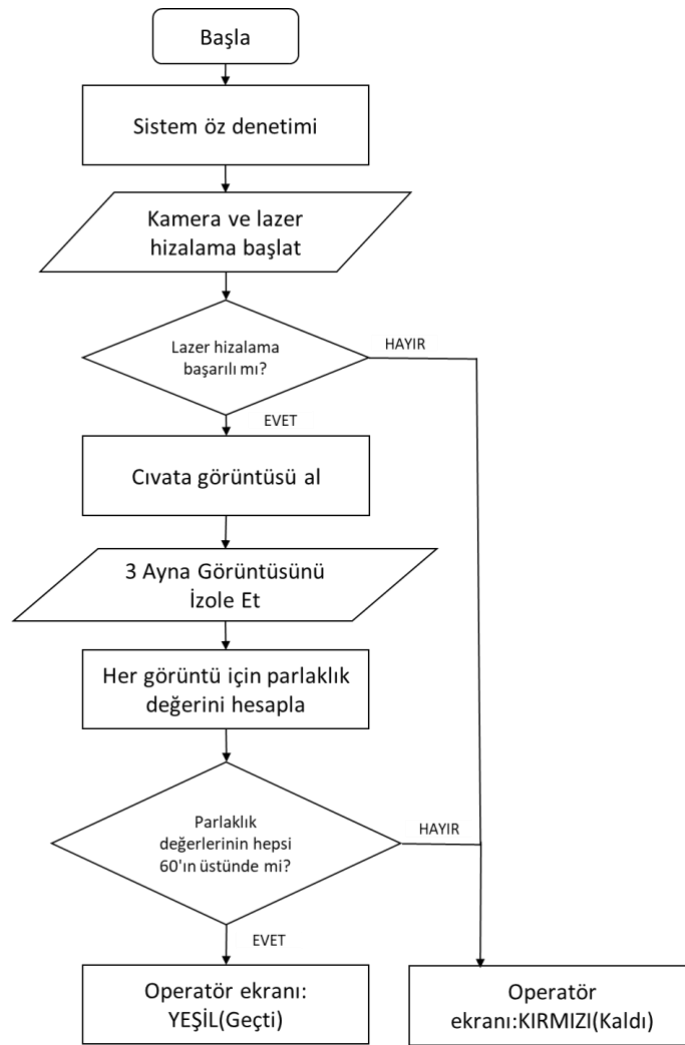
İkinci yaklaşımda ise birden fazla kamera sabit konumlara yerleştirilerek cıvatanın tüm çevresel bölgeleri eşzamanlı olarak görüntülenmektedir (Han ve ark., 2025; URL-1, 2025). Tipik olarak iki ila dört kamera kullanılarak cıvatanın yan ve üst yüzeyleri aynı anda taranmaktadır (Hesheng Wang ve ark., 2018). Bu sayede parça veya kameranın hareketine gerek kalmadan tüm yüzeyler yüksek hızda incelenebilmekte, bu nedenle sürekli akan üretim hatlarında hız ve doğruluğun kritik olduğu uygulamalarda yaygın biçimde tercih edilmektedir (Ali ve ark., 2012; Tzampazaki ve ark., 2024).

Üçüncü yaklaşımda, kamera görüntüleri gerçek zamanlı olarak işlenerek cıvatanın sayısal bir yüzey modeli oluşturulmaktadır. Bu yöntemde tek bir kamera ile elde edilen görüntüler üzerinde ikili eşikleme, kontur çıkarımı, koordinat belirleme ve iskelet oluşturma gibi bir dizi görüntü işleme adımı uygulanmakta; elde edilen sınır koordinatları MATLAB tabanlı algoritmalar ile işlenerek cıvatanın geometrik yapısı sayısal olarak modellenmektedir (Öztürk ve Kuncan, 2020). Böylece parçanın dönmesine veya çoklu kamera kurulumuna gerek kalmadan, yazılım tabanlı bir analiz ile yüzey kusurları, kontur bozuklukları ve kaplama kaynaklı düzensizlikler tespit edilebilmektedir. Bu yaklaşım, özellikle düşük maliyetli sistemlerde sınırlı donanımla yüksek doğrulukta yüzey değerlendirmesi yapılabilmesi açısından önemli bir alternatif sunmaktadır.

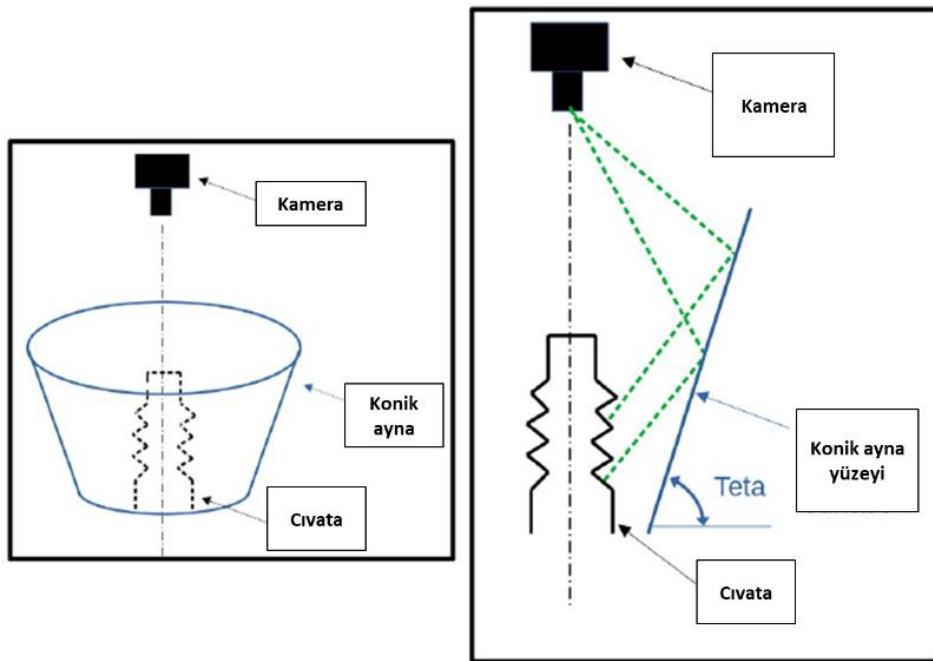
Her üç yöntem de küçük ve orta boyutlu bağlantı elemanları için uygulanabilir olmakla birlikte, batarya taşıyıcıları gibi büyük ve ağır parçaların cıvata denetiminde çeşitli kısıtlarla karşılaşmaktadır (Han ve ark., 2025). Parçanın fiziksel hacmi ve kütlesi nedeniyle sabit bir istasyonda kameranın hareket ettirilmesi veya parçanın döndürülmesi çoğu durumda pratik değildir (Ali ve ark., 2012). Ayrıca çok kameralı sistemlerin entegrasyonu, donanım maliyeti ve çalışma alanı gereksinimleri nedeniyle uygulama zorlukları içermektedir (Hesheng Wang ve ark., 2018). Bu bağlamda özellikle elektrikli araçlara özgü, büyük ve karmaşık yapıları bileşenlerde klasik denetim yaklaşımlarının ötesine geçen yeni nesil çözümlere duyulan ihtiyaç artmaktadır (Lin ve ark., 2025; Tzampazaki ve ark., 2024). Geleneksel sistemlerin fiziksel kısıtlar karşısında yetersiz kalması, otomotiv endüstrisinde daha esnek ve modüler denetim mekanizmalarının geliştirilmesini zorunlu hale getirmektedir (Han ve ark., 2025; Bračun ve Lekše, 2019).

Bu gereksinimlere yanıt verebilmek amacıyla bu çalışmada, kameranın cıvatalara daha yakın ve kontrollü biçimde konumlandırılabilmesi için robot kol tabanlı bir yapı tasarlanmıştır. Ardından, tek bir kamera ile cıvataların tüm yüzeylerinin incelenmesini mümkün kılan çelik aynaya dayalı bir çözüm geliştirilmiştir. Bu kapsamda, cıvata bölgesine giriş çıkışı kolaylaştıran ve yüzeylerin 360 derece izlenebilmesini sağlayan konik ayna sistemi uygulanmıştır. Görüntü işleme mekanizması, sabit durumdaki batarya taşıyıcısı üzerindeki cıvataların konik yapının iç merkezine hizalanması prensibine dayanmaktadır. Yüksek çözünürlüklü kamera, iç aynadan yansıyan görüntüyü yakalayarak cıvata yüzeyinde boya varlığını veya yokluğunu tespit etmektedir. Geliştirilen sistemin genel akış şeması Şekil 6'da sunulmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan kamera sistemi, 1920×1200 piksel çözünürlüğe sahip Sony IMX392 CMOS sensör ile donatılmış Basler ace 2 R a2A1920-51gcBAS modelini içermektedir. 3.45 µm piksel boyutu, özellikle kataforez kaplama gibi yüzey işlemlerinde ortaya çıkan ince detayların algılanmasına olanak tanımaktadır. Küresel obtüratör yapısı, hareketli bileşenlerin bozulmaya uğramadan görüntülenmesini sağlamıştır. Sistemin saniyede 51 kareye kadar görüntü elde edebilme kapasitesi, denetim süresinin optimize edilmesine katkı sunmuştur. GigE Vision arayüzü ve Power over Ethernet desteği sayesinde veri iletimi ve enerji beslemesi tek bir Ethernet kablosu üzerinden sağlanmış; bu da sistemdeki kablo yoğunluğunu azaltmıştır. 29 mm × 29 mm ölçülerindeki kompakt yapı, dar alanlara yerleştirme kolaylığı sunmuş ve robotik sistemlerle entegrasyonu mümkün kılmıştır.

