

Automation of the Paint Booth in an Automotive Plant and Improvement of Paint Process by Using Robots

 Oruç AKSOY¹  Ahmet AKBULUT^{2,*} 
¹ Ankara Factory MAN A.Ş. Akyurt/ANKARA

² Ankara University Faculty of Engineering, Electrical and Electronics Eng. Dept., Gölbaşı/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

The factors affecting the paint process in the paint shops in automotive plants are mainly; air flow, humidity, temperature and pressure. In order to bring these factors to most suitable conditions according to the type of paint and the surface to be painted, an automation system and programming has been established. Once the ambient conditions have been optimized, the spray paint process previously performed by the operators manually has been applied with the help of a Cartesian robot. In Cartesian robot programming, the operator's hand movements are referenced. In order to turn the system into a fully automatic system, cabinet automation system, Cartesian robot automation and an RFID tag system in addition to these two are integrated into the whole structure.

Article Info:

Research article

Received: 17/12/2019

Revision 24/02/2020

Accepted: 26/04/2020

Highlights

- Paint Booth control.
- Painting quality.
- Automation.

Keywords

Paint Robot

Motion Control

Speed Control

Paint Shop Industry 4.0



Figure A. Robot arm paint process: test (left), and real application (right)

Purpose: In this study, it is aimed to apply metal painting process with industrial robots and to ensure the necessary environment conditions to achieve the best paint quality by using automation systems.

Theory and Methods: Siemens Simotion Scout program and Simotion D controller are connected to two 5-axis Cartesian paint robots placed on the right and left of the vehicle to be painted. This controller provides control by connecting to the servo motors and servo drives on each axis through the written PLC program over the Profinet communication protocol. In addition to the control software, a control interface has been created in the WinCC flexible SCADA program. With the help of this interface program, the desired tools or parts were introduced and the paint process was carried out. Simotion Scout and WinCC Flexible programs are used in the Siemens Simatic Manager program infrastructure. Parameters such as supply air pressure, paint flow and distance significantly affect material consumption and dry film thickness. For this reason, various tests were performed gradually in the range of minimum and maximum values specified for each parameter and the values that gave the best results were determined.

Results: With this system, a better result has been achieved than an experienced painter. The paint thicknesses were in the target range of 93-105 μm and were of the desired quality prior to the sanding and finishing processes. Direct effects of paint flow, robot arm speed and ambient air flow on film thickness have been observed. In addition, significant energy savings have been achieved.

Conclusion: The approach used in the study showed that the most suitable film thickness can be achieved at the specified parameter values. It has been determined that the paint thickness standards of the manufacturers can be achieved by making precise adjustments to the parameters in question.



Bir Otomotiv Tesisinde Boya Kabininin Otomasyonu ve Boya Prosesinin Robot Kullanılarak İyileştirilmesi

Oruç AKSOY¹ Ahmet AKBULUT^{2,*}

¹ Ankara Fabrikası MAN A.Ş. Akyurt/ANKARA

² Ankara University Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Gölbaşı/ANKARA

Öz

Bu çalışmada; metal boyama yönteminin, endüstriyel robotlarla uygulanması, en iyi boya kalitesi için gerekli olan ortam şartlarının otomasyon sistemleri kullanılarak sağlanması ve sonuçta kalite, verim ve başarımdan oluşan parametreleri iyileştirmek hedeflenmiştir. Hava debisi, nem, sıcaklık ve basınç otomotiv tesislerindeki boyahanelerde boya prosesine etkileyen faktörlerdendir. Bu faktörleri, boya tipine ve boyanacak yüzeye göre en uygun şartlara getirebilmek için bir otomasyon sistemi ve programlanması yapılmıştır. Ortam şartları en uygun seviyeye getirildikten sonra daha önce operatörler tarafından elle yapılan sprey boya işlemi bir kartezyen robot yardımı ile uygulanmıştır. Kartezyen robot programlamada operatörün el hareketleri referans alınmıştır. Sonrasında ise sistemin tam otomatik hale getirilebilmesi için kabin otomasyon sistemi, kartezyen robot otomasyonu ve bu ikisine ilave olarak bir radyo frekans ile kimlik belirleme etiket sistemi tüm yapıya entegre edilmiştir. Bu entegrasyon ile kabinlerin araçları tanıyarak, kabin şartlarını araca ve boya tipine uygun hale getirmesi, robotu aracın konumuna göre doğru başlangıç noktasına iletmesi ve aracı doğru programda ve hatasız boyaması gibi çeşitli geliştirmeler elde edilmiştir.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 17/12/2019
Düzeltilme: 24/02/2020
Kabul: 26/04/2020

Anahtar Kelimeler

Boya Robotu
Hareket Kontrolü
Hız Kontrolü
Boyahane Endüstri 4.0

Keywords

Paint Robot
Motion Control
Speed Control
Paint Shop Industry 4.0

Automation of the Paint Booth in an Automotive Plant and Improvement of Paint Process by Using Robots

Abstract

In this study, it is aimed to improve the parameters consisting of quality, efficiency and performance with the application of metal painting method with industrial robots and using the automation systems for the realization of the environment conditions required for ensuring the optimum paint quality and additional improvements to be made throughout the study. The factors affecting the paint process in the paint shops in automotive plants are mainly air flow, humidity, temperature and pressure. An automation system and programming have been realized in order to bring these factors to the most suitable conditions according to the type of paint and the surface to be painted. Once the environmental conditions have been optimized, the spray paint process, which was done manually by the operators before, has been carried out with the help of a Cartesian robot. In Cartesian robot programming, the operator's hand movements have been referenced. In this way, the paint booth has been given the ability to recognize the vehicle and adapt the paint booth conditions to the vehicle and paint type. Furthermore, the robot can be advanced to the correct starting point by determining the current position of the vehicle. As a result, the aim of painting the vehicles without errors has been achieved.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

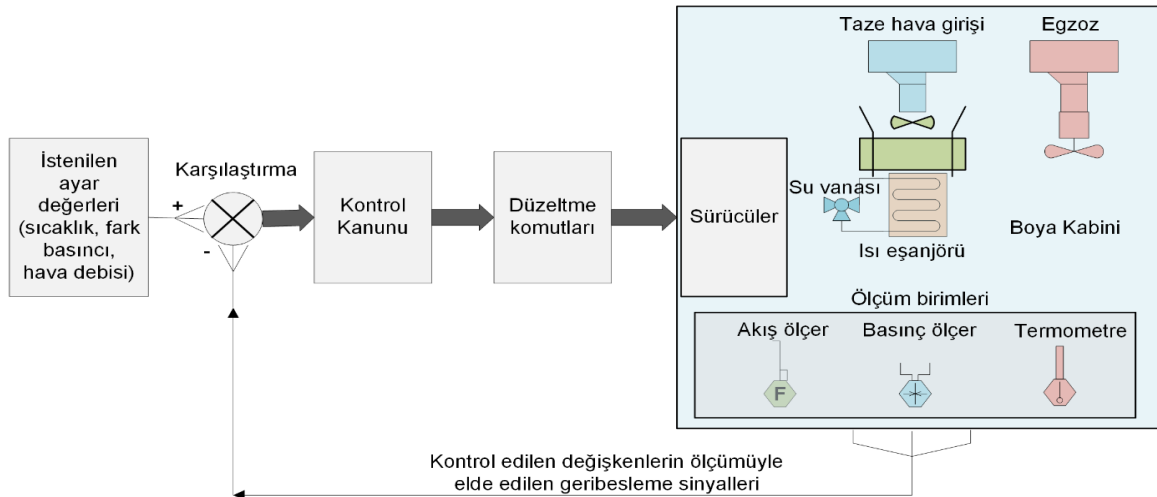
Boyahanelerde çalışan operatörlerin boya prosesi esnasında zehirleyici bir ortamda bulunması ve tedbirlere rağmen ortamın operatörler için tümüyle tehlikesiz hale getirilemediği sabittir. Literatüre bakıldığında, bu problemden kurtulmak amacıyla, boya işleminin robotize edilmesine yönelik bir hidrolik güç ünitesine ve bir kontrol ünitesine bağlı bir robotun tasarımı yapılmıştır [1]. İlerleyen dönemlerde otomotiv boyahanelerinde kaliteli boya yayılımı ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Kaliteli yayılım için gerekli parametreler formülize edilip sistem başarımını artırmak için en etkili metotlardan biri olan darboğaz analiz

