


Endüstri 4.0 kapsamında robot seçimi: SWARA ve bulanık TOPSIS yöntemlerinin entegrasyonu ile metal mutfak eşyası imalatında bir uygulama

Selection of robot in industry 4.0: A case study on metal kitchenware manufacturing with the integration of SWARA and fuzzy TOPSIS methods

Mehri Banu Erdem¹ 

Alaeddin Koska² 

¹ Dr., Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye, mbsunbul@ksu.edu.tr

ORCID: 0000-0002-9763-3271

² Dr., Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye, akoska@ksu.edu.tr

ORCID: 0000-0002-8626-4300

Sorumlu Yazar/Corresponding Author:

Mehri Banu Erdem,

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi,
Kahramanmaraş, Türkiye,

mbsunbul@ksu.edu.tr

Başvuru/Submitted: 26/05/2023

Revizyon/ Revised: 23/06/2023

Kabul/Accepted: 8/07/2023

Yayın/Online Published: 25/09/2023

Atf/Citation: Erdem, M.B., & Koska, A., Endüstri 4.0 kapsamında robot seçimi: SWARA ve bulanık TOPSIS yöntemlerinin entegrasyonu ile metal mutfak eşyası imalatında bir uygulama, bmij (2023) 11 (3): 752-771, doi: <https://doi.org/10.15295/bmij.v11i3.2252>

Öz

Endüstriyel üretim, üreticilerin artan müşteri talebini karşılmasına ve küresel pazarda rekabet gücünü korumasına yardımcı olmak için sürekli olarak gelişmektedir. Üretimdeki robotik uygulamalar, işletmeler için daha fazla koruma, kalite ve sürdürülebilirlik üretmektedir. Sektördeki birçok üretim süreci, büyük bir hassasiyet ve hızla çalışan akıllı robotlar tarafından kolaylaştırılmıştır. Bu çalışma metal mutfak eşyası imalatı yapan bir işletmede robot değerlendirme ve seçimi problemini çözmeyi amaçlamıştır. Aynı zamanda robot seçim ölçütlerinin ağırlıklarını belirlemek amaçlanmıştır. İşletme imalatında kullandığı mevcut makineyi akıllı robotla değiştirmek ve daha fonksiyonlu bir robota yatırım yapmak istemektedir. Yatırım maliyeti yüksek ve geri dönüşü pahalıya mal olduğu için alternatifler arasında doğru kararı vermekte zorlanmaktadır. Bu bağlamda robot seçim ve değerlendirme kararında işletmeye destek olmak çalışmanın ana amacını oluşturmaktadır. Çalışmada çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan SWARA ve bulanık TOPSIS yöntemleri entegre edilerek kullanılmıştır. İşletmenin seçim yapmak istediği üç alternatif akıllı robot mevcuttur. Yapılan analizler sonucu bu alternatiflerden birisi işletmeye en uygun seçim olarak önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0, Akıllı Robot, SWARA, Bulanık TOPSIS

Jel Kodları: L64, O33

Abstract

Industrial manufacturing constantly evolves to help manufacturers meet growing customer demand and remain competitive in the global marketplace. Robotic applications in manufacturing produce more protection, quality and sustainability for businesses. Many manufacturing processes in the industry have been facilitated by smart robots working with great precision and speed. This study aimed to solve a manufacturing company's robot evaluation and selection problem. Another purpose is to determine the importance of robot selection criteria for this business. The company is a large-scale company that manufactures metal kitchenware in Kahramanmaraş. This company wants to replace its machine with a smart robot and invest in a more functional one. However, since the investment in smart robots is a high-cost and financially and morally expensive investment, it is difficult to decide between the options. At this point, the study's main purpose is to support the business in the selection decision. In the study, SWARA and fuzzy TOPSIS methods, which are multi-criteria decision-making methods, were integrated and used. There are three alternative smart robots that the firm wants to choose from. As a result of the analysis, one of these alternatives was suggested as the best choice for the firm.

Keywords: Industry 4.0, Smart Robot, SWARA, Fuzzy TOPSIS

Jel Codes: L64, O33

Extended Abstract

Selection of robot in industry 4.0: A case study on metal kitchenware manufacturing with the integration of SWARA and fuzzy TOPSIS methods

Literature

In order to compete in today's high-tech environment, the application of advanced manufacturing technologies, such as robots, has become a primary requirement for manufacturing organizations. However, properly operating industrial robots for a viable production system is difficult. Today's manufacturing industries are becoming more customer-centric, eventually requiring meeting customer demand in real-time. The need for industrial robots becomes inevitable with the increasing demand for complex products at higher production speeds. Industrial robot selection is one of the challenging decision-making responsibilities regularly undertaken by various manufacturing units to select the most suitable robot for specific industrial applications. The already complex process is becoming increasingly complex as manufacturers add special features and conveniences to robots (Mondal et al., 2017). In this process, decision-makers must select the most suitable robot to achieve the desired output with minimum cost and special application ability.

Industrial robot selection, evaluation and financial justification require a broad knowledge of alternative robots. It includes identifying the most significant robot selection features based on which the most appropriate decision can be taken. The selection of industrial robots has now become quite a complex and time-consuming task as manufacturers have incorporated various advanced features into robots. An effective robot selection decision methodology includes a short list of suitable robot alternatives and developing a decision matrix consisting of different robot selection attributes and corresponding values for each shortlisted robot alternative.

Design and methods

The starting point of this study is the robot selection problem. For this purpose, an evaluation was made by integrating SWARA and fuzzy TOPSIS techniques from multi-criteria decision-making methods. Non-fuzzy multi-criteria decision-making methods have been developed based on accurate measurement and clear evaluation. That is, measurement values must be precise. However, in real life, measurements of subjective attributes, e.g. man-machine interface and programming flexibility, may not be fully defined by decision-makers. In addition, assessing robot suitability against subjective criteria and the criteria weights are often expressed in linguistic terms. For this reason, the fuzzy TOPSIS method was preferred in evaluating alternatives. In the fuzzy TOPSIS method, the experts determine the weights of the criteria. For this reason, the SWARA method was used to make the criteria weights more objective and reliable.

Findings

Mechanical weight and volume have the lowest weight scores among the criteria. The lowest scoring criteria following these criteria are improving the working environment, creating material waste and sustainability, with an equal score. Accordingly, the most important criteria in choosing a robot for this enterprise are the efficiency of the robot, the production rate and the quality of the product it produces. In addition, the mechanical weight and volume of the robot for the enterprise is the last criterion to be considered in robot selection. As a result of the analysis, robot A emerged as the most suitable option with the highest value. Robot B is in second, and robot C is in third. There is a significant difference between the alternatives. For this reason, robot A has been proposed as the most suitable robot according to the criteria that the relevant business attaches significance to.

Conclusion and discussion

The three most important criteria for selecting smart robots for this business are productivity, product quality and production rate. However, the criteria with the lowest score in order of importance are mechanical weight and volume, respectively. The company thinks its smart robot investment will provide a significant return by increasing the efficiency and production rate. It also believes that it will significantly improve product quality by significantly reducing the error rate in production. Since there is no shortage of space in the enterprise, it has been observed that the mechanical weight and volume of the robot do not have priority. The criterion weights obtained by the SWARA technique were integrated into the fuzzy TOPSIS, and a ranking was made among the alternatives. Accordingly, it has been concluded that robot A is the most suitable alternative for the enterprise.

Giriş

Günümüz iş ortamında rekabet her geçen gün artmakta ve rekabet faktörleri yeni gelişmelerle yön değiştirmektedir. Ancak rekabetin tek değişmez önemli faktörlerinden biri her zaman teknoloji olmuştur ve öyle olmaya da devam etmektedir. Teknoloji akıllı kavramına bürünmüş ve her alanda akıllı sistemler kendine yer edinmiştir. Kuruluşlar da teknolojideki bu akıllı kavramını misyonlarına entegre etmektedirler. Buna yönelik akıllı kararlar almaya başlamışlar ve bu yönde planlar yapmaktadırlar. Akıllı sistemler, işletmeler için ihtiyaç haline gelmekte ve bu yönde yatırım yapmak zorunda kalmaktadırlar. Bu amaçla doğru zamanda doğru kararlar almak önemlidir. Akıllı sistemlerin ayrılmaz bir parçası olan robotlar, üretim süreçlerinde özel görevleri yerine getirmek için kullanılmakta, iş birliği halindeki insanlara güncel veriler sunmakta, ürünün kalitesini denetlemek ve hatalı ürünleri ayırmak gibi önceden tanımlanmış görevleri yerine getirmektedir. Robotlar, güvenlik, esneklik ve iş birliğine odaklanarak görevlerini kusursuzca tamamlayarak modern endüstride önemli bir rol oynamaktadır (Goel ve Gupta, 2020).

Üretim endüstrilerinde yıllardır ileri teknolojiler kullanılmaktadır. Ancak nesnelerin interneti (IoT) ve endüstri 4.0 gibi yeni üretim paradigmaları ile üretim sistemleri devrim yaratmaktadır. Nesnelerin interneti (IoT), her şeyin internette bir temsilinin ve varlığının olduğu bir çerçevedir. Daha spesifik olarak nesnelerin interneti makineden makineye (M2M) iletişimi yaratan, nesnelere ve buluttaki uygulamalar arasındaki etkileşimi sağlayan, fiziksel ve sanal dünyalar arasında köprü kuran yeni uygulamalar ve hizmetler sunmaktadır. Nesnelerin internetinin robotlarla entegre olmasıyla birlikte üretim sürecinde önemli bir devrim yaratılmıştır.

Teknolojiler, işletmelerin mükemmel organizasyonlar olarak rekabet edebilmelerinde kritik bir rol oynamaktadır. Doğru teknolojilerin seçilmesi, gelişmiş esneklik, pazardaki değişikliklere hızlı yanıt verme, gelişmiş kalite ve üretkenlik, gelişmiş müşteri memnuniyeti ve hem ürün farklılaştırması (Evans, Lohse ve Summary, 2013; Piippo, Torkkeli ve Tuominen, 1999) hem de yeni iş planları için artan operasyon kolaylığı (Aliakbari, Khalilli ve Antucheviciene, 2015) gibi dikkate değer rekabet avantajları yaratabilmektedir (Hamze ve Xu, 2019). Endüstri 4.0, mevcut nesilde tanık olunan bir dijital devrimdir ve amacı, minimum insanla veya manuel müdahale olmadan tüm üretim sürecini dijitalleştirmektir. Amaç, mümkün olduğu kadar çok endüstriyi kapsamak ve mevcut teknolojileri dijital üretimin ihtiyaçlarına daha uygun olacak şekilde uyarlamak ve geliştirmektir. Akıllı üretim, akıllı fabrikalar ve nesnelerin interneti (IoT) gibi kavramlar, endüstri 4.0'ın anahtar sözcüklerinden bazılarıdır. Endüstri 4.0'ın başarısı, büyük ölçüde çeşitli mevcut ve gelişmekte olan teknolojilerin mevcut üretim süreciyle başarılı bir şekilde bütünleştirilmesi ve uyarlanması yatmaktadır (Goel ve Gupta, 2019). Bu bütünleştirmede akıllı sistemlerin kurulması ve bu sistemin önemli bir parçası olan robotların üretim sürecinde kullanılması gereklilik haline gelmektedir. Günümüzde, bilgi teknolojisi ve mühendislikteki gelişmeler nedeniyle, farklı yeteneklere ve özelliklere sahip robotların kullanımı büyük ölçüde artmıştır. Robotların özellikleri günümüz endüstrilerinde kritik roller oynamaktadır. Bir robot genellikle kendini kontrol eden, çok amaçlı, yeniden programlanabilir bir makinedir. Farklı türde robotlar kullanılarak çok hassas ve uygun maliyetli ürünler üretilebilmektedir.

