

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**PETRI NET İLE BİR ESNEK ÜRETİM SİSTEMİNİN
MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

HAZIRLAYAN

FATIMA BÜŞRA BULCA KAYAHAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA – 2023

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**PETRİ NET İLE BİR ESNEK ÜRETİM SİSTEMİNİN
MODELLENMESİ ANALİZİ**

HAZIRLAYAN

FATIMA BÜŞRA BULCA KAYAHAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. YUSUF TANSEL İÇ

ANKARA – 2023

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Fatıma Büşra BULCA KAYAHAN tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 03 / 01 / 2023

Tez Adı: Petri Net İle Bir Esnek Üretim Sisteminin Modellenmesi ve Analizi

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)

İmza

Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL, Gazi Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Kumru Didem ATALAY, Başkent Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ, Başkent Üniversitesi

.....

ONAY

Prof. Dr. Faruk ELALDI

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih : ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 06 / 01 / 2023

Öğrencinin Adı, Soyadı: Fatıma Büşra BULCA KAYAHAN

Öğrencinin Numarası: 21920079

Anabilim Dalı: Endüstri Mühendisliği

Programı: Tezli Yüksek Lisans

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ

Tez Başlığı: Petri Net İle Bir Esnek Üretim Sisteminin Modellenmesi ve Analizi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans/Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 170 sayfalık kısmına ilişkin, 06 / 01 / 2023 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 3'tür. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:

ONAY

Tarih: ... / 01 / 2023

Öğrenci Danışmanı Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ

Bu tezi büyük fedakârlıklarla beni büyütüp yetiştiren sevgili annem Güler Bulca ve sevgili babam Nurettin Bulca' ya ithaf ediyorum.

F. Büşra BULCA KAYAHAN

TEŞEKKÜR

Eğitim hayatım ve tüm çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübelerini hiçbir zaman esirgemeyen, vizyonu ile kariyerime yön vermemi sağlayan, desteğini ve hoşgörüsünü her zaman hissettiğim, öğrencisi olmaktan daima büyük bir onur duyacak olduğum değerli danışman hocam Prof. Dr. Yusuf Tansel İ'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecinde yardımları ve yol göstericiliği ile desteklerini esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL'a teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans hayatım boyunca değerli öneri ve yardımlarıyla eğitimime katkı sağlayan ve parçası olmaktan gurur duyduğum tüm Başkent Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü hocalarıma ve desteklerini esirgemeyen başta Araç. Gör. Selin İŐIK olmak üzere yanımda olan çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Desteklerini ve duydukları güveni daima yanımda hissettiğim, hayatımda oldukları için büyük bir şansa sahip olduğum Aslıhan EROĞLU, Aybüke AY ve Rabia ÜNAL'a sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitim hayatım boyunca tecrübelerini sabırla aktarıp her zaman en büyük motivasyon kaynağım olan, sabır ve güvenle attığım her adımda beni destekleyip varlığıyla güç veren sevgili ablam Betül Burcu BULCA'ya sonsuz sevgilerimle teşekkür ederim.

Beni sonsuz sevgileriyle büyütüp maddi manevi her konuda daima desteklerini esirgemeyen, bana olan inançlarıyla her zaman arkamda hissettiğim, bulunduğum konumda olmamın yegane sorumluları sevgili annem Güler BULCA ve sevgili babam Nurettin BULCA'ya sonsuz minnet, sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte ve daima karşılaştığım her zorlukta sabır ve güvenle beni destekleyen, aldığım her kararda beni izleyerek sonsuz sevgisiyle yoluma ışık tutan en büyük şansım sevgili eşim Aykut KAYAHAN'a en büyük sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Fatıma Büşra BULCA KAYAHAN

PETRİ NET İLE BİR ESNEK ÜRETİM SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

2023

Üretim sektöründe gün geçtikçe ortaya çıkan teknolojik ve ekonomik gelişmelerle birlikte güçleşen rekabet ortamında işletmelerin sürekli değişen ürün talep ve çeşitlerini zamanında karşılayıp hızlı cevap verebilmeleri zorunluluğu doğmuştur. Bu rekabet ortamında yerini koruyup geliştirmek isteyen firmaların belirtilen piyasa değişikliklerine hızlı ve etkili bir şekilde uyum sağlayabilmesi için sahip oldukları üretim sistemlerini söz konusu şartlara uyumlu hale getirmeleri gerekmektedir. Bu da üretim sistemlerinde “esneklik” kavramını ortaya çıkarmaktadır. Esneklik çok boyutlu bir kavram olmakla birlikte üretilen parça çeşitliliğinin fazla olması ve bunun yanında sürekli değişim gösteren piyasa isteklerine hızlı ve etkili bir şekilde cevap verebilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Günümüz dinamik, belirsiz ve rekabetçi piyasa koşullarının üretim sistemlerinde esnekliği bir gereklilik haline getirmesi nedeniyle “Esnek Üretim Sistemleri” (EÜS) güçlü bir rekabet aracı olarak çağdaş üretim sistemleri arasında öne çıkmaktadır. EÜS otomasyon yoğun, personel müdahalesini en aza indiren, bilgisayar destekli makineler tarafından desteklenen ve otomatik programlanabilen taşıma sistemleri, robotlar ve konveyörlerden oluşan birden fazla adette ve çeşitte parçayı etkin bir şekilde üretebilen sistemlerdir. Bu tür kompleks sistemlerin modellenmesi ve analizi güçlü modelleme araçları gerektirir. Bu çalışmada bir esnek üretim hücresi (EÜH), “Petri ağları” (PA) modelleme aracı kullanılarak modellenmiş ve performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Ele alınan PA yöntemi; hem sistem verimliliği, hem de sistem etkinliği analizini mümkün kılar. Geleneksel matematiksel yöntemler ile tanımlamanın zor olduğu karakteristik özellikler gösteren EÜH gibi kompleks sistemleri güçlü matematiksel özellikleri sayesinde kolaylıkla tanımlayan cebirsel sonuçlar elde edip farklı matematiksel araçlar geliştirilmesine imkan tanıyan ve diğer grafiksel gösterim yöntemlerinden farklı olarak daha anlaşılır ve ayrıntılı bir şekilde mantıksal etkileşimleri ortaya koyabilen PA, bu

özellikleri ile güçlü bir modelleme aracıdır. Karmaşık mekanik sistemlerde hidrolik, pnömatik, elektriksel nedenlerle meydana gelen güç kayıpları, bu sistemlerde belirsizlik durumuna sebebiyet verir. Stokastik değişkenlikle açıklanamayan bu belirsizlikler “bulanık modellerle” tanımlanabilir. Çünkü EÜS’lerdeki girdi/çıkıtı parametrelerindeki bazı belirsizlikler sadece kesin olmayan ölçümlerden kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada EÜS’lerde işlem sürelerinde meydana gelen belirsizlikler için “bulanık küme teorisi” kullanılarak parametrelerin bulanıklaştırıldıktan sonra sisteme entegre edilebileceği düşünülmüştür. Ayrıca bulanık parametreler kullanılarak oluşturulan modelin sistemin gerçek yapısını yansıtmaya derecesini ölçmek amacıyla ele alınan EÜH, üç farklı yaklaşımla modellenmiştir. İlk modelleme yaklaşımında bulanık parametre kullanılmamışken, ikinci modelleme yaklaşımında sadece bazı parametreler bulanıklaştırılmıştır. Önerilen üçüncü yaklaşımda ise, benimsenen bulanık küme teorisi ile modeldeki tüm belirsiz parametreler bulanıklaştırılmıştır. Geliştirilen yöntem bir EÜH’nin modellenmesi ve performans analizinde kullanılmıştır. Bu amaç doğrultusunda MATLAB PN Toolbox programından yararlanılmıştır. Sonuçlar, bulanık parametrelerin kullanıldığı “Bulanık Geçiş Zamanlı PA Model” inin sistemi en doğru şekilde yansıtan model olduğunu göstermiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Esnek Üretim Sistemleri, Petri Ağları, Bulanık Küme Teorisi

ABSTRACT

Fatıma Büşra BULCA KAYAHAN

MODELING AND ANALYSIS OF A FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEM WITH PETRI NET

Başkent University, Institute of Science and Engineering

Department of Industrial Engineering

2023

In the competitive environment, which has become more difficult with the developments emerging day by day in the manufacturing sector, it has become necessary for enterprises to meet the ever-changing product demands and varieties in a timely manner. Companies that want to maintain their position in this competitive environment need to adapt their production systems to these conditions in order to adapt effectively to the specified market changes. This reveals the concept of “flexibility” in production systems. Due to the fact that today's dynamic and uncertain market conditions related to flexibility capabilities systems, “Flexible Manufacturing Systems” (FMS) standouts as a powerful competitive tool considering this challenging task. FMSs are systems that include automated systems with minimum personnel intervention, computer-aided machines, material-handling systems, robots, and conveyors that can be programmed automatically. Modeling and analysis of such complex systems require powerful tools. In this study, a flexible manufacturing cell (FMC) was modeled using the "Petri nets" (PN) tool, and performance analyzes were performed. Considered PN method; shows characteristics that are difficult to describe with traditional mathematical methods, easily defining such complex systems, thanks to its strong mathematical features, allowing to development of different mathematical tools by obtaining algebraic results, and being different from other graphical representation methods. Power losses that occur due to their nature in complex mechanical systems cause uncertainty in these systems. These uncertainties, which cannot be explained by stochastic variability, are defined by “fuzziness”. Because some uncertainties in input/output parameters in FMSs arise only from imprecise measurements. In this study, it's thought that the parameters can be integrated into the system after fuzzification by using the "fuzzy set theory" for the uncertainties occurring in the processing times in FMSs. In addition, FMC was modeled with

3 different approaches in order to measure the degree to which the model created using fuzzy parameters reflects the real structure of the system. While no fuzzy parameter was used in the first modeling approach, only some parameters were blurred in the second modeling approach. In the proposed third approach, all uncertain parameters in the model are blurred with the adopted fuzzy set theory. The developed method was used in modeling and performance analysis of an FMC. For this purpose, the MATLAB PN Toolbox program was used. The results showed that the "Fuzzy Transition Timed PN Model", in which fuzzy parameters are used, is the model that most accurately reflects the system.

KEYWORDS: Flexible Manufacturing Systems, Petri Nets, Fuzzy Set Theory

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı.....	1
1.2. Çalışmanın Kapsamı ve Araştırma Yöntemleri.....	2
1.3. Önceki Çalışmalar ve Çalışmanın Literatüre Katkısı.....	3
2. ESNEK ÜRETİM SİSTEMLERİ.....	4
2.1. Esnek Üretim Sistemlerine Tarihsel Bir Bakış	4
2.2. Esneklik Nedir?	6
2.3. Esneklik Türleri	7
2.4. Esnek Üretim Sistemlerinin Tanımı.....	7
2.5. Esnek Üretim Sistemlerinin Bileşenleri	9
2.6. Günümüzde Esnek Üretim Sistemleri.....	10
2.7. Geleneksel Üretimden Esnek Üretime Geçiş: Amaçlar ve Avantajlar	11
2.7.1. Esnek üretim sistemlerinin uygulanma amaçları.....	11
2.7.2. Esnek üretim sistemlerinin sağladığı avantajlar	12
2.8. Esnek Üretim Sistemlerinin Tasarım, Analiz Ve Modellemesi: Petri Ağı Perspektifi	13
3. PETRİ AĞLARI.....	15
3.1. Üretim Sistemlerinde Bir Araç ve Metodoloji Olarak Petri Ağları....	15

3.2.	Esnek Üretim Sistemlerinin Petri Ağları ile Modellenmesi.....	18
3.3.	Ayrık Olay Sistemleri	20
3.4.	Petri Ağı Yapısının Öğeleri.....	21
3.4.1.	Ağ yapısı	21
3.4.2.	İşaretleme	23
3.5.	Petri Ağları ile Modellenen Sistemlerin Genel Özellikleri.....	25
3.5.1.	Ardıllık / sıralı ilişki (sequential execution)	25
3.5.2.	Paralellik/ eş zamanlılık (concurrency)	25
3.5.3.	Çatışma (conflict)	26
3.5.4.	Senkronizasyon.....	26
3.5.5.	Sınırlı kaynaklar	26
3.5.6.	Karşılıklı dışlama (mutually exclusive)	26
3.5.7.	Deterministik olmama.....	26
3.6.	Sistem Öğeleri ile Petri Ağ Yapısı Arasındaki İlişki	27
3.7.	Petri Ağlarının Matematiksel Notasyonla Tanımlanması	28
3.8.	Geçişlerin Ateşlenmesi.....	32
3.9.	Petri Ağlarının Özellikleri.....	35
3.9.1.	Ulaşılabilirlik	36
3.9.2.	Kapsanabilirlik	36
3.9.3.	Canlılık	37
3.9.4.	Geri dönebilirlik	41
3.9.5.	Korunumluluk	42
3.9.6.	Tutarlılık	44
3.9.7.	Sınırlılık.....	44
3.9.8.	Güvenilirlik	45
3.9.9.	Devamlılık	45

3.10. Üretim Sistemlerinde Petri Ağları ile Modelleme Yaklaşımları.....	47
3.10.1. Faaliyet-konum modelleme yaklaşımı	47
3.10.2. Faaliyet-geçiş modelleme yaklaşımı.....	48
3.11. Petri Ağları Analizinde Kullanılan Yöntemler	48
3.11.1. Ulaşılabilirlik (kapsanabilirlik) ağacı.....	49
3.11.2. Matris-denklemler yaklaşımı (değişmez değer analiz yöntemi)	52
3.11.3. İndirgeme ve ayrıştırma yöntemi.....	54
3.12. Petri Ağların Yapısal Özelliklerine Göre Sınıflandırılması.....	55
3.12.1. Durum makinesi / durum grafiği (state machine / state graph)....	55
3.12.2. Hareket grafikleri (event graph).....	56
3.12.3. Serbest seçim ağları (free choice).....	57
3.12.4. Genişletilmiş serbest seçim ağları (extended free choice).....	57
3.12.5. Asimetrik seçimli Petri ağları (asymmetric choice)	58
3.13. Petri Ağları Çeşitleri.....	59
3.13.1. Zamanlı Petri ağları (timed Petri nets)	59
3.13.2. Modüler Petri ağları (hierarchical Petri nets-HPN)	60
3.13.3. Renkli Petri ağları (coloured Petri nets-CPN).....	60
3.13.4. Bulanık Petri ağları (fuzzy Petri nets-FPN).....	60
3.14. Petri Ağlarında Zaman Kavramı	61
3.14.1. Deterministik zamanlı Petri ağları (deterministic timed Petri nets-DTPN).....	61
3.14.2. Stokastik zamanlı Petri ağları (stochastic timed Petri nets-STPN).....	63
3.15. Petri Ağlarında Bulanıklık Kavramı	64
3.16. Modellemede Petri Ağlarının Kullanıldığı Alanlar	65
3.17. Petri Ağları ile Modellenen Üretim Sistemlerinde Performans Analizi.....	66

4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	67
5. UYGULAMA VE BULGULAR.....	93
5.1. Bir Esnek Üretim Hücresinin Geçiş Zamanlı Petri Ağları ile Modellenmesi	93
5.1.1. Uygulamanın amacı.....	93
5.1.2. Uygulama adımları.....	94
5.1.3. Uygulama yapılan sisteme ait varsayımlar ve kısıtlar	95
5.1.4. Modellenen esnek üretim hücresinin tanımlanması.....	96
5.1.5. Esnek üretim hücresinin modelleme hazırlıkları	97
5.1.6. Geçiş zamanlı Petri ağı ile modelleme	102
5.1.7. Kısmi-bulanık geçiş zamanlı Petri ağı ile modelleme.....	105
5.1.8. Bulanık geçiş zamanlı Petri ağı ile modelleme.....	109
5.2. Esnek Üretim Hücresinin ait PA Modelin Sahip Olduğu Özelliklerin İncelenmesi.....	117
5.2.1. Esnek üretim hücresinin ait PA modelinin sınıfı	120
5.2.2. Esnek üretim hücresinin ait PA modelinin davranışsal özellikleri	121
5.2.3. Esnek üretim hücresinin ait PA modelinin yapısal özellikleri.....	124
5.3. Esnek Üretim Hücresinin ait PA Modeline Petri Ağ Analiz Yöntemlerinin Uygulanması.....	129
5.3.1. Modelin ulaşılabilirlik analizi.....	129
5.3.2. Modelin değişmez değer analizi (matris-denklemler yaklaşımı)	131
5.4. Esnek Üretim Hücresinin Performans Analizinin Gerçekleştirilmesi	135
5.4.1. Geçiş zamanlı PA model için performans analizi.....	139
5.4.2. Kısmi-bulanık geçiş zamanlı PA model için performans analizi ..	143
5.4.3. Bulanık geçiş zamanlı PA model için performans analizi	147

5.5. Petri Ağ Modellerinin Performans Kriterleri Açısından İncelenmesi.....	151
5.5.1. Varış toplamı performans kriteri	151
5.5.2. Varış aralığı performans kriteri	152
5.5.3. Varış Oranı Performans Kriteri	154
5.5.4. Çıktı toplamı performans kriteri	155
5.5.5. Çıktı aralığı performans kriteri	156
5.5.6. Çıktı oranı performans kriteri	157
5.5.7. Bekleme süresi performans kriteri	158
5.5.8. Kuyruk uzunluğu performans kriteri	160
5.5.9. Servis toplamı performans kriteri	162
5.5.10. Servis aralığı performans kriteri	163
5.5.11. Servis oranı performans kriteri	164
5.5.12. Servis süresi performans kriteri	165
5.5.13. Kullanım oranı.....	167
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	169
KAYNAKLAR	171
EKLER	
EK 1	

TABLolar LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2. 1. Geleneksel üretim anlayışı ve esnek üretim anlayışının karşılaştırılması	11
Tablo 3. 1 Petri ağ yapısı ile sistem öğeleri arasındaki ilişkiler.....	28
Tablo 3. 2. Petri ağ grafiğine ait canlılık seviyeleri	41
Tablo 3. 3. Petri ağ analizinde kullanılan yöntemlerin sınıflandırılması	49
Tablo 5. 1. Operasyon tanımları ve ortalama işlem süreleri	100
Tablo 5. 2. Konumlar, geçişler ve açıklamaları	101
Tablo 5. 3. Geçiş zamanlı PA model için kullanılan geçiş süreleri	103
Tablo 5. 4. Kısmi-bulanık geçiş zamanlı PA model geçiş süreleri..	108
Tablo 5. 5. Bulanık geçiş zamanlı PA model geçiş süreleri.....	116
Tablo 5. 6. Ulaşılan performans kriterleri ve anlamları	137
Tablo 5. 7. Geçiş zamanlı PA modelde konumların sağladığı performans kriterlerinin aldıkları değerler.....	141
Tablo 5. 8. Geçiş zamanlı PA modelde geçişlerin sağladığı performans kriterlerinin aldıkları değerler.....	142
Tablo 5. 9. Kısmi-bulanık geçiş zamanlı PA modelde konumların sağladığı performans kriterlerinin aldıkları değerler.....	145
Tablo 5. 10. Kısmi-bulanık geçiş zamanlı PA modelde geçişlerin sağladığı performans kriterlerinin aldıkları değerler.....	146
Tablo 5. 11. Bulanık geçiş zamanlı PA modelde konumların sağladığı performans kriterlerinin aldıkları değerler.....	149
Tablo 5. 12. Bulanık geçiş zamanlı PA modelde geçişlerin sağladığı performans kriterlerinin aldıkları değerler.....	150
Tablo 5. 13. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için konumlarda gerçekleşen varış toplamı değerleri.....	152
Tablo 5. 14. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için konumlarda gerçekleşen varış aralığı değerleri.....	153

Tablo 5. 15. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için konumlarda gerçekleşen varış oranı değerleri.....	154
Tablo 5. 16. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için konumlarda gerçekleşen çıktı toplamı değerleri.....	155
Tablo 5. 17. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için konumlarda gerçekleşen çıktı aralığı değerleri.....	156
Tablo 5. 18. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için konumlarda gerçekleşen çıktı oranı değerleri.....	157
Tablo 5. 19. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için konumlarda gerçekleşen bekleme süresi değerleri	158
Tablo 5. 20. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için konumlarda gerçekleşen kuyruk uzunluğu değerleri	160
Tablo 5. 21. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için geçişlerde gerçekleşen servis toplamı değerleri.....	162
Tablo 5. 22. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için geçişlerde gerçekleşen servis aralığı değerleri.....	164
Tablo 5. 23. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için geçişlerde gerçekleşen servis oranı değerleri.....	165
Tablo 5. 24. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için geçişlerde gerçekleşen servis süresi değerleri.....	166
Tablo 5. 25. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için geçişlerde gerçekleşen kullanım oranı değerleri.....	167

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1. Üretim sektöründe hakimiyet gösteren kavramların yıllara göre değişimi.	6
Şekil 3. 1. Petri ağ yapısı.....	21
Şekil 3. 2. Yönlü ok ağırlıklarının gösterimi	22
Şekil 3. 3. Yönlü ok ağırlıklarının gösterimi	23
Şekil 3. 4. Jetonların konumlar içindeki noktalar ile temsili	24
Şekil 3. 5. Jetonların konumlar içindeki rakamlar ile temsili	24
Şekil 3. 6. Pasif ve aktif geçiş örneği	34
Şekil 3. 7. Canlı Petri ağı örneği	38
Şekil 3. 8. Yarı-canlı Petri ağı örneği.....	38
Şekil 3. 9. Kilitlenme içermeyen bir Petri ağı.....	39
Şekil 3. 10. Canlılık özelliği incelenen Petri Ağ örneği.....	40
Şekil 3. 11. Tutarlı Petri ağı örneği.....	43
Şekil 3. 12. Tutarsız Petri ağı örneği.....	43
Şekil 3. 13. Devamlılık özelliği taşıyan Petri ağı.....	45
Şekil 3. 14. Devamlılık özelliği taşımayan Petri ağı.....	46
Şekil 3. 15. Ulaşılabilirlik ağacı örneği.....	51
Şekil 3. 16. Elde edilen ulaşılabilirlik ağı	51
Şekil 3. 17. Durum makinesi Petri ağı örneği	56
Şekil 3. 18. Hareket grafiği Petri ağı örneği.....	57
Şekil 3. 19. Serbest seçim Petri ağı örneği.....	57
Şekil 3. 20. Genişletilmiş serbest seçim Petri ağı örneği	58
Şekil 5. 1. Modellemesi yapılan EÜH.....	96
Şekil 5. 2. EÜH'ye ait akış şeması	98

Şekil 5. 3. EÜH'ye ait PA model	104
Şekil 5. 4. Geçiş zamanlı PA model için PN Toolbox programı çıktısı	105
Şekil 5. 5. Negi Yaklaşımı'nda kullanılan yamuk üyelik fonksiyonu	106
Şekil 5. 6. t_4 geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu ..	107
Şekil 5. 7. t_7 geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu ..	107
Şekil 5. 8. t_{10} geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu..	108
Şekil 5. 9. Kısmi-bulanık geçiş zamanlı PA model için PNTtoolbox programı çıktısı.	109
Şekil 5. 10. t_1 geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu.	110
Şekil 5. 11. t_2 geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu	110
Şekil 5. 12. t_3 geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu	111
Şekil 5. 13. t_4 geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu	111
Şekil 5. 14. t_5 geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu	112
Şekil 5. 15. t_6 geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu	112
Şekil 5. 16. t_7 geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu	113
Şekil 5. 17. t_8 geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu	113
Şekil 5. 18. t_9 geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu	114
Şekil 5. 19. t_{10} geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu	114
Şekil 5. 20. t_{11} geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu	115
Şekil 5. 21. t_{12} geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu	115
Şekil 5. 22. Bulanık geçiş zamanlı PA model için PN Toolbox programı çıktısı....	117
Şekil 5. 23. PN Toolbox programı input matrix sorgulaması sonucu	119

Şekil 5. 24. PN Toolbox programı output matrix sorgulaması sonucu.....	120
Şekil 5. 25. Topoloji analizinin yapılışı	120
Şekil 5. 26. Petri ağ modelinin ait olduğu sınıf.....	121
Şekil 5. 27. Canlılık analizinin yapılışı	122
Şekil 5. 28. Canlılık analizi sonucu.....	122
Şekil 5. 29. t-sabitlerinin elde edilmesi	123
Şekil 5. 30. Petri ağ modeline ait t-sabitleri	123
Şekil 5. 31. Sınırlandırılmışlık analizinin yapılışı.....	124
Şekil 5. 32. Sınırlandırılmışlık analizi sonucu	124
Şekil 5. 33. p-sabitlerinin elde edilmesi	125
Şekil 5. 34. Petri ağ modeline ait p-sabitleri	125
Şekil 5. 35. Korunumluluk analizinin yapılışı	126
Şekil 5. 36. Korunumluluk analizi sonucu	127
Şekil 5. 37. Tekrarlanabilirlik analizinin yapılışı.....	127
Şekil 5. 38. Tekrarlanabilirlik analizi sonucu	128
Şekil 5. 39. Tutarlılık analizinin yapılışı	128
Şekil 5. 40. Tutarlılık analizi sonucu	129
Şekil 5. 41. Petri ağ modeline ait ulaşılabilirlik ağacı	130
Şekil 5. 42. Yineleme matrisi.....	132
Şekil 5. 43. Petri ağ modelinin çalıştırılması adım 1	135
Şekil 5. 44. Petri ağ modelinin çalıştırılması adım 2	136
Şekil 5. 45. Petri ağ modelinin çalıştırılması adım 3	136
Şekil 5. 46. Geçiş zamanlı PA modelin çalıştırılması.....	139
Şekil 5. 47. Geçiş zamanlı PA model sonucu	139

Şekil 5. 48. Geçiş zamanlı PA modelden performans kriterlerinin elde edilmesi aşamaları.....	140
Şekil 5. 49. Geçiş zamanlı PA modelin çalıştırılması sonucu elde edilen konumlara ait istatistikler	141
Şekil 5. 50. Geçiş zamanlı PA modelin çalıştırılması sonucu elde edilen geçişlere ait istatistikler	142
Şekil 5. 51. Kısmi-bulanık geçiş zamanlı PA modelin çalıştırılması.....	144
Şekil 5. 52. Kısmi-bulanık geçiş zamanlı PA model sonucu	144
Şekil 5. 53. Kısmi-bulanık geçiş zamanlı PA modelin çalıştırılması sonucu elde edilen konumlara ait istatistikler	145
Şekil 5. 54. Kısmi-bulanık geçiş zamanlı PA modelin çalıştırılması sonucu elde edilen geçişlere ait istatistikler	146
Şekil 5. 55. Bulanık geçiş zamanlı PA modelin çalıştırılması	148
Şekil 5. 56. Bulanık geçiş zamanlı PA model sonucu.....	148
Şekil 5. 57. Bulanık geçiş zamanlı PA modelin çalıştırılması sonucu elde edilen konumlara ait istatistikler	149
Şekil 5. 58. Bulanık geçiş zamanlı PA modelin çalıştırılması sonucu elde edilen geçişlere ait istatistikler	150
Şekil 5. 59. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için varış toplamı grafiği	152
Şekil 5. 60. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için varış aralığı grafiği	153
Şekil 5. 61. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için varış oranı grafiği	154
Şekil 5. 62. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için çıktı toplamı grafiği	155
Şekil 5. 63. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için çıktı aralığı grafiği	156
Şekil 5. 64. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için çıktı oranı grafiği	158
Şekil 5. 65. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için bekleme süresi grafiği.....	159
Şekil 5. 66. GZPA, KBGZPA ve BGZPA modelde bekleme sürelerinin dağılımı .	159
Şekil 5. 67. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için kuyruk uzunluğu grafiği	161
Şekil 5. 68. Bulanıklık içeren modellerin kuyruk uzunluğu kriterine etkisi	161

Şekil 5. 69. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için servis toplamı grafiği.....	163
Şekil 5. 70. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için servis aralığı grafiği.....	164
Şekil 5. 71. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için servis oranı grafiği.....	165
Şekil 5. 72. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için servis süresi grafiği.....	166
Şekil 5. 73. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için kullanım oranı grafiği.....	168
Şekil 5. 74. Bulanıklık içeren modellerin kullanım oranı kriterine etkisi.....	168

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

c_{ij}^-	p_i girdi konumundan t_j geçişine olan yönlü okun ağırlığı
c_{ij}^+	t_j geçişinden p_i çıktı konumuna olan yönlü okun ağırlığı
$C_{s \times n}$	Yineleme matrisi (incidence matrix)
F	Yönlü oklar kümesi
I	Konumlardan geçişlere yönlü oklar kümesini tanımlayan girdi fonksiyonu
$[I_{ij}]$	Girdi vektörü (input vector)
$I_{s \times n}$	Girdi matrisi (input matrix)
$I(t)$	Girdi okları kümesi
k	jeton sayısı
L	Petri ağının canlılık seviyesi
m	jeton sayısı
M_0	Başlangıç işaretlemesi (initial marking)
M_k	Bir Petri ağının k anındaki işaretleme vektörü
$M(p)$	p konumundaki jeton sayısı
$M(p_i)$	p_i konumundaki jeton sayısı
$M'(p_i)$	p_i girdi konumunun t_j geçişi ateşlendikten sonraki yeni jeton sayısı
n	konum sayısı
O	Geçişlerden konumlara yönlü oklar kümesini tanımlayan çıktı fonksiyonu
$[O_{ij}]$	Çıktı vektörü (output vector)
$O_{s \times n}$	Çıktı matrisi (output matrix)
$O(t)$	Çıktı okları kümesi
p	place (konum)
P	Sonlu konumlar kümesi
p^\bullet	p konumuna ait çıktı geçişleri kümesi
${}^\bullet p$	p konumuna ait girdi geçişleri kümesi
$(p_i)^*$	p_i konumuna ait çıktı geçişleri kümesi
${}^*(p_i)$	p_i konumuna ait girdi geçişleri kümesi
$R(M_0)$	Ulaşılabilirlik kümesi
s	Geçiş sayısı
σ	M_k işaretlemesine gelene kadar gerçekleşen geçişler dizisi
t	transition (geçiş)
T	Sonlu geçişler kümesi
t^\bullet	t geçişine ait çıktı konumları kümesi
${}^\bullet t$	t geçişine ait girdi konumları kümesi
$(t_j)^*$	t_j geçişine ait çıktı konumları kümesi

$^*(t_j)$	t_j geçişine ait girdi konumları kümesi
U_k	Kontrol vektörü
w	Yönlü ağırlık fonksiyonu
$W(p,t)$	p girdi konumuyla t geçişini birbirine bağlayan okun ağırlığı
$W(t,p)$	t geçişiyle p çıktı konumunu birbirine bağlayan okun ağırlığı
X	Zaman fonksiyonu
x'	Bulanık süre
x_i	p_i konumuna atanan zaman
AGV	Automated Guided Vehicle (Otomatik Yönlendirmeli Araç)
AGVS	Otomatik Yönlendirmeleri Araç Sistemleri
AMS	Automatic Manufacturing System (Otomatik Üretim Sistemi)
BGZPA	Bulanık Geçiş Zamanlı Petri Ağı
CIM	Bilgisayarla Bütünleşik İmalat Sistemleri
CNC	Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
CPN	Coloured Petri Net (Renkli Petri Ağı)
CTOPN	Coloured Timed Object-Oriented Petri Net (Renkli Zamanlı Nesne Yönelimli Petri Ağı)
DECS	Discrete Event Control System (Ayrık Olay Kontrol Sistemi)
DEDSs	Discrete Event Dynamic Systems (Ayrık Olay Dinamik Sistemleri)
DES	Discrete Event System (Ayrık Olay Sistemi)
DESs	Discrete Event Systems (Ayrık Olay Sistemleri)
DoE	Design of Experiment (Deney Tasarımı)
DTPN	Deterministic Timed Petri Net (Deterministik Zamanlı Petri Ağı)
ECSPN	Extended Coloured Stochastic Petri Net (Genişletilmiş Renkli Stokastik Petri Ağı)
EHLEPN	Extended High Level Evaluation Petri Net (Genişletilmiş Yüksek Seviye Değerlendirmeli Petri Ağı)
ETPN	Extended Timed Petri Net (Genişletilmiş Zamanlı Petri Ağı)
EÜH	Esnek Üretim Hücresi
EÜS	Esnek Üretim Sistemi
FTPn	Fuzzy Timed Petri Net (Bulanık Zamanlı Petri Ağı)
FTTPN	Fuzzy Transition Timed Petri Net (Bulanık Geçiş Zamanlı Petri Ağı)
GSPN	Generalized Stochastic Petri Net (Genelleştirilmiş Stokastik Petri Ağı)
GZPA	Geçiş Zamanlı Petri Ağı
HCPN	Hierarchical Coloured Petri Net (Modüler Renkli Petri Ağı)
HLPN	High Level Petri Net (Yüksek Seviyeli Petri Ağı)
HPN	Hierarchical Petri Net (Modüler Petri Ağı)
HSTPN	Hybrid Stochastic Timed Petri Net (Hibrit Stokastik Zamanlı Petri Ağı)
KBGZPA	Kısmi Bulanık Geçiş Zamanlı Petri Ağı
KDS	Karar Destek Sistemi
MCM	Mass Customization Manufacturing (Kitlesele Özelleştirilmiş Üretim)
NC	Numerical Control (Sayısal Kontrollü)
NMS	Networked Manufacturing System (Ağ Bağlantılı Üretim Sistemi)
PA	Petri Ağı

Partial-FTTPN	Partial Fuzzy Transition Timed Petri Net (Kısmi-Bulanık Geçiş Zamanlı Petri Ağı)
PN	Petri Net
PPNR	Parallel Process Net with Resources (Kaynaklı Paralel Süreç Ağı)
PTPN	Place Timed Petri Net (Konum Zamanlı Petri Ağı)
PTPN	Place Timed Petri Net (Konum Zamanlı Petri Ağı)
RMC	Robotic Manufacturing Cell (Robotik Üretim Hücresi)
RMS	Reconfigurable Manufacturing System (Yeniden Yapılandırılabilir Üretim Sistemi)
ROPN	Resource Oriented Petri Net (Kaynak Yönelimli Petri Ağı)
SCT	Supervisory Control Theory (Denetleyici Kontrol Teorisi)
SPN	Stochastic Petri Net (Stokastik Petri Ağı)
SSMS	Single State Multimachine System (Tek Aşamalı Çok Makineli Sistem)
STPN	Stochastic Timed Petri Net (Stokastik Zamanlı Petri Ağı)
TPN	Timed Petri Net (Zamanlı Petri Ağı)
TTPN	Transition Timed Petri Net (Geçiş Zamanlı Petri Ağı)
TTPN	Transition Timed Petri Net (Geçiş Zamanlı Petri Ağı)

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze üretim sistemlerinin gelişimi incelendiğinde, pazar koşulları ile bir ilişki içinde oldukları görülür. Bu ilişkiye yakından bakıldığında, pazar koşullarındaki dinamizmin üretim sistemlerinin gelişmesine sebebiyet verdiği gözlemlenmektedir. Modern imalat şirketleri, daha kısa yaşam döngüleri, düşük hacimler ve daha kısa müşteri teslimat süreleri ile giderek farklılaşan ürünlere göre işletme performanslarını iyileştirmelerini gerektiren çalkantılı bir dünya pazarında rekabetle karşı karşıyadır [1]. Böylece işletmelerin özellikle son yıllarda ortaya çıkan ürün çeşitliliğindeki genişlemeye ve özelleştirilmiş ürün taleplerindeki artışa hızlı ve etkili bir şekilde cevap verebilmeleri zorunlu hale gelmiştir. Bu zorunluluk ile birlikte üretim sistemlerinde “esneklik” kavramı ortaya çıkmış ve rekabette avantaj elde etmek isteyen firmalar “esneklik” kavramını bünyelerine kazandırmaya başlamışlardır. Esneklik ve yüksek üretkenlik ihtiyacı “Esnek Üretim Sistemi” nin (EÜS) geliştirilmesine yol açmıştır [2].

