

ÜRETİM SİSTEMLERİNDE DARBOĞAZ TESPİTİ: LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Nagihan AKKURT ^{*ID}

Servet HASGÜL ^{*ID}

Alınma: 01.06.2022; düzeltme: 09.08.2022; kabul: 08.10.2022

Öz: Üretim sistemleri için darboğaz üretim verimliliğini kısıtlayan en etkili faktörlerden biridir. Darboğaza sebep olan bir süreç daha hızlı çalışır ise tüm hattın üretim hızı artacak ve böylelikle üretim süreçlerinin ve tedarik zincirinin devamlılığı sağlanacaktır. Bu sebeple darboğazın tespit edilmesi ve kontrol altına alınması işletmeler için önem kazanmıştır. Literatürde bu konuda çok sayıda yöntem ve çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmanın amacı ise literatürde bulunan darboğaz tespiti çalışmalarının incelenmesi, kullanılan yöntemlerin açıklanması ve analiz edilmesidir. Çalışma kapsamında 2007-2022 yıllarına ait toplam 48 makale incelenmiştir. İncelenen çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre darboğaz tespitinde en çok benzetim yönteminin kullanıldığı görülmektedir. Aynı zamanda dönüm noktası yöntemi, aktif dönem yöntemi ve matematiksel yöntemler de darboğaz tespitinde diğer yöntemlere göre daha fazla kullanılmaktadır. Son yıllarda ise artan yapay zeka çalışmaları ile birlikte makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar kullanılmaya başlanmıştır. Literatürde bu kadar sayıda darboğaz tespit yönteminin açıklandığı ve bu konudaki çalışmaların derlenip analiz edildiği bir çalışma bulunmamaktadır. Bu sebeple yapılan çalışmanın ilgili araştırmacılara yol göstermesi hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Üretim Sistemleri, Darboğaz, Darboğaz Tespit Yöntemleri

Bottleneck Detection in Production Systems: Literature Research

Abstract: For production systems, the bottleneck is one of the most effective factors limiting production efficiency. If a process that causes a bottleneck runs faster, the production speed of the entire line will increase, thus ensuring the continuity of the production processes and supply chain. For this reason, it has become important for businesses to detect and control bottlenecks. There are many methods and studies on this subject in the literature. This study aims to examine the bottleneck detection studies in the literature and to explain and analyze the methods used. Within the scope of the study, a total of 48 articles belonging to the years 2007-2022 were examined. According to the results obtained from the studies examined, it is seen that the simulation method is mostly used in bottleneck detection. At the same time, the turning point method, active period method and mathematical methods are also more used in bottleneck detection than other methods. In recent years, machine learning-based approaches have been used in with increasing artificial intelligence studies. There is no study in the literature in which so many bottleneck detection methods are explained and studies on this subject are compiled and analyzed. For this reason, it is aimed that the study will guide the relevant researchers.

Keywords: Production Systems, Bottleneck, Bottleneck Detection Method

* Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Meşelik Kampüsü, 26480, Eskişehir, Türkiye

İletişim Yazarı: Nagihan Akkurt (503220191002@ogrenci.ogu.edu.tr)

1. GİRİŞ

Darboğaz bir üretim sürecindeki en yavaş süreci ifade eder ve maksimum verimlilik kapasitesindeyken işleyebileceğinden daha fazla iş talebi alan bir iş aşamasıdır. Bir üretim akışında darboğaz, bir makine, bir operatör, bir departman veya tüm bir çalışma aşaması olabilir. Darboğaz olan iş aşaması maksimum kapasitesinde çalışsa bile, tüm sürecin gecikmesini engelleyecek kadar hızlı işleyemez. Dolayısıyla üretimin hızı darboğaz olan sürece bağlıdır. Bir darboğaz üretim sürecinin yavaşlamasına hatta durmasına sebebiyet verebilir. Bu durum iş akışındaki kesintilere, üretimde oluşabilecek gecikmelere ve üretimin verimliliğini etkileyeceğinden performans düşüklüğüne ve maddi kayıplara yol açabilir. Darboğaz, herhangi bir makinede ortaya çıkabilecek arıza ve bakım süreçleri, hatalı talep tahmini sebebiyle fazla veya eksik üretim yapılması, bir sonraki makine veya hatta gerekli ürününün gönderilememesi, çalışan performansından kaynaklı bekleme veya duruşlar gibi sebeplerden meydana gelebilmektedir. Oluşan darboğaz ile birlikte üretimin aksaması ve bu sebeple oluşabilecek müşteri memnuniyetsizliği, zaman ve motivasyon kaybı, makine beklemesi sırasında oluşabilecek aşırı yarı mamul stokları ve maliyet artışı vb. sonuçlar oluşabilmektedir.

Üretim sistemleri stokastik sistemlerdir ve dinamik bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, darboğaz genellikle durağan bir yapıya sahip değildir ve zaman içerisinde yer değiştirebilir. Darboğazın tanımlanması, tespit edilmesi, kontrol altına alınması ve sürdürülebilir hale getirilmesi üretim devamlılığı açısından büyük önem taşımaktadır. Literatürde darboğaz tespitine ilişkin gerçekleştirilen çalışmalarda kullanılan birçok farklı yöntem bulunmaktadır. Gelişen ve popülerleşen yapay zeka uygulamalarıyla birlikte bu problemlerin çözümünde makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar kullanılmaya başlanmıştır.

Bu derleme makalede üretimde darboğaz tespitine ilişkin literatürü değerlendirmek amacıyla bir araştırma süreci yürütülmüştür. ScienceDirect, Scopus gibi popüler veri tabanları kullanılarak ‘Bottleneck in the Manufacturing’, ‘Bottleneck Detection’, ‘Bottleneck Detection Methods’ anahtar kelimeleri ile 2007-2022 yıllarını kapsayan bir tarama gerçekleştirilmiştir ve uygun olduğu düşünülen çalışmalar listelenmiştir. Bu kapsamda yayımlanan çalışmalarda kullanılan darboğaz tespit yöntemlerine yer verilmiş olup gerçekleştirilen çalışma kapsamında bu yöntemler tanıtılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde literatürde geçen üretimde darboğaz tanımlarına değinilmiştir. Üçüncü bölümünde darboğaz tespit yöntemleri açıklanmış, dördüncü bölümde ise darboğaz tespit yöntemlerini içeren çalışmalara yer verilmiş ve çalışmalar hakkında kısaca bilgilendirme yapılmıştır. Beşinci bölümde ise literatürdeki çalışmalar, yıllara ve kullanılan yöntemlere göre analiz edilerek değerlendirilmiştir.

2. ÜRETİM SİSTEMLERİNDE DARBOĞAZ

Üretim sistemindeki bir darboğazın iyileştirilebilmesi için öncelikle bulunması gerekir. Ayrıca iyileştirmenin ne zaman durdurulacağı da bilinmelidir, yani iyileştirmeden sonra darboğazın hangi konuma kaydığı bilinmelidir. Darboğaz olmayan kaynaklarda iyileştirme, sistem kapasitesini artırmaz (Betterton ve Silver, 2012). Darboğazın bilinmesi, sistemdeki tüm kalan parçalar yerine yalnızca bir süreci iyileştirerek akışı artırmaya olanak tanır. Bir darboğaz varsa, değer akışının başka bir yerinde yapılan hiçbir şey verimliliği iyileştiremez. Üretim sistemindeki darboğaz, iş yükleri belirli bir noktaya, o noktanın üstesinden gelebileceğinden daha hızlı ulaştığında ortaya çıkar. Darboğaz durumu, gereksiz envantere neden olur ve üretim sağlama sürelerini uzatır (Leporis ve Králová, 2010).

Üretimde darboğaz kavramı ilk olarak Lawrence ve Buss (1994) tarafından tanımlanmıştır. 1994 yılından günümüze birçok farklı darboğaz tanımlaması yapılmıştır. Bu tanımlamalara ek olarak darboğazın tespit edilmesi ve gereken önlemlerin alınabilmesi için birçok farklı tespit yöntemi geliştirilmiştir.

Darboğazın tanımında bu zamana kadar bir fikir birliğine varılamamış ve literatürde veya uygulamalarda kullanılan farklı darboğaz tanımları belirtilmiştir. Bernedixen'e (2018) göre önerilen bu kadar çok yöntemin olmasının bir nedeni, darboğaz kaynağının ne olduğu konusunda net bir fikir birliği olmamasıdır. Thüerer ve diğ.'ne (2021) göre darboğaz, tüm sistemin hem çıktısını hem de teslim süresi performansını etkileyen süreçtir. Etki ne kadar büyük olursa, darboğaz o kadar önemli olur. Wedel ve diğ.'ne (2016) göre ise sunulan tüm darboğaz tanımlarının özü, bir darboğazın bir sistem üzerinde olumsuz bir etkisi olmasıdır. Bu nedenle, darboğazdaki iyileştirmeler, çıktı artışına neden olur. Literatürde kullanılan farklı darboğaz tanımları Tablo 1'deki gibidir (Betterson ve Silver, 2012; Lai ve diğ., 2021; Esmaeeli ve Aleahmad, 2019).