yöntemi benimsenmiştir [2]. Bunun yanısıra farklı bir çalışmada otomotiv boya proseslerinde yapılan boya işlemlerinin çevreye olan etkileri ve her bir işlem adımında harcanan elektrik enerjisi yüzdesel olarak hesaplanmıştır. Enerji tüketiminin en yüksek olduğu adımların netleştirilmesinde esinlenilebilecek bir araştırma niteliğindedir [3]. Sprey boya proseslerinde malzeme tüketimi ve kuru film kalınlığı ile ilgili yapılan çalışmalarda tabanca hava basıncının, tabanca nozül çapının ve spreyleme sürelerinin film kalınlığına etkileri incelenirken [4] benzer bir çalışmada ise boya kabinlerindeki Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme (heating, ventilating and air conditioning, HVAC) sistemlerinde model tabanlı sıcaklık ve nem kontrolü uygulamaları ele alınmıştır [5]. Sonraki dönemde Verona Üniversitesinde boya teknolojisinin robotlar ile yapıldığındaki sonuçları üzerinde bir araştırma çalışması yapılmıştır [6]. Son yıllarda spreyle yüzey boya tekniklerinde enerji tasarrufu sağlanan, yüzeyin daha hızlı boyanabildiği [7], kendi kendini programlayan boya kabini konsepti yöntemlerinin oluşturulabildiği ve bu tekniklerle otonom boya kabinlerinin imal edilebildiği çalışmalar mevcuttur [8]. En güncel çalışmalardan birinde bulut sisteminin entegrasyonu, geri bildirimli boya prosesi sistemi, tüm sistemi kontrol eden akıllı tampon sistemi (programmable logic controller, PLC ve supervisory control and data acquisition, SCADA) ve uygulama tekniklerinden oluşan entegre bir sistem tasarımı oluşturulmuştur [9].

Bu çalışmada otomotiv boyahanelerinde gelecekte uygulanabilecek geliştirmelere dayanak olacak bir Endüstri 4.0 altyapısının temel bileşenlerini oluşturmak hedeflenmiştir. PLC ile PID (proportional integral derivative) kontrol blokları oluşturularak boya kabini ortam şartlarının en uygun duruma getirilmesi, kartezyen boya robotu ile otobüs ve büyük araçların boyanması ve bu yöntemle kalite hatalarının ve boya dalgalanmalarının en aza indirilmesi, RFID (radio frequency identification) sistemi ile araçların tanınması ve RFID - PLC ve kartezyen boya robotu kontrolörünün Profinet haberleşme sistemi üzerinden haberleştirilerek, araç tipine göre otonom boya prosesinin geliştirilmesi, boya kalitesinin bağlı olduğu tüm etkenlerin anlık olarak raporlanması ve geriye dönük yeniden proses nedenlerinin saptanması, tinerle otomatik boya hattı temizliği, boya debisi kontrolü gibi teknikler operator tecrübelerine de dayalı olarak geliştirilmiştir. Tüm bu çalışmalar bir araya geldiğinde Endüstri 4.0 Boyahanesi adını verebileceğimiz entegre bir yapı oluşturulmuştur.

2. DENEYSSEL METOD (EXPERIMENTAL METHOD)

Temel olarak Siemens PLC ve Profinet haberleşme alt yapısı kullanılarak boya kabini ortam koşullarının kontrolü yapılmıştır. En uygun ortam fark basıncı, sıcaklık ve hava debisinin sağlanabilmesi için kabin hacmi, menfez ve emiş kanallarının çapı gibi faktörlerin göz önünde bulundurulması gerekir. Bu faktörlerle birlikte tüm sensörlerin, sürücülerin, ısı dağıtıcı ve fanların doğru biçimde modellenmesi güç olacağından iki aşamalı bir yaklaşım izlenmiştir. İlk aşamada ortam koşullarının istenilen basınç farkı, sıcaklık ve hava debisi değerlerinde tutulması için gerekli kontrolcülerin başka deyişle PID parametrelerinin tesbiti yapılmıştır. Fark basıncı, sıcaklık ve hava debisi kontrolleri için blok diyagram Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Ortam fark basınç kontrolü, ortam sıcaklık kontrolü, hava debisi kontrolü blok diyagramı

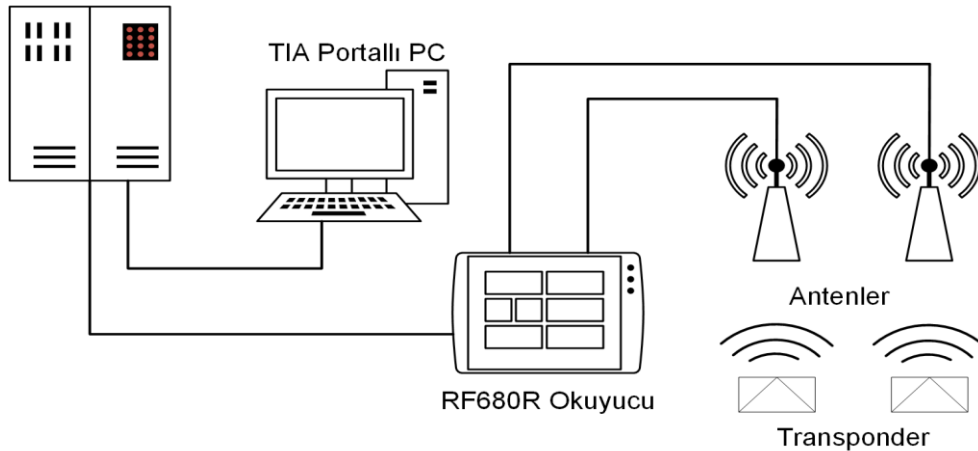
İstenen değerlere ulaşım ve kararlı duruma geçme süreleri gözetilerek her bir kontrolcü için bir değişkenin sabit tutulup diğerlerinin değiştirilmesi yoluyla deneyler yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre arama yapılan değerlerin yön ve aralıkları seçilmiş ve nihayi parametre değerleri belirlenmiştir.

Sonraki bölümlerde sırayla, tüm ortam koşulları araç tipine göre özelleşeceğinden aracın tanınması ve bilgilerin ilgili birimlere aktarılması için kullanılan RFID sistemi, ortam koşullarının kontrolü için kullanılan donanım ve yazılımlar, robot kol kontrolü için kullanılan donanım ve yazılımlar ile son olarak tüm sistemin birlikte nasıl çalıştığına yer verilmiştir. Bu amaçla otomotiv tesislerindeki boya proseslerinde en yüksek standartlarda boya kalitesinin sağlanabilmesi için gerekli olan ve aşağıda belirtilen işlevler gerçekleştirilmiştir.

- Boya prosesinin uygulandığı boya kabinindeki ortam şartlarının PLC kullanılarak en uygun duruma getirilmesi,
- PID kontrol yazılımları ile söz konusu ortam şartlarının hassas bir şekilde sürdürülebilirliğinin sağlanması,
- Boya kalitesinin bağlı olduğu etkenlerin raporlanarak geriye dönük yeniden proses nedenlerinin saptanması,
- RFID sistemi ile kabin otomasyonunun haberleştirilmesi,
- Daha önce operatörlerin elle yaptığı boya işleminin bir kartezyen robot ile gerçekleştirilmesi ve bu bağlamda kalite hatalarının ve boya dalgalanmalarının minimize edilmesi,
- RFID sistemi ile kartezyen robot kontrol biriminin haberleştirilerek, başlangıç konumlandırması ve otomatik başlatma işlevi,
- Hassas ve rampa ayarlı servo hız kontrol ile operatörün taklit edilmesi,
- Standart boya tabancasının pnömomatik piston ile birleştirilerek otomatiğe çevrilmesi,
- Sürekli boya debisi kontrolü yapılması,
- Boya kalite tekrarlanabilirliğinin sağlanabilmesi amacıyla her proses sonrasında otomatik tinerle temizleme modu yapılması.