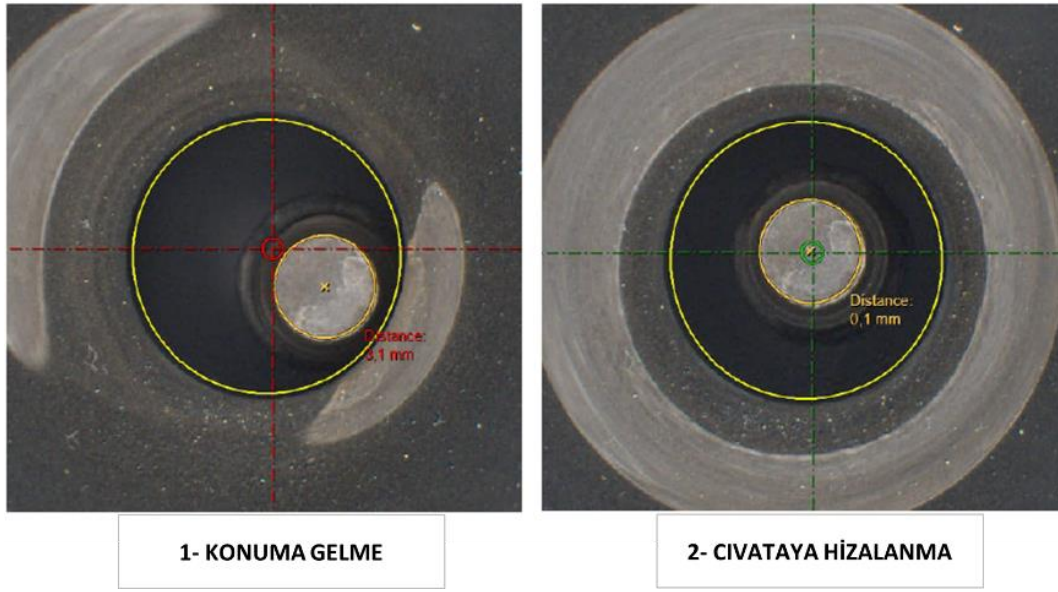


Şekil 6. Geliştirilen sistem için yazılım akış şeması.



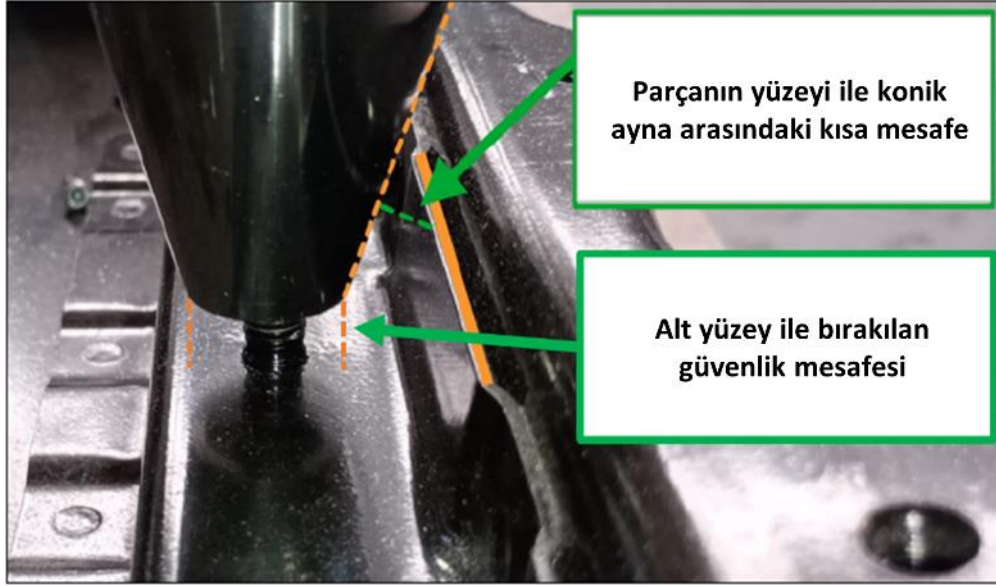
Şekil 7. Konik ayna tabanlı 360° inceleme yöntemi.

Şekil 7’de, cıvataların 360 derecelik açıyla görüntülenebilmesini sağlayan konik ayna tabanlı inceleme yöntemi gösterilmektedir. Sabit parça üzerindeki cıvatalar, üretim ve montaj toleransları nedeniyle konum bakımından belirli sapmalar gösterebilmektedir. Bu nedenle önceden programlanmış sabit bir koordinat sistemine göre hareket eden robot, bazı durumlarda çarpışma riski ile karşılaşabilmektedir. Bu riski azaltmak amacıyla robot, ilk etapta cıvata dan 30 mm uzaklıkta tanımlanmış güvenli bir konuma hareket etmekte ve cıvatanın üstten görüntüsünü almaktadır. Ardından, cıvatanın merkezini referans alarak X ve Y eksenlerinde konumunu ayarlamakta ve hassas hizalama sağlamaktadır.



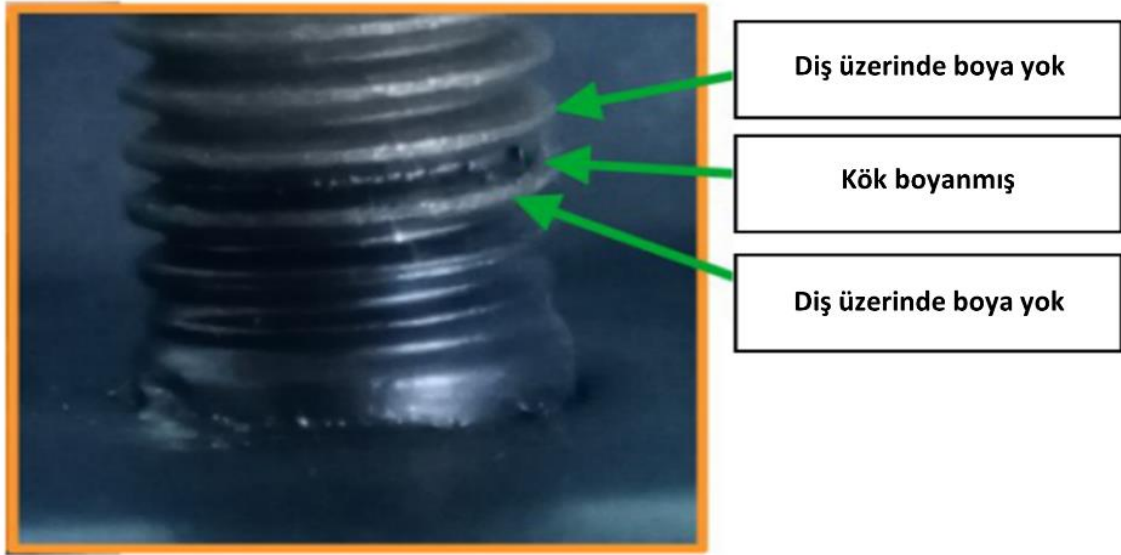
Şekil 8. Robot kolunun kamera ile cıvata hizalama yöntemi.

Şekil 8’de, robot kolunun cıvatalara kamera aracılığıyla hizalanma süreci gösterilmektedir. Çarpışma riskini en aza indirmek amacıyla konik aynanın açısı 73° olarak tasarlanmıştır. Daha geniş bir açı robot ile batarya taşıyıcısı arasında çarpışma ihtimalini artırırken, daha dar bir açı boya hatalarının tespitini zorlaştırmaktadır. Buna ek olarak, cıvatalarda gözlenen bazı hatalar, operatörün plastik kapağı doğru konumlandıramamasından kaynaklanmakta ve hataların çoğunlukla cıvatanın kök bölgelerinde, yani alt yüzeylerde ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Konik ayna sistemi yalnızca robotun X ve Y eksenlerinde hizalanmasına olanak verdiği için, Z ekseninde belirli bir güvenlik mesafesi korunmakta ve bu durum bazı cıvatalarda alt yüzeylerin doğrudan gözlemlenmesini engellemektedir.

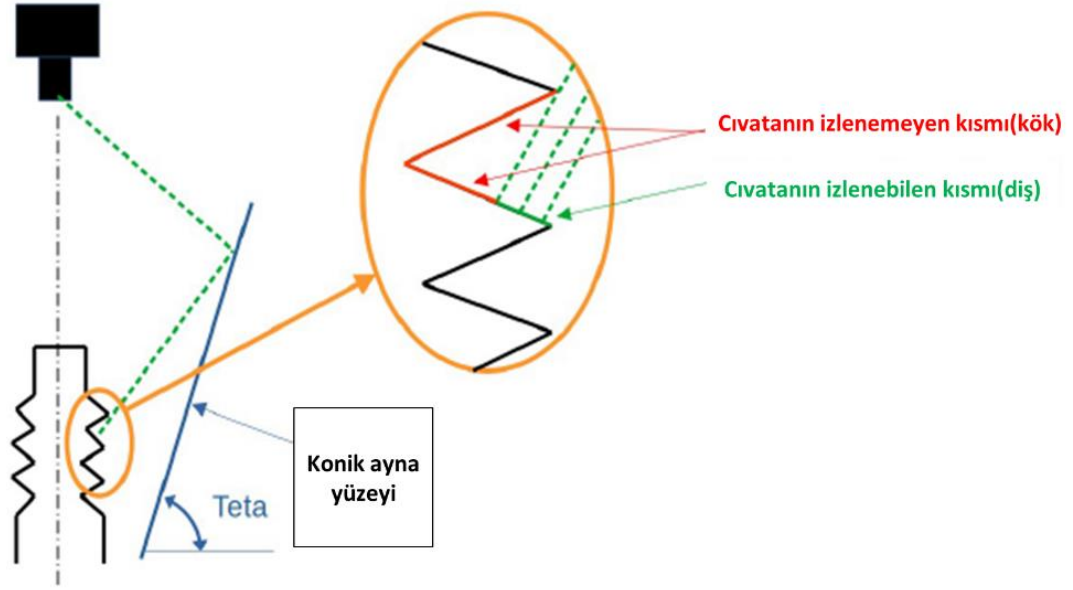


Şekil 9. Konik aynanın alt yüzeyleri görüntüleyememesine ilişkin teknik kısıtlar.

Şekil 9’da, konik aynanın 73° ’lik açısı nedeniyle alt yüzeylerin gözlemlenmesinde ortaya çıkan teknik kısıtlar ve zorluklar gösterilmektedir. Ayrıca, konik aynanın 73° ’lik açısı nedeniyle sistem yalnızca dış yüzeylerini doğrudan görüntüleyebilmiş, kök yüzeyler gözlemlenemediğinden bazı hataların gözden kaçma ihtimali ortaya çıkmıştır.



Şekil 10. Boyanmış civatanın yakınlaştırılmış görüntüsü.



