

Çalışan Üretim Performansı İçin Bulanık Mantık Modeli: Akademik ve Teknik Analiz

BÖLÜM 2: ÇALIŞAN PERFORMANSINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER ÜZERİNE LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, geliştirilen bulanık mantık modelinin temelini oluşturan girdi değişkenlerinin (İş Tecrübesi, Yaş, Cinsiyet) üretim performansı üzerindeki etkileri, akademik literatür ve teorik çerçeveler ışığında derinlemesine incelenecaktır. Modelin amacı, bu karmaşık ve genellikle doğrusal olmayan ilişkileri daha iyi anlamak ve modellemektir.

2.1 İş Tecrübesi, Öğrenme Eğrileri ve Performans İlişkisi

İş tecrübesi ile performans arasındaki ilişki, endüstri mühendisliği ve yönetim psikolojisi alanlarında en köklü araştırma konularından biridir. Literatür, tecrübe ile performans arasında güçlü bir pozitif korelasyon olduğunu tutarlı bir şekilde ortaya koymaktadır (Simüle_Kaynak_B28, 2021). Ancak bu ilişkinin doğası, basit bir doğrusal artıştan çok daha karmaşıktır.

Bu ilişkiyi açıklayan en temel teorik yapı, ilk olarak havacılık endüstrisinde T.P. Wright (1936) tarafından ortaya konan "Öğrenme Eğrisi" (Learning Curve) teorisidir. Teori, bir görevin kümülatif tekrar sayısı (örn. üretilen toplam birim) her iki katına çıktığında, o görevi tamamlamak için gereken doğrudan işçilik süresinin veya maliyetin sabit ve öngörülebilir bir oranda azaldığını varsayar (Simüle_Kaynak_B28, 2021; Simüle_Kaynak_B16, 2022).

Modelin çıktısı olan "parça sayısı" (verimlilik) açısından bu teori, bir çalışanın işe başladığı ilk dönemlerde (ilk aylar ve yıllar), performansında üstel (exponential) bir artış yaşandığını ima eder. Çalışan, görevin temel gerekliliklerini, kısa yolları ve verimli hareket kalıplarını hızla öğrenir

(Simüle_Kaynak_B16, 2022).

Bununla birlikte, öğrenme eğrisi sonsuza kadar aynı diklikte devam etmez. Akademik çalışmalar, tecrübe arttıkça öğrenme hızının logaritmik olarak yavaşladığını ve belirli bir süre sonra "performans platosu" (performance plateau) olarak bilinen bir durağan seviyeye ulaştığını göstermektedir (Simüle_Kaynak_B22, 2019). Genellikle aynı görevde 8-10 yıl veya daha fazla kıdemle ulaşıldığında, çalışan "uzman" (master) seviyesine erişir. Bu noktadan sonra, ek tecrübenin (örn. 12. yıl ile 13. yıl arasındaki fark) performans üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi kalmayabilir veya bu etki marginal düzeyde olur (Simüle_Kaynak_B22, 2019). Performans artık tecrübeden ziyade, iş süreçlerindeki değişimler, motivasyon veya fiziksel yorgunluk gibi dışsal faktörlere daha bağımlı hale gelir.

Bu belirgin doğrusal olmayan (non-linear) yapı, neden "Performans = $\beta_0 + \beta_1 * \text{Tecrübe}$ " gibi basit bir lineer regresyon modelinin bu ilişkiyi yakalamakta yetersiz kalacağını açıkça göstermektedir. Tecrübenin performansa olan etkisinin *hızlı, yavaşlayan* ve *durağan* olmak üzere üç farklı fazda seyretmesi, bu değişkenin "Az", "Orta" ve "Yüksek" gibi dilsel ifadelerle tanımlanmasını gerektirir. Bu durum, bu tür karmaşık ve non-lineer ilişkileri modellemek için bulanık mantık yaklaşımının teorik uygunluğunu güçlü bir şekilde desteklemektedir (Simüle_Kaynak_B28, 2021).

2.2 Yaş Faktörünün Üretim Performansına Ergonomik Etkileri

Yaş değişkeninin performans üzerindeki etkisi, sıklıkla sosyal stereotipler (örn. "yaşlı işçiler daha yavaştır") tarafından gölgelenen, ancak bilimsel verilerle incelendiğinde çok daha nüanslı olduğu anlaşılan bir konudur (Simüle_Kaynak_B29, 2020). Modelin bağlamı olan fiziksel üretim (parça sayısı), özellikle montaj hattı gibi tekrarlayan ve manuel efor gerektiren işlerde, çalışanın fizyolojik kapasitesi ile doğrudan ilişkilidir.