Tablo 1. Literatürde bulunan darboğaz tanımları

Referans	Tanım
Lawrence ve Buss (1994)	Talebin geçici olarak kapasiteyi aştığı veya kuyrukta bekleyen iş envanterinin maksimum olduğu veya uzun vadeli kullanımın maksimum olduğu kaynak darboğazdır.
Kuo ve diğ. (1996)	Sistem üretim hızının bir istasyonun üretim hızına duyarlılığı sistemdeki tüm istasyonlar arasında en yüksek ise istasyon darboğazdır. Akış yukarı istasyonların engellenmesine ve akış aşağı istasyonların aç kalmasına neden olur.
Hopp ve Spearman (2000)	Darboğaz istasyon diğer istasyonlardan daha etkili bir işlem süresine sahiptir. Etkin işlem süresi, arıza duruş süresi, kurulum veya hurda gibi diğer faktörleri hesaba katmak için ayarlanan ham işlem süresidir. Diğer istasyonlardan daha yüksek kullanıma sahiptir.
Chiang ve diğ. (2001)	Bir sistemin performansını en güçlü şekilde engelleyen kaynak, yani bir sistemin verimliliğini düşürmede en büyük etkiye sahip kaynak darboğazdır.
Roser ve diğ. (2001)	En uzun ortalama aktif dönemi olan kaynak darboğazdır.
Roser ve diğ. (2002)	İstasyon, tüm sistemi yavaşlatma veya durdurma konusunda en büyük etkiye sahipse darboğazdır.
Blackstone (2008)	Kapasitesi, kendisine verilen talepten daha az olan bir kaynak darboğazdır.
Sengupta ve diğ. (2008)	Etkin olmayan (engellenmiş ve aç bırakılmış) durumlarda harcanan minimum toplam süreye sahip kaynak darboğazdır.
Betterson ve Cox (2009)	Önce kapasitesi tükenen ve dolayısıyla sistem verimliliğini sınırlandıran kaynak darboğazdır.
Li ve diğ. (2009b)	İstasyon, en küçük izole üretim hızına (PR) sahipse darboğazdır. PR, bir makine tarafından çevrim süresi başına üretilen ortalama parça sayısı olarak tanımlanır. Yukarı akış arabelleğindeki devam eden çalışma envanteri, sistemlerdeki tüm arabelleklerin en büyüğü ise, istasyon darboğazdır.
Biller ve diğ. (2009)	Sistemin verimliliği üzerinde en güçlü etkiye sahip kaynak darboğazdır.
Roser ve Nakano (2015)	Darboğaz, tüm sistemin verimliliğini etkileyen süreçtir. Etki ne kadar büyük olursa darboğaz o kadar önemli olur.
Esmaeeli ve Aleahmad (2019)	Darboğaz, süreci bekleyen malzeme zinciridir. Üretim sistem performansı üretim planlamasının altına düştüğünde üretim sistemlerinde darboğaz ortaya çıkmaktadır.

Sistem üretim hızının bir makinenin üretim hızına duyarlılığı sistemdeki tüm makinelerin en yükseği ise, verilen makine darboğazdır. Bu tanım matematiksel olarak şu şekilde temsil edilir: Eğer,

$$\frac{\Delta TP_{sys,k}}{\Delta TP_k} = \max\left(\frac{\Delta TP_{sys,1}}{\Delta TP_1}, \frac{\Delta TP_{sys,2}}{\Delta TP_2}, \dots, \frac{\Delta TP_{sys,n}}{\Delta TP_n}\right) \quad (1)$$

ise k. makine, n makine ve n-1 tamponlu ardışık bir hattaki darboğazdır. Bu tanımda $\Delta TP_{sys,i}$ i makinesinin arıza süresini azaltarak bir performans değişikliğinden kaynaklanan sistem çıktı artışıdır, sys alt indisi sistemi temsil etmektedir, ΔTP_i ise i makinesinin bağımsız çıktı artışıdır (Li ve diğ. 2009b).

Literatürde darboğazın farklı şekillerde sınıflandırılması yapılmıştır. Wedel ve diğ.'ne (2016) göre darboğaz odaklandıkları süre çerçevesine göre sınıflandırılabilir. Kısa vadeli dönemler (son 24 saat), uzun vadeli dönemler için (son 24 saatten daha uzun) geçmiş darboğaz tespit edilebilir. Lemessi ve diğ. (2012) darboğazı statik ve dinamik olarak ele almaktadır. Dinamik darboğaz zamanla değişerek sistemi belirli bir zaman çerçevesinde etkilerken, statik darboğaz sistemi her zaman etkiler. Bu tanıma bağlı olarak, anlık ve ortalama bir darboğaz ayırt edilebilir. Belirli bir zamandaki darboğaz anlık olarak adlandırılır, ancak ortalama darboğaz tüm anlık darboğazlar ile ilgilidir ve en önemli olanı sistem sınırlamasının birincil faktörü olarak kabul eder. Lima ve diğ. (2008) ise darboğaz türlerini 3 kategoride sınıflandırmıştır; Basit Darboğaz, Çoklu Darboğaz, Değişen Darboğaz. Basit darboğazda, ele alınan tüm süre boyunca yalnızca bir darboğaz makinesi vardır. Çoklu darboğaz durumunda, darboğaz, ele alınan tüm dönem için sabitlenir. Değişen darboğaz durumu için, tüm dönem için tek bir darboğaz yoktur; darboğaz anında bir istasyondan diğerine geçmektedir.

3. DARBOĞAZ TESPİT YÖNTEMLERİ

İmalatta darboğaz tespiti, genel imalat kapasitesini iyileştirmenin ilk ve en önemli adımıdır. Bir süreci gözlemlerken, sürecin darboğaz olup olmadığı tek bir gözlemle belirlenemez. Bir süreç parça bekliyorsa (aç kalmışsa), darboğaz yukarı yönde olmalıdır. Bir işlem taşınmayı bekliyorsa (engellenmişse), darboğaz aşağı yönde olmalıdır. İşlem durumu tespit edilirken işlem süresinin bitmesini beklemek kesinliğin sağlanması için esastır. İşlem süresinin sona ermesinden ve parçanın bir sonraki istasyona aktarılmasından sonraki an, gözlemciye gerçek durumun ne olduğunu söyler (Roser ve diğ. 2014).

Literatürde üretim bağlamında çeşitli darboğaz tespit yöntemleri mevcuttur. Üretim hatlarında darboğaz tespit sorunu kapsamlı bir şekilde ele alınmaktadır ve bunun için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Darboğaz tespiti temel olarak üç gruba ayrılmıştır: analitik yöntemler, benzetim tabanlı yöntemler ve veriye dayalı yöntemler (Lai ve diğ., 2021; Singh ve Thathia, 2019; Subramaniyan ve diğ. 2016; Li ve diğ., 2009b).

Analitik yöntemler, makine arıza süresi, çalışma süresi ve döngü süresi gibi makine performans ölçütlerinin istatistiksel bir dağılımını varsayarak, çıktının kapalı biçimli bir ifadesini elde etmek veya buna yaklaşmak için matematiksel modeller geliştirmeyi amaçlar (Lai ve diğ., 2021). Analitik yöntemler kullanan darboğaz çalışmalarının çoğu, makine performansı için istatistiksel ve olasılık dağılımı varsayımları nedeniyle, uzun vadeli kararlı durum darboğaz tespiti ile sınırlıdır. Ayrıca karmaşık hatlar için analitik kapalı form çözümleri geliştirmek zordur (Li ve diğ., 2009a). Analitik bir model, uzun vadeli tahmin için uygun olsa da bu tür bir model, kısa vadeli darboğaz tespit problemlerini çözmek için yeterli değildir (Leporis ve Králová, 2010).

Benzetime dayalı yöntem, bir üretim sisteminin dijital bir modelinden oluşur. Böyle bir model, kullanım süreleri, arıza istatistikleri ve bakım faaliyetleri hakkında ayrıntılı bilgi verebilir ve değişiklik yapabilmeyi, üretim sistemini nasıl etkilediğini görebilmeyi sağlar. Böylece karmaşık bir üretim sistemindeki darboğazın belirlenmesine yardımcı olabilir (Singh ve Thathia, 2019). Benzetim tabanlı yöntemin ana avantajı, karmaşık üretim hatlarındaki darboğazı tespit edebilmesidir (Lai ve diğ., 2021). Bir benzetim modeli, sistem iyileştirme olasılıklarını belirlemeye ve bunların genel sistem performansı üzerindeki etkilerini doğrulamaya yardımcı olabilir (Leporis ve Králová, 2010). Benzetim tabanlı modeller genellikle daha uzun geliştirme süresi gerektirir ve dinamik olarak değişen üretim sistemleriyle güncellenmesi zordur (Lai ve diğ., 2021). Benzetim yaklaşımının en büyük dezavantajları, sisteme özel bilgi, yerleşim değişiklikleri için nispeten daha az esneklik, uzun geliştirme süresi ve benzetim sonuçlarının olası yanlış

yorumlanmasıdır. Bu faktörler, benzetim tabanlı yöntemlerin geniş uygulamasını büyük ölçüde engellemektedir (Li ve diğ., 2009a).

Veriye dayalı yöntem, üretim sistemlerinden toplanan gerçek zamanlı verileri analiz ederek darboğazı tespit eden darboğaz tespit yöntemidir. Benzetim tabanlı yöntemle karşılaştırıldığında, veriye dayalı yaklaşımlar genellikle esnek, modeli yeni bir sistemde oluşturmak için daha az kurulum süresi gerektirir ve sistem değişikliğine uyum sağlayabilir. Üretim verilerini kullanarak üretim sistemi darboğazını tespit etmeye yönelik endüstriyel uygulamalar, kuyruk uzunluğunun, döngü süresinin ve kullanım oranının değerlendirilmesini içerir (Lai ve diğ., 2021).

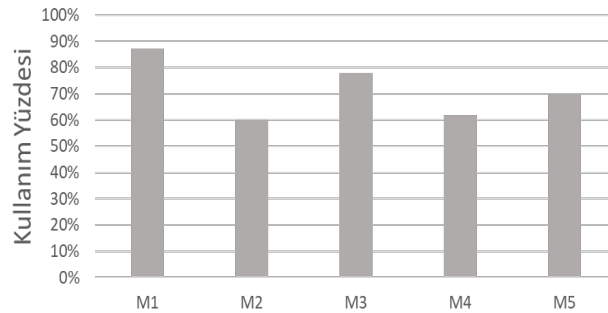
Bir üretim sürecindeki herhangi bir öge için darboğaz meydana gelmesi birçok farklı sebebe bağlı olabilir. İlgili veriler toplanıp, bu durumlar üzerinde çeşitli analizler yapılarak darboğaz tespiti yapılabilir. Darboğazın tespit edilmesi üretimdeki gecikme ve aksaklıkları engellemek için çok önemlidir. Literatürde bu amaç doğrultusunda geliştirilen farklı yöntemler bulunmaktadır. İzleyen başlıklarda bu yöntemlerin detayları ve çalışma mekanizmaları kısaca anlatılmaktadır.

3.1. Kullanım Yöntemi

Darboğaz tespit yöntemlerinden biri de kullanım yöntemidir (Utilization Method). Bu yöntem, darboğazı tespit etmek için bir makinenin aktif olduğu sürenin yüzdesini ölçer. Sistem genelinde en yüksek yüzdeye sahip ögenin sistemdeki sınırlayıcı faktör olduğu varsayılmaktadır.