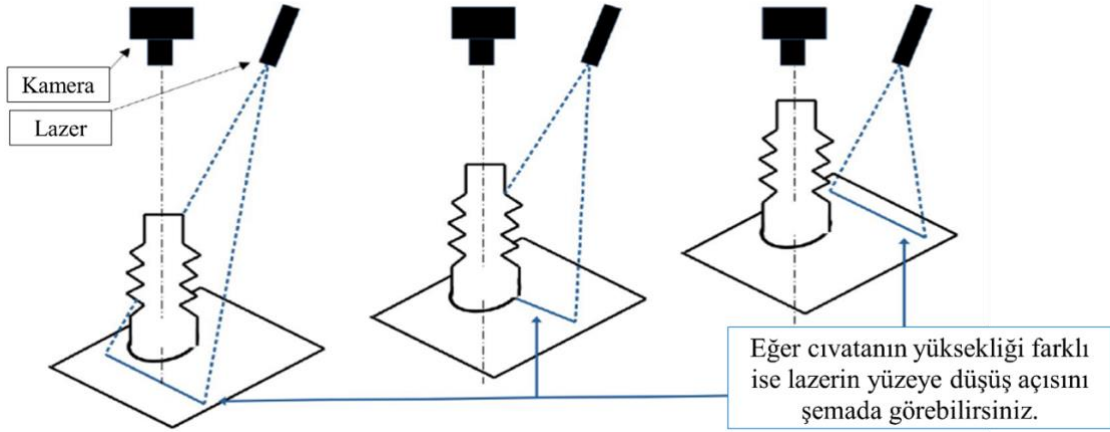
Şekil 11. Konik aynanın görüntüleyemediği yüzeylerin şematik gösterimi.

Şekil 10’da, konik ayna sisteminin görüş hattı dışında kalan bölgelerde oluşan boya birikiminin yakınlştırılmış görüntüsü sunulmaktadır. Şekil 11’de ise konik aynanın görüntüleyemediği yüzey bölgelerinin şematik gösterimi verilmiştir. Bu görseller, mevcut sistemin iki temel zayıf yönünü ortaya koymaktadır. İlk olarak, robot ve kameranin Z ekseninde konumlanamaması nedeniyle tanımlanan güvenlik mesafesi, özellikle batarya taşıyıcısının yan yüzeylerine yakın konumlanan cıvatalarda alt kısımdaki üç ila dört dişin görüntülenmesini engellemiştir. İkinci olarak, konik aynanın açısai yapısı yalnızca diş yüzeylerinin incelenmesine imkân tanımış, diş kök bölgelerinin görüntülenmesini kısıtlamıştır.

Bu sorunları gidermek amacıyla önerilen ilk çözüm, kesişen iki lazerden oluşan bir ölçüm mekanizmasının sisteme entegre edilmesidir. Mevcut yapıda yalnızca iki boyutlu ölçüm yapabilen kameraya OSELA SL-520-80-S-A-30 model lazer modülü eklenmiştir. Bu lazer 520 nm dalga boyunda ve 80 mW çıkış gücünde çalışmakta, sürekli dalga modunda 5 µs yükselme ve düşme süresi ile yüksek tepki hızı sağlamaktadır. Ayarlanabilir odaklama özelliği sayesinde küçük odak noktaları elde edilebilmekte, yaklaşık %0,03 doğruluk düzeyinde hat doğruluğu ve homojenlik sunabilmekte, 5 µm genişliğinde çizgiler oluşturabilmektedir. Ayrıca 10 kHz’e kadar analog ve dijital modülasyon desteği ile birlikte doğrusal güç ayarı, elektrostatik boşalma koruması ve termal koruma gibi endüstriyel güvenlik özellikleri sunmaktadır.

Bu lazer yapılandırması sayesinde kamera ile yüzey arasındaki mesafe ve yüzey açısı hesaplanabilmekte, elde edilen ölçümler yazılım aracılığıyla robota aktarılmaktadır. Böylece robot, çarpışma riski oluşturmadaan gerekli konum düzeltmelerini yapabilmekte ve güvenlik boşluğu ortadaan

kaldırılarak cıvataların eksiksiz görüntülenmesi mümkün hale gelmektedir. Kamera lazer çizgisinin görüntüdeki konumunu tespit etmekte, bu çizgiye ait üç boyutlu koordinatlar hesaplanmakta ve yüzeyin uzaysal konumu koordinat ölçüm prensiplerine benzer şekilde belirlenmektedir (Pedone, Vicario ve Romano, 2008). Her bir lazer bir ekseninde yön bilgisi sağlamakta olup, ölçüm prensibinin şematik gösterimi Şekil 12’de sunulmaktadır.



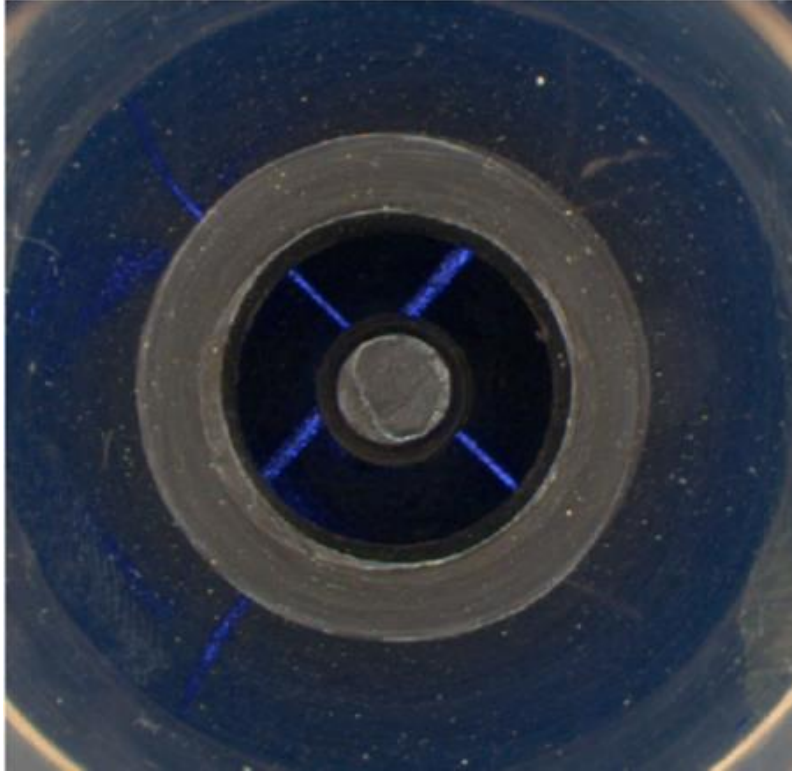
Şekil 12. Tek lazerli hizalama prensibi.

Sistem, batarya taşıyıcısı üzerindeki cıvataların çevresindeki yüzeylerin eğimini ve mesafesini belirlemek amacıyla tasarlanmıştır. Prototip üzerinde gerçekleştirilen ölçümler ile sistemin tekrarlanabilirliği analiz edilmiş, ayrıca ölçümlerin hesaplanması için özel bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım, lazer çizgisinin görüntü üzerindeki konumundan hareketle mesafe tahmini yapmaktadır.

Lazer ve kamera arasındaki sabit geometrik düzen ve kamera kalibrasyon parametreleri kullanılarak lazer çizgisinin piksel konumu gerçek dünya koordinatlarına dönüştürülmekte ve yüzeye olan uzaklık üçgenleme yöntemiyle hesaplanmaktadır. Bu işlemde kullanılan temel denklem(1) aşağıda verilmiştir.

$$d = \frac{b \cdot \sin(\theta)}{\sin(\phi + \theta)} \quad (1)$$

Burada b kamera–lazer baz uzunluğunu, θ lazer ışınının yüzeye düşme açısını ve ϕ lazer çizgisinin kamera tarafından ölçülen açısal pozisyonunu ifade etmektedir. Böylece yüzeye olan mesafe yüksek doğrulukla belirlenmekte ve robotun pozisyon düzeltmeleri optimize edilmektedir. Sistemde kullanılan kamera–lazer düzeni Şekil 13’te gösterilmiştir.



Şekil 13. Lazer çizgilerini gözlemleyen kamera düzeni.

Lazer sisteminin doğruluk analizine yönelik gerçekleştirilen on ölçümün sonuçları Tablo 1’de sunulmuştur. Ölçümlerde açısal sapmanın en fazla 0,2 derece, mesafe farkının ise 0,1 milimetre düzeyinde kaldığı görülmektedir. Bu değerler, sistemin kısa menzilde yüksek tekrarlanabilirliğe sahip olduğunu ve kalibrasyon doğruluğunun kabul edilebilir sınırlar içinde bulunduğunu göstermektedir.

Tablo 1. Lazer sistemi ile cıvatalara ait on ölçümün sonuçları.

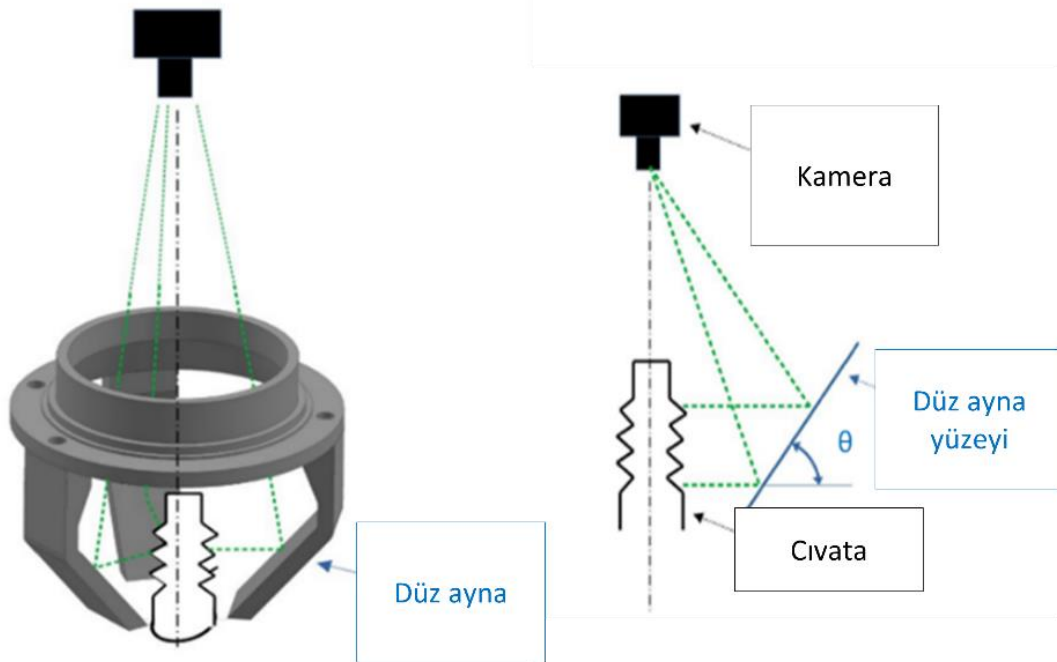
	Asıl Açı(°)	Asıl Mesafe(mm)	Ölçülen Açı(°)	Ölçülen Mesafe (mm)
Ölçüm 1	0	30	0	30
Ölçüm 2	0	30	-0.1	30
Ölçüm 3	0	30	0	30
Ölçüm 4	0	30	-0.1	30
Ölçüm 5	0	30	-0.1	30
Ölçüm 6	0	30	-0.1	30
Ölçüm 7	0	30	-0.1	30
Ölçüm 8	0	30	-0.1	29,9
Ölçüm 9	0	30	-0.2	30
Ölçüm 10	0	30	0	30

Burada σ standart sapmayı, N ölçüm sayısını, x_{ix_ixi} her bir ölçüm değerini ve $\bar{x}$ ölçümlerin aritmetik ortalamasını göstermektedir. Kalibrasyon işlemi çoklu ölçümün ortalamasına dayandığından, standart sapma doğrudan tek bir ölçümden elde edilmemiş; farklı ölçümlerin varyasyonlarını temsil etmektedir. Kullanılan kalibrasyon araçlarının hata payları da dikkate alınmış olup cihaz hassasiyeti açısal ölçümlerde $0,5^\circ$, mesafe ölçümlerinde ise $0,1$ mm düzeyindedir.