Ergonomi ve iş fizyolojisi literatürü, bu ilişkiyi nesnel verilerle ele almaktadır. Araştırmalar, maksimum aerobik kapasite ($VO_{2\max}$), kas gücü ve reaksiyon süresi gibi zirve fiziksel performans göstergelerinin genellikle 25-35 yaş aralığında zirve yaptığını belgelemektedir (Simüle_Kaynak_B17, 2022). 40-45 yaşlarından sonra, yaşa bağlı kas kütlesi kaybı (sarkopeni) ve diğer fizyolojik değişimler nedeniyle bu kapasitelerde kademeli bir azalma gözlemlenir (Simüle_Kaynak_B18, 2018). Bu durum, özellikle yüksek tempo, ani güç veya hızlı tekrarlayan hareket gerektiren işlerde, 45 yaş üstü çalışanların aynı iş yükü altında daha hızlı yorulabileceğini veya kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarını (Musculoskeletal Disorders - MSDs) açısından daha yüksek risk altında olabileceğini göstermektedir (Simüle_Kaynak_B29, 2020).

Yaşlanma ile birlikte artan bir diğer önemli faktör, kümülatif travma bozukluklarının (Cumulative Trauma Disorders - CTDs) görülme sıklığıdır. Yıllar boyunca aynı tekrarlayan hareketlerin

yapılması, özellikle ergonomik olmayan iş istasyonlarında, eklemeler ve yumuşak dokular üzerinde birikimli bir etki yaratır (Simüle_Kaynak_B18, 2018). Bu durum, doğrudan performans düşüşünden ziyade, artan hata oranları veya işe devamsızlık (iş görememezlik günleri) yoluyla dolaylı olarak "günlük parça sayısı" üzerinde olumsuz bir etki yaratabilir.

Ancak, yaşın tek başına bir belirleyici olarak ele alınması yaniltıcıdır. Literatürdeki en önemli bulgulardan biri, yaşın getirdiği fizyolojik dezavantajların, *tecrübenin* getirdiği avantajlarla telafi edilebilmesidir (Simüle_Kaynak_B24, 2022). Yaşa büyük (örn. 50 yaşında) bir çalışan, fiziksel kapasitedeki azalmayı; süreçleri daha iyi bilme, problem çözme yeteneği, daha az hata yapma (kalite artışı) ve daha istikrarlı bir çalışma temposu (daha az değişkenlik) ile dengeleyebilir.

Bu durum, yaşı değişkeninin modeldeki rolünün karmaşıklığını ortaya koymaktadır. Yaş, tek başına bir performans belirleyicisi değil, "Tecrübe" değişkeninin etkisini düzenleyen (modüle eden) bir faktördür. Örneğin, bulanık modelde "EĞER Yaş 'Yaşlı' VE Tecrübe 'Yüksek' İSE Performans 'Orta'" (istikrarlı üretim) gibi bir kural, "EĞER Yaş 'Yaşlı' VE Tecrübe 'Az' İSE Performans 'Düşük'" (yüksek risk, düşük adaptasyon) gibi bir kuraldan çok farklı bir sonuç üretecektir. Bulanık mantık, bu karmaşık ve çelişkili görünen etkileşimleri yönetmek için ideal bir araçtır (Simüle_Kaynak_B17, 2022).

2.3 Cinsiyet Değişkeninin Fiziksel İş Kapasitesi ve Antropometrik Açıdan Değerlendirilmesi

Cinsiyet değişkeni, bir performans modelinde kullanılırken en yüksek düzeyde bilimsel nesnellik ve dikkat gerektiren değişkendir. Bu değişkenin analizi, sosyal önyargılardan ve genellemelerden tamamen arındırılmalı; yalnızca nesnel ergonomi, iş fizyolojisi ve antropometri (insan vücudunun fiziksel ölçülerini) verilerine dayandırılmalıdır (Simüle_Kaynak_B30, 2023).

Bilimsel literatür, belirli fiziksel kapasiteler açısından cinsiyetler arasında istatistiksel (ortalama) farklılıklar olduğunu göstermektedir. Bu farklılıklar bireysel düzeyde geçersiz olabilir (örn. çok güçlü bir kadın veya zayıf bir erkek olabilir), ancak popülasyon düzeyinde iş tasarımları için önemlidir.

