

ULUSLARARASI SOSYAL ARAŞTIRMALAR DERGİSİ THE JOURNAL OF INTERNATIONAL SOCIAL RESEARCH

Cilt: 13 Sayı: 70 Nisan 2020 & Volume: 13 Issue: 70 April 2020
www.sosyalarastirmalar.com Issn: 1307-9581
Doi Number: <http://dx.doi.org/10.17719/jisr.2020.4150>

İŞYÜKÜ KONTROLÜ YAKLAŞIMININ İMALAT SANAYİ FİRMALARININ PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF WORKLOAD CONTROL ON PERFORMANCE OF MANUFACTURING COMPANIES

Ahmet HASKÖSE*

Öz

Üretim planlama, yoğun bir rekabetin yaşandığı ve tüketici taleplerinin sürekli değişim gösterdiği günümüz şartlarında, imalat sanayi firmalarının rekabetçiliğinin belirlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Üretim planları kapasite, makine kullanımı, ara stok ve temin süresi gibi bir dizi faktöre ilişkin varsayımlara ve normlara dayanmaktadır. Bu faktörlerden bir veya daha fazlasındaki değişimler hem kısa hem de uzun vadede üretim planlarının revizyonunu gerektirecektir. Öte yandan, üretim temin sürelerinin kısa ve güvenilir olması, özellikle siparişe-özel-üretim yapan firmaların üretim planlama ve kontrol sistemleri için kritik önem taşımaktadır. İşyükü kontrolü yaklaşımı, kapasite planlama ve temin süresi yönetimine yönelik yeni üretim planlama ve kontrol kavramlarından biri olarak öne çıkmakta ve çok yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Bu yaklaşımın, firmaların rekabet gücünün artırılmasında önemli katkı sağlama potansiyeline sahip olduğunu söylemek mümkündür. Bu çalışmada siparişe-özel-üretim gerçekleştiren atölye tipi üretim sisteminde işyükü kontrolü yaklaşımının üretim planlama faaliyetlerine katkısı araştırılmaktadır. Bu bağlamda, girdi kontrolü bakımından sipariş kabulü aşamasında kontrolün ve çıktı kontrolü bakımından da iş istasyonlarının işleme kapasitesine yönelik ayarlamaların atölye tipi üretim sisteminin performansı üzerindeki etkisi blokeli kuyruk ağ modelleri yardımıyla deneysel olarak incelenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Siparişe-özel-üretim, Atölye Tipi Üretim Sistemleri, İşyükü Kontrolü, Kuyruk Ağları.

Abstract

Production planning has a great importance for competitive position of a manufacturing firm in today's competitive environment where customer's demand changing continuously. Production plans are based on presumptions and expectations for a number of factors such as capacity, machine utilisation, inventory and manufacturing lead time. They require decisions or assumptions to be made with respect to these factors. Changes in one or more of these factors affect production plans in both the short and long term. On the other hand, reliable and determinable manufacturing lead times are essential inputs for all production planning systems, particularly in the make-to-order industry. Workload control has been described as one of the new production planning and control concepts for capacity planning and manufacturing lead time management. This approach has the potential to make an important contribution in the competitiveness of companies. This paper aims to investigate the contribution of Workload Control to production planning in job shops. For this purpose, two control mechanisms within the Workload Control concept are considered: (i) input control regulating the work that can enter the shop, and (ii) output control using capacity adjustments to regulate the outflow of work. The effects of these mechanism on performance of job shop is examined by using an approximate model for queueing networks with blocking.

Keywords: Make-to-order, Job Shops, Workload Control, Queueing Networks.

* Doç. Dr., Erciyes Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, haskose@erciyes.edu.tr



GİRİŞ

Üretim sistemleri literatürde ürün çeşitleri, miktarları ve akışı gibi ölçütler dikkate alınarak farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Genel olarak, üretim sistemlerinin *stoğa-üretim* (make-to-stock) ve *siparişe-özel-üretim* (make-to-order) olmak üzere iki ana başlık altında sınıflandırılması mümkündür. Stoğa-üretimde makine ve araç-gereçler özel amaçlı olup, çalışma hızları ve kapasite kullanım oranları yüksektir. Üretim miktarları piyasa şartları dikkate alınarak tahmin edilmekte; sipariş verilmeden önce üretim gerçekleştirilmekte ve nihai ürün çoğunlukla stoklanmaktadır. Stoğa-üretimde kuyrukta bekleme süreleri temel olarak işlem sürelerinden farklılıklardan kaynaklanmakta olup, bekleme süreleri ve ara stoklar düşüktür. Bu nedenle işletmelerin üretim temin süresi kısadır ve tahmin edilebilir. Ayrıca, bu tip üretim sistemlerinde iş akışının düzgünlüğü, üretilen ürünlerin standart tipte olması ve az çeşitli olması nedeniyle üretim planlama faaliyetleri göreceli olarak daha kolaydır. Siparişe-özel-üretim ise zaman, miktar ve çeşit bakımından özel sipariş şartlarına göre gerçekleşen üretim şeklidir. Bu tip üretimde taleplerin düzensiz olması ve öngörülemezliği ile az miktarda çok çeşitli mamul üretilmesi söz konusudur. Bu nedenle, genel amaçlı makine ve araç-gereçler kullanılmakta ve yüksek miktarlarda ara stoklar bulunmaktadır. Bu tip üretimde mamullerin ve hatta üretim hattının planlanması sipariş verildikten sonra gelen siparişe uygun olarak gerçekleştirilmektedir. Siparişe-özel-üretimde öne çıkan özellikleri ürün çeşidinin çok fazla ve üretim miktarlarının düşük olması ile talebin değişken yapıya sahip olmasıdır. Siparişe-özel-üretimde sisteme giren sipariş (iş) çeşitli iş istasyonlarını izleyerek dönüşüme uğrarlar. Sistemdeki makinelerin çok amaçlı olması nedeniyle sisteme giren siparişlerin, alternatif iş istasyonlarından uygun olanlarında veya uygun olan yoksa iş istasyonları arasında kuyruğa alınmak suretiyle üretimleri gerçekleştirilmektedir. Düzensiz bir iş akışına sahip olan bu düzenleme biçimi üretim planlanmasının karmaşık olmasına neden olmaktadır.

Diğer taraftan, üretim sistemleri iş akışı ve yerleşim bakımından da sınıflandırılmaktadır. Bu bağlamda, *akış tipi üretim sistemleri* (flow shops) ve *atölye tipi üretim sistemleri* (job shops) olmak üzere iki ana kategoriden söz etmek mümkündür. Bunlardan akış tipi üretim stoğa-üretimde uygun iken atölye tipi üretim sistemleri ise siparişe-özel-üretim şekline daha uygundur (Muda & Hendry, 2003, 471). Akış tipi üretim sisteminde makine ve araç-gereçler üretilen mamulün üretim aşamalarına uygun olacak şekilde genellikle tek hat boyunca sıralı (tandem) yerleşmişken, atölye tipi üretim sisteminde makine ve araç-gereçler çok amaçlı olup yerleşim genellikle gelen siparişe uygun tasarlanmakta ve bu nedenle düzensiz veya yapılandırılmamış (arbitrary) yerleşim söz konusudur.