Günümüzün yüksek teknoloji ortamında rekabet edebilmek için, robotlar gibi ileri üretim teknolojilerinin uygulanması, üretim organizasyonları için birincil gereksinim haline gelmiştir. Ancak kullanışlı bir üretim sistemi için endüstriyel robotların uygun şekilde çalıştırılması kolay bir iş değildir. Günümüzün imalat endüstrileri daha çok müşteri odaklı hale gelmekte ve bu da sonunda müşterinin talebini gerçek zamanlı olarak karşılamayı gerektirmektedir. Daha yüksek üretim hızlarında karmaşık ürünlere olan talebin artmasıyla birlikte endüstriyel robotlara olan gereksinim kaçınılmaz hale gelmektedir. Endüstriyel robot seçimi, belirli endüstriyel uygulamalarda en uygun robotu seçmek için çeşitli üretim birimleri tarafından düzenli olarak yürütülen zorlu karar verme sorumluluklarından biridir. Zaten karmaşık olan süreç, üreticiler tarafından robotlara özel özellikler ve kolaylıklar eklenmesi nedeniyle giderek daha da karmaşık hale gelmektedir (Mondal, Kuila, Singh ve Chatterjee, 2017). Bu süreçte karar vericilerin, istenen çıktıyı minimum maliyet ve özel uygulama yeteneği ile elde etmek için en uygun robotu belirlemesi ve seçmesi gerekmektedir.

Endüstriyel robot seçimi, değerlendirilmesi ve finansal olarak gerekçelendirilmesi, alternatif robotlar hakkında geniş bir bilgi birikimini gerektirmektedir. En uygun kararın alınabilmesi temelinde en önemli robot seçim özelliklerinin tanımlanmasını içermektedir. Endüstriyel robotların seçimi, üreticiler tarafından çeşitli gelişmiş özelliklerin robotlara dahil edilmesi nedeniyle artık oldukça karmaşık ve zaman alan bir iş haline gelmiştir. Etkili bir robot seçimi karar verme metodolojisi, uygun robot alternatiflerinin kısa bir listesini ve kısa listedeki robot alternatiflerinin her biri için farklı robot seçim özniteliklerinden ve bunlara karşılık gelen değerlerden oluşan karar matrisinin geliştirilmesini içermektedir.

Belirli bir endüstriyel uygulama için çeşitli alternatif robotlar arasından seçim yapılacaksa, bunların performans özelliklerinin kesin bir şekilde karşılaştırılması gerekmektedir. Endüstriyel robot seçim problemi, birbiriyle çelişen birden fazla kriter ve sınırlı sayıda aday alternatif içerdiğinden, bu tür problemleri çözmek için farklı çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışma metal mutfak eşyası imalatı yapan büyük ölçekli bir işletmenin robot seçim problemini ele almaktadır. Çalışmada hem subjektif hem de objektif kriterlerin bir arada değerlendirilebilmesine olanak tanıyan çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan SWARA ve bulanık TOPSIS yöntemleri tercih edilmiştir. Literatür taramasıyla ve uzmanlarla görüşme neticesinde kriterler belirlenerek SWARA ve bulanık TOPSIS ölçeği oluşturulmuştur. Daha sonra ilgili işletmeden üç adet uzmanla grup görüşmesi yapılarak veriler alınmıştır. Elde edilen veriler analiz edilmiş ve bulgular yorumlanarak ilgili işletmeye en uygun robot önerisi yapılmıştır.

Endüstri 4.0 ve akıllı robotlar

21. yüzyıl şu anda ürünlerin üretilme ve hizmetlerin sunulma biçimlerinde köklü bir dönüşümün ortasındadır. Mevcut nesil, üretim sürecinin dijitalleşmesine tanık olmaktadır. Sektördeki bu zorlayıcı, önemli değişiklik, dördüncü sanayi devrimi veya Endüstri 4.0 olarak adlandırılmıştır. Birinci sanayi devriminde su ve buhardan elde edilen gücün kullanıldığı makineleşmeden, ikinci sanayi devriminde elektriğin seri üretim için kullanılmasına kadar, sanayi devriminin bu dördüncü aşaması, üçüncü sanayi devriminde başlatılan otomasyon ve bilgisayarlaşmayı bir sonraki aşamaya taşımaya misyon edinmiştir. Yapay zekâ, bulut depolama ve büyük veri analizi temelleri üzerine kurulu akıllı üretim düzeyini hedef almaktadır (Goel ve Gupta, 2019). Endüstri 4.0, çalışma koşullarını iyileştirmek ve üretkenliği ve kaliteyi artırmak için endüstriyel otomasyonu içeren ve yeni üretim teknolojilerini entegre eden yeni bir üretim kavramıdır. Endüstri 4.0 ve akıllı üretim, modern endüstrinin ve ulusal ekonominin çok önemli temelleridir. Endüstri 4.0, otomasyon sistemlerinin ve fabrikaların tüm seviyeleri içinde ve genelinde birlikte çalışabilirlik ve uyumluluk sorunlarını ele alan evrensel bir ağ mimarisi oluşturmayı ve böylece geleneksel üretimin esnekliğini ve çevikliğini geliştirmeyi hedeflemektedir.

Akıllı üretim için eşit derecede vazgeçilmez olan, üretim hatlarının her köşesinde görünen akıllı bir ajan olarak hizmet eden gelişmiş robot teknolojisidir (Huang, Shen, Li, Fey ve Brecher, 2021). Akıllı robot, genellikle karmaşık ve monoton görevleri tekrar tekrar gerçekleştirebilen mekanik, mikro elektronik ve elektrikli bileşenlerle yapılmış, güçle çalışan, kendi kendini kontrol eden programlanabilir bir makinedir. American Robots Association'a göre robot, programlar ve komutlarla daha iyi kontrol edilebilen çok işlevli bir yapı olarak tanımlanabilir (Mondal ve Chakraborty, 2013). Son yıllarda, robotik sistemlerin ticari girişimlerde ve üretim birimlerinde kullanımı, kaynakların zamanında iyi kullanılması, verimliliğin artırılması ve ürün kalitesinin iyileştirilmesi bakış açısıyla önemli ölçüde yaygınlaşmıştır (Sen, Datta ve Mahapatra, 2016). Firmaların performanslarını artırmak için endüstriyel iş istasyonlarında akıllı robotların kullanımı giderek artmaktadır. Teslimat süresinin azaltılmasına, çalışma ortamının iyileştirilmesine, üretim maliyetinin düşürülmesine ve hatta zaman içinde pazar talebine uygun ürün yelpazesinin artırılmasına yardımcı olmak için tekrarlayan üretim işlerini, tehlikeli işleri, çok vardiyalı işlemleri vb. gerçekleştirmek için robotlar kullanılmaktadır (Bhattacharya, Sarkar ve Muukherjee, 2005).

Bir endüstriyel robot, genel olarak, değişken programlanmış hareketler yoluyla malzemeleri, parçaları, araçları veya diğer cihazları hareket ettirmek ve çeşitli başka görevleri gerçekleştirmek için tasarlanmış, yeniden programlanabilir çok işlevli bir mekanik sistem olarak tanımlanmaktadır (Rao, 2007). Daha geniş bir bağlamda robot terimi, doğrudan bir operatör tarafından etkinleştirilen sistemleri de içermektedir. Unimate ilk olarak 1961 yılında robotu piyasaya sürmüş ve ilk olarak General Motors tarafından uygulanmıştır.

Robotlar, çeşitli işlevleri programlanmış yazılım tarafından otomatik olarak kontrol edildiğinden, hem insan gücünü diğer faaliyetlere bırakmakta ve insanı fiziksel zorlanma ve yaralanmaya neden olabilecek faaliyetlerden kurtarmakta hem de günün her saati çalıştırılabilmektedir. Böylece akıllı robotların kullanılması, teslimat süresini azaltıp ve çalışma ortamını iyileştirirken, günümüz imalat sanayilerinin üretkenliğini ve karlılığını da artırmaktadır (Agarwal, Chakraborty, Prasad ve Chakraborty, 2021). Endüstriyel robotlar birçok farklı yeteneklere sahiptirler ve bu yetenekleri sayesinde işletmelere birçok fayda yaratmaktadır. Bu faydalar Tablo 1'de yer almaktadır.

Tablo 1: Endüstriyel Robot Yetenekleri ve Bunların Üreticilere Sağladığı Olası Faydalar

Endüstriyel Robot Yetenekleri		Sağladığı Faydalar
Azalış	Üretim maliyeti	İşgücü ve hizmet giderleriyle ilgili maliyetleri azaltmayı sağlar.
	Malzeme atığı	Artan verimlilik, üretim malzemesi israfının azaltılmasını sağlar.
	Sermaye maliyeti	Yatırım geri dönüş oranıyla sermaye maliyetinin düşmesini sağlar.
	Yüz ölçümü	Çok yönlü montaj ile kompakt sistemler sayesinde robotların hacminde azalma sağlanarak kapladığı alandan tasarruf edilmektedir.
	Üretim süresi	Üretim hızının ve verimliliğin artmasını, yeniden yapılandırılabilirliğin hızlanmasını sağlayarak üretim süresinde azalış yaratmaktadır.
Gelişim	Ürün kalitesi	Daha verimli süreç kontrolüyle görevi doğru yürütmeyi sağlayarak üretim kalitesini arttırmaktadır.
	Ürün bütünlüğü	İnsan hatası ve yorgunluktan kaynaklanan hataların giderilmesini sağlamaktadır.
	Çalışma ortamı	Çalışma ortamının iyileştirilmesini, çalışanların elverişsiz koşullardan ve sıkıcı görevlerden uzaklaştırılmasını sağlar.
Artış	Üretim oranı	7/24 kesintisiz üretim yapabilmeyi sağlar.
	Esneklik	Yeniden yapılandırılabilirliği ve çeşitli görevlere uyarlanması kolaydır.
	Güvenlik	Çalışma şartlarının güvenliğinin artmasını ve hijyen sağlar
	Rekabet avantajı	Pazar taleplerine daha hızlı yanıt verebilmeyi, ürünün özelleştirilmesine ve kişiselleştirilmesine izin verir.
	Verimlilik	Süreçlerin optimize edilmesini sağlayarak verimliliği artırır.

Kaynak: Bader ve Rahimifard, 2020

Tablo 1'e göre akıllı robotlar üretim maliyeti, malzeme atığı, sermaye maliyeti, yüz ölçümü ve üretim süresinde azalma yaratırken üretim oranı, esneklik, güvenlik, rekabet avantajı ve verimlilikte artış sağlamaktadır. Bununla birlikte ürün kalitesi, ürün bütünlüğü ve çalışma ortamını da iyileştirmektedir. Tüm bu sağladığı iyileştirmeler işletmeleri akıllı robot kullanımına teşvik etmektedir.

Literatür taraması

Endüstriyel robotlar, tekrar eden, zor ve tehlikeli görevleri (montaj, makine yükleme, malzeme taşıma, boyama ve kaynak yapma gibi) hassasiyetle gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca üretim organizasyonlarının kalitesini ve üretkenliğini önemli ölçüde artırabilmektedir. Farklı yeteneklere ve özelliklere sahip robotlar artık piyasada çok çeşitli operasyonları gerçekleştirmeye adanmıştır. Çok sayıda aday alternatif arasından belirli bir uygulamaya ve üretim ortamına uygun robot seçimi artık zorlu bir görev haline gelmiştir. Robot edinimi ve kurulumu için büyük ölçüde yatırım gerektiğinden, uygun robot seçimi, niceliksel veriler kullanılarak elde edilebilecek bir süreç olan alternatiflerin özelliklerinin yanı sıra gereksinimlerin de dikkatli bir şekilde incelenmesini ve değerlendirilmesini gerektirmektedir. Belirli bir endüstriyel uygulama için bir robot seçerken göz önünde bulundurulması gereken çok fazla özellik yer almakta ve bu farklı özellikler de problemin karmaşıklığını arttırmaktadır (Bhangale, Agrawal ve Saha, 2004). Bu kriterler robotun konu olduğu endüstriye, işletmenin yapısına ve faaliyet alanına bağlı olarak farklılaşabilmekte ve aranan özellikler ve bu özelliklerin önceliği de değişebilmektedir. Bu amaçla literatürde robot seçimi üzerine yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Bunlardan bazılarına aşağıda değinilmiştir.