- Güç ve Manuel Taşıma:** En belirgin fark, kas gücündedir. Çok sayıda çalışma, erkeklerin ortalama olarak daha yüksek kas kütlesine, özellikle üst gövde gücüne (örn. kaldırma, itme) ve kavrama kuvetine sahip olduğunu belgelemektedir (Simüle_Kaynak_B30, 2023). Bu nesnel veri, ABD Ulusal İş Sağlığı ve Güvenliği Enstitüsü (NIOSH) gibi kurumların, manuel malzeme taşıma (kaldırma) görevleri için önerilen ağırlık limitlerini (Recommended Weight Limit - RWL) belirlerken cinsiyeti bir faktör olarak dikkate almasına yol açmıştır (Simüle_Kaynak_B20, 2019).
- Antropometri:** Uzunma mesafeleri, boy ve diğer vücut ölçülerindeki ortalama farklar, iş istasyonu tasarımını (örn. tezgah yüksekliği, parçaların konumu) doğrudan etkiler

- (Simüle_Kaynak_B20, 2019).
3. **İnce Motor Beceriler:** Bazı araştırmalar, el becerisi, hız veya hassas el-göz koordinasyonu gerektiren (örn. mikro-montaj) görevlerde kadınların ortalama olarak daha avantajlı olabileceğine işaret etse de, bu bulgular güç farklılıklarını kadar tutarlı veya evrensel değildir (Simüle_Kaynak_B19, 2021).

Bu değişkenin bir performans modeline dahil edilmesi, kritik bir gerçeği ortaya koyar: Modelin değerlendirdiği "parça sayısı" işi, muhtemelen *önemli bir fiziksel güç bileşeni* (ağır kaldırma, taşıma, yüksek tork uygulama) içermektedir.

Cinsiyet değişkeni (örn. 0=Kadın, 1=Erkek), bu modelde "performans yeteneğini" ölçen bir değişken değildir. Bunun yerine, "işin gerektirdiği fiziksel efor" ile "çalışanın ortalama antropometrik/fizyolojik kapasitesi" arasındaki *ergonomik uyum veya uyumsuzluk riskini* temsil eden bir *vekil (proxy)* değişkendir (Simüle_Kaynak_B19, 2021).

Eğer değerlendirilen iş, ergonomik olarak *mükemmel* tasarılanmışsa (örn. tüm ağır parçalar için yardımcı kaldırıcılar kullanılıyorsa, istasyonlar herkesin boyuna göre ayarlanabiliyorsa), cinsiyet değişkeninin performans (parça sayısı) üzerinde istatistiksel olarak *anlamsız* bir etkiye sahip olması beklenir. Bu değişkenin modelde anlamlı bir faktör olarak yer alması, mevcut iş tasarıminının evrensel (herkese uygun) olmadığını, belirli antropometrik özelliklere sahip çalışanları (ortalama olarak) dezavantajlı duruma düşürebileceğini ve bunun da "parça sayısı" çıktısına yansığını göstermektedir (Simüle_Kaynak_B30, 2023).

BÖLÜM 3.1: BULANIK KÜME PARAMETRELERİ İÇİN AKADEMİK VE ENDÜSTRİYEL GEREKÇELENDİRME

Bulanık mantık modelinin geçerliliği ve doğruluğu, uzman bilgisine ve literatüre dayalı olarak tanımlanan dilsel değişkenlerin (örn. 'Az', 'Orta') sayısal aralıklarına (üyelik fonksiyonlarına) kritik düzeyde bağlıdır. Bu bölümde, modelde kullanılan girdi ve çıktı küme sınırlarının akademik ve endüstriyel standartlara dayalı gereklilikleri sunulmaktadır.

3.1.1 Giriş Değişkeni: 'İş Tecrübesi' (Yıl) Kümelerinin Tanımlanması

- **Seçilen Kümeler:** Az (0–5 Yıl), Orta (5–15 Yıl), Yüksek (10–30+ Yıl)

'Az Tecrübeli' (0-5 Yıl) Aralığının Gerekçesi:

Bu aralık, İnsan Kaynakları (İK) yönetimi ve endüstriyel psikoloji literatüründe "kariyerin

başlangıcı", "oryantasyon" veya "çıraklık" dönemi olarak yaygın bir şekilde kabul edilen periyottur (Simüle_Kaynak_B31, 2022). Bölüm 2.1'de tartışılan Öğrenme Eğrisi teorisi (Simüle_Kaynak_B16, 2022) bağlamında, 0-5 yıllık dönem, performans artışının en hızlı (en dik eğimli) olduğu "hızlı öğrenme" fazına karşılık gelir. Çalışan bu dönemde temel yetkinlikleri kazanır.

'Orta Tecrübeli' (5-15 Yıl) Aralığının Gerekçesi:

Endüstriyel uygulamalarda, bir çalışanın "junior" (acemi) seviyeden "mid-level" (orta düzey) veya "senior" (kıdemli) statüsüne geçişi genellikle 5 yıl civarında gerçekleşir (Simüle_Kaynak_B31, 2022). Bu 5-15 yıllık aralık, çalışanın artık görevinde "tam yetkin" (proficient) olduğu, öğrenme eğrisinin yavaşlamaya başladığı ancak hala tecrübe kazandıkça performansın arttığı "yetkinlikten uzmanlığa" geçiş dönemini temsil eder (Simüle_Kaynak_B22, 2019).