2.1. RFID Sistemi (RFID System)

Radyo frekans ile kimlik belirleme başka deyişle RFID, nesnelere radyo dalgaları kullanarak tanımlayabilmeyi sağlayan yöntemdir. Bir RFID okuyucu anten, önceden tanımlanmış bir çipin (RFID etiket) içindeki bilgiyi bir başka alıcıya iletilebilmesini sağlar.



Şekil 2. S7 CPU, RF680R ve antenlerin haberleşme altyapısı

Okuyucu anten, RFID etiketinden aldığı radyo sinyallerini sayısal verilere çevirerek otomasyon sistemine aktarılmasını sağlar ve bu bilgi bit düzeyinde veri işleme ile birlikte anlamlı hale getirilebilir. Araçların en kolay tanımlanabilmesi için gerekli olan veri şase numaralarıdır. Şase numaraları araç üretim hattına ilk

girdiği andan itibaren verilir ve bu şase numarası RFID etikete de yazılarak etiket aracın üzerine yerleştirilirse, RFID antenler vasıtasıyla proses içerisinde aracın konumu sürekli olarak izlenebilir. RFID etiketlerindeki şase verilerini PLC'ye aktarmak için gerekli olan bağlantılar Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu amaçla kullanılan donanım ve çalışma biçimi kısaca şu şekilde özetlenebilir: Profinet IO özelliğine sahip olan SIMATIC RF680R bir ağ geçidi olarak çalışmaktadır. RF640A ise sahadaki antendir ve ağ geçidi ile haberleşerek okuduğu şase numaralarını ağ geçidi içerisindeki register adreslerine yazmaktadır.

2.2. TIA Portal ve S7-1500 CPU ile Boya Kabini Ortam Şartları İyileştirmeleri (Paint Booth Environment Conditions Improvements with Tia Portal and S7-1500 CPU)

Bir otomotiv tesisi boya kabini boya kalitesine etkiyen en kritik faktörler dört ana başlıkta sıralanabilir. Bunlar ortamın fark basıncı, ortamın sıcaklığı, ortamın hava debisi ve ortamın nemidir.

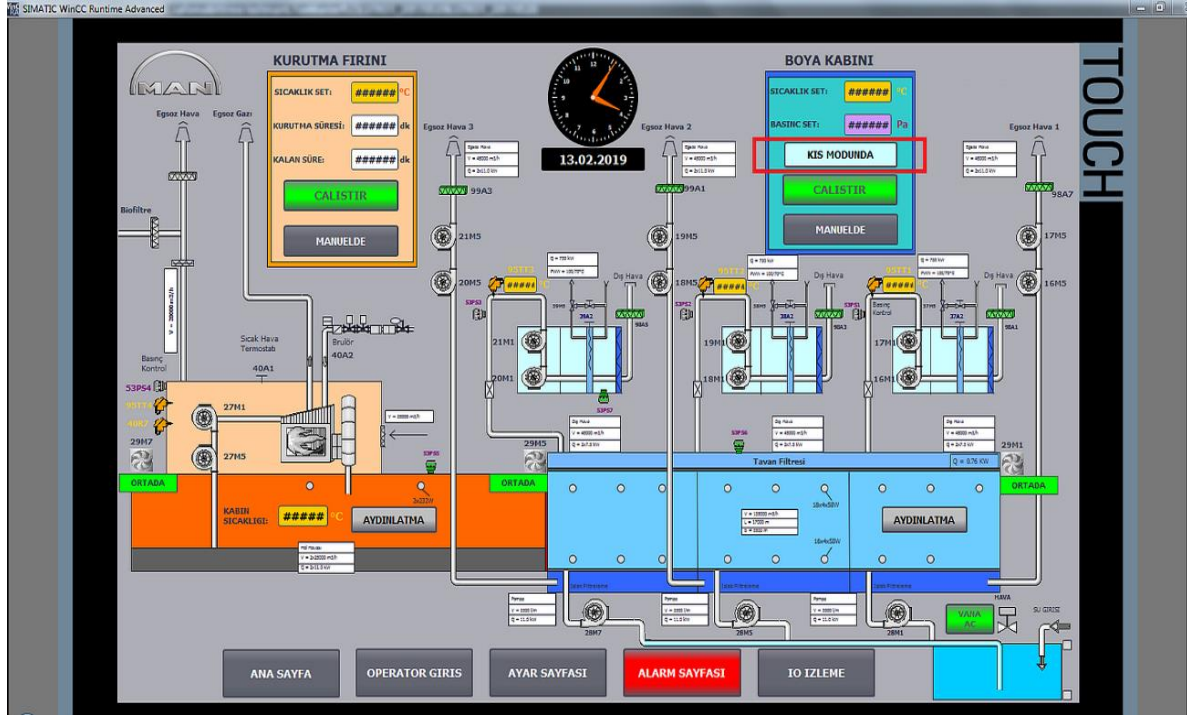
Kaliteli bir boya prosesi için bu faktörler en uygun düzeye getirilmelidir. Bu faktörlerin kontrolünde P, PI, PD veya PID gibi sistemler kullanılabilir. Hassasiyetin istenen düzeyde sağlanabilmesi için bu çalışmada tüm faktörler PID kontrol yazılımı yapılarak sağlanmıştır. PID, Proportional, Integral ve Derivative yani oransal, tümlev ve türev temelli bir kontrol yapısıdır. Bu kontrol yapısı bir sistemdeki çıkış değerini sürekli kontrol ederek istenilen ayar değerine yakınsatan bir yapıdır. Bu işlem, sistemde çıkışa etkiyen parametreler sürekli ayarlanıp ve fark değerine bakılarak sağlanır.

2.2.1. Ortamın fark basıncı (Difference pressure of the environment)

Boya yapılan ortamda yüksek kaliteden söz edebilmek için boya kabini içerisine dışarıdan toz girmemesi sağlanmalıdır. Bu nedenle ortamın fark basıncı eksi değerlere düşmemelidir. Yapılan deneylerde eksi fark basıncı çalışılan kabinlerde kalite hatalarına rastlanılmıştır. Dolayısıyla bir fark basınç ölçer ile kabin fark basıncı kontrol edilmelidir ve değeri pozitif bir değer olarak belirlenmelidir. Bir boya kabini havalandırılması amacıyla taze hava ve egzoz fanları kullanılır. Bu fanlar direk yol verme yöntemi ile 50 Hz şebeke frekansında çalışırsa, kabin fark basıncını ayarlamak güçleşecektir. O yüzden bu çalışmada frekans çeviriciler kullanılmıştır. Bu sürücüler Profinet haberleşme protokolü ile PLC'ye bağlanıp hız kontrolü yapılacak şekilde programlanmıştır.

2.2.2. Ortamın sıcaklığı (Temperature of the environment)

Boya prosesinde kullanılan boyanın yüzeyde tam emiliminin gerçekleşmesi amacıyla uygulanması gereken tekniklerden bir tanesi de sıcaklığın sabitlenmesidir. Yapılan deneyler neticesinde P kontrol tipinde çalışan sıcaklık kontrol sistemlerinde önemli boya kalite problemlerine rastlanmıştır. Bu yüzden yine hassas ayar yapabilmek için PID kontrol tercih edilmiştir. Boya kabinlerinde sıcaklığı sabitleyebilmek için serpantin denilen mekanik ısı eşanjörü kullanılmıştır. PLC programı vasıtasıyla serpantine bağlı olan su besleme hattına entegre edilmiş olan pnömatik 3 yollu oransal vana PID kontrol kullanılarak kontrol edilmiştir. Sonrasında dış ortamdan taze hava fanı ile çekilen hava, serpantine temas eder ve kabine dolar. Kabin içinde istenilen hava sıcaklığına göre serpantinden geçecek olan suyun debisi 3 yollu vana kontrolü ile sağlanır. Bu noktada karşılaşılan en önemli problem mevsim değişikliklerinde yaşanır. Dış ortam hava sıcaklığı mevsimlere göre değiştiğinden, yazın düzgün çalışan PID'nin kışın da düzgün çalışması amacıyla PID'nin kazanç parametresinin terslenmesi gerekmektedir. Bu noktada en iyi kontrolü sağlamak amacıyla sisteme yaz ve kış modları fonksiyonları eklenmiştir. Bu mod, mevsim geçişlerinden kaynaklı ortam ısı dengesi problemlerinin önüne geçmiştir. Şekil 3'te SCADA ve kabin yaz modu kış modu fonksiyonu görülmektedir.