Braglia ve Petroni (1999), doğrusal programlama problemlerinin çözümü yoluyla her bir robot için görece verimliliği ölçerek en iyi robotun belirlenmesini amaçlayan veri zarflama analizi kullanan endüstriyel robotların seçimi için bir metodoloji önermiştir. Buna karşılık Athawale ve Chakraborty (2011) robot seçiminde Ağırlıklı Çarpım Metodu (WPM), İdeal Çözüme Benzerlik yöntemi ile Sıralama Tercihi Tekniği (TOPSIS) ve gri ilişkisel analiz yöntemi (GRA) kullanmıştır. Her üç yöntemin sonuçlarını kıyaslamış ve WPM, TOPSIS ve GRA yöntemlerinin performansının diğerlerine göre biraz daha iyi olmasına karşın tüm bu yöntemlerin alternatif robotlarla hemen hemen aynı sıralamaları verdiği sonucuna ulaşmıştır. Bu nedenle belirli bir endüstriyel robot seçim problemi için, kullanılacak en uygun ÇKKV yönteminin seçilmesinden çok, ilgili kriterlerin ve alternatiflerin doğru seçimine daha fazla dikkat edilmesi gerektiği sonucuna ulaşmıştır. Bu çalışmalara ek olarak çok kriterli karar verme yöntemleriyle robot seçimi üzerine yapılmış çalışmalardan bazıları Tablo 2'de yer almaktadır.

Tablo 2: Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Robot Seçimi Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Yöntem	Yazar
AHP	Bhattacharya vd. (2005), Costa, Mamede ve Silva (2023)
TOPSIS	Bhangale vd. (2004), Kahraman, Çevik, Ateş ve Gülbay (2007), Rashid, Beg ve Husnine (2014), İç, Yurdakul, Günayar ve Önel (2017), Chodha, Dubey, Kumar, Singh ve Kaur (2022)
VIKOR	Chatterjee, Athawale ve Chakraborty (2010)
PROMETHEE	Sen vd. (2016), Nasrollahi, Ramezani ve Sadraei (2020)
ELECTRE	Chatterjee vd. (2010), Bao ve Shi, 2022
WASPAS	Karande, Zavadskas ve Chakraborty (2016), Sampathkumar, Augustin, Kaaban ve Yue (2023)
MOORA	Karande vd. (2016)
ARAS	Şahin (2020)
(VZA) Veri Zarflama Analizi	Alinezhad, Makui, Kiani ve Zahrehbandian. (2011), Kao ve Liu (2022)
(KFG)Kalite Fonksiyon Göçerimi	Bhattacharya vd. (2005), Karsak (2008)
Fuzzy Best-Worst	Nasrollahi vd. (2020)
COPRAS	Bairagi, Dey, Sarkar ve Sanyal (2014), Mondal vd. (2017)
Fuzzy AHP	Bairagi vd. (2014), Shahrabi (2014), Parameshwaran, Kumar ve Saravanakumar (2015)
Fuzzy TOPSIS	Chu ve Lin (2003), Bairagi vd. (2014), Shahrabi (2014), Parameshwaran vd. (2015), İç vd. (2021)
Fuzzy VIKOR	Devi (2011), Bairagi vd. (2014), Parameshwaran vd. (2015), Zhou, Wangh ve Goh (2018), Narayanamoorthy, Geetha, Rakkiyappan ve Joo (2019)

Literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada robot seçimi endüstri 4.0 kapsamında değerlendirilmiş ve akıllı robotlar üzerine bir seçim gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan SWARA ve bulanık TOPSIS robot seçiminde ilk kez birlikte kullanılmıştır. Dolayısıyla literatürde bu yönden benzer bir çalışmaya rastlanmamıştır. Çalışmanın kriter ve yöntem açısından akıllı robot seçimine yol gösterici bir nitelik taşıyacağı düşünülmektedir.

Metodoloji

Son yıllarda, işletmelerin rekabet avantajını artırmak amacıyla teknolojilerin seçimi için çeşitli yöntemler geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bu çeşitlilik göz önüne alındığında, bir karar vericinin en uygun yaklaşımı bulması ve doğru seçimi gerçekleştirmesi zorlu bir iştir. Bu nedenle doğru seçimi gerçekleştirebilmek için hem ihtiyaca uygun kriterlerin belirlenmesi hem de yöntemin seçilmesi önemlidir. Bununla birlikte çeşitli alternatif robotları karşılaştırırken, etkili niteliklerin uygun şekilde tanımlanması da kritik derecede önemlidir. Bu nedenle, bir robot kullanıcısı yeni robot satın almak için tedarikçiye gittiğinde, bu öznel nitelikler tanımlaması büyük önem kazanmaktadır. Bazen, incelenmekte olan belirli alternatifler bağlamında hangi niteliklerin önemli olduğunun basitçe ifade edilmesi, bazı niceliksel veya yarı niceliksel seçim yöntemlerinin uygulanması rasyonel bir seçime yardımcı olmaktadır. Bu çalışmanın çıkış noktası da robot seçim problemi üzerinedir. Bu amaçla çok kriterli karar verme yöntemlerinden SWARA ve bulanık TOPSIS teknikleri entegre edilerek bir değerlendirme yapılmıştır. Bulanık olmayan çok kriterli karar verme yöntemleri, doğru ölçüm ve net değerlendirme kavramlarına dayalı olarak geliştirilmiştir, yani ölçüm değerleri kesin olmalıdır. Bununla birlikte, gerçek hayatta, öznel niteliklerin ölçümleri, örn. insan-makine arayüzü ve programlama esnekliği, karar vericiler tarafından tam olarak tanımlanamayabilir. Ayrıca, subjektif kriterlere karşı robot uygunluğunun değerlendirilmesi ve kriterlerin ağırlıkları genellikle dilsel terimlerle ifade edilmektedir. Bu nedenle alternatiflerin değerlendirilmesinde bulanık TOPSIS yöntemi tercih edilmiştir. Bulanık TOPSIS yönteminde kriterlerin ağırlıkları uzmanlar tarafından belirlenmektedir. Bu nedenle kriterlerin ağırlıklarının daha objektif ve güvenilir olması amacıyla SWARA yönteminden faydalanılmıştır. Bu yöntemlerin açıklamaları aşağıda yer almaktadır.

SWARA tekniği

SWARA tekniği çok kriterli karar verme yöntemlerinden biridir. Kerşulienne vd. tarafından ilk olarak 2010 yılında ortaya konulmuştur. Türkçesi "Adım Adım Ağırlık Değerlendirme Oran Analizi" olan SWARA'nın açılımı "Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis"dır. Çok kriterli karar verme teknikleri içerisinde yer alan diğer yöntemlere göre avantajı karar vericiye sınırlandırıcı bir ölçek sunmadan özgürce cevap verme imkânı sunmasıdır.

Kerşulienne, Zavadskas ve Turskis (2010)'ne göre, SWARA yöntemini kullanarak bir problem çözmenin ilk adımı bir dizi değerlendirme kriteri tanımlamakla başlamakta, ardından kriterler beklenen önemlerine göre azalan düzende sıralanmaktadır. Bu yöntemde uzman, değerlendirmelerde ve ağırlıkların hesaplanmasında önemli bir role sahiptir.

Yöntemin işlem adımlarında ilk olarak kriterler belirlenmektedir. Daha sonra belirlenen kriterler karar vericiler tarafından en çok önemliden en az önemliye doğru sıralama yapılmaktadır. Bu işlemde sonra

elde edilen sıralamaya göre her bir ölçütün göreceli önem düzeyi belirlenmektedir. Bunun için j . faktörün ($j+1$). faktörden ne kadar önemli olduğu belirlenmektedir. Bu değer Kerşulienne vd. (2010) tarafından s_j olarak ifade edilmiştir. Üçüncü adımda k_j katsayısı hesaplanmaktadır. Bu katsayı eşitlik (1)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$k_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ s_j + 1 & j > 1 \end{cases} \quad \text{Eşitlik (1)}$$

Dördüncü adım olarak q_j değişkeni hesaplanır. q_j değişkeni eşitlik (2)'de ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$q_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ \frac{q_{j-1}}{k_j} & j > 1 \end{cases} \quad \text{Eşitlik (2)}$$

Son adım olarak değerlendirme ölçütlerinin ağırlıkları yani w_j değeri hesaplanmaktadır. Bu hesaplama işlemi de eşitlik (3)'e göre yapılmaktadır.

$$w_j = \frac{q_j}{\sum_{k=1}^n q_k} \quad \text{Eşitlik (3)}$$

Bulanık mantık

Bulanık mantık bir elemanın içinde bulunduğu kümeye ait olma derecesini ifade etmektedir. Bulanık mantıkta doğru ya da yanlış yoktur. Doğru ya da yanlışın bir derecesi vardır. Bulanık mantıktaki bir değişken, geleneksel ikili kümelerde doğru veya yanlış almanın aksine, 0 ile 1 arasında bir doğruluk değeri aralığı alabilir. Bulanık mantık fen bilimlerinin yanı sıra sosyal bilimler alanlarında da başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Sosyal bilimler alanında yapısı gereği ifadelerde kesin bir dilin kullanılması uygun olmamaktadır. Bu noktada bulanık mantık kendini göstermektedir. Dolayısıyla bulanık mantıkta siyah ya da beyaz yoktur. Aksine siyah ve beyazın arasında gri alan vardır. Kesinlik olmayıp ifadeler bu gri alanda yer almaktadır. Bulanık mantık devreye girdiğinde ölçeklerde bulanık sayıların kullanılması gerekmektedir. Bu noktada genellikle üçgensel bulanık sayılar kullanılmaktadır. Üçgensel bulanık sayılar en küçük, en geniş ve en yüksek değerleri temsil etmektedir.

Bulanık TOPSIS

İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıralama Tercihi Tekniği (TOPSIS), Hwang ve Yoon (1981) tarafından ortaya atılmış ve açıklanmıştır. TOPSIS'te bulanık küme teorisi kullanıldığında buna Fuzzy TOPSIS (FTOPSIS) denilmektedir. Geçmişte, birkaç araştırmacı TOPSIS'i bulanık ortamlara genişletmişlerdir (Chen, 2000; Jahanshahloo vd. 2006; Wang ve Lee, 2007). TOPSIS/FTOPSIS yöntemine göre en iyi alternatif, pozitif ideal çözüme en yakın ve negatif ideal çözüme en uzak olan alternatiftir (Shih, 2008; Wu, Tzeng ve Chen, 2009; Bairagi vd., 2014). Pozitif ideal çözüm, fayda kriterlerini maksimize eden ve fayda/maliyet kriterlerini en aza indiren çözümdür. FTOPSIS yönteminin adımları aşağıdaki gibidir (Bairagi vd., 2014).

Bulanık TOPSIS için Chen (2000) tarafından önerilen bulanık ölçek kullanılmaktadır. Bu ölçek Tablo 3'de yer almaktadır.

Tablo 3: Bulanık TOPSIS Yöntemi Ölçeği İçin Bulanık Sayılar ve Dilsel İfadeler

Dilsel İfadeler	Bulanık sayılar
Çok düşük	0, 0, 0.1
Düşük	0, 0.1, 0.3
Orta derecede düşük	0.1, 0.3, 0.5
Orta	0.3, 0.5, 0.7
Orta derecede yüksek	0.5, 0.7, 0.9
Yüksek	0.7, 0.9, 1.0
Çok yüksek	0.9, 1.0, 1.0

Kaynak: Chen, 2000

Bulanık karar matrisinin oluşturulması: TOPSIS, kriterlere göre alternatiflerin performans derecelerini içeren bir karar matrisi oluşturarak başlamaktadır. Karar matrisi Çok düşük (ÇD), Düşük (D), Orta (O), Yüksek (Y) ve Çok yüksek (ÇY) gibi dilsel değişkenlerden oluşmaktadır. Bulanık performans derecelendirmesini ifade eden dilsel değişkenler, aşağıda gösterildiği gibi karşılık gelen bulanık sayılara dönüştürülür. m adet kriter ve n adet alternatif için formül:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \tag{Eşitlik 4}$$

Bulanık performans derecelendirmelerinin normalleştirilmesi: Performans derecelendirmelerini 0 (sıfır) ile 1 arasında boyutsuz sayılara dönüştürmek için normalleştirme yapılır. Performans derecelendirmelerini normalleştirmek için aşağıdaki denklemler (Eşitlik 5,6,7) kullanılmaktadır. a, b ve c sırasıyla üçgensel bulanık sayıları temsil etmektedir. r_{ij} üçgensel bulanık sayıların normalleştirilmiş değerlerini ifade etmektedir.

$$X_{ij} = [r_{ij}]_{m \times n} ; i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n; \tag{Eşitlik 5}$$

$$r_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^+} + \frac{b_{ij}}{c_j^+} + \frac{c_{ij}}{c_j^+} \right) ; c_j = \max c_{ij} \tag{Eşitlik 6}$$

$$r_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}} + \frac{a_j^-}{b_{ij}} + \frac{a_j^-}{c_{ij}} \right) ; a_j = \min a_{ij} \tag{Eşitlik 7}$$

Chen (2000)'nin önerdiği yaklaşıma göre, eğer bulanık karar matrisinde ilgili kriter fayda yönlü (yani yüksek olması) isteniyorsa eşitlik 6 kullanılarak en büyüklenir, eğer maliyet yönlü (düşük olması) isteniyorsa eşitlik 7 kullanılarak en küçüklenir. Böylece normalize edilmiş karar matrisi elde edilir.