Bu kapsamda ölçülen açıların standart sapması yaklaşık $0,0632^\circ$, ölçülen mesafelerin standart sapması ise $0,0316$ mm olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, lazer sisteminin konum belirleme performansının yüksek kararlılığa sahip olduğunu doğrulamaktadır.

Lazer sisteminin kalibrasyonunun tamamlanmasının ve cıvata yüzeylerinin kapsamlı şekilde incelenmesinin ardından çalışma, ikinci çözüm alanı olan ayna mimarisine odaklanmıştır. Daha önce de belirtildiği üzere konik ayna yapısı, cıvatanın tüm yüzeylerinin eksiksiz görüntülenmesi için yeterli olmamıştır. Özellikle konik aynanın açısal yapısı, alt dış bölgelerinin görüntülenmesini sınırlamıştır. Bu nedenle, yeni tasarımda açısal bağımlılığı azaltılmış, sınırlı alanlarda çarpışma riski oluşturmadan çalışabilecek bir yapı hedeflenmiştir.

Tamamen düz yüzeylerden oluşan bir ayna sistemi, batarya taşıyıcısına yakın konumlanan cıvatalarda robot çarpışma riski doğurduğundan uygun bir çözüm oluşturmamaktadır. Bu nedenle, düz yüzey yansıtma kabiliyeti korunurken, yapısal olarak kompakt ve açısal gözlem sağlayabilen bir ayna mimarisinin geliştirilmesi gerekmiştir. Bu doğrultuda tasarlanan üç düz aynalı görüntüleme sistemi Şekil 14'te gösterilmektedir.



Şekil 14. Üç düz ayna ile görüntüleme yöntemi.

Yeni geliştirilen ayna sisteminin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla, batarya taşıyıcısı üzerinde bulunan M6 ve M8 cıvatalar üzerinde kontrollü hata senaryoları uygulanmıştır. Bu kapsamda öncelikle temsil niteliği taşıyan bir parça seçilmiş ve deneysel çalışma için işaretlenmiştir. Elektro-kaplama öncesi maskeleme aşamasında, örnek parçadaki toplam 22 cıvataya plastik kapaklar takılmıştır. Bu kapaklardan 11'i (6 adet M6 ve 5 adet M8 cıvata) özellikle hatalı yerleştirilerek boyama hatalarının kontrollü biçimde oluşturulması sağlanmıştır. M6 cıvataları için ek örnek hazırlanmasının nedeni, bu cıvataların parça üzerinde farklı uzunluklarda bulunması ve dolayısıyla daha fazla varyasyon gerektirmesidir. Boyama işleminin ardından numuneler parça üzerinden kesilerek ayrılmış ve deneylerde kullanılmak üzere uygun şekilde etiketlenmiştir. Numune hazırlama sürecine ilişkin görseller Şekil 15'te sunulmaktadır.



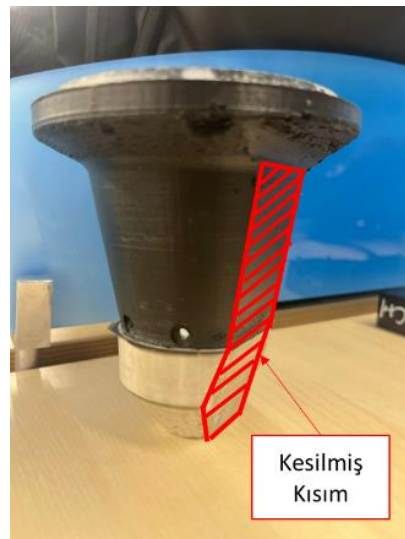
Şekil 15. Hazırlanan test numunelerinin görselleri.

Tablo 2’de, hazırlanan boyalı ve boyasız numunelere ait sınıflandırma bilgileri verilmiştir. Tablo, farklı dış bölgelerinde oluşturulan kaplama hatalarının dağılımını ortaya koymakta ve sistemin hem hatalı hem de hatasız durumları ayırt edebilmesini değerlendirmek üzere oluşturulan veri çeşitliliğini göstermektedir. Buna göre çalışma kapsamında toplam 22 numune kullanılmış; bunların beşi tamamen, altısı ise kısmen boyanmış M8 cıvatalardan oluşmuştur. Kalan numuneler ise farklı seviyelerde boyanmış veya tamamen boyasız M6 cıvatalardır. Bu çeşitlilik, sistemin farklı kaplama kalınlıkları ve yansıtırlık özelliklerine sahip yüzeylerdeki performansının kapsamlı şekilde analiz edilmesine olanak sağlamıştır.

Tablo 2. Boyanmış ve boyanmamış cıvata numunelerinin numaralandırılması.

Numune çeşidi	Boyanmış dişler	Numune no.
M8 boyalı numuneler	İlk 5 diş boyalı	Numune 01
	İlk 6 diş boyalı	Numune 02
	Tüm dişler boyalı	Numune 03
	İlk 3 diş boyalı	Numune 04
	İlk 2 diş boyalı	Numune 05
M8 boyasız numuneler		Numune 06
		Numune 07
		Numune 08
		Numune 09
		Numune 10
M6 boyalı numuneler	İlk 5 diş boyalı	Numune 11
	İlk 7 diş boyalı	Numune 12
	İlk 4 diş boyalı	Numune 13
	İlk 5 diş boyalı	Numune 14
	İlk 6 diş boyalı	Numune 15
	İlk 4 diş boyalı	Numune 16
M6 boyasız numuneler		Numune 17
		Numune 18
		Numune 19
		Numune 20
		Numune 21
		Numune 22

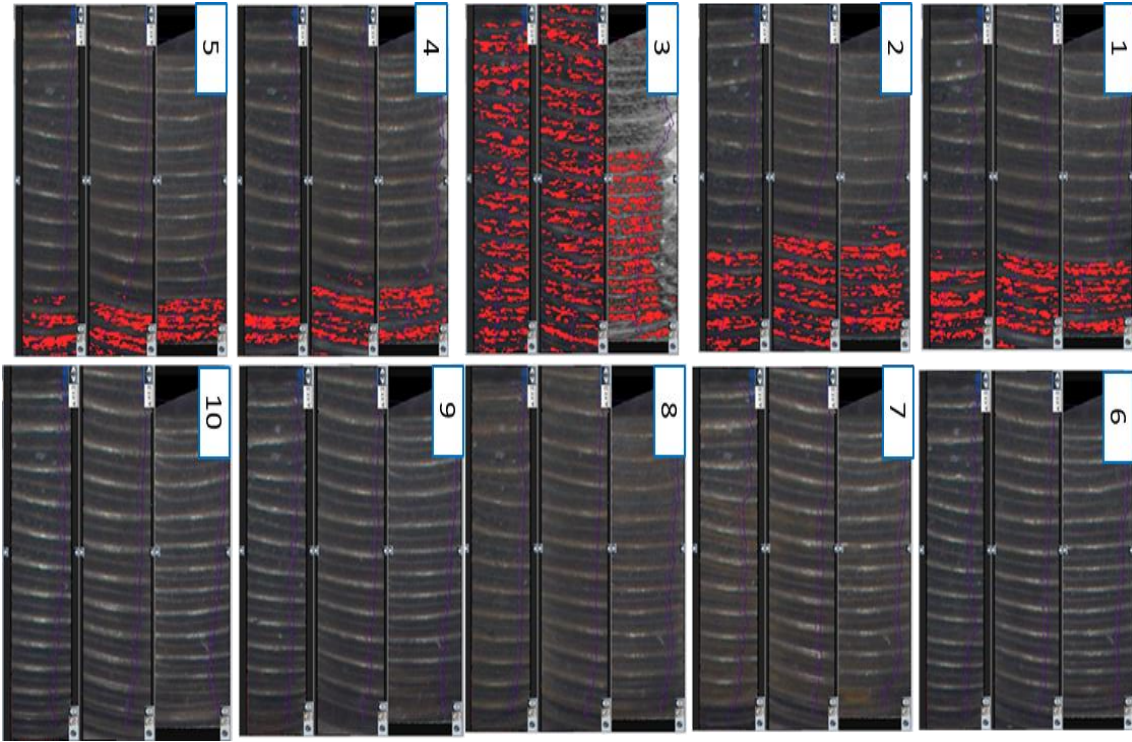
Numuneler hazırlandıktan sonra prototip çalışmasına geçilmiştir. Herhangi bir işlem sırasında ana kamera sisteminin zarar görmesini önlemek amacıyla, dış koruma için 3D yazıcı kullanılarak plastik bir prototip üretilmiştir. Daha önce de belirtildiği üzere, tek bir büyük konik ayna yerine üç düz ayna kullanılmasıyla elde edilen hacimsel avantajdan yararlanılarak tasarımda dış çıkıntının bir kısmı kesilmiştir. Bu yapısal değişikliğe ait prototip tasarım Şekil 16’da gösterilmektedir.