Şekil 3. Boya kabini otomasyonu SCADA ana sayfası ve mevsim modları

2.2.3. Ortamın hava debisi (Air flow rate of the environment)

Boya kabiniinde boya işlemi yapılırken fark basınç 2 Pa (Pascal) değerinde PID yardımıyla tutulsa bile boya kalitesinde en elverişli sonuçları yakalamak, boya dalgalanmalarının, tozuma olaylarının ve boya akması denilen problemlerin önüne geçilmesi amacıyla ortamda ideal bir hava akışı sağlanmalıdır. PLC programla hava debisi kontrolü elde edilmiştir. Debinin sabitlenmesi için standart bir frekans yoktur. Boya kabininin hacmi, menfez ve emiş kanallarının çapı gibi etkenler debiyi etkilemektedir. İdeal ayar yapabilmek için ihtiyaç duyulan ekipman anemometredir. Bu ekipman ile hava debisi gözlemlenerek deneylerde elde edilen en uygun aralıkta tutulmuştur.

2.2.4. Ortamın nemi (Humidity of the environment)

Ortamdaki nem kontrolü de benzer şekilde sağlanmıştır. Bir nem ölçer ve spreyleme nozülleri yardımıyla, kabin içerisine gerektiğinde pulverize olarak su verilmesi yöntemi ile yapılmıştır. 2.2.1., 2.2.2. ve 2.2.3.'te kullanılan blokların aynıları kullanılmıştır.

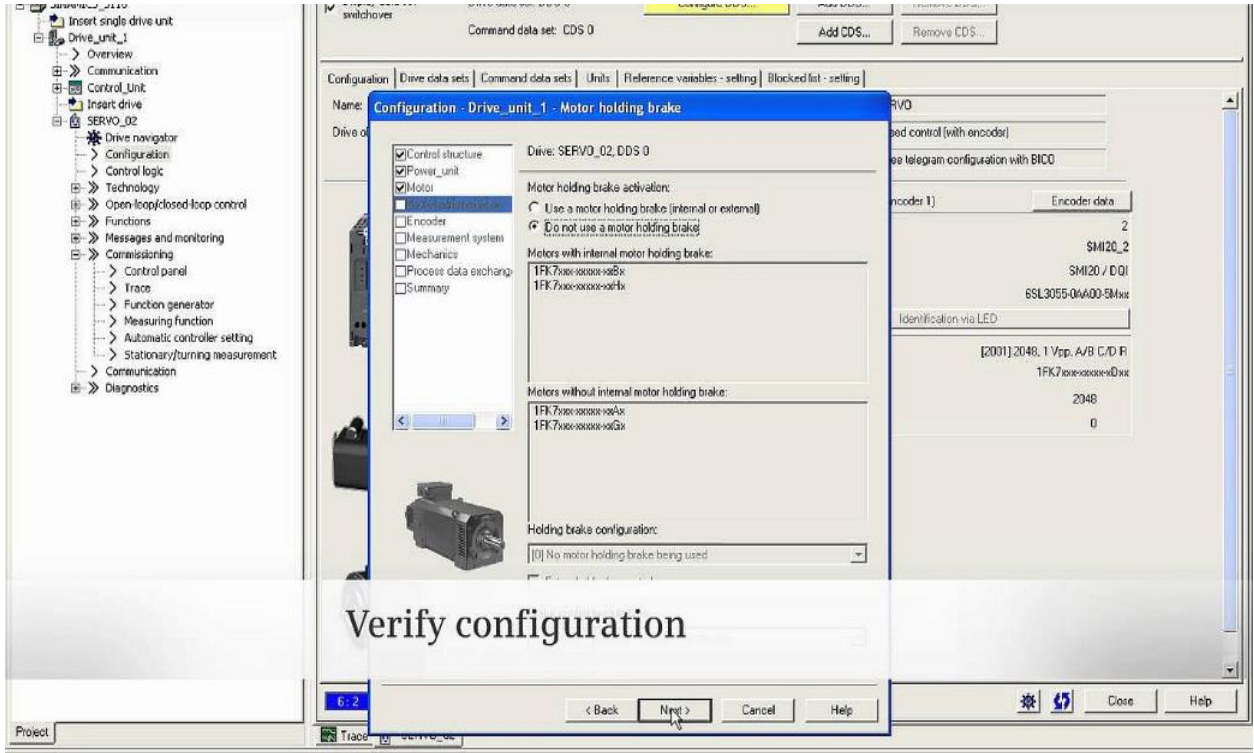
2.3. Simotion Scout - Simotion D ile Kartezyen Boya Robotu ve İyileştirmeler (Cartesian Paint Robot with Simotion Scout - Simotion D and Improvements)

Bu bölümde, çalışmada kullanılan kartezyen robotun ve derleyici programının genel tanıtımı ve WINCC insan makine arayüzü (İMA) panelinde yapılan arayüz programının genel yapısı ile ilgili konulara değinilmektedir.

2.3.1. Simotion Scout ve WINCC Flexible (Simotion Scout and WINCC Flexible)

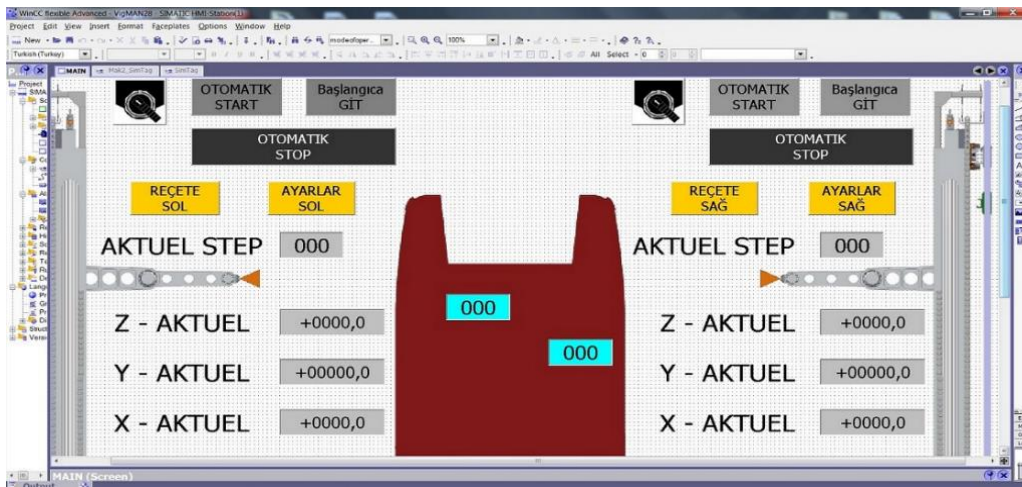
Simotion Scout, Simotion D olarak adlandırılan ve Siemens'in servo motor ve sürücü kontrolü için geliştirilmiş ileri seviye bir hareket kontrol derleme programıdır. Bu program, LADDER ve ST kodlama dillerinde yazılım geliştirmeye olanak sunan ve servo sürücülerin tüm hareket, hız, koruma gibi özelliklerinin konfigüre edilmesini sağlayan bir derleyicidir. Aynı zamanda Simatic Manager ve TIA PORTAL programlarıyla eş zamanlı çalışabilmesi geliştirilen sistemlerin daha kararlı ve entegre olarak tasarlanmasına olanak sağlamaktadır. WinCC Flexible ise bir SCADA programıdır ve kullanıcılara sistem kontrol için bir arayüz sağlamaktadır. Programın içerisinde oluşturulan etiketler ve bu etiketlere bağlanan register adresleri sayesinde İMA ile PLC arasında veri alışverişi sağlamaktadır. Şekil 4'te Simotion Scout

programının arayüzü görülmektedir ve bu arayüz üzerinden sisteme entegre edilen tüm sürücü ve servo motorların konfigürasyonlarının yapılması mümkündür.



Şekil 4. Simotion scout sürücü ayarları

Kabindeki tüm iyileştirmelerden ve kartezyen robotun programlama safhasından sonra sistemin özelliklerinin etkin bir biçimde kullanılabilmesi amacıyla iyi tasarlanmış bir SCADA yazılımına ihtiyaç bulunmaktadır. Şekil 5'te çalışmanın en önemli kısımlarından biri olan robot kontrol sayfasının tasarımı görülmektedir.