Üretim sistemlerinin gelişmesi, üretim planlama faaliyetlerinin önemini artmasına neden olmuştur. Özellikle talep miktarlarında ve tiplerinde düzensizliğin, ürün çeşitliğinin, farklı işlem sürelerinin ve karmaşık iş akışlarının söz konusu olduğu siparişe-özel-üretimde üretim planlama faaliyetlerinin önemi ön plana daha fazla çıkmakta ve etkin üretim planlama zorunluluğu daha fazla hissedilmektedir. Öte yandan, üretim planlama, yoğun bir rekabetin yaşandığı, tüketici istek ve taleplerinin sürekli değişim gösterdiği günümüz şartlarında, imalat sanayi firmalarının rekabetçiliğinin belirlenmesinde de büyük önem taşımaktadır. Günümüz rekabet ortamında, firmaların hayatta kalması ve hedeflerini gerçekleştirmesi, rakiplerinin hamlelerine karşılık verecek, müşteri kaybını engelleyecek ve hatta yeni müşteri kazandıracak üstünlüklere sahip olmasına bağlıdır. Bu bağlamda, üretim planlama ve kontrol faaliyetleri imalat sanayi firmaları bakımından hayati öneme sahiptir.

Genellikle, üretim planları kapasite, makine kullanımı, ara stok ve üretim temin süresi gibi bir dizi faktöre ilişkin varsayımlara ve normlara dayanmaktadır. Bu faktörlerden bir veya daha fazlasındaki değişimler hem kısa hem de uzun vadede üretim planlarının revizyonunu gerektirecektir. Ayrıca, bu değişimler ne kadar büyük olursa, planlama sürecinde hızlı bir yanıt alma ihtiyacı da o kadar elzem olacaktır. Öte yandan, üretim temin sürelerinin kısa ve güvenilir olması, özellikle sipariş üzerine üretim yapan firmaların üretim planlama ve kontrol sistemleri için kritik önem taşımaktadır. Literatürde üretim planlama ve kontrol faaliyetlerine ilişkin birçok çalışma bulunmaktadır. Zapfel & Missbauer (1993) ve Stevenson, Hendry & Kingsman (2005), siparişe-özel-üretimde yönelik üretim planlama ve kontrol yaklaşımlarının bir değerlendirmesini yapmaktadır. Kingsman (2000, 73), *işyükü kontrolü* (workload control) yaklaşımını kapasite planlama ve temin süresi yönetimine yönelik yeni üretim planlama ve kontrol kavramlarından biri olarak tanımlamaktadır. Breithaupt, Land & Nyhuis (2002, 625) siparişe-özel-üretim yapan firmalar ve özellikle atölye tipi üretim sistemleri için işyükü kontrolü yaklaşımının önemli katkı sağladığını ifade etmektedir. Öte yandan, Stevenson, Hendry & Kingsman (2005, 869) atölye tipi üretim sistemleri için işyükü kontrolü yaklaşımının en etkin üretim planlama yaklaşımı olduğunu savunmakta; Thüerer, Stevenson, Land & Fredendall (2019, 1741) ise yaklaşımın atölye tipi üretim sistemlerinin performanslarını önemli ölçüde iyileştirdiğini ileri sürmektedir. Günümüz piyasa koşullarında firmaların



hizmet kalitesi ölçümü faktörlerinden, kısa teslim tarihi ve zamanında yapılan teslimatın diğer faktörlere göre daha öne çıktığı dikkate alındığında işyükü kontrolü yaklaşımının firmaların rekabet gücünün artırılmasında önemli katkı sağlayacağı söylenebilir.

Bu çalışmada siparişe-özel-üretim gerçekleştiren atölye tipi üretim sistemlerinde işyükü kontrolü yaklaşımının üretim planlama faaliyetlerine katkısı araştırılmaktadır. Çalışmanın birinci bölümünde işyükü kontrolü yaklaşımı hakkında genel bilgi verilmekte, ilgili literatür özetlenmekte ve bu çalışmanın amacı ile önemi belirtilmektedir. İkinci bölümde, üretim sistemlerinin kuyruk modelleri ile modellenmesi tartışılmaktadır. Atölye tipi üretim sistemlerinde siparişlerin kabulü aşamasındaki kontrolün ve işleme kapasite ayarlamasının sistemin performansı üzerindeki etkileri üçüncü bölümde incelenmektedir. Son bölümde ise, elde edilen bulguların genel bir değerlendirilmesi yapılmaktadır.

I. İŞYÜKÜ KONTROLÜ YAKLAŞIMI

İşyükü kontrolü, üretim planlama ve kontrolü için üretim temin sürelerini tahmin problemi olarak ele almak yerine bu süreleri yönetmeye çalışan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, ürün çeşidinin çok fazla, üretim miktarlarının düşük ve talebin değişken yapıya sahip olduğu siparişe-özel-üretim sistemlerinde daha etkin üretim planlaması yapılmasına imkân vermektedir. Günümüz rekabet koşullarında hızlı bir şekilde değişen müşteri ihtiyaç ve beklentilerine hızlı yanıt verme becerisi önemli olduğundan üretim planlamadaki etkinliğin iyileşmesini sağlayan işyükü kontrol yaklaşımına ilgi giderek artmakta ve literatürde bu yaklaşımı gerek teorik gerekse uygulama temelinde inceleyen çok sayıda çalışma mevcuttur. Literatürdeki işyükü kontrolü yaklaşımına ilişkin çalışmaların kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi Kingsman & Hendry (2002) ve Thüerer, Stevenson & Silva (2011)'de bulunmaktadır. İşyükü kontrolünün temel prensibi, atölyedeki iş istasyonlarının önündeki kuyrukların kontrol edilmesi ve böylece işlem görecekt işlerin bekleme sürelerinin ve dolayısıyla toplam üretim temin süresinin kontrol edilmesidir (Land & Gaalman, 1996).

Hendry, Kingsman & Cheung (1998, 64) iş istasyonları önündeki kuyrukların kontrol altına alınabileceği üç aşama tanımlamaktadır: Bu tür kontrolün *i*) siparişin işlenmek üzere iş istasyonlarına yüklenirken (priority dispatching level), *ii*) işlerin kabul edilmesinden sonra bekletildiği sipariş havuzundan iş serbest bırakılmasında (job release level), *iii*) siparişin sisteme giriş aşamasında (job entry level) gerçekleştirilmesi mümkündür. Kingsman (2000, 81) ve Huang (2017, 352) son aşamanın önemini vurgulamakta ve bu aşamayı müşteri siparişlerine yönelik tekliflerin geliştirildiği (customer enquiry level) ve siparişlerin teyit edildiği sipariş kabulü (order acceptance level) olmak üzere iki aşamaya ayırmaktadır. İşyükü bakımından üretim sisteminin fazla dolu olmasına neden oluyorsa imalat firmasına gelen tüm siparişin kabul edilmesi, siparişlerin kabul aşamasında taahhüt edilen teslim tarihlerine uyulması konusunda önemli risk oluşturacak ve teslimat tarihlerinde gecikmelere yol açacaktır. Bu nedenle sipariş kabulü aşaması firmanın kârlılığı ve müşteri memnuniyeti bakımından önemlidir. İmalat firmasına gelen siparişleri bir kısmının red edilmesi şüphesiz iş kaybına neden olacaktır. Bununla birlikte, çoğu sektörde teslim tarihlerine uyulmaması müşterilerin siparişlerini daha güvenilir firmalara vermesine neden olacak ve firma açısından kâr kaybına ve pazar payının azalmasına yol açacaktır. Yöneticilerin, bir siparişi reddetme veya kabul etme ve ardından teslim tarihlerine uymama arasında bir denge sağlayacak şekilde karar vermesi gerekmektedir.