'Yüksek Tecrübeli' (10-30+ Yıl) Aralığının Gerekçesi:

Literatür, aynı veya benzer bir görevde 10 yıl ve üzeri tecrübenin "kıdemli uzman" (senior expert) veya "usta" (master) seviyesi ile ilişkilendirildiğini göstermektedir (Simüle_Kaynak_B22, 2019). Bu aralık, Bölüm 2.1'de belirtilen "performans platosuna" ulaşıldığı, yani ek tecrübenin performans üzerinde artık marjinal bir etki yarattığı dönemi tanımlar.

Parametre Seçiminin Analizi (Örtüşme):

Bu parametrelerin seçiminde 'Orta' (5-15) ve 'Yüksek' (10-30+) kümeler arasında bilinçli bir örtüşme (overlap) (10-15 yıl aralığı) bırakılmıştır. Bu bir modelleme hatası değil, bulanık mantığın temel gücüdür. Geleneksel (keskin) mantıkta 12 yıllık bir çalışan %100 "Yüksek" olarak etiketlenmek zorunda kalabilir. Bulanık mantıkta ise 12 yıllık bir çalışan, bu parametreler sayesinde, örneğin %30 'Orta' ve %70 'Yüksek' kümeye aynı anda ait olabilir. Bu, uzmanlığa geçişin keskin bir çizgi olmadığını, bir süreç olduğunu kabul eden daha gerçekçi ve "yumuşak" bir modelleme sağlar (Simüle_Kaynak_B31, 2022).

3.1.2 Giriş Değişkeni: 'Yaş' (Yıl) Kümelerinin Tanımlanması

- **Seçilen Kümeler:** Genç (18–35 Yıl), Orta (30–50 Yıl), Yaşlı (45–60 Yıl)

'Genç İşçi' (18-35 Yıl) Aralığının Gerekçesi:

Bu aralık, Bölüm 2.2'de tartışıldığı gibi, ergonomi ve iş fizyolojisi literatüründe fiziksel performansın (kas gücü, aerobik kapasite, dayanıklılık) zirvede olduğu (prime physical capacity) dönemi tanımlar (Simüle_Kaynak_B17, 2022). İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) mevzuatı "Genç İşçi" tanımını (örn. 18-25 yaş) yasal korumalar için kullanısa da, 18-35 aralığı, endüstriyel performans açısından tam fiziksel kapasite dönemini temsil etmek için daha yaygın bir ergonomik sınıflandırmadır (Simüle_Kaynak_B32, 2020).

'Yaşlı İşçi' (45-60 Yıl) Aralığının Gerekçesi:

Bu aralık, "Yaşlanan İş Gücü" (Aging Workforce) kavramıyla ilgili akademik ve İSG literatürü ile tam uyumludur (Simüle_Kaynak_B24, 2022). Birçok ergonomik risk değerlendirme çalışması, 45 veya 50 yaşını, özellikle fiziksel işlerde kümülatif travma bozuklukları (CTDs) riskinin belirgin

şekilde arttığı ve ergonomik müdahalelerin kritik hale geldiği bir eşik olarak kabul eder (Simüle_Kaynak_B32, 2020; Simüle_Kaynak_B18, 2018).

'Orta Yaşlı İşçi' (30-50 Yıl) Aralığının Gerekçesi:

Bu küme, hem 'Genç' (30-35 örtüşmesi) hem de 'Yaşlı' (45-50 örtüşmesi) kümeleriyle örtüşerek kritik bir "geçiş" (transition) bölgesi yaratır. Bu aralık, fizyolojik kapasitenin zirveden yavaşça azalmaya başladığı ve aynı zamanda tecrübeinin (Bölüm 3.1.1) "Orta" ve "Yüksek" seviyeye ulaştığı dönemi mükemmel bir şekilde kapsar.

Parametre Seçiminin Analizi (Fizyolojik Eşikler):

Tecrübe aralıklarında olduğu gibi, yaş aralıklarındaki örtüşmeler de (30-50 ve 45-60) modelin gerçekçiliğini artırır. Bu aralıklar sosyal kategorilere değil, fizyolojik risk eşiklerine dayanmaktadır. Model, 47 yaşındaki bir çalışanı %100 "Orta" veya %100 "Yaşlı" olarak etiketlemez; bunun yerine onu kademeli olarak "Yaşlı" kategorisine dahil eder. Bu yumuşak geçiş, yaşa bağlı fizyolojik değişimlerin de ani değil, kademeli olması gereğince uyumludur (Simüle_Kaynak_B32, 2020).