**Şekil 16.** Üç düz aynalı sistemin prototip tasarımı.

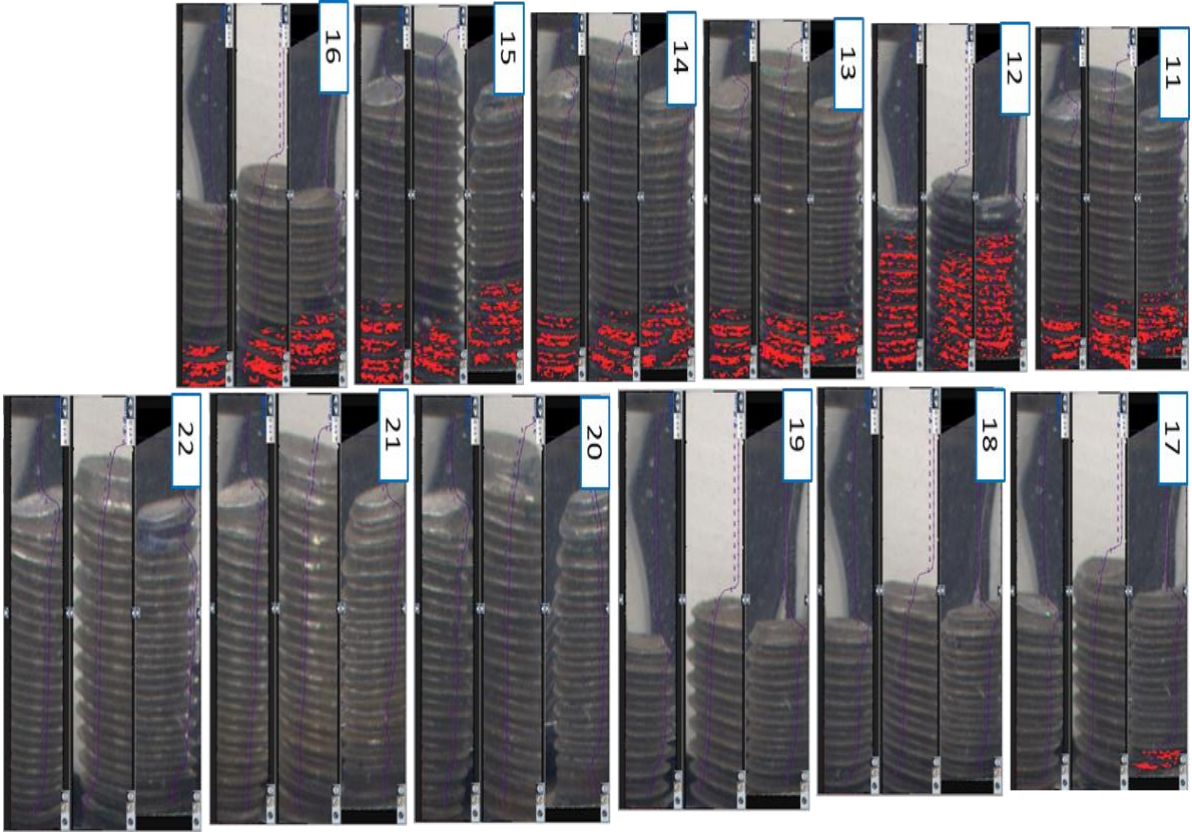
Aynaların üretimi tamamlandıktan sonra, plastik prototip üzerine monte edilmiş ve hazırlanan numuneler ile test sürecine başlanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

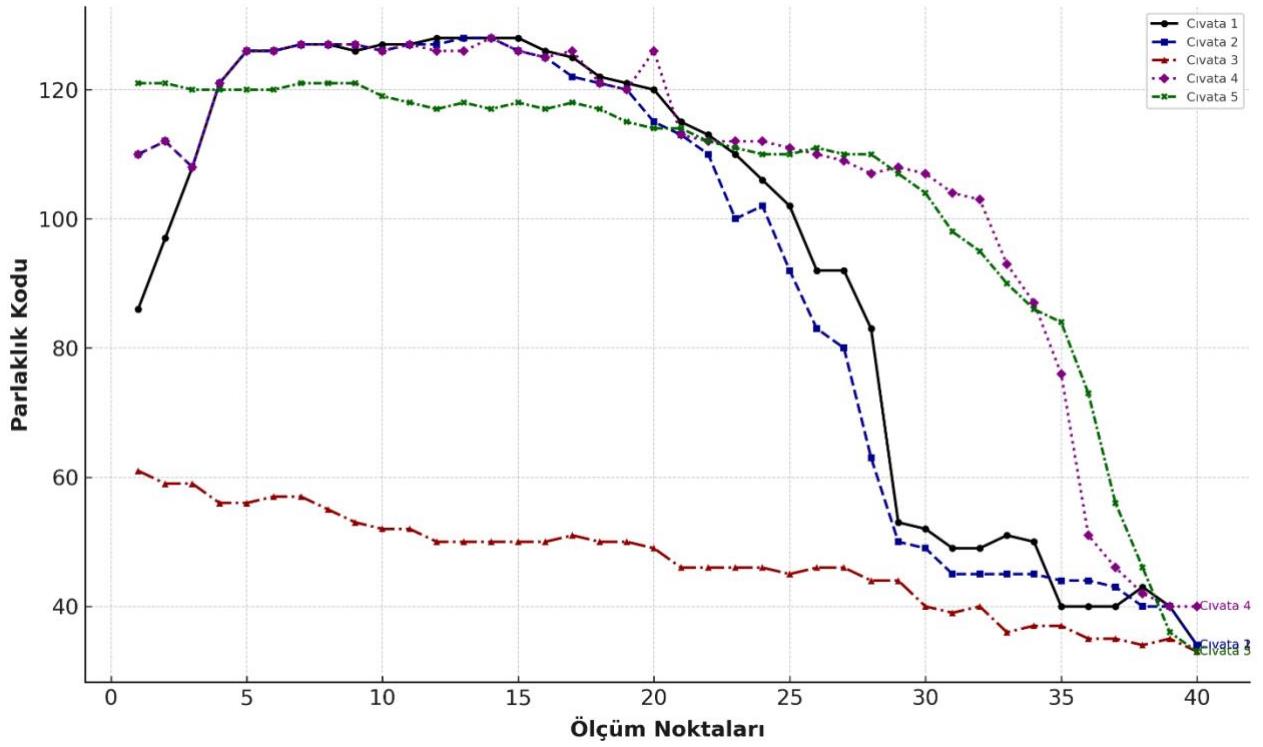
Üç aynalı kamera sistemi kullanılarak cıvataların görüntülenme süreci aşağıda gösterilmiştir. Görüntülerin küçük boyutlu olması nedeniyle, sonuçlar bir sonraki sayfalarda grafiksel formatta sunulacaktır. Bu kapsamda, boyanmış ve boyanmamış cıvatalara ait gözlem görselleri Şekil 17 ve Şekil 18’de sırasıyla M8 ve M6 cıvatalar için sunulmuştur.



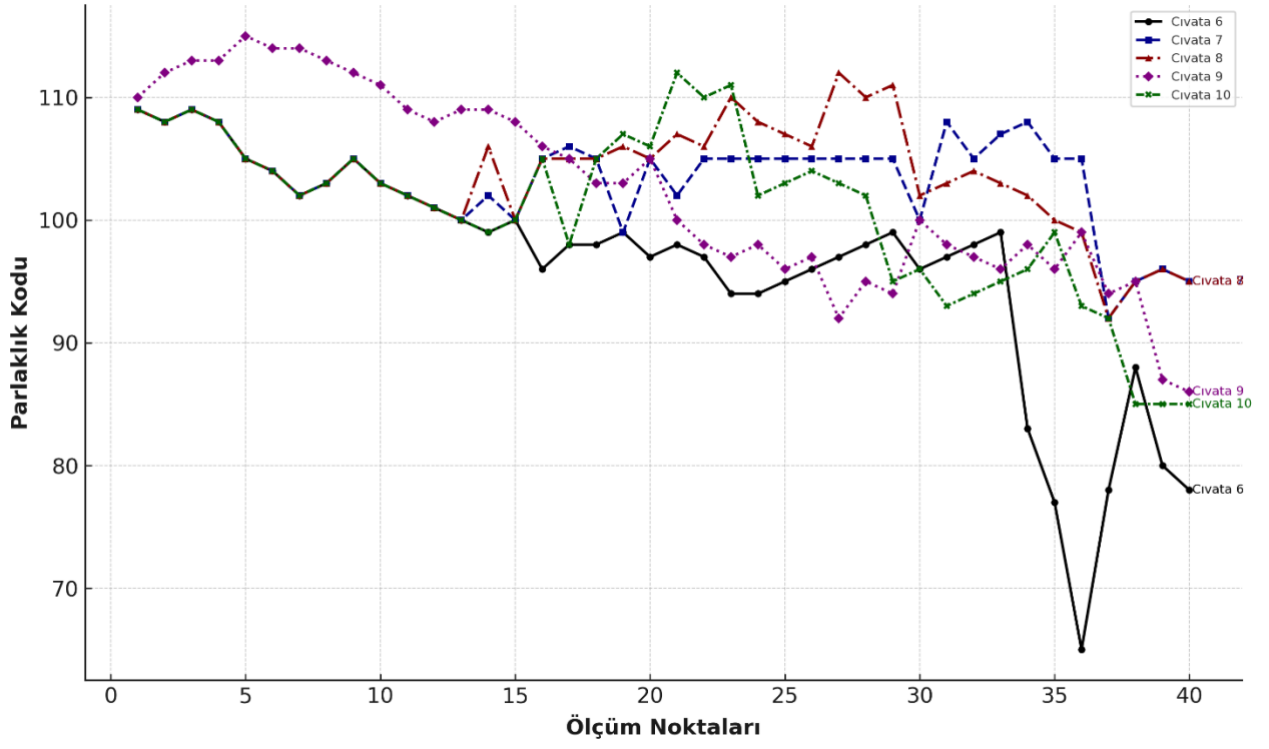
Şekil 17. M8 cıvatalara ait boyanmış ve boyanmamış yüzey gözlem görselleri.