İşyükü kontrolü yaklaşımının, iş istasyonlarının önündeki kuyrukların uzunluğunu kontrol ederek kuyruk sürelerinin ve dolayısıyla üretim temin süresinin kontrol edilmesini amaçladığı dikkate alındığında, kuyruk teorisinde geniş uygulama alanı olan Little teoremi önemli çıkarımlar sunmaktadır. Little (1961) kuyruktaki ortalama bekleme süresini kuyruktaki yer alan ortalama iş sayısı ile ilişkilendirmektedir. Bu teorem, tek aşamalı kuyruk sistemlerinde geçerli olduğu gibi çok aşamalı kuyruk ağlarında da geçerlidir. Geniş kapsamlı uluslararası bir araştırmada, Vastag & Whybark (1993) teoriye uygun olarak ara stoklar arttıkça üretim temin süresinin arttığını bildirmektedir. Öte yandan, Little teoremi, iş kabul oranını azaltarak ara stoklar azaltıldığında, bu durumun kuyruktaki bekleme sürelerine etkisinin saptanmasının kolay olmadığı konusuna da işaret etmektedir.

İşyükü kontrolü yaklaşımı, iş girişinin kontrolüne ve bu girişlerin zaman içindeki dinamik planlamasına önem vermektedir. Bununla birlikte, diğer tüm üretim planlama yöntemleri gibi, işlerin belirli bir iş istasyonunda ne zaman işleme alınacağını planlamak ve herhangi bir iş istasyonunun aşırı yüklenip yüklenmeyeceğini öngörmek için her bir iş istasyonunda bir işin ortalama kuyruktaki bekleme süresinin tahmin edilmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda, işlerin sisteme girişini irdelemek, bir veya daha fazla işin serbest bırakılmasını geciktirmek veya iş istasyonların aşırı yüklü olduğu dönemlerde ihtimal dahilinde işleme kapasitelerini artırmak için işyükü kontrolü yaklaşımının kullanılabilceğini söylemek mümkündür.



İşyükü kontrolü yaklaşımının bir kısım uygulamasında, hedef teslimat süreleri ve maksimum teslimat süreleri sistemden elde edilen veriler yerine belirli ölçüde keyfi olarak belirlenmektedir. İşlerin iş istasyonlarının önündeki kuyruklarda harcadığı bekleme sürelerinin farklı değerlerinin etkisi bazı çalışmalarda simülasyon modeliyle elde edilmiştir. Silva, Stevenson & Thüerer (2015, 281) işyükü kontrolü yaklaşımına ilişkin çalışmaların neredeyse yarısının simülasyon tabanlı olduğunu ifade etmektedir. Bununla birlikte, simülasyon ile herhangi bir yeni durum için kuyrukta bekleme sürelerine ilişkin hangi değerlerin kullanılacağı açık olmadığı için bu yöntemin bazı dezavantajlarının olduğu söylenebilir.

İşyükü kontrolü yaklaşımı iş istasyonlarının önündeki kuyrukların uzunluğunu uygun seviyelerde tutmak için girdi-çıkı kontrolünün temel prensiplerini uygulamaktadır. Buradaki asıl amaç, taahhüt edilen teslim tarihlerini karşılamaya yönelik kısa, güvenilir ve öngörülebilir temin sürelerini elde etmektir (Fernandes & Carmo-Silva, 2011, 2443).

İş serbest bırakma ve işin işlenmek üzere iş istasyonlarına yükleme aşamalarındaki kontrolün, iş havuzundaki kuyruğunun da denetlenmesiyle daha etkili olacağı söylenebilir. Aksi takdirde, işlerin havuzda uzun süre kalması ve böylelikle taahhüt edilen teslimat tarihlerinin karşılanmaması mümkündür. Stevenson, Hendry & Kingsman (2005, 878), işyükünün kontrol edildiği ilk iki aşama olan siparişlere yönelik tekliflerin geliştirildiği ve siparişlerin teyit edildiği sipariş kabulü aşamasında kontrolün daha önemli olduğu vurgulamaktadır. Bu aşamalarda işyükünün kontrol altına alınmaması durumunda daha sonraki aşamalarda (iş serbest bırakılması ve iş istasyonlarına yüklenmesi aşamaları) kontrolün zayıf kalacağı ve işlerin iş havuzunda bekleme sürelerinin uzamasına neden olacağı ifade edilmektedir. Hemmati, Ebadia & Nahvi (2012, 2670) ise, siparişe-özel-üretim planlanmasına ilişkin literatürde, işin giriş aşamasında kontrolü ile ilgili çok az sayıda çalışma bulunduğunu belirtmektedir.

Öte yandan, sisteme gelen iş girişlerinin denetlenmesinin yanında girdi-çıkı kontrolünün temel prensipleri çerçevesinde iş istasyonlarının işleme kapasitelerinin ayarlanmasıyla da işyükü kontrolünün sağlanması mümkündür. Dolayısıyla, iş kabul oranlarını değiştirmeden iş istasyonları önündeki kuyruk uzunluklarının azaltılması için işleme kapasitesinin artırılması gibi işyükü kontrol önlemleri alternatif olarak ortaya çıkmaktadır.

Thüerer, Stevenson & Land (2016, 43)'a göre atölye veya iş istasyonlarına girecek işleri düzenleyen girdi kontrolüne yönelik literatürde çok sayıda çalışma bulunmakta; ancak sistemdeki iş akışını düzenleyen işleme kapasite ayarlamasını kullanan çıkı kontrolü büyük ölçüde ihmal edilmektedir. Thüerer & Stevenson (2019) ise işyükü kontrolü yaklaşımında iş istasyonlarının işleme kapasite ayarlamasının üretim sistemlerinin performansına etkisinin fazla incelenmediğini; çok az sayıda çalışmada simülasyon yöntemiyle kapasite ayarlamasının performans üzerindeki etkisi araştırılmış olsa da bu çalışmalarda iş istasyonlarının bireysel kapasitelerinden ziyade bütün sistemin işleme kapasite ayarlamasının dikkate alındığını ifade etmektedir.

Kuyrukta bekleme sürelerinin üretimin muhtelif aşamalarındaki işlerin geliş ve işleme (üretim) oranlarına bağlı olduğuna işaret eden temel kuyruk teorisinin işyükü kontrolü yaklaşımında fazla uygulanmadığı görülmektedir. Oysa ki, kuyruk ağları modellerinin önemli faydalarından biri, zamana dayalı bir strateji ve kısa sürede güvenilir teslimat tarihlerinin belirlenmesi için gerekli olabilecek farklı senaryoların analizleri yapmak için çok az çaba ve zaman gerektirmesidir.