Kullanım, ham üretim hızı değil, arıza, kurulum vb. nedeniyle zaman kaybını ortadan kaldırmak için indirgenmiş ham üretim hızı olan etkin üretim hızı kullanılarak hesaplanır. Buna göre bu yaklaşıma etkin süreç süresi yöntemi de denir (Betterson ve Silver, 2012). Bu yöntemin, bir ögenin durumunun değiştiği zamanı tanımlaması gerekir: (1) Bir öge yeni görevler için beklerken veya aşağı yönde engellendiğinde etkin olmayan durum; (2) Bir öge bir işlevi yerine getirirken aktif durum. Ayrıca bu makinenin diğer makineler tarafından kesintiye uğrama olasılığının en düşük olması ve dolayısıyla en yüksek ortalama çalışma süresine sahip makinenin darboğaz olarak kabul edildiğini ayrıntılı olarak vurgulanmıştır (Lemessi ve diğ., 2012). Yöntemin temel kusuru, ortalamalara dayanması ve dinamik sistemlerde değişen darboğazı tespit edememesidir (Roser ve diğ., 2014). Her makinenin kullanımı veya iş yükü ölçülerek darboğaz tespit edilebilir (Zhai ve diğ., 2010).

Şekil 1’de bulunan M1 makinesi en büyük kullanıma sahip olduğundan, bu makine kullanım yöntemine göre birincil darboğaz olacaktır. Kullanım yöntemi, makine M1’i birincil darboğaz olarak bulur, ancak ikincil darboğaz veya darboğaz olmayanlarla ilgili herhangi bir fikir sağlamaz (Roser ve diğ., 2003).

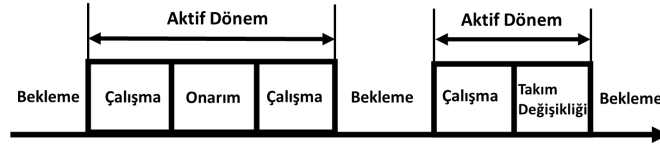


Şekil 1:
Kullanım Yöntemi

3.2. Aktif Dönem Yöntemi

Toyota Merkezi Araştırma ve Geliştirme Laboratuvarlarında geliştirilen aktif dönem yöntemi (Active Period Method), bir makinenin kesintisiz olarak aktif olduğu dönemleri belirleyen makine durum bilgilerinin analizine dayanmaktadır. En uzun ortalama etkin süreye sahip makine bir darboğaz olarak kabul edilir.

Her makine için beş farklı durum tanınır: Çalışıyor, Bekliyor, Engellendi, Takım Değişikliği ve Onarım Altında. Analiz için Bekliyor ve Engellendi, etkin değil olarak kabul edilir. "Makine" terimi, faaliyet gerçekleştiren herhangi bir öğeyi içerebilir; makine, konveyör, AGV, vb. Aktif dönem yöntemine ilişkin bir gösterim Şekil 2'deki gibidir.



Şekil 2:
Aktif Dönem Yöntemi (Leporis ve Králová, 2010)

En uzun aktif dönemler arasındaki örtüşme, darboğazın değiştiği zamanlardır. Örtüşme olmayan dönemler tek darboğazdır (Roser ve Nakano, 2015). Aktif dönem yönteminin avantajları şunlardır: Basit ve güvenilir darboğaz değerlendirmesi yapar. Darboğaz olma olasılığı tüm makineler, konveyörler veya işçilikler için güvenilir bir şekilde belirlenir. Göstergeler her iş yeri için ayrı ayrı hesaplanır, böylece yöntem üretim sistemi yapısından bağımsız olarak (işyeri düzeni, sürecin dallanması, yeniden işleme döngüleri vb.) uygulanabilir (Leporis ve Králová, 2010).

3.3. Ortalama Aktif Dönem Yöntemi

Ortalama aktif dönem yönteminde (Average Active Period Method) darboğaz, en uzun ortalama aktif dönemi olan süreç olarak tanımlanır. Uzun vadeli statik darboğazın belirlenmesi için ortalama aktif dönem yöntemi kullanılır. Uzun vadeli darboğaz, belirli bir zaman aralığında, diğer tüm makinelerle kıyasla üretim hattında en yüksek darboğaz süresine sahip makine olarak tanımlanır. Ardışık aktif dönemler tek bir aktif dönem olarak alınır (Subramaniyan ve diğ., 2016). Aktif dönem ve ortalama aktif dönem yöntemleri süreçlerin sistem kapasitesi üzerindeki genel etkisini belirleyebilir. Olumsuz tarafı, bu yöntemler, her zaman mevcut olabilecek veya olmayabilecek süreçle ilgili kapsamlı veriler gerektirir. Bu nedenle, yalnızca veriler mevcutsa yararlıdır (Roser ve diğ., 2014).

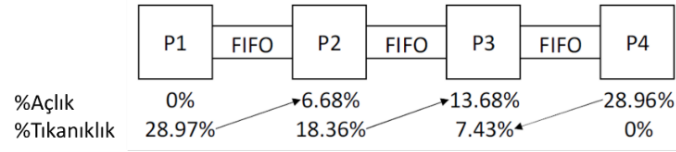
3.4. Aktif Olmayan Dönem Yöntemi

Aktif olmayan dönem yöntemi (Inactive Period Method) yöntem, etkin olmayan (engellenmiş ve aç bırakılmış) durumlarda harcanan minimum toplam süreye sahip istasyonu darboğaz olarak tanımlar (Betterton ve Silver, 2012).

3.5. Ok Tabanlı Yöntem

Ok tabanlı yöntem (Arrow-Based Method) iki bitişik istasyonun operasyonlarını karşılaştırarak darboğazın tespit edilmesine dayanmaktadır. Yöntem, adını bitişik istasyonlara kıyasla hangi istasyonların daha yüksek tıkanma ve açlığa sahip olduğunu gösteren sola veya sağa işaret eden oklar çizme uygulamasından alır (Zhao ve diğ., 2014). Örneğin, yukarı akış istasyonunun tıkanma süresi, akış aşağı bitişik istasyonun aç kalma süresinden daha yüksekse, darboğaz aşağı akış olmalıdır, bu nedenle akış aşağıyı gösteren bir ok oluşturur. Oklar

kesiştğinde, bir darboğaz istasyonunun tespit edildiğini gösterir (Lai ve diğ., 2021). Bir başka anlatım ile; bir m_i makinesinin üretim tıkanmasının sıklığı, makine m_{i+1} 'in üretim yetersizliği sıklığından daha büyükse, darboğaz makine m_i 'nin aşağısındadır. Makine m_i 'nin üretimden yoksun kalma sıklığı, m_{i-1} 'deki üretim tıkanma sıklığından daha büyükse, darboğaz makine m_i 'nin yukarısındadır (Roser ve Nakano, 2015). Çıkan okları olmayan tek bir makine darboğazdır. Çıkan okları olmayan birden fazla makine varsa, en büyük önem derecesine sahip olan birincil darboğazdır (Leporis ve Králová, 2010). Yöntem, Şekil 3'teki gibi birincil darboğaz P3'ü açıkça tanımlar. Bununla birlikte, ok yöntemi, P1, P2 ve P4'ün darboğaz olmadığını kabul eder.



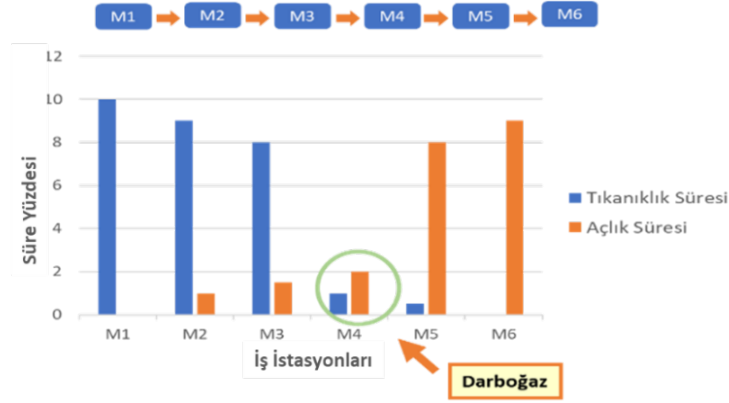
Şekil 3:
Ok Tabanlı Yöntem (Roser ve Nakano, 2015)

3.6. Dönüm Noktası Yöntemi

Dönüm Noktası Yöntemi (Turning Point Method), bir darboğaz tanımlamak için üretim sisteminin tıkanıklık ve açlık verilerini kullanır. Tıkanmanın açlıktan daha yüksek olması durumdan, açlığın tıkanıklıktan daha yüksek olma durumuna dönüştüğü makine dönüm noktası olarak tanımlanır.

Bir dönüm noktası makinesinin tıkanması ve açlığının toplamı, komşu makinelere göre daha küçüktür. Böylece, dönüm noktası makinesi, segmentteki diğer makinelere kıyasla çalışma süresi ve duruş süresi toplamının en yüksek yüzdesine sahiptir (Leporis ve Králová, 2010). Darboğaz istasyonları, akış yukarı istasyonların tıkanmasına ve aşağı akış istasyonlarının aç kalmasına neden olma eğiliminde olan istasyonlardır. Ayrıca, darboğaz istasyonları genellikle yakındaki istasyonlara kıyasla daha yüksek kullanımlara sahiptir, bu nedenle bitişik istasyonlardan daha düşük toplam tıkanıklık ve aç kalma süresine sahiptir (Lai ve diğ., 2021). Herhangi bir dönüm noktasının bulunmadığı özel durumda, her istasyonun açlığı tıkanmasından fazlaysa, ilk istasyon darboğazdır; Aksi takdirde, her istasyonun tıkanıklığı açlığından daha yüksekse, son istasyon darboğazdır (Zhao ve diğ., 2014).