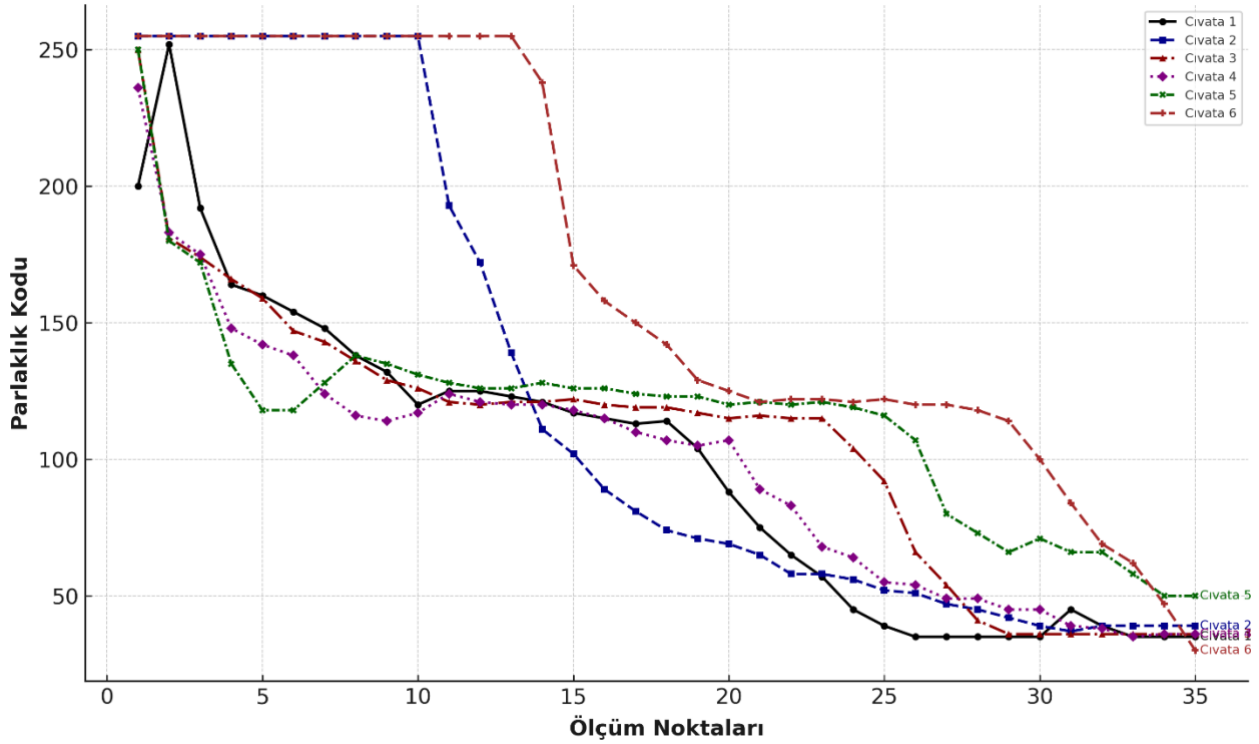
Şekil 18. M6 cıvatalara ait boyanmış ve boyanmamış yüzey gözlem görselleri.



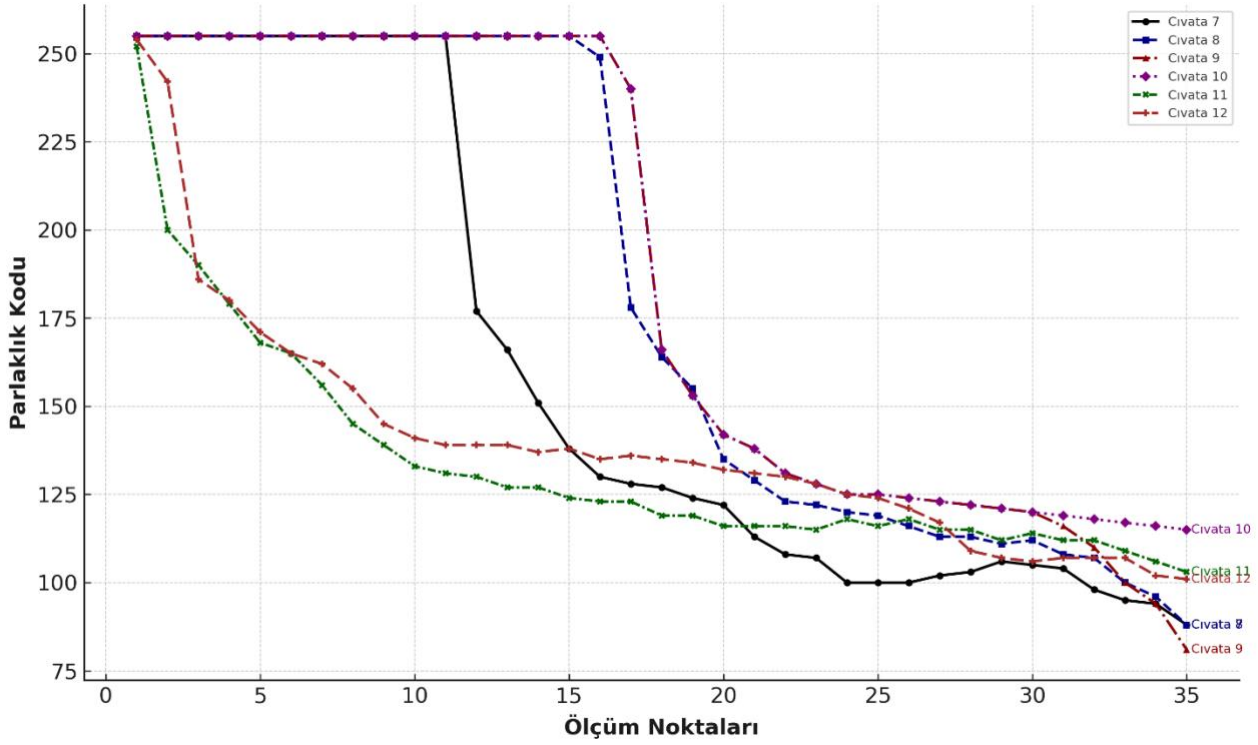
Şekil 19. Boyanmış M8 cıvataların parlaklık kodu dağılımı.



Şekil 20. Boyanmamış M8 cıvataların parlaklık kodu dağılımı.



Şekil 21. Boyanmış M6 cıvataların parlaklık kodu dağılımı.



Şekil 22. Boyanmamış M6 cıvataların parlaklık kodu dağılımı.

Şekil 19–22’de, boyalı ve boyasız M6 ile M8 cıvata numunelerine ait parlaklık kodu dağılımları verilmiştir. Her bir grafik, görüntüyü oluşturan piksellerin parlaklık intensitesini temsil etmekte olup yüzey karakteristiğinin nicel olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır. Yapılan ölçümlere göre çeliğin doğal gri yüzeyinde parlaklık kodu değerleri 60–130 aralığında değişirken, siyah katodik elektro-kaplama uygulanan yüzeylerde bu değerler 30–60 bandında yoğunlaşmaktadır. Bu iki aralık, boyalı ve boyasız yüzeylerin ayırımında temel referans değerleri oluşturmaktadır.

Grafiklerde 120 üzerinde görülen ani yükselmeler, çoğunlukla yüzeyin kameraya göre yansıma açısının değişmesiyle parlayan cıvata başlarına, ya da özellikle kısa M6 cıvatalarda kamera kadrajını tam dolduramayan bölgelerde oluşan beyaz piksel kümelerine karşılık gelmektedir. Bu bölgeler analiz kapsamı dışında bırakılmıştır.

M8 cıvataları temsil eden Şekil 19 ve 20’de, üç düz aynalı sistemin hem boyalı hem boyasız yüzeylerde yüksek tutarlılıkta parlaklık eğilimleri ürettiği görülmektedir. Bununla birlikte, Şekil 20’de 6 numaralı numunede tespit edilen ani parlaklık düşümü yapılan inceleme sonucu cıvata yüzeyine yapışan yabancı plastik partikülünden kaynaklanmıştır. Bu bulgu, sistemin yalnızca kaplama hatalarını değil, yabancı madde kaynaklı yüzey anomalilerini de renk farkından dolayı güvenilir bir biçimde tespit edebildiğini göstermektedir.

M6 cıvatalarına ait Şekil 20 ve 21’de de benzer bir tutarlılık elde edilmiştir. Üç aynalı yapı, daha küçük numunelerde bile kaplama kalitesi ile doğal yüzey farkını ayırt edebilmiş, farklı cıvata boyutlarında ölçüm doğruluğunu korumuştur. Bu sonuç, sistemin parça boyutundan bağımsız çalışan

bir geometrik uyumluluk sunduğunu göstermektedir. Çalışmada kullanılan üç düz aynalı konfigürasyon ile çift lazer hizalama mekanizması, alt diş bölgelerinin görünürlüğünü artırmış ve robotik konumlandırma hatalarını azaltarak sistemin endüstriyel ortamdaki tekrarlanabilirliğini güçlendirmiştir.

Tablo 3. Parlaklık kodlarının istatistiksel özeti.

Cıvata Türü	Min	Max	Ortalama (μ)	Std (σ)	Yorum
M8 – Boyalı	33	128	88.9	34.9	Kaplama parsiyel; geniş dağılım
M8 – Boyasız	65	115	101.5	7.4	Doğal yüzey; düşük değişkenlik
M6 – Boyalı	30	255	118.7	66.6	Yansıma etkisi güçlü; geniş varyasyon
M6 – Boyasız	81	255	165.2	61.9	Çelik parlaklığı yüksek; tepe noktaları güçlü

Tablo 3’te sunulan ölçümler, M8 ve M6 cıvatalarda elde edilen parlaklık kodlarının kaplama durumuna bağlı olarak farklı dağılımlar oluşturduğunu göstermektedir. Boyalı M8 numunelerde parlaklık kodu 33 ile 128 arasında değişmekte ve ortalama değer 88.9 düzeyinde gerçekleşmektedir. Bu geniş aralık, hem kaplamanın yüzey boyunca homojen olmayan yansıma özelliklerini hem de ölçüm geometrisinin etkilerini yansıtmaktadır. Boyasız M8 numunelerde ise değerlerin 65–115 aralığında kümelenmesi ve standart sapmanın 7.4 gibi düşük bir seviyede bulunması, doğal çelik yüzeyinin daha kararlı bir parlaklık profili sunduğunu göstermektedir.

M6 numunelerde ise boyalı yüzeylerde parlaklık kodunun 30 ile 255 gibi geniş bir aralıkta dağılması ve ortalamanın 118.7 seviyesine çıkması, özellikle yüzey yansıması ve dar görüş alanı etkisinin belirgin olduğunu göstermektedir. Boyasız M6 numunelerde ortalamanın 165.2’ye yükselmesi ve üst uç değerlerin 255 seviyesine ulaşması, kısa cıvata geometrisinin kameraya göre daha yüksek parlama eğilimi oluşturduğunu işaret etmektedir. Bu durum M6 ve M8 cıvatalar arasındaki ışık yansıtma davranışının yalnızca kaplama durumundan değil, parça boyutundan da etkilendiğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, kaplamasız yüzeylerde ortalama parlaklık kodlarının belirgin şekilde yüksek olması; kaplama uygulanmış yüzeylerde ise hem ortalama değerlerin düştüğü hem de dağılımın daraldığı görülmektedir. Bu fark, kaplamanın ışığı soğurma kapasitesinin güçlü olduğunu ve iki yüzey tipinin parlaklık profili üzerinden güvenilir şekilde ayrıştırılabildiğini göstermektedir. Bununla birlikte ölçümlerde görülen yüksek tepe değerlerinin çoğunlukla yüzey yansıması, cıvata boyut farkı ve görüntü kadrajının dolmaması gibi fiziksel etkenlere bağlı olduğu

anlaşılmaktadır. Bu nedenle gelecekte yapılacak çalışmaların yüzey parlaklık eğilimlerinin analizini, bölgesel yoğunluk değişimlerini ve ani geçişleri dikkate alan daha ayrıntılı yöntemlerle desteklenmesi uygun olacaktır.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Literatürde kaplama kusurlarının tespiti üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, yaklaşımların çoğunlukla yazılımsal sınıflandırma modellerine veya donanımsal görüntüleme düzeneklerine odaklandığı görülmektedir. Han ve ark. (2025) çok aşamalı derin öğrenme tabanlı bir kaplama denetim çerçevesiyle yüksek doğrulukta hata sınıflandırması sağlamış olsa da, fiziksel görünürlük alanını artıran bir optik yenilik önermemektedir. Drago Bračun ve Lekše (2019) tarafından sunulan fark görüntüleme yaklaşımı sabit kamera geometrisine bağımlı olduğundan büyük ve karmaşık yüzeylerde sınırlı kalmaktadır. Manoj Babu ve ark. (2019) serbest biçimli yüzeylerin robotik optik taramayla hizalanmasını iyileştirse de odak noktası kaplama kusurlarının optik tespiti değil geometrik tolerans kontrolüdür. Erdoğan ve Yayan (2024), kamera tabanlı robotik sistemlerin güvenilirliğini hata enjeksiyonu ile inceleyerek lazer merkezleme mekanizmalarının güvenlik avantajlarını ortaya koymuş, ancak kaplama hatası analizi gerçekleştirmemiştir. Lin ve ark. (2025) ise transfer öğrenme tabanlı bir modeli montaj hatalarına uygulamış, ancak farklı geometrilere sahip bağlantı elemanlarına ölçeklenebilirlik sorunu tam olarak giderilememiştir.