Bu çalışmada üretim sistemlerinin planlanmasında yaygın bir şekilde uygulanan işyükü kontrolü yaklaşımında çok fazla araştırılmayan iş kabulü aşamasındaki kontrolün ve iş istasyonlarının işleme kapasitelerine yönelik ayarlamaların atölye tipi üretim sistemlerinin ara stok ve temin süresi gibi performans göstergeleri üzerindeki etkisinin kuyruk ağları ile incelenmesi amaçlanmaktadır.

II. ÜRETİM SİSTEMLERİNİN KUYRUK AĞLARI İLE ANALİZİ

İşyükü kontrolü yaklaşımını uygulayan bir atölyeyi kuyruk sistemi olarak düşünmek mümkündür. Şöyle ki, atölyeye gelen herhangi bir sipariş (iş) sisteme girdikten sonra rotasındaki ilk iş istasyonuna gider ve bu istasyon meşgul ise kuyrukta bekler. İş ilk istasyonundaki işlemini tamladıktan sonra iş rotasındaki bir sonraki iş istasyonuna doğru ilerler ve burada işlem görmeye başlayana kadar yine bekler. Bu durum, çok aşamalı bir kuyruk sistemi veya kuyruk ağı olarak temsil edilebilir. Öte yandan, işyükü kontrolü yaklaşımı her bir istasyondaki iş yükünün her bir makede kabul edilebilir maksimum akış süresini temel alarak belirlenen normu (eşik değeri) aşmamasını ve yeni bir siparişin gelmesi, önceden belirlenmiş normların ihlaline neden olursa gelen siparişin kabul edilmemesini öngörmektedir. Bu şekilde iş yükünün sınırlandırılması, sistemdeki bir iş istasyonunun bekleme alanına gelebilecek iş sayısında bir sınırın getirildiği anlamına gelir. Bu durum, iş istasyonlarında sonlu sayıda ara tampon alanının bir başka ifadeyle



sınırlı ara stok kapasitesinin olduğu blokeli kuyruk ağlarına tekabül etmektedir (Fernandes & Carmo-Silva, 2011, 2444).

Kuyruk ağı, karşılıklı etkileşim içerisinde bulunan bir dizi kuyruğun bulunduğu sistem olarak tanımlanabilir. Birden fazla kuyruğun bulunduğu bu ağlarda işler işlem görmek için kuyruklar arasında transfer edilir ve işlem gören işler sisteme dışardan gelip, işlem gördükten sonra ayrılabilir veya sistemdeki işlem sayısı sabit olabilir. Bu bağlamda, kuyruk ağları *açık kuyruk ağları* ve *kapalı kuyruk ağları* olmak üzere iki alt kategoriye ayrılmaktadır. Açık kuyruk ağları, işlerin bir veya daha fazla kuyruktan dışarıdan sisteme gelerek işlem gördükleri ve sonrasında sistemi terk ettikleri ağlardır. Bu ağlarda, sistemdeki iş sayısı tesadüfî gelişlere ve ayrılışlara bağlı olarak zamanla değişmektedir. Kapalı kuyruk ağlarında ise, işlerin sisteme dışarıdan gelmesi ve sistemden ayrılması söz konusu değildir; bu ağlar sistemdeki iş sayısının sabit olduğu ve aynı sayıdaki işin sürekli bir şekilde sistemde dolaştığı ağlardır.

Kuyruk ağındaki kuyrukların sonsuz veya sonlu bekleme yerlerine sahip olmasına göre ağlar *blokesiz kuyruk ağları* ve *blokeli kuyruk ağları* olarak sınıflandırılmaktadır. Blokesiz kuyruk ağlarında, bütün kuyruklar sonsuz bekleme yerine sahiptir ve bu ağlara Jackson Ağları da denilmektedir. Bu ağlarda kuyruklar sonsuz kapasiteye sahip olduğu için herhangi bir kuyruk, ağdaki diğer kuyruklardan bağımsız analiz edilebilir ve bu tür sistemlerin analiz edilmesi daha kolaydır (bknz. Jackson, 1957 ve 1963). Blokeli kuyruk ağlarında ise bir kısım veya bütün kuyrukların bekleme yerleri sınırlıdır ve bunlar belirli bir azami kapasiteye sahiptir. Bu ağlarda, işlem görecekt iş sınırlı sayıda bekleme yeri olan kuyruğa gidecek olduğunda eğer bu bekleme yeri dolu ise işi gönderecek kuyruğun bloke olması ile karşılaşmaktadır. Blokeli kuyruk ağlarında bloke durumu nedeniyle kuyrukların birbirinden bağımsız analiz edilmesi mümkün olmayıp karşılıklı etkileşimlerin dikkate alınması gerekmekte ve analiz çok daha zorlaşmaktadır.

Son olarak topoloji bakımından da kuyruk ağlarının, kuyrukların yerleşim düzenine göre *sıralı* (tandem) ve *yapılandırılmamış* (arbitrary) olmak üzere sınıflandırılması mümkündür. Sıralı topolojide kuyruklar birbiri ardınca sıralanmışken, yapılandırılmamış ağlarda kuyrukların dizilişine ilişkin herhangi bir sınırlama bulunmamaktadır. İşlerin kuyruklar arasında transferi ve dolayısıyla ağıın yerleşimi kuyruklar arasındaki rotaların olasılıkları ile tanımlanmaktadır. Yapılandırılmamış kuyruk ağları da kendi içerisinde *ileri* (feed-forward) ve *geri beslemeli* (feed-backward) ağlar olmak üzere iki alt kategoriye ayrılmaktadır. İleri beslemeli yapılandırılmamış kuyruk ağlarında bir kuyruğa diğer bir kuyruktan geriye doğru bir geri dönüş olamaz; buna karşılık geri beslemeli ağlarda işlerin hem ilerideki kuyruklara hem de gerideki kuyruklara gitmesine izin verilmektedir; bir başka ifadeyle geri dönüşlere izin verilmektedir.

Bahsedilen bu üç ana sınıflandırmanın farklı kombinasyonlarını kullanarak kuyruk ağlarının gerçek hayattaki birçok sistemin modellenmesinde ve performans değerlendirmesinde kullanılması mümkündür.

Birkaç özel durum dışında, blokeli kuyruk ağlarının modellenmesi ve analiz edilmesi kolay olmayıp, kuyruklar arasındaki etkileşimin dikkate alınması gerekmektedir. Genel olarak, blokeli kuyruk ağlarının analizi yaklaşık çözüm veren analitik modeller veya simülasyon ile gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte simülasyon modellerinin geliştirilmesi, geçerliliğinin araştırılması ve sonuçların istatistiksel analizi çok fazla zamanı gerektirir. Alternatif olarak, blokeli kuyruk ağlarının *yaklaşık modeller* (approximate models) kullanarak analiz edilmesi mümkün olup; literatürde bu tür kuyruk ağları için birçok yaklaşık model önerilmiştir. Dallery & Gershwin (1992), Perros (1994), Balsamo, de Nitto Persone & Onvural (2001) ve Zhang vd. (2017) blokeli kuyruk ağlarına ilişkin önerilen yaklaşık modelleri kapsamlı bir şekilde incelemektedir.