Bulanık ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisinin oluşturulması: Ağırlıklı normalleştirilmiş performans derecelendirmesi, eşitlik 8 kullanılarak hesaplanmaktadır. v_{ij} ağırlıklandırılmış değeri ifade etmektedir.

$$v_{ij} = w_j * r_{ij} ; \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n; \tag{Eşitlik 8}$$

Bulanık pozitif ideal çözüm ve bulanık negatif ideal çözümlerinin hesaplanması: Bulanık ağırlıklı karar matrisi oluşturulduktan sonra bulanık pozitif ideal çözüm noktası (eşitlik 9) ve bulanık negatif ideal çözüm noktasına (eşitlik 10) olan mesafe hesaplanmaktadır.

$$A^+ = (y_1^+, y_2^+, \dots, y_n^+) \tag{Eşitlik 9}$$

$$A^- = (y_1^-, y_2^-, \dots, y_n^-) \tag{Eşitlik 10}$$

$$y_j^+ = (1,1,1) \quad \text{ve} \quad y_j^- = (0,0,0)$$

Bulanık yakınlık katsayılarının belirlenmesi: Aşağıdaki denklem (eşitlik 11,12,13) kullanılarak yakınlık dereceleri hesaplanmaktadır.

$$D_j^+ = \sum_{i=1}^m d(y_{ij}, y_i^+), j = 1, 2, \dots, n \tag{Eşitlik 11}$$

$$D_j^- = \sum_{i=1}^m d(y_{ij}, y_i^-), j = 1, 2, \dots, n \tag{Eşitlik 12}$$

$$d(m, n) = \sqrt{\frac{1}{3}(m_1 - n_1)^2 + (m_2 - n_2)^2 + (m_3 - n_3)^2} \tag{Eşitlik 13}$$

En iyi alternatifin seçimi: Alternatifler yakınlık katsayılarının azalan sırasına göre düzenlenir. En yüksek yakınlık katsayısına sahip en iyi alternatif seçilir. Eşitlik 14 ile ideal çözüme göreli yakınlık (C_i) hesaplanmaktadır.

$$C_i^+ = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad 0 \leq C_i^+ \leq 1 \tag{Eşitlik 14}$$

Uygulama

Metal mutfak eşyaları imalatı alternatifli üretim hatları kurmaya ve ileri teknoloji tabanlı üretim yapmaya uygun ürün içeriklerinden oluşmaktadır. AR-GE ve tasarımların yoğun olduğu sektörde kalite artışı, maliyet düşüşü, verimlilik artışı, üretim hızı önemli kavramlardandır. Bu nedenle sektör, teknolojik gelişime açık olan ve endüstri 4.0 teknolojilerine kolay uyum sağlayabilen sektörlerden biridir. Metal mutfak eşyaları imalatında akıllı robotlar önemli bir yer edinmektedir. Bu alanda faaliyet

gösteren işletmeler akıllı sistemlere geçerek birçok yönden rekabet avantajı kazanmaktadır. Bunlardan biri de işgücü maliyetlerinin düşmesidir. İşletmeler akıllı robotlar sayesinde işgücü tasarrufu elde ederek kendi kendini yönetebilen, durmaksızın çalışabilen ve yorulmayan, hatasız üretim yapabilen ve hata olduğunda anında tespit edebilen akıllı sistemlerin birçok avantajından yararlanmaktadır. Ancak işletmeler endüstri 4.0 kapsamında akıllı üretim hattını kurabilmek amacıyla çeşitli akıllı robotlar arasından kendilerine en uygun olanını belirleme sorunuyla karşı karşıya kalmaktadır. Aşağıda bu alanda yapılmış bir uygulamanın detaylı açıklaması yer almaktadır.

Araştırmanın amacı ve kapsamı

Bu çalışmanın amacı endüstri 4.0 kapsamında teknolojiye uyum sağlama sürecinde olan bir firmanın akıllı robot seçimi problemine çözüm önerisi sunmaktır. Firma metal mutfak eşyası imalatı yapan büyük ölçekli bir firmadır. Firma mevcut makinesinin yerine akıllı robota geçmek istemektedir. Ancak yatırım maliyeti çok yüksek olduğundan doğru robotu seçmek için çözüm yolu aramaktadır. En iyi robotun seçilmesi, çeşitli performans özelliklerinin dahil edilmesinden dolayı endüstriyel bağlamda önemli bir problemdir. Bu çalışmada, robot seçim problemini çözmek için çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan SWARA ve Bulanık TOPSIS yöntemleri entegre edilerek kullanılmıştır. İşletmede bir üst düzey yönetici, bir üretim müdürü ve bir mühendisle yüz yüze görüşülerek üç adet uzmandan veriler alınmıştır. Araştırmada öncelikle belirlenen kriterlerin ağırlıkları SWARA tekniği ile belirlenmiştir. Ardından bu elde edilen ağırlıklar bulanık TOPSIS yönteminde kullanılarak firma için en uygun robot seçim işlemi yapılmıştır.

Araştırmanın önemi

Endüstri 4.0 teknolojileri, bağlı bilgisayarların, ekipmanların, uygulamaların ve bireylerin bağlantılı bir ağda iletişim kurmasını sağlamakta ve üreticilere kritik süreçler hakkında bilgiyi zamanında ulaştırmaktadır. Robotlar, endüstride çeşitli görevleri yerine getirmek için kullanılan yenilikçi teknolojilerdir. Üretim sorunlarını proaktif olarak düzeltilebilen bu robotlar üretim performansını artırırken maliyetleri en aza indirmek için sürekli olarak iyileştirme de sağlamaktadır. Endüstri 4.0'da tüm cihazlar, ekipmanlar, robotlar ve bilgisayarlar akıllı sistemleri içeren bir endüstriyel üretim yöntemiyle ilişkilidir (Javaid, Haleem, Singh ve Suman, 2021). Endüstri 4.0, işletmeleri önemli demirbaş yatırımlarına zorlamaktadır. İşletmeler de bu yatırımı yapabilmek için finansal kaynakların sınırlarını zorlamaktadır. Birçok işletme akıllı robotlara kademeli olarak geçmektedir. Bu yatırım kararlarını doğru verebilmek adına uzun süre araştırma yapmaktadırlar. Yatırım maliyeti yüksek olan akıllı robot seçim kararı işletmeler için önemli bir problem oluşturmaktadır.

Endüstriyel robot seçim problemi, birbiriyle çelişen birden fazla kriter ve belirlenen sayıda alternatif içerdiğinden, bu tür problemleri çözmek için çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri etkili bir şekilde kullanılabilir. Çok kriterli karar verme, çelişen birden çok kriterin varlığında karar vermeyi ifade etmektedir. Bir ÇKKV yöntemi, alternatifleri sıralamakta ve en yüksek sırada yer alanı, karar vericiye en iyi alternatif olarak önermektedir (Athawale ve Chakraborty, 2011). Bu çalışma da iki farklı ÇKKV yöntemini kullanarak akıllı robot seçim problemine çözüm önerisi sunmuştur. Problem metal mutfak eşyası imalatı yapan büyük ölçekli bir işletmenin akıllı robot yatırımı yapmak istemesiyle ortaya çıkmıştır. İmalat teknolojilerinde yüksek teknolojinin kullanılmasıyla üretim hızı artmakta, hata ve fire oranları azalmaktadır. Ayrıca maliyet düşmekte, kalite ve esneklik artmaktadır. Bu temel avantajlarına eklenebilecek sektörden sektöre değişen çok sayıda faydaları mevcuttur. İşletmenin bu faydalardan en optimum şekilde yararlanabilmesi için üretim süreçlerine uyumlu en uygun robot seçimi yapılmaya çalışılmıştır.

Kriterlerin belirlenmesi ve karar hiyerarşisinin oluşturulması

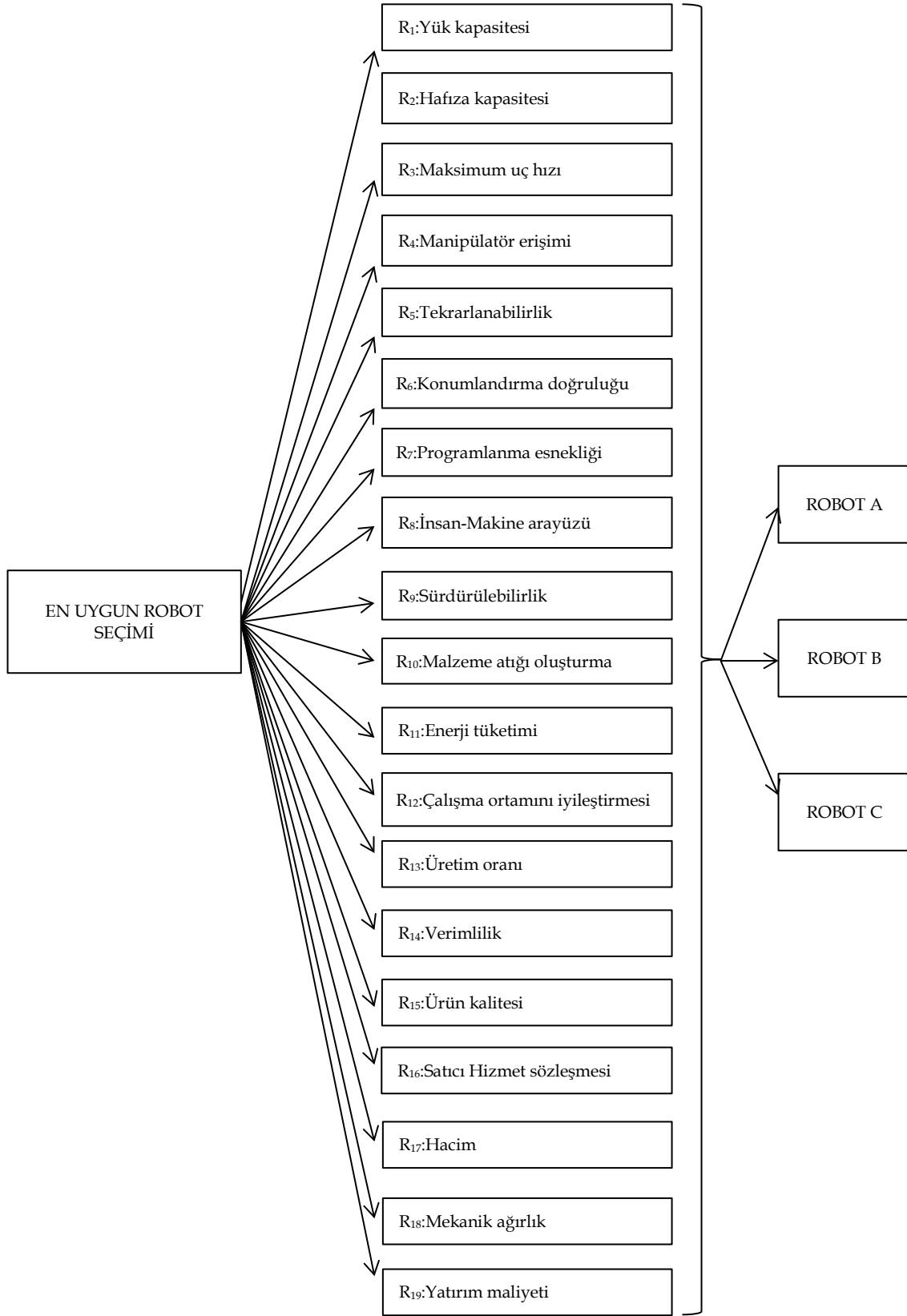
Seçim ve değerlendirme söz konusu olduğunda birçok değerlendirme ölçütü belirlenebilmektedir. Bu ölçütlerden bazıları doğası gereği olmazsa olmaz faydalı özelliklerden iken bazıları gereksizdir. Yük kapasitesi ve program esnekliği gibi faydalı kriterler için her zaman daha yüksek değerler istenirken, maliyet ve tekrarlanabilirlik gibi faydalı olmayan kriterler için daha düşük değerler tercih edilmektedir. Robotların uygulama alanları kaynak, malzeme taşıma, bileşen montajı, boyama ve yüzey işleme vb. alanları içermektedir. Piyasada çok çeşitli endüstriyel robotların bulunması nedeniyle, belirli bir endüstriyel uygulama için uygun robot seçimi çok zor bir görev haline gelmiştir. Uygun olmayan robot seçimi, yalnızca ürünlerin üretkenliğini ve kalitesini olumsuz etkilemekle kalmaz, aynı zamanda kuruluşun itibarını da büyük ölçüde etkilemektedir. Bununla birlikte, bir robot uygulamasını yürütmek, sermaye yoğun bir iştir. Bu nedenle, uygulanmadan önce, çeşitli seçim faktörlerinin etkisinin değerlendirilmesi gereken, uygulanabilirliği ve performansı ile ilgili dikkatli bir incelemeye ihtiyaç vardır (Mondal vd., 2017). Bu çalışmada kriterler öncelikle kapsamlı bir literatür taramasıyla belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen bu kriterler uzmanlara sunularak kendi ihtiyaçlarına uygun

olanlarını seçmeleri ve listede olmayan kriterler varsa eklemeleri istenmiştir. Buna göre belirlenen kriterler Tablo 4'te yer almaktadır.