3.1.3 Çıktı Değişkeni: 'Parça Sayısı' (Adet) Kümelerinin Vaka Analizi ile Desteklenmesi

- **Seçilen Kümeler:** Düşük (0–100 Adet), Orta (50–350 Adet), Yüksek (300–500+ Adet)

Gerekçelendirme Yöntemi:

Parça sayısı aralıkları, evrensel akademik standartlara değil, modelin uygulandığı spesifik endüstriyel bağlama (örn. sektör, fabrika, üretilen parça, vardiya süresi) bağlıdır. Bu nedenle, bu parametreleri gerekçelendirmenin en doğru yolu, benzer bir üretim ortamını inceleyen bir vaka çalışmasına (case study) veya endüstriyel bir rapora atıf yapmaktır.

Referans Vaka Analizi:

(Simüle_Kaynak_B33, 2021) tarafından yapılan bir vaka çalışması, bir otomotiv yan sanayi firmasının manuel montaj hattında 8 saatlik vardiya başına günlük üretim adetlerini incelemiştir. Bu çalışmada bulgular, seçilen aralıklar için güçlü bir gerekçe sunmaktadır:

- **'Düşük Performans' (0-100 Adet/Gün) Gerekçesi:** Bu vaka çalışmasında, günlük 100 adetin altındaki üretimler, "eğitim ihtiyacı" (yeni işe başlayanlar), "ciddi üretim yavaşlaması" veya "anormal durum" (örn. malzeme eksikliği, arıza) olarak tanımlanmıştır (Simüle_Kaynak_B33, 2021). Dolayısıyla bu aralık, "eğitim seviyesi" veya "kabul edilemez" performans seviyesini temsil eder.
- **'Orta Performans' (50-350 Adet/Gün) Gerekçesi:** (Simüle_Kaynak_B33, 2021) çalışmasında, hattın ortalama (norm) üretiminin yaklaşık 280-300 adet/gün olduğu belirtilmiştir. (Simüle_Kaynak_B26, 2019) ise benzer bir sektörde günlük üretimde standart sapmanın 50-70 adet civarında olduğunu raporlamıştır. Seçilen 50-350 aralığı, "düşük-normal" (eğitimden yeni çıkış) seviyeden "yüksek-normal" (tam yetkin) seviyeye kadar olan geniş "kabul edilebilir çalışma aralığını" kapsamaktadır.
- **'Yüksek Performans' (300-500+ Adet/Gün) Gerekçesi:** 300 adet ve üzeri,

(Simüle_Kaynak_B33, 2021) çalışmasındaki "norm" seviyenin üzerinde, yüksek tecrübeli ve motive çalışanların (uzmanlar) ulaştığı "yüksek performans" veya "teşvik/prim" seviyesini temsil eder. 500+ adet ise, olası maksimum (teorik) kapasiteyi veya istisnai performansı gösterir.

Parametre Seçiminin Analizi (Model Stabilitesi):

Çıktı kümelerinde de geniş örtüşme alanları (50-100 ve 300-350) mevcuttur. Bu, modelin kararlılığını (stability) ve sürekliliğini (continuity) sağlayan kritik bir tasarım seçimidir. Eğer kümeler arasında boşluk veya çok az örtüşme olsaydı, girdi değişkenlerindeki çok küçük bir değişiklik (örn. tecrübe 1 yıl artması), çıktıda ani ve büyük bir sıçramaya (örn. 150 parçadan 250 parçaya atlama) neden olabilirdi. Geniş örtüşme, çıktı yüzeyini "pürüzsüz" (smooth) hale getirir ve modelin küçük girdi değişimlerine orantılı ve makul tepkiler vermesini sağlar (Simüle_Kaynak_B33, 2021).

BÖLÜM 5: DURULAMA (DEFUZZIFICATION) YÖNTEMLERİNİN TEORİK ANALİZİ VE KARŞILAŞTIRMASI

Durulama (defuzzification), bulanık çıkarım sürecinin (Fuzzy Inference System - FIS) son ve en kritik adımlarından biridir. Bu adım, önceki aşamalarda (bulanıklaştırma, kural değerlendirme ve birleştirme) elde edilen bulanık çıktı kümesini (genellikle karmaşık bir geometrik şekil) alır ve onu, gerçek dünyada bir karar veya tahmin olarak kullanılabilen net (crisp) bir sayısal değere (örn. "284 parça") dönüştürür. Bu bölümde, en yaygın kullanılan iki yöntem olan Ağırlık Merkezi (Center of Gravity - COG) ve Alan Merkezi (Center of Area - COA) teorik olarak karşılaştırılacaktır.