III. İŞYÜKÜ KONTROLÜ YAKLAŞIMININ DENEYSSEL İNCELENMESİ

İşyükü kontrolü yaklaşımında, siparişin kabulü aşamasında kontrol uygulanmadığında daha sonraki aşamalarda uygulanacak kontrolün etkisinin zayıf kalması ve işlerin iş havuzunda bekleme sürelerinin uzaması mümkündür. Öte yandan, iş kabul oranlarını değiştirmeden, üretim hattındaki iş istasyonlarının işleme kapasitelerinin ayarlanmasıyla da iş yükünü kontrolünün sağlanması ve iş istasyonlarında işlem görecekt işlerin bekleme sürelerinin azaltılması mümkündür. Bu kısımda, girdi kontrolü bakımından sipariş kabulü aşamasında kontrolün ve çıktı kontrolü bakımından da iş istasyonlarının işleme kapasitelerine yönelik ayarlamaların atölye tipi üretim sistemlerin performansı üzerindeki etkisi blokeli kuyruk ağ modelleri yardımıyla deneysel olarak incelenmektedir. Bu amaçla, beş iş istasyonundan oluşan bir atölye tipi üretim sistemi düşünülmüştür. Atölyeye gelen işler öncelikle sonlu bekleme alanına sahip iş havuzuna alınmakta, daha sonra iş rotasındaki sonlu ara stok alanlarına sahip istasyonlarda işleme alınmakta ve nihayetinde atölyeden ayrılmaktadır. Deneysel çalışmanın sonuçlarının elde edilmesi amacıyla ileri ve geri beslemeli topolojileri dikkate alan yapılandırılmamış kuyruk ağlarının



analizine imkân veren Haskose, Kingsman & Worthington (2004) tarafından önerilen yaklaşık model kullanılmıştır.

A. GİRDİ KONTROLÜ BAKIMINDAN SİPARİŞİN KABULÜ AŞAMASI

Siparişe-özel-üretim yapan atölye tipi üretim sistemlerinin belirli bir yerleşim düzenine sahip olmaması ve gelen siparişin özelliklerine göre çok farklı şekillerde tasarlanmasının mümkün olması nedeniyle yerleşim düzeni Tablo 1’de gösterilen rota olasılıklarıyla tanımlanan bir atölye tipi üretim sistemi düşünülmüştür. Bu kısımda, siparişin kabulü aşamasındaki kontrolün tanımlanan atölyenin performansı üzerindeki etkisini incelenmiştir. Tablo 1’den görüldüğü gibi, iş havuzu atölyedeki tüm istasyonlara iş gönderebilmekte ve işler işlemlerini tamamladıktan sonra herhangi bir istasyon üzerinden atölyeden ayrılabilir. Bir başka ifadeyle, dikkate alınan atölye tipi üretim sisteminde işler sisteme herhangi bir iş istasyonundan girebilmekte ve herhangi bir iş istasyonundan sistemden ayrılabilir. Atölyedeki her iş istasyonu kendinden önce veya sonraki üç istasyona ve sistemin dışına (çıkışa) eşit olasılıklarla iş gönderebilmektedir. Bu bağlamda esnekliği yüksek yapılandırılmamış atölye tipi üretim sistemi söz konusudur.

Tablo 1: Atölye tipi üretim sisteminin iş rotaları ve olasılıkları

	1	2	3	4	5	çıkış
İş havuzu	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0
1	0	0,25	0,25	0,25	0	0,25
2	0,25	0	0,25	0,25	0	0,25
3	0	0,25	0	0,25	0,25	0,25
4	0	0,25	0,25	0	0,25	0,25
5	0	0,25	0,25	0,25	0	0,25

Dikkate alınan atölye için genel kabul ve varsayımlar şu şekilde sıralanabilir:

- Sistemde gelen işlerin toplandığı iş havuzu ve beş iş istasyonu bulunmakta,
- Her iş istasyonu tek kanallı servis birimine sahip,
- İş havuzu ve bütün iş istasyonlarında sonlu sayıda bekleme alanı mevcut,
- İşlerin üretim merkezine gelişleri tamamen tesadüfi olup iş gelişleri Poisson dağılım göstermekte,
- İşleme (üretim) süreleri stokastik olup üstel dağılıma uymakta,
- Sistemdeki herhangi bir iş istasyonu kendisine iş gönderen istasyona da iş gönderebilmekte, yani geri beslemeli topoloji mevcuttur.

Atölyeye işlerin ortalama geliş oranı (λ) günde 0,9 ve iş istasyonların günlük ortalama işleme oranları (μ_i) 1 iş olarak kabul edilmektedir. Sistemdeki tüm iş istasyonlarına ait bekleme alanlarının en fazla 5 iş kabul edebildiği varsayılmaktadır.

İşyükü kontrolü yaklaşımına göre iş istasyonlarının önündeki kuyrukların kontrol altına alınabileceği aşamalardan biri olan siparişlerin kabul aşamasına yönelik alınacak kararların sistemin performansı üzerindeki etkisi incelemek amacıyla iş havuzunun büyüklüğü bakımından 6 farklı senaryo öngörülmüş ve bu senaryolar h30, h25, h20, h15, h10 ve h5 olarak kodlanmıştır. Senaryolardan biri olan ‘h30’ kodlu senaryoda iş havuzunun kapasitesi en fazla 30 iş olarak düşünülmüştür. Diğer senaryolarda bu kapasite kademeli olarak azaltılmış ve iş havuzunun maksimum kapasitesi sırasıyla 25, 20, 15, 10 ve 5 iş olarak planlanmıştır. Burada, iş havuzunun kapasitesi küçüldükçe sisteme kabul edilen iş sayısının ve dolayısıyla atölyede işlem görmek için bekleyen iş sayısının düşmesi öngörülmektedir.

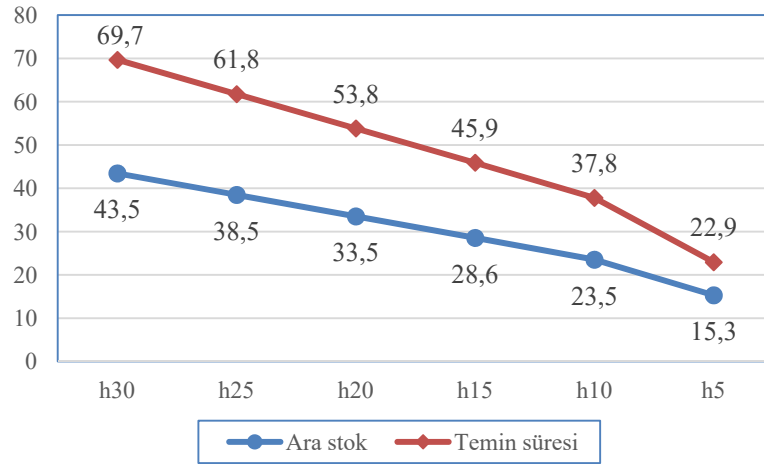
Dikkate alınan bu altı senaryo için iş havuzu ve istasyonlarda bekleyen ortalama iş sayıları Tablo 2’te gösterilmektedir. Özellikle ilk beş senaryoda iş istasyonları ara stok seviyelerinin çok fazla değişmediği; buna karşın iş havuzunda bekleyen iş sayısının havuzun bekleme yeri kapasitesinin büyüklüğü ile benzer eğilimi gösterdiği anlaşılmaktadır. Bir başka ifadeyle, iş havuzunun bekleme yeri kapasitesinin düşürülmesiyle orantılı bir şekilde iş havuzunda bekleyen iş sayılarında belirgin bir şekilde düşme olmasına rağmen istasyonlarda bekleyen iş sayılarının değişmediği görülmektedir. Bununla birlikte, iş havuzunun bekleme yeri kapasitesinin istasyonların bekleme yeri kapasitelerine eşit olduğu ‘h5’ kodlu senaryoda istasyonlarda bekleyen iş sayılarında %20 ile %30 arasında düşüşler izlenmektedir.



