

## SİPARİŞE ÜRETİMDE ESNEKLİK YÖNETİMİ: YAKIN ZAMANIN GETİRDİKLERİ

Sinan KAYALIGİL\*  
Bekir İlker SÜER

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara  
skayali@metu.edu.tr

Geliş Tarihi: 4 Eylül 2008; Kabul Ediliş Tarihi: 18 Mayıs 2010  
Bu makale 2 kez düzeltilmek üzere 305 gün yazarlarda kalmıştır.

### ÖZET

İmalatta esneklik iki açıdan arzulanır: Kısa vadede sipariş karmasındaki değişimlere kolay uyum göstermek ve gelecekteki belirsiz siparişler için hareket alanını açık tutmak. Bu amaçla, CNC tezgahları ve programların elleçleme uygulamalarının başladığı 80'lerden beri imalatta esneklik yönetimi araştırılmaktadır. İlgili çalışmalar, imalat esnekliğinin ancak belirli düzeylerde sağlanabildiğini ve her düzeye karşılık bir bedel olduğunu göstermekte, bir başka deyişle; ancak ihtiyaçlar ve olası kurulumlar iyi yönetilirse yararlı sonuçlara ulaşılabileceği öngörülmektedir.

Siparişe üretimde, atölyeye kontrollü iş sürme uygulanırken esneklik yönetimi bir karar konusu yapılırsa, hem kısa vadenin hem de geleceğin amaçları birlikte gerçekleştirilebilir. Çalışmamızda, son yirmi yılın belli başlı literatürü bu gözle incelenmekte ve imalat esnekliğinin gündelik karar konusu halini alabilmesi için nasıl bir yaklaşım önerilebileceği tartışılmaktadır. Böylelikle önceden yapılacak ayrıntılı bir iş planının yerini, değişikliklere anında karşılık verecek esnekliğin alması amaçlanmaktadır. Bu anlamda birleştirilmiş esneklik değerlendirmesini dönemsel amaç olarak ele alan ve işlem esnekliği ile rotalama esnekliği arasında denge kuran bir modellemeden yararlanılabileceği anlatılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Siparişe üretim, imalatta esneklik, kontrollü iş sürme

### MANAGING MANUFACTURING FLEXIBILITY IN MAKE TO ORDER: INSPIRATIONS FROM RECENT DEVELOPMENTS

#### ABSTRACT

Two causes motivate manufacturing flexibility: ease to meet changes in the order mix at present and a wider spectrum of potential moves in the future. Hence since the introduction of CNC machines and programmable materials handling in the '80's, research on use of manufacturing flexibility began to appear. Related work underlines that manufacturing flexibility is realized at different levels and that each level has its own consequences. In short, it is possible to achieve superior results through proper management of the needs and the chosen settings.

Both the current and the future objectives may be collectively satisfied if flexibility is made a decision issue in connection to controlled order releases. In this study, we discuss how to improve implementation in this field and how to make manufacturing flexibility an operational day in-day out decision issue. This will provide a replacement for preplanning a detailed work flow with a rapidly responding flexibility in the face of ever changing order requirements. Modeling that evaluates a weighted flexibility mix as a periodic goal will be shown with its potential use in this regard.

**Keywords:** Make to order, manufacturing flexibility, controlled order release

\* İletişim yazarı

## 1. GİRİŞ

Siparişe üretimde temel sıkıntı tüm siparişlerde söz verilen termini yakalarken, atölyede makul bir doluluk düzeyini tutturmak ve iş merkezlerinin önünde uzun ara stok kuyrukları yaratmamaktır. 1980'li yıllardan itibaren yapılan araştırmalar, bu sıkıntının siparişleri atölyeye sürme (“*order release*”) kararları yoluyla giderilebileceğini göstermiştir. Bu tür kontrol; (a) siparişin ilk kabulü anında, (b) kabul edilmesinden sonra bekletildiği sipariş havuzunda, (c) işlenmek üzere makinelere yüklenirken önceliklendirme ile yapılabilir. Siparişleri atölyeye sürmede uygulanacak kontrol, atölyenin o anda mevcut esnekliği ile yakından ilgilidir. Daha çok esneklik bulunan şartlarda daha çok çeşitte işyüğü atölyeye sığdırılabileceği için, daha yüksek hacimde işi sürme olanağı vardır. Ancak sınırlı sayıda bir çeşide hitap edebilir. Tüm müşteri siparişlerini kapsayan bir esnekliği bulundurmamak kolay değildir. Atölyede farklı ürün gamları için zaman içinde esneklik yaratmak zorunda kalınır. Dolayısıyla, imalatta esnekliği kontrol altında tutmak, siparişleri atölyeye sürme kararlarını ve nihai işletme başarımını (performansı) derinden etkileyebilmektedir.

Siparişe üretimde esnek imalat, hem kesin olarak bilinmeyen (gelecek) siparişleri ele alma ve mevcut siparişleri değişik rotalarda işleme fırsatını kullanma, hem de fazla hazırlık süresi kaybına uğramadan geniş bir ürün yelpazesini tamamlama ihtiyacını karşılar. Tezgahların sipariş çeşitlerine hazır tutulması (*işlem esnekliği*) özellikle müşteri siparişlerinde belirsizliğin çok olduğu öncelikli işlerde zaman kazanma ihtiyacı varken yararlı olacaktır. Öte yandan, rotalamada yüksek bir esneklik ile yeni siparişlere yönelik seçenekler açık tutulup, işlenen parçaların bir yoldan olmazsa diğerinden yollanıp hızla tamamlanması sağlanır. Kazanılan sürede başka siparişlere geçilir. Diğer bir deyişle, kimi durumlarda işlem esnekliği ağırlıklı davranmak, kimi hallerde rotalamanın esnek kalması yararlı olacaktır. Bundan dolayı esnekliğin ne seviyede kurulacağı planlama konusu yapılırsa bundan bir kazanç sağlanabilir. Örneğin, Caprihan ve Wadhwa (1997) atölyenin genel ve anlık işyüğü karakterine göre rotalama esnekliğinde ideal bir düzeyin bulunabileceğini gösteren çalışmalardan biridir.

Bu anlamda yakın tarihli örnek bir çalışmayı Daniels vd. (2004)'de görmek olasıdır. Akış tipi bir atölyede birkaç yönden vasıflı işgörenlerin yarattığı kısmi esnekliğin verili bir sipariş kümesini bitirme süresini ne şekilde kısaltabildiğini incelemişlerdir. Sonuçta, işgörenlerin esnek yeterlikleri bir zincir düzeninde birbirine bağlanıyor ve dengeli bir yaygınlık temin ediliyor ise daha önceki araştırmaların da işaret ettiği avantajlı kurulumların mümkün olduğunu göstermişlerdir.

Siparişleri atölyeye sürme anında rota esnekliğini dikkate alan erken tarihli bir çalışma Lingayat vd. (1995)'dir. Yazarlar gerçek zamanlı kontrol ile esnekliğin sağlayacağı işyüğü dengeleme olanağına dikkat çekerler. Yaptıkları deneylerle o yıllara kadar kullanılan rotalama kararlarının, siparişin kabulü anında verilmesi yaklaşımlarının başarımda olumsuzluklara yol açtığını gösterirler. Bergamaschi vd. (1997) tarama çalışmalarında, 1970'lerde başlayan işyüğü kontrollü sipariş yönetimi anlayışında, 25 yıl içinde önerilen farklı yolları sınıflandırmıştır. Ana gözlem, en büyük ağırlığın zaman dilimleri ve tezgahlar arasında işyüğü dengelemeye verildiğidir. Taramada, atölyelerde kapasite değişiklikleri için yeterli makine esnekliğinin bulunmadığı kabulünün yapıldığı anlaşılmıştır. Bu nedenle de pek az çalışmada, gelecekteki siparişler için karar gereği doğmuştur. Newman ve Maffei (1999) ise sipariş sürme ve önceliklendirmeye karşılık, rotalama esnekliğinin atölye başarımı üzerindeki etkisini inceler. Sonuçta, rotalama esnekliğinin, başarımı doğrudan etkilemede denenen diğer operasyonel yönetim araçlarına göre en başta yer aldığı anlaşılır. Esneklik sayesinde yönetim kontrol araçları daha etkili hâle gelebilmekte, farklı başarımlar ölçüleri arasındaki çelişkiler yumuşatılmaktadır. Ancak yazarlar esnekliğin, stoklar gibi imalatta kayıp ve yanlışları gizleyen yeni ama pahalı bir çare olabileceğine dikkat çekmektedir.