5.1 Ağırlık Merkezi Yöntemi (Center of Gravity - COG / Centroid)

Teorik Tanım:

Ağırlık Merkezi (COG), veya Centroid yöntemi, bulanık mantık uygulamalarında en yaygın kullanılan, en sezgisel ve genellikle en güvenilir durulama teknigidir (Simüle_Kaynak_B27, 2023). Adını fizikteki "kütle merkezi" kavramından alır. Geometrik olarak, birleştirilmiş (aggregated) nihai çıktı üyelik fonksiyonunun (örn. 'Düşük', 'Orta' ve 'Yüksek' performans kümelerinin birleşimi olan şekil) altındaki alanın geometrik merkezini (denge noktasını) bulur.

Hesaplama Prensibi:

COG, çıktı evrenindeki (örn. 0'dan 500'e kadar olan parça sayısı ekseni) her bir noktanın

ağırlıklı ortalamasını alır. Bu hesaplamada, her bir z noktasının (parça sayısı) "ağırlığı", o noktanın birleştirilmiş çıktı kümesindeki üyelik derecesidir ($\mu(z)$ - yükseklik) (Simüle_Kaynak_B38, 2017).

Formülasyon (Sürekli Evren için):

Net çıktı değeri ($\$z_{COG}$), alanın momentinin toplam alana bölünmesiyle bulunur:

$$\$z_{COG} = \frac{\int \mu_C(z) \cdot z \, dz}{\int \mu_C(z) \, dz}$$

Burada $\$z$ çıktı değişkeni (parça sayısı), $\mu_C(z)$ ise $\$z$ 'nin birleştirilmiş çıktı kümesindeki üyelik derecesidir (yükseklik). Payda, birleştirilmiş şeklin toplam alanını; pay ise o alanın birinci momentini (ağırlıklı toplamını) temsil eder (Simüle_Kaynak_B34, 2021).

5.2 Alan Merkezi Yöntemi (Center of Area - COA / Bisector of Area - BOA)

Teorik Tanım:

Alan Merkezi (COA), genellikle Alan İkibölümleyicisi (Bisector of Area - BOA) olarak da adlandırılan ve COG ile sıkça karıştırılan ancak temelde farklı bir mantıga dayanan bir yöntemdir (Simüle_Kaynak_B27, 2023). COA/BOA, birleştirilmiş çıktı şeklinin toplam alanını iki eşit parçaya bölen dikey çizginin $\$z$ -eksenindeki (parça sayısı) değerini bulmayı amaçlar.

Hesaplama Prensibi:

Bu yöntem, istatistikteki "medyan" kavramına benzer. Şeklin "ağırlığını" (yani üyelik derecesinin yüksekliğini) COG kadar dikkate almaz; yalnızca toplam alanın geometrik olarak nerede ikiye bölündüğüne odaklanır.

Formülasyon (Sürekli Evren için):

$\$z_{COA}$ değeri, aşağıdaki eşitliği sağlayan değerdir:

$$\$ \int_a^{z_{COA}} \mu_C(z) \, dz = \int_{z_{COA}}^b \mu_C(z) \, dz$$

Burada $[a, b]$ çıktı evrenidir ve $\$z_{COA}$, toplam alanı (a 'dan b 'ye kadar olan integral) iki eşit yarı-alana bölen $\$z$ değeridir (Simüle_Kaynak_B38, 2017).

5.3 COG ve COA Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

Bu iki yöntemin seçimi, modelin nihai sonucunu, özellikle karmaşık ve asimetrik kural etkileşimlerinde önemli ölçüde değiştirebilir.

Temel Hesaplama Farkı:

Ana fark, ağırlıklandırmadadır.

- **COG (Ağırlık Merkezi):** Ateşlenen kuralların *yüksekliğine* (ateşleme derecesi, α -kesmesi) son derece duyarlıdır. Yüksek üyelik derecesine (örn. $\mu = 0.9$$) sahip bir bölge, düşük üyelik derecesine (örn. $\mu = 0.1$$) sahip bir bölgeye göre nihai sonucu (denge noktasını) kendi tarafına doğru çok *daha fazla* çeker. (Simüle_Kaynak_B27, 2023).
- **COA (Alan Merkezi):** Kural yüksekliklerine (ateşleme derecelerine) *dolaylı* olarak duyarlıdır (çünkü yükseklik alanı etkiler), ancak asıl odaklandığı şey toplam alanın ikiye bölünmesidir. Alanı büyük olan bir bölge, ateşlenme derecesi düşük olsa bile sonucu etkileyebilir (Simüle_Kaynak_B34, 2021).

Neden COG Genellikle Varsayılan ve Tercih Edilen Yöntemdir?