Şekil 5. Robot eksenleri genel izleme ve kontrol sayfası


Şekil 6'da sistemin reçete oluşturma ara yüzü, Şekil 7'de koordinat ve hareket hazırlama ara yüzü ve Şekil 8 'de referanslama ve konfigürasyon sayfası görülmektedir.


SOL BOYAMA KOLU REÇETE No. -----


Hazır

YENİ REÇETE 

REÇETE SİL 

AYARLARI REÇETEYE ÇAĞIR 

REÇETE KAYDET 


REÇETE YÜKLE 

Şekil 6. Boya reçetesi hazırlama sayfası

2	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	18	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	AŞAĞI	YUKARI
3	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	19	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	EKSEN X (KOL)	
4	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	20	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	MAN.HIZ 0	A.POZ. 0,0
5	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	21	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	GERİ	İLERİ
6	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	22	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	EKSEN Y	
7	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	23	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	MAN.HIZ 0	A.POZ. 0,0
8	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	24	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	SOLA	SAĞA
9	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	25	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	TABANCA	
10	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	26	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	MAN.HIZ 0	A.POZ. 0,0
11	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	27	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	SOLA	SAĞA
12	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	28	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	STEP HIZ 0	
13	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	29	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	HIZ ve AKTUEL POZISYONLARI	
14	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	30	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0. ADIMA AKTAR	
15	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	31	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	-1 STEP +1	
16	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	32	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0	0		

MAIN ALARM STEP PAGES-L STEP PAGES-R <- GERİ İLERİ ->

Şekil 7. Reçete koordinat hazırlama sayfası

REFERANSLAR 

Z offset #####

Y offset #####

KOL REFERANS POZİSYONU KOL REFERANSLA

a1 ##### a2 ##### a3 #####

KOL1-CW KOL2-CW KOL3-CW

KOL1-CCW KOL2-CCW KOL3-CCW

STEP DEĞERLERİNİ KAYDIRMA

####. STEPTEN İTİBAREN DEĞERLERİ **KAYDIR**

-1 #### +1

STEP DEĞERLERİNİ RESETLE **RESET**

BOYA VALFİ MANUEL **PUSKURT**

MAIN ALARM STEP PAGES-L STEP PAGES-R

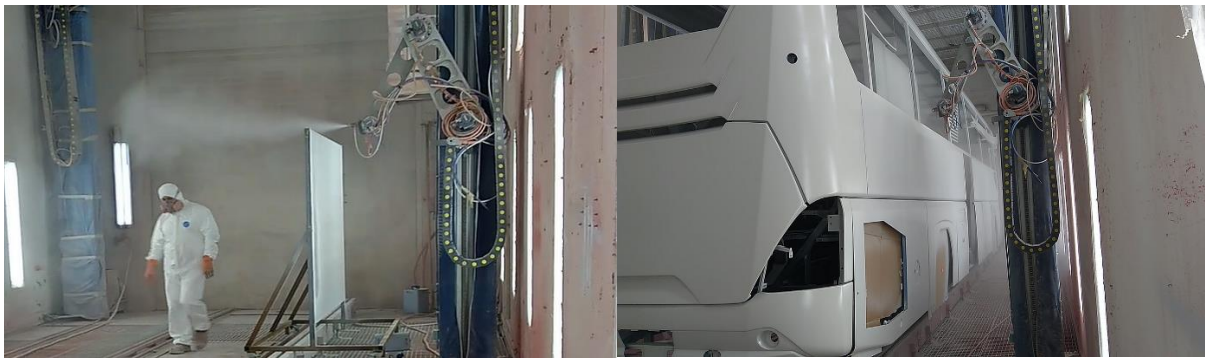
Şekil 8. Kinematik manuel ayarları ve referanslama

2.3.2. Sistemin çalışması (System operation)

Sistemde Simotion D CPU kontrol birimini kontrol edebilmek amacıyla mevcut olan İMA panelin Şekil 7’de görülen koordinat hazırlama sayfasında, boya kabini içerisine aldığımız araç, panel gibi metalik aksamın otomatik olarak boyanabilmesi için ekipmanın koordinatlarının gezdirilerek öğrenme yöntemiyle tanıtılması gereklidir. Bu süreçte adım adım tanıma yapılır. Her bir adımda eksenlerin yeni konumu belirlenir. Böylece istenen sayıda adım içeren bir boya işlemi otomatikleştirilmiş olur (Şekil 8). İstenilen bir sonraki konuma boya tabancası getirilir ve “AKTAR” butonu ile adım sabitlenir. X eksen kinematik kol, Y eksen kabin boyunca uzanan eksen, Z eksen yerden kabin tavanına kadar olan eksen ve T eksen ise boya tabancasının 360 derecelik eksenidir. Tüm araç veya yüzey gezdirilerek adım adım aktarılır. Bu tanıma işlemine reçete hazırlama işlemi denir. Reçete tamamlandıktan sonra Şekil 6’daki reçete hazırlama sayfasına gelinir. Yeni reçete oluşturulup isim verilir. Artık bu model bu aracın boya koordinatlarını içeren bir doküman niteliğindedir. Aracı hiç kabine almadan teknik resmi üzerindeki koordinatlar kullanılarak da araç tanımlanabilir. Araç bu şekilde tanımlandıktan sonra tek dikkat edilmesi gereken konu, araç kabine alınıp gerçek bir boya işlemi yapılacağına aracın en arka noktasının kabinde doğru konumda olmasıdır. Aksi takdirde önceden tanımladığımız başlangıç noktası gerçekte olması gereken başlangıç noktasıyla uyuşmayacağı için boya işleminde problemler yaşanacaktır.

Yeni reçete oluşturulduktan sonra Şekil 6’daki reçete hazırlama sayfasında önceden tanımlanan koordinatlar için ayarları reçeteye çağır ve reçeteyi kaydet butonlarına basılır. Bu reçete İMA panelin C sürücüsü içerisinde saklanır. Farklı bir PC veya İMA üzerinden kontrol edilmek istendiğinde bu reçete dosyasının kopyalanması mümkündür. Bu yöntemlerle oluşturulan reçeteler istenirse aynı sayfa üzerindeki reçete sil butonu yardımıyla silinebilir veya farklı bir araç için reçete çağırarak gerektiğinde reçete yükle işlemi manuel olarak yapılabilir. Daha sonra Şekil 5’teki izleme ve kontrol sayfası üzerinde “başlangıç konumuna git” ve “otomatik start” butonları sırası ile tıklanır. Başlangıç konumuna git denildiğinde robot ilk tanımlanan koordinata gider. Otomatik start tıkladığında ise boya işlemi başlar ve bitene kadar beklenilir.

Şekil 9 (a)’da deneme uygulamalarındaki bir yan yüzey boyama görüntüsünden örnek verilmiştir. Araç yerine bir deneme plakası kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar ve denemeler neticesinde istenen boya kalınlık seviyeleri elde edilerek gerçek araçlarda da uygulaması yapılmıştır. Gerçek araç boya uygulaması Şekil 9 (b)’de görülmektedir.