1990 başlarında Lancaster Üniversitesinde başlatılan işyüğü kontrolü (“*work load control*”) yaklaşımında, giren sipariş işyüğünün yanı sıra kapasite düzenlemelerinin etkileri de incelenmiştir (Hendry ve Kingsman, 2002). Kapasite düzenleme

yollarından biri, zaman zaman değiştirilen işçilik tahsisleridir. Bu, bir tür esneklik uygulaması kabul edilebilir. İşyüküne göre esnek işçilik tahsisleriyle atölyeden geçiş süresi ve ara stok ortalamalarında anlamlı azalışlar sağlanmıştır.

Corsten vd. (2005), atölyeye iş sürme yönetiminde esnekliği bir karar kriteri (esnekliğin maksimizasyonu) yapmayı incelerken, 1986'dan sonraki araştırmalarda, ya rotalama etkilerinin ihmal edildiğini ya da esnekliğin bir planlama konusu yapılmadığını belirtir. Yazarlar daha önce (Corsten ve Gössinger, 2004) önerdikleri asgari bağlanma ("*least commitment*") prensibini uygulayarak, hem maksimum esnekliğin teminini, hem de yaratılan esneklikten maksimum fırsatı yaratmayı önermektedir. Land (2006), işyükü kontrolünde kullanılan eşik değerlerinin (normların) ve kontrol parametrelerinin başarımlı ölçülerine etkilerini inceler. İşyüklerine toplamda değil, tezgah düzeyinde bakıldıkça ve tezgah geçiş süreleri doğruya yakın belirlendikçe başarımlı da yükselir. Bekleyen siparişleri sık sık değerlendirip gerçek zamanlı işyükü sürme kararları verildiğinde daha dengeli işyükü dağılımı olası görülür. Henrich (2007) siparişe üretimde işyükü kontrolü uygulama araştırmalarında, 2006 sonuna kadar esnek bir rotalama ve birbirini ikame edebilir makineler ("*semi-interchangeable machines*") hiç değinilmediğini vurgular. Çalışmalarının özgün amacı, işyükü rotalama kararlarını verme anının başarımlı etkisini tespit etmektir. Ampirik bulgular rotalama esnekliğinin geçiş süresine olumlu etkisini vurgulamaktadır. Esnekliğin varlığı, rotalamadan başka, işlem önceliklendirmede de yarar sağlamaktadır.

## 2. İŞLEM VE ROTALAMA ESNEKLİĞİ

Yapılan araştırmalarda esnekliğin kontrolü amaçlayan ve kısa vadeli operasyonel bir karar olarak hemen hemen hiç ele alınmadığı anlaşılmaktadır. Buna karşılık bu araştırmalarda esnek makine ve rotalama, işçilik tahsislerinde esnek davranabilmenin ve işyükü akışında zaman kazanmanın iş istasyonları arasında denge sağlayıp başarımlı iyileştirdikleri vur-

gulanmaktadır. Bu yüzden siparişe üretimde işlem ve rotalama esnekliğini kısa vadede kontrol etmeye derinlemesine bakmak yararlı görünmektedir.

İşlem esnekliği ("*process flexibility*") kavramıyla, iş merkezlerinde kapsanan işlemlerin çeşitliliği sayesinde kararlaştırılmış geniş bir yelpazede parça imalatının hemen hemen kesintisiz sürdürülmesi anlaşılır. Tezgahlar, hazırlık ve ayar duruşlarıyla beklemeksizin ne kadar geniş bir parça kümesini bir arada ele alabilir ise işlem esnekliği o kadar yüksek olur. Bu esneklik, çoklu kesici takımlar, modüler bağlama, esnek kullanımlı tablalar ve programlanır otomasyonla temin edilen kolaylıklardır.

İşlenecek siparişlerdeki parçaların farklı güzergahları takip edebilmelerine izin veren düzenlemeler ise rotalama esnekliğini ("*routing flexibility*") getirir. Arızalanma, sonraki tezgahta tıkanma ve öncelikli siparişleri bekleme hallerinde seçenek rotaların varlığı süreçlerin gecikmesiz ilerlemesine yardımcı olur (Mahmoodi vd. 1999).

İşlem esnekliğini temin etmek için her iş merkezinde işlenebilir parça yelpazesini genişletmek, mamullere çok sayıda rota seçeneği yaratmayabilir. Çünkü her tezgahın işleyebileceği ürün yelpazesi, diğer tezgahlarla uyum içinde olmayabilir. Oysa rotalama esnekliği, tezgahlar arasında bütünleşme sağlamayı gerektirir.

Bunu basitçe açıklamak için şu örneği verebiliriz: Üç iş istasyonunda beş çeşit parça işlenebilsin. Her istasyonda ilgili parçaların ( $p$  parçayı göstereyim) hangi işlemlerinin ( $s$  işlemi göstereyim) yapılabildiği ( $Y_{ps}$ ) Tablo 1'de verilmektedir. Her istasyon en fazla dört işlemle kısıtlı olsun ve bir parçanın tamamlanması için her işlemin en az bir iş istasyonunda yapılabilmesi gereğine uyalım.

Bu hâlde işlem esnekliği yüksek olsun diye bir çevrimde:

1. İstasyonda:  $Y_{11}, Y_{12}, Y_{21}, Y_{41}$
2. İstasyonda:  $Y_{22}, Y_{23}, Y_{51}, Y_{52}$
3. İstasyonda:  $Y_{13}, Y_{14}, Y_{24}, Y_{42}$

**Tablo 1.** Üç İstasyonlu Bir Örnekte Ürünlere Göre Her İstasyonun İşlem Yapabilirliği

Ürün	İş İstasyonu 1	İş İstasyonu 2	İş İstasyonu 3
P1	$Y_{11}, Y_{12}, Y_{13}$	$Y_{12}$	$Y_{12}, Y_{13}, Y_{14}$
P2	$Y_{21}$	$Y_{22}, Y_{23}, Y_{24}$	$Y_{23}, Y_{24}$
P3	$Y_{31}, Y_{32}$	$Y_{31}, Y_{32}, Y_{33}$	$Y_{32}, Y_{33}$
P4	$Y_{41}$	-	$Y_{41}, Y_{42}$
P5	-	$Y_{51}, Y_{52}$	$Y_{51}, Y_{52}$

kurulumu yapılabilir. Böylece 1, 2, 4 ve 5 numaralı parçalar ürün yelpazesinde kapsanarak yüksek işlem esnekliği sağlanmaktadır.