COG, endüstriyel ve akademik uygulamaların büyük çoğunda varsayılan yöntemdir. Bunun temel nedenleri:

1. **Temsil Kabiliyeti:** Ateşlenen *tüm* kuralların katkısını, o kuralların *gücü* (ateşlenme derecesi) oranında hesaba katar. Bu, daha "demokratik" ve "dengeli" bir uzlaşma sonucu olarak kabul edilir (Simüle_Kaynak_B27, 2023).
2. **Süreklik ve Stabilite:** COG'nin en önemli teknik avantajıdır. Girdi değerlerindeki küçük, kademeli değişiklikler (ve dolayısıyla birleştirilmiş çıktı şeklindeki küçük değişiklikler), COG sonucunda da küçük, kademeli ve pürüzsüz (*smooth*) değişikliklere yol açar. Bu, özellikle kontrol sistemlerinde (modelin "kararsızca zıplamasını" önlemek için) kritik öneme sahiptir (Simüle_Kaynak_B38, 2017).
3. **Sezgisellik:** "Kütle merkezi" veya "denge noktası" fikri, mühendisler ve analistler için fizikal dünyaya en yakın ve en sezgisel yaklaşımındır.

COG'nin tek potansiyel dezavantajı, özellikle karmaşık çıktı şekillerinde (veya gömülü sistemlerde) integral hesabının, COA'ya veya diğer daha basit yöntemlere (örn. Maksimumların Ortalaması - MOM) göre hesaplama açısından daha maliyetli olabilir. (Simüle_Kaynak_B34, 2021).

Farklı Sonuç Üretme Senaryoları:

Eğer birleştirilmiş çıktı şekli (aggregated shape) mükemmel simetrik ise, COG ve COA (BOA) tam olarak aynı sonucu üreticektir (Simüle_Kaynak_B38, 2017).

Farklılıklar, birleştirilmiş şekil *asimetrik* (simetrik olmayan) hale geldiğinde belirginleşir.

- **Örnek Senaryo:** İki kuralın aynı anda ateşlendiğini varsayıyalım:
 1. Kural 1 (Güçlü): "Performans Düşük" kümesini $\mu = 0.8$$ yükseklüğinde ateşler (örn. dar bir üçgen).
 2. Kural 2 (Zayıf): "Performans Yüksek" kümesini $\mu = 0.2$$ yükseklüğinde ateşler (örn. çok geniş bir yamuk).
- **COG Tepkisi:** COG, yükseklüğü ($\mu = 0.8$$) nedeniyle "Düşük" kuralına çok daha fazla ağırlık verecektir. Sonuç, "Düşük" bölgeye doğru *güçlü bir şekilde çekilecektir*.
- **COA Tepkisi:** COA, "Yüksek" kümesinin ateşlenme derecesi düşük ($\mu = 0.2$$) olsa bile, eğer bu küme çok genişse (yani toplam alana katkısı fazlaysa), COA sonucu (alanı ikiye

bölmek için) COG'den daha fazla "Yüksek" tarafa doğru kaydırabilir (Simüle_Kaynak_B27, 2023).

Model İçin Çıkarım:

Bu proje gibi "Çalışan Performansı Tahminlemesi" amaçlı bir karar destek sisteminde, modelin, girdilerin kuralları ne kadar "doğruladığını" (ateşleme derecesini) adil bir şekilde yansıtması istenir. COG'nin, kuralların ateşlenme derecelerine (yani, girdilerin o kuralı ne kadar "doğruladığına") verdiği önem, onu bu tür çok-kriterli karar verme problemleri için teorik olarak en uygun ve en sağlam yöntem yapmaktadır (Simüle_Kaynak_B34, 2021).

Aşağıdaki tablo, iki yöntemin temel farklarını özetlemektedir:

Tablo 5.1: COG ve COA Durulama Yöntemlerinin Karşılaştırması

Özellik	Ağırlık Merkezi (Center of Gravity - COG)	Alan Merkezi (Center of Area - COA / BOA)
Temel Prensip	Birleştirilmiş şeklin geometrik kütle merkezi (Centroid).	Birleştirilmiş şeklin alanını iki eşit parçaya bölen nokta (Bisector/Median).
Matematiksel İfade	$z_{COG} = \frac{\int z \mu(z) dz}{\int \mu(z) dz}$	$\text{Area}_{COA} = \frac{\int z \mu(z) dz}{\int \mu(z) dz}$
Ana Duyarlılık	Kural yüksekliklerine (ateşleme derecesi, μ) ve şekele duyarlıdır.	Öncelikle şekele <i>alanına</i> ve <i>genişliğine</i> duyarlıdır. Yüksekliğe dolaylı olarak duyarlıdır.
Sonuç Temsili	Ağırlıklı ortalama (Mean).	Alanın ortanca değeri (Median).
Süreklilik/Stabilite	Çok yüksek. Çıktı yüzeyi pürüzsüzdür (smooth).	Düşük. Özellikle örtüsen kurallarda ani sıçramalar yapabilir.
Tercih Durumu	En yaygın, varsayılan ve en çok tavsiye edilen yöntem.	Daha az yaygın, özel durumlarda veya COG ile karşılaştırma için kullanılır.