(a)

(b)

Şekil 9. Yan yüzey boyamada robot kol konumu (a), gerçek araçta kartezyen boya robotu ile boya uygulanması (b)

2.3.3. Endüstri 4.0 uygulamaları (Industry 4.0 Applications)

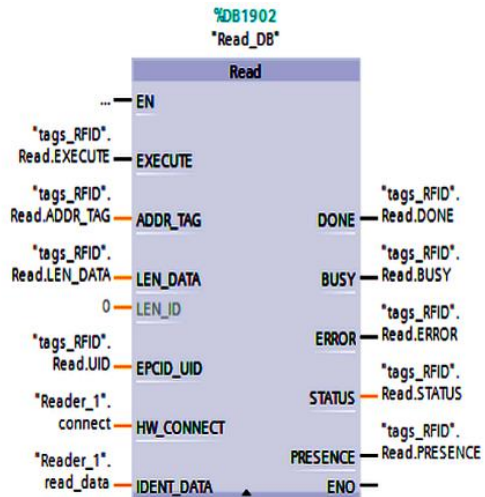
RFID sistemi burada bir yenilik getirmektedir. S7-1500 CPU RFID anten vasıtasıyla araç üzerindeki etiketi ve ona bağlı şase numarasını okuyarak register üzerine kaydeder. Şase numarasını tutan register değiştiğinde yükselen kenar tetikleme yöntemi ile şase numarasının Simotion D üzerine aktarımı sağlanır. Dolayısıyla reçete otomatik olarak yüklenir. Şekil 10’da TIA Portal RFID Read Bloğu yardımı ile RFID

üzerinden byte cinsinden alınan veriler S7-1500 ile aynı profinet ağ üzerinde olan Simotion D CPU'ya aktarılır. Şase numaraları sürekli karşılaştırma bloğu ile karşılaştırılır ve yükselen kenar tetikleme ile değişim esnasında yeni şase reçete olarak yüklenir. Böylece kabin içerisindeki araç değiştiğinde İMA üzerinde otomatik start anahtarı açık konumunda iken otomatik başlangıç konumuna gidilir ve istenen şartlar sağlandığında sistem yeni araç şasesine göre boya prosesine başlar.

Simotion D CPU'nun RFID üzerinden gelen veri ile şaseyi tanıyıp uygun reçeteyi otomatik olarak başlatması güvenlik ve kalite açısından riskler barındırmaktadır. Bu nedenle bir ana denetleyicinin tüm şartları kontrol etmesi kritiktir. Kontrol edilecek faktörler:

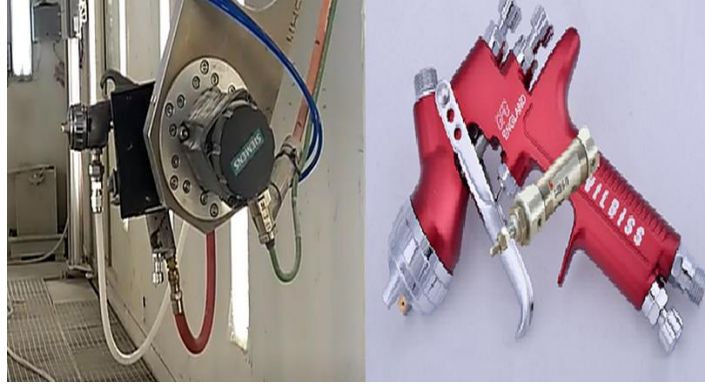
- Sıcaklık: Kabin sıcaklık verisi 21-25 derece aralığında ise Sıcaklık tamam biti ayarlanır.
- Fark basıncı: Kabin iç ortam basıncı dış ortama göre +1 Pa ile +5 Pa değer aralığında ise Fark Basıncı tamam biti ayarlanır.
- Fan çalışması: Kabin içi havalandırmayı sağlayan taze hava ve egzoz fanları devrede ise Fanlar tamam biti ayarlanır.
- Tiner temizliği: Bir önceki boya prosesi tamamlandıktan sonra renklerin karışmasının engellenmesi için boya tabancasına gelen hava hattındaki tüm partiküllerin temizlenmesi gereklidir. Tiner temizleme modu boya prosesinin ardından robotun otomatik olarak başlangıç noktasına gidip tabancasının ağızını logar kanalına çevirmesiyle 5 dakika boyunca yürütülür. Bu işlemin ardından robot yeni bir boya prosesine hazırdır. Bu aşama sonrasında Tiner Temizlik tamam biti ayarlanır.

Block				Data			
	Name	Data t...	Monitor...		Name	Data ...	Monitor ..
1	Static			1	Static		
2	send	Array...		2	receive	Array...	
3	send[1]	Byte	16#00	3	receive[1]	Byte	16#00
4	send[2]	Byte	16#00	4	receive[2]	Byte	16#00
5	send[3]	Byte	16#00	5	receive[3]	Byte	16#00
6	send[4]	Byte	16#00	6	receive[4]	Byte	16#00
7	send[5]	Byte	16#AA	7	receive[5]	Byte	16#00
8	send[6]	Byte	16#BB	8	receive[6]	Byte	16#00
9	send[7]	Byte	16#CC	9	receive[7]	Byte	16#00
10	send[8]	Byte	16#DD	10	receive[8]	Byte	16#00
11	send[9]	Byte	16#EE	11	receive[9]	Byte	16#00
12	send[10]	Byte	16#00	12	receive[10]	Byte	16#AA
13	send[11]	Byte	16#00	13	receive[11]	Byte	16#BB
14	send[12]	Byte	16#00	14	receive[12]	Byte	16#CC
15	send[13]	Byte	16#00	15	receive[13]	Byte	16#DD
16	send[14]	Byte	16#00	16	receive[14]	Byte	16#EE
17	send[15]	Byte	16#00	17	receive[15]	Byte	16#00
18	send[16]	Byte	16#00	18	receive[16]	B...	16#00



Şekil 10. TIA Portal RFID read bloğu

Boya hattında boyanın istenen debi değerinin korunması boyanın film kalınlığının dengeli dağılımı açısından elzemdir. Bu nedenle herhangi bir nedenden dolayı boya debisi değişirse ve bu durum fark edilmez ise tüm boya prosesi tekrarlanmak zorunda kalacaktır. Bu duruma engel olmak için boya hattına manyetik debimetre takılmamıştır. İstenen boya debi aralığı sisteme tanımlanarak boya prosesi başladıktan sonra bu sınır aralık değerleri aşırsa ana CPU'nun Simotion D'ye kesme göndermesi ve boya prosesini sonlandırması sağlanmıştır. Boya prosesinin bir insan elinin en hatasız halini benzetebilmesi için hız kontrolü kritik bir aşamadır. Simotion Scout üzerinden duruş ve kalkış rampalarında robotun salınım yapmasını engelleyerek boya dalgalanmasına ve hatalarına engel olunmuştur. Bunun yanı sıra otomatik boya tabancalarının yerine bu çalışmada manuel bir boya tabancası kullanılmıştır. Bu tabancanın tetiğine bağlanan küçük bir pnömatik piston yardımı mevcut boyama işlemlerinde kullanılan tabancalar kullanılabilmiştir. Otomatik bir tabancaya sahip olunmadığında bu problemin nasıl aşılacağı konusuna da bir çözüm sunulmuştur. Şekil 11'de çalışmada kullanılan boya tabancası ve bu tabancaya entegre edilen piston görülmektedir.



Şekil 11. Manuel boya tabancası ve tetik piston

Yapılan geliştirmelere ek olarak, boyama prosesindeki boya kabinlerinin enerji tüketimi konusunda da iyileştirmeler yapılmıştır. Enerji tüketiminin önemli bir kısmı boya prosesi için harcanmakta ve bu alanda elde edilecek tasarruf önem arz etmektedir [10]. Boyama prosesinde 24 saat aktif olarak çalışan kabinde fanların, boya havuzu sirkülasyon pompalarının, kabin aydınlatmalarının toplam enerji tüketimi ölçülerek günlük tüketimin 2300-2400 kWh aralığında olduğu belirlenmiştir. Yapılan iyileştirmenin ve tasarruf edilen enerjinin kaynağı şöyle özetlenebilir:

- Boya kabini içerisinde araç olmadığında veya boya prosesi yürütülmediğinde operatörün bir buton yardımıyla bunu belirtmesi
- Bu sayede fanların %40 frekansa düşmesi, aydınlatmaların %50 azalması ve boya havuzu sirkülasyon pompalarının durması senaryosunu gerçekleştiren bir program yazılmıştır. Tekrar bir boya prosesi başlayacağında operatörün “araç_var” butona basması yeterli olacak şekilde bir tasarım yapılmıştır. FB_Tasarruf bloğu PLC’ye entegre edildikten sonra yazılım ARAÇ_VAR mühür bobini, (kabin içinde boya prosesi var anlamına gelen) boya kabini giriş kapısının açılmasını da engeller hale getirilmiştir ve ARAÇ_YOK mühür bobini de boya prosesinin ve boya emilim süresinin tamamlanmasından sonra fırına yani kurutma bölümüne giriş kapısına izin verir hale getirilmiştir. Fırın kapısı açık iken ne boya giriş kapısı ne de fırın çıkış kapısı açılmaz durumdadır. Bu ortak kilit sistemi araç kabinde iken herhangi bir kapının yanlışlıkla açılmasını ve dış ortamdan toz, partikül gibi istenmeyen maddelerin boyaya yapışmasını engellemektedir.