Tablo 4: Belirlenen Ölçütler ve Tanımlamaları

Kriter Kodu	Kriterler	Tanımı	Kaynak
R ₁	Yük kapasitesi	Bir robotun kaldıracabileceği ağırlığı (yükü) göstermektedir (Mondal vd., 2017)	Chu ve Lin, 2003; Gitinavard, Mousavi, Vahdani ve Siadat, 2016; Sen vd., 2016; Mondal vd., 2017; Nasrollahi vd., 2020; Chodha vd., 2021; Kumar, Kalita, Catterjee, Zavadskas ve Chakraborty, 2022
R ₂	Hafıza kapasitesi	Bir robotun hafıza kapasitesi, önceden tanımlanmış bir yol boyunca ilerlerken hafızasında saklayabileceği nokta veya adım sayısı cinsinden ölçülmektedir (Athawale ve Chakraborty, 2011)	Sen vd., 2016; Mondal vd., 2017; Nasrollahi vd., 2020
R ₃	Maksimum uç hızı	Bir robotun kol ucunu ne kadar hızlı konumlandırabildiği olarak tanımlanmaktadır (Mondal vd., 2017)	Sen vd., 2016; Mondal vd., 2017; Bader ve Rahimifard, 2020; Nasrollahi vd., 2020; Kumar vd., 2022
R ₄	Manipülasyon erişimi	Manipülasyon erişimi, robotik manipülasyonun belirli bir yerleştirme işlemi için nesnelere kavramak amacıyla kat edebileceği maksimum mesafedir (Athawale ve Chakraborty, 2011)	Sen vd., 2016; Mondal vd., 2017; Nasrollahi vd., 2020; Chodha vd., 2021; Kumar vd., 2022
R ₅	Tekrarlanabilirlik	Bir robotun tekrar tekrar aynı pozisyona ve oryantasyona geri dönme yeteneğinin ölçüsüdür (Athawale ve Chakraborty, 2011)	Sen vd., 2016; Mondal vd., 2017; Nasrollahi vd., 2020; Chodha vd., 2021; Kumar vd., 2022
R ₆	Konumlandırma doğruluğu	Bir robotun beklenen bir noktaya ne kadar yakın bir şekilde ulaşabileceğidir (Mondal vd., 2017)	Chu ve Lin, 2003; Gitinavard vd., 2016; Sen vd., 2016; Mondal vd., 2017; Nasrollahi vd., 2020
R ₇	Programlanma esnekliği	Robotun faaliyetlerini kesintiye uğratmadan bir programı oluşturma veya değiştirme yeteneğidir (Mondal vd., 2017)	Chu ve Lin, 2003; Ghorabae vd., 2016; Gitinavard vd., 2016; Sen vd., 2016; Bader ve Rahimifard, 2020; Nasrollahi vd., 2020
R ₈	İnsan-Makine Arayüzü	Süreç verilerini monitörde bilgiye dönüştürerek kullanıcının makine ile etkileşimini sağlayan bir sistemdir (Nardo vd., 2020)	Chu ve Lin, 2003; Ghorabae vd., 2016; Gitinavard vd., 2016; Sen vd., 2016; Nasrollahi vd., 2020
R ₉	Sürdürülebilirlik	Robotun çevreye verdiği zararın boyutunu içermektedir. (Hava, su kirliliği, atık oluşturma vb.) (Nasrollahi vd., 2020)	Sen vd., 2016
R ₁₀	Malzeme atığı oluşturma	Üretim malzemesinden ne kadar atık oluşturduğudur (Bader ve Rahimifard, 2020)	Bader ve Rahimifard, 2020
R ₁₁	Enerji tüketimi	Daha düşük güç tüketimi, cihaza bir girdi olarak ele alındığından maliyet tasarrufu sağlamaktadır (Kumar vd., 2022)	Chodha vd., 2021; Kumar vd., 2022
R ₁₂	Çalışma ortamını iyileştirmesi	Çalışma ortamının iyileştirilmesi, çalışanların elverişsiz koşullardan ve sıkıcı görevlerden uzaklaştırılmasını ifade etmektedir (Bader ve Rahimifard, 2020)	Bader ve Rahimifard, 2020
R ₁₃	Üretim oranı	Bir robotun girdileri kullanarak yapabileceği maksimum üretim miktarını ifade etmektedir. İşletmelerin robotlardan beklentisi 7/24 kesintisiz üretim yapabilmeyi sağlamasıdır (Bader ve Rahimifard, 2020)	Bader ve Rahimifard, 2020
R ₁₄	Verimlilik	Robotun, süreçleri optimize edilmesini sağlayarak verimliliği arttırmasıdır (Bader ve Rahimifard, 2020)	Bader ve Rahimifard, 2020
R ₁₅	Ürün kalitesi	Robotun görevini hatasız yerine getirerek kalitesi yüksek ürünler meydana getirebilmesidir. Robotlar daha verimli süreç kontrolüyle görevi doğru yürütmeyi sağlamaktadırlar (Bader ve Rahimifard, 2020)	Bader ve Rahimifard, 2020
R ₁₆	Satıcı Hizmet sözleşmesi	Satıcının satış sonrası tamir, bakım vb. hizmetleri üstlenmesidir (Nasrollahi vd., 2020)	Chu ve Lin, 2003; Ghorabae vd., 2016; Gitinavard vd., 2016; Nasrollahi vd., 2020
R ₁₇	Hacim	Robotun kapladığı alandır.	Bader ve Rahimifard, 2020
R ₁₈	Mekanik ağırlık	Robotun mevcut ağırlığıdır.	Chodha vd., 2021; Kumar vd., 2022
R ₁₉	Yatırım maliyeti	Bir işletmenin demirbaş veya kalıcı malzemelere yatırım kararı sonucunda kullanılan finansal kaynakların toplam maliyetidir.	Chu ve Lin, 2003; Bader ve Rahimifard, 2020

Kriterler belirlendikten sonra amaca yönelik karar hiyerarşisi oluşturulmuştur. Karar hiyerarşisinde 19 adet kriter/ölçüt ve üç adet alternatif yer almaktadır. İşletme üç adet robotun değerlendirilmesini istemiştir. Bu karar hiyerarşisi Şekil 1'deki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 1: Belirlenen Ölçütlerin Karar Hiyerarşisi

Analiz ve bulgular

SWARA yöntemi kullanılarak, belirlenen kriterler, bir grup karar verici (KV1, KV2 ve KV3) tarafından birbirlerinden bağımsız olarak eşitlik 1 ve 2'den yararlanarak sıralanmıştır. Görüşme neticesinde karar vericilerin yapmış oldukları sıralamalar aşağıda yer alan Tablo 5'teki gibidir.

Tablo 5: Karar Vericilerin Genel Sıralamaları ve Geometrik Ortalaması

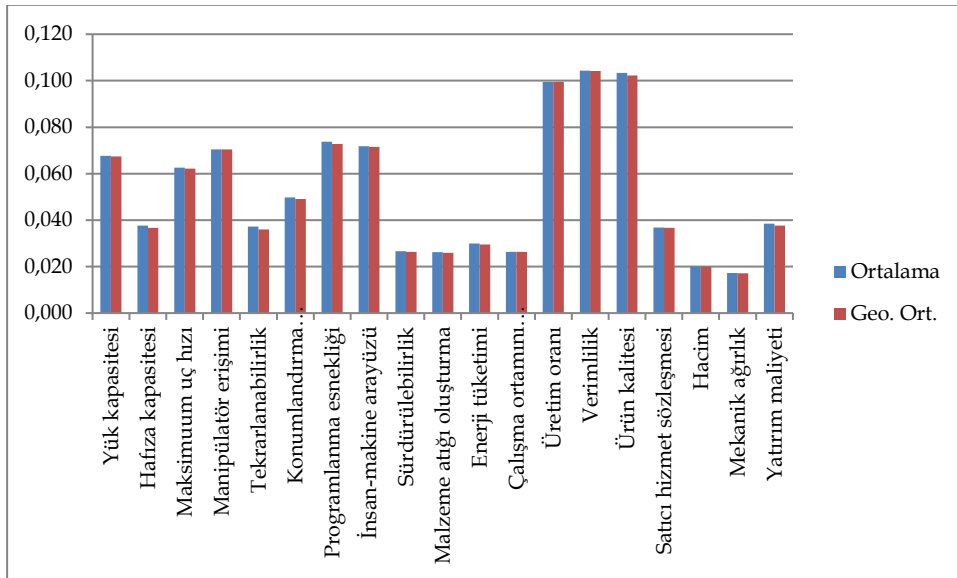
Kriter Kodu		KV1	KV2	KV3	G.O.
R ₁	Yük kapasitesi	7	4	7	5,809
R ₂	Hafıza kapasitesi	11	16	9	11,657
R ₃	Maksimum uç hızı	8	5	8	6,840
R ₄	Manipülâtör erişimi	6	6	6	6,000
R ₅	Tekrarlanabilirlik	10	17	10	11,935
R ₆	Konumlandırma doğruluğu	9	9	11	9,623
R ₇	Programlanma esnekliği	4	8	4	5,040
R ₈	İnsan-makine arayüzü	5	7	5	5,593
R ₉	Sürdürülebilirlik	15	14	16	14,978
R ₁₀	Malzeme atığı oluşturma	16	13	17	15,235
R ₁₁	Enerji tüketimi	14	12	15	13,608
R ₁₂	Çalışma ortamını iyileştirmesi	17	15	14	15,283
R ₁₃	Üretim oranı	1	2	3	1,817
R ₁₄	Verimlilik	2	1	2	1,587
R ₁₅	Ürün kalitesi	3	3	1	2,080
R ₁₆	Satıcı hizmet sözleşmesi	12	11	12	11,657
R ₁₇	Hacim	18	18	18	18,000
R ₁₈	Mekanik ağırlık	19	19	19	19,000
R ₁₉	Yatırım maliyeti	13	10	13	11,911

Elde edilen bu veriler her bir karar verici için ayrı ayrı analiz edilerek hesaplanmıştır. Daha sonra ortalamaları alınarak (eşitlik 3) karar vericilerin genel değerlendirme sonuçları elde edilmiştir. Bu değerlendirme sonucu kriter ağırlıkları Tablo 6'daki gibidir.