Yöntemin birkaç dezavantajı vardır; bütünsel darboğazın birkaç yerel darboğazdan doğrudan değerlendirilmesi mümkün değildir ve emek, potansiyel bir darboğaz olarak değerlendirilmez (Leporis ve Králová, 2010). Yöntem, kısa vadeli darboğaz tespiti için doğru sonuçlar ve herhangi bir zamanda performans iyileştirme önlemleri alma fırsatı sağlayabilir. Büyük arabelleklerden ve sık sık küçük durmalardan oluşan bir sistem içindeki gerçek darboğazı tespit etmekte başarısız olur (Singh ve Thathia, 2019). Yöntem orijinal olarak seri hatlar için tanımlanmıştır ve bu nedenle karmaşık üretim sistemleri için sınırlı endüstriyel uygulanabilirliğe sahiptir (Lai ve diğ., 2021). Yöntem, özellikle makinede, yukarı yöndeki makinelerin tıkanmasına veya sonraki makinelerin aç kalmasına neden olmayan küçük üretim bozuklukları olduğunda, darboğazı tespit etmede başarılı değildir (Subramaniyan ve diğ., 2018a). Şekil 4, dönüm noktası yönteminin ana fikrini gösteren bir örnektir. Şekil, altı istasyonlu ve beş tamponlu bir seri üretim hattının tıkanıklık ve aç kalma bilgilerini göstermektedir. Modele dayalı olarak, M4 istasyonunun tıkanıklık ve açlık davranışının “Dönüm Noktası” olduğu, dolayısıyla sistemin darboğazı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4:
Dönüm Noktası Yöntemi (Lai ve diğ., 2021)

3.7. Ortalama ve En Uzun Bekleme Süresi

Ortalama bekleme süresi yönteminde (Average Waiting Time) bir işin kuyrukta geçirdiği ortalama süre bazında en uzun beklediği istasyon, darboğaz olarak kabul edilir (Betterton ve Silver, 2012). En uzun bekleme süresi yönteminde (Longest Waiting Time) ise bir işin kuyrukta geçirdiği maksimum süre bazında en uzun beklediği istasyon darboğaz olarak kabul edilir (Zhao ve diğ., 2014).

3.8. En Uzun Kuyruk Yöntemi

Genel işlem süresinin en büyük kısmı için kuyrukta en fazla bekleyen işe sahip olan istasyon darboğazdır. En uzun kuyruk yöntemi (Longest Queue Method) tüm makinelerdeki kuyruk uzunluklarının, örneğin bir iş herhangi bir kaynak kuyruğuna her geldiğinde, belirli zaman aralıklarında karşılaştırılmasını ve zamanın her noktasında maksimum uzunluğa sahip kuyruğun işleyen bir çizelgesinin muhafaza edilmesini gerektirir (Betterton ve Silver, 2012).

3.9. Kalkışlar Arası Süre Yöntemi

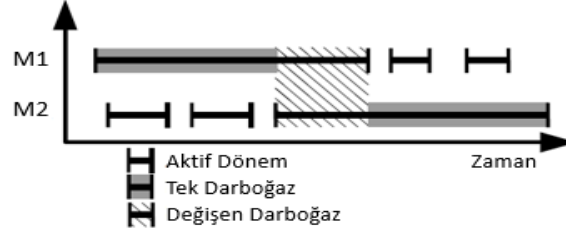
Kalkışlar arası süre yöntemi (Inter Departure Time Method), kalkışlar arası verileri analiz eder. Yöntem, darboğazı bulmak için bir ögenin dört farklı durumunu tanımlar; 1. Döngü (öge çalışıyor), 2. Aşağı-Engellenmiş (bitmiş ürün, ögeden ayıramaz), 3. Yukarı-Engellenmiş (öge ürün bekliyor), 4. Başarısız (ürün bozuk). Yöntem, darboğazı sistemdeki diğer ögelerden en az etkilenen öge olarak tanımlar. Farklı durumları analiz ederken, yavaş bir öge tarafından beslenen hızlı bir ögenin genellikle engel durumunda olduğu açıktır. Bu, hızlı bir öge yavaş bir ögeyi beslediğinde de geçerlidir; bu durumda öge genellikle engellenmiş durumdadır. Bu nedenle bir ögenin engellenmiş durumda olduğu minimum toplam zaman yüzdesine sahip olduğunda darboğaz olarak adlandırılır. Bu durumda, öge sıklıkla diğer ögelerden etkilenmez, ancak büyük olasılıkla diğer ögeleri etkiler (Lemessi ve diğ., 2012).

3.10. Kalkışlar Arası Süre Yöntemi

Bekleme süresi yöntemi (Waiting Time Method), ürünlerin belirli bir ögenin (örneğin bir makine) kullanılabilirliğini beklemesi gereken kümülatif süreyi dikkate alır. İmalat sistemindeki tüm kalemler arasında en yüksek kümülatif bekleme süresine sahip kalemin genel sistem kısıtı olduğu varsayılmaktadır. Bu yöntemi kullanırken iki varsayımda bulunulmalıdır. Birden fazla ürün türü olmayan, yalnızca doğrusal bağlantılı ögeler için geçerlidir ve yalnızca ögelerin önündeki kuyruklar sonsuz kapasiteye sahip olduğunda çalışır; aksi takdirde, bir öge, kuyruğu dolduğunda yukarı yönde başka bir ögenin engellenmesine yol açabilir (Lemessi ve diğ., 2012).

3.11. Değişen Darboğaz Yöntemi

Değişen darboğaz yöntemi (Shifting Bottleneck Method), darboğazı belirlemede kullanım yöntemiyle aynı verileri kullanır. Değişen darboğaz yöntemi ayrıca bir makinenin ne zaman aktif olup olmadığını da araştırır (Şekil 5). Bununla birlikte, kullanım yöntemi, bir makinenin aktif olduğu sürenin yüzdesini belirlerken, değişen darboğaz yöntemi, bir makinenin kesintisiz olarak aktif olduğu süreyi belirler. Bu, sistem içindeki kısıtlamaların çok daha iyi anlaşılmasını sağlar ve dolayısıyla çok daha güvenilir bir darboğaz tespiti sağlar (Roser ve diğ., 2003).



Şekil 5:
Değişen Darboğaz Yöntemi (Roser ve diğ., 2003)

3.12. Kritiklik Göstergelerine Dayalı Yöntem

Kritiklik göstergelerine dayalı yöntemdeki (Criticality Indicators Based Method) yaklaşım, her iş istasyonu için kritiklik göstergesinin değerlendirilmesine ve kritik yeri tespit etmek için gösterge değerlerinin karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Her iş istasyonu için özel kritiklik göstergesi, iş istasyonu için istatistiksel göstergelerin sistemdeki tüm iş istasyonları için göstergelerin ortalama değerlerinden sapmalarının toplanmasıyla oluşturulur. Kritiklik göstergelerine dayalı yöntem, makineler ve işçilik dikkate alınarak darboğazın doğrudan nicel olarak belirlenmesine olanak tanır. İstatistiklerin analizinin ardından ikinci aşamada tıkanıklığa neden olan unsur keşfedilmektedir. Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında, bu yöntem sadece darboğazı ve bunların şiddetini değil, aynı zamanda üretim sistemindeki rezervleri de (kullanılmayan kapasiteye sahip iş istasyonları) belirler (Leporis ve Králová, 2010).

3.13. Darboğaz Yürüyüşü Yöntemi

Darboğaz yürüyüşü yöntemi (The Bottleneck Walk Method), verilere veya teorik modellere bağlı olmayıp doğrudan üretim alanına odaklanır. Yöntem, darboğazdan bakıldığında tamponlar yukarı yönde dolu ve aşağı yönde boş olma eğiliminde olacağından, sistemdeki tampon miktarlarını gözlemleyerek aç kalma ve tıkanma kavramlarına dayanmaktadır. Böylece herhangi bir hesaplama yapılmadan darboğaz görülebilmekte ve nedeni sadece gözlemle de bulunabilmektedir (Singh ve Thathia, 2019). Darboğaz yürüyüşü birkaç varsayıma dayanmaktadır: Yürüyüş sırasında, üretim hattı boyunca stok seviyesi her istasyonda not edilir. Zamanında değişen darboğazın tam bir resmini elde etmek için "bir dizi gözlemin birden çok tekrarlanması" önerilir. Bu nedenle, darboğaz yürüyüşlerini birkaç kez tekrarlayarak ("birkaç güne dağıtılmış") koşulların yalnızca bir anlık görüntüsüne sahip olma sorunu çözülmüştür. Darboğaz yürüyüşlerinin daha sık tekrarlanmasıyla, olası tüm darboğazların, özellikle de zamanında değişen darboğazın tespit edildiği varsayılır. Ancak, bu hantal süreç, yaklaşma süresini yoğun hale getirir (Roh ve diğ., 2018). Şekil 6'ya göre P1 sürecinin her parçadan sonra nakliye için biraz bekleme süresi vardır ve P3 ve P4 süreçleri her parçadan sonra malzeme beklemektedir. Tüm oklar P2'yi gösterdiğinden, bu işlem şu anda darboğazdır.



Şekil 6:
Darboğaz Yürüyüşü Yöntemi (Roser ve diğ., 2014)

3.14. İşlem Süresi Yöntemi

İşlem süresi yöntemi (Process Time Method), izole koşullar altında malzeme akışındaki işlem sürelerini ölçer. Bu yöntem, darboğazı tespit etmenin basit ve hızlı bir yolunu sunar. Ancak yöntem yalnızca statik darboğazı, yani akış hattının kapasite sınırını algılar. Bu yöntem herhangi bir kayıp içermez ve bu nedenle darboğazı değil, ideal koşullar altında maksimum kapasiteyi tespit eder (Roser ve diğ., 2014).

3.15. Benzetim Yöntemi

Benzetim, bilgi edinmek için denenebilecek bir yazılım modelinde bir sistemi ve dinamik süreçlerini modellemek için deneysel bir prosedürdür. Bir benzetim temel olarak, özellikle öğelerin kombinasyonu diğer klasik darboğaz tespitini yasakladığında, darboğaz tespitine izin verir. Ayrıca benzetim yazılımının malzeme akış tasarımını görselleştirme yeteneği, sistemin yönetim içinde kabulünü artırır (Roser ve diğ., 2014).

Mevcut benzetim tabanlı darboğaz tespit yöntemleri üç kategoride gruplandırılabilir: statik hesaplama yöntemleri, katsayı tabanlı yöntemler ve senaryo tabanlı yöntemler. Birinci kategori, darboğazı belirlemek için benzetim girdi verilerini analiz eder, ikinci kategori katsayılara dayalı olarak benzetim çıktı verilerini analiz eder ve üçüncü kategori, farklı model öğelerinin hassasiyetini değerlendirmek için benzetim senaryoları gerçekleştirir. Darboğazı tespit etmenin basit bir yolu, benzetim için sağlanan girdi verilerini kullanarak statik ve deterministik hesaplamalardır. Bir üretim sisteminin belirli bir süre boyunca karşılaması gereken bilinen talep göz önüne alındığında, takt süresi işlem süresinden büyükse, makine darboğazı değildir. Katsayı tabanlı benzetim darboğaz tespiti, benzetim çıktı verilerine dayanır. Benzetim, üretim sisteminin performansını değerlendirmek için katsayıları hesaplar. Senaryoya dayalı darboğaz tespit yöntemleri, benzetimin What-If sorularını yanıtlama ve farklı model senaryolarını test etme yeteneğini kullanır. Bu yöntem, darboğazı bulmak için benzetim modelini değiştirir (Lemessi ve diğ., 2012).