Tablo 2: İş havuzu büyüklüğünün farklı düzeyleri için atölyenin iş havuzunda ve istasyonlarda bekleyen iş sayıları

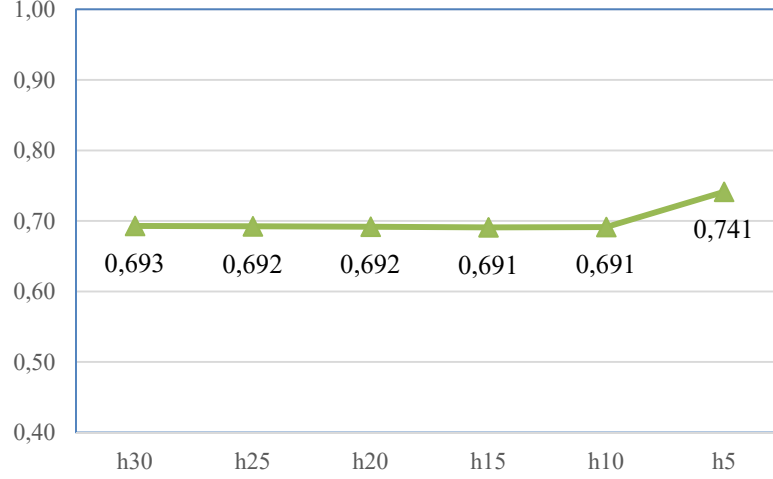
	h30	h25	h20	h15	H10	h5
İş havuzu	27.50	22.53	17.57	12.64	7.79	3.00
Ara stok 1	1.11	1.11	1.11	1.10	1.08	0.82
Ara stok 2	3.95	3.95	3.95	3.94	3.90	3.13
Ara stok 3	4.12	4.11	4.11	4.11	4.07	3.24
Ara stok 4	4.12	4.11	4.11	4.11	4.07	3.24
Ara stok 5	2.67	2.66	2.66	2.66	2.61	1.87

Genel olarak, iş havuzunun bekleme yeri kapasitesinin azaltılması yoluyla atölyeye daha az iş kabul edilmesi, atölyenin toplam ara stok seviyesinin düşmesine ve temin süresinin kısalmasına neden olmaktadır. İş havuzu kapasitesinin farklı düzeyleri için atölyenin tamamında yani iş havuzu ve tüm istasyonlarda bekleyen işlerin ortalama sayıları ve temin süreleri Şekil 1’de gösterilmektedir. İş havuzu kapasitesindeki 5 birimlik azalma çoğunlukla hemen hemen aynı miktarda toplam ara stok seviyesinde düşüşe yol açmakta ve bu durumun iş havuzunda bekleyen iş sayısının azalmasından kaynaklandığını söylemek mümkündür. İş havuzu bekleme yeri kapasitesi 30 işten 25 işe düşürüldüğünde atölyede bekleyen ortalama iş sayısı yaklaşık 5 iş azalarak 38,5 olmakta ve bu durum son senaryo hariç diğerlerinde de görülmektedir. Son senaryo olan ‘h5’ kodlu senaryoda ise toplam ara stok seviyesi daha yüksek miktarda azalmakta; toplam ara stok seviyesinin 8 işten daha fazla azaldığı görülmektedir. Diğer senaryoların aksine ‘h5’ kodlu senaryoda iş havuzunda bekleyen iş sayısındaki azalmaya ilave olarak istasyonlarda bekleyen iş sayılarında gerçekleşen %20 ile %30’luk düşüşün bu sonuçta etkili olduğunu söylemek mümkündür (bknz. Tablo 1). Benzer eğilim siparişlerin temin süresinde de izlenmekte olup, iş havuzu kapasitesindeki 5 birimlik azalma temin süresinde ilk beş senaryoda yaklaşık 8 günlük düşüşe, son senaryoda ise yaklaşık 15 günlük iyileşmeye yol açmaktadır.



Şekil 1: İş havuzu büyüklüğünün farklı düzeyleri için atölyedeki toplam ara stok miktarı ve temin süresi

İş havuzu bekleme yeri kapasitesinin azaltılması yoluyla girdi kontrolünün, atölyeye gelen siparişlerin bir kısmının kabul edilmemesi nedeniyle iş kaybına etkisini de incelemek mümkündür. Bu bağlamda, iş havuzu kapasitesinin farklı düzeyleri için atölyeye gelen siparişlerin kabul olasılıkları Şekil 2’te gösterilmektedir. İş havuzu bekleme yeri kapasitesinin azaltılmasının, sipariş kabul olasılıklarında ciddi bir düşüşe neden olmadığı görülmekte; özellikle ilk beş senaryoda iş kabul olasılıklarında önemli bir değişim izlenmemektedir. Öyle ki, ‘h5’ kodlu son senaryoda iş kabul olasılığının arttığı görülmektedir. İş havuzu kapasitesinin azaltılması daha az sayıda işin sisteme girmesini sağlamakta ve atölyedeki iş yükü yoğunluğunu düşürmektedir. Bu durumun, siparişin kabul olasılığının artmasına neden olması mümkündür. Ayrıca, ‘h5’ kodlu senaryo için gözlemlenen ara stok seviyeleri ve temin süresine yönelik performans iyileşmesi bu görüşü desteklemektedir.



Şekil 2: İş havuzu büyüklüğünün farklı düzeyleri için atölyeye gelen siparişin kabul edilme olasılığı

Sonuç olarak, siparişin kabulü aşamasındaki kontrolün atölyede işlem görmek için bekleyen iş sayısı ve üretim temin süresi üzerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır. İş kabul aşamasında uygulanacak kontrol vasıtasıyla üretim sistemi performans artışının mümkün olduğu söylenebilir. Öte yandan, siparişin kabulü aşamasındaki kontrolün yaratacağı etkinin belirgin bir eğilim izlemediği görülmektedir. Bu bağlamda, uygulanacak kontrol mekanizmasının sistem performansında meydana getireceği değişimin öngörüsünün güç olduğu söylenebilir; ancak analitik model veya simülasyon yardımıyla gerçekleştirilecek öngörüler daha güvenilir analizlere imkân verme potansiyeline sahiptir. Öyle ki, farklı parametrelere sahip sistemlerde çok farklı sonuçlarla karşılaşılabilmektedir.