Tablo 6: Ölçütlerin Genel Ağırlıkları

Kriter Kodu	Faydalar	Ortalama	Geo. Ort.
R ₁	Yük kapasitesi	0,068	0,067
R ₂	Hafıza kapasitesi	0,038	0,037
R ₃	Maksimum uç hızı	0,063	0,062
R ₄	Manipülör erişimi	0,070	0,070
R ₅	Tekrarlanabilirlik	0,037	0,036
R ₆	Konumlandırma doğruluğu	0,050	0,049
R ₇	Programlanma esnekliği	0,074	0,073
R ₈	İnsan-makine arayüzü	0,072	0,072
R ₉	Sürdürülebilirlik	0,027	0,026
R ₁₀	Malzeme atığı oluşturma	0,026	0,026
R ₁₁	Enerji tüketimi	0,030	0,029
R ₁₂	Çalışma ortamını iyileştirmesi	0,026	0,026
R ₁₃	Üretim oranı	0,099	0,099
R ₁₄	Verimlilik	0,104	0,104
R ₁₅	Ürün kalitesi	0,103	0,102
R ₁₆	Satıcı hizmet sözleşmesi	0,037	0,037
R ₁₇	Hacim	0,020	0,020
R ₁₈	Mekanik ağırlık	0,017	0,017
R ₁₉	Yatırım maliyeti	0,039	0,038

Ölçütlerin genel ağırlıkları Şekil 1’de grafiksel olarak gösterilmiştir. Buna göre ağırlığı en yüksek olan kriterler sırasıyla verimlilik (0,104), ürün kalitesi (0,102) ve üretim oranı (0,99)’dir. Bu üç kriterin ağırlıkları arasındaki fark çok azdır.



Şekil 2: Ölçütlerin Genel Ağırlıkları Grafiği

Ölçütler arasında ağırlık puanı en düşük olanlar sırasıyla mekanik ağırlık (0,017) ve hacim (0,020)’dir. Bu kriterleri takip eden en düşük puanlı kriterler ise 0,026 eşit puanla çalışma ortamını iyileştirmesi, malzeme atığı oluşturma ve sürdürülebilirliktir. Buna göre bu işletme için robot seçiminde en önemli ölçütler robotun verimliliği, üretim oranı ve ürettiği ürünün kalitesidir. Arica işletme için robotun mekanik ağırlığı ve hacmi robot seçiminde dikkate alınacak en son ölçüttür.

İşletme için sürdürülebilirlik, enerji tüketimi ve malzeme atığı oluşturma kriterleri mekanik ağırlık ve hacim ölçütlerinden sonra sıralamada en sonda yer almışlardır. Enerji tüketimi ve malzeme atığı

oluşturma kriterlerinin de sürdürülebilirliğe hizmet ettiğini düşündüğümüzde işletme için sürdürülebilirlik uygulamalarını ikinci planda tuttuğu yorumu yapılabilir. Ancak işletme bu durumu kabul etmemiş ve akıllı robotların hepsinin modern dünyada sürdürülebilirliğe hizmet eden yapılar olduğunu ifade etmiştir. Bu nedenle sürdürülebilirlik faktörleri açısından akıllı robotların hemen hemen eşit olduklarını düşünmektedirler. Dolayısıyla kıyaslama yapılırken robotlar arasında bu kriterlerden daha önemli farklılıklar yaratan diğer kriterleri baz aldıkları söylenebilir.

SWARA yöntemiyle elde edilen ağırlıklar daha sonra bulanık TOPSIS'te kullanılarak alternatifler arasından robot seçim önerisi yapılmıştır. Bulanık TOPSIS ölçeği hazırlanmış ve aynı grup karar vericilerle yüz yüze görüşme yapılmıştır. Yapılan görüşme için hazırlanan anket formu Tablo 3'te yer alan bulanık sayılarla oluşturulmuştur. Elde edilen veriler ve SWARA tekniği ile elde edilen ölçüt ağırlıkları entegre edilerek bulanık TOPSIS analizleri yapılmıştır. Buna göre bulanık TOPSIS başlangıç matrisi Tablo 7 aşağıdaki gibidir. Tablo 7 eşitlik 5 kullanılarak oluşturulmuştur.

Tablo 7: Bulanık TOPSIS Başlangıç Matrisi

	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈	R ₉	R ₁₀	R ₁₁	R ₁₂	R ₁₃	R ₁₄	R ₁₅	R ₁₆	R ₁₇	R ₁₈	R ₁₉
Ro	0,3;	0,5;	0,7;	0,9;	0,5;	0,5;	0,5;	0,5;	0,7;	0,7;	0,7;	0,7;	0,9;	0,7;	0,7;	0,7;	0,9;	0,9;	0,7;
bot	0,5;	0,7;	0,9;	1,1	0,7;	0,7;	0,7;	0,7;	0,9;	0,9;	0,9;	0,9;	1;1	0,9;	0,9;	0,9;	1;1	1;1	0,9;
A	0,7	0,9	1		0,9	0,9	0,9	0,9	1	1	1	1	1;1	1	1	1	1;1	1;1	1
Ro	0,5;	0,7;	0,5;	0,7;	0,7;	0,7;	0,9;	0,7;	0,5;	0,7;	0,7;	0,7;	0,7;	0,5;	0,9;	0,5;	0,7;	0,7;	0,7;
bot	0,7;	0,9;	0,7;	0,9;	0,9;	0,9;	1;1	0,9;	0,7;	0,9;	0,9;	0,9;	0,9;	0,7;	1;1	0,7;	0,9;	0,9;	0,9;
B	0,9	1	0,9	1	1	1		1	0,9	1	1	1	1	0,9	0,9	1	1	1	1
Ro	0,7;	0,3;	0,7;	0,5;	0,3;	0,1;	0,3;	0,3;	0,3;	0,5;	0,5;	0,5;	0,5;	0,3;	0,5;	0,7;	0,5;	0,5;	0,5;
bot	0,9;	0,5;	0,9;	0,7;	0,5;	0,3;	0,5;	0,5;	0,5;	0,7;	0,7;	0,7;	0,7;	0,5;	0,7;	0,9;	0,7;	0,7;	0,7;
C	1	0,7	1	0,9	0,7	0,5	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,9	1	0,9	0,9	0,9
Ma																			
x/																			
Mi	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5
n																			

Bulanık ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisi eşitlik 6 ve 7 kullanılarak oluşturulmuştur. Bu matris Tablo 8'de yer almaktadır.

Tablo 8: Bulanık Ağırlıklı Normalize Edilmiş Karar Matrisi

	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈	R ₉	R ₁₀	R ₁₁	R ₁₂	R ₁₃	R ₁₄	R ₁₅	R ₁₆	R ₁₇	R ₁₈	R ₁₉
R	3,33	2,00	1,43	0,90	0,50	0,50	0,50	0,50	0,70	1,40	1,40	0,70	0,90	0,70	0,70	0,70	1,80	1,80	1,40
O	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;
B	2,00	1,43	1,11	1,00	0,70	0,70	0,70	0,70	0,90	1,80	1,80	0,90	1,00	0,90	0,90	0,90	2,00	2,00	1,80
O	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;
T	1,43	1,11	1,00	1,00	0,90	0,90	0,90	0,90	1,00	2,00	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00	2,00
A																			
R	2,00	1,43	2,00	0,70	0,70	0,70	0,90	0,70	0,50	1,40	1,40	0,70	0,70	0,50	0,90	0,50	1,40	1,40	1,40
O	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;
B	1,43	1,11	1,43	0,90	0,90	0,90	1,00	0,90	0,70	1,80	1,80	0,90	0,90	0,70	1,00	0,70	1,80	1,80	1,80
O	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;
T	1,11	1,00	1,11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	2,00	2,00	1,00	1,00	0,90	1,00	0,90	2,00	2,00	2,00
B																			
R	1,43	3,33	1,43	0,50	0,30	0,10	0,30	0,30	0,30	1,00	1,00	0,50	0,50	0,30	0,50	0,70	1,00	1,00	1,00
O	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;
B	1,11	2,00	1,11	0,70	0,50	0,30	0,50	0,50	0,50	1,40	1,40	0,70	0,70	0,50	0,70	0,90	1,40	1,40	1,40
O	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;
T	1,00	1,43	1,00	0,90	0,70	0,50	0,70	0,70	0,70	1,80	1,80	0,90	0,90	0,70	0,90	1,00	1,80	1,80	1,80
C																			

Bulanık başlangıç karar matrisi oluşturulup normalize edildikten sonra bulanık pozitif ideal çözüm noktası ve bulanık negatif ideal çözüm noktasına olan mesafeler eşitlik 8 kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen matris Tablo 9'daki gibidir.

Tablo 9: Bulanık Ağırlıklı Karar Matrisi

	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈	R ₉	R ₁₀	R ₁₁	R ₁₂	R ₁₃	R ₁₄	R ₁₅	R ₁₆	R ₁₇	R ₁₈	R ₁₉
R	0,23	0,08	0,09	0,06	0,02	0,02	0,04	0,04	0,02	0,04	0,04	0,02	0,09	0,07	0,07;	0,03	0,04	0,03	0,05
O	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	0,09;	;	;	;	;
B	0,14	0,05	0,07	0,07	0,03	0,03	0,05	0,05	0,02	0,05	0,05	0,02	0,10	0,09	0,01	0,03	0,04	0,03	0,07
O	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	0,1	;	0	;	;	;	;
T	0,10	0,04	0,06	0,07	0,03	0,04	0,07	0,06	0,03	0,05	0,06	0,03	0	0,10	;	0,04	0,04	0,03	0,08
A																			
R	0,14	0,05	0,13	0,05	0,03	0,03	0,07	0,05	0,01	0,04	0,04	0,02	0,07	0,05	0,09;	0,02	0,03	0,02	0,05
O	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	0,10;	;	;	;	;
B	0,10	0,04	0,09	0,06	0,03	0,04	0,07	0,06	0,02	0,05	0,05	0,02	0,09	0,07	0,10	0,03	0,04	0,03	0,07
O	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	0,	;	;	;	;	;	;
T	0,08	0,04	0,07	0,07	0,04	0,05	0,07	0,07	0,02	0,05	0,06	0,03	10	0,09	;	0,03	0,04	0,03	0,08
B																			
R	0,10	0,13	0,09	0,04	0,01	0,00	0,02	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01	0,05	0,03	0,05;	0,03	0,02	0,02	0,04
O	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	0,07;	;	;	;	;
B	0,08	0,08	0,07	0,05	0,02	0,01	0,05	0,04	0,01	0,04	0,04	0,02	0,07	0,05	0,09	0,03	0,03	0,02	0,05
O	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;
T	0,08	0,05	0,06	0,06	0,03	0,02	0,05	0,05	0,02	0,05	0,05	0,03	0,09	0,07	;	0,04	0,04	0,03	0,07
C																			

Değerlendirme ölçütleri ayda cinsinden ideal A⁺ en iyi değerlerden oluşurken negatif ideal A⁻ en kötü değerlerden oluşmaktadır. Değerlendirme ölçütleri maliyet cinsinden ise bu durumda A⁺ ölçüt değerlerinin en küçüklerinden oluşurken, A⁻ en büyük değerlerinden oluşmaktadır. Bu durumda Tablo 10 elde edilmiştir.

Tablo 10: İdeal ve Negatif İdeal Çözüm Kümesi

	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈	R ₉	R ₁₀	R ₁₁	R ₁₂	R ₁₃	R ₁₄	R ₁₅	R ₁₆	R ₁₇	R ₁₈	R ₁₉
A⁺	0,226;	0,12	0,12	0,06	0,02	0,03	0,06	0,05	0,01	0,02	0,03	0,01	0,09	0,07	0,09	0,02	0,02	0,01	0,03
A⁺	0,135;	6;	5;	3;	6;	5;	6;	0;	9;	6;	0;	8;	0;	3;	3;	6;	0;	7;	9;
A⁺	0,097	0,07	0,08	0,07	0,03	0,04	0,07	0,06	0,02	0,03	0,04	0,02	0,09	0,09	0,10	0,03	0,02	0,02	0,05
A⁺		5;	9;	0;	4;	5;	4;	5;	4;	7;	0;	2;	4;	9;	4;	3;	3;	8;	4;
A⁺		0,05	0,07	0,07	0,03	0,05	0,07	0,03	0,02	0,03	0,05	0,02	0,09	0,10	0,10	0,03	0,03	0,03	0,06
A⁺		4	0	0	7	0	4	6	7	4	6	9	4	3	7	6	1	9	
A⁻	0,09	0,05	0,08	0,03	0,01	0,00	0,02	0,02	0,00	0,03	0,04	0,01	0,05	0,03	0,05	0,01	0,03	0,03	0,05
A⁻	7;	4;	9;	5;	1;	5;	2;	2;	8;	7;	2;	3;	0;	1;	2;	8;	6;	1;	4;
A⁻	0,07	0,04	0,07	0,04	0,01	0,03	0,03	0,01	0,04	0,05	0,01	0,07	0,05	0,07	0,02	0,02	0,04	0,03	0,06
A⁻	5;	2;	0;	9;	9;	0,15;	7;	6;	3;	7;	4;	8;	0;	2;	2;	6;	0;	4;	9;
A⁻	0,06	0,03	0,06	0,06	0,02	0,02	0,05	0,05	0,01	0,05	0,06	0,02	0,09	0,07	0,09	0,03	0,04	0,03	0,07
A⁻	8	8	3	3	6	5	2	0	9	3	0	4	0	3	3	3	0	4	7

Bulanık yakınlık katsayıları eşitlik 11, 12, 13 kullanılarak belirlenmiştir. Analizler sonucu pozitif ideal ayırım ölçüleri Tablo 11 ve negatif ideal ayırım ölçüleri Tablo 12 elde edilmiştir. Bu iki tabloda durulaştırma işlemi yapılarak bulanık sayılardan arındırılmış hali elde edilmiştir.