3.16. En Düşük Üretim Oranı Yöntemi

Makinelerin çevrim sürelerine ve üretim oranlarına bakarak darboğaz bulunmaktadır. En uzun çevrim süresine sahip makine en düşük kapasiteye sahip olacağından darboğazdır. Ayrıca en düşük üretim oranına (Lowest Production Rate) sahip makine darboğazdır. Bir başka yöntem ise, süreç döngü sürelerinin ölçüldüğü ve birbiriyle ve müşterinin takt süresiyle karşılaştırıldığı bir takt diyagramı kullanmaktır. Takt süresi müşterinin takt zamanından büyük olan makine mevcut darboğazdır (Singh ve Thathia, 2019).

3.17. Genel Verim Etkinliği

Genel Verim Etkinliği (OTE, Overall Throughput Effectiveness) metriği, kümülatif verim kaybının yanı sıra her tür istasyon gecikmesini ve arıza süresini içerir. En küçük OTE'ye sahip istasyon darboğaz olarak kabul edilir (Betterson ve Silver, 2012). OTE metrikleri, bireysel ekipman üretkenliğinin bir fonksiyonudur, dolayısıyla teşhis amacıyla kullanılabilirler (Muthiah ve Huang, 2007).

4. LİTERATÜR TARAMASI

Literatür kapsamında incelenen çalışmalarda benzetim yöntemiyle darboğaz tespiti gerçekleştiren veya kullandığı başka bir yöntemi desteklemek amacıyla benzetim modellemesi kullanan çalışmaların diğer yöntemlere göre daha fazla kullanıldığı görülmüştür. Aktif dönem yöntemi, dönüm noktası yöntemi ve matematiksel tabanlı yöntemler de bu sırayı takip etmektedir. İncelenen çalışmaların geneli bir vaka çalışması ile desteklenmiştir. Son yıllarda ise darboğaz tespitinde makine öğrenmesi, görüntü işleme gibi yapay zeka temelli yaklaşımların kullanılmaya başlandığı gözlenmiştir. Çalışmalara ait kullanılan yöntem bilgisi ve çalışmaların özet açıklamaları Tablo 2’de yer almaktadır.

Tablo 2. Darboğaz tespiti kapsamında literatürde yer alan çalışmalar

Referans	Kullanılan Yöntem	Açıklama
Li ve diğ. (2007)	Dönüm Noktası Yöntemi	Seri üretim hattı darboğazını tespit etmek için veriye dayalı yöntem önerilmiştir. Üretimdeki tıkanma ve açlık ölçümlerinin darboğaz tanımlamasında önemli rol oynadığı gösterilmiştir.
Muthiah ve Huang (2007)	Genel Verim Etkinliği (OTE)	Fabrika düzeyinde performans izleme ve tanılama için geliştirilmiş Genel Verim Etkinliği (Overall Throughput Effectiveness, OTE) metriği sunulmuştur. Bir vaka çalışması, darboğazın ve iyileştirme fırsatlarının nicel olarak tanımlanabileceğini göstermiştir.
Lima ve diğ. (2008)	Benzetim	Belirli bir duruma uygulanacak darboğaz tespit yönteminin seçimine yardımcı olmak için benzetime dayalı bir yöntem sunmaktadır.
Sengupta ve diğ. (2008)	Kalkışlar Arası Süre Yöntemi	Darboğazı belirlemek ve sıralamak için farklı makinelerden kalkışlar arası süre analiz edilir. Durağan ve durağan olmayan durum verilerini analiz etmek için kullanılabilir.
Li ve diğ. (2009a)	Dönüm Noktası Yöntemi	Seri üretim hattı darboğazını tespit etmek için veriye dayalı yöntem önerilmiştir. Üretim tıkanık ve açlık ölçümlerinin darboğaz tanımlamasında önemli bir rol oynadığı gösterilmiştir.
Leporis ve Králová (2010)	Kesikli Olay Benzetimi	Kesikli Olay Benzetimi yaklaşımı kullanılarak üretim hattı darboğaz analizi için çeşitli yöntemlerin karşılaştırmasını sunmaktadır. Kritiklik göstergelerine dayalı yöntem diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında iyi sonuçlar vermektedir.
Zhai ve diğ. (2010)	Ortogonal Deney	Yöntem, üretim sisteminin amacını tahmini indeks olarak alır, bu indeks üzerinde en büyük etkiye sahip olan darboğaz makinesini tespit etmek için farklı sevk kurallarını birleştirerek sistem çalışmadan önce darboğazı tespit edebilir.
Zhai ve diğ. (2011)	Ortogonal Deney	Çizelgeleme perspektifinden atölye için ortogonal deneye dayalı yeni bir çalıştırma öncesi darboğaz tespit yöntemi önerilmiştir. Sonuçlar, çalıştırma öncesi darboğaz tespit yönteminin verimli olduğunu göstermektedir.
Betterton ve Silver (2012)	Kesikli Olay Benzetimi	Kesikli olay benzetimi kullanılarak, sonlu tamponlara sahip, açık, asenkron seri üretim hatlarında yeni bir darboğaz tespit yöntemi tanımlanmış ve doğrulanmıştır.
Lemessi ve diğ. (2012)	Benzetim	Önceden tanımlanmış darboğaz tespit yöntemlerini tek bir yaklaşımda birleştiren yarı otomatik (semi-automatic) benzetim tabanlı darboğaz tespit yaklaşımı sunulmaktadır.
Kwon ve Lim (2013)	Aktif Dönem Yöntemi	Sınırlı arabellek boyutuna sahip akış atölyesi üretim sistemine aktif döneme dayalı bir darboğaz tespit yöntemi uygulanmaktadır.
Zhou ve Li (2013)	Sezgisel Yöntem	Üretim kısıtlaması altında gerçek zamanlı talep için darboğaz tespitini dikkate alan sezgisel bir yöntem tanıtılmaktadır. Sayısal durum çalışması önerilen yöntemin etkinliğini göstermiştir.
Roser ve diğ. (2014)	Darboğaz Yürüyüşü Yöntemi	Önerilen yöntem ile bir sistem içindeki çoklu süreç durumlarının ve envanter seviyelerinin gözlemleriyle, belirli bir zamanda darboğazın yönünü belirlemek ve dolayısıyla sistemdeki anlık darboğazı bulmak mümkündür.
Yu ve Matta (2014)	İstatistiksel Yaklaşım	Veriye dayalı darboğaz tespit prosedürlerinin yanlışlığını azaltmak için bir istatistiksel çerçeve önerilmektedir. Yöntem, yalnızca benimsenen darboğaz tespit yöntemi tarafından kullanılan saha kayıtları gerektirir ve literatürde önerilen tüm darboğaz tespit yöntemlerine uygulanabilir.

Tablo 2. Darboğaz tespti kapsamında literatürde yer alan çalışmalar (Devamı)

Referans	Kullanılan Yöntem	Açıklama
Zhao ve diğ. (2014)	Genetik Algoritmalar	Karmaşık üretim montaj hattında maksimum çalışma kapasitesine dayalı yeni bir darboğaz tespt algoritması önerilmiş ve sayısal olarak doğrulanmıştır. Algoritmanın etkinliğini ve uygulanabilirliğini göstermek için benzetim örneği üzerine bir vaka çalışması sunulmuştur.
Roser ve Nakano (2015)	Kullanım, Aktif Dönem, Bekleme Süresi, Dönüm Noktası, Darboğaz Yürüyüşü	Darboğaz tespti için bir dizi yöntem karşılaştırılmaktadır. Sunulan yöntemlerden aktif dönem yöntemi, veri açısından zengin ortamlar için özellikle çok uygundur, darboğaz yürüyüşü ise atölye tabanlı bir gözlem için en uygunudur sonucuna varılmıştır.
Wedel ve diğ. (2015)	Arıza Onarım Önceliklendirme Yaklaşımı	Tanıtılan gerçek zamanlı darboğaz tespt yöntemi, gerçek zamanlı darboğazı tespt etmenin yanı sıra, bir makinenin darboğaz olana kadar kalan süreyi göstererek yakın gelecekte ortaya çıkacak bir tahmin darboğazı verme avantajına sahiptir.
Subramaniyan ve diğ. (2016)	Aktif Dönem Yöntemi	Gerçek zamanlı atölye verilerine dayalı olarak darboğazı belirlemek için makinelerin ortalama etkin süresini inceleyen gerçek zamanlı, veriye dayalı bir algoritma sunar.
Wedel ve diğ. (2016)	Arıza Onarım Önceliklendirme Yaklaşımı	Tanıtılan üç yeni darboğaz tespt yöntemi, kısa vadeli ve gerçek zamanlı darboğazın yanı sıra yakın gelecekteki darboğazların tesptine odaklanmaktadır.
Kang ve Ju (2017)	Matematiksel Yaklaşım	Birden fazla geometrik makine ve sonlu tampon içeren seri üretim hatları için sistem darboğazını analiz etmek ve tespt etmek için pratik bir karar verme aracı geliştirilmiştir.
Velumani ve Tang (2017)	Ayrık Olay Benzetimi	Çalışma, benzetime dayalı ürün ve süreç değişkenleri ile orta düzeyde karmaşık bir toplu işlemeyi ele almaktadır. Benzetim çalışmasında aynı ve farklı partiler, kullanım ve işlem süresi, üretim değişkenleri ve termin önceliği ile karşılaştırılır. Benzetim çıktıları, belirli bir parti boyutunda üretim darboğazlarını tespt etmeye yardımcı olur.
Yemane ve diğ. (2017)	Benzetim	Bu çalışma, benzetim teknikleri ve zaman etüdü kullanarak darboğaz tespti ile ilgilenmektedir. Arena yazılımı ile bir üretim hattının benzetim modellemesi yapılmıştır. Kaynak kullanımı ve kuyrukta bekleyen ürün sayısına göre darboğaz tespti gerçekleştirilmiştir.
Li (2018)	Matematiksel Yaklaşım	Genel seri üretim sistemleri için katı matematiksel kanıtlara dayalı yeni bir veri odaklı darboğaz tespt yöntemi önerilmiş ve teorik olarak ispatlanmıştır.
Ongbali ve diğ. (2018)	Fourier Dönüşümü	Üretim çıktı ölçümlerindeki frekans içeriğinin yapısı aracılığıyla üretim sistemindeki darboğazı tespt etmek için bütünsel olarak değerlendirmeyi amaçlamaktadır.
Roh ve diğ. (2018)	Veriye Dayalı Yaklaşım	Çok değişkenli üretim hatlarında dinamik darboğazın tespti için üretim katındaki makinelerden alınan döngü süresi verilerini kullanarak darboğazı dinamik ve otomatik olarak algılayan veri odaklı bir yöntem önerilmektedir.
Subramaniyan ve diğ. (2018b)	Aktif Dönem Yöntemi	Darboğazı tespt etmek için aktif dönem yöntemine dayalı bir algoritma önerilmektedir. Makinelerden gelen mevcut üretim yürütme sistemleri (Manufacturing Execution System, MES) verilerini entegre eder ve tespt edilen herhangi bir darboğazın istatistiksel önemini test eder.
Thomas ve diğ. (2018)	Makine Öğrenmesi	İşlerin periyodik olarak sıralandığı gerçekçi bir uzantıyla İş Atölyesi Çizelgeleme Problemleri incelenmiştir ve MINERVA adlı makine öğrenmesi tabanlı bir çözüm önerilmiştir.
Zhang ve Matta (2018)	Kesikli Olay Optimizasyonu	Saha verilerini kullanan Kesikli Olay Optimizasyonu (Discrete Event Optimization) modelleme çerçevesine dayalı olarak açık akış hatlarında darboğaz tespt yaklaşımı önerilmektedir.
Alzubi ve diğ. (2019)	Kullanım Yöntemi, Bekleme Süresi Yöntemi, Benzetim	Darboğazı tespt etmek için gereken verileri sağlamak için bir benzetim modeli oluşturulmuştur. Üretim hatlarından ve benzetim modelinden toplanan veriler üzerine kullanım yöntemi ve bekleme süresi yöntemi olmak üzere iki darboğaz tespt yöntemi kullanılmaktadır.
Esmaceli ve Aleahmad (2019)	Yüksek Seviyeli Petri Ağları	Atölye üretim sistemindeki yüksek seviyeli petri ağları ile darboğazın tespt edilmesine dayanmaktadır. Yöntem, gelecekteki çalışmalarda yöntemleri optimize ederek sistemi çalıştırmadan önce darboğazdan kaçınmak için atölye üretim sürecini izlemeyi sağlamaktadır.

Tablo 2. Darboğaz tespiti kapsamında literatürde yer alan çalışmalar (Devamı)

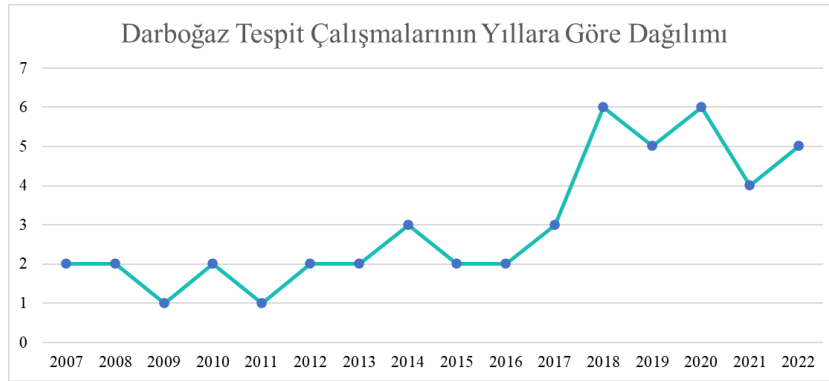
Referans	Kullanılan Yöntem	Açıklama
Hofmann ve diğ. (2019)	Karma Gerçeklik	Çalışma, üretim hatlarında darboğaz tespiti için karma gerçeklik kullanan gerçek zamanlı KPI görselleştirmesi için bir yaklaşım sunmaktadır. Uygulama, iş istasyonlarını tanımlamak için görüntü tanımayı kullanır ve artırılmış gerçeklikte döngü sürelerini ve devam eden işleri görselleştirir. Darboğazın tespiti, sadece olağandışı hareketler ve yüksek tamponlar gözlemlenerek, çevrim sürelerine erişim olmadan da mümkün olmaktadır.
Singh ve Thathia (2019)	Dönüm Noktası Yöntemi	Çalışmanın amacı, esnek bir üretim sistemi için gerçek zamanlı verilere dayalı darboğaz tespitine yönelik bir yaklaşım göstermektir. Dönüm noktası darboğaz tespit yöntemi seçilmiştir.
Tang (2019)	Genel Ekipman Etkinliği (OEE)	Karmaşık üretim sistemlerinin darboğazını tespit etmek için genel ekipman etkinliğine (Overall Equipment Efficiency, OEE) dayalı bir yöntem önermektedir. Yöntem, iyileştirme çabalarına rehberlik edebilecek bir üretim sisteminin yetkinliğini ortaya çıkarabilir.
Lizarralde-Aiastui ve diğ. (2020)	Kısıtlar Teorisi	Bu çalışma, sipariş üzerine üretim sistemlerindeki darboğaz tespiti için stratejik bir bakış açısı sağlamaya odaklanmaktadır. Sistematik süreç, sipariş üzerine üretim yapan bir şirket üzerinde bir vaka çalışması aracılığıyla başarılı bir şekilde test edilmiştir.
Nandakumar ve diğ. (2020)	Altı Sigma, DMAIC	Çalışma, bir gıda işleme endüstrisinde yürütülen üretim ve paketleme süreçlerine odaklanan bir çalışmanın sonucudur. Çalışmanın amacı, bu süreçlerdeki darboğazı altı sigma ve DMAIC (define, measure, analyze, improve, control; tanımla, ölç, analiz et, iyileştir, kontrol et) yöntemleriyle tespit etmek ve ortadan kaldırmaktır.
Subramaniyan ve diğ. (2020a)	Hiyerarşik Kümeleme Yaklaşımı	Darboğazı tespit etmek için genel, denetimsiz bir makine öğrenmesi tabanlı hiyerarşik kümeleme yaklaşımı önerilmektedir.
Subramaniyan ve diğ. (2020b)	Makine Öğrenmesi	Çalışmanın amacı, bakım ve veri bilimi alanlarının birleşik bilgisini kullanarak darboğazı tespit etmek için veri odaklı bir yaklaşım göstermektir. Darboğaza ilişkin tanımlama öngörülleri, denetimsiz makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak elde edilir.
Tu ve diğ. (2020)	Matematiksel Yaklaşım	Çalışma, dinamik bir ortamda darboğaz problemini incelemektedir. Sonlu kapasiteli tamponlara ve Bernoulli güvenilirlik makinelerine sahip seri üretim hatlarını ele alır, darboğaz tespiti kararlı durum veriminin maksimizasyonu hedefiyle kontrol-teorik bir yaklaşım kullanılmaktadır.
Urban ve Rogowska (2020)	Kısıtlar Teorisi	Bir üretim sistemindeki darboğazın tespit edilmesi için bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemin kilit aşaması, üretim akışının derinlemesine bir analizi ve süreçlere bölünmesidir.
Hao ve Lin (2021)	Metin Madenciliği (N-gram Modelleme Yaklaşımı)	Bir üretim hattında darboğaza aday olabilecek makineleri tespit etmek için veri setlerini analiz etmede N-gram modelleme yaklaşımı benimsenmiştir. Adaylara göre, darboğaz verileri orijinal veri setlerinden çıkarılmıştır ve karma tamsayılı programlama modeli ile akış atölyesi olarak çözülmüştür.
Lai ve diğ. (2021)	Dönüm Noktası Yöntemi	Seri olmayan karmaşık üretim sistemlerde darboğaz tespiti için sistematik bir yaklaşım önerilmektedir. Dönüm noktası yöntemini karmaşık üretim sistemlerine kadar genişletir.
Roser ve diğ. (2021)	Aktif Dönem Yöntemi, Değişen Darboğaz Yöntemi	Aktif dönem darboğaz tespit yöntemi, veri tabanlı değişen darboğaz tespit yöntemi ile birlikte kullanılmış ve geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma, herhangi bir zamanda en uzun aktif dönemi belirlemek için gerçek zaman aralıklarını kullanarak analizin doğruluğunu artırır.
Thürer ve diğ. (2021)	Düzeltilmiş ve Maksimum İş Yüğü, Kullanım Yöntemi, Aktif Dönem Yöntemi, Kalkışlar Arası Süre Yöntemi	Yüksek çeşitlilikte sipariş üzerine üretim yapan bir mağazada beş farklı darboğaz tespit yönteminin performansını değerlendirmek için benzetim yöntemi kullanır. Sonuçlar, etkin sürenin veya kullanım yönteminin, kuyruk durumuna odaklanan bir darboğaz tespit yönteminden daha iyi bir seçim olduğunu göstermektedir.
Kumbhar ve diğ. (2022)	Veri Entegrasyonu, Süreç Madenciliği, Kesikli Olay Benzetimi	Darboğazı tespit etmek için fabrika fiziğine dayalı veri entegrasyonu, süreç madenciliği ve analitik tekniğinden yararlanan veri odaklı bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntemi test etmek için kesikli bir olay benzetim modelinin oluşturulduğu ve doğrulandığı endüstriyel bir senaryo üzerinde bir vaka çalışması yapılmıştır.

Tablo 2. Darboğaz tespiti kapsamında literatürde yer alan çalışmalar (Devamı)

Referans	Kullanılan Yöntem	Açıklama
McClelland (2022)	Makine Öğrenmesi	Bir tesiste veriye dayalı darboğaz tespitine yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Veri hattında toplanan hata istatistikleri, ilk ilkeler ve denetimsiz öğrenme teknikleri kullanılarak darboğaz tespiti gerçekleştirilmiştir.
Rudnitckaia ve diğ. (2022)	Zaman Gecikmesi Yöntemi, Güven Aralığı Yöntemi	Çalışma, süreçte en çok zaman alan yerleri ve bunların nedenlerini bulmaya odaklanmıştır. Geliştirdikleri zaman gecikmesi yöntemini ve güven aralığı yöntemini kullanarak, iş akışı veri kümesindeki darboğazları tespit ederek ve aşağı veya yukarı akış sürecinin neden olduğu işlem ve gecikmeye dayalı olarak darboğazların temel nedenini bulmaktadır.
Su ve diğ. (2022)	Dönüm Noktası Yöntemi, Benzetim	Darboğazı doğru bir şekilde tespit etmek için etkili arabelleklere ve makine durumlarına dayanan dinamik bir darboğaz tespit yöntemi önerilmiştir. Yapılan benzetim çalışması yöntemin üretim süreçlerindeki dinamik darboğazları etkin bir şekilde tespit edebildiğini göstermektedir.
Zhang ve diğ. (2022)	Renkli Petri Ağları, Bulut Benzetimi	Bir üretim sisteminde darboğazı dinamik olarak tespit etmek için, nesne yönelimli renkli Petri ağları ve bulut benzetimini birleştirerek akıllı bir darboğaz tespit yöntemi önerilmiştir. Yöntem güç trafosu endüstrisinden pratik bir vaka çalışmasında uygulanmış ve doğrulanmıştır.

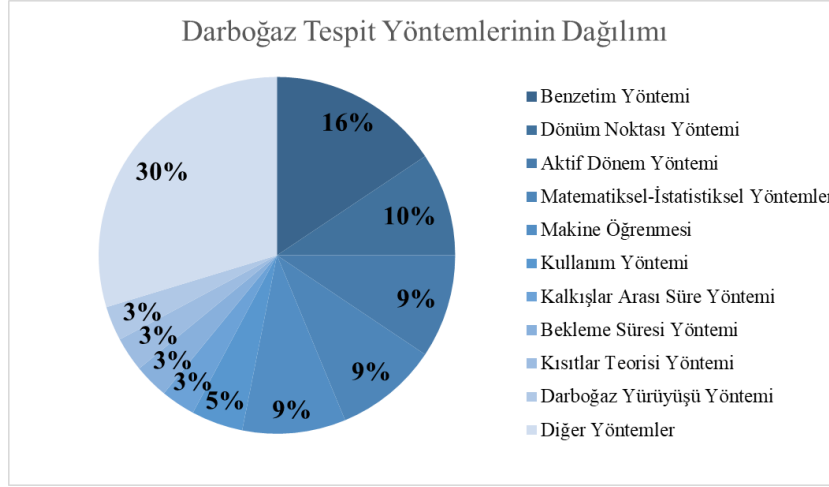
5. LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu başlık altında literatürde incelenen çalışmalarda kullanılan yöntemler ve yapılan çalışmaların yıllara göre değerlendirilmesi yapılmıştır. Şekil 7'ye göre yapılan çalışmaların 2016 yılından sonra artış gösterdiği ve bu konuda gerçekleştirilmiş çalışmaların en fazla 2018 ve 2020 yıllarında yapıldığı görülmektedir.

**Şekil 7:**

İncelenen Darboğaz Tespit Çalışmalarının Yıllara Göre Dağılımı

İncelenen çalışmalar özelinde darboğaz tespiti için kullanılan yöntemlerin dağılımları Şekil 8'deki gibidir. Yapılan çalışmada darboğaz tespiti için çok sayıda farklı yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemler arasından %16 ile benzetim tabanlı yöntemlerin en çok tercih edilen yöntem olduğu görülmektedir. Bu sıralamayı %10 ile dönüm noktası yöntemi, %9 ile aktif dönem yöntemi, matematiksel yöntemler ve makine öğrenmesi tabanlı yöntemler takip etmektedir.



Şekil 8:
İncelenen Çalışmalarda Kullanılan Darboğaz Tespit Yöntemlerinin Dağılımı

İncelenen çalışmalarda 2018 yılı ve sonrasında darboğaz tespiti için makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımların kullanımının arttığı gözlemlenmiştir. Benzetim modelleri, dönüm noktası yöntemi ve aktif dönem yöntemleri incelenen zaman aralığına homojen şekilde dağılmaktadır. Son yıllarda yapılan darboğaz tespit çalışmalarında yine bu yöntemlerin kullanımına yer verilmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bir darboğaz, üretim süresi ve maliyetinde önemli ölçüde artışa sebebiyet vererek üretim verimliliğini düşürebilir. Darboğaz tespitinin ardından analiz edilmesi ve iyileştirme çalışmalarının gerçekleştirilmesi darboğazın sistem üzerindeki olumsuz etkisini azaltacaktır. Bu çalışmada darboğaz tespiti üzerine yapılan çalışmalarda kullanılan yöntemlerin tanımlamaları yapılmıştır. Tarama sonucunda benzetim temelli yöntemlerin yanı sıra dönüm noktası ve aktif dönem yöntemleri ile matematik ve istatistik tabanlı yaklaşımların çoğunlukta kullanıldığı görülmektedir. Son yıllarda ise bu yöntemlerin yerini makine öğrenmesi teknikleri almaya başlamıştır. Endüstri 4.0 ile birlikte yaygınlaşan üretim sistemlerinde yapay zeka ve makine öğrenmesi kavramlarının kullanımı giderek artış göstermektedir. Gelişen akıllı fabrikalarla birlikte kullanımı artan nesnelerin interneti (IoT) ve sensör teknolojileri üretim sistemlerini gerçek zamanlı veriler üzerinden analiz etmeye yardımcı olmaktadır. Gerçek zamanlı toplanan çok sayıda verinin oluşturduğu büyük veri setleri bulut bilişim ile birlikte üretim sistemlerinin analizinde daha anlamlı sonuçlar elde etmek için kullanılmaktadır. Birbiriyle haberleşen makinelerin artışı, gelişen büyük veri bazlı makine öğrenmesi ve derin öğrenme kavramlarıyla birlikte üretimde darboğaz tespitinin de akıllı sistemler aracılığıyla yapılacağı ve daha doğru tespitlerde bulunulacağı düşünülmektedir. Gelecek çalışmalarda makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemlerinin darboğaz tespitinde daha çok kullanılacağı ve daha iyi sonuçların elde edilebileceği öngörülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın 1. Yazarı TÜBİTAK 2211-A Yurt İçi Doktora Burs Programı tarafından desteklenmektedir. Ancak yayın ile ilgili tüm sorumluluk yayının sahibine aittir. Yayının içeriğinin bilimsel anlamda TÜBİTAK tarafından onaylandığı anlamına gelmez.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Bu araştırmada Nagihan AKKURT bilimsel yayın araştırması, makale metninin yazımı; Servet HASGÖL makalenin gelişmesinde fikri katkının sağlanması, makalenin genel kontrolünün yapılması konularında katkı sağlamıştır.

NOT

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında devam eden 2. Yazarın danışmanlığında 1. Yazara ait doktora tezinden üretilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Alzubi, E., Atieh, A. M., Abu Shgair, K., Damiani, J., Sunna, S. and Madi, A. (2019) Hybrid integrations of value stream mapping, theory of constraints and simulation: application to wooden furniture industry, *Processes*, 7(11), 816. doi: 10.3390/pr7110816
2. Bernedixen, J. (2018) Automated bottleneck analysis of production systems: increasing the applicability of simulation-based multi-objective optimization for bottleneck analysis within industry, *Doctoral Thesis*, University of Skövde.
3. Betterton, C.E. and Cox, J.F. (2009) Espoused drum-buffer-rope flow control in serial lines: a comparative study of simulation models, *International Journal of Production Economics*, 117(1), 66–79. doi: 10.1016/j.ijpe.2008.08.050
4. Betterton, C.E. and Silver, S.J. (2012) Detecting bottlenecks in serial production lines—a focus on interdeparture time variance, *International Journal of Production Research*, 50(15), 4158–4174 doi: 10.1080/00207543.2011.596847
5. Biller, S., Li, J., Marin, S. P., Meerkov, S. M. and Zhang, L. (2009) Bottlenecks in Bernoulli serial lines with rework, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 7(2), 208–217. doi: 10.1109/TASE.2009.2023463
6. Blackstone, J.H. (2008) APICS dictionary, *Chicago: APICS The Association for Operations Management*.
7. Chiang, S.Y., Kuo, C.T. and Meerkov, S.M. (2001) C-bottlenecks in serial production lines – identification and application, *Mathematical Problems in Engineering*, 7, 543–578. doi: 10.1155/S1024123X01001776
8. Esmaeeli, H. and Aleahmad, M. (2019) Bottleneck detection in job shop production by high-level Petri nets, In 2019 *15th Iran International Industrial Engineering Conference (IIIEC)*, 178–183. doi: 10.1109/IIIEC.2019.8720639
9. Hao, P.C. and Lin, B.M. (2021) Text mining approach for bottleneck detection and analysis in printed circuit board manufacturing, *Computers & Industrial Engineering*, 154, 107121. doi: 10.1016/j.cie.2021.107121
10. Hofmann, C., Staehr, T., Cohen, S., Stricker, N., Haefner, B. and Lanza, G. (2019) Augmented go & see: an approach for improved bottleneck identification in production lines, *Procedia Manufacturing*, 31, 148–154. doi: 10.1016/j.promfg.2019.03.023