Enerji tasarruf bloğu sayesinde hem iç ortam sıcaklığının korunmasından dolayı tasarruf sağlanmış hem de elektrik tüketimi 1500-1600 kWh/gün değerlerine ulaşmıştır. Bu tasarrufun sağladığı ekonomik fayda yıllık 300 çalışma günü için $800 \times 300 = 240.000$ kWh enerjiye tekabül etmektedir. 16 adet manuel boyama yapılan diğer kabinlere de aynı sistem uygulanmıştır ve toplam boyahane enerji tasarrufu yıllık $240.000 \times 16 = 3840000$ kWh/yıl olarak gerçekleşmiştir.

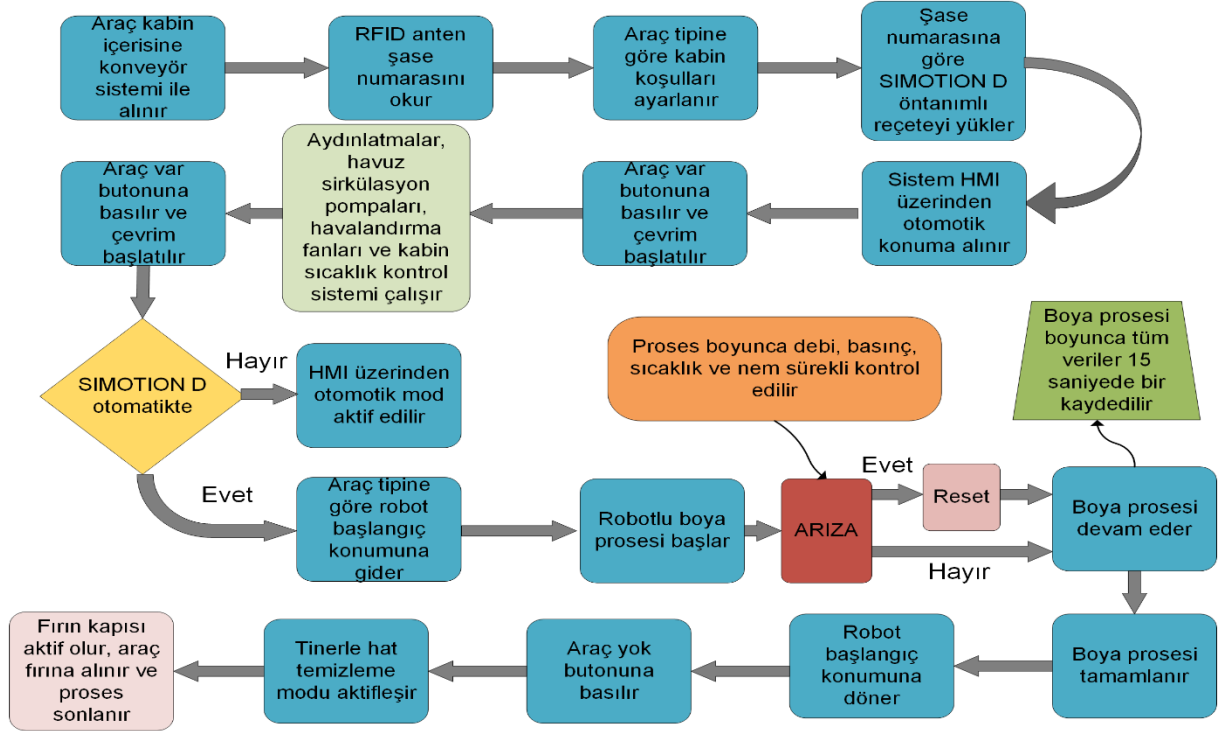
Tablo 1’de elde edilen enerji tasarrufu karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Tablo 1. Eneji tasarrufu verileri

<i>Uygulamadan önce ortalama enerji tüketimi (günlük)</i>	<i>Uygulamadan sonra ortalama enerji tüketimi (günlük)</i>	<i>Tasarruf miktarı (günlük)</i>
2300-2400 kWh	1500-1600 kWh	800 kWh
<i>Yıllık tasarruf (300 iş günü) :</i>		240000 kWh

2.4. İyileştirmelerin Akış Şeması (Flow Chart of Improvements)

Sistemdeki tüm iyileştirmeler yapıldıktan sonra önceden manuel yapılan işlemler tamamen otomatik olarak yürütülür. Tüm kritik parametreler kontrol edilir ve boya kalitesine etkiyen tüm veriler her 15 sn’de bir arşivlenir. Bu sayede kalite hataları önemli ölçüde azaltılmıştır. Akış şeması Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. İyileştirmelerin akış şeması

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, ilgili püskürtme işleminin etkileri, kaplama malzemesi sarfiyatı ve kuru film üzerindeki parametreler incelenmiştir. Kaplanacak malzeme 0,8 mm olan sacdır. Kullanılan boyanın (BA08 Seri Epoksi Astar) spesifikasyonları Tablo 1’de verilmiştir. En iyi boya kalitesinin elde edilmesi ve operatörün elle boyadığından daha kararlı ve hatasız bir proses yürütülmesi amacıyla denemeler yapılmıştır (Şekil 13).



Şekil 13. Elle boyama ve patern aralığı

Önemli parametrelerden, besleme havası basıncı, boya debisi ve mesafe gibi parametreler önemli miktarda malzeme sarfiyatını ve kuru film kalınlığını etkilemektedir. Bu nedenle, her parametre için Tablo 2’de belirtilen minimum ve maksimum değerler aralığında kademeli olarak çeşitli deneyler yapılmıştır.

Tablo 2. Boya verileri

Faktörler	Değerler
Yoğunluk (gr/cm ³)	1,55
Katı madde (%)	68
Uygulama viskozitesi (sn)	18-20
İstenen ortam sıcaklığı (Co)	20-30
Uygulanan kabin nemi (%)	50-70
Uygulama debisi (cc/dk)	400-700
Karışım donma süresi (saat)	4
Karışım oranı (hacimce)	1,7/1

Tablo 3'teki verilerden bir değeri değiştirip diğerlerini sabit tutarak denemeler yapılmıştır.

Tablo 3. Boya prosesi aralıklar

Faktörler	Min.	Maks.
Spreyleme basıncı (bar)	3,5	4
Boya debisi (cc/dk)	400	500
Mesafe (m)	0,19	0,21
Patern (m)	0,3	0,4
Perde aralığı (m)	0,1	0,125
Kabin sıcaklığı (Co)	20	25
Kabin fark basıncı (Pa)	-5	+10
Kabin hava debisi (m/sn)	0,2	0,4
Robot kol hızı (mm/sn)	200	450

İlk boya deneme işleminde kullanılan parametreler Tablo 4'te ve boyama işlemi sonucunda sac üzerinde oluşan görüntü Şekil 14 (a)'da görülmektedir.

Tablo 4. Başarısız bir boya prosesine ait değerler

Faktörler	Değerler
Spreyleme basıncı (bar)	4,2
Boya debisi (cc/dk)	450
Mesafe (m)	0,2
Patern (m)	0,35
Perde aralığı (m)	0,12
Kabin sıcaklığı (Co)	24
Kabin fark basıncı (Pa)	+1
Kabin hava debisi (m/sn)	0,4
Robot kol hızı (mm/sn)	350

Yapılan boyamada bir miktar akma problemine rastlanmıştır. Daha düşük debi ile denenmesinde veya kol hızının artırılmasında problemin giderilebileceği düşünülmüştür. Kabin içi hava hızının fazlalığından dolayı boyada yer yer dalgalanmalar saptanmıştır.

Bir diğer deneme işleminde kullanılan parametreler Tablo 5'te ve boyama işlemi sonucunda sac üzerinde oluşan görüntü Şekil 14 (b)'de görülmektedir. Daha düşük debi ile denenmesinde veya kol hızının artırılmasında akma problemi giderilmiştir fakat ortam hava debisinin bir önceki denemeye göre artırılması ve perde aralığının 3 cm artırılması sonucunda kısmi dalgalanma problemleri görülmüştür. İstenilen dolgun görüntü elde edilememiştir. Kuru ve kötü yayımlı bir görüntü vardır.