Tablo 11: Pozitif İdeal Ayırım ölçüleri

	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈	R ₉	R ₁₀	R ₁₁	R ₁₂	R ₁₃	R ₁₄	R ₁₅	R ₁₆	R ₁₇	R ₁₈	R ₁₉
ROBOT	0,00	0,09	0,05	0,00	0,00	0,00	0,04	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
A	0	0	3	0	5	8	8	7	0	9	2	0	0	0	6	0	4	0	9
ROBOT	0,29	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
B	0	2	0	7	0	0	0	0	2	9	2	0	5	5	0	4	5	4	9
ROBOT	0,61	0,00	0,05	0,04	0,02	0,08	0,12	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00	0,08	0,15	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
C	7	0	3	3	0	2	9	4	0	0	0	2	7	5	3	0	0	0	0

Tablo 12: Negatif İdeal Ayırım Ölçüleri

	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈	R ₉	R ₁₀	R ₁₁	R ₁₂	R ₁₃	R ₁₄	R ₁₅	R ₁₆	R ₁₇	R ₁₈	R ₁₉
ROBOT	0,61	0,01	0,00	0,04	0,00	0,04	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,08	0,15	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
A	7	9	0	3	6	0	2	1	0	0	0	2	7	5	5	4	0	0	0
ROBOT	0,06	0,00	0,05	0,01	0,02	0,08	0,12	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,04	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
B	2	0	3	6	0	2	9	4	3	0	0	2	2	4	3	0	2	2	0
ROBOT	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
C	0	2	0	0	0	0	0	0	0	9	2	0	0	0	0	4	4	0	9

Analizlerin son adımında pozitif ve negatif ayırım ölçülerinin hesaplanması tamamlanarak belirli karar seçeneğine ait D_i^+ ve D_i^- hesaplanmış ve her bir seçenek için göreceli yakınlığı C_i^* (eşitlik 14) bulunmuştur. Ulaşılan değerler Tablo 13'te yer almaktadır.

Tablo 13: Alternatiflerin Sıralaması

	D_i^+		D_i^-		C_i^*		SIRALAMA
S_1^+	0,5479	S_1^-	1,0298	C_1^*	0,6527	S_1 (ROBOT A)	1
S_2^+	0,7713	S_2^-	0,7836	C_2^*	0,5040	S_2 (ROBOT B)	2
S_3^+	1,1686	S_3^-	0,5104	C_3^*	0,3040	S_3 (ROBOT C)	3

Tablo 13'e göre robot A 0,6527 en yüksek değer ile en uygun seçenek olarak ortaya çıkmıştır. Robot B 0,5040 ile ikinci sırada ve robot C 0,3040 ile üçüncü sırada yer almaktadır. Alternatifler arasında önemli derecede fark vardır. Bu nedenle ilgili işletmeye önem verdiği ölçütlere göre en uygun robot olarak robot A seçeneği önerilmiştir. Robot C'nin önemli bir farkla diğerlerinin geride kaldığı ifade edilmiştir. Ancak işletme robot C'nin yatırım maliyetinin diğerlerine oranla çok düşük olduğunu bu nedenle robot C'yi alternatif olarak değerlendirdiğini ifade etmiştir.

Sonuç ve tartışma

Dördüncü devrim olarak da bilinen endüstri 4.0, endüstrinin robotik, otomasyon, yapay zekâ (AI) ve daha pek çok teknolojiyle ilgileneceği yeni bir dönemdir. Dünya çapında endüstrilerde robotların benimsenmesi giderek artmaktadır. Hem robotların hem de insanın kendi güçlü yönleri ve sınırlamaları vardır. Güvenli bir şekilde birlikte çalışmak, daha kısa sürede yüksek doğrulukta daha kaliteli ürün sağlayacaktır. Endüstri 4.0 kapsamında gelişen akıllı robotların temel amacı, verimliliği artırmak, düşük fiyata yüksek kaliteli ürün üretmek ve müşteri beklentilerini karşılamaktır (Goel ve Gupta, 2019). Endüstriyel üretim, üreticilerin artan müşteri talebini karşılamasına ve küresel pazarda rekabet gücünü korumasına yardımcı olmak için sürekli olarak gelişmektedir. Robotik makineler artık çeşitli endüstriyel pazarlara girmektedir. Üretimdeki robotik uygulamalar, işletmeler için daha fazla koruma, kalite ve sürdürülebilirlik yaratmaktadır. Endüstri 4.0'ın gelişimiyle birlikte, robotik entegrasyon, güvenilirlik, hassasiyet, performans ve tehlikeli ortamlara karşı direnç dahil olmak üzere çeşitli nedenlerle imalat endüstrisi için faydalıdır. Daha etkin ve güvenilir bir üretim süreci sağlamaktadır. Sektördeki birçok üretim süreci, büyük bir hassasiyet ve hızla çalışan akıllı robotlar tarafından kolaylaştırılmıştır. Mevcut talep, düşük maliyetle düzenli ürün ayarlamalarına izin veren yüksek düzeyde uyarlanabilir sistemler gerektirmektedir. Böylece ilerleyen zamanlarda otomasyon, imalat sanayisine önemli kâr fırsatları getirecektir (Javaid vd., 2021).

Bu çalışmada, metal mutfak eşyası imalatı yapan büyük ölçekli bir işletmeye montaj için ihtiyaç duyduğu akıllı robot seçim probleminde çözüm önerisi sunmak amaçlanmıştır. Bu amaçla çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan SWARA ve bulanık TOPSIS yöntemleri entegre edilerek kullanılmıştır. SWARA tekniği ile ölçüt ağırlıkları belirlenmiştir. Buna göre bu işletme için akıllı robot seçiminde en önemli üç kriter sırasıyla; verimlilik, ürün kalitesi ve üretim oranıdır. Bununla birlikte önem sıralamasında en düşük puanı alan kriterler ise sırasıyla mekanik ağırlık ve hacimdir. İşletme akıllı robot yatırımıyla verimliliği ve üretim oranını arttırarak önemli bir getiri sağlayacağını düşünmektedir. Ayrıca üretimde hata oranını önemli ölçüde azaltarak ürün kalitesinde önemli bir iyileştirme yaratacağına inanmaktadır. İşletmede alan sıkıntısı olmadığından robotun mekanik ağırlığı ve hacminin öncelik içermediği görülmüştür.

SWARA tekniği ile elde edilen ölçüt ağırlıkları bulanık TOPSIS'e entegre edilerek alternatifler arasında sıralama yapılmıştır. Buna göre işletme için en uygun alternatifin robot A olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Karar vericilere göre Robot A ve Robot B'nin maksimum uç hızı ve konumlandırma doğruluğu eşit ancak robot A'nın ürün kalitesi daha yüksektir. Dolayısıyla işletmenin en çok önem verdiği ölçütler açısından beklentiyi en iyi karşılayacak robot A'dır. İşletme için sürdürülebilirlik, enerji tüketimi ve malzeme atığı oluşturma kriterleri mekanik ağırlık ve hacim ölçütlerinden sonra sıralamada en sonda yer almışlardır. İşletme sürdürülebilirlik faktörleri açısından akıllı robotların hemen hemen eşit olduklarını düşünmektedir. Dolayısıyla kıyaslama yapılırken robotlar arasında bu kriterlerden daha önemli farklılıklar yaratan diğer kriterleri dikkate aldıkları ifade edilebilir. Buna göre birçok ölçüt açısından robotların özellikleri birbirine çok yakınken bazı özelliklerde birbirlerinden önemli farklılıklar ortaya çıkmaktadır. İşletme bu çalışma neticesinde kullanılan ÇÇKV yöntemleriyle aslında bazı kriterlerin daha az önemli bazılarının ise daha çok önemli olduğunu ve bu kriterlerin önem

derecelerine göre değerlendirmeye tabi tutulduğunu grmstr. Bu nedenle de çalışmanın sonucuna güven duyarak bu yönde bir karar vermiştir.

Üretim, hizmet ve iletişimde yeni teknolojilerin kullanımı giderek artmaktadır. Endüstri 4.0, kurumsal verimliliği destekleyen dördüncü sanayi devrimidir. Akıllı robotlar, imalat alanında kapsamlı yetenekler sağlayan endüstri 4.0'ın önemli bir teknolojisidir. Bu teknoloji gelişmiş otomasyon sistemlerine sahiptir ve tekrarlayan işleri hassas ve daha düşük maliyetle yapmaktadır. Robotlar, mevcut işbirlikçi şemaların değerini korurken, kademeli olarak kaliteli ürünlerin üretilmesine öncülük etmektedir. Endüstri 4.0'ın birincil çıktısı, son derece gcl, güvenli ve uygun maliyetli olacak şekilde gelişmiş robotik, büyük veri, bulut bilişim, akıllı sensörler, nesnelerin interneti ve diğer ileri teknolojik gelişmelerin yardımıyla geliştirilen akıllı fabrikalardır. Böylece işletmeler, iş yerinin fiili iş üzerindeki güvenliğini ve güvenilirliğini artırarak ve maliyetlerden tasarruf ederek üretimlerini kitlesel uyum için geliştirebilmektedir. İşletme yatırım yapacağı robotla alternatifli üretim hatları kurarak üretim sürecindeki esnekliği arttırabilir. Bu da üretim planlamasında kolaylık sağlayarak verimlilik artışı ve maliyetlerin düşüşünde etkili olacaktır.

Literatürde konuyla ilgili yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Farklı KV yöntemleri kullanılarak işletmelere robot seçim önerisinde bulunulmuştur. Bunlar Chu ve Lin (2003) ve İ vd. (2021) yalnızca bulanık TOPSIS kullanmış, Bairagi vd. (2014) bulanık TOPSIS yöntemiyle bulanık AHP, bulanık VIKOR ve COPRAS yöntemlerini entegre etmiş, Shahrabi (2014) bulanık AHP ve bulanık TOPSIS yöntemini entegre etmiş, Parameshwaran vd. (2015) bulanık DELPHI, bulanık AHP, bulanık VIKOR ve bulanık TOPSIS yöntemlerini entegre etmiştir. Bu alışma diğerlerinden farklı olarak çok kriterli karar verme yöntemlerinden SWARA yöntemini bulanık TOPSIS ile entegre ederek robot seçim işlemini gerçekleştirmiştir. Ayrıca bu çalışmada diğerlerinden farklı olarak ilk kez bu kriterlerin hepsi birlikte değerlendirme ölçütü olarak kullanılmıştır.

Her çalışmada olduğu gibi bu çalışmanın da bazı kısıtları vardır. Birincisi alışma tek bir işletme probleminin çözümüne yönelik yapıldığından metal mutfak eşyası imalatında başka işletmeler için aynı kararın doğru olduğunu göstermez. İkincisi elde edilen veriler karar vericilerin değerlendirmesi sonucu elde edilmektedir. Bu açıdan değerlendirmeye katılan karar verici sayısı yine bu araştırmanın kısıtları arasındadır. Konuyla ilgili bundan sonra yapılacak çalışmalara diğer KV yöntemlerini entegre ederek kullanmaları önerilebilir. Ayrıca farklı sektörlerde benzer araştırmalar yapılabilir. Sadece robot seçim kriterleri açısından sektörler arasında bir kıyaslama yapılması da önerilebilir. Böylece robot seçim kriterlerinin sektörlere göre ne gibi farklılıklar yarattığı sonucuna ulaşılabilir.