B. ÇIKTI KONTROLÜ BAKIMINDAN İŞ İSTASYONLARIN İŞLEME KAPASİTE AYARLANMASI

İş kabul oranlarını değiştirmeden iş istasyonlarının kuyruk uzunluklarını kontrol etmek adına çıktı kontrolü bir başka ifadeyle iş istasyonlarının işleme kapasitesinin ayarlanması bir alternatif işyükü kontrol önlemi olarak ortaya çıkmaktadır. Bu kısımda, önceki bölümde dikkate alınan senaryolardan iş havuzu bekleme yeri kapasitesi 15 olan 'h15' kodlu senaryo, işleme kapasitesinin ayarlanması çerçevesinde incelenmektedir. Öncelikle 'atölye' kodlu senaryoda atölyenin yani üretim sistemindeki bütün iş istasyonlarının günlük işleme oranları %25 artırılmıştır. Daha sonrasında ise farklı senaryolarda bireysel istasyonların işlem oranları artırılmıştır. Bu bağlamda, 'ist1' kodlu senaryoda sadece 1 nolu iş istasyonunun işleme oranı %25 artırılmış ve diğer istasyonların işleme oranlarında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Bu artış sırasıyla diğer istasyonlarda da uygulanmış ve 'ist2', 'ist3', 'ist4' ile 'ist5' kodlu senaryolar oluşturulmuştur. Son olarak, 'havuz' kodlu senaryoda ise iş serbest bırakılması %25 hızlandırılmıştır. Bu senaryoların ara stok seviyeleri Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3: İşleme kapasitesinin farklı senaryoları için atölyenin iş havuzunda ve istasyonlarda bekleyen iş sayıları

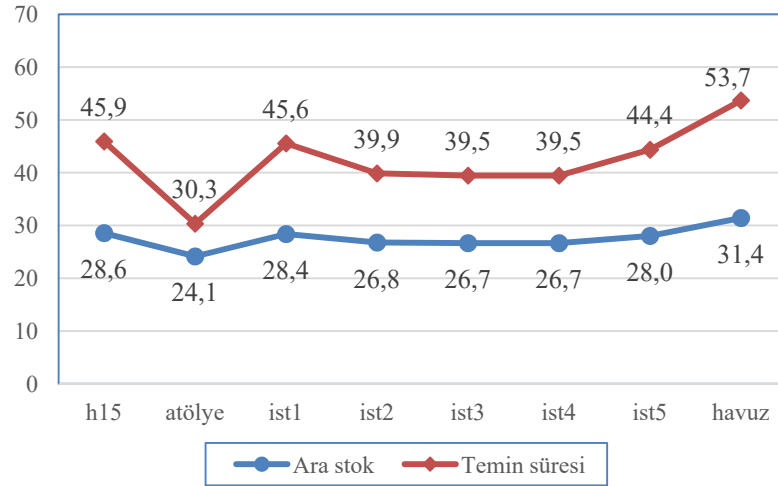
	h15	atölye	ist1	ist2	ist3	ist4	ist5	havuz
İş havuzu	12.6	9.1	12.6	12.0	11.9	11.9	12.5	13.0
Ara stok 1	1.1	1.0	0.9	1.1	1.0	1.0	1.1	1.4
Ara stok 2	3.9	3.7	3.9	3.1	3.8	3.8	4.0	4.4
Ara stok 3	4.1	3.9	4.1	4.0	3.3	4.0	4.1	4.6
Ara stok 4	4.1	3.9	4.1	4.0	4.0	3.3	4.1	4.6
Ara stok 5	2.7	2.4	2.7	2.5	2.5	2.5	2.1	3.4

Atölyedeki tüm iş istasyonlarının günlük işleme oranları %25 artırıldığında ('atölye' kodlu senaryo) iş istasyonlarında bekleyen iş sayılarında çok belirgin bir azalma olmamakla birlikte iş havuzunda bekleyen iş sayısında %30'a yakın düşüş görülmektedir. İşleme kapasite artışı sadece 1 nolu iş istasyonunda gerçekleştirildiğinde ('ist1' kodlu senaryo) atölyenin tüm birimlerinde bekleyen iş sayısında ciddi iyi bir



azalma görülmemekte; sadece 1 nolu iş istasyonu ara stok seviyesinde sınırlı düşüş izlenmektedir. Bu duruma, kapasite ayarlaması yapılmadan önceki durumda ('h15' kodlu senaryoda) 1 nolu iş istasyonu ara stok seviyesinin yüksek olmamasının neden olduğunu söylemek mümkündür. Öte yandan, ara stok seviyeleri en yüksek olan 2, 3 ve 4 nolu iş istasyonlarının günlük işleme oranlarındaki %25'lik artış ('ist2', 'ist3' ve 'ist4' kodlu senaryolar) gerek iş havuzunda gerekse artış yapılan istasyonda bekleyen iş sayılarında nispeten önemli düşümlere yol açmaktadır. 5 nolu iş istasyonunun işleme kapasite artışının ('ist5' kodlu senaryo) atölyenin ara stok seviyesi üzerindeki etkisi, 'ist1' kodlu senaryodaki gibi sınırlı kalmakta ve sadece 5 nolu istasyonun ara stok seviyesini etkilemektedir. Diğer taraftan, iş serbest bırakılmasının %25 hızlandırılması ('havuz' kodlu senaryo) ise atölyenin tüm birimlerinin ara stok seviyelerinde nispeten önemli artışlara yol açmakta; özellikle 1 ve 5 nolu istasyonların ara stok seviyelerindeki artış daha belirgin bir şekilde öne çıkmaktadır.

Atölyenin tüm birimlerinde bekleyen toplam iş sayısı ve üretim temin süresi, iş havuzu ve istasyonlarının bireysel ara stok seviyelerinde gözlemlenen eğilime benzer değişim izlemektedir. Atölyenin tüm birimlerinde bekleyen ortalama iş sayıları ve temin süreleri senaryolar itibarıyla Şekil 3'te gösterilmektedir. Atölyedeki tüm iş istasyonları işleme kapasitelerinin artırdığı 'atölye' kodlu senaryoda en düşük toplam ara stok seviyesi ve en kısa temin süresi elde edilmektedir. Buna karşın, atölyenin performansının en düşük olduğu senaryo olarak 'havuz' kodlu senaryo öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, iş serbest bırakma aşamasındaki kontrolün de sistem performansını etkileyen işyükü kontrol mekanizması olarak dikkate alınması gerektiği söylenebilir.



Şekil 3: İşlem kapasitesinin farklı senaryoları için atölyedeki toplam ara stok miktarı ve temin süresi

İşyükü kontrolü yaklaşımının, iş istasyonlarının önündeki kuyrukların denetim altına alınmasını ve böylelikle işlerin bekleme süresi ile siparişlerin temin süresinin kontrol edilmesini amaçladığı dikkate alındığında, farklı aşamalarda girdi kontrolüyle bu amacın gerçekleştirilmesinin mümkün olmasının yanında işleme kapasite ayarlaması gibi çıktı kontrolüyle de başarı sağlanmasının mümkün olduğu anlaşılmaktadır. Bu bağlamda, iş istasyonlarının işleme kapasite ayarlanması alternatif işyükü kontrol aracı olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, bu araç işyükünün daha fazla olduğu iş istasyonları üzerinde uygulandığında sistemin performansında daha fazla etki yaratma potansiyeline sahiptir.