Bu çalışmada geliştirilen sistem, söz konusu boşlukları hedefleyerek üç düz aynalı yansıtımlı görüntüleme yapısı ile çift lazer destekli robot hizalama mekanizmasını bir araya getiren kompakt bir mimari önermektedir. Önerilen yapı, sabit bir kamera ile çok açılı gözlem imkânı sağlayarak optik kapsama alanını artırmakta ve kaplama yüzeyinin kritik bölgelerinin görünür hale getirilmesine olanak tanımaktadır. Çift lazer merkezleme, robot konumlama hatalarını azaltarak görüntülerin tekrarlanabilirliğini yükseltmekte, böylece hem hatalı kaplama alanlarının hem de yabancı madde kaynaklı anomalilerin güvenilir biçimde algılanmasını mümkün kılmaktadır.

Uygulama testleri, M6 ve M8 cıvatalarda farklı kaplama senaryoları altında elde edilen parlaklık kodlarının yüzey karakteristiğini nicel olarak temsil ettiğini göstermiştir. Boyasız yüzeylerde parlaklık kodunun 60–130, boyalı yüzeylerde ise 30–60 aralığında yoğunlaşması, sistemin yüzey yapısına bağlı ışık yansıtma özelliklerini ayrıştırabildiğini doğrulamaktadır. Ortalama parlaklık farkının yaklaşık 60 birim düzeyinde olması, eşikleme tabanlı algoritmanın sınıflandırma performansını sayısal olarak desteklemektedir. Ayrıca M8 numunelerinden birinde gözlenen ani parlaklık düşümünün, yüzeye yapışmış plastik bir partikülden kaynaklandığının belirlenmesi, sistemin kaplama homojenliğinin yanında yüzey temizliği ve kontaminasyon gibi üretim açısından kritik kusurları da tespit edebildiğini ortaya koymaktadır.

Elde edilen bulgular, geliştirilen çözümün literatürdeki maliyeti yüksek ve geniş alan kaplayan döner mekanizmalı sistemlere veya tek yönlü kamera tabanlı çözümlere kıyasla daha kompakt, düşük maliyetli ve mevcut hatlara entegre edilebilir bir alternatif sunduğunu göstermektedir. Aynalı yapı sayesinde karmaşık yüzeylerin görünürlüğü artırılmış, robotik kontrol ile optik hizalama doğruluğu güçlendirilmiş ve sistemin endüstriyel ortam koşullarına uyumu deneysel olarak doğrulanmıştır. Buna bağlı olarak, geliştirilen mimarinin özellikle batarya taşıyıcıları gibi kritik bileşenlerde kullanılan civataların kalite kontrolünde uygulanabilir ve ölçeklenebilir bir çözüm niteliği taşıdığı söylenebilir.

Bununla birlikte, mevcut sistem parlaklık kodu tabanlı bir eşikleme yaklaşımına dayandığından, daha karmaşık yüzey anomalilerinin ayrıştırılmasında sınırlılıklar doğabileceği öngörülmektedir. Bu nedenle yöntemin çok boyutlu hale getirilmesi ve karar sınırlarının daha esnek biçimde tanımlanması amacıyla yapay zekâ tabanlı sınıflandırma modelleri ile desteklenmesi önerilmektedir. Literatürde boyalı yüzeylerdeki mikro kusurların çeşitli sinir ağı mimarileriyle yüksek doğrulukla sınıflandırılabilirdiği gösterilmiştir (Jiang ve ark., 2023). Yapay zekâ tabanlı kalite kontrol çözümlerinin endüstriyel ortamlara entegrasyonunda veri akışı, kestirimci analizler ve karar destek yapılarının belirleyici bir rol üstlendiği; Industrial AI yaklaşımlarının ise dinamik ve karmaşık üretim hatlarında gerçek zamanlı veri işleme ve çok aşamalı karar mekanizmalarını güçlendirebildiği vurgulanmaktadır (Peres ve ark., 2020). Bu çerçevede, çalışmada sunulan optik mimarinin yapay zekâ temelli modellerle birleştirilmesi, sistemin kararlılığını ve hata ayıklama kabiliyetini daha da geliştirecek potansiyele sahiptir.

Gelecekte geliştirilen sistemin dijital ikiz tabanlı üretim ortamlarına entegrasyonu planlanmaktadır. Dijital ikiz modeli ile üretim hattından toplanan görüntü ve sensör verilerinin gerçek zamanlı işlenmesi, sistem durumunun sürekli izlenmesini ve yapay zekâ destekli kestirimci kalite analizlerinin gerçekleştirilmesini mümkün kılacaktır. Bu entegrasyon öncesinde yöntemin sınırlarının belirlenmesi amacıyla kontrollü hat senaryolarında tekrarlanabilirlik, duyarlılık ve yanlış alarm oranı gibi nicel metrikler üzerinden kapsamlı bir deneysel doğrulama yapılması öngörülmektedir. Elde edilecek bulgular, dijital ikiz modelinin parametre ayarlarına ve yapay zekâ modellerinin çevrim içi güncelleme stratejilerine doğrudan girdi sağlayacaktır.

Sonuç olarak, üç düz aynalı optik mimari, lazer destekli hizalama ve görüntü işleme algoritmalarını bir araya getiren geliştirilen sistem, kaplama temelli kalite denetiminde işlevsel bir yenilik sunmaktadır. Yapay zekâ tabanlı yöntemlerle desteklendiğinde, sistemin hassasiyet, esneklik ve karar verme kapasitesinin daha da artacağı ve otomotiv endüstrisinde yüksek doğruluklu, düşük maliyetli ve entegrasyonu kolay bir kontrol çözümü olarak konumlanabileceği değerlendirilmektedir.

Yazarların Katkısı

Makalede yer alan tüm bilimsel katkılar tek yazar tarafından sağlanmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Bu çalışma kapsamında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Akafuah, N. K., Poozesh, S., Salaimah, A., Patrick, G., Lawler, K., ve Saito, K. (2016). Evolution of the automotive body coating process – A review. *Coatings*, 6(2), 24. <https://doi.org/10.3390/coatings6020024>
- Ali, M., Mailah, M., Tang, H. H., ve Kazi, S. (2012). Visual inspection of cylindrical product's lateral surface using cameras and image processing. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 6, 340-348.
- Besra L., ve Liu, M. (2007). A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD). *Progress in Materials Science*, 52, 1-61. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.07.001>
- Bessant, J., ve Caffyn, S. (1997). High-involvement innovation through continuous improvement. *International Journal of Technology Management*, 14. <https://doi.org/10.1504/IJTM.1997.001705>
- Bračun, D., ve Lekše, I. (2019). A visual inspection system for KTL coatings. *Procedia CIRP*, 81, 771-774. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.192>
- Burggräf, P., Wagner, J., Heinbach, B., Steinberg, F., Pérez M., A. R., Schmallenbach, L., Garcke, J., Steffes-lai, D., ve Wolter, M. (2021). Predictive analytics in quality assurance for assembly processes: Lessons learned from a case study at an industry 4.0 demonstration cell. *Procedia CIRP*, 104, 641-646. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.14113715.v1>
- Chen, W., Liu, H., Tang, Y., ve Liu, J. (2017). Trajectory optimization of electrostatic spray painting robots on curved surface. *Coatings*, 7(10), 155. <https://doi.org/10.3390/coatings7100155>
- Chen, Y., Kang, Y., Zhao, Y., Wang, L., Liu, J., Li, Y., Liang, Z., He, X., Tavajohi, N., ve Li, B. (2021). A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards. *Journal of Energy Chemistry*, 59, 83-99. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.10.017>
- Contri, G., Zimmermann, C. A., Ramoa, S. D. A. D. S., Schmitz, D. P., Ecco, L. G., Barra, G. M. O., ve Fedel, M. (2020). Polypyrrole modified e-coat paint for corrosion protection of aluminum AA1200. *Frontiers in Materials*, 7, 45. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00045>
- Çalışkan, M., ve Kayır, Y. (2025). Görüntü işleme tekniği ile üretimde süreç izleme. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(4), 1975-1992. <https://doi.org/10.47495/okufbed.1545564>
- García-Martín, J., Gómez-Gil, J., ve Vázquez-Sánchez, E. (2011). Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors*, 11(3), 2525-2565. <https://doi.org/10.3390/s110302525>
- Gonçalves, L. S., Campilho, R., ve Prakash, C. (2023). Development of quality assurance system in the automotive industry. *10th Manufacturing Engineering Society International Conference*, 132, 43-52. <https://doi.org/10.4028/p-Rci2nA>
- Gupta, A. K., Arora, S. K., ve Westcott, J. (2016). *Industrial automation and robotics: An introduction*. Mercury Learning & Information.