Oysa rotalama esnekliğini yüksek tutmak için:

1. İstasyonda:  $Y_{21}, Y_{31}, Y_{32}$
2. İstasyonda:  $Y_{22}, Y_{23}, Y_{24}, Y_{33}$
3. İstasyonda:  $Y_{23}, Y_{24}, Y_{32}, Y_{33}$

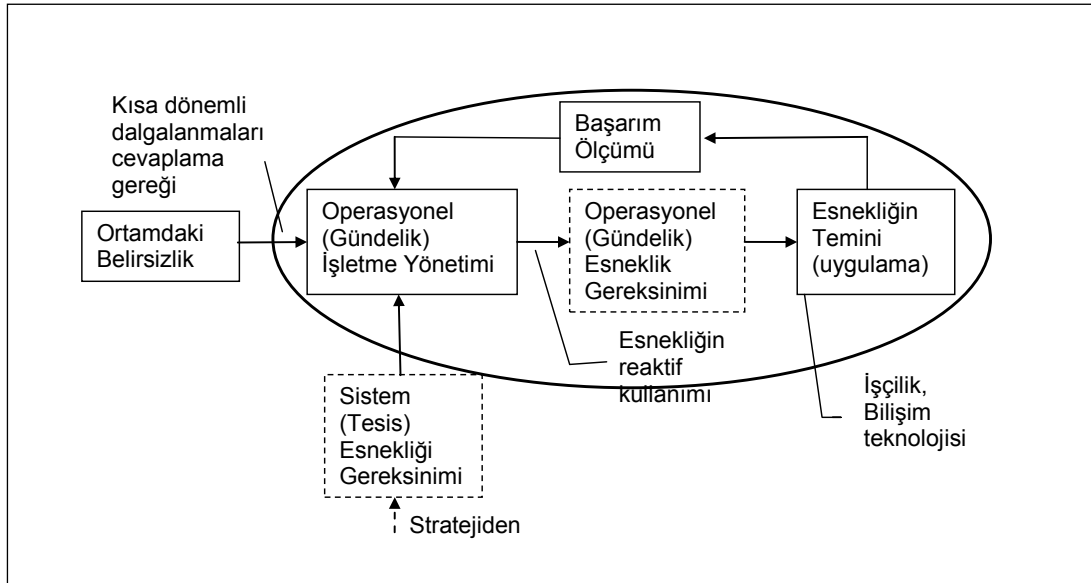
kurulumu daha fazla sayıda rota seçeneği sunmaktadır. Bu durumda, rotalama esnekliğini yüksek düzeyde kurabilmek adına yalnızca 2 ve 3 numaralı ürünler için kurulum yapabiliriz.

1, 2, 4 ve 5 numaralı parçalar için ilk durumda birer rota vardır. Yani toplamda dört rota yaratılmıştır. Oysa rotalama esnekliği sağlandığı durumda 2 numaralı parça için dört ve 3 numaralı parça için dört olmak üzere toplam sekiz rota yaratılmıştır.

## 2.1 Siparişe üretimde esneklik

Yaklaşımımıza benzer bir düşünce, Beach vd. (2000) çalışmasında yer alır (Bkz. Şekil 1). Bu şekilde göre stratejik tercihlerle erişilen otomasyon, nümerik kontrol teknolojisi, modüler kalıp ve tasarım teknikleri gibi yatırım aşamasından gelen özellikler, tesis edilen esneklik düzeyini belirler. Bu esneklik kısa dönemli dalgalanmalara karşı dikkate alınır. Bu noktadan itibaren bir çevrime girilir. Günlük işletme yönetiminde, tesis esneklikleri ile birlikte uygulamada sağlanan başarımlar takip edilecektir. Ardından bir sonraki çevrimde operasyonel esneklikler, tür (işlem/rotalama vb.) ve düzey cinsinden belirlenebilir. Başarımlar gözlenip aynı çevrim sürekli tekrarlanacaktır.

Siparişe üretim kapsamında bizim araştırmamızın odaklandığı alan Şekil 1’de elipsle sınırlanmış işte bu çevrimdir. Buradaki esas, gündelik gelişmelere bağlı



**Şekil 1.** Operasyonel Esneklik Yönetimi (Beach vd. 2000)

esneklik tercihlerini; kapasite tahsisi, parti büyüklüğü ve siparişlerin çizelgelemesi gibi planlanabilir kararlar haline getirmektedir. Otomasyon sayesinde esneklik kısa vadede kontrol altına alındığında, planlamanın ayrıntılı yapılması gereği ortadan kalkacak, günlük işleyiş çoğu otomatikleşmiş kararlarla yürüyecektir.

Aşağıda sunduğumuz Tablo 2'de ilgili bulduğumuz başlıca çalışmaların özellikleri özetlenmiştir. Esneklik çeşitlerine vurgu yapma dışında, kapasitenin verili (kontrol dışı) kabul edildiği durumlar edilgen olarak adlandırılmıştır. Atölyeye iş sürmede, siparişlerin mevcut olanlar ya da henüz işletmeye ulaşmamış gelecek siparişler diye iki kategoride ele alındığı görülmektedir. Bu tablodan anlaşılacağı gibi, her iki esneklik türünü göstergelerle birlikte kullanarak esneklik düzeyinin kontrolü yoluyla siparişe üretimde yeni geliştirme fırsatları incelemeye değerdir. Kapasitenin yönetiminde, kontrollü esneklik ile etkenliği ("effectiveness") dikkate alan ve mevcutların yanı sıra gelecek siparişleri de gözeten çalışmaların eksikliği bulunmaktadır. Bu eksikliği gidermeye esnekliği planlamak olarak bakılabilir.

### 3. ESNEKLİK ÖLÇÜMÜ VE KAPSAMA KAVRAMI

Esnekliğin planlanabilir yapılması, ölçmeyi ve ölçüler cinsinden hedeflemeyi gerektirir. Planlama, bu ölçülerin alacakları değerlerin tayini şeklinde ele alınacaktır. Bu sayısal değerlerin bağlantılarını anlamaya yardımcı olacak modelleme ve karşılaştırmayla da daha etkili esneklik kararları verilebilir.

İşlem ve rotalama esnekliği için önerdiğimiz ölçüler, kapsama kavramıyla açıklanabilir. Burada atölyedeki mevcut teknik yapıyla imalat işlemleri ve rotaların bir bölümü belirli bir kolaylıkla kapsanıyorsa, ayrı ayrı esneklik sağlayan düzenlemeler olarak kabul edilir. Bu düşüncüyü şöyle açıklayabiliriz:

*İşlem esnekliği ölçüsü* ( $İşEsn^{atölye}$ ): Mevcut kurulumla tüm işlemleri atölyede işlenebilen parça çeşidi sayısının ( $Parça^{kapsanan}$ ), uygun kurulumla atölyede imal edilebilecek tüm parça çeşidi sayısına oranı ( $Parça^{tüm}$ ).

$$İşEsn^{atölye} = \frac{Parça^{kapsanan}}{Parça^{tüm}}$$

**Tablo 2.** Yakın Tarihli Siparişe Üretimde İmalat Esnekliği Çalışmalarının Temel Özellikleri

Çalışma	İşlem Esnekliği	Rotalama Esnekliği	Zamanlama Esnekliği	Esneklik Göstergesi	Kapasite Kontrolü	Sipariş Kontrolü
Lingayat vd. (1995)	Yok	Var	Var (çekme)	Yok	Edilgen	Mevcut
Bergamaschi vd. (1997)	Yok	Var	Var	Yok	Edilgen, Etken	Mevcut, Mevcut + Gelecek
Newman ve Maffei (1999)	Yok	Var	Var (sipariş sürme zamanlaması)	Var (seçenek makine sayısı)	Edilgen	Mevcut
Hendry ve Kingsman (2002)	Yok	Yok	Var (Çekme ve erken iş sürme biçiminde)	Yok	Etken	Mevcut, Mevcut + Gelecek
Corsten vd. (2005)	Var	Var	Var	Var (kapasite tahsisi payları)	İhtiyaç / Boş Kapasite	Mevcut + Gelecek
Land (2006)	Yok	Yok	Var (sipariş sürme zamanlaması)	Yok	Edilgen	Mevcut (Termin süresi kısıtlı liste)
Henrich vd. (2007)	Var	Var	Yok	Var (ikame edilir tezgahların payı)	Edilgen	Mevcut
Calvo vd. (2007)	Var	Var	Yok	Var (yarar fonksiyonunda oransal değişme)	Etken	Mevcut

Örneğin, Tablo 1’de geliştirdiğimiz örnekte mümkün olduğunca çok parça ürün yelpazesinde kapsanarak işlem esnekliği yüksek tutulduğunda

$$\dot{I}şEsn^{atölye} = \frac{4}{5} = 0,8 \text{ çıkmaktadır.}$$

*Rotalama esnekliği ölçüsü* ( $RotaEsn_p$ ): Her ürünün imalat sürecini atölyede iş istasyonlarından geçen (yönlü) bir yol ağına benzetebiliriz. Bu rotalamadaki seçenekler, istasyonlar arasındaki geçişlerle anlaşılabilir. Aslında atölyede esnekliği inceleyen başka çalışmalarda da istasyonlar arasında geçişin genel biçimi üzerinde durulmuştur (Jordan ve Graves, 1995; Daniels vd., 2004 gibi).