1.1. Çalışmanın Amacı

Bir EÜS, bir malzeme taşıma sistemi ile birbirine bağlanan ve farklı işleri aynı anda işleyebilen otomatik iş istasyonlarından oluşan bilgisayar kontrollü bir sistemdir [3]. Bu tanımı karşıladığı sürece büyük veya küçük herhangi bir üretim sistemi EÜS olarak adlandırılabilir [4]. Paletler için büyük depolama alanları ve işlenecek parçalar için basit rotalara sahip daha küçük boyutlu esnek üretim sistemlerinin kullanımı da endüstride oldukça yaygındır. “Esnek Üretim Hücresi” (EÜH) olarak da adlandırılan bu küçük EÜS'ler, daha büyük sistemlere doğru bir aşama olarak görülebilir [3]. Boyutu küçük veya büyük olması fark etmeksizin bu tür karmaşık sistemlerin uygulanacakları işletmelere entegrasyonları oldukça pahalıdır ve yüksek başlangıç yatırımları gerektirirler [5]. EÜS'lerin hem sistem yapılarındaki karmaşıklık hem de yüksek başlangıç yatırımları nedeniyle uygulanacakları işletmeye kurulumları öncesinde ve kullanımları sırasında doğru bir şekilde modellenmeleri ve performans analizlerinin yapılması gerekir. Bu amaçla, hazırlanan bu çalışmada bir EÜH'nin modellenmesi ve performans analizlerinin yapılması üzerinde durulacaktır. Bunun için Petri ağları yöntemi ele alınacak EÜS'lerin (ve dolayısıyla EÜH'lerin) Petri ağları ile modellenme ve performans analizlerinin yapılma prensipleri ortaya konacak ardından EÜH'lerin PA'lar ile modellenmesi ve performans analizi için geliştirilen yeni bir yaklaşım tanıtılacaktır.

1.2. Çalışmanın Kapsamı ve Araştırma Yöntemleri

Esneklik kavramı firmaların rekabet gücünü artırıcı unsur olarak görüldüğünden; esnek üretim sistemleri ve türevlerinin tasarlanması, üretim sistemine entegre edilmesi ve analizi oldukça önemlidir. Yüksek sermaye yatırımları gerektiren bu bütünleşik sistemlerden beklenen karlı geri dönüşler için, sistemlerin kurulumdan önce modellenmesi ve denenmesi gerekmektedir [6]. Esnek üretim sistemleri her elamanı yerel kontrollü olduğu için “Ayrık Olay Sistemleri” nin (Discrete Event Systems-DESS) bir sınıfı olarak düşünülür. Ayrık olay sistemlerini karmaşıklıkları nedeniyle analitik olarak değerlendirmek zordur [7]. Petri ağları; ayrık olaylı sistemlerin tasarımı, modellenmesi ve analizi için geliştirilmiş, güçlü grafiksel ve matematiksel yapısı sayesinde öne çıkan bir modelleme aracıdır [8]. Petri ağları eşzamanlı/eşzamansız işlemlerin ayrık olaylarını grafiksel olarak modelleyip analitik olarak test etmeyi sağlar [9]. Bu nedenle hazırlanan çalışma kapsamında ele alınan EÜH'nin modellenerek performans analizlerinin yapılması için Petri ağları kullanılmıştır. Yapılan çalışmanın kapsamı aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- EÜS'lerde Petri ağlarının modelleme ve performans analizi yapılması amacıyla nasıl kullanıldığı aktarılmıştır.
- Zamanın PA modellerine entegrasyonu tartışılmıştır.
- Zamanlı PA modelleri ve uygulama metodolojisi anlatılmıştır.
- Mekanik sistemlerde meydana gelen belirsizlik durumlarından bahsederek “bulanık küme teorisi” ve “bulanıklık” kavramları üzerinde durulmuştur.
- Üretim sistemlerinin modellenmesi amacıyla geliştirilen, zamanın geçişler aracılığıyla modele entegre edildiği ve bulanıklığın kullanıldığı yeni bir yaklaşım tanıtılmıştır.
- Mekanik belirsizliklerin var olduğu sistemleri, bulanık küme teorisi yardımıyla bulanık hale getirilmiş parametreler kullanarak modellemenin yarattığı farklılıkları görebilmek amacıyla ele alınan sistem, bulanık parametrelerin kullanılmadığı ve sadece bazı parametrelerin bulanıklaştırıldığı iki farklı yaklaşımla daha modellenmiştir.
- Her 3 modelleme yaklaşımı için de performans analizleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

•Yapılan modelleme ve performans analizi çalışmaları için MATLAB¹ paket programına ait PN Toolbox alt programı kullanılmıştır.

1.3. Önceki Çalışmalar ve Çalışmanın Literatüre Katkısı

İlk olarak 1962 yılında bir doktora tezi çalışması kapsamında Carl Adam Petri [10] tarafından ortaya konan Petri ağlarının geliştirilme amacı iletişim teorisi temellerini tartışmak olsa da birçok araştırmacının PA'ları üretim sistemlerinin tasarım, modelleme, denetleme ve analiz aşamalarında uyguladığı görülmektedir. 1980'li yıllardan günümüze kadar PA'ların üretim sistemlerindeki etkin kullanımı Bölüm 4'te incelenmiştir. Literatürde EÜS'lerin PA'lar ile modellenmesi çalışmalarına bakıldığında sistemlerdeki belirsizliklerin ele alınmasında ya sadece stokastikliğin ya da stokastiklik ve bulanıklığın bir arada kullanılmış olduğu saptanmıştır. Oysa bazı belirsizlikleri açıklamanın tek yolu “bulanık küme teorisi” nden geçer (Bkz. Bölüm 3.14).

EÜS'lerin PA'lar ile modellenmesi çalışmalarında sistemdeki zamanın sadece geçişler ile ilişkilendirilerek, parametrelerin benimsenen bulanık yaklaşımla hesaplandıktan sonra geçiş elemanları aracılığıyla kullanıldığı başka bir yaklaşımın daha olmaması bu çalışmanın yapılmasına motivasyon sağlamıştır.

¹ MATLAB; MathWorks firmasına ait bir paket programdır.

2. ESNEK ÜRETİM SİSTEMLERİ

2.1.Esnek Üretim Sistemlerine Tarihsel Bir Bakış

Sürekli gelişen ve değişen dünya dinamizmi ile üretim alışkanlıkları da değişim göstermektedir. Artan uluslararası rekabet, küresel pazarın çekiciliği, özelleştirilmiş ürünlere olan ilginin artması ve sürekli değişkenlik gösteren talep gibi faktörler neticesinde yeni üretim sistemleri arayışı kaçınılmaz olmuştur.

Günümüz endüstrisinde sağlanan yüksek standartların çoğu gelişimini seri üretim tekniklerine borçludur. Esnek üretimin kökeni de otomatikleştirilmiş seri üretime dayanan entegre bir üretim teknolojisidir. Endüstri devrimi ile birlikte üretim hızı yüksek ve maliyeti düşük ürünler üretmenin yolu olarak “seri üretim” görülse de gelişen teknoloji bize uygulanabilir yeni bir alternatif sunmuştur: Esnek Üretim Sistemi (EÜS).

EÜS’lerin doğuşuna ve gelişimine yol açan olaylara kronolojik olarak baktığımızda Henry Ford tarafından geliştirilen montaj hattı karşımıza çıkar. 1914’te Henry Ford tarafından bir motorun üretimi için 84 aşamalı bir akış hattının geliştirilmesi entegre üretim sistemleri için çok önemli bir dönüm noktası meydana getirmiştir. Henry Ford’un montaj operasyonlarını birleştirip birbirine bağlaması ile öncüsü olduğu seri üretim sistemi ile birlikte otomatik hale gelen üretim sistemleri, endüstride yeni değişimlerin önünü açmıştır. Henry Ford özellikle esnek üretimle ilgilendiğinden değil, üretim verimliliğini sağlamak ve piyasa isteklerine cevap verebilmek amacıyla bu sistemi geliştirmiştir. Çünkü o yıllarda satın alınan ürünün bireysel olması ve müşteri tarafından seçilen varyasyonlarla değiştirilebilme arzusu henüz yeni yeni bahsedilmeye başlanarak pazarın yapısını değiştirmiştir. Pazar yapısıyla birlikte müşteri zevk ve taleplerinin de oldukça değişken olması üretilen ürünü çeşitlendirme yeteneğine sahip olan firmalara endüstriyel hayatta söz sahibi olma şansı vermiştir. Seri üretimin varlığı ile birleşince bu etmenler esnek üretimin gelişmesinde temel motivasyonu sağlamıştır.

Pazar koşulları, üretim sistemlerinin yapısını belirleyen başlıca öğedir. İkinci Dünya Savaşı’nı takiben uluslararası rekabetin artmasıyla pazarın odak noktasını üreticiler değil tüketiciler oluşturmaktadır. Odağın değişmesiyle birlikte kalite kavramı da artık endüstriler için önemli hale gelmiştir.

1960’ların sonları ile 1970 arasında üretim sektörü için öncelikli endişe kaynağı olan “maliyet”e zamanla “kalite” de eşlik eder hale gelmiştir. Pazar koşullarının gittikçe

karmaşıklaşması ile müşteri öncelikleri arasında “teslimat hızı” da girmiş ve değişen dünya ile ürünlerde “özelleştirilebilirlik” kavramı ortaya çıkmıştır.

1967 senesinde İngiltere’de D.T.N Williamson tarafından çalışmış olduğu Molins Machine Company için bir “esnek işleme sistemi” geliştirilmiştir. Geliştiricisinin “System24” adını verdiği bu sistem EÜS’lerin bilinen ilk örneği olarak kabul edilir. Çok çeşitli bileşenleri üretmek üzere tasarlanan, üretim elemanlarını otomatik olarak yükleme, boşaltma ve gözetimsiz olarak uzun süre çalışabilme yeteneğine sahip bir sistemdir. Bu amaçlar günümüzde hala EÜS’lerin amaçları arasında sıralanabilir. Araştırmacı bu buluşu için patent almıştır. Ancak bu patent, 24 saat neredeyse insansız çalışabilen bilgisayarlı işleme sisteminin ayrıntılarını açıklarken “esnek üretim sistemi” ifadesini içermemektedir. System24 adı verilen bu sistemde esneklik kavramı kullanılmamış olsa da EÜS’ler ile ilgili bilinen ilk çalışmalardan olduğu ileri sürülmektedir.

1970’lerin başlarında ortaya çıkan “esneklik” kavramından o sıralarda henüz geliştirilen entegre üretim sistemlerinde söz edilmeye başlanmıştır. Tüm bu sayılan sebepler beraberinde firmaların faaliyet gösterdikleri ortama uyum sağlama, faaliyetlerinde esnek olma ve farklı beklentileri karşılama zorunluluğunu getirmiştir.

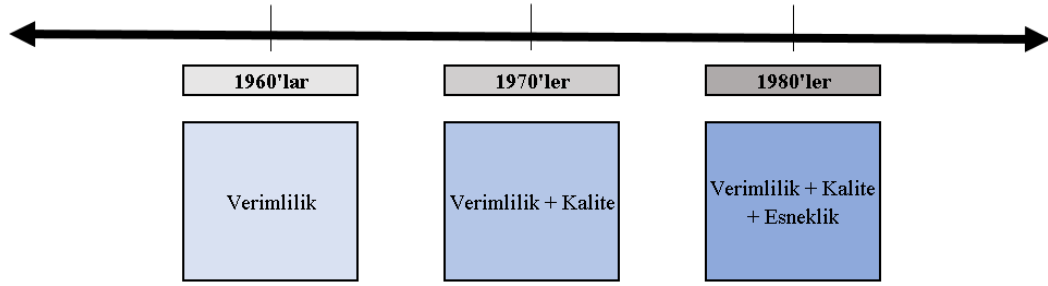
1970’lerin ortalarına gelindiğinde bu durum yerini “Esnek Üretim Sistemi” olarak bilinen ve bir devrim niteliğinde olan bir üretim sistemi fikrinin somutlaşmasına bırakmıştır.

1970’li yılların sonlarına gelindiğinde ise değişken tüketici talepleri ve özelleştirilmiş ürün talepleri tüm üretim sektöründe konuşulan kavramlar haline gelmişti. Bu kavramların beraberinde getirdiği esneklik kavramı ile EÜS’lerin kuruluşu 1970’lerin sonu itibari ile hızlı bir artışa geçmiştir. Bu hızlı artışın başlıca sebepleri;

- Artan uluslararası rekabet
- Üretim süreçlerinin kısaltılması isteği
- Üretim maliyetlerinin azaltılması isteği

olarak gösterilebilir.

Şekil 2.1’de üretim sektöründe yıllara göre hakimiyet gösteren kavramlar görülebilir.



Şekil 2. 1. Üretim sektöründe hakimiyet gösteren kavramların yıllara göre değişimi

Üretim teknolojilerinin yaşadığı değişim ve gösterdiği gelişim tüketici pazarında bir canlanma ile sonuçlanmış ve tüketicilerin farklı ürünlere olan ilgisi artmıştır. Bununla birlikte pazarda yeni odak noktası üreticiler değil tüketicilerdir. Tüketici isteklerine cevap verirken aynı zamanda verimlilik ve düşük maliyet sağlama vaadi ile EÜS'lerin popülerliği çok geçmeden tüm dünyada yayılmıştır. Değişken müşteri taleplerine cevap vererek pazar paylarını koruyabilmek adına artık sadece büyük miktarlarda değil aynı zamanda çok çeşitli ürün üretmeleri gerektiğini fark eden firmaların bu girişimleri EÜS'lerin popülaritesini artırmıştır. Böylece EÜS'ler, pazardaki yenilikleri karşılayacak rekabet avantajı elde edecek yeni sistemler olarak ortaya çıkmışlardır. Öncelikle bir üretim teknolojisi olarak adlandırabileceğiniz EÜS'lere farklı bir perspektif ile yaklaşırsak aynı zamanda bir üretim felsefesi olduğunu söylememiz mümkündür. EÜS değişen ve gelişen dünya ile birlikte üretim sektöründe ortaya çıkan kavramlardan biri olan çevikliği elde etmenin bir yolu olarak gösterilir. Çevik bir üretici pazardaki değişimlere hızlı bir şekilde cevap veren, müşteri beklentilerini karşılama konusunda başarılı olan bir üreticidir ve esnek üretim sistemleri bunu elde etmenin bir yoludur.

1980'lerden beri EÜS teknolojisinin hızla ilerlediği yadsınamaz bir gerçektir. Bu gerçeğe rağmen rekabette yer edinmek ve söz sahibi olmak isteyen firmalar hız kesmeden üretim sistemlerini değişen pazar koşullarına ve müşteri taleplerine hızlı bir şekilde uyum sağlayabilen bir yapıya kavuşturmak zorundadırlar. Ürün yapılarında meydana gelen değişimlere cevap verebilecek bir sistem ancak "üretim sistemlerinin esnekliği" ile mümkündür.

2.2. Esneklik Nedir?

Endüstri devrimi ile insan gücünün yerini makinelere bıraktığı üretim sistemleri hala değişim göstermeye devam etmektedir. Endüstri devrimi neticesinde otomasyon sürecinin

gelişim göstermesi “esneklik” kavramının oluşumu ve gelişimini de tetiklemiştir. EÜS’lerin temel karakteristik özelliği olarak karşımıza çıkan esneklik kavramı günümüz üretim sistemleri için stratejik bir hamle niteliğindedir. Bir üretim sistemi eğer bir dizi farklı iş parçasını otomatik olarak ve talebe göre şekillendirerek belirli bir sırayla işleyebiliyorsa “esnek” olduğu söylenir.

“Meydana gelebilecek değişikliklere karşı gösterilen tepki hızı” [11] [12] olarak da tanımlayabileceğimiz esnekliği bir üretim sistemine tam anlamı ile entegre edebilmek için örgütsel anlamda bütüncül bir yaklaşım ile ürünün tüm aşamalarında gerçekleşen bir uygulama gerekir. Üretim sistemlerinde bahsedilen şekliyle esneklik kavramını tam anlamıyla açıklamak oldukça zordur. Çünkü “Esneklik çok boyutlu bir kavramdır.” [13]. Sistemdeki makineler, iş parçalarının işlemlerini herhangi bir sırayla kabul edip yürütürken, aynı anda birkaç farklı iş parçasını otomatik olarak işleyebiliyorsa, bir üretim sisteminin esnek olduğu söylenmiştir. Bunu yapmak için, sistemdeki makineler, bir sonraki iş parçasına, takıma ve halihazırda işlenmekte olan parçayı tamamladıktan sonra bir sonraki iş parçasını işlemek için gerekli talimatlara sahip olmalıdır.

Firmanın esneklik kavramını üretim stratejisi olarak benimsemesi ancak ve ancak söz konusu üretim sisteminin EÜS teknolojisinin tam kontrolü ile sağlanır. Bir işletme için yüksek esnekliğe ulaşmak yenilikçi teknikler ve organizasyonel çabalar ile mümkündür.

2.3. Esneklik Türleri

Çok boyutlu bir kavram olmasıyla birlikte esnekliğin çok çeşitli türleri de vardır. Bizim ilgilendiğimiz başlıklarda bazı esneklik türleri şöyledir [14]:

- Makine esnekliği: EÜS’lerdeki otomatik takım değiştirme araçları ile makinenin bir operasyondan diğerine geçebilme kabiliyetidir.
- Malzeme taşıma esnekliği: EÜS’lerdeki, otomatik malzeme taşıma sistemlerinde farklı tür ve boyuttaki parçaların belirtilen yerlere taşınması kabiliyetidir.
- Operasyon esnekliği: İşlenecek olan iş parçasına farklı işlem adımları uygulanabilme kabiliyetidir. EÜS’lerde parçalara farklı adımlar ve teknikler ile uygulama yapılabilir.

2.4. Esnek Üretim Sistemlerinin Tanımı

EÜS’ler farklı çeşitteki parçaları tezgahlarda aynı anda işleyebilmesi, talebe göre çeşitlendirebilmesi sebebiyle esnek olarak adlandırılırlar. EÜS’ler günümüz itibarıyla üretim

endüstrisinde etkinliğini ve etkililiğini kanıtlamış sistemlerdir. Üretim faaliyetlerinde geniş bir uygulama alanı edinmişlerdir. Bunlar şekillendirme, montaj, kaynak vb. operasyonlar olarak sıralanabilir.

Geleneksel üretim sistemlerinden içinde barındırdığı esneklik kavramı ile ayrılan bu sistemlerin hakkında çokça konuşulmasına ve birçok araştırma olmasına rağmen üzerinde karar kılınmış kesin bir tanımları bulunmamaktadır.

EÜS'ler otomatik bir malzeme taşıma sistemi ve çoğunlukla buna eşlik eden bir depolama sistemi ile birbirlerine bağlanmış bir ana bilgisayar tarafından kontrol edilen sayısal kontrollü (Numerical Control-NC) işleme tezgahlarından oluşan entegre bir üretim sistemidir [15]. Otomatik taşıma sistemi paletler veya diğer taşıma birimleri aracılığıyla makinelere parçaları taşır. İşlenmesi bitmiş parçalar da yine aynı taşıma birimleri aracılığıyla ve otomatik taşıma sistemi ile varış noktalarına taşınır. Her malzeme taşıma sisteminin otomatik bir parça taşıma sistemi vardır. Bazı gelişmiş sistemler ayrıca otomatik alet taşıma cihazları içerir. Bunlar, sistem çalışırken takım magazinleri ve merkezi takım depolama alanı arasında takımları transfer edebilir. Bir ana bilgisayar hem tezgâhları hem de otomatik taşıma sisteminin kontrolünü sağlar. Bu bilgisayarın hem denetim hem de bilgi kontrol işleri vardır.

EÜS'ler bilgisayar kontrollü iletişim, üretim süreci ve ilgili ekipmanın dikkatli bir şekilde birleştirilmesi yoluyla bir EÜS; bir organizasyonun üretime yönelik yönlerinin bir bölümünün, faaliyetlerindeki önemli değişikliklere entegre bir şekilde hızlı ve ekonomik yanıt vermesini sağlar. Bu tür sistemler tipik olarak proses ekipmanları (makine aletleri, montaj istasyonları, robotlar vb.), malzeme taşıma ekipmanları (robotlar, konveyörler, otomatik yönlendirmeli araçlar (Automatic Guided Vehicle-AGV) vb.), bir iletişim sistemi ve gelişmiş bir bilgisayar kontrol sistemi içerir. Böyle bir tanım hem oldukça uzun hem de genel bir tanımdır. İleride literatürde sıklıkla kullanılan başka tanımlardan da bahsedilmiştir. Çok çeşitli tanımların olması ve tek bir tanımda karar kılınmamasının sebebi EÜS bileşenlerinin o an uygulandığı sisteme göre farklılık gösterebilmesidir. Varsayılanın aksine EÜS'ler yalnızca bilgisayar sayısal kontrollü (Computer Numerical Control-CNC) tezgahlar içermez; CNC ve otomatik makinelerin bir karışımını içerir. Yine benzer şekilde varsayılanın aksine parça işleme merkezinin birçoğunda robotlar olmayabilir [16].

Üzerinde anlaşılan tek bir tanımlı bulunmayan EÜS'ler için literatürde bulunan bazı tanımları şunlardır:

- Bir EÜS, makineler, montaj hücreleri, endüstriyel robotlar, inceleme makineleri ve bunlara ek olarak otomatik malzeme taşıma ve depolama sistemleri kullanarak yüksek seviyeli data işleme ve otomatikleştirilmiş malzeme akışı sağlayabilen bir üretim sistemidir [6].

- EÜS, otomatik bir konveyör sistemi ile birbirine bağlanan, birbirinin aynısı veya tamamlayıcısı olan bir dizi NC makineden oluşan bir üretim sistemidir [14].

- EÜS, bir dizi farklı iş parçası üzerinde gerekli üretim ve işleme operasyonlarını otomatik olarak gerçekleştirebilen bilgisayar kontrollü takım tezgâhları ve benzer makinelerden oluşan bir sistemdir [17].

- EÜS, bilgisayar kontrollü makineler, montaj hücreleri, endüstriyel robotlar, inceleme makineleri kullanılarak yüksek düzeyde dağıtılmış veri işleme ve otomatik malzeme akışı ile ilgilenen bir sistemdir [18].

- EÜS, parçaların sistemdeki çeşitli tezgahlarda otomatik olarak işlenmesi için entegre bir sistem oluşturmak amacıyla mevcut NC üretim teknolojisi, otomatik malzeme taşıma ve malzeme depolama sistemi ile bilgisayar donanımı ve yazılımını birleştiren kombine bir üretim sistemidir [19].

2.5. Esnek Üretim Sistemlerinin Bileşenleri

EÜS’lerde işlenen çeşitli hassas parçalar için sayısal kontrollü makineler gereklidir. İşlenecek/işlenmiş iş parçalarını EÜS’lerin içine veya dışına taşıyan otomatik bir malzeme taşıma sistemi mevcuttur. Yani kısaca EÜS’lerin bir bilgisayar kontrolü altında makineler ve otomatik malzeme taşıma sistemlerinden oluştuğu söylenebilir. Bu sistemlerde işlenecek/işlenmiş parçaların yönlendirilmeleri de esnektir. Parçaların işlenmesi robotlar tarafından yapılır, işlenmiş parçalar otomatik taşıma sistemleri aracılığıyla taşınır. İşlenecek parçalarda meydana gelecek tasarım veya mühendislik değişiklikleri bilgisayarlar aracılığıyla sisteme dahil edilir.

EÜS’leri oluşturan alt sistemlerdeki teknolojik gelişmelerle birlikte esnek bir üretim sistemi de aynı doğrultuda gelişim gösterir.

NC makinelerinin gelişim süreci üreticilere verimliliği ve esnekliği yüksek, maliyeti düşük ürünler üretmenin yolunu sunmuştur. 1966’dan itibaren NC tezgahların gelişimi EÜS’lerin gelişimini de tetiklemiştir. 1971’de CNC tezgahlara geçiş yapılmasıyla entegre sistemlerin oluşmasında önemli bir unsur meydana gelmiştir.

Bir EÜS’nin niteliklerini oluşturan üç temel bileşeni vardır [20]:

- NC / CNC Tezgahlar: Parçaların işlenmesi görevinden sorumlu sayısal kontrollü (NC) veya bilgisayarlı sayısal kontrollü (CNC) takım tezgahlarıdır. Bir takım tezgâhı işlevini herhangi bir kontrol olmaksızın kodlar ile gerçekleştiriyorsa bu takım tezgahının sayısal kontrollü olduğu söylenebilir ve bu tezgahlar EÜS'lerin esnekliğini sağlayan en önemli birimdir.

- Otomatik Malzeme Taşıma Sistemi ve Depolama Sistemi: Otomatik malzeme taşıma sistemleri işlenecek iş parçalarını belirli bir başlangıç noktasından işleneceği tezgâha götürülmesi görevinden sorumludur. EÜS'lerin iskeletini oluşturduğunu söyleyebileceğimiz bu temel eleman, bilgisayarlı kontrol sisteminin denetimi altında varış noktalarını belirleyerek birimler arasında parça taşıma görevini yerine getirir.

- Bilgisayar Kontrol Sistemi: Tüm sistemdeki tezgahların ve malzeme taşıma sisteminin faaliyetlerini koordine etme ve denetleme görevinden sorumludur. EÜS'lerdeki veri işleme ve hiyerarşik kontrolü sağlayan temel elemandır. EÜS'lerde bulunan entegre modüler yapıdaki her bir modelin kontrolünü sağlayan hiyerarşik bir kontrolör yapısı içerir.

2.6. Günümüzde Esnek Üretim Sistemleri

EÜS'ler hakkında Henry Ford'un seri üretim mirasının bir uzantısı olduğu, yalnızca bir üretim sistemi değil aynı zamanda bir üretim felsefesi olduğunu söylemek mümkündür.

İlk kurulan EÜS'lerin çokça CNC tezgâh ve oldukça karmaşık otomatik malzeme taşıma sistemlerinden oluştuğu, çok büyük ve çok karmaşık sistemler olduğu söylenebilir. Oldukça pahalı olan bu sistemleri kontrol eden yazılımlar da epey karmaşık ve anlaşılması zordu. Bu kadar büyük bir başlangıç yatırımı olan ve böyle komplike sistemleri firmalarına uygulamayı göze alacak sınırlı sayıda endüstri vardı.

Şu anda ise EÜS'lerdeki eğilim "Esnek Üretim Hücresi" olarak adlandırılan geleneksel EÜS'nin küçük versiyonlarına yöneliktir. EÜH'ler, EÜS'lerin çok daha küçük boyutlu bir hali olarak kısaca ifade edilebilir. Günümüzde iki veya daha fazla CNC tezgâh EÜH olarak kabul edilirken iki veya daha fazla esnek hücre ise EÜS olarak kabul edilir. Bu nedenle EÜS'nin en basit ve en anlaşılır tabirle farklı çeşit ve sayıda parçayı üretecek CNC tezgahlar, üretilecek/üretilecek parçaları taşıyacak otomatik malzeme taşıma sistemi, parça üretimi ve parça taşınmasını denetleyen bir ana kontrol bilgisayarından oluştuğu söylenebilir.

EÜS'ler başlangıçta daha kısıtlı alanlarda uygulama yeri bulduysa da son zamanlarda EÜS'lerin entegre yaklaşımının birçok üretim sistemine uyarlanabildiği gözlemlenmiştir.

2.7. Geleneksel Üretimden Esnek Üretime Geçiş: Amaçlar ve Avantajlar

Geleneksel üretim anlayışı ve esnek üretim anlayışının özelliklerinin birkaçı karşılaştırmalı olarak aşağıda verilmiştir.

Tablo 2. 1. Geleneksel üretim anlayışı ve esnek üretim anlayışının karşılaştırılması

GELENEKSEL ÜRETİM ANLAYIŞI	ESNEK ÜRETİM ANLAYIŞI
İşler birçok basit ve küçük işleme bölünür.	İşler birkaç işlem adımına bölünür.
İşlemler belirli gruplar halinde ve sırayla tamamlanır.	İşlemler partiler halinde NC/CNC tezgahlarda tamamlanır.
İşlemleri çok hızlı tamamlamak hedeflenir.	İşlemleri tutarlı ve hızlı bir şekilde tamamlamak hedeflenir.
Bazı işlemler otomatikleştirilir.	Tüm işlemler otomatikleştirilir.

2.7.1. Esnek üretim sistemlerinin uygulanma amaçları

EÜS'lerin amaçlarının anlaşılabilirliğini sağlamak için daha geniş bir perspektiften bakmak önemlidir. Artan otomasyon ve bilgisayar entegrasyonu ile birlikte EÜS'lerin üretim hayatına girmesi sonucu artırılmaya çalışılan “çalışan başına çıktı miktarı” hedefi, yerini sistem çıktısı ve verimliliğini artırmaya yönelik hedeflere bırakmıştır.

Üretim sektöründe gerçekleştirilmeye çalışılan ve aslında birbirleri ile çeliştikleri söylenebilecek iki hedef “esneklik” ve “verimlilik” olarak gösterilebilir. Verimlilikte asıl hedef yüksek hızda ve miktarda ürün üretimini sağlamak iken esneklikte ise ürün çeşitliliği ve değişkenliğin hedeflenmesi söz konusudur. EÜS kavramının üretim sektörüne girmesi ile verimlilik korunurken esnekliğin de sağlanması gibi bir hedef oluşmuştur [21].

EÜS'lerin uygulanması ile amaçlanan hedefler:

- Maliyetleri azaltmak
- Üretim ekipmanının en uygun şekilde kullanılmasını sağlamak
- Stokları azaltmak
- Teslimat sürelerini kısaltmak
- Rekabet gücünü artırmak
- Kaliteyi artırmak

olarak sıralanabilir.

2.7.2. Esnek üretim sistemlerinin sağladığı avantajlar

EÜS'lerde bir araya getirilmiş olan yüksek teknolojiye sahip tezgahlar, tamamen otomatik malzeme taşıma sistemleri ve yenilikçi üretim yaklaşımlarının kombinasyonu sayesinde bu sistemi firmasında uygulayacak firma eğer EÜS'nin fonksiyonel ve doğru bir şekilde kullanımını sağlayabilirse birçok avantaj elde eder Firmaları büyük bir başlangıç yatırımı gerektiren EÜS'lere yatırım yapmaya yönlendiren avantajlara baktığımızda;

- Esnek üretim yeteneği: EÜS'lerin temel elemanlarından olan NC tezgahlar ve CNC tezgahlar ile yeni iş parçaları kolayca kabul edilip işlenebilir, talep değişikliklerine ayak uyduracak hızda bir parçadan diğerine geçiş yapılabilir.

- Yüksek ekipman kullanımı: Parçalar arasındaki sürenin sadece paletlerin aktarımı ve ana bilgisayar kontrolörü için denetleme/koordine süresini içerdiği ve böylece en aza indirilmiş olduğu söylenebilir. Yani ekipman kullanımını azaltan gecikmeler minimize edilerek yüksek ekipman kullanımı sağlanabilir.

- Azaltılmış ekipman maliyeti: EÜS'lerden bağımsız tezgahlara kıyasla belirli bir miktarda çıktı için gereken tezgâh sayısı mümkün olan en yüksek düzeyde tezgâh kullanım oranı ile azaltılmış olur.

- Azaltılmış kullanım alanı: EÜS'ler özellikle konveyör gibi otomatik malzeme taşıma sistemlerine sahip olduğundan tesis yerleşimi açısından daha avantajlı planlar elde edilebilir, tesis alanından maksimum fayda sağlanabilir.

- Azaltılmış doğrudan işçilik maliyeti: EÜS'lerde parça yükleme ve boşaltma işlemleri merkezileştirdiğinden bir operatör birçok makineye bakabilir bu nedenle esnek üretim sistemlerinde gereken operatör sayısı geleneksel sistemlere göre azdır.

- Kısaltılmış teslim süresi, azaltılmış envanter, iyileştirilmiş piyasa tepkisi: EÜS'lerin yapısal tasarımı, bir bilgisayar kontrolü altında çalışan CNC tezgahlar ve otomatik malzeme taşıma sistemleri sayesinde üretim süreleri ve envanterlerin azaltılmasıyla büyük stoklar tutmak zorunda kalmadan pazar değişimlerine hızlı ve etkili yanıt vermeyi sağlar. CNC tezgahlar sayesinde daha iyi kaliteli ürünler üretilirken, hata oranı azaltılıp ıskartalardan tasarruf edilebilir. Parça işlenen tezgâhları ve otomatik malzeme taşıma sistemini denetleyen koordine eden ana bilgisayarın planlama hassasiyeti sayesinde stoklar azaltılabilir. şeklinde birçok avantajın sıralanabileceğini görürüz [17].

2.8. Esnek Üretim Sistemlerinin Tasarım, Analiz Ve Modellemesi: Petri Ağı Perspektifi

EÜS'ler bir araya getirilmesi ve bir uyum içinde çalışması gereken çeşitli ekipman türlerinin karmaşık bir entegrasyonudur. Sistem karmaşıklığı beraberinde tasarım analiz ve modelleme zorluğu da getirir. İleri teknolojilerin oldukça karmaşık kombinasyonlarına sahip olan bu sistemin geleneksel bir üretim tesisine herhangi bir zorluk yaşanmadan uygulanması olağan dışıdır. Bu gerçeğe bakıldığında firmaların başlangıçta EÜS'lere mesafeli yaklaşmasını sebebi anlaşılabilir.

EÜS'lerin başarılı olması için uygulama öncesi ve sonrası düzgün bir analize tabi tutulmaları şarttır. EÜS'lerin sağladığı artırılmış kalite, yüksek esneklik ve düşük maliyet avantajlarından faydalanmak için firmaların bu karmaşık sistemlerin uygulanmasını dikkatli bir şekilde yönetmeleri gerekmektedir. Büyük bir başlangıç yatırımı gerektiren EÜS'lerin sağladığı performans iyileştirmelerinden yararlanmak bu karmaşık sistemlerin güçlü araçlarla tasarlanarak modellenmesi ve analizi ile mümkündür [6].

Herhangi bir teknolojinin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi ile ilgili bir öğrenme eğrisi olduğu bilinen bir gerçektir. Bu sistemlerin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi ve sürdürülebilmesi için gerekli teknolojinin varlığı tek başına yeterli değildir. Bununla birlikte sistemin doğru kolay ve anlaşılır bir şekilde modellenip analiz edilmesi gibi konularda fonksiyonel araçlara ihtiyaç duyulur.

Ayrıca EÜS'lerde kontrol sistemlerinin geliştirilmesi için entegre modelleme araçlarına ihtiyaç duyulur. Modelleme sürecindeki yanlışların azaltılması ve sistemin işleyişini düzgün ve anlaşılır analizlerinin yapılmasının beraberinde önemli maliyet azalışları ve operasyonel verimlilik artışları da kaçınılmaz olacaktır. Tüm bu sebepler bütün planlama seviyelerinde kullanılan / kullanılacak olan modellerin doğruluğunun önemine dikkat çeker.

Oluşturulan modellerin davranışsal özelliklerinin analizi ve performans değerlendirmesinde grafiksel ve matematiksel bir araç olarak karşımıza çıkan "Petri ağı" (PA) ayrık olay sistemlerin modellenmesi ve analizinde kullanıcılara tek tip bir ortam sağlar. Başka bir deyişle Petri ağlarının EÜS'lerin tasarımı, modellenmesi ve performans analizinde ideal entegre modelleme aracı olduğu iddia edilmektedir.

PA'lar, grafiksel bir araç olarak kullanıcılara güçlü bir iletişim ortamı ve yüksek seviyede anlaşılabilirlik sunar. Anlaşılması güç açıklamalar ve matematiksel ifadeler yerine Petri ağları aracılığıyla karmaşık sistem özellikleri uzman olmayan kişilerce de rahatça

anlaşılabilecek şekilde grafiksel olarak ifade edilebilir. Bu güçlü özellik simülasyona izin veren bilgisayar tabanlı Petri ağı araçları ile birleştirildiğinde tasarımcılara karmaşık sistem geliştirme süreçlerine yardımcı olan bir ortam sağlamış olur.

Matematiksel bir araç olarak Petri ağları faaliyetler arasındaki öncelik ilişkileri, eşzamanlı faaliyetler, tekrarlayan faaliyetler gibi özelliklerin cebirsel olarak yansıtılmasına olanak sağlar.

3. PETRİ AĞLARI

3.1. Üretim Sistemlerinde Bir Araç ve Metodoloji Olarak Petri Ağları

Petri ağları eşzamanlı, paralel, stokastik, dağıtık gibi özellikler gösteren sistemleri modelleyip, oldukça karmaşık olan bu sistemlerin görsel olarak ifade edilebilmesini sağlayan araçlardır. Bu araçlar ile sistemin performans analizi yapılabilir, geçerli kodlar üretilebilir, simülasyon çalışması gerçekleştirilebilir. PA'lar genel özelliklerine bakıldığında durum-geçiş (state-transition) diyagramlarına benzetilirler [22].

Olay güdümlü sistemlerin karmaşıklık ve boyut açısından büyük olmaları bu sistemlerden istenen performans özelliklerinin elde edilmesi için sistematik modelleme ve tasarım araçlarına sahip olmayı zorunlu kılar. Bu sistemler eş zamanlılık, karşılıklı dışlama, deterministik olmama, çatışma gibi özellikler taşıyabilirler. Bu gibi özellikleri klasik modelleme araçları ve diferansiyel denklemlerle açıklamak oldukça zordur. Bu tür sistemlere “ayrık olay sistemleri” (Discrete Event Systems-DESS) denir ve DESS'lerin düzgün olmayan şekilde yapılan tasarımı ve performans analizi sistemde kilitlenme oluşumu gibi istenmeyen sonuçlar doğurabilir [23].

“Ayrık olay dinamik sistemleri” (Discrete Event Dynamic Systems-DEDS) ise eşzamanlı, paralel, dağıtık, deterministik ve/veya stokastik özellikler taşıyabilen, kilitlenmeler ve çatışmalar içerebilen sistemlerdir ve PA'lar böyle zor ve karmaşık karakteristik özelliklere sahip sistemlerin modellemelerinde başarıyla kullanılırlar.[9] Bir DEDS'in modellenme ve tasarım çalışması, sistemi yansıtan uygun bir matematiksel temsil ile başlamalıdır. Amaca yönelik geliştirilmiş birçok farklı uzantıya sahip PA, başta otomatik üretim sistemleri olmak üzere çok çeşitli DEDS'ler için uygulanabilirliği yüksek, güçlü modelleme araçlarıdır. Olay güdümlü sistemlerde bilgi akışını sağlayan güçlü matematiksel ve grafiksel alt yapıya sahiptir [24].

Başlangıçta DEDS için geliştirilmiş olan PA'lar 1960'lı yıllardan itibaren kullanılan ve oldukça farklı alanda sıklıkla başvurulmuş bir modelleme aracıdır. Kökeni 1962 yılında batı Almanya'da bulunan Darmstadt Teknik Üniversitesi Matematik Fizik Fakültesi bünyesine araştırmacı Carl Adam Petri tarafından sunulan doktora tezine dayanan bu modelleme aracı geliştiricisinin adını almıştır [25]. Modelleme aracına adını veren çağdaş Alman matematikçi Carl Adam Petri, yürüttüğü iletişim çalışması kapsamında PA'yı matematiksel bir araç olarak tanıtmıştır. Bu matematiksel aracın uygulama hacmi yıllar boyu yapılan teorik araştırmalar sonucu etkileyici bir şekilde büyümüştür. O yıllardan itibaren

birçok farklı disiplindeki birçok farklı alanda araştırma konusu olan PA'nın literatürde senkron, asenkron, deterministik, stokastik, dağıtık, paralel gibi özellikler gösteren birçok farklı sistem için uygulaması mevcuttur. Geliştiricisi Carl Adam Petri, doktora tezindeki çalışmasında bir iletişim sisteminde meydana gelen olaylar arasındaki nedensel ilişkilere yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada ortaya konan teorik bilgiler ve kavramlar sonraki çalışmalarda geliştirilerek birçok farklı disiplinde kullanılan bir araç haline gelmiştir. Bu çalışmalara bakıldığında PA'nın uygulama alanının genişliği rahatça görülebilir. Genel itibariyle grafiksel olarak ifade edilmesi gereken, akış diyagramı benzeri yapılarda PA'lar kullanılabilir. Üretim sistemleri, kontrol sistemleri, veritabanı sistemleri, iletişim ağları ve hatta kimyasal / biyolojik yapılar dahi PA'lar aracılığıyla modellenilebilir [26]. Uygulama alanının genişliği, PA'ların tercih sebeplerinden birisidir. Örneğin akış diyagramları aracılığıyla gösterilen senkron veya paralel olaylar içeren sistemlerde başarılı sonuçlar verir.

Ortaya konulmasından itibaren hakkında birçok çalışma yapıp makaleler yayınlanmış ve bunun neticesinde teorik çalışmaların pratiğe dönüştürüldüğü birçok farklı sistem üzerinde uygulamalar geliştirilmiş olan bu modelleme araçları genellikle

- Ayrık Olay Sistemleri (DESS)
- Üretim Sistemleri
- Kontrol Sistemleri
- İletişim Sistemleri

gibi sistemlerin modellenmesi ve analizinde başarılı uygulamalara sahiptir [27].

PA, bir sisteme ait fiziksel öğeler ve bu sistemde meydana gelen olaylar arasındaki, yapısı itibariyle karmaşıklığa sahip ilişkilerin gösteriminde kullanılan ve yıllar geçtikçe de popüleritesinin arttığı gözlemlenen bir modelleme aracıdır. PA'lar, bilgisayar bilimi çalışmalarından ortaya çıkmış olmasına ve başlangıçta sıklıkla bilgisayar bilimciler tarafından kullanılmasına rağmen üretim sistemleri için tasarım ve modelleme aşamalarında zorlu sorunları ele alabilen araçlar olarak dikkat çekmektedirler. Üretim sistemlerinin modellenmesi ve analizi amacıyla kullanılması 1989 yılından itibaren artarak devam etmektedir [28].

Bu araçlar modellenecek sistemin davranışlarının görsel olarak ifade edilmesini sağlayan özellikleri bakımından grafiksel, bu davranışların doğrusal denklemler ile ifade edilmesini sağlayan özellikleri bakımından ise matematiksel araçlardır. Hem grafiksel hem de matematiksel özellikler taşıyan bu modelleme araçları niteliksel ve niceliksel analizlerin etkin bir şekilde yapılabilmesi amacıyla kullanılabilir.

Grafiksel özellikleri sistem davranışlarını kolaylıkla ve anlaşılabilir bir şekilde görsel olarak ifade ederken şemaları, diyagramları ve çizgeleri kullanır. Böylece sistemin statik davranışı, anlaşılması sağlanacak şekilde görsel hale getirilmiş olur. Elde edilen şematik gösterim yani grafiksel gösterim ile karmaşık sistemlerin gösterdiği tüm özellikler betimlenebilir. PA'lara özgü şematik yapı diğer görsel araçlardan farklı olarak sistemin işleyişini içeren işlem adımlarını ve öncelik ilişkilerini, gereken kaynaklar ve kaynakların durumlarının da anlaşılabilceği şekilde görselleştirir. PA'lara ait birçok karmaşık sistem özelliği yalnızca grafiksel haldeki bu gösterim ile basitçe ifade edilebilir. Matematiksel özellikleri sistem davranışlarını doğrusal denklemler ile ifade ederken, cebirsel ilişkiler kullanarak matematiksel modellerin geliştirilmesi sağlanabilir. Niteliksel analiz ile kilitlenmeler, kapasite aşmaları, paylaşılan kaynakların kullanımı vb. modelin doğruluğunu belirleyen özellikler irdelenirken, niceliksel analiz ile çıktı oranı, verimlilik vb. performans özellikleri irdelenir. Hem model geliştiriciler hem de uygulayıcılar tarafından grafiksel özelliklerinin açıklayıcılığı sayesinde iki grup arasında kuvvetli iletişim kurulmasını sağlaması bakımından sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir.

PA'ların tercih sebeplerinden bir diğeri de birbirinden farklı sistemlerin önemli özelliklerini taşımasıdır. Özellikle ayrık olaylı sistemlerin tasarımı, modellenmesi ve performans analizinde barındırdığı özellikler sayesinde oldukça büyük faydalar sağlar. Daha sonra ayrıntılı olarak açıklanacak olan özelliklerden “paralellik özelliği” birden fazla operasyonun eşzamanlı gerçekleştirilebilmesini, “asenكرون özelliği” birden fazla operasyonun eşzamanlı olmayan bir şekilde gerçekleştirilebilmesini, “çatışma özelliği” sistemdeki tezgahların/makinelerin çoklu operasyonlarının gerçekleştirilebilmesini sağlarlar.

PA başlangıçtaki kısıtlı uygulama alanının aksine uygulama avantajlarının ortaya konmasıyla bu alanı genişleterek geniş bir yelpazeye ulaşmıştır. Bir üretim sisteminde PA'lar kullanılarak modelleme ve performans analizi yapılmasının birtakım avantajları vardır. Bunlar [29]:

- Sistemdeki çatışmaların etkin bir şekilde ifade edilebilmesi
- Sistemde bulunan çıkmazların ortaya çıkarılabilmesi
- Stokastik, senkron, asenkron özellikler gösteren sistemlerde modelleme kolaylığı sunması
- Faaliyetler arası öncelik ilişkileri, kaynak paylaşımı gibi durumların grafiksel özelliği sayesinde görselleştirilebilmesi

- Amaca yönelik çeşitlendirilmiş çok çeşitli PA'ların olması
 - Karmaşık sistemlerin görselleştirilerek kolay anlaşılır bir hale getirilebilmesi
 - Performans analizi ve simülasyon için ayrı araçlara ihtiyaç duymadan tek bir platformda gerçekleştirilebilecek yazılım araçlarına sahip olması
 - Sistem hatalarının yapılan model aracılığıyla rahatlıkla görülebilmesi
 - Zaman entegrasyonu ile sistemlerin gerçek zamanlı kontrolüne izin vermesi
- olarak sayılabilir.

PA'lar diğer modelleme araçlarıyla kıyaslandığında;

- Niteliksel ve niceliksel analiz için gerekli matematiksel bir alt yapıya sahip olması
 - Sistemin mantıksal sıralamasını ve yapısal özellikleri yansıtabilecek grafiksel gösterime sahip olması
 - Anlaşılmayı ve anlatılmayı basitleştiren grafiksel tasarımı
 - Öncelik ilişkileri paylaşılan kaynaklar çatışmalar çıkmazlar gibi yapısal özellikleri kolaylıkla ele alabilmesi ve modele entegre edebilmesi
- özelliklerine sahip olmaları sebebiyle öne çıkan bir modelleme aracıdır.

3.2. Esnek Üretim Sistemlerinin Petri Ağları ile Modellenmesi

Üretim sistemlerinin modernleşmesiyle birlikte bu sistemler paralel ve dağıtılmış özellikler göstermeye başlamışlardır. Böyle sistemler hem modellenen sistemin doğruluğunu inceleyen niteliksel analiz yöntemlerine, hem de modellenen sistemin verimliliğini inceleyen niceliksel analiz yöntemlerine tabi tutulmalıdır. PA'lar modellenen sistemlerin niteliksel ve niceliksel analiz yöntemleri ile incelenmesine olanak sağlayan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır [30].

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte ortaya çıkan sistemler geleneksel diferansiyel denklemler kullanılarak tanımlanamayacak kadar büyük karmaşıklığa ulaşmıştır. Bu sistemlere bu çalışma kapsamında ele alınan EÜS'ler de örnek olarak verilebilir. Bu gibi sistemlerin davranışlarına, sistemlerdeki mevcut ayrık olayların işleyişi karar verir [31]. DES'lerin modellenmesi, performans analizi ve tasarımı aşamasında PA yaygın olarak kullanılan bir araçtır.

Kuyruk modelleri EÜS'lerin modellenmesi ve analizinde sıkça başvurulan yöntemlerdendir. Fakat uygulama aşamasında gerçek hayat problemine uygun olmayan bazı varsayımlar gerektirdiğinden ve bu yöntemlere daha çok performans analizi gerektiren

çalışmalarda başvurulduğundan alternatif olarak simülasyon modelleri karşımıza çıkar. PA ise hem performans özelliklerini sağlaması hem de ek olarak sistemleri görsel olarak ifade edebilmesi sebebiyle bu araçlar arasında öne çıkmaktadır. PA'nın bilgisayar destekli kendi yazılım araçlarına sahip olması modelleme ve simülasyon kolaylığı sağlar.

Hızla değişen müşteri talepleri üreticileri esnek ve çevik üretime etmiştir. Müşteri talep değişimlere uyum sağlama yeteneği esneklik ile ölçülürken, değişken taleplere göre sistemin şekillenme hızı ise çeviklik ile ilgilidir. Bu iki kavram bir araya gelerek üreticiler için pazarda yanıt verme hızını artırır. Yüksek esneklik ve çevikliği elde etmek bir üretim sisteminin tüm aşamalarının dahil edilerek entegre bir şekilde yapılması gereken zorlu bir süreçtir ve bu aşamalara sistemlerin tasarlanması ve modellenmesi de dahildir. Bilgisayar destekli araçlar yüksek esneklik ve yüksek çeviklik içeren sistemlerin en önemli öğeleridir. Bu tür araçlar içeren son teknoloji sistemler yüksek modelleme kabiliyeti gerektirirler. PA modelleme aracı özellikle esnek ve çevik üretim sistemleri başta olmak üzere DES'lerin modellenmesi ve analizi için tek tip bir ortam sağlayan ve uygun çözüm teknikleri içeren entegre araçlardır [32].

Genellikle karmaşık özellikler gösteren ve büyük ölçekli olan EÜS'lerde davranışlar iki grupta incelenir: olaylar ve faaliyetler. "Olay" sistem durumunda meydana gelen değişiklik olarak tanımlanır. "Faaliyet" ise sistemde bulunan makineler tarafından meydana getirilen operasyonlara verilen addır. Birden çok ve birbirinden farklı faaliyet kümelerinin sistemdeki durumları belirlediği söylenebilir. Sistemdeki durumlarda faaliyetler eşzamanlı olarak meydana gelebilir. Buna bir yanda farklı tezgahlarda parçalar işlenirken aynı anda taşıma sistemi tarafından işlenecek veya işlenmiş parçaların taşınması örnek olarak verilebilir. PA'nın eşzamanlı olayların modellenmesinde kolaylık sağlayan bir yapıya sahip olduğu söylenebilir [33].

Bir EÜS'nin en büyük avantajlarından ve de aynı zamanda en büyük modelleme ve performans analizi zorluklarından birisi paylaşılan kaynaklar içeriyor olmasıdır. Karmaşık sistemlerin modellenmesinde güçlü matematiksel ve grafiksel özellikleriyle öne çıkan PA, paylaşılan kaynaklar içeren EÜS'ler için de iyi bir modelleme alternatifidir.

Anlatıldığı üzere PA'lar karmaşık sistemlerde sahip olduğu güçlü analiz teknikleri ile sistemlere kolay modellenebilme imkânı sunar. Böylelikle karmaşık sistemler kolaylıkla ve detaylı bir şekilde irdelenebilir, performans değerlemesi yapılabilir, üzerinde düzeltmeler gerçekleştirilebilir. Modellenmek istenen sistemler karmaşıktıkça sistemin özelliklerini en iyi yansıtacak şekilde PA'lar çeşitlendirilir. Uygulama alanının da genişlemesiyle birlikte

klasik (sıradan-ordinary) PA'nın yeterli olmadığı bazı alanlar ortaya çıkmaya başlamıştır. Bununla birlikte PA zamanlı, stokastik, bulanık, renkli, hibrit gibi şekillerde çeşitlenerek eksiklikler giderilmiş ve böylece PA'nın modelleme ve analiz kabiliyetleri de artırılmıştır. Sıradan yani klasik PA, imalat sistemlerinin modellenmesi amacıyla kullanılan ilk PA'lardır. Literatürde karşımıza çıkan PA çeşitlerinden "modüler PA" (hierarchical Petri net- HPN) kullanımı ile karmaşık yapıdaki sistemlerin modellerinin yapılması ve sonrasında incelenmesinin kolaylığı sağlanmış olmuştur. Bir diğer PA çeşidi olan "renkli PA" (coloured Petri net-CPN) ise yine anlaşılabilirlik ve faaliyetlerin takip edilebilmesi kolaylığı sunar. Sıradan PA'nın daha karmaşık bir versiyonudur çünkü analizleri için daha karmaşık tekniklere ihtiyaç duyulur. Zaman entegre edilmiş "zamanlı PA" (timed Petri net-TPN) ise zamana dayalı faaliyetlerin modelde gösterilmesini sağlayarak gerçekçi modeller elde edilmesine imkân tanır [27][29].

3.3. Ayrık Olay Sistemleri

Gerçek hayat sistemlerinin modellenmesi amacıyla kullanılan PA'lar, koşullar (durumlar) ve olaylardan meydana gelir ve PA'ların bir başka ifade edilmiş biçimi de koşul/olay ağlarıdır.

Ayrık olay sistemlerinin (DESs) anlaşılabilmesi ve modellenmesi için bu sistemlere özgü durum ve olay kavramlarının bilinmesi gerekir. Durumlar, modellenen sisteme ait elemanların koşullarını (örneğin makine çalışıyor, makine bekliyor, makine boşta vb.) tanımlar. DES'lerde olaylar durumların değişimine yol açan etmenlerdir. Durum ve olay kavramları PA grafik yapısında konumlar (places) ve geçişler (transitions) ile temsil edilir. Yani yerler sistem elemanlarına ait bazı koşulları (makine çalışıyor, makine bekliyor, makine boşta vb.), grafikteki geçişler ise bu koşullar doğrultusunda olayın gerçekleşmesini (işin başlaması, işin tamamlanması vb.) ifade eder.

Bir olayın meydana gelmesi, o olaya ait geçişin gerçekleşmesi ile mümkündür. Geçişin gerçekleşmesi ise (geçişin ateşlenmesi denir ve Bölüm 3.8'de tanımlanacaktır) o geçişe ait bütün koşulların sağlanması ile oluşur. Gerekli tüm koşulların sağlanması halinde geçiş meydana gelir, yani bir olay oluşur.

Geçişlerin uygunluğu halinde olayın oluşmasıyla birlikte bir durumdan diğerine geçilmiş olur, durumlardaki bu değişiklikler işaretlemeleri de değiştirir.

Ayrık (kesik) olay sistemlerine ait önemli karakteristik özelliklerden biri durumlardaki değişikliğin yalnızca bir olayın meydana gelmesiyle mümkün olmasıdır. Yani sistemdeki bir

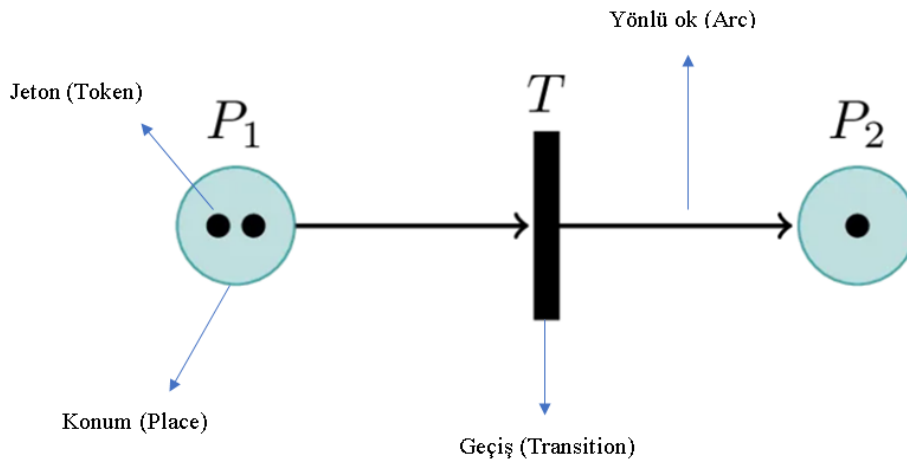
durumun değişmesinden yalnızca bir olay sorumlu olur. Buradan durum değişkenlerinin zamana göre sürekli bir değişim göstermediği, kesikli değerler aldığı, bir diğer ifadeyle “kesikli değişkenler” olduğu sonucuna varılabilir. Sistemin belirli bir anındaki durum değişkeninin aldığı değer, o anki duruma ait durum vektörünü tanımlar.

3.4. Petri Ağı Yapısının Öğeleri

PA yapısının öğelerini (bileşenlerini) “ağ yapısı” ve “işaretleme” olarak iki temel başlıkta inceleyebiliriz. Ağ yapısı PA'nın durağan yani statik öğesiyken, işaretleme ise PA'nın dinamik öğesidir.

3.4.1. Ağ yapısı

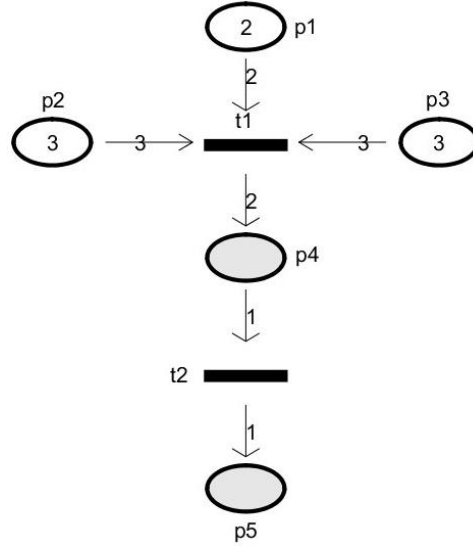
Statik öğe olarak tanımlanan ağ yapısı, PA'nın grafiksel gösterimine dayanır ve oldukça anlaşılır bir yapıya sahiptir. PA iki düğümden ve bu iki düğümü birbirine bağlayan yönlü “oklar” dan (arcs) oluşun, ağırlığı olan, belirli bir yöne sahip ve aynı zamanda iki parçalı bir grafik (çizge) olarak tanımlanır. Bu düğümler “konumlar” (places) ve “geçişler” (transitions) olarak adlandırılır. Konumlar içi boş daireler ile temsil edilir ve p ile sembolize edilirken, geçişler o geçişin anlık olup olmama durumuna bağlı olarak dikdörtgen çizgilerle (anlık geçişler) veya içi dolu çubuklarla (zaman alan geçişler) temsil edilip t ile sembolize edilirler. Klasik bir Petri ağı Şekil 3.1'deki gibi temsil edilir.



Şekil 3. 1. Petri ağ yapısı

Çizge yapısının iki parçalı olmasından dolayı türü aynı olan düğümler birbirine bağlanamaz. Yani konum-konum veya geçiş-geçiş bağlantısı yapılamaz. Bağlantılar yönlü

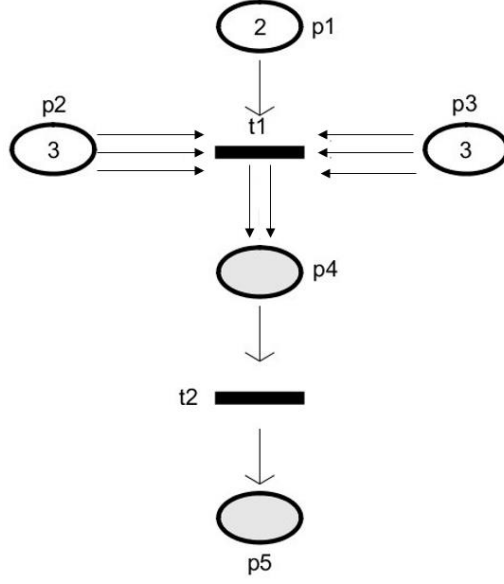
oklar (directed arcs) aracılığıyla farklı türdeki düğümler arasında gerçekleşir. Yönlü ok/oklar, bir konumdan başlayıp geçişte veya bir geçişten başlayıp konumda sonlanır. Yönlü oklar belirli ağırlıklara sahip olabilirler ve yönlü okun ağırlığı okun üzerinde gösterilir. Fakat genel bir anlayış eğer ağırlık 1 ise gösterilmemesidir. Buradan bir çizgedeki yönlü ok/okların üzerinde ağırlık yazmıyorsa o ağırlığın 1 olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 3. 2. Yönlü ok ağırlıklarının gösterimi

Şekil 3.2’de konumlar p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 olarak, geçişler ise t_1 ve t_2 olarak tanımlanmıştır. Örneğin (p_1, t_1) , p_1 konumundan t_1 geçişine yönlendirilmiş oku/okları temsil eder. Benzer şekilde (t_1, p_4) , t_1 geçişinden p_4 konumuna yönlendirilmiş oku/okları temsil eder.

(p_1, t_1) , (p_2, t_1) , (p_3, t_1) , (t_1, p_4) , (p_4, t_2) , (t_2, p_5) yönlü oklarının tanımlanmış ağırlıkları sırasıyla 2, 3, 3, 2, 1 ve 1’dir.



Şekil 3. 3. Yönlü ok ağırlıklarının gösterimi

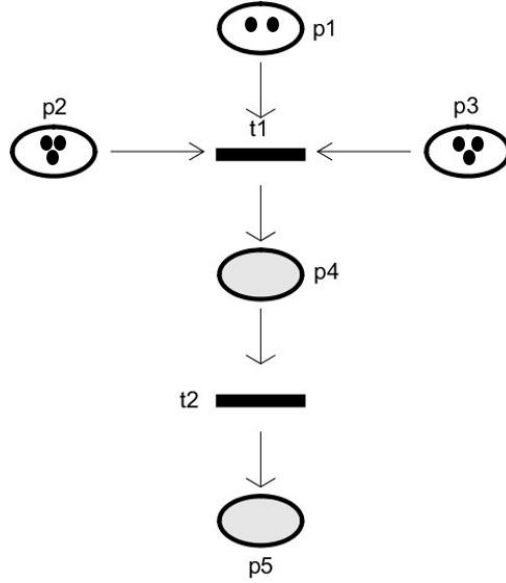
Ağırlıklar Şekil 3.2’de olduğu haliyle yönlü okların üzerine yazılarak gösterilebildiği gibi, Şekil 3.3’teki gibi ağırlık sayısı kadar ok çizilerek de gösterilebilir. Ancak bu gösterim pratik olmaması nedeniyle pek tercih edilmez.

3.4.2. İşaretleme

Dinamik öge olarak adlandırılan işaretleme, Petri ağında konumların içinde içi dolu siyah noktalar ile resmedilen “jeton” ların (token) hareketine dayanır. Petri ağının dinamikmi jetonların konumlar arasındaki hareketiyle sağlanır. Sistemdeki herhangi bir andaki ve herhangi bir konumdaki jetonun sayısı söz konusu konumun “işaretlemesi” (marking) olarak adlandırılır.

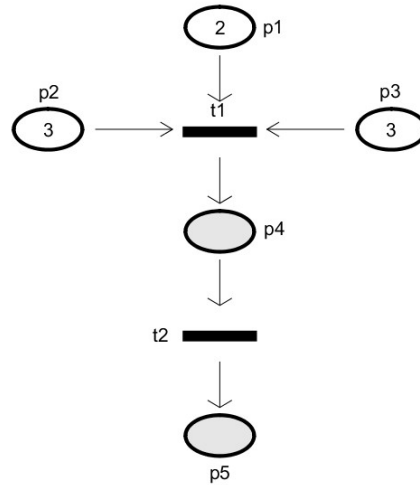
Bir p konumunda “ m ” adet jeton olması bu p konumunun “ m ” adet jetonla işaretlenmiş olduğu anlamını taşır. Buraya kadar bahsedilen sadece konumun işaretlemesidir. Tüm ağın işaretlemesi ise ağdaki bütün konumlarda bulunan jetonların sayısını gösterir ve bir vektör ile temsil edilir. Modellemenin en başında herhangi bir ateşleme gerçekleşmeden bütün konumlardaki jeton sayısını gösteren bu vektör “başlangıç işaretlemesi” (initial marking) olarak adlandırılır ve M_0 ile sembolize edilir. Bu şekilde bir ağa ise “işaretli Petri ağ” (marked Petri net) denir. Ağdaki herhangi bir p konumunun işaretlemesi sadece o konuma ait bilgi verir, bir diğer ifadeyle lokaldir. Fakat tüm ağın işaretlemesi bütün ağ yapısına ait bilgi verir, yani bir diğer ifadeyle globaldir.

n konum sayısı olmak üzere; $M_0 = [p_1, p_2, p_3 \dots p_n]$ “başlangıç işaretlemesi” olarak tanımlanır ve bir vektördür.



Şekil 3. 4. Jetonların konumlar içindeki noktalar ile temsili

Şekil 3.4’te gösterilen Petri ağıının başlangıç işaretlemesi $M_0 = [2, 3, 3, 0, 0]$ olarak belirlenir. Yani en başta p_1 konumunda 2 adet, p_2 konumunda 3 adet, p_3 konumunda 3 adet jeton mevcut iken p_4 ile p_5 konumlarında ise jeton yoktur.



Şekil 3. 5. Jetonların konumlar içindeki rakamlar ile temsili

Jetonlar Şekil 3.4'te olduğu gibi konumların içine yerleştirilmiş içi dolu siyah noktalarla gösterilebildiği gibi ayrıca Şekil 3.5'teki gibi konumların içine kaç adet jeton olduğunun yazılmasıyla da gösterilebilir ve oldukça pratik bir gösterim olduğundan daha çok tercih edilir.

İşaretlemenin değişmesi “geçişlerin ateşlenmesi” (firing) ile olur. Geçişlerin ateşlenmesi bazı kurallara bağlı olarak gerçekleşir ve ateşlenme konusu ilerde Bölüm 3.8'de anlatılmıştır. Bu kurala bağlı olarak gerçekleşen geçiş/geçişler neticesinde konumların içinde bulunan jetonlar hareket eder ve böylece konumlardaki jeton sayıları değişir. Ateşleme kuralı doğrultusunda geçişlerin ateşlenmesi sonucu jetonların konumlar arasındaki hareketi ile Petri ağı modellenen sistemin dinamik yapısını yansıtabilir.

3.5. Petri Ağları ile Modellenen Sistemlerin Genel Özellikleri

PA'lar yardımıyla modellenip analizleri yapılan sistemlerde, sistemlerin çeşitli özelliklerinden doğan bazı yapılarla karşılaşılır. PA'lar yardımıyla böyle zorlu karakteristik özellikler rahatlıkla modele yansıtılabilir. Çok sayıda ve çeşitte eleman içeren günümüz üretim sistemlerinde rastlanan ve modelleme aşamasını zorlaştıran paralellik (eş zamanlılık), senkronizasyon, sınırlı kaynak kullanımı gibi özelliklerin sistemler modellenirken dikkate alınması şarttır. DEDS'lere ait bu özellikler aşağıdaki gibi açıklanabilir:

3.5.1. Ardıllık / sıralı ilişki (sequential execution)

Olayların gerçekleşmesinde öncelik ilişkisinin olması durumudur. Bir olayın gerçekleşmesi bir başka olayın gerçekleşmesine bağlıysa ve o olay gerçekleştikten sonra meydana gelebiliyorsa bu olaylar arasında sıralı bir ilişkiden bahsedilir.

3.5.2. Paralellik/ eş zamanlılık (concurrency)

Aralarında sıralı ilişki olmayan, bağımsız bir şekilde meydana gelebilen eş zamanlı olayları tanımlayan durumdur. Bu tür bir yapıda olaylar birbirinden bağımsız ve eş zamanlı bir şekilde meydana gelir.

3.5.3. Çatışma (conflict)

Çatışma, kaynak paylaşımli sistemlerde ortaya çıkan bir durumdur. Çatışma durumunda aynı anda gerçekleşmesi mümkün olmayan olaylar arasından seçim yapılması söz konusu olur.

3.5.4. Senkronizasyon

Bir geçişin gerçekleşmesi durumunun en az 2 farklı konumda yeterli jetonun bulunmasına bağlı olmasıdır. Söz konusu geçişin gerçekleşebilmesi, o geçişin sahip olduğu tüm girdi konumlarında yeterli jetonun bulunmasıyla oluşabilir. Bir başka deyişle gerekli olan bütün koşulların sağlanması beklenir.

3.5.5. Sınırlı kaynaklar

Üretim sistemlerinde kullanılan kaynakların sınırlı sayıda olması, mevcut sistemin performansını etkileyen en önemli özelliklerdendir. Kaynaklar tükenirse sistem durur, iş akışı ilerlemez, başka bir ifadeyle sistem bloke olur.

Bu tarz sistemlerin modellenip analiz edilebilmesi için sistem modellemesinde kullanılan Petri ağ modelinin sınırlı kaynak özelliğine sahip olması gerekir. Modelde bulunan kaynaklar jeton sayısı, geçişler giriş çıkış sayısı ile sınırlı kapasiteli olarak tanımlanabilirler.

3.5.6. Karşılıklı dışlama (mutually exclusive)

Kaynak paylaşımli sistemlerde ortak kullanılan bir kaynak paralel şekilde çalıştırılabilir de bu kaynağa diğer konumlardan aynı anda erişilemiyorsa bu duruma “karşılıklı dışlama” denir. Kısaca kaynak paylaşımli sistemlerde, paylaşılan kaynağı kullanan faaliyetlerin aynı anda gerçekleşmemesi ancak bir tane faaliyet tamamlandıktan sonra diğerinin gerçekleşebilmesi durumudur.

3.5.7. Deterministik olmama

Faaliyetlerin gerçekleşmesi durumunun belirsizliği veya sistemdeki değişken parametrelerden dolayı sistemin deterministik olmaması durumu söz konusu olabilir. Şekil4’te açıklanan çatışma durumuna sahip PA’da taşıma robotunun Parça-1’i taşıması veya Parça-2’yi taşıması faaliyetlerinden herhangi biri gerçekleşebilir, hangisinin meydana

geleceği kesin değildir. Bu, faaliyetlerin gerçekleşmesi durumundaki belirsizliğe örnek olarak verilebilir. Bir diğer şekilde sistemde bulunan makinelerin işlem sürelerinin arıza vb. çeşitli sebeplerden dolayı değişiklik göstermesi parametre değişkenliğinden doğan deterministik olmama durumuna örnek olarak verilebilir.

3.6. Sistem Öğeleri ile Petri Ağ Yapısı Arasındaki İlişki

PA modelleme aracının statik karakteristik özelliği, bu araç ile modellenmesi yapılan sistemin statik özelliklerini başarıyla yansıtır. Genel bir anlayışa göre ağ yapısındaki

- Konum elemanı durum değişkenlerini
- Geçiş elemanı faaliyetleri (olayları)
- Yönlü oklar (konumlardan geçişlere doğru veya geçişlerden konumlara doğru)

durum değişkenleri ve olayların birbirleriyle arasında olan ilişkileri temsil eder.

PA yapısının iki parçalı bir çizgeden oluştuğu ve dolayısıyla aynı tür düğümlerin (konum-konum ya da geçiş-geçiş) birbirleriyle bağlanamayacağı göz önüne alındığında konum ve geçişlerin temsil ettiği kesikli olay sistemi elemanlarının da aynı türleri arasında bağlantı olmadığı görülür. Yani ayrık olay sistemlerinin doğası gereği durum değişkeni-durum değişkeni ya da faaliyet-faaliyet bağlantısı yapılamaz.

PA modelleme aracının dinamik karakteristik özelliği ise konumlarda bulunan jetonların hareketi ile sağlanır. Belirli bir konumda o an bulunan jeton/jetonlar söz konusu konuma karşılık gelen durum değişkeninin değerini verirken, ağın sahip olduğu tüm konumlardaki jetonlar (ağ işaretlemesi) ise tüm sistem için durum vektörünü verir. Geçişlerin ateşlenmesi ile değişen işaretlemeler sistem dinamiklerini yansıtır. Dolayısıyla faaliyetleri temsil eden geçişlerin ateşlenmesi o faaliyetin gerçekleştiği anlamına gelir. Ateşleme sonucu değişen işaretlemeler de tüm sistem için durum değişimini temsil eder. PA yapısı ile sistem öğeleri arasındaki ilişkiler Tablo 3.1’de gösterilmiştir [26][34].

Tablo 3. 1 Petri ağ yapısı ile sistem öğeleri arasındaki ilişkiler

Özellik	Petri Ağı	Yansıttığı Sistem Özelliği
STATİK	Konumlar	Durum Değişkenleri
	Geçişler	Olaylar
	Yönlü Oklar	Durum Değişkenleri ve Olaylar arasındaki ilişkiler
DİNAMİK	Konum İşaretlemesi	Durum Değişkeninin Değeri
	Ağ İşaretlemesi	Sistem Durumu
	Geçiş Ateşlenmesi	Olayların Gerçekleşmesi
	Ağ İşaretlemesi Değişimi	Sistem Durumu Değişimi

3.7. Petri Ağlarının Matematiksel Notasyonla Tanımlanması

Petri ağları içi boş dairelerle temsil edilen “konumlar” (places) ve dikdörtgen çizgiler veya çubuklarla temsil edilen “geçişler” (transitions) olmak üzere iki temel düğümden oluşan iki parçalı bir çizgedir. Konumlar “ p ” harfi ile geçişler ise “ t ” harfi ile sembolize edilirler. Farklı kaynaklarda konumların “yer” veya “durum”, geçişlerin ise “faaliyet” veya “olay” olarak da isimlendirildiği görülür. Konumlar sistemdeki makineleri, tezgâhları, teçhizatları, tampon alanlarını, taşıma robotlarını, konveyörleri, AGV’leri (Automatic Guided Vehicle / Otomatik Yönlendirmeli Araç) vb. temsil ederler. Geçişler ise ayrık olay sistemindeki faaliyetleri tanımlarlar. Böylece konumlar ve geçişler birlikte, modellenen sistemdeki olayların öncelik ilişkilerini tanımlayarak koşulları hakkında bilgi verir. t geçişinin oluşması ayrık olay sisteminde temsil ettiği faaliyetin meydana geldiğini gösterir. Faaliyeti başlatan ve bitiren durumlar birbirini izler ve bu durumlar arasında geçen süre sıfır ise söz konusu t geçişi anlık oluşan bir geçiştir. Bu durumun aksine durumlar arasında geçen süre sıfırdan farklı pozitif bir tam sayı olabilir yani söz konusu t geçişi belirli bir süreye sahip olabilir. Örneğin bir t geçişi bir arızanın giderilmesi faaliyetini temsil ediyorsa, faaliyeti başlatan durum arızanın giderilmesine başlanırken, faaliyeti bitiren durum arızanın giderilmesinin tamamlanmasıdır. Bu durumda t geçişinin sahip olduğu süre arızanın giderilmesi süresine eşittir.

Grafiksel gösterimde konumlar ve geçişleri birbirine bağlayan “yönlü oklar” (directed arcs) mevcuttur. Oklar yalnızca iki farklı düğümü birbirine bağlayabilir, aynı düğümler birbirleri arasında bağlantı kuramazlar. Yani yönlü oklar aracılığıyla kurulan bağlantılar konum-geçiş (konumdan geçişe doğru) veya geçiş-konum (geçisten konuma doğru) şeklindedir. Konum-konum veya geçiş-geçiş bağlantısı yapılamaz. Eğer yönlendirilmiş ok p konumundan t geçişine doğru ise o konum geçişin “girdi konumu” (öncelik konumu/öncülü) olarak adlandırılır ve konumlardan geçişlere doğru olan bu oklar $I(t)$ kümesiyle ya da (p_i, t_j) ile gösterilir. Tam tersi durumda yani yönlendirilmiş ok geçisten konuma doğru ise o konuma geçişin “çıkı konumu” (sonraki konumu) denir ve geçişlerden konumlara doğru olan bu oklar $O(t)$ kümesiyle veya (t_j, p_i) ile gösterilir. Bir konumdan geçişe veya geçisten konuma doğru olan yönlendirilmiş oklar 1 veya daha fazla sayıda olabilir. Okların sayılarına aynı zamanda “okun ağırlığı” denir ve sistemdeki oklara ait ağırlıklar W kümesi ile gösterilir. W kümesi pozitif tamsayılardan oluşur. Yani oklara atanan ağırlıklar ancak pozitif tamsayılar olabilir. Ok ağırlıklarının aynı zamanda söz konusu okun sayısını belirttiğini düşününce bu durum daha anlaşılabilir bir hal alır. Bazı kaynaklarda bir geçişin girdi konumlarının kümesinin $^*(t_j)$ çıkı konumlarının kümesinin ise $(t_j)^*$ ile gösterildiği görülebilir. Eğer bir t geçişinin $^*(t_j)$ girdi konumlarının kümesi boş ise yani bir eleman yoksa bu durumda o geçiş için “kaynak geçiş” (source transition) tanımlaması yapılır. Bir t geçişinin $(t_j)^*$ çıkı konumlarının kümesi boş ise bu durumda geçişe “batış geçiş” (sink transition) ifadesi kullanılır. Benzer şekilde yönlendirilmiş ok t geçişinden p konumuna doğru ise o geçiş p konumu için “girdi geçişi” ve yönlendirilmiş ok p konumundan t geçişine doğru ise o geçiş p konumu için “çıkı geçişi” olarak adlandırılır. $^*(p_i)$ gösterimi p_i konumuna ait girdi geçişleri için kullanılırken, $(p_i)^*$ gösterimi ise çıkı geçişlerini ifade etmede kullanılır.

Bir geçişin girdi konumunda bulunan konum/konumlar o geçişin meydana gelmesi (ateşlenmesi) için gerekli olan ön koşullardır. Girdi konumları (öncelik konumları) kaynağın kullanılabilirliği ve geçiş kullanımını hakkında bilgi verir. Modelde geçişin çıkı konumunda bulunan konum/konumlar o geçiş ile ilgili daha sonra ulaşılabilecek son koşullardır. Çıkı konumları (sonraki konumlar) kullanım sonrası durumlar hakkında bilgi verir.

Grafik yapısında konumların içinde yer alan ve içi dolu siyah noktalar ile temsil edilen “jetonlar” (tokens) vardır. Jetonlar konumlar arasında hareket edebilen dinamik bileşenlerdir. Bu özellikleri sayesinde modellenen sistemin dinamik özelliklerini simüle edebilirler. Bir konumun içinde bulunan jeton o konumun ifade ettiği kaynağın müsaitlik durumunu anlatır. Konumlar 1 veya daha fazla jeton içerebilir veya hiç jeton içermeyebilir. Bir konumda jeton bulunmaması o konumun temsil ettiği kaynağın kullanım için müsait olmadığı anlamına gelir. Jetonlar pozitif tam sayı değerlerine sahiptir ve işaretlendirme sonucu bir konuma atanan jeton/jetonlar ile o konuma pozitif bir tamsayı aktarılmış olur. Bir p konumuna atanan k adet jeton o konumun içinde k adet içi dolu siyah nokta ile veya k tamsayısının konumun içine yazılmasıyla belirtilir. Böylece p konumu k adet jeton ile işaretlenmiş olur. p konumunda bulunan k adet jeton p konumunun ifade ettiği kaynağın sayısını gösterir. Bir p konumunda jeton bulunması o konumun temsil ettiği şartın doğruluğunu anlatabilirken, jetonun olmaması ise şartın yanlışlığını ifade edebilir.

Bir t geçişinin gerçekleşebilmesi için gerekli tüm şartların sağlanmış olması gerekir. Ateşleme kuralı (firing rules) denen bu şartlar Bölüm 3.8’de anlatılmıştır. Gerekli tüm şartlar sağlandığında geçiş oluşur (ateşlenir), yani bir faaliyet meydana gelir. Oluşan her geçiş neden sonuç ilişkisine dayanır.

Bir Petri ağı $PA = (P, T, F, W, M_0)$ şeklinde 5 bileşenli matematiksel notasyonla ifade edilir. Burada;

1. $P = \{p_1, p_2, p_3 \dots p_n\}$ $n = \text{konum sayısı}$ ve $n > 0$ olmak üzere sonlu konumlar kümesini,
2. $T = \{t_1, t_2, t_3 \dots t_s\}$ $s = \text{geçiş sayısı}$ ve $s > 0$ olmak üzere sonlu geçişler kümesini,
3. $F \subset (P \times T) \cup (T \times P)$ yönlü oklar kümesini ve
4. $I : (P \times T) \rightarrow N$ konumlardan geçişlere yönlü oklar kümesini tanımlayan girdi fonksiyonunu,
5. $O : (T \times P) \rightarrow N$ geçişlerden konumlara yönlü oklar kümesini tanımlayan çıktı fonksiyonunu,
6. $W : F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ yönlü okların ağırlık fonksiyonunu,
7. $M_0 : P \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ başlangıç işaretlemesini temsil eder.

Burada $P \cup T \neq \emptyset$ ve $P \cap T \neq \emptyset$ 'dir. Yani konumlar kümesi ve geçişler kümesi boş küme olma özelliği taşıyamaz. Bu kümeler sonlu boyutludurlar ve ayrıklardır.

$I(p,t)$ girdi ($I = Input$) fonksiyonu, konumlardan geçişlere yönlendirilmiş okları tanımlar. $I(p,t) = k$, p konumundan t geçişine doğru k adet paralel yönlendirilmiş okun olduğunu ifade eder. Benzer şekilde $O(p,t)$ çıktı ($O = Output$) fonksiyonu, geçişlerden konumlara yönlendirilmiş okları tanımlar. $O(p,t) = m$, t geçişinden p konumuna doğru m adet paralel yönlendirilmiş okun olduğunu ifade eder. $I(p,t) > 1$ ise bu durumda $I(p,t)$ sayısı (örneğin k) p konumundan t geçişine doğru olan yönlü okların sayısına veya diğer bir ifadeyle okun ağırlığına eşittir. Benzer şekilde $O(p,t) > 1$ ise bu durumda $O(p,t)$ sayısı (örneğin m) t geçişinden p konumuna doğru olan yönlü okların sayısına yani okun ağırlığına eşittir. Eğer $I(p,t)$ değeri olan $k = 0$ veya $O(p,t)$ değeri olan $m = 0$ ise bu durum, o konumla geçiş arasında bağlantı olmadığı anlamını taşır.

F kümesi, sistemdeki tüm okları tanımlayan, I girdi fonksiyonu ile O çıktı fonksiyonunu kapsayan oklar kümesidir. Bu durumda alternatif olarak bir Petri ağı $PA = (P, T, I, O, M_0)$ olarak da ifade edilebilir. Burada;

1- $P = \{p_1, p_2, p_3 \dots p_n\}$ $n = konum\ sayısı$ ve $n > 0$ olmak üzere sonlu konumlar kümesini,

2- $T = \{t_1, t_2, t_3 \dots t_s\}$ $s = geçiş\ sayısı$ ve $s > 0$ olmak üzere sonlu geçişler kümesini,

3- $I : (P \times T) \rightarrow N$ veya $I_{s \times n} [I_{ij}]$ şeklinde yazılabilen girdi matrisi (input matrix) ,

4- $O : (T \times P) \rightarrow N$ veya $O_{s \times n} [O_{ij}]$ şeklinde yazılabilen çıktı matrisi (output matrix),

5- $M_0 : P \rightarrow \{0, 1, 2, 3 \dots\}$ başlangıç işaretlemesini ,

temsil eder.

$N = (P, T, I, O)$ dörtlü notasyonu ağ yapısını, M_0 ise başlangıç işaretlemesini temsil etmek üzere bir Petri ağı kısaca $PA = (N, M_0)$ olarak da ifade edilebilir. Başka bir deyişle eğer bir Petri ağının spesifik bir başlangıç noktası yoksa $N = (P, T, I, O)$ notasyonu ile gösterilebileceği söylenir. Başlangıç işaretlemesinin yer almadığı bu gösterim Petri ağının statik yapısını ifade eder.

n adet konum sayısı kadar satır, s adet geçiş sayısı kadar sütun içeren $[I_{ij}]$ girdi matrisi ve $[O_{ij}]$ çıktı matrisi Petri ağındaki tüm konumlar ve geçişler arasındaki ilişkiyi anlatır. Eşitlik (3.1)'de verilen $[I_{ij}]$ girdi matrisi (input matrix) konumlardan geçişlere doğru olan yönlü okların ağırlıklarından oluşan matristir. Matrisin I_{ij} 'nci elemanı p_i konumundan t_j geçişine doğru olan ok sayısını, yani ağırlığını verir.

$$[I]_{n \times s} = \begin{pmatrix} I_{11} & \dots & I_{1s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{n1} & \dots & I_{ns} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Eşitlik (3.2)'de verilen $[O_{ij}]$ çıktı matrisi (output matrix) geçişlerden konumlara doğru olan yönlü okların ağırlıklarından oluşan matristir. Matrisin O_{ij} 'nci elemanı t_j geçişinden p_i konumuna doğru olan ok sayısını, yani ağırlığını verir.

$$[O]_{n \times s} = \begin{pmatrix} O_{11} & \dots & O_{1s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ O_{n1} & \dots & O_{ns} \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Eğer bir p konumu ile t geçişi arası bağlantı yoksa matrislerde bu konum ve geçişi ifade eden elemanın değeri sıfır olur. Eğer $[I_{ij}]$ girdi matrisi ve $[O_{ij}]$ çıktı matrisini oluşturan elemanların hepsi 0-1 değerlerinden oluşuyorsa bu matrislere sahip ağa “doğal Petri ağı” (ordinary Petri net) denir. Ancak matris elemanları 1 ve daha büyük değerler içeriyorsa bu durumda ağ “genel Petri ağı” (generalized Petri net) veya sadece “Petri ağı” (PA) (Petri net-PN) olarak adlandırılır ve kısaca PA ile sembolize edilir.

EK 1'de verilen PA için şimdiye kadar açıklanan tüm notasyonlar ile bir analiz yapılmıştır.

3.8. Geçişlerin Ateşlenmesi

Sistemdeki durumlarda meydana gelen değişimler, sistem davranışını ifade eder. Durum değişimleri jetonların hareketiyle sağlanır. Jetonların konumlar arasındaki hareketi, Petri ağları ile modellenen sistemlerin dinamik özelliklerini simüle edebilir.

Tüm ağdaki konumlarda var olan jetonların dağılımı “işaretleme” olarak adlandırılır. Başlangıç işaretleme M_0 ile sembolize edilir. Ve M_0 başlangıçta konumlarda var olan jetonlar hakkında bilgi verir. Eğer Petri ağındaki bir p konumunda en az 1 adet jeton varsa p konumu “işaretleli” dir. Tam tersi durumda yani p konumunda hiç jeton yoksa bu durumda p konumuna “işaretsiz” denir. Bir konumda var olan jeton/jetonların sayısı, o konuma dair durum hakkında bilgi verirken, tüm ağın içerdiği konumlarda bulunan jetonların sayısı ise sistemin genel durumuna dair bilgi verir.

Bir PA'nın herhangi bir andaki işaretleme vektörü M_k ile gösterilsin. Bu durumda $M(p_i)$, p_i konumunda bulunan jeton sayısını tanımlar. Bu Petri ağında bulunan n adet konum için, Petri ağının herhangi bir andaki durumu Eşitlik (3.3)'te verilen

$$M_k = [M(P_1), M(P_2), M(P_3), \dots, M(P_n)] \quad (3.3)$$

vektörü ile gösterilir.

Modellenen sistemin dinamik özellikleri konumlarda bulunan bu jetonların konumlar arası hareketiyle simüle edilir. Bazı kaynaklarda “jeton oyunu” da denen bu akış “geçişlerin ateşlenmesi (tetiklenmesi)” (firing) ile sağlanır. “Geçiş ateşleme kuralı” na göre ateşlenen geçişler sonucu konumlarda bulunan jetonların hareket etmesiyle ağdaki jetonların dağılımı değişir. Çünkü ateşleme sonucu jetonlar giriş konumundan çıkış konumuna doğru yer değiştirir.

Ateşlemenin gerçekleşebilmesi için o geçişin “aktifleşmiş geçiş” (enabled transition) olması gerekir. Bu durum “geçerlilik” (enabling) koşuluna bağlıdır ve bu koşul “Geçerlilik Kuralı” ile açıklanır.

Ateşlemenin gerçekleşerek geçişin oluşabilmesi için gerekli ön şart olan “Geçerlilik Kuralı” na göre ;

1. Petri ağındaki herhangi bir geçiş $t_j \in T$ 'nin aktif geçiş olması için $M_k(p_i) \geq W(p_i, t_j)$, $\forall p \in P \quad \forall t \in T$ koşulu sağlanmalıdır.

2. Burada $M_k(p_i)$ Petri ağının k anında i . konumunun işaretleme (p_i) konumunda bulunan jeton sayısını), $W(p_i, t_j)$ ise p_i girdi konumu ile t_j geçişini birbirine bağlayan okun ağırlığını ifade eder.

3. Matematiksel notasyonu açıklamak gerekirse, Petri ağındaki herhangi bir M_k işaretlemesi için, ağıdaki herhangi bir t_j geçişinin tüm girdi konumu/konumlarında en az o t_j geçişi ile girdi konumu/konumlarını birbirine bağlayan okun ağırlığı kadar jeton varsa t_j geçişi aktiftir (enable) . Yani geçerlilik kuralı sağlanmış olur.

4. Aktif geçişin ateşlenip ateşlenmemesi, o geçişin temsil ettiği faaliyetin gerçekleşip gerçekleşmemesiyle ilgidir.



Şekil 3. 6. Pasif ve aktif geçiş örneği

Şekil 3.6-a'da $M(p_1) = 1 < W(p_1, t_1)$ olduğu için t_1 geçişi aktif değildir ve ateşlenemez. Şekil 3.6-b'de ise $M(p_1) = 2 = W(p_1, t_1)$ olduğu için t_1 geçişi aktif haldedir ve ateşlenebilir.

Petri ağında bir durumdan başka bir duruma geçebilmek jetonların hareketi ile mümkündür. Jetonların girdi-çıkı konumları arasındaki hareketi ile aktif haldeki geçişlerin ateşlenmesi (firing) sağlanır. Geçerlilik kuralının yerine gelmesinin ardından bir geçişin ateşlenmesi “Geçiş Ateşleme Kuralı” na göre gerçekleşir. Buna göre;

1. Aktif (geçerli) hale gelen t_j geçişinin meydana gelmesi ateşleme (firing) olarak adlandırılır.

2. t_j geçişinin ateşlenmesiyle t_j geçişine ait bütün girdi konumlarından $W(p_i, t_j)$ kadar jeton silinirken, t_j geçişine ait bütün çıktı konumlarına $W(p_i, t_j)$ kadar jeton eklenir.

3. Burada $W(p_i, t_j)$ p_i girdi konumuyla t_j geçişini birbirine bağlayan okun ağırlığını, $W(t_j, p_i)$ ise t_j geçişiyle p_i çıktı konumunu birbirine bağlayan okun ağırlığını ifade eder.

4. p_i girdi konumunu ifade etmek üzere;

$$M'(P_i) = M(P_i) - W(P_i, t_j) \quad (3.4)$$

olarak tanımlanır. Burada $M'(p_i)$, p_i girdi konumunun t_j geçişi ateşlendikten sonraki yeni jeton sayısıdır. Matematiksel notasyonu açıklamak gerekirse aktif haldeki bir t_j geçişinin ateşlenmesinin ardından girdi konumu olan p_i 'nin jeton sayısı, p_i girdi konumu ile t_j geçişini bağlayan okun ağırlığı kadar azalır.

5. p_i çıktı konumunu ifade etmek üzere;

$$M'(P_i) = M(P_i) + W(t_j, P_i) \quad (3.5)$$

olarak tanımlanır. Burada $M'(p_i)$, p_i çıktı konumunun t_j geçişi ateşlendikten sonraki yeni jeton sayısıdır. Matematiksel notasyonu açıklamak gerekirse aktif haldeki bir t_j geçişinin ateşlenmesinin ardından çıktı konumu olan p_i 'nin jeton sayısı, t_j geçişi ile p_i çıktı konumunu bağlayan okun ağırlığı kadar artar.

6. Eğer bir p_i konumu t_j geçişinin hem girdi hem de çıktı konumuysa, p_i konumundan $W(p_i, t_j)$ kadar jeton eksilirken, aynı konuma $W(t_j, p_i)$ kadar jeton eklenir.

7. t_j geçişinin ateşlenmesinin ardından mevcut M_k işaretlemesi değişerek, sonraki M_{k+1} işaretlemesine ulaşılır.

3.9. Petri Ağlarının Özellikleri

Petri ağları, modellenen sistemlerin özelliklerinin belirlenmesinde yardımcı birçok ağ özelliğine sahiptir. Petri ağı yardımıyla analiz edilebilen bu özellikler 2 grupta incelenir : Petri ağlarının başlangıç işaretlemesine ve başlangıç durumuna dayanan özellikleri “davranışsal özellikler” (behavioral properties) olarak adlandırılırken; Petri ağlarının yapısına, niteliksel ve biçimsel özelliklerine dayanan özellikleri is “yapısal özellikler” (structural properties) olarak adlandırılır. Bu özellikler ulaşılabilirlik (reachability), canlılık

(liveness), geri dönebilirlik (reversibility), korunumluluk (conservativeness) ve sınırlandırılmışlık (boundedness) olarak 5 başlıkta incelenebilir.

3.9.1. Ulaşılabilirlik

Ulaşılabilirlik (reachability) özelliği Petri ağının başlangıç işaretlemesine dayanan davranışsal özellikleri arasında yer alır. Ulaşılabilirlik özelliği Bölüm 3.10.1’de detaylıca açıklanan bir PA analiz yöntemi olan Ulaşılabilirlik Analizi’ nin temelini oluşturur.

Bir Petri ağı $PA = (P, T, F, W, M_0)$ olarak tanımlansın.

M_0 , PA’nın başlangıç işaretlemesidir ve bir dizi geçişin ateşlenmesi neticesinde M_k işaretlemesi oluşur. M_k işaretlemesine gelene kadar gerçekleşen geçişler $\sigma = (t_1, t_2, t_3, \dots, t_k)$ ile gösterilir. Böylece yeni oluşan M_k işaretlemesine σ dizisiyle M_0 ’dan ulaşılabilir denir. Bu durum $M_0[\sigma > M_k]$ ile gösterilir [35].

M_0 başlangıç işaretlemesinden ulaşılabilir durumda olan tüm işaretlemelerin oluşturduğu küme “ulaşılabilirlik kümesi” dir. Ulaşılabilirlik kümesi $R(M_0)$ ile sembolize edilir [25].

Yeni oluşan M_k işaretlemesiyle geçerli hale gelen geçişlerin ateşlenmesi sonucu M_{k+1} işaretlemesi oluşuyorsa bu durumda ise M_{k+1} işaretlemesi M_k işaretlemesinden “derhal ulaşılabilir” dir.

Modellenen üretim sistemlerinin analizinde cevap aranan “Sistem belirli bir duruma ulaştı mı?” veya “Belirli bir davranış gösterdi mi?” gibi önemli sorular vardır. Ulaşılabilirlik özelliği sayesinde Petri ağı ile modellemesi yapılan bu sistemlerin spesifik bir M' işaretlemesinde olması durumuna cevap verilebilir [36].

3.9.2. Kapsanabilirlik

Ulaşılabilirlik özelliğinin daha genel bir hali olarak düşünülebilecek olan “kapsanabilirlik” (coverability) özelliği, ulaşılabilir işaretlemeler kavramı için daha genel bir tanım sunar. Bir PA’da var olan herhangi bir $t \in T$ geçişinin daha sonraki işaretlemelerde geçişe uygunluk durumunu gösterir.

2.3.4 numaralı “Geçişlerin Ateşlenmesi” başlıklı bölümde yapılan tanıma göre ağıdaki bir $t \in T$ geçişinin aktif hale gelebilmesi için, t geçişine ait tüm girdi konumlarında en az

girdi konumu/konumları ile t geçişini birbirine bağlayan okun ağırlığı kadar jeton bulunması gerekir. Böylece aktif hale gelen t geçişi ateşlenebilir.

M_0 başlangıç işaretlemesi, M_k ise herhangi bir işaretleme olmak üzere;

$$M_k = [M_k(p_1), M_k(p_2), M_k(p_3), \dots, M_k(p_n)] \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad n = \text{konum sayısı}$$

işaretlemede bulunan herhangi bir $t_j \in T$ geçişi ateşlenebilir durumdaysa;

• $i = 1, 2, 3, \dots, n \quad \forall i$ için M_0 başlangıç işaretlemedesinden $M(p_i) \geq M_k(p_i)$ şeklinde bir M işaretlemesine erişilebiliyorsa, M işaretlemesi M_k işaretlemesini kapsıyor denir.

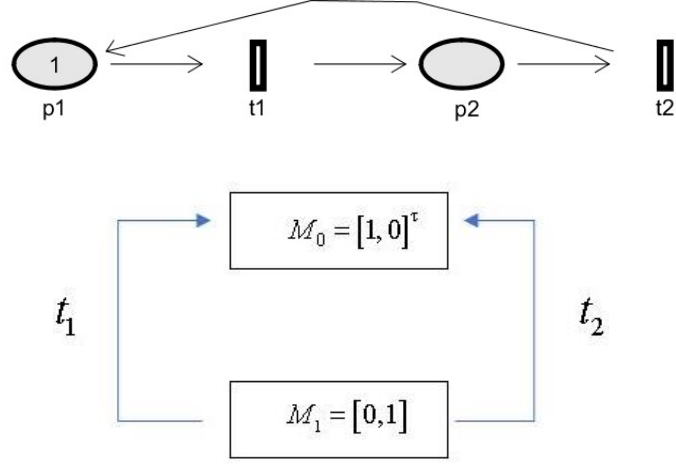
Yani M_k işaretlemesi “kapsanabilir” (coverable) dir.

• M_0 başlangıç işaretlemede bir $t_j \in T$ geçişi için, t_j geçişinin giriş konumundaki her p_i konumunda yeterli jeton varsa ve t_j geçişi gerçekleşebilirse p_i konumuna “kapsanabilir” denir.

3.9.3. Canlılık

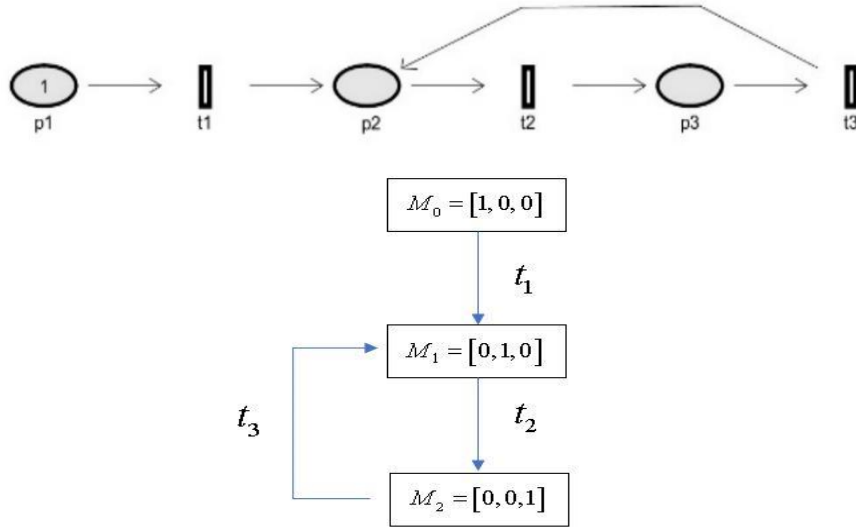
Canlılık özelliği (liveness) birçok sistemde aranan bir özelliktir. Bu özellik ile ilgili olarak Petri ağları “Canlı” (live), “Yarı-canlı” (quasi-live) ve “Kilitlenme bulunmayan” (deadlock-free) Petri ağları olarak sınıflandırılabilir [26] [37].

M_0 başlangıç işaretlemesini temsil etmek üzere; başlangıç işaretlemesinden ulaşılabilir tüm işaretlemelemlerin oluşturduğu küme $R(M_0)$ ’dır ve M_k işaretlemesi bu kümenin bir elemanıdır ($M_k \in R(M_0)$). Bu M_k işaretlemede bir geçiş sıralamasının oluşumu veya o geçiş sıralamasının ateşlenmesi eğer $t_j \in T$ geçişini geçerli yapıyorsa t_j geçişinin “canlı” (live) olduğu söylenebilir. Benzer şekilde $M_k \in R(M_0)$ işaretlemede şayet geçiş oluşum sırası t_j geçişini içeriyorsa, t_j geçişi “canlıdır” denir. Bir “Petri ağının canlılığı”, o PA’yı oluşturan tüm geçişlerin canlı olmasıyla mümkündür. Tüm ağın “yapısal canlılığı” (structurally liveness) ise ağı canlı yapan bir sonlu başlangıç işaretlemesi M_0 ile mümkündür.



Şekil 3. 7. Canlı Petri ağı örneği

Eğer bir t_j geçişinin ateşlenme ihtimali varsa o geçişin “yarı canlı” (quasi-live) olduğu söylenir.



Şekil 3. 8. Yarı-canlı Petri ağı örneği

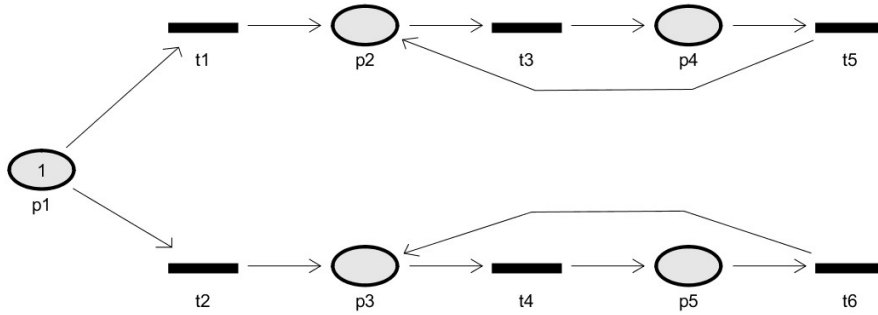
Eğer bir t_j geçişi herhangi bir geçiş sıralaması ile geçerli olamıyorsa, t_j geçişi “ölüdür” (dead). Bir PA’da hiçbir geçişin geçerli hale gelemediği bir M' işaretlemesi varsa o Petri ağının “çıkılmaz/kilitlenme” (deadlock) içerdiğinden söz edilir. Yani eğer ulaşılan durumdan sonraki başka bir duruma geçilemiyorsa çıkılmaz meydana gelmiştir. Bir çıkılmaz durumunda bir veya daha fazla geçişin gerçekleşmemesi söz konusudur. Bir PA’nın çıkılmaz

(kilitlenme) içermeyen bir ağ olarak tanımlanabilmesi için M_0 başlangıç işaretlemesinden ulaşılan hiçbir işaretlemede çıkmaz meydana gelmiyor olması gerekir.

Eğer üretim sistemlerinde bir ölü nokta yoksa o halde sistem “canlıdır”. Başka bir ifadeyle M_0 başlangıç işaretlemesinden ulaşılabilir tüm işaretlemelelerdeki tüm geçişlerin gerçekleşmesi o PA’da canlılık olduğu anlamına gelir. Canlılık özelliği çıkmaz olmamasını sağlar [25].

PA modelinde en az bir geçişin canlı olması o PA modelinin çıkmaza girmeyeceği anlamını taşıırken bunun tersi geçerli değildir. Yani PA modelinde çıkmazların olmaması PA modelinin canlı olmasını garanti etmez.

Çıkmazlar herhangi bir t geçişinin ateşlenemediği işaretlemeleerdir. Dolayısıyla M_0 başlangıç işaretlemesinden itibaren erişilebilen hiçbir işaretleme çıkmaz değilse o PA için çıkmaz içermediği söylenebilir. Başka bir deyişle eğer bir PA canlı ise $R(M_0)$ kümesine ait herhangi bir M işaretlemesindeki herhangi bir $t \in T$ geçişinin ateşlenmesi mümkündür. Böylelikle sistemde çıkmaz olmaması o sisteme ait PA’nın canlı olmasıyla sağlanır. Yani canlılık ve çıkmaz terimleri birbirleriyle ilişkilidir. Çünkü canlı bir ağ çıkmaz yaşanmamasını garantiler. Yani canlılık özelliği taşıyan herhangi bir ağ aynı zamanda çıkmaz yaşanmayan bir ağdır. Fakat yarı canlılık ve çıkmaz terimleri birbirleriyle ilişkili değildir. Yarı canlı bir ağda çıkmaz yaşanabilir [37].



Şekil 3. 9. Kilitlenme içermeyen bir Petri ağı

Sistemlerde bulunan kaynakların yanlış atanması veya bu kaynakların aşırı kullanımı çıkmaza neden olur. İdeal üretim sistemlerinde canlılık özelliğinin var olması aranır. Fakat üretim sistemleri büyüyüp karmaşıklaştıkça canlılık özelliğini sorgulamak zorlaşır. Bu sebeple canlılık özelliğinin analizi seviyelere ayrılmıştır.

- L_0 Canlılık Seviyesi : Bir PA'da var olan bir $t \in T$ geçişi hiçbir zaman geçerli hale gelemiyor ve ateşlenemiyorsa t geçişi ölü geçiştir ve bu durumda t geçişinin " L_0 Canlı" olduğu söylenir.

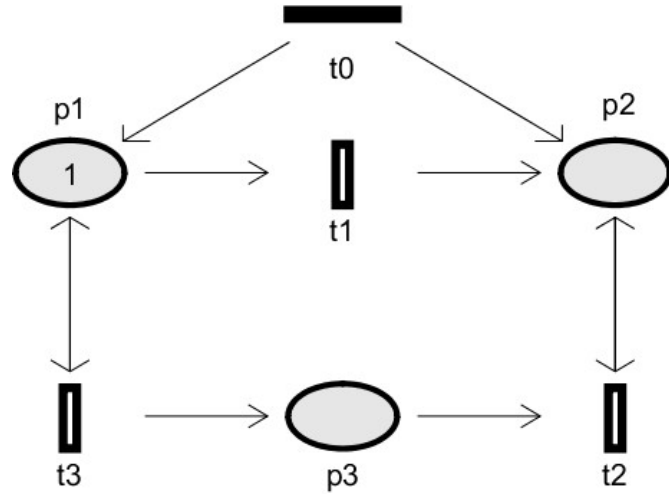
- L_1 Canlılık Seviyesi : Bir PA'da var olan bir $t \in T$ geçişi tüm ağ boyunca en az 1 kez geçerli hale gelebiliyor ve ateşleniyorsa bu durumda t geçişinin " L_1 Canlı" olduğu söylenir.

- L_2 Canlılık Seviyesi : θ pozitif bir tamsayı olmak üzere, bir PA'da var olan bir $t \in T$ geçişinin en az θ kadar gerçekleşmesi durumunda t geçişinin " L_2 Canlı" olduğu söylenir.

- L_3 Canlılık Seviyesi : Bir PA'da var olan bir $t \in T$ geçişinin herhangi bir ateşleme sırasıyla sonsuz kez gerçekleşmesi durumunda t geçişinin " L_3 Canlı" olduğu söylenir.

- L_4 Canlılık Seviyesi : Bir PA'da var olan bir $t \in T$ geçişi ulaşılabilen tüm işaretlemelerde L_1 seviyede canlılık gösteriyorsa o halde t geçişinin " L_4 Canlı" olduğu söylenir.

Şekil 3.10'da verilen PA grafiğinin canlılık özelliği analizi seviyeler bazında yapılmıştır.



Şekil 3. 10. Canlılık özelliği incelenen Petri Ağ örneği

Tablo 3. 2. Petri ağ grafiğine ait canlılık seviyeleri

Geçişler	Açıklama	Canlılık Seviyesi
t_0	Ölü geçiştir, hiçbir zaman geçerli hale gelemez ve ateşlenemez.	L_0
t_1	Tüm ağ boyunca yalnızca 1 kez geçerli hale gelebilir ve ateşlenebilir.	L_1
t_2	Tüm ağ boyunca 1'den çok kez geçerli hale gelebilir ve ateşlenebilir.	L_2
t_3	Tüm ağ boyunca sonsuz kez geçerli hale gelir.	L_3

Üretim sistemlerinde canlılık özelliği aranan ve önemli bir özelliktir. Çünkü çıkmaz durumu meydana gelerek sistemler kapanabilir ve üretim kapasitesi düşebilir. Canlılık özelliğiyle sistemlerin kapanmaması, üretim kapasitesinin düşmemesi ya da kesilmemesi sağlanır.

3.9.4. Geri dönebilirlik

Geri dönebilirlik (reversibility) özelliği PA'nın başlangıç işaretlemesine dayalı bir özelliğidir.

$\forall M \in R(M_0)$ ve $M_0 \in R(M)$ ise $PA = (P, T, F, W, M_0)$ ile tanımlanan PA “geri dönebilir” dir (reversible). Matematiksel notasyon ile anlatılmak istenen M işaretlemesi M_0 'dan ulaşılabilir bir işaretleme iken, M işaretlemesinden tekrar M_0 başlangıç işaretlemesine ulaşabiliyorsa $PA = (P, T, F, W, M_0)$ ile tanımlanan PA'ya geri dönebilir denir. Yani daha basit bir ifadeyle $R(M_0)$ kümesine ait her bir M işaretlemesi, M_0 başlangıç işaretlemesinden ulaşılabilir bir işaretleme ise ve M işaretlemesinden M_0 başlangıç işaretlemesine tekrar dönülebiliyorsa bu durumda bu Petri ağı geri dönebilirlik özelliğine sahiptir. Bazı durumlarda başlangıç işaretlemesi M_0 haricinde spesifik başka bir M' işaretlemesine (home state) geri dönebilmek önem arz eder. Böyle bir durumda tanım, söz konusu özel duruma geri dönebilmeyi içerecek şekilde genişletilebilir. Bu özel durum için yeni tanım “ $R(M_0)$ kümesine ait her bir M işaretlemesi için, M işaretlemesinden

spesifik M' işaretlemesine dönülebiliyorsa bu durumda Petri ağına geri dönebilir denir.” Şeklinde olacaktır [26].

Üretim sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan hata düzeltme (error recovery) durumu için başlangıç işaretlemesine yani hatalı durumdan doğru duruma dönebilmek önem arz eder. Üretim sistemlerindeki makine ve takım arızaları, konveyörün durması, yanlış parça üretimi, talebin değişmesi, işlenecek parça eksikliği gibi bazı rassal durumlarda sistemin yeniden başlayarak başlangıç durumuna gelebilmesi geri dönebilirlik özelliği ile sağlanır.

Geri dönebilirlik aynı zamanda sistemdeki döngüsel davranışı da garantiler. Sistemde bir çıkmaz (kilitlenme) durumu varsa o sistem geri dönebilirlik içeremez [6][25].

3.9.5. Korunumluluk

Korunumluluk (conservativeness) özelliği yapısal bir özelliktir, çünkü başlangıç işaretlemesine dayanmaz.

Bir PA Eşitlik (3.6)'daki gibi tanımlansın.

$$PA = (P, T, F, W, M_0), W = (W_1, W_2, W_3, \dots, W_n); W_i > 0, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.6)$$

Ayrıca M_0 başlangıç işaretlemesinden ulaşılabilir tüm işaretlemelerin oluşturduğu $R(M_0)$ kümesi verilsin.

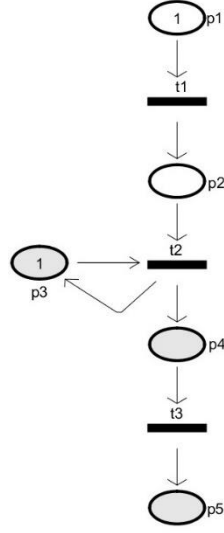
1. Eğer $W^t M = W^t M_0, \forall M \in R$ ise $PA = (P, T, F, W, M_0)$ ağı, W vektörüne göre “korunumludur” denir.

2. Eğer $W^t M = W^t M_0, \forall M \in R$ ve $W \neq 0$ ise $PA = (P, T, F, W, M_0)$ ağı, W vektörüne göre “kısmen korunumludur” (partially conservative) denir.

3. Eğer $PA = (P, T, F, W, M_0)$ ağı, $W = (1, 1, 1, \dots, 1)^t, \forall i = 1$ vektörüne göre korunumlu ise veya $\sum_{i=1}^n M(P_i), \forall M \in R$ ise PA “katı korunumludur” denir.

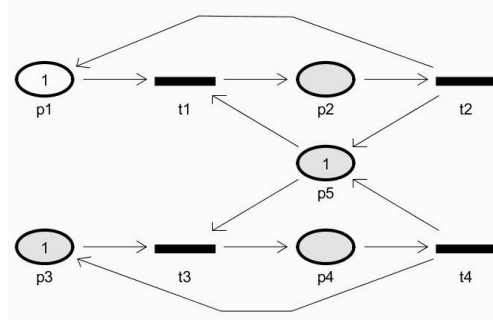
PA aracılığıyla modellenen sistemdeki var olan kaynaklar konumların içine yerleştirilmiş jetonlarla da temsil edilebilirler. Bu durumda var olan kaynak sayısı değişmeyeceğinden modeldeki jeton sayısı da değişmeyecektir. Bu sebeple korunumluluk özelliği büyük önem taşır. Korunumluluk özelliği, modellenen sistemdeki geçişlere ait girdi oklarının sayısının çıktı oklarının sayısına eşit olması durumunu ifade eder. Bu, korunumluluk tarafından sağlanan ağ yapısı özelliklerindedir.

Korunumluluk özelliği ile mevcut her işaretleme için konumlara yerleştirilmiş jetonların ağırlıklı toplamlarının aynı kaldığı belirtilir. Özetlemek gerekirse bir PA'da M_0 başlangıç işaretlemesi anında bulunan toplam jeton sayısının M_0 başlangıç işaretlemesinden sonra ulaşılabilen herhangi bir işaretleme anında değişmemesi durumunun korunumluluk özelliği ile açıklandığı söylenebilir.



Şekil 3. 11. Tutarlı Petri ağı örneği

Verilen PA modelinde $\forall t \in T$ olan her bir geçişe ait girdi okları sayısı çıktı okları sayısına eşittir. Böylelikle konumlardaki jeton sayıları toplamı her durum için aynı kaldığından bu PA'nın korunumlu olduğu söylenebilir.



Şekil 3. 12. Tutarsız Petri ağı örneği

Verilen PA modelinde $\forall t \in T$ için girdi ve çıktı okları sayısı birbirine eşit olmadığından bu PA'nın korunumlu olmadığı söylenebilir. Çünkü;

- t_1 geçişi için girdi okları sayısı 2 iken çıktı oku 1 tanedir.
- t_2 geçişi için çıktı okları sayısı 2 iken girdi oku 1 tanedir.
- t_3 geçişi için girdi okları sayısı 2 iken çıktı oku 1 tanedir.
- t_4 geçişi için çıktı okları sayısı 2 iken girdi oku 1 tanedir.

3.9.6. Tutarlılık

$PA = (P, T, F, W, M_0)$ olmak üzere bir PA'da, M_0 başlangıç işaretlemesinden ulaşılabilir tüm işaretlemelerin oluşturduğu $R(M_0)$ kümesine dahil olan bazı işaretlemeler döngüsellik gösterir. $M_k \in R(M_0)$ olmak üzere M_k işaretlemesi M_0 başlangıç işaretlemesinden ulaşılabilir bir işaretleme iken, M_k işaretlemesinden M_0 başlangıç işaretlemesine tekrar dönülebilmesi durumunda Petri ağının “tutarlı” (consistent) olduğu söylenir. Bu özellik geri dönebilirlik özelliği ile karıştırılmamalıdır. Geri dönebilirlik özelliğinde $R(M_0)$ kümesine ait bütün işaretlemelerde döngüsellik vardır. Tutarlılık özelliği, tekrarlanabilirlik özelliğinin özel bir durumudur [38].

3.9.7. Sınırlılık

Bir PA, $PA = (P, T, F, W, M_0)$ olarak tanımlansın ve M_0 başlangıç işaretlemesinden ulaşılabilir tüm işaretlemelerin oluşturduğu $R(M_0)$ kümesi verilsin.

- $M(p) \leq k, \forall m \in R(M_0), p \in P$ ve $k \geq 0$ iken p konumuna “k-sınırlı” (k-bounded) denir.

- Eğer $\forall p \in P$ k-sınırlı ise bu durumda PA da “k-sınırlı” olarak tanımlanır.

- Eğer PA, M_0 ile tanımlanan başlangıç işaretlemesi için sınırlıysa bu durumda PA'ya “yapısal olarak sınırlı” (structurally bounded) denir.

- Eğer k sayısı 1 değerine eşitse bu durumda PA için “güvenli” (saf) tanımlaması yapılır.

PA modellemesinde p konumları genellikle sistemdeki kaynakları temsil etmek için kullanılır. Ayrıca işlenmiş/işlenecek parçaların, yarı mamullerin, ekipmanların vb. depolanacakları alanları temsil etmek için de kullanılırlar. Modellenen sistemlerdeki stok alanlarının yeterliliği, sınırlılık özelliği ile denetlenerek garanti edilebilir. Bu nedenle

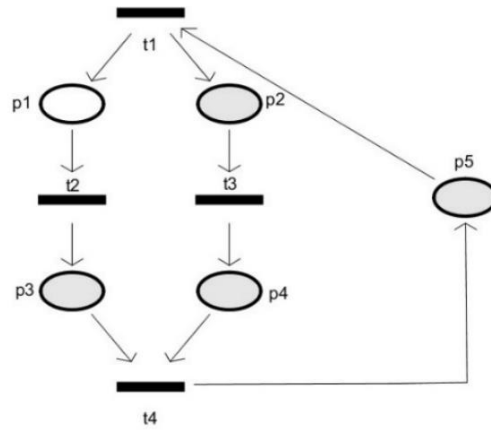
sınırlılık özelliği ile kaynakların veya depolama alanlarının kapasite bilgisinin tanımlanması ve kapasite aşımının önlenmesine yönelik stratejilerin belirlenmesi açısından önem taşıyan bir özelliktir. Aşımalar (overflow) haricinde modellenen sistemlerin aşırı yüklenmelerinin tespitinde de sınırlılık özelliği kullanılır. Modellenen sistem büyüdükçe kararsızlık durumu oluşacaktır, bu duruma ağın bir noktasında biriken jetonlar sebep olur. Sistemlerde kararsızlık durumunun oluşmasını önlemek sınırlılık özelliğinin sağlanmasıyla mümkündür.

3.9.8. Güvenilirlik

Sınırlılık özelliğinin özel bir durumu olan “güvenilirlik” (safeness) özelliği ağdaki herhangi bir $p \in P$ konumunda bulunan jeton sayısının maksimum “1” olması durumunda o ağa “güvenilir” (safe) denmesi durumunu açıklayan bir özelliktir. Böyle bir durumda ağın tüm konumlarında bulunan jetonların sayısı ya “0”dır ya da “1”dir. Tüm konumların güvenilir olması durumunda o PA da güvenilirdir.

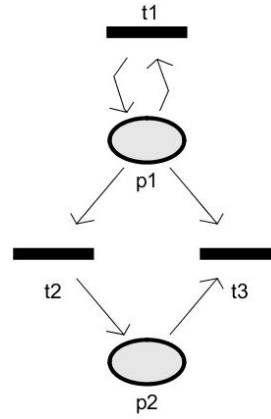
3.9.9. Devamlılık

Bir PA’da var olan herhangi bir geçişin ateşlenmesi halinde başka herhangi bir geçişin ateşlenmesi engellenmiyorsa o halde PA “devamlılık” (persistence) özelliği taşır [39]. Şekil 3.13’te devamlılık özelliği taşıyan bir PA verilmiştir.



Şekil 3. 13. Devamlılık özelliği taşıyan Petri ağı

Şekil 3.14’te PA’da ise t_1 ve t_2 geçişleri ateşlenebilir durumdadır. Fakat t_1 geçişinin ateşlenmesi durumunda t_2 geçişi ateşlenemez. Bu sebeple bu PA’nın devamlılık özelliğine sahip olmadığı söylenir.



Şekil 3. 14. Devamlılık özelliği taşımayan Petri ağı

Şu ana kadar incelenen özelliklere bakıldığında bazı özellikler birbirleriyle ilişkiliyken bazılarının ise ilişkili olmadığı, bağımsız özellikler oldukları söylenebilir. Bağımsız özellikler birbirlerinden ayrı bir şekilde incelenebilir. Bu özellikler “sınırlılık, canlılık ve geri dönebilirlik” olarak sıralanabilir.

Açıklanan tüm bu özellikler üretim sistemleri için birtakım anlamlar taşır:

- Modellenen sistemlerdeki kapasite aşmaları “sınırlılık” ve “güvenilirlik” özellikleri ile garanti edilir. Üretim sistemlerinde bulunan depolama bölgeleri vb. alanların kapasite sınırlamaları olabilir. Kapasite kısıtlaması bulunan alanları temsil eden konumlarda bu kısıtın aşılmaması sağlanır. Böylece bu gibi alanlarda aynı zamanda bulunacak mevcut parçaların belirlenen kapasiteyi geçmemesi garanti edilmiş olur.

- Birden fazla işlemin aynı anda gerçekleştirilemediği makineleri tanımlayan konumlarda bulunacak jeton sayısı en fazla 1 olmalıdır. Bu durum “1-sınırlı” özelliği yani “güvenilirlik” ile sağlanır. Modellenen üretim sistemindeki bir $p \in P$ konumunun güvenilirlik özelliğine sahip olmasıyla, konumun tanımladığı kaynaktan aynı anda kullanılacak birim 1 ile sınırlandırılmış olur.

- Modellenen sistemlerdeki çıkmaz (kilitleme) durumunun önüne, tasarım aşamasında incelenen “canlılık” özelliği ile geçilebilir. Canlılık özelliğine, sistemlerdeki ölü noktaların saptanması için başvurulur.

- Modellenen sistemlerde, M_0 başlangıç işaretlemesinden ulaşılacak herhangi bir M_k işaretlemesinden tekrar M_0 ’a dönebilmek “geri dönebilirlik” özelliği ile sağlanır. Geri dönebilirlik özelliği ile, hata durumlarından tekrar doğru durumlara dönebilmek garantilenir, yani bu özellikle hata önleme çalışmaları gerçekleştirilir.

- “Korunumluluk” özelliği kaynakların jetonlar ile temsil edildiği modellerde, sistemdeki kaynak sayısı değişmeyeceğinden jeton sayısının da değişmeyeceğini söyler. Modellenen sistemlerde geçişlerdeki girdi okları kadar çıktı okları olacaktır.

- Sistemin başlangıç konumundan ulaşılabilecek konumlar “ulaşılabilirlik” özelliği ile araştırılır.

3.10. Üretim Sistemlerinde Petri Ağları ile Modelleme Yaklaşımları

PA ile modellenen üretim sistemlerinde modelleme aşamasında tasarımcı tarafından kullanılan 2 yaklaşım vardır. Bunlar; “Faaliyet-Konum Modelleme Yaklaşımı” ve “Faaliyet-Geçiş Modelleme Yaklaşımı” olarak sıralanabilir [26].

3.10.1. Faaliyet-konum modelleme yaklaşımı

Faaliyetlerin $p \in P$ konumları tarafından temsil edildiği bu yaklaşımda, modeldeki $t \in T$ geçişleri bir faaliyetin (operasyonun) başlamasını ve bir faaliyetin tamamlanmasını tanımlar. Ayrıca bu yaklaşımda modellenen üretim sistemindeki kaynaklar da yine $p \in P$ konumları tarafından temsil edilir.

- Faaliyetleri temsil eden konumlar : Bir parçanın tezgâhta işlenmesi, işlenecek/yarı işlenmiş/ işlenmiş parçanın taşıma robotu tarafından taşınması, işlenmiş parçanın stok alanında depolanması, operatörün tampon alanına işlenecek parçayı beslemesi vb. faaliyetler modelde $p \in P$ konumları tarafından temsil edilir. Eğer söz konusu faaliyetin temsil edildiği konumda jeton/jetonlar varsa, bu durum faaliyetin yapıldığı anlamına gelir. Aksi takdirde yani konumda jeton yoksa faaliyet yapılmamış demektir.

- Kaynakları Temsil Eden Konumlar : Makine, tezgâh, taşıma robotu, konveyör, AGV, palet, operatör gibi sistem kaynaklarının durumu (kullanılabilir/meşgul), kaynağı temsil eden $p \in P$ konumundaki jeton/jetonlar tarafından gösterilir. Şayet konumda jeton varsa kaynak kullanılabilir (müsait) denir. Aksi takdirde kullanılamaz (meşgul) olduğu söylenir. Söz konusu konumdaki halihazırdaki jeton sayısı ise temsil edilen kaynaktan kaç birim kullanılabileceğini gösterir.

Faaliyet-Konum modelleme yaklaşımı literatürde oldukça sık rastlanan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşıma ait adımlar aşağıdaki gibi sıralanabilir [40] :

1. Bir parçanın ürünün üretimindeki faaliyetler belirlenir. Belirlenen gerekli faaliyetler sıralanır. Sıralama öncelik ilişkisine göre yapılır.

2. Gereken her bir faaliyet bir $p \in P$ konumu ile temsil edilir. Faaliyetin başlaması ve faaliyetin tamamlanması sırasıyla bu konuma bağlanan girdi geçişi ve çıktı geçişi ile sağlanır.

3. Faaliyetlerin gerçekleşmesi için gereken kaynaklar da yine $p \in P$ konumları aracılığıyla tanımlanır. Faaliyeti başlatmak, bu kaynağı/kaynakları temsil eden konum/konumları faaliyetin tanımlanan girdi geçişine bağlanmasıyla mümkündür. Kaynaklardaki müsaitlik durumu kaynağı tanımlayan konuma jeton/jetonların yerleştirilmesiyle sağlanır. Kaynaktaki tanımlanan jeton sayısı ise kaynaktan kaç birim kullanılabileceğini gösterir.

4. Tamamlanan faaliyetle birlikte kullanımı tamamlanan kaynak serbest kalmış olur. Kaynağın serbest kalması, ilgili faaliyetin çıktı geçişinden kaynağı tanımlayan konuma doğru bağlanan bir ok ile gösterilir. Bu sayede faaliyet esnasında meşgul durumda olan kaynak artık kullanılabilir hale gelmiş olur.

5. Başlangıç işaretlemesi sistemin ilk andaki durumuna göre belirlenir.

3.10.2. Faaliyet-geçiş modelleme yaklaşımı

Faaliyetlerin $t \in T$ geçişleri tarafından temsil edildiği bu yaklaşımda modeldeki $p \in P$ konumları ise kaynakları tanımlar. Faaliyet-Konum modelleme yaklaşımında olduğu gibi şayet kaynağı tanımlayan konumda jeton/jetonlar bulunuyorsa o durum o kaynağın kullanılabilir olduğunu gösterir [26].

3.11. Petri Ağları Analizinde Kullanılan Yöntemler

Üretim sistemlerinin hem yapısal hem de dinamik anlamda analiz edilerek mevcut ve oluşabilecek tüm risklerin belirlenmesi ve tanımlanması, sistemlerin modellenmesinde oldukça önemli bir konudur. PA'lar sistemdeki risklerin belirlenip tanımlanmasındaki gücü sebebiyle yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bu nedenle PA ile modellenen sistemlerin analizlerinin en iyi şekilde yapılması gerekmektedir.

PA'ların analizinde kullanılan yöntemlerin, literatürdeki çalışmalarda çeşitli şekillerde sınıflandırıldıkları görülmektedir. Bunlardan en önemli 2 farklı sınıflandırma 1989'da yapmış olduğu bu alanda ikonikleşen çalışmasıyla Murata [25] tarafından öne sürülmüştür.

1995 senesinde yapılan bir diğer sınıflandırma ise Marsan vd. [36] tarafından önerilen yöntemdir.

Tablo 3. 3. Petri ağ analizinde kullanılan yöntemlerin sınıflandırılması

Murata'nın Yaptığı Sınıflandırma	Marsan vd.'nin Yaptığı Sınıflandırma
Ulaşılabilirlik Ağacı	Yapısal Analiz Teknikleri
Matris-Denklem Yaklaşımı	Durum Uzayı Teknikleri
İndirgeme veya Ayrıştırma Yöntemi	

Murata'ya göre PA'nın analiz yöntemleri 3 gruba ayrılır [25]:

- Ulaşılabilirlik Ağacı / Grafiği Yöntemi (Reachability Tree/Reachability Graph Method): Başlangıç işaretlemesine dayanan bir yöntemdir. Ulaşılabilecek tüm durumlar ayrıntılı bir şekilde görülebilir.

- Matris-Denklem Yaklaşımı / Değişmez Değer Analiz Yöntemi (Invariant Analysis Method): Başlangıç işaretlemesine dayanmaz. Bu yöntem bir yapısal analiz tekniğidir. Literatürde bu yöntem "Değişmez Değer Analiz Yöntemi" olarak da anılmaktadır. Etkin bir yöntemdir ancak yalnızca belirli PA tiplerine uygulanabilir.

- İndirgeme veya Ayrıştırma Yöntemleri: Başlangıç işaretlemesine dayanan yöntemlerdir. Etkin bir yöntemdir ancak yalnızca belirli PA tiplerine uygulanabilir.

Marsan vd.'ye göre PA'nın analiz yöntemleri 2 gruba ayrılır : [36]

- Yapısal Analiz Yöntemleri (Structural Analysis Techniques) : Bu yöntemler başlangıç işaretlemesine dayanmaz. Modellerin veya sistemlerin yapısal özelliklerine göre yapısal/statik öğelerinin incelendiği yöntemlerdir.

- Durum Uzayı Analiz Yöntemleri /State Space Analysis Techniques) : Başlangıç işaretlemesine dayanan yöntemlerdir. Literatürde bu yöntem "Ulaşılabilirlik Analiz Yöntemleri" (Reachability Analysis Techniques) olarak da anılmaktadır. Başlangıç işaretlemesinin dikkate alındığı özellikler, durum uzayı analiz yöntemleri ile incelenir.

3.11.1. Ulaşılabilirlik (kapsanabilirlik) ağacı

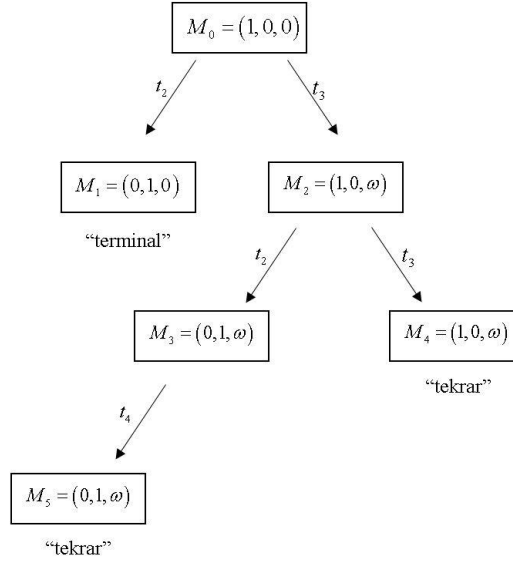
Sistemin başlangıç durumundan yani M_0 başlangıç işaretlemesinden ulaşılacak tüm durumların elde edilmeye çalışıldığı analiz yöntemidir. M_0 başlangıç işaretlemesinden itibaren ateşlenebilir durumda olan tüm $t \in T$ geçişlerinin ateşlenmesiyle yeni işaretlemeler

oluşur. Her bir yeni işaretlemeden tekrar ateşlenebilir durumdaki tüm $t \in T$ geçişleri ateşlenir ve böylece ateşlenen t geçişi kadar yeni işaretleme elde edilmiş olur. Elde edilen işaretlemeler “ulaşılabilirlik ağacı” (reachability tree) ile temsil edilir. Literatürde ulaşılabilirlik ağacı için “ulaşılabilirlik grafiği” (reachability graph) terimi de kullanılmaktadır. İşaretleme sonlu sayıda ise yani PA yapısı sınırsız değilse oluşan ağaç da sonlu olacaktır. Aksi takdirde ağaç sonlandırılmaz.

Ağacı oluştururken, M_0 başlangıç işaretleme ve sırayla devamındaki işaretlemelerden türetilen tüm işaretlemeler birbirlerini takip eden oklar ile gösterilir. Ağaçtaki düğüm gösterimi ulaşılan yeni durumları temsil eder. Düğümleri bağlayan oklar ise Petri ağının geçişlerini tanımlar. Örneğin M_0 başlangıç işaretlemesinden M_1 işaretlemesine ulaşılabilir olması durumunda ulaşılabilirlik ağacındaki M_0 ’dan M_1 ’e doğru olan yönlü ok, M_1 işaretlemesinin oluşmasını sağlayan geçişin ateşlendiği anlamına gelir.

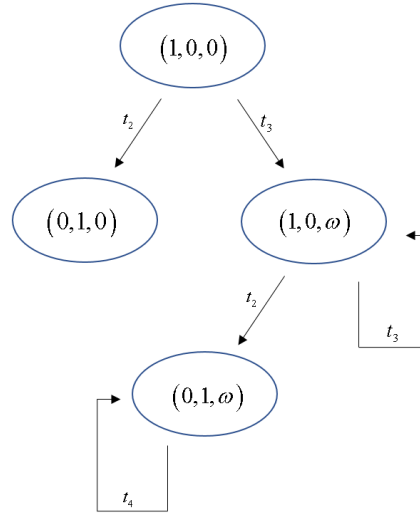
Ulaşılabilirlik ağacı oluşturularak, başlangıç işaretleme olan M_0 ’dan başlayarak erişilebilecek tüm işaretlemeleri elde etmek ve gözlemek hedeflenir. [41] Böylece ağacın elde edilmesiyle PA modelinin davranışsal özellikleri incelenebilir. Zhou ve Venkatesh’e göre (1999) [42] işaretli bir PA’da oluşabilecek tüm işaretlemeleri elde etmek için 2 farklı yöntem vardır:

- Önce Derinlemesine (Depth First) Yöntem: Bu yöntemde bir PA’da öncelikle başlangıç işaretleme M_0 ’dan başlanır ve geçerli olan geçişler saptanır. Geçerli geçişlerden herhangi birinin rassal olarak belirlenmesiyle bu geçiş ateşlenir. Ateşlenen geçiş neticesinde elde edilen işaretleme önceden ulaşılmışsa yani bu işaretleme “eski” ise veya herhangi bir geçiş sıralaması ile geçerli hale gelemiyorsa yani bu geçiş “ölü” ise bu noktada durulur. Bu işaretlemenin elde edildiği işaretlemeye dönülerek henüz ateşlenmemiş aşka bir geçiş ateşlenir ve devam edilir. Eğer ulaşılmış işaretleme eski ya da ölü değilse adımlar aynı şekilde gerçekleştirilir ve yeni işaretleme elde edilmiş olur. Bu adımların devam ettirilmesiyle geçerli haldeki tüm geçişler belirlenir, ateşlemeler yapılır ve tüm sonlu işaretlemeler elde edilir. Örnek bir PA grafiğine ait ulaşılabilirlik ağacı Şekil 3.15’te verilmiştir.



Şekil 3. 15. Ulaşılabilirlik ağacı örneği

“Ulaşılabilirlik ağı” ise ulaşılabilirlik ağacından elde edilen ve muhtemel tüm işaretlemelerin hangi ateşlemeler ile oluştuğunu görebileceğimiz ağıdır. Şekil 3.15’teki ulaşılabilirlik ağacı için elde edilen ulaşılabilirlik ağı aşağıdaki Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3. 16. Elde edilen ulaşılabilirlik ağı

- Önce enlemesine (breadth first) yöntem: Bu yöntemde ise bir önceki yöntemin aksine modeldeki geçerli halde mevcut geçişlerin hepsinin aynı anda ateşlenmesiyle yeni işaretlemeler oluşturulur. Bu aşamada oluşan yeni işaretlemelerin önceden ulaşılmış yani eski veya geçerli hale gelemeyen yani ölü geçiş olmamasıyla geçerli tüm geçişler belirlenir

ve tekrar hepsinin ateşlenmesiyle işaretlemelere ulaşılır. Ancak işaretlemelerin eski ya da ölü olmasıyla sonraki işaretlemeye geçilerek adımlar tekrarlanır.

Tanıtilan her 2 yöntemin uygulanmasının neticesinde de aynı ulaşılabilirlik ağacı ortaya çıkar, çünkü Petri ağının ve M_0 başlangıç işaretlemezinin yalnızca bir tane ulaşılabilirlik ağacı vardır. Tüm ağ tiplerine uygulanabilen bu analiz yöntemi, karmaşık ve büyük ağlar için tüm ağın incelenmesi üzerine dayalı bir yaklaşım olduğundan uygun değildir. Çünkü ağaç gösterimi büyük ağlarda gittikçe karmaşık hale gelir.

3.11.2. Matris-denklemler yaklaşımı (değişmez değer analiz yöntemi)

Petri ağlarının analizinde sıklıkla başvurulan yöntemlerden biri olan “Matris Denklem Yaklaşımı” literatürde aynı zamanda “Değişmez Değer Analiz Yöntemi” (Invariant Analysis Method) olarak da anılmaktadır. Matrislerin ve denklemlerin oluşturulmasına dayanan bu yaklaşım, modellenen PA'nın dinamik karakteristik özelliklerini tanımlar.[8] Etkin bir yöntem olmasının yanında bu yöntemin tüm ağ tiplerine uygulanamadığı söylenebilir. Bu yaklaşım ağdaki tüm $p \in P$ konumları ile tüm $t \in T$ geçişleri arasında bulunması muhtemel bağlantıları açıklamaya dayanır.

Bir PA'da bulunan $p \in P$ konumları ile $t \in T$ geçişlerinin birbirleriyle bağlantısını sağlayan yönlü okları temsil etmek amacıyla 2 matris gereklidir.

I girdi matrisini (input matrix), O çıktı matrisini (output matrix) ve C ise yineleme matrisini (incidence matrix) temsil etmek üzere, O matrisinden I matrisinin çıkarılmasıyla C yineleme matrisi elde edilir ve matematiksel ifadeyle;

$$C = O - I \quad (3.7)$$

şeklinde gösterilir.

Petri ağında s tane geçiş ve n tane konum olması durumunda yineleme matrisi $C_{s \times n}$ boyutunda olup $C = [C_{ij}]$ şeklinde de ifade edilebilir. $[C_{ij}]$, C matrisindeki i . satır j . sütunda bulunan elemanı temsil etmekle birlikte, formüle etmek gerekirse;

$$c_{ij} = c_{ij}^+ - c_{ij}^- \dots \quad (3.8)$$

anlamına gelmektedir. Burada c_{ij}^+ ve c_{ij}^- değerlerinin ilgili geçiş ve konumları birbirlerine bağlayan yönlü okların ağırlıklarını temsil ettikleri söylenebilir. Bu durumda c_{ij}^+ , t_j

geçişinden P_i çıktı konumuna yönlü okun ağırlığı anlamına gelir ve O çıktı fonksiyonunun bir elemanıdır. c_{ij}^- ise P_i girdi konumundan t_j geçişine yönlü okun ağırlığı anlamına gelir ve I girdi fonksiyonunun bir elemanıdır.

t_j geçişinin ateşlenmesiyle P_i girdi konumundan eksilen jeton/jetonların sayısı c_{ij}^- ile gösterilirken, P_i çıktı konumuna eklenecek jeton/jetonların sayısı c_{ij}^+ ile gösterilir.

$M(P_i)$ Petri ağıının k anında i . konumunun işaretlemesini (P_i konumunda bulunan jeton sayısını) temsil etmek üzere ağıdaki bir $t_j \in T$ geçişinin ateşlenebilmesi için

$$c_{ij}^- \leq M(P_i) \quad (3.9)$$

koşulu sağlanmalıdır. Matematiksel notasyonu açıklamak gerekirse t_j geçişinin ateşlenebilmesi için, P_i girdi konumundan t_j geçişine doğru olan yönlü okların ağırlığı (c_{ij}) en fazla P_i girdi konumunda bulunan jeton sayısı kadar olmalıdır. M_{k-1} işaretlemesinden hemen ulaşılabilir işaretleme M_k ve k pozitif tamsayıdır. Bir M_k matrisi;

$$[M_k] = \begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \vdots \\ \dots \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (3.10)$$

olarak Eşitlik (3.10)'da tanımlanıyor. Burada M_k bir sütun vektörüdür ve matris eşitlikleri oluşturulurken kullanılır. Bir U_k matrisi;

$$[U_k] = \begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \vdots \\ \dots \end{bmatrix}_{s \times 1} \quad (3.11)$$

olarak Eşitlik 3.11'de tanımlanıyor. Burada U_k bir sütun vektörüdür ve aynı zamanda kontrol vektörü de denir. Vektörde sadece 1 adet 0'dan farklı değer vardır, vektörün diğer elemanlarının değeri 0'dır. 0'dan farklı olan eleman t_j geçişinin nerede gerçekleştiğine dair bilgi verir. Yani bu vektör k . ateşlemeyi tanımlayan vektördür. k ateşlemesinde t_i

geçişinin ateşlenmesi durumunda U_k vektöründe i . eleman 1 değerini alırken diğer elemanlar 0 değerini alır.

Yineleme matrisi C 'nin i . satırı, i geçişi ateşlenmesiyle birlikte işaretlemeye oluşan değişimi gösterir. Bu nedenle bir Petri ağı için;

$$M_k = M_{k-1} + C^T u_k \quad k = 1, 2, 3... \quad (3.12)$$

yazılabilir. Eşitlik (3.12) “durum denklemi” olarak adlandırılır. [43]

Analizlerde sıkça karşılaşılan “ P -değişmez” (P -invariant) kavramı ve “ T -değişmez” (T -invariant) kavramı, yineleme matrisleri ile ilgili bilinmesi gereken kavramlardır. Matematiksel anlamda Eşitlik (3.13);

$$C^T x = 0 \quad (3.13)$$

ise “bu denklemi çözen x , P -değişmezdir” denir ve x pozitif bir tamsayıdır. [44] Bir M_0 başlangıç işaretlemesinden ulaşılabilecek bütün işaretlemeler için, P -değişmeze ait ve 0 değerinden farklı olup, konumlarda bulunan jeton ağırlıkları ortalama toplamları sabittir. [8] P -değişmez değeri olarak bulunan değer, Petri ağının M_0 başlangıç işaretlemesini gerçekleştiren bir dizi ateşleme ardından yeniden M_0 başlangıç işaretlemesine çeviren sıralamayı gösterir. Ayrıca bu sıralamada geçişlerin gerçekleşme sayılarını da belirtir. Diğer yandan P -değişmezinin geçişlerin ateşlenmesindeki dizilimi belirlemediğini söylemek gerekir [6][8][44]. Ayrıca T -değişmez değeri ve P -değişmez değeri Petri ağındaki sırasıyla $t \in T$ geçişlerine ait alt kümeyi ve $p \in P$ konumlarına ait alt kümeyi ortaya koyar.

3.11.3. İndirgeme ve ayrıştırma yöntemi

Üretim sistemlerinin modellenmesinde kullanılan PA'larda model büyüdükçe analiz güçleşir. Bu nedenle büyük modellerin doğru bir şekilde analiz edilebilmesi için öncelikle daha küçük boyutlara ayrıştırılıp analiz edildikten sonra analiz çıktılarının tüm modeli kapsayacak şekilde genelleştirildiği yöntemler ortaya çıkmıştır. Bu yöntemlere “indirgeme yöntemleri” denir.

3.12. Petri Ağların Yapısal Özelliklerine Göre Sınıflandırılması

Bulundurduğu özelliklere göre sınıflara ayrılan PA'larda yapılan bu sınıflandırma analizlerin yapılabilmesi açısından kolaylık sağlar. Analizler her PA sınıfının karakteristik özelliklerine göre özelleştirilebilir. Böylece yapılan analizlerin etkinliği de artırılmış olacaktır. Petri ağların sınıflandırılmasıyla ilgili literatürde en yaygın bulunan bazı tanımlar şöyledir:

- Temel Petri Ağı : Bir PA'da mevcutta bulunan tüm okların ağırlıklarının "1" olması durumunda bu ağ "Temel (ordinary) PA" olarak adlandırılır [45].
- Saf Petri Ağı : Herhangi bir $p \in P$ konumu eğer $t \in T$ geçişinin ne başlangıç geçişi ne de bitiş geçişi ise o halde bu ağ "Saf PA" olarak tanımlanır [46].
- Sınırsız Kapasiteli Petri Ağı : Bir PA'da mevcutta bulunan her $p \in P$ konumu eğer sonsuz adet jeton alabiliyorsa bu ağ "Sınırsız Kapasiteli (infinite capacity) PA" olarak adlandırılır.
- Sınırlı Kapasiteli Petri Ağı : Bir PA'da mevcutta bulunan en az bir tane $p \in P$ konumundaki jeton sayıları için bir sınır varsa bu ağ "Sınırlı Kapasiteli (finite capacity) PA" olarak adlandırılır.

Yukarıda verilen Petri ağı tanımları haricinde Petri ağları buldukları yapısal özelliklere göre bir takım başka sınıflara daha ayrılır. Bu sınıfları anlamlandırabilmek için tanımlanması gereken bazı kümeler şu şekildedir :

F , Petri ağındaki oklar kümesi, P , Petri ağındaki konumlar kümesi ve T ise Petri ağındaki geçişler kümesi olmak üzere;

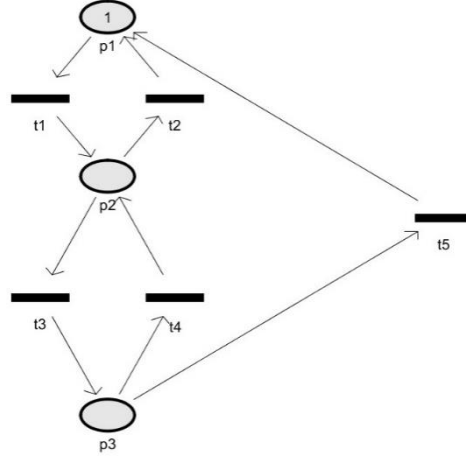
1. $\bullet p = \{t \mid (t, p) \in F\}$; p konumuna ait girdi geçişleri kümesi
2. $p \bullet = \{t \mid (p, t) \in F\}$; p konumuna ait çıktı geçişleri kümesi
3. $\bullet t = \{p \mid (p, t) \in F\}$; t geçişine ait girdi konumları kümesi
4. $t \bullet = \{p \mid (t, p) \in F\}$; t geçişine ait çıktı konumları kümesi

3.12.1. Durum makinesi / durum grafiği (state machine / state graph)

Ağıdaki her $t \in T$ geçişinin yalnızca 1 tane girdi konumu ve yalnızca 1 tane çıktı konumu varsa bu ağlar "durum makinesi" (state machine) olarak adlandırılır. [47] Bu durum Eşitlik (3.14)'te olduğu gibi

$$\bullet t = t \bullet = 1, \quad \forall t \in T \quad (3.14)$$

matematiksel notasyonu ile gösterilebilir. Durum makinesi ağlarında $p \in P$ konumundaki jeton 1'den daha çok sayıda geçişi aktifleştirebilir ve bu durum çatışma oluşmasına neden olabilir [35].



Şekil 3. 17. Durum makinesi Petri ağı örneği

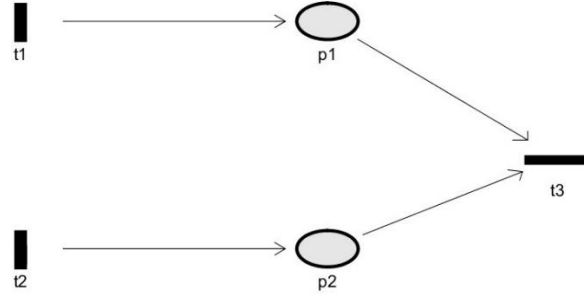
Şekil 3.17’de durum makinesi PA örneğinde, t_1 , t_2 , t_3 ve t_4 geçişlerinde 1 tane girdi konumu ve 1 tane çıktı konumu vardır.

3.12.2. Hareket grafikleri (event graph)

Ağdaki her $p \in P$ konumunun yalnızca 1 tane girdi geçişi ve yalnızca 1 tane çıktı geçişi varsa bu ağlar “hareket grafikleri” (event graph) olarak adlandırılır [47]. Bu durum Eşitlik 3.15’teki

$$\bullet p = p \bullet = 1, \quad \forall p \in P \quad (3.15)$$

matematiksel notasyonu ile gösterilebilir. Ağdaki geçişler 1’den çok girdi/çıktı konumlarına sahip olabilir.

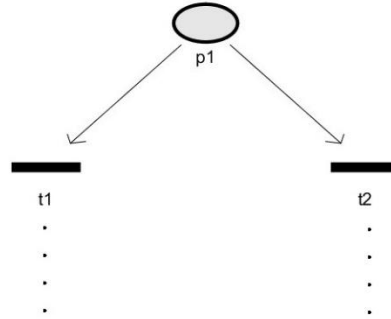


Şekil 3. 18. Hareket grafiği Petri ağı örneği

Şekil 3.18’de hareket grafiği PA örneğinde p_1 ve p_2 konumuna ait 1 tane girdi geçişi ve 1 tane çıktı geçişi bulunmaktadır.

3.12.3. Serbest seçim ağları (free choice)

Ağdaki bir $p \in P$ konumu yalnızca 1 tane t çıktı geçişine sahipse ve çatışma içermiyorsa veya bir $p \in P$ konumu bir t geçişine ait olan tek girdi konumuysa bu ağlar “serbest seçim ağları” (free choice nets) olarak adlandırılır.



Şekil 3. 19. Serbest seçim Petri ağı örneği

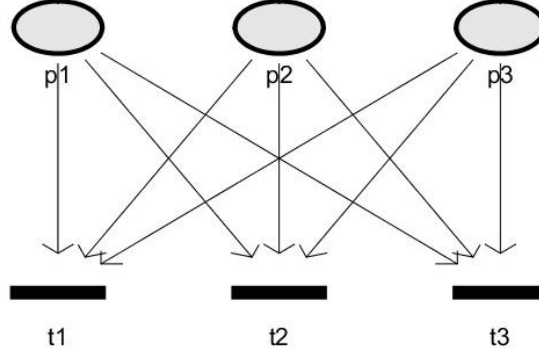
Şekil 3.19’da serbest seçim PA örneğinde p_1 girdi konumu, t_1 ve t_2 geçişlerinin tek girdi konumudur.

3.12.4. Genişletilmiş serbest seçim ağları (extended free choice)

Ağdaki bütün $t \in T$ geçişlerinin hepsi aynı girdi konumlarına sahipse bu ağlar “genişletilmiş serbest seçim ağları” (extended free choice) olarak adlandırılır. Bu durum Eşitlik 3.16’daki;

$$\bullet t_1 = \bullet t_2 = \bullet t_3 \dots = \bullet t_s \quad s = \text{geçiş sayısı ve } \forall t \in T \quad (3.16)$$

matematiksel notasyonu ile gösterilebilir.



Şekil 3. 20. Genişletilmiş serbest seçim Petri ağı örneği

Genişletilmiş serbest seçim ağları, serbest seçim ağlarını içeren bir PA sınıfıdır.

3.12.5. Asimetrik seçimli Petri ağları (asymmetric choice)

Ağdaki bütün $t \in T$ geçişleri başka bir t geçişiyle paylaşılıyorsa ve yalnızca 1 tane girdi konumu varsa bu ağlar “asimetrik seçimli ağlar” (asymmetric choice)dır. Asimetrik seçim ağları sınıfının, genişletilmiş serbest seçim ağları sınıfını kapsar. Bu sebeple; durum makinesi Petri ağları, hareket grafiği Petri ağları ve serbest seçim ağları sınıflarını içerdikleri söylenebilir. Asimetrik seçimli PA’larda , ağdaki iki farklı $p \in P$ konumunun ortak çıktı geçişleri varsa, serbest seçimli ağlar sınıfından farklı olarak ortak çıktı konu her iki konumun da çıktı geçişlerinin çakışması zorunluluğu yoktur. p_i ve p_{i+1} konumlarının ortak çıktı geçişleri t_j iken, p_i konumu bir başka çıktı geçişi olan t_k ’ya da sahip olabilir. Fakat serbest seçim ağları sınıfı p_{i+1} konumunun da t_k çıktı geçişine sahip olması gerektiği bir sınıftır [48].

Tüm bunlara bakılarak;

- Durum makineleri sistemdeki çatışmaları ifade eder.
- Paralellik veya eş zamanlılığın, hareket grafikleri ile ifade edildiği söylenebilir.
- Buradan da anlaşılacağı gibi durum makinesi petri ağları ile hareket makinesi petri ağları birbirlerini tamamlayan çiftlerdir.

• Ayrıca, serbest seçim ağları ve genişletilmiş serbest seçim ağları ise durum makineleri için çatışmaları içerir. Aynı zamanda hareket grafikleri için eş zamanlılığı da ifade eder [28][35][49].

3.13. Petri Ağları Çeşitleri

Petri ağları, modellenen sistemde geçen zamanın, sistemin yapısının, sistemdeki dinamik hareketi takip edebilme isteğinin, sistemde var olan belirsizliklerin vb. modele yansıtılma biçimlerine göre çeşitlenmektedir. “Zamanlı Petri Ağları” (Timed Petri Nets-TPN), “Modüler Petri Ağları” (Hierarchical Petri Nets-HPN), “Renkli Petri Ağları” (Coloured Petri Nets-CPN) ve “Bulanık Petri Ağları” (Fuzzy Petri Nets-FPN) literatürde bulunan başlıca PA çeşitleridir.

3.13.1. Zamanlı Petri ağları (timed Petri nets)

Carl Adam Petri tarafından ortaya koyulan PA çalışmasında, zaman kavramına yer verilmemiş ve araştırmacı bunu özellikle böyle yapmıştır. Bu duruma “zaman” kavramını sisteme entegre etmenin modeli daraltacağı görüşünü benimsemesini sebep olarak göstermiştir. Bu anlayışa göre yapılan çalışmalar ile yalnızca sistemin yansıttığı mantıksal davranış modellenmiş olur.

1970’li yıllarda yapılan çalışmaların çeşitlenmesiyle birlikte PA’lar ile modellenen sistemlerin modellerine zaman entegrasyonu zorunlu hale gelmiştir. Çünkü sistemlerin modellenmesiyle elde edilmek istenen gerçek zamanlı kontrol, performans analizi gibi konular ancak sistemlere zamanın eklenmesiyle mümkündür. Diğer bir deyişle dinamik sistemlerin modellenerek analiz edilebilmesi için zaman eklentisi şarttır. Bu amaçla ağlara zamanın entegre edilmesiyle “zamanlı Petri ağları” (timed Petri Nets- TPN) ortaya çıkmıştır [50].

Zaman kavramı, PA modelleri için etkileşim içindeki birçok farklı faaliyetin başlamasını ve bitişini gösterir. Ayrıca çatışma ve senkronizasyon bulunduran ve eş zamanlılık içermeyen sistemlerin modellenmesinde güçlü yönleriyle öne çıkan PA’lara zamanın entegrasyonu sayesinde hem paralel sistemler hem de ayrık sistemler etkili bir şekilde temsil edilerek analiz edilebilir hale gelir. Zaman unsurunun ağlara eklenme şekline göre çeşitlendirilen Petri ağları Bölüm 3.14’te ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır.

3.13.2. Modüler Petri ağları (hierarchical Petri nets-HPN)

Karmaşık PA modellerine sahip olan sistemlerde; anlaşılabilirliği artırarak analizlerin daha kolay yapılabilmesini sağlamak gerekir. Dolayısıyla ilk yapılması gereken PA modeline ait grafik yapısının basitleştirilerek karmaşıklığın azaltılmasıdır. Bu amaçla “modüler Petri ağları” (hierarchical Petri nets-HPN) geliştirilmiştir.

3.13.3. Renkli Petri ağları (coloured Petri nets-CPN)

Sistemin dinamik yapısını tanımlayan PA elemanının jetonlar ve jetonların hareketleri olduğu açıklanmıştı. Sistem büyüyüp karmaşıklaştıkça jetonların hareketlerini takip etmek zorlaşır. Dolayısıyla sistemin dinamik yapısını doğru bir şekilde anlayarak yorumlayabilmek tehlikeye girer. Sistemde var olan jetonlar birbirlerinden ayırt edilemez, bu nedenle ateşlemeler esnasında jetonların akışı takip edilemez. Tüm bu olanaksızlıkları gidererek, kabaca karmaşık sistemlerin modellenmesi kolaylaştırmak amacıyla “renkli Petri ağları” (coloured Petri nets-CPN) geliştirilmiştir. Bu ağ çeşidi ismini modelde bulunan farklı renklere sahip jetonlardan alır. Ağdaki jetonlara değişik renk atamaları ile birlikte değişik özellikler de yüklenir. Böylelikle birbirlerinden ayırt edilebilir hale gelen jetonların içinden belirli spesifik bir jetonun tüm hareketi ateşlenmeler boyunca takip edilebilir.

Ağdaki jetonlar geçişlerdeki ateşlenmeler neticesinde yer değiştirirler. Renkli PA’lar sayesinde renk atamaları yapılmış jetonlar gerçekleşen her adımda renk değiştirir, böylece adımlar kolay takip edilebilir hale gelir. Özellikle modellenen üretim sistemlerinde birden fazla parça söz konusuysa renkli PA’lar ile modellenen sistemlerin avantajları daha belirgin hale gelir. Jetonlara atanan renkler sayesinde aktivitelerin sayısı ve sistemde yer alan parçaların hareket etme zaman bilgileri de sağlanır [9]. EK-23’te bir sistem modellenmesinin renkli PA ile yapılması örneği verilmiştir.

3.13.4. Bulanık Petri ağları (fuzzy Petri nets-FPN)

Sistemlerin bir araç ile modellenerek performans analizlerinin yapılmasında bazı belirsizlikler ortaya çıkabilir. Bu belirsizlikler

- Rassallık (Randomness)
- Bulanıklık (Fuzziness)

olarak 2 başlıkta incelenebilir.

Bulanıklık, sistemlerde kesinlik içermeyen bilgilerden kaynaklanan belirsizlik durumunu anlatır [51]. Parametrelerdeki belirsizlikler bulanık yaklaşım ile hesaplanarak modele yansıtılabilir. Rassallık göstermeyen belirsizliklerin bulanık mantık ile ifade edilerek modele entegre edilmelerine ihtiyaç vardır [52]. Bir PA modeli için sistemdeki bulanıklık, PA modelinin elemanları olan konumlar, geçişler jetonlar ve/veya yönlü okların bulanıklaştırılması aracılığıyla geliştirilerek “bulanık Petri ağları” (fuzzy Petri nets-FPN) kavramı ortaya atılmıştır.

3.14. Petri Ağlarında Zaman Kavramı

Petri ağlarında zaman kavramının kullanılışı;

- Deterministik zamanlı Petri ağları
- Stokastik zamanlı Petri ağları

olarak 2 farklı biçimde ele alınabilir. Konum, geçiş ve/veya yönlü oklar ile ilişkilendirilmiş zaman kavramının aldığı değer deterministik olması durumunda “Deterministik zamanlı Petri ağları” (deterministic timed Petri nets-DTPN) ile modelleme yapılır. Fakat eğer zaman kavramının aldığı değer olasılıklı ise bu durumda “stokastik zamanlı Petri ağları” (stochastic timed Petri nets-STPN) ile modelleme söz konusu olur.

3.14.1. Deterministik zamanlı Petri ağları (deterministic timed Petri nets-DTPN)

Zaman değişkeninin kesin değerler aldığı sistemlerde “deterministik zamanlı Petri ağları” (deterministic timed Petri nets) ile modelleme yapılır. Modellemesi yapılacak bir sistem çatışma ve eş zamanlılık içeriyorsa ve bu sistemde zaman değerleri “sabit” ise, olasılıklara bağlı olarak değişkenlik göstermiyorsa, bu durumda zaman entegrasyonu deterministik zamanlı Petri ağları ile yapılır. Aksi takdirde sistemin davranışı seçimlere göre şekillenebiliyorsa yani olasılıklı ise deterministik zamanlı modellemeden bahsedilemez.

Zaman unsurunun ağlara eklenme şekline göre zamanlı Petri ağları çeşitlendirilmiştir. Bu çeşitlenme sistemlerin PA ile modellenmesindeki ele alış biçimine göre şekillenmektedir. Petri ağlarında zaman; konumlar, geçişler ve/veya yönlü oklar ile ilişkilendirilebilir.

a) Konum zamanlı Petri ağları (place timed Petri nets) : PA modelinde sistemdeki zamanın konumlar ile ilişkilendirildiği modellere “konum zamanlı Petri ağları” (place timed Petri nets) denir ve literatürde kısaca “PTPN” şeklinde ifade edilir. Bu modelleme

yaklaşımında konumlar belirli süreler alan faaliyetler ile ilişkilendirilirken, geçişler ise sistemdeki anlık olayları temsil etmek üzere kurgulanır. Yani burada geçişlerin süresiz olarak tanımlandığı söylenebilir. Söz konusu faaliyetin aldığı süre “ x ” olarak biliniyorsa, faaliyetin atandığı konuma jetonun ulaşması ile jetonun konumdan ayrılarak o konumun çıktı geçişini aktif hale getirinceye kadar “ x ” kadar süre geçiyor demektir.

Bir Petri ağı $PA = (P, T, F, W, M_0)$ şeklinde tanımlanmak üzere;

- ❖ $X = \text{zaman fonksiyonu}$ 'dur ve $X = \{\forall x_i \in \mathbb{R} | x_i > 0\}$
- ❖ $x_i = p_i$ konumuna atanan zaman 'dır
- ❖ x_i ; p_i konumundaki bir jetonun buradaki en az bekleme süresine eşittir.

Bu durumda PTPN, konum zamanlı bir PA'dır ve,

$$\text{❖ } PTPN = (PA, X)$$

ile gösterilir.

b) Geçiş zamanlı Petri ağları (transition timed Petri nets): PA modelinde sistemdeki zamanın geçişler ile ilişkilendirildiği modellere “geçiş zamanlı Petri ağları” (transition timed Petri nets) denir ve literatürde kısaca “TTPN” olarak ifade edilir. Bu modelleme yaklaşımında geçişler, ağıdaki işaretlemenin değişmesine sebep olan operasyonlar ile ilişkilendirilir. Yani zaman atamaları geçişlere yapılır. Söz konusu faaliyetin aldığı süre “ x ” olarak biliniyorsa, faaliyetin ilişkilendirildiği geçişin aktif hale gelmesinden bu geçişin ateşlenmesine kadar “ x ” kadar süre gerekiyor demektir.

Bir Petri ağı $PA = (P, T, F, W, M_0)$ şeklinde tanımlanmak üzere;

- ❖ $X = \text{zaman fonksiyonu}$ 'dur $X = \{\forall x_i \in \mathbb{R} | x_i > 0\}$
- ❖ $x_i = t_j$ geçişine atanan zaman 'dır
- ❖ x_i ; t_j geçişinin ateşlenme süresine eşittir.

Bu durumda TTPN, geçiş zamanlı bir PA'dır ve,

$$\text{❖ } TTPN = (PA, X)$$

ile gösterilir.

c) Zamanın yönlü oklar ile ilişkilendirilmesi: PA modelinde, sistemdeki zamana bağlı davranışlar yönlü oklar ile ilişkilendirilebilir. Bu ilişkilendirme 2 farklı şekilde yapılabilir:

- ❖ Zamanın konumdan-geçişe yönlendirilmiş oklar ile ilişkilendirilmesi:

Petri ağ modelinde bir $p \in P$ konumundan $t \in T$ geçişine yönlendirilmiş ok/oklar bir taşımayı veya bir malzeme akışını tanımlıyorsa ve söz konusu işlemin aldığı süre “ x ” olarak biliniyorsa, o halde ok/okların bağlandığı geçişin aktif hale gelebilmesi için söz konusu konumdaki jetonun bu konumda “ x ” kadar süre kalması gerekiyor demektir.

❖ Zamanın geçişten-konuma yönlendirilmiş oklar ile ilişkilendirilmesi

Petri ağ modelinde bir $t \in T$ geçişinden $p \in P$ konumuna yönlendirilmiş ok /oklar bir taşımayı veya bir malzeme akışını tanımlıyorsa ve söz konusu işlemin aldığı süre “ x ” olarak biliniyorsa, o halde ok/okların çıktığı geçişin ateşlenmesi itibariyle meydana gelen jetonun okun bağlanacağı konuma erişmesi için “ x ” kadar süre gerekiyor demektir.

3.14.2. Stokastik zamanlı Petri ağları (stochastic timed Petri nets-STPN)

PA’lar, sistemlerin çeşitli özelliklerinden doğan sıralı ilişkiler, eş zamanlılık, çatışma, senkronizasyon vb. zorlu yapısal karakteristik özellikleri kolaylıkla modele yansıtılabildiği için öne çıkan bir modelleme aracıdır. Ayrıca sistem zamanının modele entegrasyonuna izin veren yöntemlere sahip olduğundan gerçek zamanlı kontrol ve performans analizi yapılabilmesine olanak sağlar.

Üretim sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan en büyük sorunlardan birisi çıkmaz (kilitlenme) oluşumlarıdır. Paylaşımlı kaynak kullanımı olan bir sistemde, kaynak atamalarının doğru bir şekilde yapılamaması çıkmaz oluşumunun en sık rastlanan sebeplerindendir. Bu nedenle paylaşımlı kaynak kullanımına sahip sistemlerin incelenerek modellenmesi amacıyla “stokastik Petri ağları” (stochastic Petri nets) geliştirilmiştir. Stokastik Petri ağlarından literatürde kısaca “SPN” olarak bahsedilir [53]. Sıralı ilişkiler, eş zamanlılık, paylaşımlı kaynak kullanımı gibi özel durumlar stokastik PA ile başarılı bir şekilde modellenabilir [54].

Sistem davranışlarının seçimlere göre şekillenebilmesi olasılıklı bir yapıya işaret eder. Deterministik zamanlı PA olasılıklı seçimleri yansıtmaya gücüne sahip değildir. Sistemdeki zaman kavramının “rastgelelik” (randomness) içermesi ve paylaşılan kaynak kullanımı vb. sonucu sistemde çıkmaz oluşumu stokastik PA’ların kullanımını gerektirir. Stokastik PA, olasılıklı yapı içermeyen deterministik PA’lara olasılıkların entegrasyonu ile elde edilir. Stokastik PA modellerinde zaman çoğunlukla geçişler ile ilişkilendirilir [25]. Literatüre baktığımızda karmaşık üretim sistemlerinin tasarımı, modellenmesi ve analizinde simülasyon, kuyruk teorisi ve Markov zincirleri gibi başka modelleme araçlarının sıklıkla

kullanıldığını görürüz. Stokastik PA'ların üretim sistemlerinin modellenmesi ve sonrasında yapılan performans analizinde kullanılan diğer yöntemlere göre sahip olduğu bazı avantajlı özellikler şu şekilde sıralanabilir [29] :

- Stokastik PA'lar ile modellenen sistemlerin ulaşılabilirlik ağacı basitçe elde edilebilir. Böylece başlangıçtan itibaren ulaşılacak tüm durumlar ayrıntılı bir şekilde görüntülenebilir.

- Stokastiklik özelliğiyle güçlendirilmiş PA modelleri, matematiksel ve grafiksel alt yapısı ile güçlü bir araç olmalarının yanı sıra, eş zamanlılık, paylaşılan kaynak kullanımı ve çıkmazlar gibi durumların kolaylıkla modellenmesine olanak tanır.

3.15. Petri Ağlarında Bulanıklık Kavramı

1965 yılında Zadeh [55] tarafından ortaya konan “bulanık küme teorisi” (fuzzy set theory), sistemdeki kesinlik içermeyen bilgiden kaynaklanan belirsizlik durumunu anlatırken aynı zamanda belirsizlik durumunu sayısal hale getirir. Kesinlik içermeyen yani belirsiz bilgileri temsil edebilme yeteneği, bulanık küme teorisinin literatüre sağladığı en önemli katkıdır.

Karmaşık sistemlerin modellenmesinde ortaya çıkan belirsizlikler

- Rassallık (randomness)
- Bulanıklık (fuzziness)

olarak 2 başlıkta incelenebilir. Rassallıktan doğan belirsizliklerde ortaya çıkan sonuçlara “olasılıklar” etki eder. Ancak bulanıklıktan doğan belirsizliklerde olasılıklar sonuçlar üzerindeki tek etken değildir.

Genel itibarıyla “bulanık kümeler” (fuzzy sets) sınırları düzgün tanımlanamayan aktiviteleri içerir ve bu kümelerde gözleme dayalı olarak tanımlama yapılamaz [56]. Bulanık küme teorisinin kesin olmayan (imprecise) terimleri ifade ederken sayısal kavramlar yerine sözel kavramları kullanabilme yeteneği bu teoriyi rassallıktan ayırır.

“Klasik Küme Teorisi” ile “Bulanık Küme Teorisi” ni kesin olarak birbirinden ayıran kavram “üyelik” kavramıdır. Klasik küme teorisine göre bir eleman o kümenin ya üyesidir ya da üyesi değildir. Üye olan elemanların aldığı derece değeri “1” iken üye olmayanlar “0” değerini alır. 1 ile 0 arasında hiçbir değer alınamaz. Bulanık küme teorisinde ise üyelik kavramı bu kadar keskin değildir ve elemanlar “0” ile “1” arasında bir derece değerine sahip olabilir. Örneğin beyaz renkli arabalar ele alınacak olursa klasik küme teorisine göre bir araba ya beyazdır (beyaz araba kümesine üyedir ve 1 üyelik derecesi değerini alır) ya da

değildir (beyaz araba kümesine üye değildir ve 0 üyelik derecesi değerini alır). Ancak bulanık küme teorisine göre beyaz rengin tonlarına sahip olan bir araba da yine bu kümeye dahil edilir ve derecelendirilir. Tam olarak beyaz renge sahip olan bir arabanın üyelik derecesi 1 olurken beyaza yakınlıklarına göre diğer renk tonlarına sahip arabalar da derecelendirilir. Böylece bütün arabalara bir derece atanmış olacaktır. Yani kısaca klasik küme teorisine göre oluşturulan kümelerdeki elemanlar üyelik özelliğini kesin bir şekilde karşılıyorken, bulanık kümelerde böyle bir kesinlik söz konusu değildir. Bulanık kümelerde üyelik kavramı “yaklaşıklık” (approximate) ile açıklanabilir [57].

Bulanık kümelerdeki üyelik fonksiyonları birden çok şekilde tanımlanabilir. Literatürde sıklıkla karşılaşılan fonksiyon tipleri üçgen üyelik fonksiyonu, yamuk üyelik fonksiyonu ve çan eğrisi (normal dağılım) üyelik fonksiyonudur.

3.16. Modellemede Petri Ağlarının Kullanıldığı Alanlar

Petri ağları ortaya konulduğu ilk dönemlerdeki kısıtlı kullanım alanının aksine günümüzde pek çok farklı sistemin modellenmesi ve analizi için sıklıkla tercih edilen bir araç haline gelmiştir. Sistemlerin modellenmesi ve performans analizi için Petri ağlarının tercih edildiği alanlar şöyle sıralanabilir [33][58][59] :

1. Farklı çeşitte üretim sistemlerinde, sistemlerin özellikleri yansıtılacak şekilde modellenerek varış zamanı, bekleme süresi, kuyruk uzunluğu, makine kullanım oranı, çıktı oranı vb. değerlerinin belirlenerek performans analizleri yapılması yoluyla sistemin kontrolü ve izlenmesi sağlanır.

2. Üretim sistemleri için geliştirilen modellere zaman entegrasyonu ilavesiyle modellenen sistemin gerçek zamanlı kontrolü yapılabilir.

3. Üretim sistemlerindeki işlerin kaynaklara nasıl atanacağını belirlemek üzere yapılan çizelgeleme çalışmalarına imkân tanır.

4. Tedarik zincirlerinin modellenerek, tüm tedarik zinciri üyelerinin kontrolü, değerlendirilmesi ve yönetiminde kullanılır.

5. Yazılım sistemleri, iletişim ağları, veri tabanı sistemleri vb. sistemlerin olduğu bilişim sektörlerinde modelleme aracı olarak kullanılır.

6. Devre sistemlerinin modellenmesi yoluyla tasarım ve kontrolü, sinyalizasyon vb. amaçlar doğrultusunda elektrik-elektronik sektöründe yaygınlıkla kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında PA, tanıtımı Bölüm 5.1.4'te yapılan bir EÜH'nin, geçiş zamanlı PA'ların kullanıldığı 3 farklı modelleme yaklaşımı ile modellenerek performans

analizlerinin yapılması neticesinde, bu 3 farklı modelin birbirleriyle kıyaslanarak sistemi en iyi yansıtan yaklaşımın saptanması amacıyla kullanılmıştır.

3.17. Petri Ağları ile Modellenen Üretim Sistemlerinde Performans Analizi

Üretim sistemlerinin tasarımı ve geliştirilmesi evresinde, sistemden beklenen performans değerlerine göre hareket edilir. Gerçek sistemde görülmesi arzu edilen sonuçlar için tasarım ve model aşaması büyük önem taşımaktadır. Çünkü beklenti, amaçlanan en yüksek performans değerine erişilmesini sağlayan bir model geliştirmektir. Mevcutta var olan bir sistem modellenecekse, sistem tam anlamıyla incelenerek eğer varsa eksikliklerin saptanması, gerekli değişikliklerin nerede ve nasıl yapılacağı belirlenebiliyor olması istenir. Bu sebeplerle üretim sistemlerinin düzgün bir şekilde modellenebilmesindeki esas önem, sistemin performans değerlerinin değerlendiriciler tarafından en doğru şekilde analiz edilebilmesinin sağlanmasıdır.

Performans analizi konusunda sıklıkla kullanılan “makine kullanım oranı”, “çıkış oranı”, “varış zamanı”, “bekleme süresi”, “kuyruk uzunluğu”, “ara stok miktarı”, “arıza oranı” vb. ölçütler sistemin çalışma performansı hakkında bilgi verirler. Bu ölçütler PA’lar ile modellenen sistemlerden kolaylıkla elde edilebilir.

4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Petri Ağları ilk olarak Carl Adam Petri [10] tarafından 1962 yılında doktora tezi çalışmasında bir bilgisayar sisteminin eşzamanlı bileşenleri arasındaki iletişim teorisinin temelini tartışmak amacıyla ortaya konmuştur. Bu çalışma ile petri ağlarının kullanımı ve incelenmesi yaygınlaşmıştır [9].

Birçok araştırmacı, PA'ları üretim sistemlerinin tasarımına, test edilmesine ve geliştirilmesine başarıyla uygulamıştır [2].

1977 yılında Peterson [60], PA'nın temel kavramlarını ve kullanım alanlarını incelemek için yaptığı çalışmada PA'nın eşzamanlı ve eşzamansız olaylar için temel bir modelleme aracı olarak kabul gördüğünü söylemiştir. Ancak PA'nın karar verme ve analiz açısından kullanılabilirliğinin kısıtlı olduğunu düşünmüş ve bu nedenle de karmaşık sistemleri modellemede yetersiz olabileceğini söylemiştir.

1983 yılında üretim sistemlerinin modellenmesi ve analizi için PA'nın ilk kez kullanılması Valette et al., [61] tarafından gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada PA'nın EÜS'de taşıma sistemleri için uygulanabilirliğini test etmek amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda bir otomobil firmasındaki taşıma sisteminin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Sistemin iyi bir şekilde yapılandırılması halinde bu modelleme aracının EÜS için kullanılmasının uygunluğu çalışma sonunda ortaya konmuştur.

1983 yılında Dubois and Stecke [62]' in yapmış olduğu çalışma ise PA'nın üretim sistemlerinde kullanılmasının ilk örneklerindedir. Bu çalışmada üç tip parçanın üretildiği üç farklı makine ve her parça için üç ayrı taşıma paletinin bulunduğu bir üretim sisteminin modellenmesi ve analizi için zamanlı PA kullanılmıştır. PA ile yapılan analiz sonucunda makine kullanım oranları, çevrim süresi, üretim oranları gibi önemli performans kriterleri elde edilmiştir.

Yine 1983 yılında Valette et al., [61] tarafından PA kullanılarak yapılan modelleme çalışmasını 1984 yılında yaptığı çalışması ile geliştiren Alla et al., [63] aynı otomobil sistemini renkli PA kullanarak modellemiştir. Renkli PA'nın EÜS'lerde uygulanmasına dair ilk örneklerden olan bu çalışmada Renkli PA'nın bir alt sınıfı tanıtılmıştır. Karmaşık bir EÜS'nin renkli PA modeli sunulmuş ve modelin kilitlenmesiz ve sınırlı bir model olduğu kanıtlanmıştır.

1985 yılında Narahari and Viswanadham [64] ise EÜS'leri modellemek ve analiz etmek için yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu yaklaşımda, ilk önce verilen EÜS'nin bir PA modeli yukardan aşağıya inşa edilmiş ve daha sonra kilitlenmelerin varlığı/yokluğu gibi EÜS davranışının önemli niteliksel yönleri analiz edilmiştir. Yaklaşımın temelinde, bireysel ağların değişmezleri bilindiğinde, sonlu sayıda PA'nın birleşiminin değişmezlerini hesaplamak vardır. Bu teoremin ispatı üç makine ve iki tampondan oluşan bir otomatikleştirilmiş transfer hattı ve iki çeşit parçadan oluşan basit bir EÜS kullanılarak yapılmıştır.

1986 yılında Feldbrugge and Jensen [65] tarafından, çalışmanın yapıldığı yıla kadar PA modelleme aracı olarak geliştirilmiş tüm araçlar bir araya getirilerek bir inceleme yapılmıştır. Geliştirilen her bir aracın kullanımı ve metodolojisine ilişkin bir rehber niteliğindedir. Çalışmanın yapıldığı 1986 yılına kadar mevcut olan tüm ağ tabanlı araçların özelliklerine değinilmiştir. Bu sayede söz konusu yıla kadar PA modelleme için kullanılmış tüm araçlara genel bir bakış açısı sağlar.

1986 yılındaki bir başka araştırmada Bruno and Marchetta [66] gerçekleştirdikleri çalışma kapsamında zamanlı PA üzerinde durmuşlardır. Amaçlarının makine kullanım oranlarını enbüyüklemek olduğunu söyleyen yazarlar bu amaçla üç makine, bir stok alanı ve bir robota sahip bir üretim hücresini zamanlı PA ile modellemişlerdir.

1988 yılında Silva et al. [67] yaptıkları çalışmanın amacının uzman olmayan kişilere EÜS'lerin geliştirilmesiyle ortaya çıkan temel konuları ve üretim mühendislerine çalışmalarında yardımcı olmak için PA'ların nasıl kullanıldığını tanıtmak olduğunu söylemiştir. Üretim sisteminin modellenmesi, analizi, performans değerlendirmesi, çizelgeleme ve kontrol uygulamasının bir EÜS'de PA aracılığıyla nasıl yapıldığını detaylıca anlatan bu makale sonucunda bu yaklaşımın avantajlarına değinilmiştir. PA teorisinin uygulama alanının oldukça geniş olduğuna vurgu yapılmış; planlama, gerçek zamanlı kontrol, performans değerlendirmesi gibi kritik konularda gerçekçi çözümlerle öne çıktığı söylenmiştir. Yazarlar çalışmanın yapıldığı 1988 yılında PA teorisinin EÜS'lerin modellenmesi amacıyla endüstride gerçek hayat problemlerinde çok sık başvurulacak bir yöntem olacağını da öngörmüştür.

1988 yılında Balbo and Bruell [54] karmaşık sistemlerin davranışlarının modellenmesi konusunda kuyruk modelleri ve genelleştirilmiş stokastik PA yöntemlerini birleştirerek güçlü bir teknik ortaya koymuşlardır. Ortaya konulan bu hiyerarşik teknik ile iki yöntemin

en iyi yönlerinin birleştirilmesine odaklanılır. Her iki yöntemin çözmekte kısıtlı kaldığı büyük modeller, yöntemlerin birleştirilmesiyle çözülebilir hale gelmiştir.

1988 yılında EÜS'lerin PA ile modellenmesi alanında yapılan araştırmaların başında gelen bu çalışmada ise Barad and Sipper [68] esnekliğin çok boyutlu karakteri üzerine bir tartışma sunmuş ve esnekliği tanımlamak ve ölçmek için bir yaklaşım önermiştir. Çalışmada PA, farklı sistemleri bir esneklik temelinde karşılaştırmak ve böylece arzu edilen esneklik özelliklerini ortaya çıkarmak amacıyla bir EÜS'nin tasarım temsili olarak kullanılmıştır.

Al-Jaar [69] 1989 yılında yapmış olduğu doktora tezi çalışmasında bilgisayarla bütünleşik imalat sistemlerinin (CIM) tasarımı ve performans değerlendirmesinin etkin bir şekilde yapılabilmesi amacıyla PA tabanlı esnek bir yapıya sahip bir modelleme metodolojisi geliştirmiştir. CIM yapılarının entegre ve disiplinler arası yapılar olması sebebiyle modellenmesi ve anlaşılması güç yapılar olduğunu belirten araştırmacı çalışmada istenen modellerin karmaşık doğasını yansıtır analizini etkin bir şekilde yürütebilen en iyi modelleme metodunun PA olduğunu belirtmiştir. Bunun sebebinin ise PA'nın üretim sistemlerinin senkron ve asenkron faaliyetlerini kolayca yakalayabilmesi olduğunu söylemiştir.

Murata [25] tarafından 1989 yılında yapılan çalışmada grafiksel ve matematiksel bir modelleme aracı olan PA'nın özelliklerinin derinlemesine bir incelemesi yapılarak, analizi ve uygulamasında kullanılan yöntemler araştırılmıştır. Çalışma PA'nın davranışsal ve yapısal özelliklerinin aktarıldığı, PA uygulamalarının yapıldığı ve analiz yöntemlerinin irdelendiği PA çalışmalarının bir rehberi niteliğindedir.

1990 yılında Valavanis [70] tarafından birden fazla türde geçiş, yer, jeton ve yönlü oklar ile genişletilmiş yeni bir PA sınıfı önerilmiştir. Önerilen yöntem ile oluşturulan sistem modelinin canlı, sınırlı ve tutarlı olacağı belirtilmiştir. Her operasyon için gerekli kaynakların belirlenmesinin ardından tüm sistem alt sistemlere ayrılarak modelleme yapılır. Belirli birleştirme kurallarına dayalı gerçekleştirilen bu yöntem esnek üretim sistemlerinin hiyerarşik modellenmesi için kullanılır. Valavanis önerdiği bu modelleme yaklaşımı ile büyük bir sisteme ait daha kapsamlı bilgiler edinilebileceğini belirtmiştir.

Bobbio [71] tarafından 1990 yılında yapılan çalışma Peterson [60]'ın görüşlerinde yarıldığını kanıtlar niteliktedir. Bobbio karmaşık sistemlerin zamana karşı davranışlarının modellenmesi ve analizinde PA'yı güçlü bir modelleme aracı olarak tanıtmıştır. Zamanlı PA ve stokastik PA tanımlarına vurgu yaparak bu alanda birkaç örneğe değinmiştir. PA'yı güvenilirlik analizinde diğer modelleme tekniklerinden ayıran özel yönlerinden bahsetmiş

ve PA'nın özellikle karmaşık stokastik sistemleri temsil etmek ve değerlendirmek için kullanıcı dostu bir dil olarak uygun bir şekilde kullanılabilceğini göstermiştir.

1990'da Zhou et al. [72] kaynak paylaşımli bir üretim sisteminin modellenmesi ve analizinin stokastik PA ile yapılması üzerinde durmuştur. Sıralı olarak paylaşılan kaynaklara sahip bir sistemin hangi durumlarda kilitlenme yaşayabileceğini açıklamışlardır. Kilitlenmeyen ve kilitlenebilen sistemler için performans analizi sorunları tartışılarak bu sistemler arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Ortaya koyulan yaklaşım bir üretim sisteminin stokastik PA ile modellenerek gösterilmiştir.

1990 yılında Al-Jaar and Desrochers [29] genelleştirilmiş stokastik PA ile modelleme üzerinde durarak, bu yaklaşımın büyük ve karmaşık sistemlerin modellenmesi ve analizi için temel yapı taşlarından olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar genelleştirilmiş stokastik PA'nın otomatik üretim sistemlerinde nasıl kullanıldığına dair bir yaklaşım sunmuşlardır. Önerilen modüler yaklaşım sayesinde model oluşturmanın ve sonrasında ise analiz etmenin kolay ve anlaşılır olduğunu savunmuşlardır.

1991 yılında Zhou and DiCesare [73] EÜS'lerde kaynak paylaşımli bir sistemin modellenmesi ve analizi üzerinde çalışarak; bir paralel ve sıralı karşılıklı dışlama yöntemi önermiş ve bu yöntemleri formüle etmişlerdir. Önerilen yöntem iki basit üretim sistemi kullanılarak gösterilmiştir.

Koh and DiCesare [74] 1992 yılında yapmış oldukları çalışmada otomatik üretim sistemlerinde sıklıkla rastlanan kaynak paylaşımı sorununa değinmişlerdir. Bu sorunu açıklamak amacıyla sapma sınırını kullanan yazarlar; kaynak paylaşımli ağı tek bir R kaynağını ortak kullanan k adet canlı ve sınırlı döngüden oluşan ağ olarak tanımlamışlardır. Çalışmada genelleştirilmiş PA'nın canlılığını analiz etmek için sapma sınırları gösterilmiştir. Ayrıca sonuçlar, genelleştirilmiş PA'nın sentezlenmesine uygulanmıştır. Geliştirilen teoremlerin, otomatik üretim sistemlerinin modellenmesi ve kontrolünde uygulanabilirliği belirtilmiştir.

1992 yılında Zhou et al. [75] yapmış olduğu bir başka çalışmada ise yine kaynak paylaşım problemi üzerinde durularak otomatik üretim sistemlerinde uygulanabilen bir metodoloji sunulmuştur. Bu metodoloji PA modellerinin sistematik bir şekilde sentezlerinin yapılabilmesi için geliştirilmiş hibrit bir metodolojidir. PA'yı öncelikle yukardan aşağı modüler bir yaklaşımla ayrıştırıp ardından paylaşılmayan kaynakların eklenmesiyle tekrar birleştirilmesine dayalı olan bu yöntem; dört adet makine, iki adet montaj hücresi, iki adet

paylaşımli robot ve iki adet tampondan oluşan bir üretim sisteminin modellenmesiyle gösterilmiştir.

1992 yılında Zhou et al. [76] bir EÜS'nin PA aracılığıyla ayrık olay kontrol kodunun tasarımı ve uygulaması üzerine çalışmış ve ağda istenen canlılık, sınırlılık ve tersinirlik özelliklerini garanti eden bir melez metodoloji ortaya koymuştur. Söz konusu sistem hem parça işleme hem de montaj operasyonlarını gerçekleştiren robotik yükleme ve boşaltma ile iki farklı işleme yapabilen iş istasyonu, bir robotik montaj iş istasyonu, bir malzeme hareket sistemi, hammadde ve nihai ürün envanteri depolama ve bir otomatik depolama ve geri alma sistemi içermektedir.

1993 yılında Jeng and DiCesare [77] PA ile modellenmiş bir otomatik üretim sisteminin analizi için mevcut tüm tekniklerin incelendiği geniş bir araştırma sunmuştur. Yukardan aşağıya, aşağıdan yukarıya olmak üzere iki başlık altında incelenen sentez yöntemlerine ek olarak indirgeme yöntemleri de incelenmiştir. Buna göre yukardan aşağı tekniklerin sistemin tamamını bir bütün olarak görüntüleyebilmesinin önemli bir avantaj olduğu, aşağıdan yukarıya tekniklerin ise kaynak paylaşımı gibi eşzamanlı etkileşimleri açıklayan sistemleri belirlemek için kolaylık avantajına sahip olduğu sonucuna varmıştır. İndirgeme yöntemlerinin ise karmaşık sistemlerin PA'nın analizi için basit ve anlaşılır bir yol sağladığını belirtmiştir.

Zuberek and Kubiak [78] 1993 yılında bir EÜS'nin modellenmesinde zamanlanmış PA ile çalışarak, zamanlanmış PA'nın nasıl kullanıldığını açıklamışlardır. Sistemdeki temel işlem sürelerinin parametre olarak kullanılacağını belirterek sistemin çevrim süresinin, alt sistemlerin çevrim süreleri ile hesaplandığını göstermişlerdir.

1993 yılında Raju and Chetty [79] EÜS'lerde otomatik yönlendirmeli araçlar için zamanlı PA'ya dayalı bir modelleme çalışması yapmışlardır. AGV'ler, iş parçalarını kılavuz yolları izleyerek iş istasyonları arasında hızla taşıyan sürücüsüz araçlardır. Otomatik yönlendirmeli araç sistemleri (AGVS'ler), esneklikleri ve uyarlanabilirlikleri nedeniyle EÜS'lerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu sistemler içerdii değişkenlerin sayısı ve rastgeleliği nedeniyle oldukça karmaşık ve pahalı sistemlerdir. Bu sistemlerin tam potansiyelini gerçekleştirmek için dikkatli tasarım ve operasyonel planlama esastır. Tüm bunlara istinaden yapılan bu çalışmada EÜS'ler için AGVS'leri modellemek ve simüle etmek için zamanlı PA tabanlı bir metodoloji önerilmiştir. Önerilen metodoloji bir örnekle açıklanmıştır. Makine ve AGV çizelgeleme kurallarının sistem performansı üzerindeki etkisi de çalışma kapsamında araştırılmıştır.

1993 yılında Zhou et al., [80] tarafından yapılan bir başka çalışmada ise EÜS'lerin modellenmesi ve analizi için kapsamlı bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Ele alınan EÜS'nin özelliklerini korumak ve yapılacak modele eksiksiz bir şekilde yansıtılabilmek için yukardan aşağı iyileştirme, sistem ayrıştırma ve modüler birleştirme yöntemlerini kullanan araştırmacılar, ayrıca modellemeye deterministik zamanı da ekleyerek sistemin çevrim süresi analizini de yapmayı hedeflemiştir.