- _____

- Simüle_Kaynak_B16, A. B. (2022). *Üretimde Öğrenme Eğrileri ve Verimlilik Modellemeleri*. Endüstri Mühendisliği Dergisi, 14(2), 45-59.
- Simüle_Kaynak_B17, C. D. (2022). *Ergonomi ve Yaşlanma: Fiziksel İş Kapasitesinin Boylamsal Analizi*. İş Sağlığı ve Güvenliği Araştırmaları, 8(1), 112-129.
 - Simüle_Kaynak_B18, E. F. (2018). *Yaşlanan İşgünden Kümülatif Travma Bozuklukları ve Ergonomik Müdahale Stratejileri* (Yayınlanmamış Doktora Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
 - Simüle_Kaynak_B19, G. H. (2021). *İnce Motor Beceriler ve Ağır İş Yükü: İş Tasarımında Cinsiyet ve Ergonomi*. Davranışsal Bilimler ve Ergonomi Dergisi, 5(3), 204-221.
 - Simüle_Kaynak_B20, I. J. (2019). *Endüstriyel Antropometri ve İş İstasyonu Tasarımı: Cinsiyete Dayalı Farklılıkların Analizi*. Ergonomi Dergisi, 11(4), 301-315.
 - Simüle_Kaynak_B22, K. L. (2019). *Performans Platosu: Deneyim Yılı ve Yetkinlik İlişkisi Üzerine Bir Araştırma*. Yönetim ve Organizasyon Dergisi, 20(1), 88-103.
 - Simüle_Kaynak_B24, M. N. (2022). *Ergonomik Açıdan Genç ve Yaşlı İşçi Performansının Karşılaştırılması*. İş ve İnsan Dergisi, 9(2), 145-160.
 - Simüle_Kaynak_B26, O. P. (2019). *Otomotiv Sektöründe Verimlilik Analizi: Montaj Hattı Performans Değerlendirmesi*. Üretim Yönetimi Raporları, 4, 78-90.
 - Simüle_Kaynak_B27, R. S. (2023). *Bulanık Mantık Sistemlerinde Durulama Yöntemlerinin Karşılaştırılmış Analizi: COG, COA ve MOM*. IEEE Erişim, 11, 4567-4580.
 - Simüle_Kaynak_B28, T. U. (2021). *Wright'in Öğrenme Eğrisi Teorisinin Modern Üretim Sistemlerine Uygulanması*. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Dergisi, 30(3), 211-225.
 - Simüle_Kaynak_B29, V. Y. (2020). *Yaşın Fiziksel Efor Gerektiren İşler Üzerindeki Etkisi: Bir Ergonomi Literatür Taraması*. Türk Fizyoloji Bilimleri Dergisi, 15(2), 99-114.
 - Simüle_Kaynak_B30, Z. A. (2023). *Fiziksel İş Kapasitesinde Cinsiyet Farklılıklarını ve Ergonomik İş Tasarımı Kılavuzu*. Uluslararası Endüstriyel Ergonomi ve İnsan Faktörleri Dergisi, 29(1), 50-65.
 - Simüle_Kaynak_B31, B. C. (2022). *Kariyer Evreleri ve Yetkinlik Gelişimi: 0-5 Yıl ve 5-15 Yıl Arasındaki Farklar*. İnsan Kaynakları Yönetimi Dergisi, 10(1), 33-48.
 - Simüle_Kaynak_B32, D. E. (2020). *İş Sağlığı ve Güvenliğinde Yaş Grupları: Genç, Orta Yaş ve Yaşlanan İşçiler için Risk Profilleri*. İSG Araştırmaları Dergisi, 6(4), 512-527.
 - Simüle_Kaynak_B33, F. G. (2021). *Bir Montaj Hattında Performans iyileştirme: Vaka Çalışması ve Verimlilik Metrikleri*. Endüstri Mühendisliği ve Yönetim Sistemleri, 12(3), 190-205.
 - Simüle_Kaynak_B34, H. I. (2021). *Bulanık Kontrol Sistemleri: Tasarım, Uygulama ve Durulama Teknikleri*. Otomasyon ve Kontrol Bilimleri Dergisi, 19(2), 134-150.
 - Simüle_Kaynak_B38, J. K. (2017). *Yapay Zeka ve Bulanık Mantık Ders Notları: Durulama Yöntemleri*. (Teknik Rapor/Ders Notu). Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü.