



Sadeleştirilmiş kısıt-tampon-bağ (S-DBR) ve yalın-hat dengesi yöntemlerinin simülasyonla kıyaslanması

Benchmarking of S-DBR and lean-line balancing methods by simulation

Batuhan Kocaoğlu¹ , Utkan Uluçay^{2,*} 

¹ Piri Reis Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, 34940, İstanbul Türkiye

² Maltepe Üniversitesi, Lojistik ve Tedarik Zinciri Yönetimi Bölümü, 34857, İstanbul, Türkiye

Öz

Geleneksel yaklaşımda işlem süreleri sabitken Yalın-hat dengesiyle gelir artışı sağlanacağı çok kaynakta kabul görmektedir. Bu çalışmanın amacı, işlem süresi değişken olduğunda S-DBR (Simplified Drum Buffer Rope: Sadeleştirilmiş Kısıt Tampon Bağ) yaklaşımının daha iyi sonuç vereceğini göstermektir. Bu amaçla Yalın-hat dengesi ve S-DBR temel kurguları simülasyonla modellenerek işlem sürelerinin değişken olduğu senaryoda kıyaslanmış ve istatistik değerlendirmesi yapılmıştır. İşlem sürelerinde değişkenlik varken Yalın-hat dengesinde gününde teslim oranı %100' den %82' ye düşmüştür. S-DBR yöntemiyle değişkenliğe rağmen %84 gününde teslim oranıyla net gelirden %4, üretimde %3 artış elde edilmiştir. Dolayısıyla sadece üretim planlama ve yönetim metodunun değiştirilmesiyle, ilave yatırım gerektirmeden iş ortamındaki değişkenliğe daha dayanıklı ve daha rekabetçi olmak mümkündür. Çalışmanın özgünlüğü, üretim firmaları için Kısıtlar Teorisindeki uygun üretim çözümünün seçimi, S-DBR yönteminin uygulama ve iyileştirme algoritmalarının literatür senteziyle oluşturulması, istatistiksel uygulanabilirlik değerlendirmesi ve gelecek araştırmalar için içgörü oluşturmalarıdır.

Anahtar kelimeler: Kısıtlar teorisi, S-DBR, Yalın, hat dengesi, simülasyon

1 Giriş

İkinci Dünya Savaşı'ndan bugüne gelirken arz artık talebi aşmış ve paradigma değişmiştir [1]. Ayrıca serbest ticaret dönemine giriş, internet çağının başlaması ve tedarik zincirlerinin gelişimi gibi sebepler aynı müşterilere ulaşmak isteyen üreticiler arasında rekabetin artmasına neden olmuştur. Dolayısıyla siparişleri gününde teslim edebilecek (DDP: Due Date Performance: Gününde Teslim%) şekilde sistemlerin iyileştirilmesi önemli bir rekabet avantajı haline gelmiştir.

İyileştirilmeler maliyet tasarrufuyla başlamış, MRP I (Material Requirements Planning: Malzeme İhtiyaç Planlaması), MRP II (Manufacturing Resource Planning: Üretim Kaynak Planlaması), ERP (Enterprise Resource Planning: Kurumsal Kaynak Planlaması), TQM (Total Quality Management: Toplam Kalite Yönetimi), Yalın, 6

Abstract

It is common in the literature that a lean-line balance with fixed process times is a good way to achieve higher throughput. This study aims to demonstrate that S-DBR (Simplified Drum Buffer Rope) approach would produce higher returns when process times are not fixed. Lean-line balancing and S-DBR methods were modeled in a basic structure and benchmarked by simulation. Results were statistically assessed. The on-time delivery rate of the Lean-line balancing method decreased from 100% to 82% with varying process times. Meanwhile, the S-DBR method yielded 84% on-time delivery, resulting in increased net income by 4%, and shipments by 3%. It is possible to become more resilient and more competitive to the variability in the business environment without requiring additional investment by simply changing the production planning and management method. This study sets a guide for choosing the proper TOC (Theory Of Constraints) method for a certain business environment as well as disposing S-DBR algorithm synthesized by literature and statistically tested for adaptability. Additionally, an insight for future research is also presented.

Keywords: TOC, S-DBR, Lean, Line balancing, simulation

sigma, TOC (Theory of Constraints: Kısıtlar Teorisi) ile devam etmiştir [2].

MRP ile beklenen gününde teslim başarısı sağlanamamış, stoklar ve maliyetler yeterince düşürülemez. Aynı dönemde Japon firmaları Yalın felsefedeki manuel kanban kartlarıyla çok daha iyi sonuçlara ulaşmışlardır [2].

Amerika Birleşik Devletleri'ndeki (ABD) ABC televizyon kanalında yayınlanan Deming' in "Japonlar Nasıl Başardı?" programıyla birlikte ABD' de TQM yıldızı parlamıştır. Ancak yıllar sonra önemli bir muhasebe firmasının ABD' de yaptığı araştırmada TQM uygulayıcılarının sadece %5' inde olumlu sonuç görüldüğü belirlenmiştir [2]. Ayrıca iş dünyasındaki çekinceler Deming ve Malcolm Bridge Kalite Ödülü alan firmalardan bir kısmının iflas etmesiyle artmıştır [2].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: utkan.ulucay@gmail.com (U. Uluçay)

Geliş / Received: 16.06.2023 Kabul / Accepted: 17.08.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1315857

Ohno' nun ABD gezisinde ziyaret ettiği Ford otomobil fabrikası ve Wallmart süpermarketten esinlenen Yalın felsefede amaç israfları önleyerek akışı sağlamaktır [3]. Talebin temposu takt zamanıdır [4] ve hatlar takt zamanına göre dengelenerek kapasite israfı veya hızlı üretimle oluşacak stok israfı önlenmelidir [5].

Kısıtlar Teorisinin en öz ifadesi odaklanma (focus) ve kaldıraçtır (leverage) [6]. Goldratt odaklanma konusunu Pareto Prensipleriyle ilişkilendirerek birbirine bağımlılık (interdependency) olan süreçlerde prensibin 80-20 yerine 99-1 olduğunu iddia etmektedir [7]. Kısıtlar Teorisinin üretim çözümünde kaynak çakışmasını dikkate alan [4] proje yönetimi için CCPM (Critical Chain Project Management: Kritik Zincir Proje Yönetimi); kısıtın pazarda olduğu yani üretim kapasitesinin talepten fazla olduğu üretim hatlarında S-DBR (Simplified Drum Buffer Rope: Sadeleştirilmiş Kısıt Tampon Bağ); kısıtın üretimde olduğu yani üretim kapasitesinin talepten az olduğu [4] üretim hatlarında DBR (Drum Buffer Rope: Kısıt Tampon Bağ) yer almaktadır.

Yalın ve Ford tipi üretim yöntemlerini TOC ile karşılaştıran Goldratt, akışı önceleyen, belirli şartlarda üretimi durduran ve lokal verimden uzaklaşan ortak bir anlayıştan söz etmektedir. Ford ve Yalın yöntemleri stabil ortamlarda iyi sonuç verirken, değişkenliğin artmasıyla beraber TOC yöntemleri öne çıkmaktadır. Japon şirketlerinin %20' den azı Yalın uygulayıcısıdır [8].

American Production and Inventory Control Society (APICS) tarafından hazırlanan sözlükte değişkenlik kanunu (law of variability) "değişkenlik artarken sürecin verimi düşer" ve hat dengelemesi "hedeflenen üretim için iş istasyonu sayısını ve boş zamanları minimize eden yalın kavram" şeklinde tanımlanmıştır [4]. 24.APICS Konferansında Goldratt kesin sürelerle dengelenmiş bir üretim hattını incelemiştir. İşlem sürelerindeki değişkenlik ve işlemler arasındaki bağımlılık nedeniyle planlanan performans elde edilememiştir [9].

Dolayısıyla işlem sürelerinde değişkenlik olan üretim hatlarında gününde teslim performansını iyileştirecek bir yönetime ihtiyaç görülmektedir. Araştırma sorusu "İşlem sürelerinde değişkenlik varken S-DBR ile Yalın-hat dengelemesinden daha yüksek performans sağlanabilir mi?" şeklinde seçilmiştir.

Bu çalışmada S-DBR yönteminin uygulanabilirliği sorgulanarak, algoritması açığa çıkarılmıştır. Bu algoritmayla uygun yazılım eklentilerinin hazırlanabilmesi ve gelecek akademik araştırmalara yön verilmesi mümkün olabilecektir.

Makalenin ikinci bölümünde tanımlar listelenmiş, hat dengelemesi çalışmaları problem tipleri ve çözüm yöntemleri açısından kısaca derlenmiştir. Üçüncü bölümde literatür sentezlenerek S-DBR algoritması çıkarılmış, yalın-hat dengelemesi ve S-DBR yöntemlerinin işlem sürelerinde değişkenlik varken kıyaslanabilmesi için kullanılan simülasyon modeli, göstergeler ve senaryolar tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde kıyaslama bulguları ve istatistik testler, beşinci bölümde bulguların değerlendirilmesi, altıncı bölümde sonuç ve öneriler yer almaktadır.

2 Literatür araştırması

2.1 Tanımlar

Yalın ve TOC DBR, S-DBR konularıyla ilgili terimlerin tanımları aşağıda listelenmiştir:

- Süpermarket (supermarket): Yalında farklı rotaların kesişim noktalarında çeşitli parçalar için tutulan ve kanban kartlarıyla önceden belirlenmiş stoktur [10].

- Ürün ailesi (product family): Benzer nitelikleri olan ürünlerdir, benzerlik ölçüsü benzer makineler ve operatör süresinde azami %30 fark kadardır [5].

- Kapasite (capacity): Bir üretim kaynağının üretim işlemleri için erişilebilen toplam süresidir, aşağıdaki üç bileşenin toplamıdır [11].

- Üretim (process) süresi: Üretimde doğrudan malzemenin çalışıldığı süredir.

- Tip değişimi (setup) süresi: Ürünler arasında hazırlık için gereken süredir.

- Koruyucu (protective) kapasite-Atıl (idle) süre: Üretim ve tip değişimi dışında kalan arıza, onarım, planlı bakım, boş bekleme vb diğer sürelerin tamamıdır [11].

- Kapasite kullanımı (load): İş istasyonunun işgünü içinde planlı saatlerdeki çalışma süresinin planlanan azami çalışma süresine oranıdır, % cinsindedir, olası kısıtı belirlemek için izlenir [12].

- Darboğaz (bottleneck): Günde 24 saat çalıştığında dahi talebe yetişemeyen kaynaktır [13].

- Kısıt (drum, CCR:Capacity Constrained Resource): TOC içinde koruyucu kapasitesi, tam kapasitesinin %30' undan az olan kaynaklardır [11].

- Kısıt olmayan (non-constrained): TOC içinde koruyucu kapasitesi, tam kapasitesinin %30'undan fazla olan kaynaklardır [11].

- Tampon (buffer): Belirsizliği sönmölemek üzere alınan önlemlerin ortak adıdır, üç tiptedir.

- Stok (inventory): Hammadde, yarı mamul veya mamul stok tutulmasıdır, adet bazındadır.

- Kapasite (capacity): Süreç boyunca iş istasyonlarda tutulan kapasite fazlasıdır, % bazında ifade edilir.

- Zaman (time): Sürece erken başlayarak alınan önlemdir. DBR ve S-DBR yöntemlerinde her sipariş için termine göre iş emri verilebilecek en erken zamanlamayı belirler, süre cinsindedir [4].

- Tampon bölgesi (buffer zones): Penetrasyona göre belirlenen, üç eşit büyüklükte bölgedir; kırmızı – sarı – yeşil olarak adlandırılır, siparişlerin önceliklerini gösterir [14].

- Penetrasyon (buffer penetration): Siparişin terminine kalan sürenin, tampona oranıdır, % cinsindedir [14].

- Tampon yönetimi (buffer management): TOC içinde kısıtı boş bırakmamak ve termini kaçırmamak için siparişlerin zaman bazında bölgelere ayrılarak yönetilmesidir [4].

- Bağ (rope): TOC içinde kısıtla işletmeye malzeme veya iş emri girişi arasında kurulan bilgi akışıdır [4].

- Planlanan iş yükü (planned load): TOC içinde kesinleşen siparişlerin kısıtta gerek duyduğu toplam standart süredir [4].

- İşlem süresi (process time): Tek bir ürünün hiçbir bekleme olmadan sadece işlem gördüğü süredir [14].

• Akış süresi (lead/flow time): Tek bir ürünün, tipik bir iş gününde, müdahale edilmeden, üretime çıkışından sevk edilene kadar geçen süredir [14].

• Alışılmış termin (standard/quoted lead time): Firmanın sektöründe piyasada kabul gören standart termin süresidir [12].

• Güvenli termin (safe due date): Planlanan iş yüküne algoritmada gösterilen emniyet payı eklenerek belirlenen termin tarihidir [12].

• Hızlı termin (rapid response): Müşterilerden daha yüksek fiyat isteyebilmek için piyasada geçerli standart terminden daha hızlı teslimi sağlayacak termindir [12].

• Ortalama sipariş (average sized order): Geriye dönük ve tercihen son bir yıllık dönemde gerçekleşen ortalama sipariş büyüklüğüdür [12].

• Büyük sipariş (large order): Ortalama sipariş büyüklüğünün 4 katıdır [12].

• Uzun süreli operasyon (long processing time): Belirlenen tamponun 1/3' ü veya daha uzun süreli veya işletme dışında yapılan operasyonlardır [12].

• Tam takım (Full kitting): Üretimde gerekecek her türlü malzeme, onay, parça, vb tam olmalıdır [12].

2.2 Hat dengelemesinin gelişimi

Montaj hatları çevrim süresi ve istasyon sayısına göre incelendiğinde 4 tipte sınıflanmaktadır:

- Tip I, sabit çevrim süresi-minimum istasyon sayısı;
- Tip II, min çevrim süresi-sabit istasyon sayısı;
- Tip E, minimum çevrim süresi-minimum istasyon sayısı ve
- Tip F, mümkün olan en küçük çevrim süresi-mümkün olan en küçük istasyon sayısı [15].

Montaj hattı dengelemesinde itme esaslı çözümler yöntemleri analitik ve sezgisel olarak iki grupta sınıflanmaktadır. Analitik çalışmalarda üç ayrı sınıflandırma görülmüştür:

• Tip E: Çevrim süresi ve istasyon sayısı azaltılarak hat verimini yükseltmek amaçlanmaktadır. Çevrim süresi ve istasyon sayısının belirsiz olduğu ortamda karışık tam sayılı programlama yöntemi kullanılmıştır [16].

• Tip II: Çevrim süresini azaltmak amaçlanmaktadır. Deterministik ortamda tam sayılı programlama [17], çevrim zamanı belirsiz alınarak sezgisel algoritmayla desteklenen karışık tam sayılı programlama [18] çalışmaları incelenmiştir.

• Tip I: İstasyon sayısını azaltmak amaçlanmaktadır. Deterministik ortamda tam sayılı programlama [19], ergonomik faktörleri dikkate alan hedef programlama [20], çevrim zamanı – istasyon sayısı – iş yükü belirsiz alınarak U tipi bantta bulanık tam sayılı programlama [21] ve karma tam sayılı programlamayla başlanan ancak problem ölçeği artınca sezgisel yönetime geçilen [22] çalışmalar görülmüştür.

Sezgisel çalışmalarda üç ayrı sınıflandırma görülmüştür:

• Tip E: Bir vaka çalışmasında deterministik ortamda sıralı konum ağırlığı yöntemi [23], yine deterministik ortamda simülasyonla karşılaştırmalı yapılan sıralı konum ağırlığı yöntemi [24] kullanılmıştır.

• Tip II: Hazır giyimde ve deterministik ortamda yapılan bir çalışmada konum ağırlığı – Hoffman – Kilbridge – basit sezgisel yöntemler karşılaştırmalı denenerек sektöre basit sezgisel yöntemin uygunluğu değerlendirilmiştir [25]. Bir diğer çalışmada basit montaj hattı ve deterministik ortamda karınca kolonisi – konum ağırlıklı yöntemler karşılaştırmalı kullanılmıştır [26].

• Tip I: Kaynak kısıtı olan deterministik ortamda konum ağırlıklı yöntem [27], işlenmiş gıda endüstrisinde deterministik ortamda sıralı konum ağırlıklı yöntem [28], metal endüstrisinde deterministik ortamda sıralı konum ağırlıklı yöntem [29], otomotiv endüstrisinde deterministik ve stokastik ortamla karşılaştırma çalışmasında COMSOAL (Computer Method of Sequencing for Assembly Lines: Montaj Hatları İçin Bilgisayarlı Sıralama Yöntemi) [30] ve büyük ölçekli problemlerde karmaşık tam sayılı programlama yerine COMSOAL – tavlama benzetimi yöntemleri [22] kullanılmıştır.

Bu çalışmada literatürde daha az karşılaşılan stokastik (belirsiz, değişkenlik içeren) çevrim süresi ve literatürdeki itme kurgusuyla, yalın kültürdeki çekme kurgusu karşılaştırması yapılacaktır. Çalışmadaki montaj hattının literatüre uygun sınıflaması Tip F' dir. İş istasyonu sayısı aynıken çevrim süresini talebe uygun hale getirmeyi hedeflemektedir. Yalın yaklaşımda talepten fazla üretim "aşırı üretim" olarak önemli bir israf unsuru kabul edilir. Bu çalışmanın S-DBR yöntemi uygulamasında ana motivasyon verim yerine gününde teslim etmektir.

Montaj hatlarını çalışılan parçaların senkronize ilerleyişine göre değerlendirerek senkron, asenkron ve hibrit sınıflaması yapılmıştır. Montaj hattı dengelemede belirsizlik nedeniyle istasyonlar arasında tampon stoklar oluşturulması önerilmiştir [31]. Bu çalışmadaki montaj hattı Hibrit sınıflamasındadır, değişken operasyon sürelerine ve istasyonlar arasında tampon stok uygulamasına yer verilmiştir.

Yüksek değişkenlik içeren siparişe üretim (MTO: Make-to-order) ortamında siparişlerin planlanması (ORR: Order Review/Release: Siparişlerin Ön İnceleme ve İş Emri Verilişi) ve iş yükü kontrolü (WLC: Work Load Control) farklı üretim yönetimi uygulamalarının ortak paydası olabilecektir. Araştırmacılar stok – kapasite – zaman tamponları kavramlarını Kısıtlar Teorisi isimlendirmesi olmadan vurgulamışlardır. Belirsizlik nedeniyle uygun analitik yöntemin simülasyon olduğu belirtilmiştir [32]. Bu çalışmanın S-DBR uygulamasında zaman tamponu simülasyon yöntemiyle denenmiştir.

Üretime geri dönüşleri içeren üretim ortamında kalite – operasyon süresi – arıza – onarım süresi gibi çeşitli belirsizlikler söz konusudur. Belirsizlikleri kapsayacak en uygun analitik yöntem simülasyondur. DBR yöntemi esas alınmakla beraber araştırmacılar bütüncül sistem yaklaşımı yerine indirgemeci lokal yaklaşımı iteratif olarak kullanmayı tercih etmişlerdir [33]. Bu çalışmada S-DBR yöntemi sistemin tamamını içerecek şekilde ancak tampon yönetimi olmaksızın örneklenmiştir.

2.3 S-DBR yönteminin gelişimi

İşletmelerde belirsizlik sorunu; stok yaparak, erken başlayarak veya kapasite fazlasıyla çözümlenmektedir. Bu yöntemlerin bütüncül değerlendirilerek optimize edilmesi gerekmektedir. Örneğin kapasite fazlası varken tutulan stok miktarı azaltılabilmektedir. Dolayısıyla her kurum kendi iş ortamına göre önceliklerini belirlemelidir [34].

Yalın yaklaşımında tek parça akış hedefi vardır, süpermarketler aracılığıyla montaj hattında ayrışma noktaları oluşturulur. TOC yaklaşımında kısıtı koruyacak kadar ve koruyacak yerde olmak üzere stoklar belirlenir, dolayısıyla stok toleransı daha yüksektir [8].

Yalın yaklaşımında üretime erken başlama durumu yoktur, stabil pazarda uygundur. Yalın yaklaşımında üretim hareketlerini kanban kartları tetiklemekte ancak talep dalgalanması halinde üretimde geçici boşluk ve yığılmalar görülebilmektedir. TOC yaklaşımında bağ kullanımıyla erken başlama halleri zorlaştırılmıştır ve planlanan iş yükü ile geleceğe dair bir önlem fırsatı sağlanmıştır [14].

Yalın yaklaşımında kapasiteler dengelendiği için takt zamanına göre küçük miktarda bir pay ayırdıktan sonraki kapasite fazlası israf olarak değerlendirilmektedir. TOC yaklaşımında kapasite; üretim, tip değişimleri, koruyucu kapasite olarak sınıflandırılmakta ve koruyucu vasfını yitirmeden iyileştirilmesi önerilmektedir [14]. Temel karşılaştırma özeti **Tablo 1**' de verilmiştir.

Tablo 1. Yalın ve Kısıtlar Teorisi temel karşılaştırma tablosu

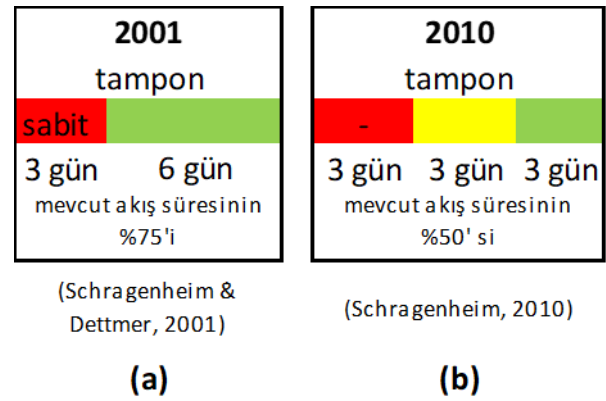
| Konu | Yalın | Kısıtlar Teorisi | Kaynak |
|-------------------------------|------------------------------------|---|---------|
| Kapasite yaklaşımı | Dengeli hat | Dengesiz hat, kısıt (Drum) | [35] |
| Tempo yaklaşımı | Takt zamanı | İş varsa koş, iş yoksa dur (Road Runner work ethic) | [35] |
| İş emri yaklaşımı | Kanban | Bağ (Rope) | [35] |
| Tamamlama yaklaşımı | Stok (supermarket) | Zaman (Buffer) | [35] |
| Sürekli İyileştirme yaklaşımı | Her yerde, Kaizen | Geciken işlere göre (POOGI: Process of Ongoing Improvement-Sürekli iyileştirme) | [36,37] |
| Amaç yaklaşımı | İsrafi önle, çevrim zamanını düşür | Geliri artır | [35] |
| Durum analizi yaklaşımı | Süreç bazlı | Sebepler-sonuç bazlı | [5,38] |

TOC yaklaşımında üretim çözümü DBR, S-DBR ve CCPM yöntemleri ve bunlarla birlikte kullanılan dinamik önceliklendirme için BM (Buffer Management: Tampon Yönetimi), işletme seviyesinde kullanılabilen kısıta uygun finansal değerlendirme için TA (Throughput Accounting: Katkı Muhasebesi) ve sebep-sonuç temelli olarak çatışmaları belirleyerek çözümlenmek için TP (Thinking Process: Düşünme Süreçleri) yöntemlerinden oluşmaktadır [14].

DBR yöntemi önce Optimized Production Technology (OPT) yazılımıyla ortaya çıkmış, daha sonra Goldratt'ın The Goal [37] kitabıyla popüler olmuş ve ilk defa The Race [39] kitabında yazılı kural seti olarak açıklanmıştır. Kuram; paradigma değişimi gerektirdiği, uygulamada tereddüt edildiği ve mevcut iyi uygulamalar olan S & OP (Sales and Operations Planning: Satış & Operasyon Planlama) kapsamındaki MPS (Master Production Schedule: Ana Üretim Çizelgesi), MRP (Manufacturing Resources Planning: Üretim Kaynak Planlama) ve RCCP (Rough Cut Capacity Planning: Kaba Kapasite Planlaması) ile uyumlandırılmadığı için beklenen kabulü görmemiştir [14].

Bu sıkıntıları giderebilmek ve uygulama kolaylığı sağlarken kuramın gücünü tam olarak kullanabilmek amacıyla S-DBR geliştirilmiş ve ilk defa Manufacturing Warp Speed [14] kitabıyla açıklanmıştır. Bu versiyon değişen paradigmaya uygun olarak kısıtın üretimde değil pazarda olduğu varsayımına dayanmaktadır. Planlanan İş Yükü yaklaşımı S & OP işleyişiyle uyumludur, tahminleri ipucu olarak değerlendirmekte, gerçekleşen siparişleri RCCP işleyişindeki gibi istasyonların kapasite kullanım oranlarını izleyerek yerleştirmektedir. MRP işleyişine uygun olarak üretim istasyonları için kapasite tamponu, siparişler için zaman tamponu ve malzemeler için stok tamponu tercih edilmektedir [14].

S-DBR uygulaması 2001 yılında **Şekil 1 (a)**'da gösterildiği gibi eşit büyüklükte olması gerekmeyen yeşil ve kırmızı olarak iki bölgeli, tampon büyüklüğünden bağımsız sabit kırmızı bölgeli tamponla kurgulanmıştır. Tampon büyüklüğü piyasada alışılmış teriminle ve olası üretim içi kısıtın akıştaki yeriyle ilişkilendirilmemiştir. Tamponun başlangıç için mevcut kapıdan kapıya akış süresinin %75' iyle başlanarak kademeli düşürülmesi öngörülmüştür. Planlanan iş yükü sadece olası iç kısıtın yerini belirlemek içindir [14].



Şekil 1. (a) 2001 tampon yapısı (b) 2010 tampon yapısı

Schragenheim 2001 yılında hazırladıkları kavramı, 2010 yılında TOC Handbook 9. Bölüm içinde değiştirmiştir: **Şekil 1 (b)**' de gösterildiği gibi tampon kırmızı – sarı – yeşil olarak 3 eşit bölgeli geleneksel DBR tamponu olarak değiştirilmiştir. Kırmızı bölge ortalama büyüklükteki bir siparişi boş işletmede bitirecek kadar büyük planlanmıştır. Tamponun tamamı piyasada alışılmış teriminin veya akış süresinin yarısı kadar kurgulanmıştır. Planlanan iş yükü hem

olası iç kısıtın yerini belirlemek hem de güvenli termin vermek için kullanılmıştır. Hızlı terminleri daha yüksek fiyatla satma opsiyonu ve buna bağlı kapasite rezervasyonu düşünülmüştür [12].

Karşılaştırmalı özeti Tablo 2’de verilen literatürde S-DBR uygulaması için ortak bir uygulama yöntemi yoktur. Ticari yazılımların izlediği algoritmalar gizli tutuldukları için kavrama uygunluğunu belirlemek kolay değildir. Dolayısıyla bu çalışmada literatürdeki bu boşluk literatürün senteziyle S-DBR algoritması verilerek ve simülasyonla doğrulama yapılarak kapatılmak istenmiştir.

Tablo 2. Literatür değerlendirmesi

| Yazarlar / Eser | Yayın Tarihi | Yayın | Yalın | S&OP | DBR | S-DBR | Sektör |
|---|--------------|-------------|-------|------|-----|-------|--------|
| Goldratt / The Unbalanced Plant | 1981 | Makale | X | - | X | - | İmalat |
| Goldratt & Cox / Amaç | 1984 | Kitap | X | - | X | - | İmalat |
| Goldratt & Fox / The Race | 1986 | Kitap | X | - | X | - | İmalat |
| Smith The Measurement Nightmare | 2000 | Kitap | - | - | X | - | - |
| Rother & Harris Sürekli Akış Yaratmak | 2001 | Kitap | X | - | - | - | - |
| Schrageheim & Dettmer / Manufacturing at Warp Speed | 2001 | Kitap | X | X | X | X | İmalat |
| Bicheno The New Lean Toolbox | 2004 | Kitap | X | - | X | - | - |
| Goldratt / Standing on the Shoulders of Giants | 2009 | Makale | X | X | X | - | İmalat |
| Cohen / Ever Improve | 2010 | Kitap | - | X | X | X | İmalat |
| Schrageheim / From DBR to S-DBR for MTO | 2010 | Kitap bölüm | - | X | X | X | İmalat |
| Blackstone / Review of literature | 2010 | Kitap bölüm | - | X | X | X | - |
| Pirasteh & Fox Profitability With No Boundaries | 2011 | Kitap | X | - | X | X | İmalat |
| Gökçen, Boru, Dosdoğru / ..tedarikçi seçimi.. | 2018 | Makale | - | - | - | - | İmalat |
| Bu çalışma | 2023 | - | X | X | - | X | İmalat |

DBR eleştirileri arasında yer değiştiren kısıtları dikkate almaması, kısıtın boş kalmamasına özen gösterirken bloke olmasını ihmal etmesi, tedarik zinciri işleyişinde sadece kısıttan önceki süreci izlemesi nedeniyle bazı hallerde kısıttan sonra yeterli stok olmasına rağmen aşırı üretimi tetiklemesi, çizelgelemesinin zayıflığı nedeniyle net öncelikleri göstermemesi sayılabilir [40].

3 Yöntem

Algoritma üç aşamalıdır. Birinci aşamada iş ortamı şartlarına uygun TOC çözümüne yönlendirme yapılmıştır. İkinci aşamada tamponun belirlenmesini, planlamayı, güvenli termin verilmesini, etkileşimli iç kısıtın takibini içeren uygulama gösterilmiştir. Üçüncü aşamada dinamik tampon yönetimi ve odaklanmış iyileştirme işleyişi açıklanmıştır.

3.1 S-DBR algoritması – birinci aşama

Her sektörde işlem süresi değişkenliği veya ürünün işlenme-bekleme süre dağılımı aynı değildir. S-DBR yönteminin uygulanabilirlik varsayımları arasında üretim takibinin adet birimiyle yapılabilmesi, ürün aileleri bazında ana hatların belirli olması, bazı noktalarda farklı yönde hareket edilse dahi genel olarak akışın belirli bir yönde olması, çok uzun süreli operasyonların net belirlenebilmesi, üretimdeki iş istasyonlarının kapasitelerinin pazar talebinden fazla olması sayılabilir [11,14].

Birinci aşamanın algoritması Şekil 2’de gösterilmiştir.

• 1: Başlarken ürün aileleri ve aile bazında ana hatlar belirlenir, akış yönü netleştirilir, iş istasyonlarının kapasite kullanımı (iş yükü) izlenir.

• 2: İşletmedeki akış süresinin içinde beklemelerin payı sorgulanmaktadır. Buradaki %10 eşik değeri için Blackstone %5 [13], Schrageheim %10 [12], Cohen %10 [11] önermiştir.

• 3: İşlem süresi, akış süresinin %10’ undan fazlaysa iş ortamı rutin üretimden ziyade proje üretimine benzemektedir, dolayısıyla TOC CCPM uygulaması önerilmiştir [14].

• 4: Uzun süreli operasyonlar (fırınlama, fason işlem gibi) belirsizlik veya değişkenliğin etkisinin belirginleştiği alanlardır ve değişkenliğin olumsuz etkilerinin sınırlanabilmesi için tipik ayrışma noktalarıdır.

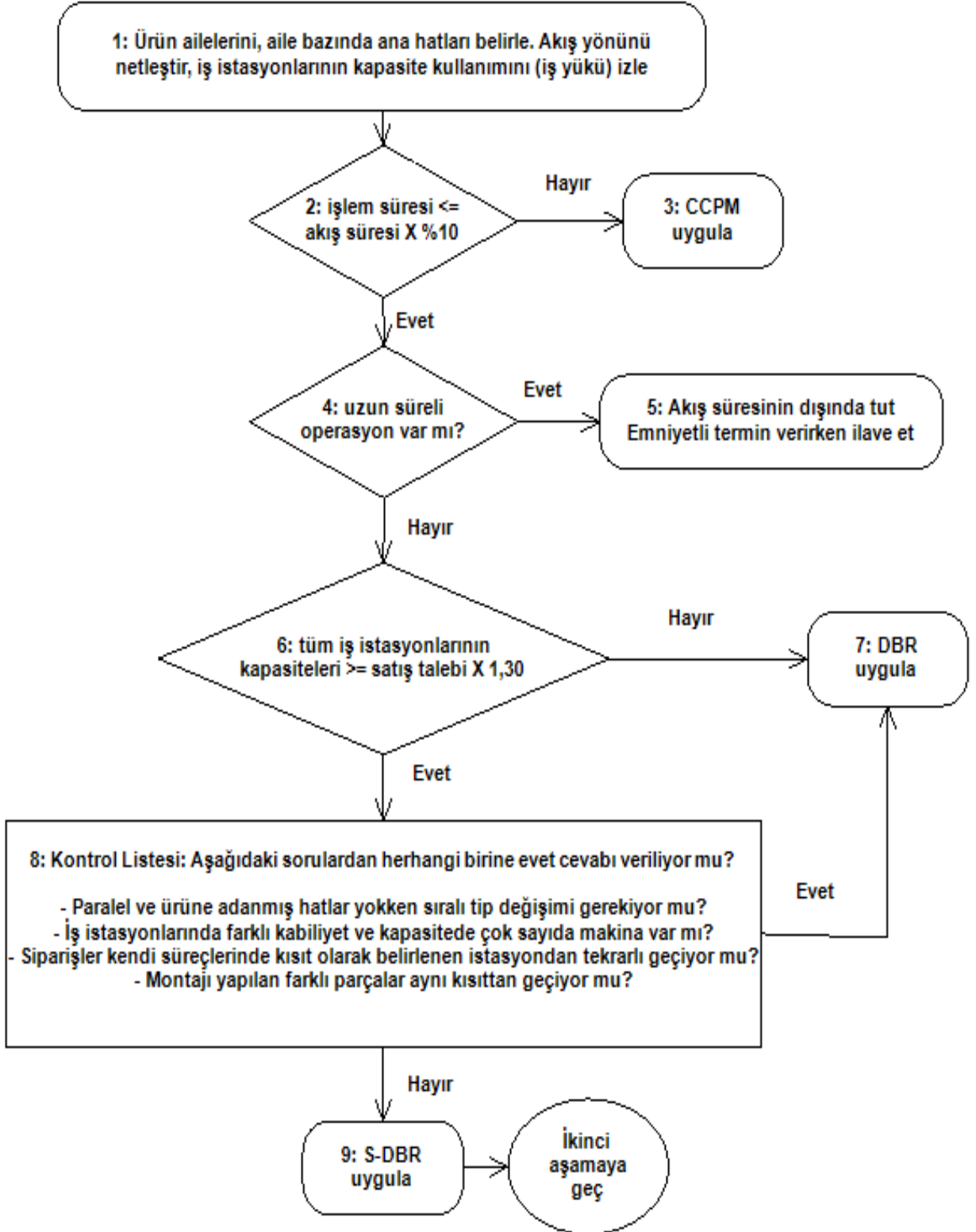
• 5: Uzun süreli operasyonların işlem süresi akış süresinden ayrı değerlendirilir, termin verilirken akış süresine eklenir.

• 6: İş istasyonlarının iş yükleri zaman cinsinden izlenmelidir, belirsizliğe dayanım için kapasite tamponu tercih edilir. %30 kapasite fazlası eşiği önerilmiştir [11,14].

• 7: Herhangi bir istasyonda hedeflenen talebe göre %30 koruyucu kapasite sağlanamıyorsa kısıt pazarda değil, üretimde ortaya çıkabilecektir, DBR uygulaması önerilmiştir.

• 8: Paralel ve ürüne adanmış hatlar yokken sıralı tip değişimi gerekiyorsa, iş istasyonlarında farklı kabiliyet ve kapasitede çok sayıda makina varsa, siparişler kendi süreçlerinde kısıt olarak belirlenen istasyondan tekrarlı geçiyorsa, montajı yapılan farklı parçalar aynı kısıttan geçiyorsa S-DBR yerine DBR kullanımı önerilmektedir [14].

• 9: S-DBR uygulanabilir.



Şekil 2. S-DBR birinci aşama algoritması

3.2 S-DBR algoritması – ikinci aşama

Rekabet avantajı aynı sektördeki rakiplerin alışılmış termin süresinden hızlı servis vermekle kazanılacaktır. Kimi zaman yeni ürün grupları için işletme içindeki fiili akış süresi önceden bilinmemektedir. Bu gibi hallerde alışılmış termin süresi kullanılabilir [11].

İşletmeye tüm siparişler termin ve tampona göre belirlenenden erken çıktığında iş istasyonları arasında işletme içi stoklar oluşacak, öncelikler karışacak, bozulma – kayıp gibi sorunlar görülebilecek, siparişler gecikebilecektir. Siparişler üretime geç çıktığında kısıt iş istasyonu boş kalabilecektir. Acil siparişlerin sıradaki iş istasyonunda bekletilmeden çalışması istenebilecektir [14].

Dolayısıyla işletmenin mevcut durumu rekabet avantajı açısından önemlidir, başlangıçta ve her yeni sipariş geldiğinde, her sipariş sevk edildiğinde izlenmelidir. S-DBR İkinci aşama algoritması Şekil 3'te gösterilmiştir.

• 10: S-DBR uygulamasına başlarken MRP, MPS, iş istasyonu iş yükü izlemesi, sipariş çizelgesi, ürün aileleri, üretim hattı yapısı, üretim ve Planlama personeliyle iletişim konuları önemlidir.

• 11: MRP yazılımı varsa kapasite kullanımları her iş istasyonu için izlenebilecektir. Uygun bir yazılım yoksa pasif kısıt olarak belirlenen iş istasyonunun izlenmesi yeterlidir.

• 12: Ortalama büyüklükte bir sipariş kırmızı tampon kodu olarak acil olduğunda bir tampon bölgesi içinde bitirilebilmelidir, planlanan akış süresi üç eşit bölgeye ayrıldığı için 3 kat şartı aranmaktadır. Diğer yandan pazardaki rakiplerin verdiği terminden daha uzun termin verilirse rekabet edilemez. Ayrıca bu sürenin yarısıyla başlanarak işletme içinde akış hızlandırılmalıdır [11].

• 13: İşletmenin mevcut durumu sektörün alışılmış performansıyla kıyaslanmaktadır. Eğer işletme sektörün pratik performansını karşılayamıyorsa önerilen tedbirlere göre durumunu gözden geçirmelidir.

• 14: Tampon belirlenmektedir. Tampon adet cinsinden stok yerine süre cinsinden zaman birimlidir. Tampon aynı zamanda işletmeye iş emri girişi kapısını “bağlamaktadır”. İş istasyonları boş kalsa dahi tamponla belirlenen günden önce iş emri verilmemelidir. İş emri verirken diğer gösterge iş emrinin “Tam Takım” (Full Kitting) olmasıdır. “Tam Takım”; çizim, onay, malzeme, parça gibi işin yapılması esnasında gereken tüm bileşenlerin hazır olması anlamına gelmektedir. Ortalama sipariş bitim süresinin üç katı kuralı Cohen [11] ve Blackstone [13] ortak önerisidir. Alışılmış termin ve akış süresinin %50 kuralı için Schragenheim önce %75 [14] sonra %50 [12] önerirken, Cohen %50-%60 [11] ve Blackstone %50 [13] önermektedir. Ürün ailelerinin belirlenen tampon süreleri arasında %25'ten fazla fark oluşuyorsa aile bazında farklı tampon süresi kullanılmaktadır [12].

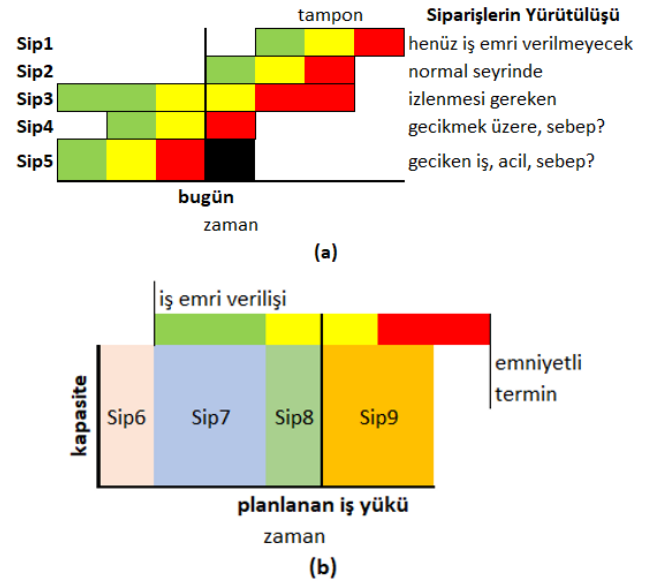
• 15: İşletme henüz sevk etmediği siparişlerin durumunu gözden geçirmelidir. Bu siparişlerin bir kısmı pasif kısıttan geçmiyor veya pasif kısıttaki işlemini tamamlamış olabilir. Başlangıç aşamasında zorunlu bir değerlendirilmedir, devam eden günlerde her yeni sipariş ve sevk sisteme işleneceği için

bir daha bu çapta bir değerlendirme gerekmeyecektir. “Penetrasyon” Denklem (1)'de gösterildiği gibi % cinsinden hesaplanmakta ve negatifse mavi, %0-%33 arasındaysa yeşil, %34-%67 arasındaysa sarı, %68-%100 arasındaysa kırmızı, %100' den büyükse siyah renk kodu verilmektedir.

$$\text{Penetrasyon} = \frac{100 * (\text{Tampon süresi} - \text{Termine kalan gün})}{\text{Tampon süresi}} \quad (1)$$

Mavi renk kodu üretime verilmeyecek ve “Tam Takım” olması sağlanacak anlamındadır. Yeşil renk kodunda üretime iş emri verilir, öncelik düşüktür, özel takip veya müdahale gerekli değildir. Sarı renk kodu, yeşile göre daha önceliklidir, özel takip veya müdahale “genellikle” gerekli değildir. Öncelikler %penetrasyona göre değil, renk kodu bazında tayin edilmektedir. Kırmızı renk kodu siparişin gecikmek üzere olduğunu gösterir, bu koddaki tüm siparişler satış ve üretim ekipleri tarafından günlük takip edilmeli, hızlandırılmalıdır. Kırmızı koda giren her sipariş için akışın gecikme nedeni not edilmelidir, bu nedenler Pareto Şemasıyla incelenerek odaklı iyileştirmeye yol gösterecektir.

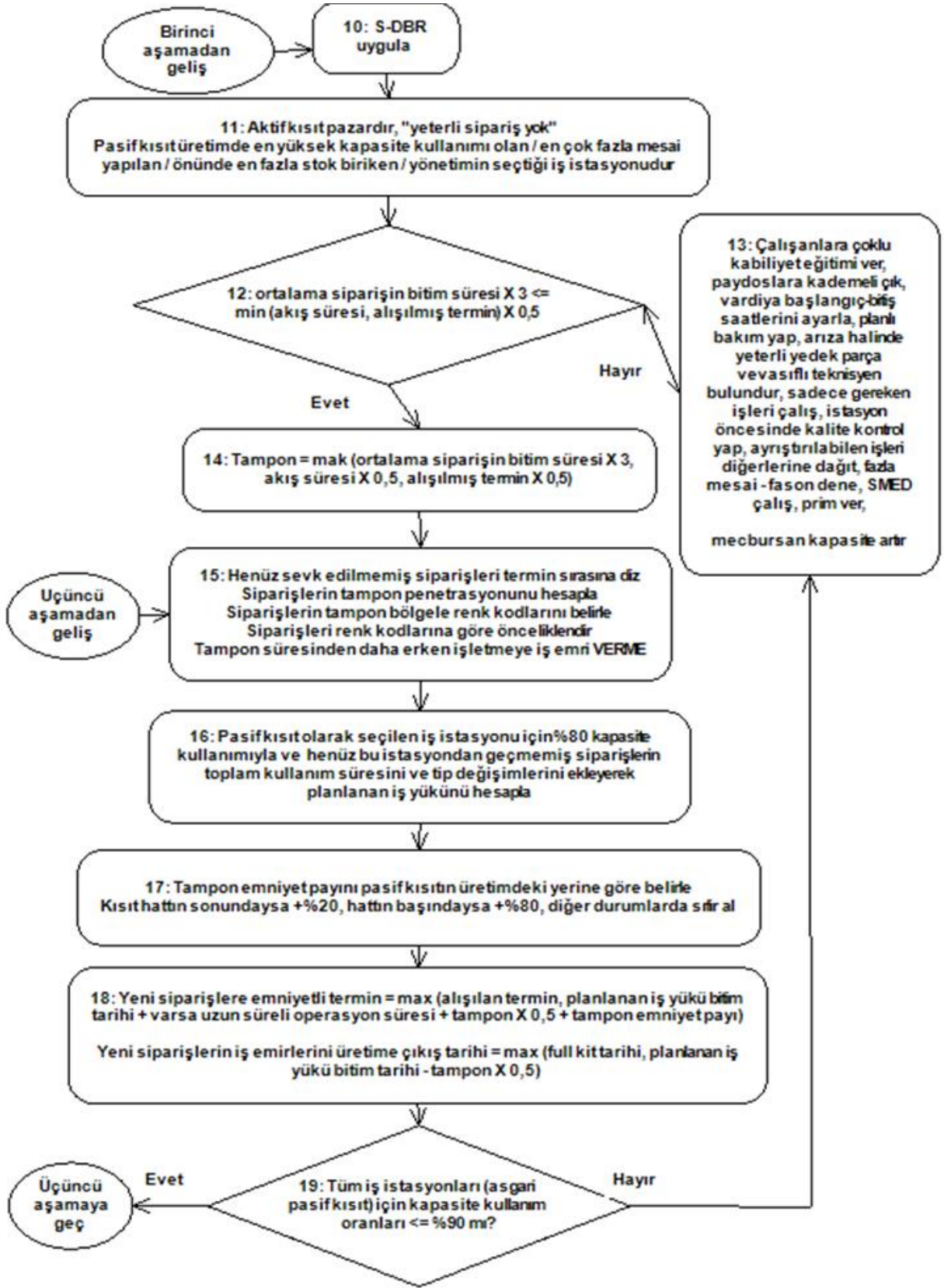
Termine göre geciken siparişler siyah renk koduyla gösterilir, hedefi sıfırdır, çok yakın takip edilmeli ve sonuçlandırılmalıdır. Şekil 4 (a)'da işleyiş örneklenmiştir.



Şekil 4. (a) Dinamik tampon yönetimi (b) Planlanan iş yükü ve emniyetli termin verililişi

• 16: Planlanan iş yükü hesaplanmaktadır. İşletme içindeki pasif kısıta göre izleme yapılmakta ve %70 eşik değere rağmen %80 doluluk geçici olarak normal kabul edilmektedir. S&OP – MPS uyumlu geleceğe dönük kaba kapasite kontrolüdür. Şekil 4 (b)'de gösterilmiştir.

• 17: Güvenli termin verilirken pasif kısıtın üretim hattındaki yerine göre tampon süresi üzerinden emniyet payı düşünülür. Pasif kısıt hammadde girişine yakınken %80, sevkiyata yakınken %20 ilave edilmesi önerilmiştir [12].



Şekil 3. S-DBR İkinci aşama algoritması

• 18: Güvenli termin belirlenmektedir. Güvenli termin, piyasanın alıştığı terminden kısayken eğer karşılığında fazla fiyat talep edilemiyorsa ve rekabet açısından sorun yoksa alışılmış terminin verilmesi tercih edilmelidir. Güvenli termine 17. adımda belirlenen emniyet payı ve varsa uzun süreli operasyon farkı eklenmelidir. Yeni siparişlerin iş emirleri, işletme içinde âtil iş istasyonları olsa dahi, “Tam Takım” olmadan veya belirlenen çıkış tarihinden önce verilmemelidir [14].

• 19: Pasif kısıt oluşumu takip edilmektedir. İş yükü takibi için kullanılan %90 eşik seviyesinde Cohen, Blackstone ve Schragenheim mutabaktır [11,13,14].

3.3 S-DBR algoritması – üçüncü aşama

Yalın felsefesinde sürekli iyileştirme vardır ancak kısıt olmayan bir makinada yapılacak iyileştirmenin işletmenin performansına etkisi olmayacaktır. Hammadde eksikleri nedeniyle gününde teslim edemeyen bir işletmede tedarikteki iyileştirme, kalite iyileştirmesine göre daha öncelikli olmalıdır [37]. S-DBR ile yapılan Pareto Analizi işletmenin en önemli gecikme sebebine odaklanarak en kısa zamanda fark edilir sonuç almaya yardımcı olacaktır [14]. S-DBR İyileştirme algoritması Şekil 5’te gösterilmiştir.

• 20: İşletmenin amacına ulaşmasına katkı sağlayan faaliyetler verimlidir [37]. Çok sayıda iyileştirme faaliyet seçeneği arasından gününde teslim azami katkısı olanlar seçilmelidir.

• 21: Siparişler sevk edilirken tampon bölgelerinin renk kodları kaydedilmelidir. Kırmızı ve siyah renk kodları için gecikmenin sebebi Pareto Şemasıyla izlenebilecek şekilde kodlanabilmelidir. İşletmeye nakit girişi, makinelerin verimli çalışmasıyla değil siparişlerin gününde sevk edilerek fatura kesilmesiyle gerçekleşmektedir [37].

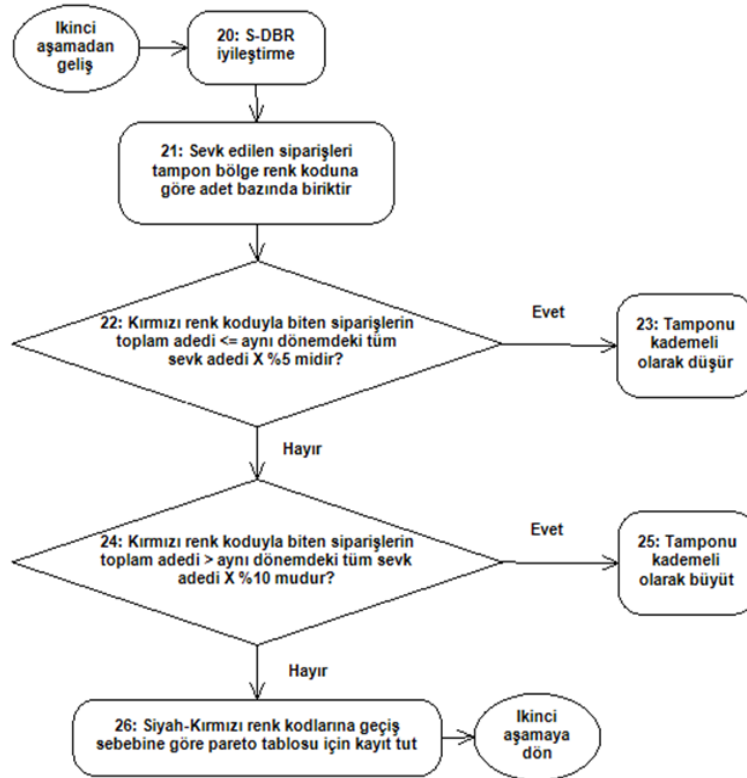
• 22: Siparişlerin büyük kısmı kırmızıya düşmeden bitiyorsa kullanılan tampon süresinin düşürülmesi mümkündür, rekabet avantajı yaratacaktır. Eşik değer Blackstone’ un önerdiği gibi %5 olarak alınmıştır [13].

• 23: TOC de stok tamponlarını 1/3 oranında kademelendirmek önerilmektedir. Ancak bu noktada her işletmenin kendi iş ortamına uygun bir yol izlemesi daha uygun olacaktır. Sistem dinamiktir, gerekirse tekrar ayarlanabilecektir.

• 24: Siparişler sık sık kırmızı-acil bölgesine düşüyorsa işletmenin gereksiz yere yorulması ve siparişlerin gecikme riski söz konusu olmaktadır. Eşik değer olarak Blackstone’ nun önerdiği %15 [13] yerine Cohen’in önerdiği ve Goldratt ile paralellik gösteren %10 kullanılmıştır [11].

• 25: İşletmenin kendi iş ortamına uygun bir kademe yapması önerilmiştir. Sistem dinamiktir, gerekirse tekrar ayarlanabilecektir.

• 26: Gecikme sebeplerinin Pareto kayıtlarına göre öncelik belirlenerek iyileştirme faaliyetleri odaklanabilecektir.



Şekil 5. S-DBR Üçüncü aşama algoritması

4 Yöntem

Bugün içinde bulunduğumuz sistemler belirsizlik içeren, geri bildirimlerle gelişen-değişen, deterministik olmayan kaotik yapıdadır [41]. Dolayısıyla bu tür sistemler simülasyon yöntemleriyle incelenmeye daha uygundur [42]. Simülasyon tercihinin bir diğer etkeni firmaların artan değişkenliği dikkate alan modeller arasında kaynak-maliyet-zaman zorlukları, olası başarısızlık riskleri gibi faktörleri gözetmesidir [43].

Simülasyonda izlenen üç ana yapı Sistem Dinamikleri (System Dynamics), Etmen Tabanlı (Agent Based) ve Ayrık Olay (Discrete Event) şeklindedir. Piyasadaki simülasyon yazılımları arasında sadece AnyLogic (<https://www.anylogic.com/>) üç yapıyı da eşzamanlı desteklemektedir [44].

Bu çalışmada AnyLogic Personal Learning Edition (PLE) 8.8.2 versiyonu kullanılarak işlem sürelerinde değişkenlik olan kurgusal bir yapıda Yalın-hat dengelemesi ve S-DBR senaryoları literatürde izlenen değerlendirme göstergelerine göre karşılaştırılmıştır. İstatistik değerlendirmeler için Minitab® Statistical Software 21.4.0.0 kullanılmıştır.

4.1 Performans göstergeleri

Üretim sektöründe çoklu ve dinamik darboğazın belirlenmesi için simülasyonla yapılan çalışmada akış süresi, gününde teslim, çizelge stabilitesi, stok miktarı, üretim miktarı ve verim göstergeleri yer almıştır [45].

Üretim sektöründe yapılan bir çalışmada üretime iş emri verilirken iş yükü kontrolü ve DBR yöntemleri simülasyonla kıyaslanmış ve gününde teslim, akış süresi, üretim süresi göstergeleri kullanılmıştır [46].

Talaşlı imalat sektöründe siparişe üretim yapan firmalarda darboğaz belirleme ve etkinleştirme konulu uygulamalı araştırmada gününde teslim, akış süresi, üretim süresi, ara stok miktarı ve servis seviyesi göstergelerine yer verilmiştir [47].

Peru'da metal imalat sektöründen bir KOBİ'de (Küçük ve Orta Boy İşletmeler) simülasyonla yapılan çalışmada arıza ve malzeme eksikleri nedeniyle yaşanan üretim kayıpları incelenmiş, yalın ve toplam kalite gibi tekniklerin birlikte kullanımı önerilmiş, gününde teslim%, çalışılabilir zaman%, üretim adedi, birinci kalite% göstergeleri dikkate alınmıştır [48].

İmalat sektöründe itme-çekme yöntemlerinin simülasyonla karşılaştırıldığı bir çalışmada değerlendirme göstergeleri akış süresi, işletme içi stok miktarı, üretim adedi ve maliyet olmuştur [49].

İspanya'da üretim sektöründen siparişe üretim yapan bir firmada S&OP entegrasyonu konulu yapılan çalışmada değerlendirme maliyet ve gününde teslim göstergeleri kullanılmıştır [50].

Üretim yönetimi yöntemleri karşılaştırılırken literatürde kullanılan göstergelerin verildiği Tablo 3 dikkate alınarak sevk adedi, gününde teslim% ve maliyet yerine işletmenin faaliyetine uyumlu olması açısından toplam gelir göstergeleri seçilmiştir.

4.2 Senaryolar

Birinci senaryoda itme (push) esaslı tipik bir üretim hattının bir bölümünü temsilen 4 istasyondan oluşan model Şekil 6'da gösterilmiştir. Arıza, onarım, bakım, devamsızlık, kalite sorunu, malzeme-onay eksikliği gibi belirsizlikler yok varsayılmıştır. Sadece M1, M2, M3 ve M4 istasyonlarının işlem süreleri minimum 4 saniye, mod 5 saniye ve maksimum 9 saniye olacak şekilde triangular (üçgensel) dağılımla değişken verilmiştir. Montaj hattı 5 saniye mod süresine göre dengelidir. Her istasyon arasında M2yedek, M3yedek, M4yedek olarak sınırsız kapasiteli ara stok alanı tanımlanmıştır. M1 ilk istasyondan önceki stok alanı Planlama olarak isimlendirilmiştir, iş emirleriyle üretim başlangıç noktasıdır. Siparişlerin giriş temposu 2 saniyede bir adet ile 10 saniyede bir adet aralığında ayarlanabilmektedir. İdeal akış süresi 4 istasyon ve ortalama 5 saniye işlem süresiyle 20 saniyedir. Müşterinin gecikme eşiği 20 -50 saniye arasında değiştirilebilmektedir. Satış fiyatı, gecikme halinde iskontolu satış fiyatı, hammadde fiyatı parametriktrir.

Tablo 3. Literatürde kullanılan göstergeler

| Yazarlar | Yayın Tarihi | Yayın | Göstergeler |
|--|--------------|-----------|--|
| Scholz-Rieter, Windt, Liu | 2010 | Dergi | Gününde teslim%, akış süresi, çizelge stabilitesi, stok miktarı, üretim miktarı, verim |
| Thürer, Stevenson, Silva, Qu | 2017 | Dergi | Gününde teslim%, akış süresi, üretim süresi |
| Lizarralde-Aiastui, Apaolaza-Perez de Eulate, Mediavilla-Guisasola | 2020 | Dergi | Gününde teslim%, akış süresi, üretim süresi, ara stok miktarı ve servis seviyesi |
| Gonzales-Romero, Huamani-Martinez, Quiroz-Flores, Diaz-Garay | 2022 | Konferans | Gününde teslim%, çalışılabilir zaman%, Üretim adedi, birinci kalite% |
| Tanhaie | 2022 | Dergi | Akış süresi, ara stok miktarı, üretim adedi, maliyet |
| Apaolaza, Orue, Lizarralde, Oyarbide-Zubillaga | 2022 | Dergi | Gününde teslim%, maliyet |

Modelde siparişler 10 saniyede bir adet (0.1 adet/saniye) temposuyla alınmıştır. Üretimde 5 saniyede bir adet (0.2 adet/saniye) kapasite vardır, dolayısıyla üretim kapasitesi talepten yüksektir. Müşterilere tedbirli termin verildiği dikkate alınarak gecikme eşiği 30 saniye seçilmiştir.

İstasyonların verimleri zaman cinsindedir, akış süresi iş emirlerinin histogramı olarak gösterilmiştir, işletme içindeki

stoklar tanımlandıkları noktaların ortalama adetleridir. Hesaplamaların detayları aşağıda listelenmiştir.

$$\text{Gelir} = \text{Gününde teslim adet} * \text{Gününde teslim satış fiyatı} + \text{Gecikmeli adet} * \text{Gecikmeli satış fiyatı} \quad (2)$$

$$\text{Gider} = \text{Planlamaya gelen adet} * \text{Hammadde fiyatı} \quad (3)$$

$$\text{Net Gelir} = \text{Gelir} - \text{Gider} \quad (4)$$

$$\text{Gününde Teslim Oranı \%} = \frac{\text{Gününde teslim adet}}{\text{Toplam teslim adet}} \quad (5)$$

Model 1000 saniye sürelidir, başlangıçta 5 adet sipariş olduğu kabul edilmiştir, 10 saniyede bir adet yeni sipariş geldiği için toplam giriş 105 adet olmuştur. Veri setleri ısınma dönemini hariç tutmak amacıyla son 80 kaydı derlemektedir. Model parametreleri Tablo 4'te özetlenmiştir.

İkinci senaryoda aynı montaj hattı çekme (pull) esaslı olarak Şekil 7'de gösterildiği gibi modellenmiştir. İş emriyle üretime girişler zaman karşılığı adet olarak sınırlanmış (tampon) ve sevkiyat öncesi son istasyonda değişkenlik iyileştirilirken işlem süresi 6 saniyeye yükseltilerek kısıt oluşturulmuştur.

Sipariş giriş temposu, gecikme eşiği, satış fiyatları, hammadde fiyatı birinci senaryo ile aynıdır. Gelir, gider, gününde teslim oranı hesaplamaları aynı formüllerle yapılmıştır. Bu senaryoda model çalışırken tampon büyüklüğü ayarlanabilmektedir.

Tablo 4. Simülasyon modellerinin parametreleri

| Model | M1 | M2 | M3 | M4 | Kapasite adet/sn | Talep adet/sn | Gecikme Eşiği |
|---------------------------|---|----|----------------------|----|------------------|---------------|---------------|
| Yalın-hat dengeli | Üçgen dağılım min:4, mod:5, mak:9 saniye/adet | | | | 0.2 | 0.1 | 30 saniye |
| S-DBR, tampon yönetim siz | Üçgen dağılım min:4, mod:5, mak:9 saniye/adet | | 6 saniye/ adet | | 0.2 | 0.1 | 30 saniye |

Bu senaryolar AnyLogic PLE 8.8.2 deki 30 farklı rastgele sayı seti için tekrarlı çalıştırılacak, sonuçların normal dağılıma uygunluğu istatistik test edilerek doğrulanacak ve iki yöntem arasında %95 güven seviyesinde anlamlı fark aranarak araştırma sorusu cevaplanacaktır.

5 Bulgular

Yalın-hat dengesi ve S-DBR modelleri 30 farklı rastgele veri setiyle çalıştırıldığında elde edilen sonuçlar Tablo 5'te gösterilmiştir. S-DBR yöntemi 30 veri setinin 21 setinde Yalın-hat dengesinde daha yüksek net gelire ulaşmıştır.

Yalın-hat dengesi yönteminde ortalama gününde teslim oranı %82, ortalama net gelir 1088 TL ve ortalama sevk 99 adet olmuştur.

S-DBR yönteminde tüm göstergelerde iyileşme vardır; ortalama gününde teslim oranı %84, ortalama net gelir 1132 TL ve ortalama sevk 102 adettir.

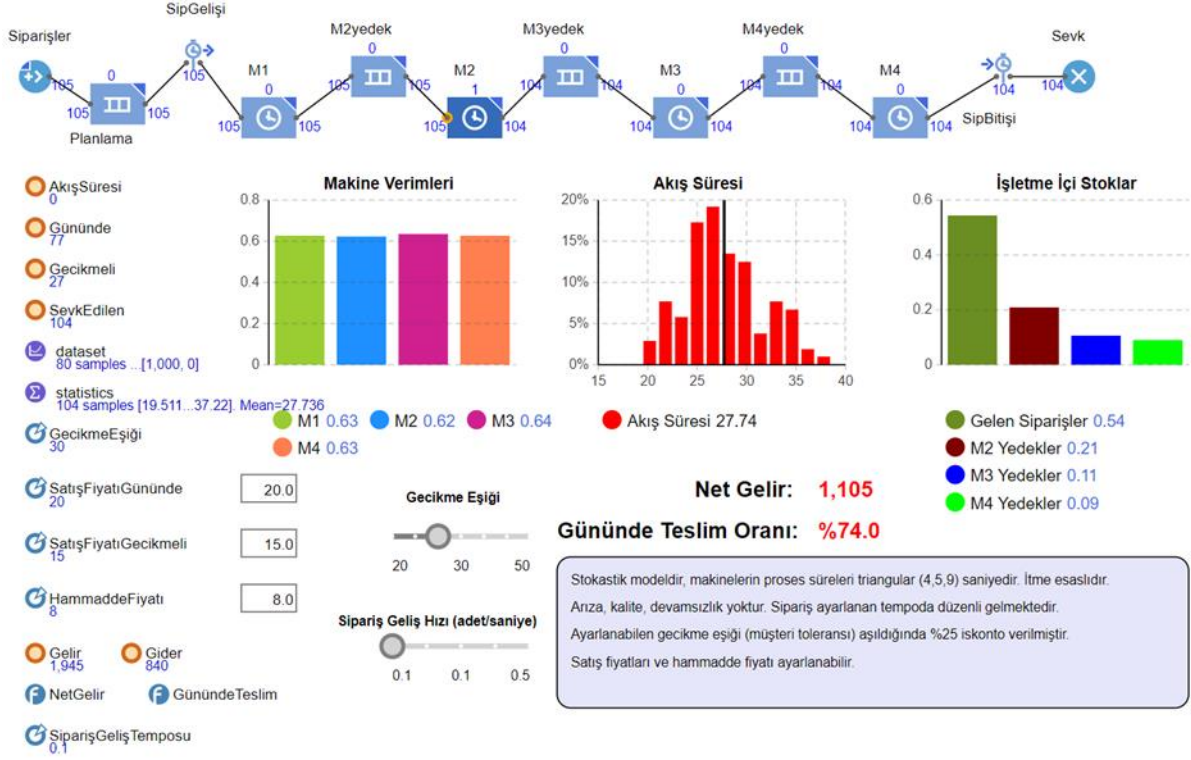
30 farklı setle elde edilen sonuçlar için Minitab ile %5 anlam seviyesinde uygunluk testi Yalın-hat dengesi için

Şekil 8'de gösterilmiştir. Net Gelir sonucunun testte hesaplanan p değeri 0.094 ile $\alpha = 0.05$ ' ten büyüktür, sola çarpık görünüme rağmen normal dağılıma uygunluk reddedilememiştir. Benzer şekilde Gününde Teslim% sonucunun test p değeri 0.88 dir ve $\alpha = 0.05$ ten büyük olduğu için normal dağılıma uygunluk reddedilememiştir.

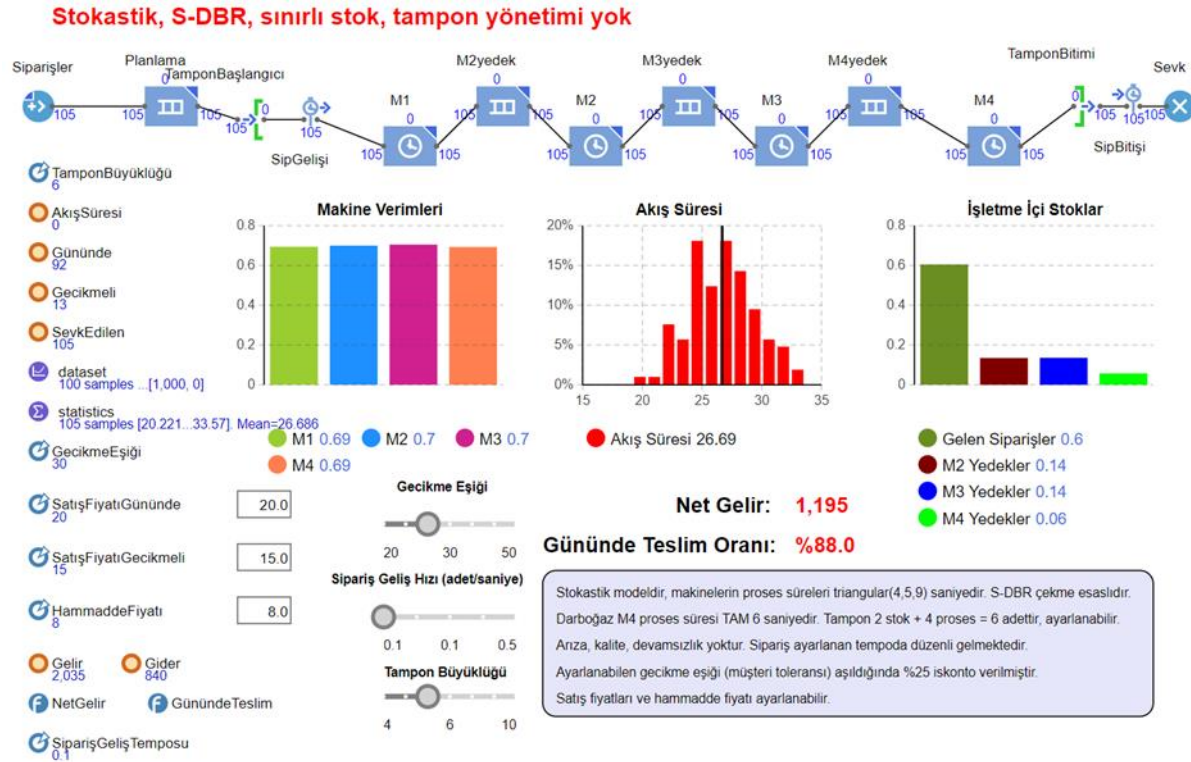
Tablo 5. Farklı rastgele sayı data setlerinin toplu sonuçları

| RSS No | Yalın-Hat Dengesi | | | S-DBR tampon yönetimsiz | | |
|-------------|-------------------|-------------|-----------|-------------------------|-------------|------------|
| | GT% | NG TL | Adet | GT% | NG TL | Adet |
| 1 | %74 | 1105 | 104 | %88 | 1195 | 105 |
| 2 | %96 | 1116 | 96 | %91 | 1000 | 90 |
| 3 | %90 | 1039 | 93 | %93 | 1113 | 97 |
| 4 | %98 | 1182 | 100 | %89 | 1200 | 105 |
| 5 | %76 | 1135 | 105 | %91 | 1215 | 105 |
| 6 | %71 | 1110 | 105 | %93 | 1089 | 95 |
| 7 | %78 | 999 | 94 | %75 | 1110 | 104 |
| 8 | %92 | 1096 | 96 | %91 | 1215 | 105 |
| 9 | %84 | 1140 | 103 | %68 | 1090 | 105 |
| 10 | %85 | 1180 | 105 | %70 | 1100 | 105 |
| 11 | %75 | 1130 | 105 | %88 | 1084 | 96 |
| 12 | %80 | 1135 | 104 | %72 | 1115 | 105 |
| 13 | %65 | 1028 | 102 | %87 | 1060 | 94 |
| 14 | %83 | 1095 | 99 | %96 | 1240 | 105 |
| 15 | %79 | 1000 | 95 | %71 | 1110 | 105 |
| 16 | %80 | 1104 | 101 | %91 | 1215 | 105 |
| 17 | %84 | 1175 | 105 | %92 | 1220 | 105 |
| 18 | %88 | 950 | 86 | %85 | 1180 | 105 |
| 19 | %82 | 1165 | 105 | %83 | 1170 | 105 |
| 20 | %76 | 954 | 92 | %89 | 998 | 90 |
| 21 | %82 | 1078 | 98 | %91 | 1080 | 94 |
| 22 | %81 | 979 | 90 | %90 | 1205 | 105 |
| 23 | %92 | 1068 | 95 | %91 | 1064 | 94 |
| 24 | %79 | 1150 | 105 | %92 | 1220 | 105 |
| 25 | %64 | 1070 | 105 | %50 | 1000 | 105 |
| 26 | %71 | 1011 | 99 | %66 | 1065 | 104 |
| 27 | %90 | 1023 | 89 | %74 | 1125 | 105 |
| 28 | %77 | 1140 | 105 | %74 | 1125 | 105 |
| 29 | %83 | 1170 | 105 | %96 | 1176 | 101 |
| 30 | %91 | 1123 | 98 | %93 | 1181 | 102 |
| Ort: | %82 | 1088 | 99 | %84 | 1132 | 102 |
| Std: | %8 | 69 | 6 | %11 | 72 | 5 |

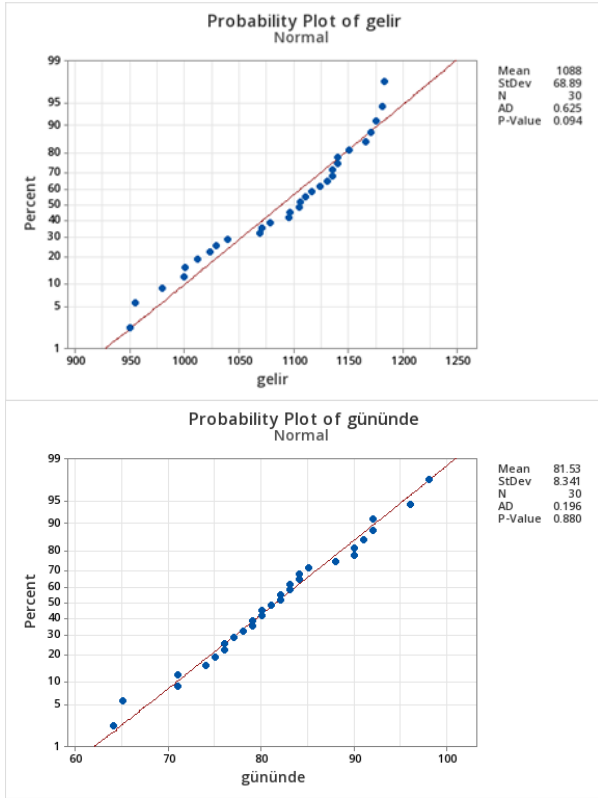
RSS: Rastgele Sayı Seti, GT%: Gününde Teslim%, NG TL: Net Gelir TL, Ort: Ortalama, Std: Standart Sapma



Şekil 6. Yalın-hat dengeli üretim hattı modeli (AnyLogic PLE ver 8.8.2'den yazarlar tarafından oluşturulmuştur)



Şekil 7. S-DBR tampon yönetimsiz üretim hattı modeli (AnyLogic PLE ver 8.8.2'den yazarlar tarafından oluşturulmuştur.)



Şekil 8. Yalın-hat dengesi simülasyon sonuçlarının normallik testleri (Minitab ver 21.4.0.0 ile yazarlar tarafından oluşturulmuştur)

Benzer şekilde S-DBR simülasyon sonuçları için Minitab ile %5 anlam seviyesinde yapılan uygunluk testi **Şekil 9'** da gösterilmiştir. Net Gelir sonucunun teste hesaplanan p değeri 0.067 ile $\alpha = 0.05$ ' ten büyüktür, sola çarpık görünümüne rağmen normal dağılıma uygunluk reddedilememiştir. Gününde Teslim% sonucunun test p değeri $\alpha = 0.05$ ten küçüktür, normal dağılıma uygun değildir.

İki yöntemin performans karşılaştırması Net Gelir, Gününde Teslim oranı ve sevk adedi göstergeleriyle yapılacaktır. Net Gelir için hipotezler aşağıdaki gibidir:

- H_0 : Yalın-hat dengesinin geliri S-DBR gelirine denktir.
- H_1 : Yalın-hat dengesinin geliri, S-DBR gelirinden düşüktür.

Minitab çiftli t test sonucunda $p = 0.008$ hesaplanmıştır, $\alpha = 0.05$ anlam seviyesinden küçük olduğu için H_0 reddedilecektir: S-DBR ile net gelir, Yalın-hat dengesine göre %4 artmıştır.

Diğer gösterge olan gününde teslim oranı için hipotezler aşağıda gösterilmiştir:

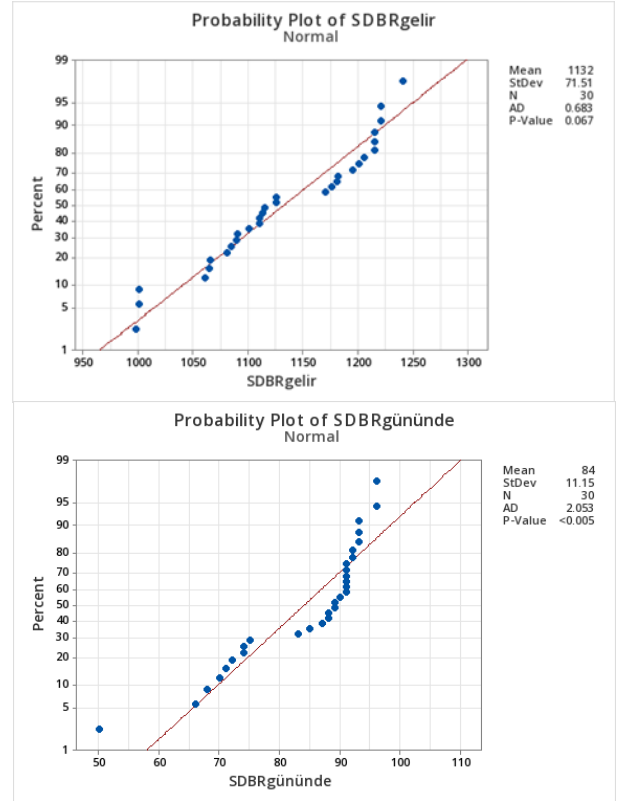
- H_0 : Yalın-hat dengesinin gününde teslim oranı S-DBR gününde teslim oranıyla denktir.
- H_1 : Yalın-hat dengesinin gününde teslim oranı S-DBR gününde teslim oranından düşüktür.

Minitab test sonucunda $p = 0.119$ hesaplanmıştır, $\alpha = 0.05$ anlam seviyesinden büyük olduğu için H_0 reddedilememiştir: S-DBR ile Yalın-hat dengesinin gününde teslim oranları denktir.

Son gösterge olan sevk adedi için hipotezler aşağıda gösterilmiştir:

- H_0 : Yalın-hat dengesinin sevk adedi S-DBR sevk adediyle denktir.
- H_1 : Yalın-hat dengesinin sevk adedi S-DBR sevk adedinden düşüktür.

Minitab test sonucunda $p = 0.046$ hesaplanmıştır, $\alpha = 0.05$ anlam seviyesinden küçük olduğu için H_0 reddedilecektir: S-DBR ile Yalın-hat dengesinden %3 daha fazla sevk edilmiştir.



Şekil 9. S-DBR simülasyon sonuçlarının normallik testleri (Minitab ver 21.4.0.0 ile yazarlar tarafından oluşturulmuştur)

6 Tartışma

Tablo 5' teki sonuçlar yöntem bazında incelendiğinde tek göstergeyle değil tüm göstergelerle birlikte değerlendirmenin daha uygun olacağı görülmektedir. Yalın-hat dengesi yönteminin 6 ve 7 numaralı veri setleri **Tablo 6'** da hatırlatılmıştır. Karşılaştırmada gününde teslim oranı artarken net gelirin azalmasının nedeni sevk miktarının 105 adetten 94 adede düşmesidir.

Tablo 6. Veri tutarlılığı

| RSS No | Yalın-Hat Dengesi | | | S-DBR tampon yönetimsiz | | |
|--------|-------------------|-------|------|-------------------------|-------|------|
| | GT% | NG TL | Adet | GT% | NG TL | Adet |
| 6 | %71 | 1110 | 105 | %93 | 1089 | 95 |
| 7 | %78 | 999 | 94 | %75 | 1110 | 104 |

RSS: Rastgele Sayı Seti, GT%: Gününde Teslim%, NG TL: Net Gelir TL

Tablo 6'deki 6 numaralı veri seti için S-DBR yönteminde gününde teslim %93 ile Yalın-hat dengesindeki %71 oranından daha yüksektir. Buna rağmen net gelirin 1089TL ile Yalın-hat dengesindeki 1110TL den düşük olmasının sebebi sevk miktarındaki 10 adetlik azalmadır.

Simülasyon sonuçları Yalın-hat dengesi modelinde net gelir ve gününde teslim oranları için normal dağılıma benzerlik sağlamıştır. Ancak sonuçlar S-DBR modelinde net gelir için normal dağılıma benzer olmakla birlikte gününde teslim için yeterli tekrara ulaşamamıştır. AnyLogic PLE 8.8.2 versiyonunda daha fazla tekrar olanağı yoktur, gelecek çalışmalarda S-DBR tam fonksiyonlu olarak modellendiğinde sonuçların normal dağılıma benzerlik göstereceği umulmaktadır.

Yalın-hat dengesi ve S-DBR yöntemlerinin performans farkları için Minitab ile $\alpha = 0.05$ anlam seviyesinde yapılan çiftli t testi sonuçlarına göre S-DBR yöntemi, Yalın-hat dengesi yönteminden net gelirden %4 ve sevk miktarında %3 daha iyi performans göstermiştir. Mevcut S-DBR modelinde dinamik tampon yönetimi gibi unsurlarının yer almaması, değişkenliğin sınırlı olması, tek ürün ve tek hat kurgusu gibi nedenlerle gününde teslim performansında görülen 2 puanlık artış anlamlı bir fark olarak değerlendirilmemiştir.

Scholz-Rieter vd. [45] sürecin içinde dinamik olarak darboğazı belirlemenin önemi üzerinde durmuşlardır, simülasyon modelleri için herhangi bir performans sonucu paylaşmamışlardır.

Bu çalışmadaki kurgu Thüerer vd. [46] akış süresine göre gecikme hesabı, akış tipi üretim ve ciddi (severe) dereceli kısıt versiyonuyla benzerlik göstermektedir. Thüerer ve arkadaşları 7 istasyonlu, gecikme eşiği düzgün dağılımla değişkenlik gösteren ve çizelgeleme yöntemleri bazında bir model oluşturmuştur. Karşılık gelen tek gösterge gününde teslim oranıdır, belirgin bir oran verilmemiştir, % cinsinden fark görülmediği ancak ortalama gecikme süresinin DBR ile azaldığı raporlanmıştır.

Lizarralde-Aiastui vd. [47] uygulamalı çalışmalarında akış süresinin %10, işletme içi stokların %40, kalite şikayetlerinin %20 azaldığını ve servis seviyesinin (gününde teslim) %50' den %70' e yükseldiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada net gelir %4, üretim (sevk) %3, gününde teslim %2 artmıştır

Gonzales-Romero vd. [48] farklı teknikleri farklı amaçlar için kullandıkları çalışmalarında gününde teslim için DDMRP (Demand Driven MRP: Talebe Duayrlı Malzeme İhtiyaç Planlaması) yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem üretimde DBR ile benzerlik içerir. Gününde teslim oranının %30'dan %59' a yükseldiği raporlanmıştır. Bu çalışmadaki S-DBR modellemesinde S-DBR yönteminin tüm fonksiyonları uygulamaya alınamamıştır ve alternatif uygulama olan Yalın-hat dengelemesi Gonzales-Romero çalışmasına göre çok daha yüksek bir karşılaştırma seviyesi sağlamıştır.

Schragenheim ve Dettmer genelde TOC, özelde DBR uygulamasıyla elde edilen sonuçları küresel ölçekte 80 firmayla yapılan bir ankete dayanarak gününde teslimde 13 firmayla %44 iyileşme, 34 firmayla akış süresinde %70 kısalma, 14 firmayla üretimde %65 artış şeklinde özetlemektedir [13,14].

Pirasteh 2005 yılında iki yılı aşkın süre zarfında 21 firmada (11 firma 6sigma, 4 firma yalın, 6 firma Yalın-6sigma-Kısıtlar Teorisi karma) yapılan çalışmada elde edilen tasarrufun %89'unun karma uygulamadan geldiğini raporlamıştır. Sürekli iyileştirme kavramı içinde bu yöntemler birbirinin rakibi değil, tamamlayıcıdır [2].

Apaolaza vd. [50] S&OP kavramını TOC ile ilişkilendirdikleri çalışmalarında belirsizliğin giderek arttığı günümüz iş ortamında satış ve üretimin pazar eğilimleri ve kapasite kısıtları üzerinden yakın ve bütüncül bir yaklaşım gerektirdiğini belirtmişlerdir. S-DBR uygulamasındaki planlanan iş yükü ve emniyetli termin uygulamaları S&OP işleyişiyle uyumludur. Firmaların üretim sürecinde hızlanmaları stok için üretimden (MTS:Make To Stock) siparişe üretime (MTO:Make To Order) geçişi sağlayabilecektir.

Corominas vd belirsizlik ortamında Tip E hat için karışık tam sayılı programlama ve sezgisel çözümleri karşılaştırmış ancak bu çalışmayla kıyaslanabilecek bir performans kriteri göstermemiştir [16]. Bu çalışma Tip F hat içindir.

Uyanık'ın çalışmasında hat duruşlarının %48 azaldığı belirtilmekle beraber toplam çalışan sayısı ve günlük üretim adedinin aynı kaldığı görülmektedir [30]. Oysa bu çalışmada hat verimi yerine gününde teslim öncelenerek %4 net gelir ve %3 üretim artışı sağlanmıştır.

Lopes vd çalışmasında akış tipi farklılıkları dikkate alınmış, ortalama %3.25 üretim artışı rapor edilmiştir [31], aynı zamanda S-DBR çözümünün tampon yönetimi içeriği desteklenmiştir. Bu çalışmada da %3 üretim artışıyla sonuç benzerliği vardır.

Portioli-Staudacher vd iş emirlerinin verilmesini sıralarken bu çalışmadaki S-DBR benzeri bir uygulamadan söz etmekte, gününde teslim ve üretim miktarı gibi benzer parametrelerde işgücü esnekliğine bağlı olarak grafik üzerinde iyileştirme göstermektedir [32].

7 Sonuç ve öneriler

"İşlem sürelerinde değişkenlik varken S-DBR ile Yalın-hat dengelemesinden daha yüksek performans sağlanabilir mi?" şeklindeki araştırma sorusunun cevabı iş ortamına uygun olmak kaydıyla olumludur. Daraltılmış bir ortamdaki simülasyon karşılaştırması $\alpha = 0.05$ seviyesinde daha fazla üretim ve gelir sağlayabilmiştir.

VUCA (Volatile- Uncertain- Complex- Ambiguous: Değişken- Belirsiz- Karmaşık- Muğlak) ortamı üretim ve dağıtım yapan firmaların üretim planlama ve yönetiminde zorlanmasına yol açmaktadır. Tedarik zincirinde dayanıklılık (resilience) fikri öne çıkmaktadır.

Küresel ölçekte arzın talebi aşması nedeniyle rekabet artmıştır. Gününde teslim edebilmek, kısa sürede üretebilmek firmaları stok yerine siparişe üretim yapabilir hale getirecek, stokların finansal yükünü azaltarak rekabet gücünü artıracaktır. Üretim planlama ve yönetiminde DBR yaklaşımı firmalara ilave yatırım yapmadan üretim artışı sağlayabilecektir.

Bu çalışmadaki simülasyon modelleri tekrar edilebilirliği kolaylaştırmak amacıyla AnyLogic Cloud üzerinde serbest erişime açılmıştır. Şekil 6'da gösterilen yalın-hat dengeli

model [51] adresinden ve Şekil 7’de gösterilen S-DBR model [52] adresinden çalıştırılabilir.

Bu çalışmanın limitasyonları arasında AnyLogic PLE 8.8.2 versiyonunun kısıtlı kapasitesi, model kurgusunun kısıtlı değişkenlik içermesi, tek ürün ve tek hattan oluşması sayılabilir.

Gelecekte daha fazla değişkenlik faktörü, farklı değişkenlik seviyeleri, akış süresi yerine terminli sipariş listesiyle gününde teslim, tek ürün yerine çok ürünlü siparişler, tek hat yerine çok hatlı üretim, akış yerine atölye üretim yapısı, dinamik tampon yönetimi, tek bir firma yerine tedarik zinciri kurgusu içeren araştırmalar yapılması önerilmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] F. Betti and P. Hong, A Global Rewiring: Redefining Global Value Chains for the Future. World Economic Forum, Geneva, 2023.
- [2] R. Pirasteh and R. Fox, Profitability With No Boundaries. American Society for Quality, Quality Press, Milwaukee, 2011.
- [3] T. Ohno, Toyota Ruhü- Toyota Üretim Sistemi. Scala Yayıncılık, İstanbul, 2018.
- [4] J. H. Blackstone, Ed., APICS Dictionary, 13 ed. APICS-The Association for Operations Management, Chicago, 2010.
- [5] M. Rother and R. Harris, Sürekli Akış Yaratmak-Yöneticiler, Mühendisler ve Üretim Çalışanları İçin Bir Eylem Kılavuzu. The Lean Enterprise Institute, Massachusetts, 2001.
- [6] D. Smith, The Measurement Nightmare-How the TOC Can Resolve Conflicting Strategies, Policies and Measures. The St. Lucie Press/APICS Series on Constraints Management, Boca Raton, 2000.
- [7] E. M. Goldratt, Introduction to TOC-My Perspective. in Theory of Constraints Handbook, J. F. Cox III and J. G. Schleier, Eds., McGraw-Hill, pp. 3-9, New York, 2010.
- [8] E. M. Goldratt, Standing on the Shoulders of Giants. The Manufacturer, 2009.
- [9] E. M. Goldratt, The Unbalanced Plant. Twenty-fourth Annual International Conference Proceedings, Boston, 1981.
- [10] J. Bicheno, The New Lean Toolbox-Towards Fast, Flexible Flow, Production and Inventory Control. Systems and Industrial Engineering Books, Buckingham, 2004.
- [11] O. Cohen, Ever Improve- A Guide to Managing Production the TOC Way. Ivancna: TOC Strategic Solutions, 2010.
- [12] E. Schragenheim, From DBR to Simplified-DBR for Make-to-Order. in Theory of Constraints Handbook, J. F. Cox III and J. G. J. Schleier, Eds., McGraw-Hill, pp. 211-238, New York, 2010.
- [13] J. H. J. Blackstone, A Review of Literature on Drum-Buffer-Rope, Buffer Management and Distribution. in Theory Of Constraints Handbook, J. F. Cox III and J. G. Schleier, Eds., McGraw-Hill, pp. 145-173, New York, 2010.
- [14] E. Schragenheim and H. Dettmer, Manufacturing at Warp Speed- Optimizing Supply Chain Financial Performance. Boca Raton: St. Lucie Press/APICS series on constraints management, 2001.
- [15] Ş. Demirkol Akyol, Tip-2 Montaj Hattı Dengeleme ve İşgücü Atama Problemi için Doğrusal Programlama Yaklaşımı: Bir Vaka Çalışması. DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 25(73), 121-129, 2023. [10.21205/deufmd.2023257310](https://doi.org/10.21205/deufmd.2023257310)
- [16] A. Corominas, A. Garcia-Villoria and R. Pastor, Improving the Resolution of the Simple Assembly Line Balancing Problem Type E. Statistics and Operations Research Transactions, 40(2), 227-242, 2016.
- [17] M. C. A. Ritt, Improved Integer Programming Models for Simple Assembly Line Balancing and Related Problems. International Transactions in Operational Research, 25, 1345-1359, 2015. [10.1111/itor.12206](https://doi.org/10.1111/itor.12206)
- [18] M. Ritt, A. M. Costa and C. Miralles, The Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem with Stochastic Worker Availability. International Journal of Production Research, 54(3), 9007-922, 2015. [10.1080/00207543.2015.1108534](https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1108534)
- [19] Z. Zhang and W. Cheng, Teaching assembly line balancing problem by using Lingo Software. Second International Workshop on Education Technology and Computer Science, pp. 663-666, 2010. [10.1109/ETCS.2010.456](https://doi.org/10.1109/ETCS.2010.456)
- [20] B. N. Şahin and E. Kahya, Hedef programlama problemi ile ergonomik kısıtlar altında montaj hattı dengelemesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 6(ÖS: Ergonomi2017), 188-196, 2018. [10.21923/jesd.358709](https://doi.org/10.21923/jesd.358709)
- [21] K. G. H. Ağpak, Basit U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemine Bulanık Programlama Yaklaşımı. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 4(2), 29-40, 2002.
- [22] S. Kökhan, Farklı tipte işgücüne sahip maliyet yönelimli paralel montaj hattı dengeleme problemi için modelleme ve çözüm. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2020.
- [23] G. Kumar and P. Gowda, An optimal balancing of assembly line using Rpw Technique. International Journal of Engineering Research And Advanced Technology, 1, 469-475, 2016.
- [24] G. Çalışkan, Bir tekstil işletmesinde simülasyon optimizasyon yaklaşımı ile hat dengeleme çalışması. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2020.
- [25] G. Kılıç, Hazır giyim işletmelerinde üretim hattı dengelemesine yönelik bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
- [26] K. Nahar, A. Habib, A. A. Nayon and M. Hossain, Assembly line balancing using ACO Algorithm and

- RPW Method: A Comparative case study. *Journal of Modern Science and Technology*, 6(3), 13-24, 2018.
- [27] K. Ağpak, H. Gökçen, N. N. Saray and S. Özel, Stokastik görev zamanlı tek modelli U tipi montaj hattı dengeleme problemleri için bir sezgisel. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17(4), 115-124, 2002.
- [28] S. T. Ghutukade and S. M. Sawant, Use of ranked position weighted method for assembly line balancing. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies / II / IV / July-Sept*, 1(3), 2013.
- [29] M. S. Khan and J. P. Saurabh, Evaluation of standard time with the application of rank positional weighted method in the production line. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, 7(2), 73-80, 2017.
- [30] A. Ş. Uyanık, Bir traktör fabrikasında karışık modelli montaj hattı dengeleme-deterministik ve stokastik ölçümlere göre analizler. Yüksek Lisans Tezi, TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2020.
- [31] T. C. Lopes, A. S. Michelsa and C. G. S. Sikorab, Balancing and cyclically sequencing synchronous, asynchronous, and hybrid unpaced assembly lines. *International Journal of Production Economics*, 203, 216-224, 2018. [10.1016/j.ijpe.2018.06.012](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.06.012)
- [32] A. Portioli-Staudacher, F. Costa and M. Thürer, The use of labour flexibility for output control in workload controlled flow shops A simulation analysis. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 11, 429-442, 2020. [10.5267/j.ijiec.2019.11.004](https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2019.11.004)
- [33] S. Yoon and S. Jeong, Line Balancing Strategy for Re-Entrant Manufacturing. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 31(1), 42-51, 2018. [10.1109/tsm.2017.2768242](https://doi.org/10.1109/tsm.2017.2768242)
- [34] N. Zheng and L. Xiaochun, Comparative study on push and pull production system based on Anylogic. in *International Conference on Electronic Commerce and Business Intelligence*, 2009. [10.1109/ecbi.2009.26](https://doi.org/10.1109/ecbi.2009.26)
- [35] B. Mendenhall, Creating Perfect Harmony - How to Solve the Discords of TOC and LSS. 2008.
- [36] M. Rother and J. Shook, Görmeyi Öğrenmek, Ver 1.2-değer yaratmak ve israfi ortadan kaldırmak için değer akışı haritalama. The Lean Enterprise Institute, Massachusetts, 1999.
- [37] E. M. Goldratt and J. Cox, Amaç-Süreklili İyileştirme Süreci. Optimist Yayınları-İstanbul: North River Press, 1984.
- [38] H. W. Dettmer, The Logical Thinking Process. Milwaukee, USA: ASQ Quality Press, 2007.
- [39] E. M. Goldratt and R. E. Fox, The Race. New York: North River Press, 1986.
- [40] C. Roser, All About Lean-Organize your Industry!, 2014. <https://www.allaboutlean.com/drum-buffer-ropel/>. Accessed Mayıs 2023.
- [41] Z. Sardar and I. Abrams, Kaos: Düzensizlikteki Düzen., İstanbul: NTV Yayınları, 1998.
- [42] J. H. Holland, Signals & Boundaries: Building Blocks For Complex Adaptive Systems., Londra: The MIT Press, 2012.
- [43] M. Gökçen, A. Boru and A. T. Dosdoğru, İki Aşamalı Tedarik Zincirinde Eş Zamanlı Stok Kontrolünün ve Tedarikçi Seçiminin Simülasyon Optimizasyonu Yaklaşımı ile Analizi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, vol. 8, no. 1, pp. 1-10, 2018. [10.7212/2Fzkufbd.v8i1.617](https://doi.org/10.7212/2Fzkufbd.v8i1.617)
- [44] informs: Simulation Software Survey, 2017. <https://www.informs.org/ORMS-Today/OR-MS-Today-Software-Surveys/Simulation-Software-Survey>. Accessed Mayıs 2023.
- [45] B. Scholz-Rieter, K. Windt and H. Liu, (DET2009) Modelling Dynamic Bottlenecks in Production Networks. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, no. 1, 2010. [10.1080/0951192x.2010.511655](https://doi.org/10.1080/0951192x.2010.511655)
- [46] M. Thürer, M. Stevenson, C. Silva and T. Qu, Drum-buffer-rope and workload control in high-variety flow and job shops with bottlenecks: An assessment by simulation. *International Journal of Production Economics*, no. 188, pp. 116-127, 2017. [10.1016/j.ijpe.2017.03.025](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.025)
- [47] A. Lizarralde-Aiastui, U. Apaolaza-Perez de Eulate and M. Mediavilla-Guisasola, 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*, vol. 13, no. 1, pp. 18-37, 2020. [10.3926/jiem.2868](https://doi.org/10.3926/jiem.2868)
- [48] A. Gonzales-Romero, I. J. Huamani-Martinez, J. C. Quiroz-Flores and B. H. Diaz-Garay, Production management model based on Lean and DDMRP tools to increase the rate of project compliance in manufacturing SMEs in the metalworking sector. in *8th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC)*, 2022. [10.1109/IESTEC54539.2022.00015](https://doi.org/10.1109/IESTEC54539.2022.00015)
- [49] F. Tanhaie, Comparison Between the Performances of Pull and Push Systems Using Discrete Event Simulation. *Journal of Systems Thinking in Practice*, vol. 1, no. 2, pp. 44-55, 2022. [10.22067/JSTINP.2022.77835.1015](https://doi.org/10.22067/JSTINP.2022.77835.1015)
- [50] U. Apaolaza, A. Orue, A. Lizarralde and A. Oyarbide-Zubillaga, Competitive Improvement through Integrated Management of Sales and Operations. *Sustainability*, no. 14-2722, 2022. [10.3390/su14052722](https://doi.org/10.3390/su14052722)
- [51] Yalın-hat dengeli model erişim adresi: <https://cloud.anylogic.com/model/194f3e34-bc74-4289-9577-2394cea5d0c5?mode=SETTINGS&tab=GENERAL>
- [52] S-DBR model erişim adresi: <https://cloud.anylogic.com/model/3d090860-dae8-4f75-92d7-20415cc20a03?mode=SETTINGS&tab=GENERAL>