Her mamulün ardışık iş istasyonları arasında geçiş alternatifleri sayısı, o mamulün kaç farklı rotada yapılabileceğini etkilemektedir.  $p$  ürününün  $s$  sırasındaki işleminin kaç kez kapsandığını  $T_{sp}$  ile gösterelim.  $S(p)$ ,  $p$  parçası için işlem sıra numaralarını içeren bir küme olsun. Bu durumda  $p$  ürünü için toplam rota sayısı şöyle çıkmaktadır:

$$\text{Rota Sayısı} = \prod_{s \in S(p)} T_{sp}$$

$T_{sp}$ ’nin alabileceği maksimum değer, atölyedeki iş istasyonlarının sayısına ( $|M|$ ) eşittir. Yani maksimum rotalama esnekliği durumunda, bir istasyonu terk eden yarı mamulün bir sonraki işlemi, tüm istasyonlarda kapsanmış hâldedir (buna mevcut iş istasyonu da dahildir). Buna göre,  $COUNT_p$ ,  $p$  ürününün toplam işlem sayısını gösterirse, maksimum rota sayısı şöyle ifade edilebilir:

$$p \text{ ürünü için maksimum Rota Sayısı} = |M|^{COUNT_p}$$

İşlem esnekliği için yaptığımız kapsama düzeyi önerisiyle aynı biçimde rotalama için aşağıdaki kapsama ifadesi önerilmektedir:

$$RotaEsn_p = \frac{\prod_{s \in S(p)} T_{sp}}{|M|^{COUNT_p}}$$

Tablo 1’de geliştirdiğimiz örnekte 2 ve 3 numaralı parçalar için rotalama seçenekleri yaratmıştık.

$$\text{Bu durumda, } RotaEsn_2 = \frac{1*1*2*2}{3^4} = 0,049 \text{ ve}$$

$$RotaEsn_3 = \frac{1*2*2}{3^3} = 0,148 \text{ olmaktadır. } p \text{ parçası}$$

sistemde kapsanıyor ise  $RotaEsn_p$ ’nin minimum değeri ise  $\frac{1}{|M|^{COUNT_p}}$  olacaktır. Ek kapsamalarla bu değer üzerine çıkılabilir. Lineer olmayan bu göstergenin belirgin bir özelliği, ek kapsamaların işlemlere dengeli bir şekilde dağıtılması durumunda çıkan değer artmasıdır. Başka bir deyişle, toplam işlem kapsanması aynı olan kombinezonlar arasında en dengeli olanı  $RotaEsn_p$ ’yi maksimize etmektedir. Bu özelliği kullanarak, lineer olmayan gösterge, lineer modellemeler için uygulanabilecek yaklaşık bir hâle getirilebilir. Bu durumda, ardışık işlemlerin kapsanma sayıları arasındaki pozitif ya da negatif sapma belirlenerek lineer olmayan göstergenin vereceği değere yaklaşan lineer bir gösterge elde edilebilir.

$\dot{I}şEsn^{atölye}$  ve  $RotaEsn_p$  kapsanan unsurların farklı iki açıdan göstergesidir.

$\dot{I}şEsn^{atölye}$  atölyede mevcut işlemlerin ne oranda kapsandığını;  $RotaEsn_p$  ise mevcut ürün gamındaki istasyon geçişlerinde her ürün başına geçiş seçeneklerinin kapsanma derecesini ölçmektedir. Göstergelerin maksimum değerlerinin elde edilmesi, taban tabana zıt olmasa bile, karşıt durumların sağlanmasını gerektirmektedir.  $\dot{I}şEsn^{atölye}$  atölyedeki işlem çeşitliliğine değer verirken,  $RotaEsn_p$  işlem çeşitliliğinin yeterince sağlanıp, aynı işlemin farklı makineler tarafından da yapılabilirliğine değer vermektedir. Bunu 4. bölümde sayısal bir örnekle göstereceğiz.

#### 4. YAKLAŞIM ÖNERİSİ

Esnekliğe ilişkin önerdiğimiz kapsanma derecesi ölçüsü, kombinatoriyel optimizasyonun *küme kaplama* (“set covering”) problemlerini çağrıştırmaktadır. Küme kaplamada, eldeki tanımlı etkinlikler, belirlenecek alanlara atanarak, gereksinim duyulan her unsurun kaplı(s)anması amaçlanır. Klasik şekliyle  $x_j$  etkinlik tercihleri yapılmak üzere A kaplama matrisi verildiğinde problemin modeli şu biçimdedir:

## KÜME KAPLAMA (KK)

$$Ax \geq \bar{e}$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j$$

olsun

$$z(\bar{x}) = \bar{c}^T \bar{x} \quad \text{minimize edilsin}$$

Burada  $\bar{e}$  tüm elemanları 1 yapılmış, gereksinim sayısı kadar satırı olan bir vektör,  $\bar{c}^T$  ise her  $j$  etkinliğinin maliyetini gösteren bir satır vektörüdür. Klasik küme kaplamada her gereksinimin kaplanacak kümede en az bir defa bulunması zorunludur.

İmalat esnekliğinde ise işlemlerin yapılıp olmasına (yani tezgahlarda kapsanmalarına) ve tezgahlar arasında akışın sağlanmasına (yani tezgahlardaki kapsamanın ürünün tüm işlemleri için olmasına, dolayısıyla ikinci bir kapsamaya) gerek vardır. İşlem adımları yaygın bir ölçüde farklı tezgahlarda yapılabildikçe iş akışında düzgünlük, verimli tezgahlardan daha büyük oranda yararlanma ve olası tıkanıklıkları giderme olanağı doğar. Bu fırsatı yaratan, tezgahlardaki kapsama aralığının ürün rotalarındaki işlem çeşitliliğinin gerektirdiği genişlikte olmasıdır. Karar verilmesi gereken, bu aralığın hangi işlemler için olacağı ve ne kadar tekrar edeceğidir. Cochran ve Ulribe (2005) talep dalgalanmalarına karşılık verirken çok işlevli tezgahlarla esnek kapasite planlamaya, bizim yaptığımız gibi küme kaplama modeliyle yaklaşmaktadır.

İmalat esnekliğini planlama, klasik küme kaplama problemlerine kıyasla bazı ilaveler gerektirmektedir. Şöyle ki: Atölyede ürünlerin tamamlanabilmesi, küme kaplarken süreç planlarındaki en son adıma kadar devamlılığı gerektirmektedir. İstasyonlarda küme kaplanacak işlemler, dolaylı olarak tezgahlar arasındaki geçişler sırasında, seçenek rotalardan hangilerinin kaplandığını da vermektedir. Yani istasyonlara yapılan işlem atamaları, biri doğrudan (işlem) biri dolaylı (rotalama) iki ayrı türden küme kaplar durumdadır. Gereksinim duyulan unsurların mutlaka bir defa değil, yapılabildiğince çok kaplanması özellikle istenebilir. Bu şekilde, gelecekteki benzer siparişler farklı rotalara dağıtılarak hızla işlenebilir.

Ayrıca bu *ilaveli küme kaplama* modelleme önerimizde, klasik KK probleminde olduğu gibi, kaplayan etkinliklerin sayısını minimize etmek yerine, kaplanan küme elemanlarının birikmiş siparişlerin durumuna (çeşit ve aciliyetlerine) göre seçilecek bir ifadesinin optimizasyonu hedeflenecektir. Bu modelin, birikmiş siparişler arasından seçim yapılacak her çevrimde bir defa kullanılacağını kabul ediyoruz. Amacımız, atölyeye her sipariş sürme kararında, önce esnekliği planlama konusu haline getirmek; sonra mevcut ve gelmesi muhtemel siparişleri daha yüksek performansla yetiştirmek için bu esneklik planlamasını nasıl bir ifade ile yapmak gerektiğini anlamaktır.

Ölçülere bakarak esnekliği karar konusu yaptığımızda, siparişe üretimin operasyonel yönetiminde ek bir kontrol kazanıyoruz. Ayrıca esnekliğe karar verirken birikmiş siparişlere özgü bir ifadeyi optimize etmekle bu kontrol, duruma bağlı hâle gelmektedir.

İlaveli küme kaplama modeli kısıtlarının aşağıdaki cebirsel ifadesinde  $X_{ij}$ ,  $j$  istasyonunda  $i$ 'nci işlemin atanma kararı değişkeni,  $B_i$  ve  $Y_{ijp}$ 'ler ise bu karar sonucunda ilgili kaplamanın olup olmadığını temsil etmektedir.  $C_p$  karar verilen bütün kaplamalar sonucunda,  $p$  ürününün üretilip üretilmeyeceğini gösterir. Modelde kullanılan küme tanımları, indisler, değişkenler ve parametreler şu şekildedir:

Kümeler:

- $O$  : Sistemdeki bütün işlemlerin kümesi
- $M$  : Sistemdeki bütün makinelerin kümesi
- $P$  : Sistemdeki bütün parça tiplerinin kümesi
- $S(p)$  :  $p$  parçası için işlem sıra numaraları kümesi
- $O(p)$  :  $p$  parçası için işlem tipleri kümesi
- $O(p,s)$  :  $p$  parçası için  $s$  sırasındaki işlem tipi kümesi
- $P(i)$  :  $i$  işlemine ihtiyaç duyan parça tiplerinin kümesi

İndisler:

$$i = 1, 2, \dots, |O|; j = 1, 2, \dots, |M|$$

$$p = 1, 2, \dots, |P|; s = 0, 1, 2, \dots, |S(p)|$$

Değişkenler:

$X_{ij}$ : İşlem-makine atamaları durumu

$B_i$ :  $i$  işleminin sistemde yapılabilme durumu

$C_p$ :  $p$  parçasının tüm işlemlerinin sistemde yapılabilme durumu

$Y_{ijp}$ : Tüm işlemleri sistemde yapılabilen  $p$  parçasının,  $i$  işleminin  $j$  makinesine atanması durumu

$T_{sp}$ :  $p$  parçasının  $s$  sırasındaki işlemi için atanan toplam takım sayısı

$E_{sp}^+$ :  $p$  parçasının  $s$  sırasındaki işlemi için atanan toplam takım sayısı ile  $s-1$  sırasındaki işleme atanan toplam takım sayısının pozitif farkı

$E_{sp}^-$ :  $p$  parçasının  $s$  sırasındaki işlemi için atanan toplam takım sayısı ile  $s-1$  sırasındaki işleme atanan toplam takım sayısının negatif farkı

$D_p$ :  $p$  parçası için fazladan yapılan takım-makine atamalarının toplamı

$CTOT$ : Sistemde tamamlanabilen parça tipi sayısının ağırlıklı toplamı

$DTOT$ :  $p$  parçası için fazladan yapılan takım-makine atamaları toplamının, alabileceği maksimum değere oranının, parçalar üzerinden ağırlıklı toplamı

Parametreler:

$WPROCINTER$ : İşlem esnekliği ağırlığı

$WROUTINTER$ : Rotalama esnekliği ağırlığı

$WPINTRA_p$ :  $p$  parçasının işlem esnekliği içindeki ağırlığı

$WRINTRA_p$ :  $p$  parçasının rotalama esnekliği içindeki ağırlığı

$COUNT_p$ :  $p$  parçası için toplam işlem sayısı ( $= |O(p)|$ )

$PF_p$ :  $p$  parçası için rotalama esnekliği ifadesinin doğrusallaştırılmasında kullanılan ve fazladan bağlanmış takımların makinelere dengesiz dağıtımını cezalandıran katsayı

$DMAX_p$ :  $p$  parçasının işlemlerinin atanabileceği makine sayılarının toplamı

$MAXTOOL$ : Bir makineye bağlanabilecek maksimum takım sayısı (makinelerin takım kapasiteleri eşit varsayılmıştır.)

İlaveli küme kaplama (İKK) için matematiksel programlama modeli şu şekildedir:

Amaç fonksiyonu:

Maksimize et  $WPROCINTER * CTOT + WROUTINTER * DTOT$

Kısıtlar:

$$\sum_{j \in M} X_{ij} \geq B_i \quad \forall i \in O \quad (1)$$

$$\sum_{i \in O} X_{ij} \leq MAXTOOL \quad \forall j \in M \quad (2)$$

$$\sum_{i \in O(p)} B_i \geq COUNT_p * C_p \quad \forall p \in P \quad (3)$$

$$CTOT = \sum_{p \in P} WPINTRA_p * C_p \quad (4)$$

$$Y_{ijp} \leq X_{ij} \quad \forall i \in O(p), j \in M, p \in P \quad (5)$$

$$Y_{ijp} \leq C_p \quad \forall i \in O(p), j \in M, p \in P \quad (6)$$

$$T_{sp} = \sum_{i \in O(p,s)} \sum_{j \in M} Y_{ijp} \quad \forall p \in P, s \in S(p) \quad (7)$$

$$T_{(s-1)p} - T_{sp} = E_{sp}^+ - E_{sp}^- \quad \forall p \in P, s \in S(p), s \geq 1 \quad (8)$$

$$\sum_{\substack{s \in S(p) \\ s \neq 0}} T_{sp} - COUNT_p * C_p - PF_p * \sum_{\substack{s \in S(p) \\ s \neq 0}} E_{sp}^- \geq D_p \quad \forall p \in P \quad (9)$$

$$DTOT = \sum_{p \in P} WRINTRA_p * D_p / DMAX_p \quad (10)$$

$$X_{ij}, B_i, C_p \in \{0,1\} \quad Y_{ijp}, T_{sp}, E_{sp}^+, E_{sp}^-, D_p, CTOT, DTOT \geq 0 \quad (11)$$



(1) kısıt grubunda  $i$  işleminin kaplanması için en az bir istasyonda bulunması istenmektedir. (2) nolu kısıtlar ise bu kaplamayı sağlayacak kararın (gereken takımı bağlama) üst sınırını vermektedir. (3) numaralı kısıt grubu  $p$  ürününün tüm işlemleriyle kapsanması durumunda bu ürünün üretilebileceğini gösterir. Burada  $COUNT_p$ ,  $p$  ürünü rotalamasındaki işlem sayısını gösterir. Tüm  $C_p$  değerleri ürünler üzerinden ağırlıklı işlem esnekliğinin ( $CTOT$ ) hesaplandığı (4) nolu kısıtta yer almaktadır. (5) ve (6) nolu kısıtlar ise,  $i$  işleminin  $j$  istasyonunda yüklü olması sonucu,  $p$  ürününün rotasında yer aldığını göstermektedir. Yani  $Y_{ijp}$  etkinliği, ancak  $X_{ij}$  ve  $C_p$ 'nin onu birlikte kapladıkları durumda açılacaktır.

Her  $p$  ürününün  $s$ 'inci sıradaki işleminin kaç kez kapsandığını  $T_{sp}$ 'ler tutmaktadır. Böylece (7) ve (8) kısıt grupları üzerinden,  $p$  ürünü için ardışık işlemlerin kapsanma sayıları arasındaki, pozitif ya da negatif sapmayı (9) eşitsizlik grubu kullanmaktadır. (9) grubundaki eşitsizliklerde,  $p$  ürünü için gerçekleşen alternatif rota sayısı hesaplanıp, takımların makinelere dengeli dağıtımından uzaklaştıkça  $PF_p$  tarafından cezalandırıldıktan sonraki toplam atama sayısını ( $D_p$ ) vermektedir. Sonuncu kısıt denklemi (10) ise ürünler üzerinden ağırlıklandırılmış rotalama esnekliğini ( $DTOT$ ) bulmak içindir.

İşlem ve rotalama esneklikleri değerleri ( $İşEsn^{atölye}$  ve  $RotaEsn_p$ ) önce her ürün için ayrı ayrı bulunur. Her ürünün üretilip üretilmeyeceğini gösteren  $C_p$  kullanılarak  $İşEsn^{atölye}$  ölçüsü atölye ölçeği için hesaplanır.  $RotaEsn_p$  ölçüsü ise her  $p$  ürününe özgüdür ve  $D_p / DMAX_p$  yaklaşık oranıyla hesaplanır. Hesabın ikinci adımı; bekleyen siparişlerin aciliyeti, işyükleri (saat cinsinden) ve işlem adetleri dikkate alınarak,  $C_p$ 'yi  $WPINTRA_p$  ile,  $D_p / DMAX_p$ 'yi ise  $WRINTRA_p$  ile ağırlıklandırır. Burada termini yaklaşmış ve büyük işyükü getiren siparişlerle çok sayıda işlemi gerektiren ürünlerin, esneklikten daha fazla pay almaları hedeflenmektedir.  $WPINTRA_p$  ve  $WRINTRA_p$ 'lerin hesaplanmasında, çizelgeleme literatüründeki önceliklendirme yaklaşımlarının klasik *kritik oran* endeksi (işlem süresi / teslim süresi) kullanılmıştır.

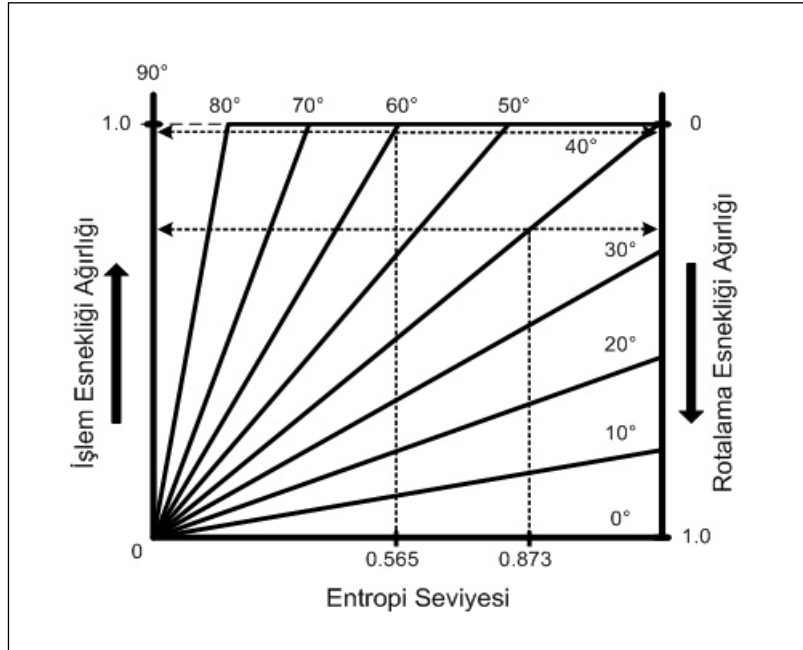
Amaç fonksiyonu ise ağırlıklandırılmış bu esneklik değerlerinin ( $CTOT$  ve  $DTOT$ ), sipariş havuzunun mevcut durumuna bağlı olarak birleştirilmesiyle tanımlanmıştır. Siparişleri atölyeye sürme çevrimlerinin başında alınan kararlarda, havuzdaki ürün çeşitliliği, o çevrimde hangi esnekliğe öncelik verileceğini gösterecektir. Bunun için bir yandan sipariş çeşitliliğini ölçen *entropi* ölçüsüne (Kumar, 1987), bir yandan da bu değere atfedilen önem derecesine bakılmaktadır.

Araştırmamız  $CTOT$  ile  $DTOT$ 'u birleştirmede rotalama ve işlem esnekliklerinin payları için  $p$  ürünü siparişinin toplam işyükü (saat cinsinden) dikkate alınarak bulunan *entropi değeri*nin

$$(Entropi = -\sum_p (İşyükü \%)_p * \log(İşyükü \%)_p)$$

nasıl kullanılacağına yöneliktir. Entropinin yüksekliğine (yani ürün çeşidinin çokluğuna) önem verilirse, ağırlıklandırılmış işlem esnekliği ( $CTOT$ ) daha fazla pay alacak demektir. Tersine, benzer rotalı ürün siparişlerinin toplu işlenmesinden avantaj sağlayan bir durum isteniyorsa (yani entropinin düşüklüğüne önem verilirse), ağırlıklandırılmış rotalama esnekliği ( $DTOT$ ) yüksek bir değerle toplama katılacaktır. Yukarıdaki amaç fonksiyonu ilişkisinde,  $CTOT$  ve  $DTOT$  değerlerini sırasıyla  $WPROCINTER$  ve  $WROUTINTER$  katsayıları ile ağırlıklandırarak bir toplamda birleştiriyoruz. Burada  $WPROCINTER$  ile  $WROUTINTER$ 'i toplandığında 1'e eşit olacak şekilde tanımlıyoruz. Mevcut sipariş çeşitliliğinin verdiği entropi değerini yatay eksende kullanarak, Şekil 2'deki gibi doğrulardan birinin denklemi üzerinden, düşey eksenlerde 0–1 aralığında değişen  $WPROCINTER$  ve onu 1'e tamamlayan  $WROUTINTER$  kolayca bulunmaktadır.

Yukarıda sözünü ettiğimiz esnekliklerin amaç fonksiyonundaki payları, bu iki çarpanın alacağı değerlerden çıkmaktadır. Şekil 2'den anlaşılacağı gibi iki esneklik türünün amaç fonksiyonundaki paylarını, entropi-çarpan doğrusunun eğimi vermektedir. Eğim arttıkça (eğim açısı dik açığa yaklaştıkça) amaç fonksiyonunda ağırlıklandırılmış işlem esnekliği  $CTOT$ 'un payı yükselmektedir.



Şekil 2. Farklı Eğim Açılıyla Entropi-çarpan İlişki Doğruları

Çalışmamızda; müşteri siparişleri rassal olarak gelen bir esnek imalat atölyesinde, uzun dönemde ortalama başarımı olabildiğince iyileştirecek esneklik payları (dolayısıyla entropi- işlem esnekliği çarpanı doğrusunun eğimi) deneysel olarak araştırılmıştır.

### Örnek

Esneklik türlerine ait amaç fonksiyonu paylarının değişmesiyle matematiksel model çözümlerinde oluşan farklar geliştirilen bir örnekle gösterilmektedir:

Sipariş havuzunda sekiz ürün tipinden yalnız üçüne ait siparişlerin beklediğini, ama yakın gelecekte her üründen olası yeni siparişlerin bekleyenlere ekleneceği bir örnek düşünülmüştür. Tablo 3'te her ürün tipi için mevcut ve gelmesi olası siparişlerin yarattığı işyükü ve kritik oranlar, bu kritik oranlardan hesaplanan işlem ve rotalama esneklikleri ağırlıkları gösterilmektedir.

Her birine üç işlem için gerekli takım yüklenebilen dört iş istasyonlu bir esnek atölyede bu örneği

Tablo 3. Bekleyen ve Olası Siparişler - Örnek Veri

Ürün Tipi	Bekleyen Siparişler		Olası Siparişler		Ağırlık [%]	
	Kritik Oran	Toplam İşyükü (saat)	Kritik Oran	Toplam İşyükü (saat)	İşlem Esnekliğinde $WPINTRA_p$	Rotalama Esnekliğinde $WRINTRA_p$
1	3	120	0,13	27,35	24,64	33,54
2	0,9	20	0,10	9,95	7,86	5,35
3	8	250	0,11	12,72	63,77	57,85
4	0	0	0,07	5,33	0,58	0,26
5	0	0	0,08	6,37	0,64	0,58
6	0	0	0,11	12,58	0,86	0,77
7	0	0	0,07	4,50	0,53	0,36
8	0	0	0,14	39,00	1,12	1,26

uyguladığımızı düşünelim. Tablo 3'ün son iki sütunu model parametreleri  $WPINTRA_p$  ve  $WRINTRA_p$ 'i vermektedir. Görüldüğü gibi bu sütun toplamları 100'e eşittir ve aynı yönde değişkenlik göstermez. Tablo 3'teki durumda amaç fonksiyonunda esneklik paylaşırma için entropi ölçüsü 0,565 çıkmaktadır. Bu yüksek bir değer değildir ve rotalamaya önem verileceğini göstermektedir.

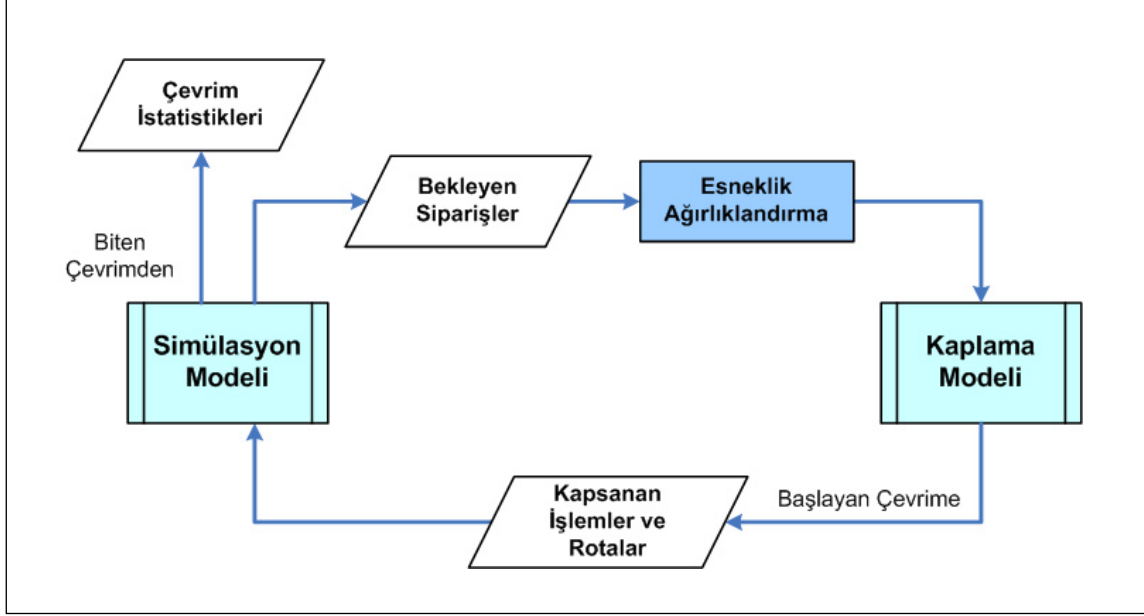
Tablo 4'te ise entropi-işlem esnekliği çarpanı doğrusunun 0°-90° arasında değişen eğim değerlerinin bazıları için İKK modelinin çözümleri verilmektedir. 0°den 30°e kadar açılarla eğim verildiğinde, toplam 15 işlemten yalnızca 4'ü üçer kez tekrarlı olarak kapsamaktadır. Bu durumlarda 8 tip ürünümüzden yalnızca biri (P3) kapsamış olmakta ve 81 seçenek rota ile

rotalama esnekliği en yüksek değerine ulaşmaktadır. 40° ve 50° eğimler kullanılacak olursa rotalama esnekliğinin amaç fonksiyonunda pay ağırlığı 0,526 ve 0,327 gibi orta ve ortanın altında değerlere inmektedir. Eğim 70° ve üzerinde açılarla tanımlandığında ise işlem esnekliği amaç fonksiyonunda tam pay (1,000) almakta, rotalama esnekliğine yer verilmemektedir. Esnekliği 70° ve üzeri aralığında tuttuğumuzda, 12 farklı işlem kapsamakta ve her birine ancak bir rota açılabilen 6 ürün kapsamış olmaktadır.

Örneğimizdeki 10 ayrı eğim açısıyla sekiz ayrı işlem ve rotalama esnekliği paylaşma durumu ortaya çıkmıştır. Bu sekiz durum, ürün kaplama ve rota çeşitliliğinde üç farklı sonuca karşılık gelmektedir. Bir başka deyişle, atölye başarımına en çok yarayan

**Tablo 4.** 0°-90° Aralığında Değişen Eğimli Entropi-çarpan Doğruları ile Kaplanan Ürün ve Rota Sayıları

Eğim Açısı	Çarpan Değerleri		Kaplanan İşlem Tipleri	Kaplanan Ürün Siparişleri	Her Üründe Kaplanan Rota Sayıları
	İşlem Esn.	Rota. Esn.			
0°	0,000	1,000	$3x(\dot{I}3)+3x(\dot{I}7)+3x(\dot{I}10)+3x(\dot{I}15)$	P3	81
10°	0,099	0,901	$3x(\dot{I}3)+3x(\dot{I}7)+3x(\dot{I}10)+3x(\dot{I}15)$	P3	81
20°	0,206	0,794	$3x(\dot{I}3)+3x(\dot{I}7)+3x(\dot{I}10)+3x(\dot{I}15)$	P3	81
30°	0,326	0,674	$3x(\dot{I}3)+3x(\dot{I}7)+3x(\dot{I}10)+3x(\dot{I}15)$	P3	81
40°	0,474	0,526	$2x(\dot{I}3)+2x(\dot{I}7)+2x(\dot{I}9)+2x(\dot{I}10)+1x(\dot{I}13)+1x(\dot{I}14)+2x(\dot{I}15)$	P1 / P3 / P6	16 / 16 / 16
50°	0,673	0,327	$2x(\dot{I}3)+2x(\dot{I}7)+2x(\dot{I}9)+2x(\dot{I}10)+1x(\dot{I}13)+1x(\dot{I}14)+2x(\dot{I}15)$	P1 / P3 / P6	16 / 16 / 16
60°	0,978	0,022	$1x(\dot{I}3)+1x(\dot{I}4)+1x(\dot{I}5)+1x(\dot{I}7)+1x(\dot{I}8)+1x(\dot{I}9)+1x(\dot{I}10)+1x(\dot{I}11)+1x(\dot{I}12)+1x(\dot{I}13)+1x(\dot{I}14)+1x(\dot{I}15)$	P1 / P2 / P3 / P5 / P6 / P8	1 / 1 / 1 / 1 / 1 / 1
70°	1,000	0,000	$1x(\dot{I}3)+1x(\dot{I}4)+1x(\dot{I}5)+1x(\dot{I}7)+1x(\dot{I}8)+1x(\dot{I}9)+1x(\dot{I}10)+1x(\dot{I}11)+1x(\dot{I}12)+1x(\dot{I}13)+1x(\dot{I}14)+1x(\dot{I}15)$	P1 / P2 / P3 / P5 / P6 / P8	1 / 1 / 1 / 1 / 1 / 1
80°	1,000	0,000	$1x(\dot{I}3)+1x(\dot{I}4)+1x(\dot{I}5)+1x(\dot{I}7)+1x(\dot{I}8)+1x(\dot{I}9)+1x(\dot{I}10)+1x(\dot{I}11)+1x(\dot{I}12)+1x(\dot{I}13)+1x(\dot{I}14)+1x(\dot{I}15)$	P1 / P2 / P3 / P5 / P6 / P8	1 / 1 / 1 / 1 / 1 / 1
90°	1,000	0,000	$1x(\dot{I}3)+1x(\dot{I}4)+1x(\dot{I}5)+1x(\dot{I}7)+1x(\dot{I}8)+1x(\dot{I}9)+1x(\dot{I}10)+1x(\dot{I}11)+1x(\dot{I}12)+1x(\dot{I}13)+1x(\dot{I}14)+1x(\dot{I}15)$	P1 / P2 / P3 / P5 / P6 / P8	1 / 1 / 1 / 1 / 1 / 1



**Şekil 3.** Önerilen Esneklik Değerlendirme Yaklaşımı

entropi-çarpan doğrusu eğim açısını incelerken, birbirinden anlamlı farklılıklar gösterebilen esneklik değerlerinin ortaya çıkacağı anlaşılmaktadır.

Siparişe üretim yapan bir kuruluşta esnekliğin gündelik işleyişe etkileri işletmenin dinamik çalışması incelenerek anlaşılabilir. Bunun için siparişlerin geliş rassallığını, atölyeye iş sürme ve önceliklendirme kurallarının varlığını da hesaba katmak gerekecektir. Kontrollü bir deney sonucunda, amaçlanacak her esneklik birleştirme tercihinin atölye işletmeciliğine etkisini belirli bir güvenle tayin etmek olasıdır. Bu bilgilerden hareketle ideal esneklik değerlerinin bulunabileceği düşünülmüştür. Yukarıda anlatıldığı gibi bu farklı birleştirme tercihlerini, entropi-çarpan doğrusuna değişik eğim değerleri vererek incelemeyi önermekteyiz.

Şekil 3 bu tür bir inceleme için önerdiğimiz yaklaşımı sunmaktadır. Bir döngüsellik içinde ilaveli küme kaplama modeli yardımıyla esneklik kontrollü bir biçime getirilmekte ve İKK'nin verdiği ideal kurulumla atölyenin sonraki çevriminin simülasyonu yapılmaktadır. Tamamlanan her çevrimden sonra sonuçlara göre sonraki çevrim için bekleyen siparişler dikkate alınmaktadır. İstatistiksel güven düzeyine erişecek

sayıda çevrimin sağlayacağı verilerle esneklik-başarımlı ilişkisi bir tepki yüzeyi ("response surface") ile incelenecektir.

## 5. SONUÇ

Belirsizlik ve çeşitliliğe karşı hazır bulunmak siparişe üretimin en kritik unsurlarıdır. Bu duruma imalatta esneklik ile ulaşıldığı pek çok araştırmacı ve uygulamacı tarafından doğrulanmıştır. Esneklik sayesinde hem farklı işleri yapan birçok yönlülük, hem de örtüşmenin yarattığı bir fazlalık (yedek imkan) olasıdır. Bu yönleriyle imalat esnekliği siparişe üretimde başarıma olumlu etki yapabilmekte, bitirme ve sipariş geçiş sürelerini düşürmede ve terminlere uyum sağlamada katkı yapmaktadır.

Öte yandan, esneklik ve esnek imalat konusunda yakın zamanlarda yapılan çalışmalar, kurulu esnekliğin olabilecek en üst düzeylerde sağlanmasının, her durumda yüksek başarımlı garanti etmediğini göstermektedir. Esnek olunurken bazen verimlilik düşmekte, ya da esnekliğin sağladığı çok yönlülüğe ve fazladan imkanlara ihtiyaç duyulmadığından kayıp ve kaçırılan fırsatlar söz konusu olmaktadır. Esnekliğin başka bir boyutu yaygınlık ve istasyonlar arası dengedir. Bu

hususlar da başarıma etki etmektedir. Özetle esnekliğin hem düzeyi hem de nasıl sağlandığı sonuçtaki başarıyı değiştirmektedir.

Bu çalışmada iki ayrı esneklik türü (işlem ve rotalama) üzerinden kontrollü esnekliği sağlamaya yardımcı olacak bir modelleme ve bu modellemeyle birlikte esneklik-başarımlı ilişkisini incelemeye yarayacak bir yaklaşım sunulmuştur. Esneklik kontrolünü, farklı kümeleri kaplama kararları olarak ele almaktayız. Esneklik kontrolünün matematiksel ifadesi de, klasik küme kaplama modeline bir takım ilaveler getirilmesiyle geliştirilen ilaveli küme kaplama modeli olmaktadır. Yaklaşımın işletme başarımlı etkilerini anlamak için döngülerden oluşan bir simülasyon deneyi ve takip eden analizi önermekteyiz. Bu analizde, esnek bir atölyede başarımlı artırmak için iki esneklik türünün hedeflenen birleşik esnekliğin içindeki ideal payları incelenecektir.

Çalışmada bundan sonra bu döngüsel değerlendirmeye yaklaşımından elde edilecek bulgulara yoğunlaşılacaktır.

### KAYNAKÇA

1. Beach, R., Muhlemann, A.P., Price D.H.R., Paterson A., Sharp J.A. 2000. "A Review of Manufacturing Flexibility", *European Journal of Operational Research*, 122, 41-57.
2. Bergamaschi, D., Cigolini, R., Perona, M., Portoli, A. 1997. "Order Review And Release Strategies in A Job Shop Environment: A Review And A Classification", *International Journal of Production Research*, 35, 399-420.
3. Caprihan, R., Wadhwa, S. 1997. "Impact of Routing Flexibility on The Performance of An FMS-A Simulation Study", *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 9, 273-298.
4. Cochran, J. K., Uribe, A. M. 2005. "A Set Covering Formulation for Agile Capacity Planning Within Supply Chains", *International Journal of Production Economics*, 95, 39-149.
5. Corsten, H., Gössinger, R. 2004. "Opportunistic Coordination of Operations in Job Shop Production", *Technovation*, 24, 219-234.
6. Corsten, H., Gössinger, R., Wolf N. 2005. "Flexibility-driven Order Releases in Job-Shop Production", *Technovation*, 25, 815-830.
7. Daniels, R. L., Mazzola, J. B., Shi, D. 2004. "Flow Shop Scheduling With Partial Resource Flexibility", *Management Science*, 50, 658-669.
8. Henrich, P., Land, M.J., Gaalman, G.J.C. 2007. "Semi-Interchangeable Machines: Implications For Workload Control", *Production Planning And Control*, 18, 91-104.
9. Kingsman, B., Hendry, L. 2002. "The Relative Contributions of Input And Output Controls on Ther Performance of a Workload Control System in Make-To-Order Companies", *Production Planning and Control*, 13, 579-590.
10. Kumar, V. 1987. "Entropic Measures of Manufacturing Flexibility", *International Journal of Production Research*, 25, 957-966.
11. Lingayat, S., Mittenhal, J., O'Keefe, R.M. 1995. "An Order Release Mechanism For A Flexible Flow System", *International Journal of Production Research*, 33, 1241-1256.
12. Land, M. J. 2006. "Parameters and Sensitivity in Workload Control", *International Journal of Production Economics*, 104, 625-638.
13. Mahmoodi, F., Mosier, T.C., Morgan, J. 1999. "The Effects of Scheduling Rules And Routing Flexibility on the Performance of A Random Flexible Manufacturing System", *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 11, 271-289.
14. Newman, W. R., Maffei, M.J. 1999. "Managing the Job Shop: Simulating The Effects of Flexibility, Order Release Mechanisms And Sequencing Rules", *Integrated Manufacturing Systems*, 10, 266-275.