- Güçlü, E., Aydın, İ., ve Akın, E. (2024). Çift doğrusal CNN kullanarak çelik yüzey kusurlarının sınıflandırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 36(1), 267-280. <https://doi.org/10.35234/fumbd.1323339>
- Güçlü, E., Aydın, İ., Şener, T. K., Akın, E. (2022). Çelik Yüzeylerdeki Kusurların Tespiti için Derin Öğrenme Tabanlı Gömülü Sistem Tasarımı. *EMO Bilimsel Dergi*, 12(2), 27-33.
- Haak, V., Yang, K., ve Meschut, G. (2024). Investigation of the electrical quality and long-term stability of aluminum ground stud connections in automotive applications. *Journal of Advanced Joining Processes*, 10, 100262. <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2024.100262>
- Han, C., Lee, J., Jun, M. B. G., et al. (2025). Visual coating inspection framework via self-labeling and multi-stage deep learning strategies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 36, 2461-2478. <https://doi.org/10.1007/s10845-024-02372-9>
- Hinckley, C. M. (1997). Defining the best quality-control systems by design and inspection. *Clinical Chemistry*, 43(5), 873-879. <https://doi.org/10.1093/clinchem/43.5.873>
- Jeong, Y.-N., Okwuosa, C. N., Hwang, J.-W., ve Hur, J.-W. (2025). Optimization of flow rate for uniform zinc phosphate coating on steel cylinders: A study on coating uniformity and elemental composition using scanning electron microscopy (SEM). *Materials*, 18, 2442. <https://doi.org/10.3390/ma18112442>
- Jiang, Z., Hu, X., ve Wang, S. (2023). Image classification of car paint defect detection based on convolutional neural networks. *Journal of Physics: Conference Series*, 2456, 012037. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2456/1/012037>
- Jones, A., Uggalla, L., Li, K., Fan, Y., Willow, A., Mills, C. A., ve Copner, N. (2021). Continuous in-line chromium coating thickness measurement methodologies: An investigation of current and potential technology. *Sensors*, 21, 3340. <https://doi.org/10.3390/s21103340>
- Kesici, B., ve Yıldız, M. (2022). Performance evaluation of the IATF 16949:2016 quality management system in an automotive supplier with the balanced scorecard model. *Trends in Business and Economics*, 36, 203-214. <https://doi.org/10.54614/TBE.2022.930725>
- Kılınç, M., ve Akyalçın, L. (2022). Kataforez kaplamalı çelik yüzeylere uygulanan dubleks kaplamanın korozyon dayanım performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi. *ESOGÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(1), 68-78. <https://doi.org/10.31796/ogummf.981120>
- Kong, Z., Jin, Y., Hong, S., Liu, Q., Vu, Q.-V., ve Kim, S.-E. (2022). Degradation behavior of the preload force of high-strength bolts after corrosion. *Buildings*, 12, 2122. <https://doi.org/10.3390/buildings12122122>
- Learner, T. (2000). A review of synthetic binding media in twentieth-century paints. *The Conservator*, 24. <https://doi.org/10.1080/01410096.2000.9995156>
- Li, J., Murphy, E., Winnick, J., ve Kohl, P. A. (2001). Studies on the cycle life of commercial lithium-ion batteries during rapid charge-discharge cycling. *Journal of Power Sources*, 102(1-2), 294-301. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00821-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00821-7)
- Li, Z., Yan, Y., Wang, X., Ge, Y., ve Meng, L. (2025). A survey of deep learning for industrial visual anomaly detection. *Artificial Intelligence Review*, 58, 279. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11287-7>
- Lin, H.-D., Wu, H.-L., ve Lin, C.-H. (2025). A deep transfer learning-based visual inspection system for assembly defects in similar types of manual tool products. *Sensors*, 25, 1645. <https://doi.org/10.3390/s25061645>
- Louda, Petr. (2007). Applications of Thin Coatings in Automotive Industry. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 24.
- Ma, J. (2020). An experimental study on factors affecting the friction coefficients in electroplated bolts. *Tribology Transactions*, 63, 1-15. <https://doi.org/10.1080/10402004.2020.1778146>
- Maile, F., Pfaff, G., ve Reynders, P. (2005). Effect pigments – past, present and future. *Progress in Organic Coatings*, 54, 150-163. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2005.07.003>
- Manoj Babu, M., Franciosa, P., ve Ceglarek, D. (2019). Spatio-temporal adaptive sampling for effective coverage measurement planning during quality inspection of free-form surfaces using robotic 3D optical scanner. *Journal of Manufacturing Systems*, 53, 93-108. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.08.003>
- Marcos, D., Garmendia, M., Crego, J., ve Cortajarena, J. A. (2021). Functional safety BMS design methodology for automotive lithium-based batteries. *Energies*, 14, 6942. <https://doi.org/10.3390/en14216942>
- Marin-Garcia, J. A., Garcia-Sabater, J. J., ve Bonavia, T. (2009). The impact of Kaizen events on improving the performance of automotive components' first-tier suppliers. *International Journal of Automotive Technology and Management*, 9(4), 362-376. <https://doi.org/10.1504/IJATM.2009.028524>

- Matope, S., Gibson, C., ve Blessed, S. (2022). Continuous improvement for cost savings in the automotive industry. *Journal of Systems Architecture*, 14(22), 15319. <https://doi.org/10.3390/su142215319>
- Miao, R., Shen, R., Zhang, S., ve Xue, S. (2020). A review of bolt tightening force measurement and loosening detection. *Sensors*, 20(11), 3165. <https://doi.org/10.3390/s20113165>
- Morales Matamoros, O., Takeo Nava, J. G., Moreno Escobar, J. J., ve Ceballos Chávez, B. A. (2025). Artificial intelligence for quality defects in the automotive industry: A systemic review. *Sensors*, 25, 1288. <https://doi.org/10.3390/s25051288>
- Mourtzis, D., Milas, N., ve Athinaios, N. (2018). Towards machine shop 4.0: A general machine model for CNC machine-tools through OPC-UA. *Procedia CIRP*, 78, 301-306. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.09.045>
- Muram, F. U., Gallina, B., ve Gómez Rodríguez, L. (2018). Preventing omission of key evidence fallacy in process-based argumentations. *11th International Conference on the Quality of Information and Communications Technology (QUATIC)*, Coimbra, Portugal, 65-73. <https://doi.org/10.1109/QUATIC.2018.00019>
- Muram, F. U., Pob, P., ve Javed, M. A. (2024). Assuring the safety of rechargeable energy storage systems in electric vehicles. *Energy*, 154, 103218. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2024.103218>
- Němcová, M., ve Paráková, M. (2021). Metal. In *Proceedings 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials* (s. 705-710). May 26-28. <https://doi.org/10.37904/metal.2021.4169>
- Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., ve Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: Present and future. *Materials Today*, 18(5), 252-264. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040>
- Öztürk, S., ve Kuncan, M. (2020). Kameradan alınan görüntünün CNC tezgâhında gerçek zamanlı olarak işlenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(3), 1251-1263. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.618965>
- Pedone, P., Vicario, G., ve Romano, D. (2009). Kriging-based sequential inspection plans for coordinate measuring machines. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 25(2), 133-149. <https://doi.org/10.1002/asmb.746>
- Peres, R., Jia, X., Lee, J., Sun, K., Colombo, A., ve Barata, J. (2020). Industrial artificial intelligence in Industry 4.0: Systematic review, challenges and outlook. *IEEE Access*, 8, 220121-220139. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3042874>
- Pilch-Pitera, B., Florczak, Ł., Czachor-Jadacka, D., Bellucco, F., Węgrzyniak-Kściuczyk, E., Daszykowska, K., ve Zychowicz, M. (2025). Anticorrosion activity of low-zinc powder coating primers containing single-walled carbon nanotubes. *Materials*, 18, 4587. <https://doi.org/10.3390/ma18194587>
- Rudnick, L. R. (Ed.). (2017). *Lubricant additives: Chemistry and applications* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315120621>
- Scholz-Reiter, B., Thamer, H., ve Lütjen, M. (2010). Optical quality assurance in micro production. *Proceedings of International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists (IMECS 2010)*, Hong Kong, China.
- Schleipen, M., Gilani, S. S., T., Bischoff, T., ve Pfrommer, J. (2016). OPC UA & Industrie 4.0 – Enabling technology with high diversity and variability. *Procedia CIRP*, 57, 315-320. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.055>
- Semitela, Â., Pereira, M., Completo, A., Lau, N., ve Santos, J. P. (2025). Improving industrial quality control: A transfer learning approach to surface defect detection. *Sensors*, 25, 527. <https://doi.org/10.3390/s25020527>
- Shen, X., Liu, H., Cheng, X.-B., Yan, C., ve Huang, J.-Q. (2018). Beyond lithium-ion batteries: Higher energy density battery systems based on lithium metal anodes. *Energy Storage Materials*, 12, 161-175. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2017.12.002>
- Tsybul'skaya, L., Gaev'skaya, T. V., Purov'skaya, O. G., ve Byk, T. (2008). Electrochemical deposition of zinc–nickel alloy coatings in a polyligand alkaline bath. *Surface & Coatings Technology*, 203, 234-239. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.08.067>
- Tzampazaki, M., Zografos, C., Vrochidou, E., ve Papakostas, G. A. (2024). Machine vision – moving from Industry 4.0 to Industry 5.0. *Applied Sciences*, 14(4), 1471. <https://doi.org/10.3390/app14041471>
- Wang, H., Wang, J., Chen, W., ve Xu, L. (2018). Automatic illumination planning for robot vision inspection system. *Neurocomputing*, 275, 19-28. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.05.015>
- Wei, R., Foster, S., Mei, H., Yan, F., Yang, R., Habli, I., O'Halloran, C., Tudor, N., Kelly, T., ve Nemouchi, Y. (2024). ACCESS: Assurance case centric engineering of safety–critical systems. *Journal of Systems and Software*, 213, 112034. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2024.112034>

- Won, Y., Kim, S., Park, K.-J., ve Eun, Y. (2021). Continuous productivity improvement using IoE data for fault monitoring: An automotive parts production line case study. *Sensors*, 21(21), 7366. <https://doi.org/10.3390/s21217366>
- Xu, J., Zhang, J., Zhang, K., Liu, T., Wang, D., ve Wang, X. (2020). An APF-ACO algorithm for automatic defect detection on vehicle paint. *Multimedia Tools and Applications*, 79. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-09245-2>
- Yaman, E., Ulubayrak, S., & Özbay, N. (2021). Fosfat Kaplama İşleminde Aktivasyon Parametreleri ve Kaplama Süresinin Kaplama Kalitesine Etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* (21), 629-634. <https://doi.org/10.31590/ejosat.832850>
- Yan, X., Liu, Z., Zheng, M., et al. (2024). Preload control method of threaded fasteners: A review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 37, 97. <https://doi.org/10.1186/s10033-024-01082-w>
- URL-1: <https://www.opto-e.com/en/industries/ITALA-G-cameras-for-high-speed-check-of-injector-nozzles> (Erişim Tarihi: 12 Kasım 2025).
- URL-2: <https://wileyindustrynews.com/en/contributions/panorama-view> (Erişim Tarihi: 12 Kasım 2025).