11. Hopp, W.J. and Spearman, M.L. (2000) Factory physics, 2nd ed. New York, NY: McGraw-Hill.
12. Kang, Y. and Ju, F. (2017) Identifying bottlenecks in serial production lines with geometric machines: indicators and rules, *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 13952-13957. doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.2217
13. Kumbhar, M., Ng, A.H. and Bandaru, S. (2022) Bottleneck detection through data integration, process mining and factory physics-based analytics, *In 10th Swedish Production Symposium (SPS2022)*, Skövde, 737-748. doi:10.3233/ATDE220192
14. Kuo, C.T., Lim, J.T. and Meerkov, S.M. (1996) Bottlenecks in serial production lines: a system-theoretic approach, *Mathematical Problems in Engineering*, 2, 233–276. doi: 10.1155/S1024123X96000348
15. Kwon, C.M. and Lim, S. (2013) Bottleneck detection based on duration of active periods, *Journal of The Korea Society for Simulation*, 22(3), 35-41. doi: 10.9709/JKSS.2013.22.3.035
16. Lai, X., Shui, H., Ding, D. and Ni, J. (2021) Data-driven dynamic bottleneck detection in complex manufacturing systems, *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 662-675. doi: 10.1016/j.jmsy.2021.07.016
17. Lawrence, S.R. and Buss, A.H. (1994) Shifting production bottlenecks: causes, cures, and conundrums, *Production and Operations Management*, 3(1), 21–37. doi: 10.1111/j.1937-5956.1994.tb00107.x
18. Lemessi, M., Rehbein, S., Rehn, G. and Schulze, T. (2012) Semi-automatic simulation-based bottleneck detection approach, *In Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)*, 1-12. doi: 10.1109/WSC.2012.6465048
19. Leporis, M. and Králová, Z. (2010) A simulation approach to production line bottleneck analysis, *In International Conference Cybernetics and Informatics*, 13-22.
20. Li, L., Chang, Q., Ni, J., Xiao, G. and Biller, S. (2007) Bottleneck detection of manufacturing systems using data driven method, *In 2007 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing*, 76-81. doi: 10.1109/ISAM.2007.4288452
21. Li, L., Chang, Q., Ni, J. and Biller, S. (2009a) Real time production improvement through bottleneck control, *International Journal of Production Research*, 47(21), 6145-6158. doi: 10.1080/00207540802244240
22. Li, L., Chang, Q. and Ni, J. (2009b) Data driven bottleneck detection of manufacturing systems, *IntJ Prod Res*, 47, 5019–5036. doi: 10.1080/00207540701881860
23. Li, L. (2018) A systematic-theoretic analysis of data-driven throughput bottleneck detection of production systems, *Journal of Manufacturing Systems*, 47, 43-52. doi: 10.1016/j.jmsy.2018.03.001
24. Lima, E., Chwif, L. and Barreto, M.R.P. (2008) Metodology for selecting the best suitable bottleneck detection method, *In 2008 Winter Simulation Conference*, 1746-1751. doi: 10.1109/WSC.2008.4736262
25. Lizarralde-Aiastui, A., Apaolaza-Perez de Eulate, U. and Mediavilla-Guisasola, M. (2020) A strategic approach for bottleneck identification in make-to-order environments: A drum-buffer-rope action research based case study, *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 13(1), 18-37. doi: 10.3926/jiem.2868
26. McClelland, G. (2022) Data-driven bottleneck identification for serial production lines, *Doctoral Thesis*, Queen's University, Canada.

27. Muthiah, K.M.N. and Huang, S.H. (2007) Overall throughput effectiveness (OTE) metric for factory-level performance monitoring and bottleneck detection, *International Journal of Production Research*, 45(20), 4753-4769. doi: 10.1080/00207540600786731
28. Nandakumar, N., Saleeshya, P. G. and Harikumar, P. (2020) Bottleneck identification and process improvement by lean six sigma DMAIC methodology, *Materials Today: Proceedings*, 24, 1217-1224. doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.436
29. Ongbali, S.O., Afolalu, S.A. and Igboanugo, A.C. (2018) Bottleneck problem detection in production system using Fourier transform analytics, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 9(12), 113-122.
30. Roh P., Kunz, A. and Netland, T. (2018) Data-driven detection of moving bottlenecks in multi-variant production lines, *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 158-163. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.251
31. Roser, C., Lorentzen, K. and Deuse, J. (2014) Reliable shop floor bottleneck detection for flow lines through process and inventory observations, *Procedia Cirp*, 19, 63-68. doi: 10.1016/j.procir.2014.05.020
32. Roser, C., Nakano, M. and Tanaka, M. (2001) A practical bottleneck detection method, *In Proceeding of the 2001 Winter Simulation Conference*, 2, 949-953. doi: 10.1109/WSC.2001.977398
33. Roser, C., Nakano, M. and Tanaka, M. (2002) Shifting bottleneck detection, *Winter Simulation Conference*. doi: 10.1109/WSC.2002.1166360
34. Roser, C., Nakano, M. and Tanaka, M. (2003) Comparison of bottleneck detection methods for AGV systems, *In Winter Simulation Conference*, 2, 1192-1198. doi: 10.1109/WSC.2003.1261549
35. Roser, C. and Nakano, M. (2015) A quantitative comparison of bottleneck detection methods in manufacturing systems with particular consideration for shifting bottlenecks, *In IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*, 273-281. doi: 10.1007/978-3-319-22759-7_32
36. Roser, C., Subramaniyan, M., Skoogh, A. and Johansson, B. (2021) An enhanced data-driven algorithm for shifting bottleneck detection. *In IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*, 683-689. doi: 10.1007/978-3-030-85874-2_74
37. Rudnitchkaia, J., Venkatachalam, H. S., Essmann, R., Hruška, T., and Colombo, A. W. (2022) Screening process mining and value stream techniques on industrial manufacturing processes: process modelling and bottleneck analysis. *IEEE Access*, 10, 24203-24214. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3152211
38. Sengupta, S., Das, K. and Vantil, R.P. (2008) A new method for bottleneck detection, *In 2008 Winter Simulation Conference*, 1741-1745. doi: 10.1109/WSC.2008.4736261
39. Singh, M. and Thathia, H. (2019) Analytic tool for identifying bottlenecks using turning point method, *Master's Thesis*, Chalmers University of Technology.
40. Su, X., Lu, J., Chen, C., Yu, J. and Ji, W. (2022) Dynamic bottleneck identification of manufacturing resources in complex manufacturing system, *Applied Sciences*, 12(9), 4195. doi: 10.3390/app12094195
41. Subramaniyan, M., Skoogh, A., Gopalakrishnan, M. and Hanna, A. (2016) Real-time data-driven average active period method for bottleneck detection, *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 11(3), 428-437. doi: 10.2495/DNE-V11-N3-428-437

42. Subramaniyan, M., Skoogh, A., Salomonsson, H., Bangalore, P. and Bokrantz, J. (2018a) A data-driven algorithm to predict throughput bottlenecks in a production system based on active periods of the machines, *Computers & Industrial Engineering*, 125, 533-544. doi: 10.1016/j.cie.2018.04.024
43. Subramaniyan, M., Skoogh, A., Salomonsson, H., Bangalore, P., Gopalakrishnan, M. and Sheikh Muhammad, A. (2018b) Data-driven algorithm for throughput bottleneck analysis of production systems, *Production & Manufacturing Research*, 6(1), 225-246. doi: 10.1080/21693277.2018.1496491
44. Subramaniyan, M., Skoogh, A., Muhammad, A. S., Bokrantz, J., Johansson, B. and Roser, C. (2020a) A generic hierarchical clustering approach for detecting bottlenecks in manufacturing, *Journal of Manufacturing Systems*, 55, 143-158. doi: 10.1016/j.jmsy.2020.02.011
45. Subramaniyan, M., Skoogh, A., Muhammad, A. S., Bokrantz, J., Johansson, B. and Roser, C. (2020b) A data-driven approach to diagnosing throughput bottlenecks from a maintenance perspective, *Computers & Industrial Engineering*, 150, 106851. doi: 10.1016/j.cie.2020.106851
46. Tang, H. (2019) A new method of bottleneck analysis for manufacturing systems, *Manufacturing Letters*, 19, 21-24. doi: 10.1016/j.mfglet.2019.01.003
47. Thomas, T.E., Koo, J., Chaterji, S. and Bagchi, S. (2018) Minerva: A reinforcement learning-based technique for optimal scheduling and bottleneck detection in distributed factory operations, *In 2018 10th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS)*, 129-136. doi: 10.1109/COMSNETS.2018.8328189
48. Thürer, M., Ma, L., Stevenson, M. and Roser, C. (2021) Bottleneck detection in high-variety make-to-order shops with complex routings: an assessment by simulation, *Production Planning & Control*, 1-12. doi: 10.1080/09537287.2021.1885795
49. Tu, J., Bai, Y., Yang, M., Zhang, L. and Denno, P. (2020) Real-time bottleneck in serial production lines with bernoulli machines: theory and case study, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 18(4), 1822-1834. doi: 10.1109/TASE.2020.3021346
50. Urban, W., and Rogowska, P. (2020) Methodology for bottleneck identification in a production system when implementing TOC, *Engineering Management in Production and Services*, 12(2), 74-82. doi: 10.2478/emj-2020-0012
51. Velumani, S., and Tang, H. (2017) Operations status and bottleneck analysis and improvement of a batch process manufacturing line using discrete event simulation, *Procedia Manufacturing*, 10, 100-111. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.03
52. Wedel, M., Noessler, P. and Metternich, J. (2016) Development of bottleneck detection methods allowing for an effective fault repair prioritization in machining lines of the automobile industry, *Production Engineering*, 10(3), 329-336. doi: 10.1007/s11740-016-0672-9
53. Wedel, M., Von Hacht, M., Hieber, R., Metternich, J. and Abele, E. (2015) Real-time bottleneck detection and prediction to prioritize fault repair in interlinked production lines, *Procedia CIRP*, 37, 140-145. doi: 10.1016/j.procir.2015.08.071
54. Yemane, A., Haque, S. and Malfanti, I. S. (2017) Bottleneck identification using time study and simulation modeling of apparel industries, *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Bogota, Colombia*.

55. Yu, C. and Matta, A. (2014) Data-driven bottleneck detection in manufacturing systems: A statistical approach, *In 2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 710-715. doi: 10.1109/CoASE.2014.6899406
56. Zhai, Y., Sun, S., Wang, J. and Wang, M. (2010) An effective bottleneck detection method for job shop, *In 2010 International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering*, 2, 198-201. doi: 10.1109/CCIE.2010.168
57. Zhai, Y., Sun, S., Wang, J. and Niu, G. (2011) Job shop bottleneck detection based on orthogonal experiment, *Computers & Industrial Engineering*, 61(3), 872-880. doi: 10.1016/j.cie.2011.05.021
58. Zhang, M. and Matta, A. (2018) Data-driven downtime bottleneck detection in open flow lines, *In 2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 1513-1518. doi: 10.1016/j.cie.2011.05.021
59. Zhang, Y., Luo, Z., Zeng, L. and Li, C. (2022) Bottleneck detection for discrete manufacturing system based on object-oriented colored petri nets and cloud simulation. *In ITM Web of Conferences, EDP Sciences*, 45. doi:10.1051/itmconf/20224501015
60. Zhao D., Tian X. and Geng J. (2014) A bottleneck detection algorithm for complex product assembly line based on maximum operation capacity, *Mathematical Problems in Engineering*. doi: 10.1155/2014/258173
61. Zhou, Z. and Li, L. (2013) Real time electricity demand response for sustainable manufacturing systems considering throughput bottleneck detection, *In 2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 640-644. doi: 10.1109/CoASE.2013.6653942