Tablo 5. Başarısız bir boya prosesine ait değerler

Faktörler	Değerler
Spreyleme basıncı (bar)	4,2
Boya debisi (cc/dk)	320
Mesafe (m)	0,2
Patern (m)	0,35
Perde aralığı (m)	0,15
Kabin sıcaklığı (Co)	24
Kabin fark basıncı (Pa)	-1
Kabin hava debisi (m/sn)	0,4
Robot kol hızı (mm/sn)	450



(a)

(b)

Şekil 14. Tablo 4'teki değerlerle elde edilen sonuç (a), Tablo 5'teki değerlerle elde edilen sonuç

Denemelerden elde edilen en başarılı değerler Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6'daki veriler kullanılarak gerçekleştirilen proseste elde edilen istenilen özelliklerde bir boyanın yaş halinde az miktarda portakal kabuğu görüntüsü beklenmektedir. Parlak ve yoğun bir görüntünün yanında akma, tozuma, kuma gibi sorunların olmaması ve boya yayılımının dengeli olması istenir. Bu sistemle bir insan elinin yapabileceğinden daha iyi sonuç elde edilmiştir.

Şekil 15 (a) ve 15 (b)'de farklı açılardan fırında pişirilmiş araçların son görüntüleri mevcuttur. Boya kalınlıkları hedef 93-105 mikron aralığındadır ve zımpara ve son kat boya işlemlerinden önce istenilen kalitededir.

Tablo 6. En başarılı boya prosesi değerleri

Faktörler	Değerler
Spreyleme basıncı (bar)	4,1
Boya debisi (cc/dk)	380
Mesafe (m)	0,2
Patern (m)	0,35
Perde aralığı (m)	0,125
Kabin sıcaklığı (Co)	23,5
Kabin fark basıncı (Pa)	+3
Kabin hava debisi (m/sn)	0,35
Robot kol hızı (mm/sn)	400

Şekil 15 (a) ve 15 (b)'de farklı açılardan fırında pişirilmiş araçların son görüntüleri mevcuttur. Boya kalınlıkları hedef 93-105 mikron aralığındadır ve zımpara ve son kat boya işlemlerinden önce istenilen kalitededir.



(a)

(b)

Şekil 15. Fırın 1 (a), Fırın 2 (b)

Boya ve kurutma işlemlerinin ardından yapılan film kalınlık ölçüm sonuçları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Yüzeydeki Boya Film Kalınlıkları (mikron) (Ölçümler 10 cm aralıklarla yapılmıştır)

Sac yatay uzunluğu (140 cm) boyunca 10 cm aralıklardaki ölçümler														
Sac dikey uzunluğu (80 cm)	104	98	97	97	93	103	104	95	98	105	96	102	104	95
	95	97	105	98	104	99	99	95	94	100	102	93	102	98
	105	103	97	97	104	105	99	96	104	104	97	104	99	99
	104	102	104	97	103	105	94	93	99	93	103	99	104	103
	100	94	101	96	105	105	96	98	98	102	103	98	95	103
	95	97	95	102	101	101	93	98	105	97	101	100	99	97
	100	103	98	96	96	102	105	95	104	93	97	97	99	105
	102	95	96	95	100	94	98	95	96	95	93	98	97	102

Çalışma sonucunda astar boyası, 0,8 mm kalınlığındaki sac yüzeye kartezyen boya robotu yardımı ile kararlı bir şekilde püskürtülmüştür. Boya işlemi tamamlandıktan sonra, kalınlıkların 93-105 mikron arası değiştiği görülmüştür ve boya debisinin, robot kol hızının, ortam hava debisinin film kalınlığı üzerinde direkt olarak etkileri gözlemlenmiştir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada; metal boyama yönteminin, endüstriyel robotlarla uygulanması ve en iyi boya kalitesinin sağlanması için gerekli olan ortam şartlarının otomasyon sistemleri kullanılarak gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Ortam şartları en uygun seviyeye getirildikten sonra daha önce operatörler tarafından elle yapılan spreyci boya işlemi bir kartezyen robot yardımı ile uygulanmıştır. Kartezyen robot programlamada operatörün el hareketleri referans alınmıştır. Boyanacak parça veya aracın sağına ve soluna yerleştirilmiş olan 2 adet 5 eksenli Kartezyen boya robotu kullanılmıştır. Hazırlanmış olan kontrol yazılımına ilave olarak WinCC flexible SCADA programında bir kontrol arayüzü oluşturulmuştur. Bu arayüz programı yardımıyla istenilen araçlar veya parçalar tanıtilip boya işlemi gerçekleştirilmiştir. Aynı ürünler için kayıtların geri çağırılması ile aynı boyama işleminin yapılabilmesi sağlanmıştır. Sonrasında ise sistemin tam otomatik sistem haline getirilebilmesi için kabin otomasyon sistemi, kartezyen robot otomasyonu ve bu ikisine ilave olarak bir RFID etiket sistemi tüm yapıya entegre edilmiştir. Çalışma sonucunda en elverişli film kalınlığının belirlenen parametre değerlerinde tutturulabildiği görülmüştür ve üretici firmaların boya kalınlığı standartlarının söz konusu parametrelerde hassas ayarlamalar yaparak elde edilebileceği tespit edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan yaklaşımlar ile elle boyamaya kıyasla daha tutarlı ve sürdürülebilir bir kalite elde etmek mümkün olmuştur. Sağlanan enerji tasarrufu ile de verimlilik artırılmıştır. Proses boyunca tüm parametrelerin ve sonuçta oluşan ürün değerlendirmelerin raporlanması ile daha detaylı analizler yapılabilir hale gelmiştir. Böylelikle daha fazla iyileştirme amaçlı çalışmalar için de material sağlanmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Haugan, K. M. (1974). Spray Painting Robots: Advanced Paint Shop Automation. *Industrial Robot*, 1 (6), 270-272. <https://doi.org/10.1108/eb004453>.
- [2] Feng, J., Jingshan, L., Guoxian, X., Jorge, A. (2013). Modeling Quality Propagation in Automotive Paint Shops: An Application Study. *IFAC Proceedings Volumes*, 46 (9), 1890-1895. <https://doi.org/10.3182/20130619-3-RU-3018.00084>.
- [3] Rivera, J. L. Reyes-Carrillo, T. (2014). A framework for Environmental and Energy Analysis of the Automobile Painting Process. *Procedia CIRP*, 15, 171-175. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.022>.
- [4] Luangkularb, S., Prombanpong, S., Tangwarodomnukun, V. (2014). Material Consumption and Dry Film Thickness in Spray Coating Process. *Procedia CIRP*, 17, 789-794. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.046>.
- [5] Alt, S., Sawodny, O. (2015). Model-Based Temperature and Humidity Control of Paint Booth HVAC Systems. 2015 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), Nagoya, Japan, 160-165. doi: 10.1109/ICMECH.2015.7083966.
- [6] Geretti, L., Muradore, R., Bresolin, D., Fiorini, P., Villa, T. (2017) Parametric Formal Verification: The Robotic Paint Spraying Case Study. *IFAC-PapersOnLine*, 50 (1), 9248-9253. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1287>.
- [7] Moe, S., Gravidahl, J. T., Pettersen, K. Y. (2018). Set-Based Control for Autonomous Spray Painting. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 15 (4), 1785-1796. doi: 10.1109/TASE.2018.2801382.

- [8] Edelvik, F., Tiedje, O., Jonuscheit, J., Carlson, J. S. (2018). SelfPaint - A Self-Programming Paint Booth, *Procedia CIRP*, 72, 74-479. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.167>.
- [9] Bysko, S, Krystek, J., Bysko, S. (2018). Automotive Paint Shop 4.0, *Computers & Industrial Engineering*, 105546, ISSN 0360-8352. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.056>.
- [10] Çanka Kılıç, F., Eyidoğan, M., Sapmaz, S. (2018). Bir Otomobil Montaj İşletmesinde Enerji Verimliliği Artırıcı Çözümlerin İrdelenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6 (1), 149-162. DOI: 10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.331104.