Hakem Değerlendirmesi / Peer-review:

Dış bağımsız

Externally peer-reviewed

ıkar atışması / Conflict of interests:

Yazarlar çıkar atışması bildirmemiştir.

The authors have no conflict of interest to declare.

Finansal Destek / Grant Support:

Yazarlar bu çalışma için finansal destek almadığını beyan etmiştir.

The authors declared that this study has received no financial support.

Etik Kurul Onayı / Ethics Committee Approval:

Bu alışma için etik kurul onayı, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Sosyal ve Beşeri Bilimler Etik Kurulu/Komitesinden 05/06/2023 tarihli E.2016756 sayılı karar ile alınmıştır.

Ethics committee approval was received for this study from Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Social Sciences and Humanities Ethics Committee on 05/06/2023 and E.2016756 document number.

Yazar Katkıları / Author Contributions:

Fikir/Kavram/Tasarım - *Idea/Concept/ Design*: **M.B.E., A.K.** Veri Toplama ve/veya İşleme - *Data Collection and/or Processing*: **A.K.** Analiz ve/veya Yorum - *Analysis and/or Interpretation*: **M.B.E.** Kaynak Taraması - *Literature Review*: **M.B.E., A.K.** Makalenin Yazımı - *Writing the Article*: **M.B.E., A.K.** Eleştirel İnceleme - *Critical Review*: **M.B.E., A.K.**, Onay - *Approval*: **M.B.E., A.K.**

Kaynakça / References

- Agarwal, S., Chakraborty, S., Prasad, K., & Chakraborty, S. (2021). A rough multi-attributive border approximation area comparison approach for arc welding robot selection. *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*, 15(2). 169-180.
- Aliakbari Nouri, F., Khalili Esbouei, S., ve Antucheviciene, J. (2015). A hybrid MCDM approach based on fuzzy ANP and fuzzy TOPSIS for technology selection. *Informatica*, 26(3), 369-388.
- Alinezhad, A., Makui, A., Kiani Mavi, R., & Zohrehbandian, M. (2011). An MCDM-DEA approach for technology selection. *Journal of Industrial Engineering International*, 7(12), 32-38. 10.30495/JIEI.2022.1944196.1175
- Athawale, V. M., & Chakraborty, S. (2011). A comparative study on the ranking performance of some multi-criteria decision-making methods for industrial robot selection. *International journal of industrial engineering computations*, 2(4), 831-850. doi: 10.5267/j.ijiec.2011.05.002
- Bader, F., & Rahimifard, S. (2020). A methodology for the selection of industrial robots in food handling. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 64, 102379. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102379>
- Bao, H., & Shi, X. (2022). Robot selection using an integrated MAGDM model based on ELECTRE method and linguistic q-rung orthopair fuzzy information. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/1444486>
- Bhangale, P. P., Agrawal, V. P., & Saha, S. K. (2004). Attribute based specification, comparison and selection of a robot. *Mechanism and Machine Theory*, 39(12), 1345-1366. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2004.05.020>
- Bhattacharya, A., Sarkar, B., ve Mukherjee, S. K. (2005). Integrating AHP with QFD for robot selection under requirement perspective. *International journal of production research*, 43(17), 3671-3685. DOI: 10.1080/00207540500137217
- Bairagi, B., Dey, B., Sarkar, B., & Sanyal, S. (2014). Selection of robot for automated foundry operations using fuzzy multi-criteria decision making approaches. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 9(3), 221-232. <https://doi.org/10.1080/17509653.2014.880076>
- Braglia, M., & Petroni, A. (1999). Evaluating and selecting investments in industrial robots. *International Journal of Production Research*, 37(18), 4157-4178. <https://doi.org/10.1080/002075499189718>
- Chatterjee, P., Athawale, V. M., & Chakraborty, S. (2010). Selection of industrial robots using compromise ranking and outranking methods. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(5), 483-489. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2010.03.007>
- Chen, C. T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy sets and systems*, 114(1), 1-9. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(97\)00377-1](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(97)00377-1)
- Chodha, V., Dubey, R., Kumar, R., Singh, S., & Kaur, S. (2022). Selection of industrial arc welding robot with TOPSIS and Entropy MCDM techniques. *Materials Today: Proceedings*, 50, 709-715. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.487>
- Chu, T. C., & Lin, Y. C. (2003). A fuzzy TOPSIS method for robot selection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21, 284-290. <https://doi.org/10.1007/s001700300033>
- Costa, D. S., Mamede, H. S., & da Silva, M. M. (2023). A method for selecting processes for automation with AHP and TOPSIS. *Heliyon*, 9(3).
- Devi, K. (2011). Extension of VIKOR method in intuitionistic fuzzy environment for robot selection. *Expert Systems with Applications*, 38(11), 14163-14168. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.22>

- Evans, L., Lohse, N., ve Summers, M. (2013). A fuzzy-decision-tree approach for manufacturing technology selection exploiting experience-based information. *Expert systems with applications*, 40(16), 6412-6426. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.05.047>
- Ghorabae, M. K. (2016). Developing an MCDM method for robot selection with interval type-2 fuzzy sets. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 37, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.04.007>
- Gitinavard, H., Mousavi, S. M., Vahdani, B., & Siadat, A. (2016). A new distance-based decision model in interval-valued hesitant fuzzy setting for industrial selection problems. *Scientia Iranica*, 23(4), 1928-1940. 10.24200/SCI.2016.3938
- Goel, R., ve Gupta, P. (2020). Robotics and industry 4.0. a roadmap to industry 4.0: smart production, *Sharp Business and Sustainable Development*, 157-169. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14544-6_9
- Hamzeh, R., & Xu, X. (2019). Technology selection methods and applications in manufacturing: A review from 1990 to 2017. *Computers & Industrial Engineering*, 138, 106123. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106123>
- Huang, Z., Shen, Y., Li, J., Fey, M., ve Brecher, C. (2021). A survey on AI-driven digital twins in industry 4.0: Smart manufacturing and advanced robotics. *Sensors*, 21(19), 6340. <https://doi.org/10.3390/s21196340>
- Hwang, C. L., Yoon, K., Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Methods for multiple attribute decision making. *Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey*, 58-191. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3
- İç, Y. T., Yurdakul, M., Günyar, A., & Önel, H. (2017). Endüstriyel Robot Seçimi İçin Bir Karar Destek Sistemi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 15(2), 92-105.
- İç, Y., Atalay, K., & Yurdakul, M. (2021). Kararsız Bulanık TOPSIS Yöntemi ile Endüstriyel Robot Seçimi. Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri, Mehmet Kabak, Babek Erdebli (Ed.), *Bulanık çok kriterli karar verme yöntemleri*, Erişim adresi: <https://avesis.gazi.edu.tr/yayin/16cb160c-d7c6-4d1e-8198-0e30077d003c/bulanik-cok-kriterli-karar-verme-yontemleri>, Nobel, Ankara, 129-140.
- Jahanshahloo, G. R., Lotfi, F. H., & Izadikhah, M. (2006). Extension of the TOPSIS method for decision-making problems with fuzzy data. *Applied mathematics and computation*, 181(2), 1544-1551. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2006.02.057>
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. (2021). Substantial capabilities of robotics in enhancing industry 4.0 implementation. *Cognitive Robotics*, 1, 58-75. <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2021.06.001>
- Kao, C., & Liu, S. T. (2022). Group decision making in data envelopment analysis: A robot selection application. *European Journal of Operational Research*, 297(2), 592-599.
- Kahraman, C., Çevik, S., Ates, N. Y., ve Gülbay, M. (2007). Fuzzy multi-criteria evaluation of industrial robotic systems. *Computers & Industrial Engineering*, 52(4), 414-433. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.01.005>
- Karande, P., Zavadskas, E., & Chakraborty, S. (2016). A study on the ranking performance of some MCDM methods for industrial robot selection problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7(3), 399-422. DOI: 10.5267/j.ijiec.2016.1.001
- Karsak, E. E. (2008). Robot selection using an integrated approach based on quality function deployment and fuzzy regression. *International Journal of Production Research*, 46(3), 723-738. <https://doi.org/10.1080/00207540600919571>
- Keršuliene, V., Zavadskas, E. K., ve Turskis, Z. (2010). Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA). *Journal of business economics and management*, 11(2), 243-258. Doi:10.3846/jbem.2010.12
- Kumar, V., Kalita, K., Chatterjee, P., Zavadskas, E. K., & Chakraborty, S. (2022). A SWARA-CoCoSo-based approach for spray painting robot selection. *Informatica*, 33(1), 35-54. 10.15388/21-INFOR466
- Mondal, S., & Chakraborty, S. (2013). A solution to robot selection problems using data envelopment analysis. *International journal of industrial engineering computations*, 4(3), 355-372. doi: 10.5267/j.ijiec.2013.03.007
- Mondal, S., Kuila, S., Singh, A. K., & Chatterjee, P. (2017). A complex proportional assessment method-based framework for industrial robot selection problem. *Int J Res Sci Eng*, 3(2), 368-378.

- Narayanamoorthy, S., Geetha, S., Rakkiyappan, R., & Joo, Y. H. (2019). Interval-valued intuitionistic hesitant fuzzy entropy based VIKOR method for industrial robots selection. *Expert Systems with Applications*, 2019, 121: 28-37. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.12.015>
- Nasrollahi, M., Ramezani, J., & Sadraei, M. (2020). A FBWM-PROMETHEE approach for industrial robot selection. *Heliyon*, 6(5), e03859. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03859>
- Parameshwaran, R., Kumar, S. P., & Saravanakumar, K. (2015). An integrated fuzzy MCDM based approach for robot selection considering objective and subjective criteria. *Applied Soft Computing*, 26, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.09.025>
- Piippo, P., Torkkeli, M., & Tuominen, M. (1999, July). Use of GDSS for selection of technology: new integrated CAD-system for an entire company. In *PICMET'99: Portland International Conference on Management of Engineering and Technology. Proceedings Vol-1: Book of Summaries (IEEE Cat. No. 99CH36310)* 1(13), IEEE. 10.1109/PICMET.1999.807689
- Rashid, T., Beg, I., & Husnine, S. M. (2014). Robot selection by using generalized interval-valued fuzzy numbers with TOPSIS. *Applied Soft Computing*, 21, 462-468. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.04.002>
- Rao, R. V. (2007). Decision making in the manufacturing environment: using graph theory and fuzzy multiple attribute decision making methods (Vol. 2, p. 294). London: Springer.
- Sampathkumar, S., Augustin, F., Kaabar, M. K., & Yue, X. G. (2023). An integrated intuitionistic dense fuzzy Entropy-COPRAS-WASPAS approach for manufacturing robot selection. *Advances in Mechanical Engineering*, 15(3), 16878132231160265.
- Sen, D. K., Datta, S., & Mahapatra, S. S. (2016). Extension of PROMETHEE for robot selection decision making: Simultaneous exploration of objective data and subjective (fuzzy) data. *Benchmarking: An International Journal*. 4(2013), 355-372. <https://doi.org/10.1108/BIJ-08-2015-0081>
- Shahrabi, M. (2014). identification and selection of robot using FAHP and FTOPSIS hybrid model. *International Journal of Modern Engineering Sciences*, 3(1), 16-28.
- Shih, H. S. (2008). Incremental analysis for MCDM with an application to group TOPSIS. *European journal of operational research*, 186(2), 720-734. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.02.012>
- Şahin, M. (2020). A Hybrid Multi-criteria Decision Approach for Industrial Robot Selection. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 1-9. <https://doi.org/10.31590/ejosat.818275>
- Wang, Y. J., & Lee, H. S. (2007). Generalizing TOPSIS for fuzzy multiple-criteria group decision-making. *Computers & Mathematics with Applications*, 53(11), 1762-1772. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2006.08.037>
- Wu, H. Y., Tzeng, G. H., & Chen, Y. H. (2009). A fuzzy MCDM approach for evaluating banking performance based on Balanced Scorecard. *Expert systems with applications*, 36(6), 10135-10147. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.01.005>
- Zhou, F., Wang, X., & Goh, M. (2018). Fuzzy extended VIKOR-based mobile robot selection model for hospital pharmacy. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 15(4), <https://doi.org/10.1177/1729881418787315>