SONUÇ

İşyükü kontrolü, üretim temin sürelerini yönetmeye çalışan üretim planlama ve kontrol yaklaşımı olup; iş istasyonları önündeki kuyrukların kontrolünün ve bunların dinamik bir şekilde planlanmasının önemini vurgulamaktadır. Üretim planlama ve kontrol sistemlerinin etkinliğinde temin sürelerinin kısa ve güvenilir olması önemli rol oynamaktadır. Bu bağlamda, üretim planlama faaliyetlerinin etkinliği bakımından iş istasyonlarında işlerin ortalama kuyrukta bekleme sürelerinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi gerekmektedir. Özellikle rekabetin oldukça yoğun yaşandığı günümüz piyasa koşullarında kısa ve güvenilir teslimat süreleri büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, farklı senaryoların hızlı bir şekilde analiz edilmesine imkân vermesi nedeniyle kuyruk ağı modelleri öne çıkmaktadır.



Bu çalışmada işyükü kontrolü yaklaşımının üretim planlama faaliyetlerine katkısı incelenmiştir. Bu bağlamda, siparişin kabulü aşamasında işyükü kontrol uygulamasının ve iş istasyonlarının işleme kapasite ayarlamasının üretim sistemi performansına etkisi blokeli kuyruk ağ modeliyle deneysel olarak araştırılmıştır. Siparişin kabulü aşamasındaki kontrol bakımından iş havuzu bekleme yeri kapasitesine yönelik farklı senaryolar değerlendirilmiştir. Bu senaryolarda iş havuzu bekleme yeri kapasitesi küçüldükçe, atölyede bekleyen toplam iş sayısında ve dolayısıyla üretim temin süresinde azalma tespit edilmiştir. Öte yandan, sistemin işyükü kontrolünün iş istasyonlarının işleme kapasite ayarlamasıyla da gerçekleştirilebileceği ve alternatif işyükü kontrol aracı olarak kullanılabilmesi anlaşılmaktadır. İş istasyonlarının işleme kapasite ayarlamasının tüm üretim hattı için tercih edilebileceği gibi özellikle işyükünün iş istasyonları itibarıyla dengeli olmadığı ve işyükünün diğerlerine göre daha fazla olduğu istasyonlar için bireysel kapasite ayarlamasının sistemin performansına olumlu katkı sağlama potansiyeli olduğu görülmüştür. Üretim planlama faaliyetleri bakımından firmaların girdi kontrolü veya çıktı kontrolünden kendi koşullarına uygun olanı tercih edebileceği söylenebilir. Bununla birlikte gerek girdi gerekse çıktı kontrolünün sistem performansı üzerindeki etkisinin belirgin bir eğilim göstermediği, farklı parametrelere sahip sistemlerde uygulanacak işyükü kontrolünün performans üzerindeki etkisinin tahmin edilmesinin mümkün olmadığı ve yaklaşık model sonuçlarına dayanmayan tahminlerin üretim planlamasının etkinliğini zayıflatacağını söylemek mümkündür.

KAYNAKÇA

- Balsamo, S., de Nitto Persone, V., & Onvural, R. (2001). *Analysis of Queuing Networks with Blocking*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Breithaupt, J.W., Land, M., & Nyhuis, P. (2002). The workload control concept: theory and practical extensions of Load Oriented Order Release. *Production Planning & Control*, 13(7), 625-638.
- Dallery, Y. and Gershwin, S. B. (1992). Manufacturing flow line system: a review of models and analytical results. *Queueing Systems, Special Issue on Queueing Models of Manufacturing Systems*, 12, 3-94.
- Fernandes, N.O., & Carmo-Silva, S. (2011). Order release in a workload controlled flow-shop with sequence-dependent set-up times. *International Journal of Production Research*, 49(8), 2443-2454.
- Hemmati, S., Ebadian, M., & Nahvi, A. (2012). A new decision making structure for managing arriving orders in MTO environments. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 2669-2676.
- Hendry, L.C., Kingsman, B.G., & Cheung, P. (1998). The effect of Workload Control on performance in make-to-order companies. *Journal of Operations Management*, 16(1), 63-75.
- Huang, Y. (2017). Information architecture for effective Workload Control: an insight from a successful implementation. *Production Planning & Control*, 28(5), 351-366.
- Jackson, J.R. (1957). Networks of waiting lines. *Operations Research*, 5, 518-521.
- Jackson, J.R. (1963). Jobshop-like queueing systems. *Management Science*, 10, 131-142.
- Kingsman, B., & Hendry, L. (2002). The relative contributions of input and output controls on the performance of a workload control system in Make-To-Order companies. *Production Planning & Control*, 13(7), 579-590.
- Kingsman, B.K. (2000). Modelling input-output workload control for dynamic capacity planning in production planning systems. *International Journal of Production Economics*, 68(1), 73-93.
- Land, M.J., & Gaalman, G. J. C. (1996). Workload control concepts in Job Shops: a critical assessment, *International Journal of Production Economics*, 46-47, 535-548.
- Little, J.D.C. (1961). A proof of the queueing formula $L = \lambda W$, *Operations Research*, 9(3), 383-389.
- Muda, M.S., & Hendry, L. (2003). The SHEN model for MTO SMEs: a performance improvement tool. *International Journal of Operations & Production Management*, 23(5), 470-486.
- Perros, H. G. (1994). *Queueing Networks with Blocking - Exact and Approximate Solutions*. New York: Oxford University Press, Inc.
- Silva, C., Stevenson, M., & Thürer, M. (2015). A case study of the successful implementation of workload control: A practitioner-led approach. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 26(2), 280-296.
- Stevenson, M., Hendry, L.C., & Kingsman, B.G. (2005). A review of production planning and control: the applicability of key concepts to the make-to-order industry. *International Journal of Production Research*, 43(5), 869-898.
- Thürer, M., & Stevenson, M. (2019). The use of finite loading to guide short-term capacity adjustments in make-to-order job shops: an assessment by simulation. *International Journal of Production Research*, DOI: 10.1080/00207543.2019.1630771.
- Thürer, M., Stevenson, M., & Land, M.J. (2016). On the integration of input and output control: Workload Control order release. *International Journal of Production Economics*, 174, 43-53.
- Thürer, M., Stevenson, M., & Silva, C. (2011). Three decades of workload control research: a systematic review of the literature. *International Journal of Production Research*, 49(23), 6905-6935.
- Thürer, M., Stevenson, M., Land, M.J., & Fredendall, L.D. (2019). On the combined effect of due date setting, order release, and output control: an assessment by simulation. *International Journal of Production Research*, 57(6), 1741-1755.
- Vastag, G., & Whybark, D.C. (1993). Global relations between inventory, manufacturing lead time and delivery date promises. *International Journal of Production Economics*, 30-31, 563-569.
- Zapfel, G., & Missbauer, H. (1993). New concepts for production planning and control. *European Journal of Operational Research*, 67(3), 297-320.
- Zhang, H.Y., Chen, Q.X., Smith, J.M., Mao, N., Yu, A.L., & Li, Z.T. (2017). Performance analysis of open general queueing networks with blocking and feedback. *International Journal of Production Research*, 55 (19), 5760-5781.