Teng and Zhang [7] 1993 yılında üretim sistemlerini modelleme ve simülasyon çalışmalarında ayrıştırma problemini tartışmışlardır. DES'lerin modellenmesi ve analitik olarak değerlendirilmesi karmaşıklıkları nedeniyle zordur. Bu sebeple simülasyon araçları bu sistemlerin modellenmesi ve analizinde kullanılmak üzere en etkili ve popüler araç haline gelmiş olsa da , araştırmacılar simülasyon tekniklerinin kullanılmasının yalnızca program geliştirme sürecinde değil, aynı zamanda program yürütme sürecinde de uzun zaman ve büyük çaba gerektirdiğini söylemişlerdir. Araştırmacılar tarafından grafik gösterimlerinin etkili olabileceğinin görülmesiyle PA ile modelleme yöntemini önermişlerdir. Bu sebeple çalışmada PA, bir üretim sistemi kontrol çalışmasında modelleme aracı olarak seçilmiştir. Üretim sistemi işlemlerindeki paralellik özelliği, geliştirilen ayrıştırma prosedürü ile çıkarılır. Bir sistemin bu ayrıştırma prosedürüne dayalı olarak birkaç alt sisteme bölünebildiği, alt sistemlerin ise daha sonra eş zamanlı olarak analiz edilebildiği görülmüştür.

1994 yılında Choi [9] yazmış olduğu doktora tezinde o zamana kadar yapılan çalışmaların teorik ve uygulama açısından PA'ların kısmi temsiline sahip olduğunu bu nedenle de ayrıntılı ve iyi bir şekilde organize edilmiş bir çalışma sunmayı amaçladığını belirtmiştir. Bu amaçla yaptığı çalışmaya PA modellerinin temel fikirlerini ve yapılarını tanıtarak başlamıştır.

Lee and Jung [81] ise 1994 yılında PA yaklaşımını esnek süreç planlaması alanında kullanmışlardır. Süreç planlaması kavramını genişleterek literatürden farklı olarak hem operasyon seçimi hem sıralamayı içeren bir planlama üzerine çalıştıkları yeni bir metodoloji sunarlar. Bu planlama; bütün sisteme ait kesici takımlar ve kesme parametreleri seçimi gibi bilgi yoğun problemler için uygun görülen yapay zekâ tabanlı bir hibrit metodoloji ve PA'ların birleştirildiği bir yaklaşım içermektedir.

1994 yılında Shiizuka and Suzuki [82] PA'ların EÜS'lerde bulunan AGV'lerin modellenmesindeki rolünü ve gücünü gösteren bir çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında eş zamanlı veya eş zamansız olarak davranabilen AGVS'ler PA kullanılarak

modellenmiştir. Araştırmacılar gelecek yıllarda modern üretim sistemlerinde EÜS'lerin öneminin artacağını vurgulamışlar, bu sebeple de AGV içeren EÜS'lerin modellenme ve analiz yönteminin PA'ya dayalı bir yaklaşımla tanımlanması gerektiğini söylemişlerdir. Bu anlayışla çalışmada 21 bileşenden oluşan bir EÜS için AGV sistemini modelleyen bir PA yaklaşımı sunulmuştur.

Zuberek and Kubiak [33] 1994 yılında zamanlı PA üzerine yaptıkları bu geniş araştırmada bir EÜH'nin zamanlı PA ile modellenmesi gösterilmiştir. Bu çalışmanın çok sayıda benzer ürün üretebilen büyük hacimli EÜS ile, daha küçük partiler halinde çeşitli ürünler üreten EÜS arasındaki boşluğu kapattığı söylenmiştir. Modelin çözümünde, temel işlem (yükleme, boşaltma, hareket etme gibi) süreleri analitik bir biçimde parametre olarak elde edilmiştir. Tüm bunların sonucunda zamanlı PA'ların tıpkı EÜS'leri modellediği gibi EÜH'leri de uygun şekilde modelleyebildiği gösterilmiştir.

1994'te Lee and DiCesare [83] yaptıkları çalışmada EÜS'lerin tam anlamıyla çizelgeleme ve denetim kontrollerinin edinilebilmesi için parça işlemenin yanı sıra iş akışının da dikkate alınması gerektiğini söylemiş ve bu amaçla söz konusu bu iki sistemi ayrı ayrı modellemek yerine tüm sisteme entegre edilebilen bir formülasyon geliştirmiştir. PA'ya dayalı bu modelleme yaklaşımı; modelleme için PA'nın ve çözüm için sezgisel aramanın kullanıldığı çizelgeleme metotlarında doğrudan kullanılabilir niteliktedir. Parça işleme ve parça taşıma sistemlerini birleştiren bu model EÜS'nin tamamını tek bir seferde programlamak ve kontrol etmek için kullanılabilir.

Zurawski and Zhou [8] 1994 yılında çalışmalarında hem akademide hem de sanayide araştırmalar yapabilecek araştırmacılar için PA'yı tanıtarak, endüstriyel alanda uygulanması için bir rehber oluşturmayı amaçlamışlardır. Bu amaçla PA'ların genel kavramlarını tanıtmış, uygulama ve analiz yöntemlerini açıklamışlardır. PA'ların özellikleri endüstriyel alandaki uygulama bağlamında incelenmiştir ve PA çeşitlerine değinilmiştir. PA'ların gelişmesini karmaşık endüstriyel sistemlerin anlaşılır bir şekilde modellenmesi ihtiyacına bağlayan araştırmacılar, sıradan PA bu iş için yetersiz kaldığı durumlar olduğunu altını çizmiştir. Bu nedenle de bu çalışmada da bahsedilen yeni PA türlerinin ortaya çıkması söz konusu olmuştur.

Venkatesh et al., [84] 1996 yılında bu makalede üretim sistemi yönetiminde sık karşılaşılan sorunları incelemek için güçlü bir araç olarak gördükleri PA'ları kullanmışlardır. Her bir birimin işlem süreleri, parti büyüklükleri, sistemde bulunan AGV sayısı ve rotaları ve kurulum süreleri gibi birçok parametre nedeniyle bu tür problemleri çözmenin zor ve

karmaşık olduğunu söyleyen yazarlar, bunun için bir PA modeli geliştirerek, sistemlerin performansını "itme" ve "çekme" paradigmaları kullanarak analiz etmişlerdir. Çalışmada performans kriterleri tampon büyüklüğü, çıktı oranı, makine, AGV ve robot kullanım oranı olarak belirlenmiştir.

1996 yılında Murata [85] yaptığı çalışmada zamansal belirsizlikleri ele alarak yüksek seviyeli bir PA modelinde bulanık zamanlamayı tanıtmıştır. Geliştirilen metodolojide ağdaki her geçişin en fazla bir kez ateşlendiği belirli sonlu ateşleme dizileri tanımlandığından bulanık zaman hesaplamalarının çok hızlı bir şekilde yapılabildiğini, böylece bu metodolojinin zaman açısından kritik uygulamalar için uygun hal geldiğini belirtmiştir. Araştırmacı bulanık mantık alanında yapılan modelleme çalışmalarında bir dereceye kadar belirsizliğe izin verilmesinin çok karmaşık sistemlerin modellenmesini ve analizini basitleştirme konusunda iyi bir yaklaşım olduğunu savunurken ayrıca bu basitleştirmeler sonucu elde edilen sonuçların kesinliği az olsa da orijinal sistemlerden uzaklaşmadığını ve aralarındaki bağı korunduğu ortaya koymuşlardır.

Jones et al., [86] 1996 yılındaki çalışmalarında otomatikleştirilmiş üretim sistemlerinin gittikçe karmaşık bir hal almasıyla birlikte yüksek seviyeli ayrık olay kontrol sistemlerinin modellenmesi için etkili bir tasarım aracına ihtiyaç duyulduğunu, PA'ların ise bu tür ayrık olay kontrol sistemleri (Discrete Event Control System-DECS) için en etkili yöntemlerden biri olduğunu savunmuşlardır. Bir imalat sisteminde DECS tasarımı ele alınarak üretim sistemi için bir PA denetleyicisi geliştirilmiştir.

Yeung et al., [87] 1996 yılında yayınladıkları bu makalede, EÜS'lerin dinamik davranışını modellemek için "Bulanık Renkli PA" adlı ağ tabanlı bir yapı önermişlerdir. Renkli PA dinamik sistemlerde görüntülenen eşzamansız ayrık olayları modellemek için yaygın olarak kullanılırken, "Bulanık PA" belirsizlik içeren sistemlerde kullanılmaktadır. Makalede ortaya konan metodoloji "Renkli PA" ve "Bulanık PA" kavramlarının entegrasyonuna dayanmaktadır.

Koriem and Patnaik [88] 1997 yılında, boyutu ve karmaşıklığı artan sistemlerin modellenmesi için "genelleştirilmiş stokastik Petri ağı" (generalized stochastic Petri nets-GSPN) yaklaşımının avantajlı olduğunu savunan bir çalışma ortaya koymuşlardır. Çalışmada genelleştirilmiş stokastik PA modellerinin söz konusu karmaşık sistemlerin durum uzayının büyüklüğünün anlaşılabilirlik açısından sorun yarattığı belirtilmektedir. Bu nedenle genelleştirilmiş stokastik PA modellerinin durum uzaylarını küçültmek amaçlanarak geliştirilen metodoloji kapsamında örnekler analiz edilmiştir.

1997 yılında Jeng [89] EÜS'lerin modellenmesi ve analizi için PA'lara dayalı entegre bir sentezleme teorisi önermiştir. Teori, ağ modellerini oluşturmak için aşağıdan yukarıya veya modüler birleştirme yöntemlerini kullanır. Her modül, EÜS'deki kaynak türlerini kontrol eden bir alt sistemi temsil eden bir kaynak kontrol ağı olarak modellenmiştir. Modüller arasındaki etkileşimler, ortak geçiş ve geçiş alt ağları olarak tanımlanır. Modüllerin birleştirilmesinin ardından elde edilen ağın canlılık ve sınırlılık özelliklerini taşıdığı gösterilmiştir. EÜS'lerin modellenmesi için bu teorinin kullanılabilirliği gösterilmiştir.

PA'ların niteliksel ve niceliksel analiz açısından güçlü bir araç olduğunu belirten Holloway et al., [90] 1997 yılında yaptıkları çalışmada hesaplama karmaşıklığını azaltmak için PA'ların yapısal özelliklerinden yararlanan modelleme, analiz ve sentez prosedürleri geliştirmeyi amaçlamışlardır.

1997 yılında Proth et al., [91] çalışmada tersinir, canlı ve sınırlı bir PA modeli üzerinde durulmuştur. Bu modelin birbirinden bağımsız olarak ateşlenebilen bağımsız geçişlere sahip olmasının üretim sistemlerini modellerken önemli bir özellik olduğu açıklanmıştır. Modüler yaklaşımın karmaşıklıkla başa çıkmanın bir yolu olması sebebiyle, ulaşılan sonuçların büyük ölçekli üretim sistemlerinin tasarımı, analizi ve kontrolüne ışık tutacağı düşünülmüştür.

1997 yılında Ezpeleta and Colom [92] tarafından gerçekleştirilen çalışmada bir EÜS'nin yerleşim düzeni ve işlenecek farklı parça türlerine karşılık gelen süreç planları seti arasındaki farklılığın avantajını kullanan, geniş bir EÜS sınıfına uygulanabilir bir modelleme metodolojisi araştırılmış ve bu iki bileşenin ayrı bir modellenmesi önerilmiştir. Her iki model de renkli PA ile temsil edilen bir modele entegre edilmiştir. Ayrıca çalışmada sistemdeki her bir parçanın işlenmesinin tamamlanmasını sağlayacak şekilde kilitlenme önleme kontrolü uygulanmıştır. Araştırmacılar öncelikle bu tür sistemlerin modellenmesine odaklanmış, ardından ise bu tür sistemlerin herhangi bir kilitlenme sorunu ortaya çıkmayacak şekilde kontrolü için çalışmışlardır. Ancak yazarlar bu çalışmada kullanılan metodolojisinin genel PA için tanımlanmadığını ekleyerek çalışmanın eksik kaldığı yönlerin olduğunu da belirtmiştir.

Yan et al., [93] tarafından 1997'de yapılmış olan çalışmada EÜS'lerin modellenmesi ve kontrolü amacıyla yeni bir model sınıfı önerilmiştir. Bu yeni model sınıfı "Genişletilmiş Yüksek Seviye Değerlendirmeli PA" (Extended High Level Evaluation Petri Net-EHLEPN) olarak adlandırılmaktadır ve basit, algılanabilir ve açıklayıcı olup çıkarım yapma ve karar verebilme özelliklerine sahip olduğu vurgulanmıştır. Bu model sınıfının dinamik

çizelgeleme kurallarının incelenip değerlendirilebileceği gerçek zamanlı sistemlerin modellenmesinde yetenekli olacağı söylenmektedir. Araştırma sonucunda elde edilen deneysel sonuçlara göre, yeni çizelgeleme stratejilerine sahip bu tür sistemler için verimin artabileceği gösterilmiştir.

Jeng [94] tarafından 1997’de yapılan bir başka çalışmada ise hata düzeltme kavramıyla ilgili önemli bir özellik olan tersinirlikle başa çıkma yeteneği ile bir PA sentezi teorisi geliştirilmiştir. Teori, paylaşılan kaynaklı otomatik üretim sistemlerini modellemek amacıyla bir PA sınıfını sentezlemek için önerilmiştir. Ağın sınırlılık ve canlılık özellerine sahip olması, modellenen sistemin üretimde iki tür istenmeyen davranış olan kapasite taşmalarına ve kilitlenmelere sahip olamayacağı anlamına gelir. Bu yazıda ayrıca ağın tersinirlik özelliğine de sahip olduğu kanıtlanmıştır.

Gündoğar ve İpek [95] 1997’de yaptıkları geniş araştırmada temel PA, renkli PA ve zamanlı renkli PA incelenmiş ve açıklayıcı bir örnek olarak PA ile bir planlama modeli sunmuşlardır. Çalışmada PA ile modelleme sayesinde doğruluk ve etkinlik analizlerinin kolayca yapılabildiği vurgulanırken, PA ile modellenen sistemin geliştirilip değiştirilmesi için öneriler de sağlanabildiği söylenmiştir. Yazarlar, çalışmada ağ modellerinin tasarımcı ve kullanıcı arasındaki iletişimi kolaylaştıran grafiksel yapısına da dikkat çekmiştir. Ayrıca PA’ların özellikle üretim sistemlerinin modellenmesi ve analizi için büyük yararlar sağlayacağını öngörmüşlerdir.

1998 yılında DES’ler daha karmaşık hale geldikçe etkili bir tasarım aracı ve uygulamasına duyulan ihtiyacın arttığına yazdığı doktora tezi çalışmasında değinen Uzam [31] sonlu durum makinelerine ve biçimsel dillere dayanan denetleyici kontrol teorisinin (supervisory control theory-SCT), DES çalışmaları için iyi kurulmuş bir çerçeve olduğunu söyler ve bu tez kapsamında denetim kontrolünde PA’ların kullanımını araştırmıştır.

Allam and Alla [96] 1998’de elektronik parça üreten bir imalat sisteminin modellenmesi ve analizi için karma bir PA tabanlı yaklaşım önermiştir. Bu sistemlerde “Ayrık PA” kullanılmasının olası durumların sayısının fazla olması ve simülasyon maliyetlerinin çok olması nedeniyle uygun olmadığını söylemişlerdir. Yazarlar, önerdikleri karma PA modellemesinin daha doğru ve daha hızlı simülasyon sonuçları verdiğini bir örnek üzerinde açıklamışlardır.

1998 yılında Wang and Wu [97] ilk kez otomatik üretim sisteminde (AMS) modelleme için “Renkli Zamanlı Nesneye Yönelimli Petri Ağı” (Coloured Timed Object-Oriented Petri Net-CTOPN) kullanılmasını önermişlerdir. Yazarlar bir renkli zamanlı nesneye yönelik

PA modelinin dört özellikten oluştuğunu söylemişlerdir. Birinci özellik bir AMS'nin dinamik davranışının nesne yönelimli temsil edilmesi gerektiğidir. İkinci özellik bir AMS'de malzeme akışını ve zaman kısıtlarını modellemek için girdi/çıkı dönüşüm fonksiyonları, renkli jetonlar ve ilgili zaman gecikmesi özellikleri kullanılmasıdır. Üçüncü özellik bir AMS'nin kontrol mantığı/dinamik davranışı açıkça analiz edilebilir olmasıdır. Dördüncü ve son özellik ise bir AMS'yi aynı anda modellemek, programlamak ve kontrol etmek için entegre ve tutarlı bir ortam sağlanmasıdır. Yazarlar bu çalışma ile renkli zamanlı nesneye yönelimli PA yönteminin, bir AMS'nin dinamik davranışını iyi bir şekilde yansıttığını ortaya koymuşlardır.

Zhou and Jeng [98] 1998 yılında eşzamanlı ve çelişkili ilişkiler sergileyen DES'ler olarak karakterize edilebilen üretim sistemlerinin modellenmesi, analizi, simülasyonu, çizelgelemesi ve kontrolüne yönelik PA'lara dayalı bir çalışma yürütmüşlerdir. PA yaklaşımı, bu tür karmaşık DES'lerin tam olarak tanımlanmasını sağlar ve böylece hem niteliksel hem de niceliksel analiz, çizelgeleme ve ayrık olay kontrolünün gerçekleştirilmesine olanak tanır. Bu makale aynı zamanda öğretici bir makale olarak da nitelendirilebilir. Sistematik olarak bir model oluşturmak için, işlemler arasındaki temel ilişkiler, modüller ve genel bir modelleme yöntemi tartışılmıştır. Daha sonra, performans analizi için deterministik ve stokastik zamanlı PA tartışılmıştır. Bununla birlikte, stokastik zamanlı bir ağın performansını hesaplamak için, onun altında yatan Markov sürecini elde etmek amacıyla tüm durumları oluşturmak gerekli olduğu belirtilmiş ve de yöntemin büyük sistemlere uygulamanın mümkün olmayabileceği de eklenmiştir. Araştırmacılar simülasyonun gerçek dünyadaki durumlarda kullanıldığını ancak yine de zaman alan bir yöntem olduğunu belirtmiştir. Araştırmacılar bu çalışmada zamanlı PA'nın planlama ve kontrol amaçları için nasıl benimsenebileceğini de göstermeye çalışmıştır.

1998 yılında sürekli veya ayrık olaylı sistemlerin simülasyonunun temelinde niteliksel ve niceliksel olarak iki şekilde gerçekleştirildiğini belirten Fanni and Giua [99] bu çalışmada da fiziksel sistemlerin nitel modellemesi için PA'nın kullanılabilirliği üzerine çalışmışlardır. Nitel analizin dezavantajının simülasyonu gerçekleştirmek için etkili basit matematiksel araçlardan yoksun olunmasından kaynaklandığını belirterek, bir dizi nitel kısıtlamayı çözmek için ustalık ve buluşsal yöntemlerin kullanılmasını gerektiğini söylerler. Çalışmada bu sorundan kaçınmanın basit bir yolu önerilmiştir. Ayrık nicelik durum uzayıyla nitel bir sistemin DES olarak da görülebileceği söylenmiş, bu yüzden de DES'yi temsil etmek için kullanılan modellerden herhangi biri tarafından tanımlanabileceği aktarılmıştır. Çözüm

yaklaşımında bir fiziksel sistem davranışının nicel tanımı verildiğinde, karşılık gelen nitel açıklamanın türetildiği ve bir PA yapısında derlendikten sonra değişken miktar uzayının seçimine bağlı olarak aynı nitel davranışı temsil etmek için farklı PA yapıları kullanılabilirdi. Aynı zamanda bu yaklaşım, davranışları hem sürekli hem de ayrık olay dinamikleri tarafından tanımlanan yani hibrit olan sistemlerin de sadece DES olarak modellenmesi için de genişletilebilir.

1999'da Zimmermann ve Hommel [100] çalışmalarında üretim sistemlerinin etkili bir şekilde modellenmesine duyulan ihtiyacın her geçen gün arttığını belirtmişlerdir. Bu nedenle üretim sistemlerinin modellenmesine çok uygun olan yeni bir renkli PA modelleme yöntemini ortaya koymuşlardır. Büyük modellerin oluşturulmasına yardımcı olan bu yöntem sayesinde, farklı model parçaları, üretim sisteminin eksiksiz bir modelini oluşturmak için otomatik olarak birleştirilebilir. Ayrıca performans ve güvenilirlik analizinin yapılmasını sağlayan ölççekler modelden elde edilebilir. Anlatılan avantajların kullanılabilirliği çalışmada gerçek bir hayat örneği üzerinde de test edilmiştir.

Zhou and Jeng [98] tarafından 1998'de yapılan çalışmanın devamı niteliğinde 1999 yılında yine Jeng ve Zhou [101] tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise söz konusu üretim sistemlerinin modelleme ve analiz çalışmaları geliştirilmiştir.

2001'de Lefebvre [102] PA modellerindeki ana elemanlardan birisi olan geçişlerin ateşlenme sıklığı tahminine yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Kesikli ve sürekli PA modellerini ayrı ayrı inceleyerek her iki durum için de ateşleme sıklığı hesaplamasında kullanılabilir bir yöntem önermiştir.

Zimmermann and Rodrigues [103] üretim sistemlerinin PA ile modellenmesinde iki aşamalı bir metot ortaya koymuştur. 2001 yılında ortaya konan bu metot bir optimizasyon metodudur. Çalışmada tavlama benzetimi yoluyla öncelikle optimuma yakın bir sonuç bulunmuş, ardından ikinci aşamada ise optimum sonuç elde edilmiştir.

Bu alanda oldukça fazla çalışması olan Zuberek [104] tarafından 2001 yılında yapılan bir başka çalışmada zamanlı PA kullanılarak araç takımlarının modellenmesi ve analizi üzerinde durulmuştur. Modelde ele alınan sistem kapsamında tek bıçaklı takımların performansı ve çift bıçaklı takımların performansı PA ile modellenmesi sonucunda ayrı ayrı yapılmış ve iki durum birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Bir EÜS'de, sınırlı sayıda paylaşılan kaynak; yani makineler, robotlar, tamponlar, nedeniyle kilitlenmeler ortaya çıkabilir. Kilitlenme, bir dizi iki veya daha fazla işin her birinin, kümedeki diğer işleri kaynakları serbest bırakmak için süresiz olarak beklediği,

oldukça istenmeyen bir durumdur. 2002’de Uzam [105] yaptığı çalışmada EÜS’ler için optimal bir kilitlenme önleme politikası önermiştir. Önerilen optimal kilitlenme önleme politikası, belirli bir EÜS’nin bir PA modelinin erişilebilirlik grafiği analizinin kullanımına ve bir dizi yeni ağ elemanın, yani ilk işaretlemeye sahip yerler ve eklenecek ilgili yayların sentezine dayanmaktadır. Önerilen yöntem, üretim gereksinimlerine göre sistemdeki kaynakların maksimum kullanımına izin vermesi anlamında optimaldir. Yöntem iki adet örnek üzerinde uygulanarak açıklanmıştır.

21.yy. ekonomisinde sürekli hale gelen rekabet ve dinamik küresel pazar, üreticileri maliyetleri düşük tutarken ürünleri hızlı bir şekilde teslim etmelerini sağlamak için toplu üretim tekniklerinden esnek ve hızlı yanıt yöntemlerine geçiş yapmaya itmiştir. Bu sebeple ortaya çıkan kavramlardan biri “Kitlesel Özelleştirilmiş Üretim (Mass Customization Manufacturing-MCM)” kavramıdır. Bu tür sistemlerin amacı eşit parti büyüklüklerinde dahi özelleştirilmiş ürünler oluşturabilmektir. Böylelikle bu tür sistemlerin modellenmesi için de çalışmalara başlanmıştır. Söz konusu sistemlerin modellenmesi için sistemin karakteristik özelliklerinden doğan bazı zorluklar karşımıza çıkar. Bu özellikler, alt sistemler arasında eşzamanlılık, senkronizasyon ve iş birliğini içerir. Ayrıca MCM, kısaltılmış ürün yaşam döngülerini vurgular, bu da üretim hatlarının sık sık değiştirilmesi veya yeniden yapılandırılması gerektiği anlamına gelir. Son derece esnek ve yeniden yapılandırılabilir fabrikalar tasarlanmalı, simüle edilmeli ve analiz edilmelidir. Bu nedenle bu sistemlerin geliştirilmesini ve analizini desteklemek için modelleme ve simülasyona yönelik etkili yaklaşımlar geliştirilmesi gerektiği açıktır. Bu noktada ise karşımıza PA ile modelleme yaklaşımı bir çözüm olarak çıkmaktadır. Qiao et al., [106] 2002’de yaptıkları çalışmada renkli PA kullanarak söz konusu sistemleri temsil etmek için bir metodoloji sunarlar. PA’ların bu tarz sistemleri modellemek için gereken dinamikliği sağladığı belirtilmiştir.

Abdallah et al., [107] 2002 yılında EÜS’lerde çıkmazların olmadığı çizelgeleme problemleri üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Zamanlı PA ile çizelgeleme problemi için uygun bir algoritma oluşturmuşlardır. Önerilen algoritmada modeldeki geçişlerin ateşlenme sıraları dikkate alınmaktadır. Böylece optimum veya optimuma yakın bir çizelge oluşturulmaktadır. Oluşturulan modelde amaç ortalama akış zamanının enküçüklenmesidir. Bu amaçla orta ölçekli bir model üzerinde çalışıldığını belirten yazarlar, daha büyük boyutta problemler için modelin uygulanabilir olduğunu söylemişlerdir.

21.yyda imalat alanında yaşanan değişikliklerle birlikte ortaya çıkan imalat sistemlerinde özelleştirme problemine ilaveten istikrarsız talep de gündeme gelmeye

başlamıştır. Süregelen atölye içi hiyerarşik kontrol yapıları beklenmedik senaryolara karşı cevap üretebilmek ve üstesinden gelebilmek konusunda yeterince esnek değildir. Değişen müşteri ihtiyaçlarını karşılamak için tek aşamalı çok makineli sistem (Single Stage Multimachine System-SSMS) veya paralel makineler kavramı ortaya çıkmıştır. SSMS'ler, takım hareketi politikası ile karakterize edilir. Takım teslim sistemlerindeki son gelişmelerle birlikte, dinamik takım atamalı takım hareket politikası, makine yükleme sorunları gibi serbest bırakma sonrası planlama ihtiyacını ortadan kaldırır. Esneklik ve talep değişikliklerine hızlı yanıt, hiyerarşik olmayan kontrol şemasının başlıca avantajlarıdır. Hiyerarşik olmayan bir kontrol şeması altındaki EÜS kontrol problemleri, gerçek zamanlı olarak parça/makine/takım atama kararlarını içerecektir. Gerçek zamanlı operasyonel kararlar, sistemin makine arızası ve kararsız müşteri talepleri gibi değişikliklere hızlı yanıt vermesini sağlayacaktır. Bu sebeplerle Chen and Chen [108] tarafından 2003 yılında yapılmış olan bu çalışmada renkli PA kullanılarak bir EÜS'de dinamik alet tahsisi ve kontrolünün modellenmesine yönelik nesne yönelimli bir yaklaşım sunulmaktadır.

2004 yılında birden fazla ürüne sahip bir EÜS'de makineler, robotlar, tamponlar, vb. gibi sınırlı paylaşılan kaynaklar nedeniyle kilitlenmeler ortaya çıkabileceğini belirten Uzam [109] çalışmasında EÜS'ler için optimal bir kilitlenme önleme politikası elde etmek için gerekli hesaplamaları kolayca yapabilmek amacıyla çok büyük PA modellerini basitleştirmek için PA azaltma yaklaşımının kullanılmasını önermiş ve örnek bir çalışma üzerinde metodolojiyi göstermiştir.

Buchholz [110] 2004 yılında yürüttüğü çalışmasında stokastik PA'ya dayalı modellemelerin sayısal olarak analizinin yapılabilmesi için bir çözüm yöntemi ortaya koymuştur. Diğer yaklaşım yöntemlerinin aksine, önerilen yöntem, yüksek olasılığa sahip durumları ayrıntılı olarak ele alarak ve küçük olasılıklı durumları toplayarak uyarlanabilir.

Modern teknolojinin ilerleyişi ile diferansiyel denklemlerle kolayca tanımlanamayan insan yapımı dinamik sistemleri gittikçe artmıştır. İmalat sistemleri bu tür sistemlere örnek olarak verilebilir. Bu sistemlerdeki aktivite, insanlar tarafından tasarlanan operasyonel kurallar tarafından yönetilir. "Ayrık Olay Dinamik Sistemleri (Discrete Event Dynamic Systems-DEDS)" olarak adlandırılan bu sistemler bir işin gelişi veya gidişi veya bir görevin başlatılması ve tamamlanması gibi ayrık olayların asenkron oluşumları özellikleriyle karşımıza çıkar. Son yıllarda bu tür sistemlerin modellenip analiz edilmesine yönelik doğan ihtiyaçlar neticesinde yeni yaklaşımlar üzerinde durulmaya başlanmıştır. Koriem and Dabbous [111] tarafından 2004 yılında yürütülen bu çalışmada DEDS'lerin performans

analizi için PA ile modelleme tekniğine dayalı bir yaklaşım üzerinde durulmuştur. Diğer sistem modüllerini açıklamadan bir veya daha fazla sistem modülünü modelleme ihtiyacı neticesinde araştırmacı istenen modüllerin performans ölçüleri mevcut olduğunda, tüm sistem için gerekli performans ölçülerinin önerilen modelleme tekniği ile tahmin edilebileceğini söyler.

Gerçek hayatta üretim sistemlerinin modellenmesi ve optimizasyonu, çözülmesi zor ve de karmaşık problemlerdir. Bu problemler için kabul edilebilir bir zaman içerisinde iyi çözümler elde etmek oldukça güçtür. Karmaşık üretim sistemlerinin gerçekçi modelleri için iyi bilinen doğrudan optimizasyon yöntemleri kullanılması uygun olmayacaktır. Buradan yola çıkan Rodriguez et al. [112] yılında üretim sistemleri için modelleme aracı olarak PA'ları kullanmaya karar vermiştir. Bu amaçla yapılan çalışmada iki aşamalı optimizasyon yönteminin iyileştirilmesi için iki farklı sezgisel yöntem önerilmiştir. Temel fikir, optimizasyonu iki aşamada hesaplamaktır. Birinci aşama sonucunda "yakın" bir optimal parametre seti hızlı bir şekilde hesaplanır, bu parametre seti ikinci aşamada iyileştirilir. Bu yöntem aynı amaçla yapılan önceki çalışmalarda optimuma ulaşılan süreyi azaltma konusunda faydalı olmuştur. Bu çalışmada ise optimizasyon çabasını azaltmayı amaçlayan birkaç ek yöntem geliştirilmiştir. Bu yeni tekniklerle elde edilen çözümler, orijinal iki aşamalı optimizasyon çalışmasında elde edilenlerle karşılaştırılabilir, hesaplama çabası ortalama %50 oranında azaltıldığı görülür.

Ding et al., [113] 2005'te yeni bir bulanık zamanlı PA modeli üzerinde çalışmışlardır. Geliştirilen modelde her bir geçişin ateşlenmesi bir bulanık sayı ile ilişkilendirilmiştir. Geçişlerin ateşlenmesi ile değişen işaretler ile elde edilen işaret değişim oranı sabit kabul edilmiştir, elde edilen erişilebilirlik grafiğine dayalı bir performans analizi yapılmıştır. Araştırmacıların bu çalışmada kullandıkları yaklaşım bulanık diferansiyel denklemlere dayalı olarak geliştirilmiştir.

21.yy. ve Endüstri 4.0'ın etkisiyle birlikte üretim terminolojisinde hayatımıza giren kavramlardan biri de "Ağ Bağlantılı Üretim Sistemleri (Networked Manufacturing Systems-NMS)"dir. NMS bir ürünü monte etmek veya üretmek için gereken bir veya daha fazla operasyonu kolaylaştıran hem mekanik sistemlerin hem de kontrol sistemlerinin özelliklerine sahip olan sistemlerdir. Bu karmaşık sistemlerin modellenmesi ve kontrolü için hibrit PA modelleri kullanılmasını öneren Wang et al., [114] 2005'te; çalışmalarında ele aldıkları sistem için hem üretim sürecinin dinamiklerini hem de sipariş ve teslim sürecinin dinamiklerini tanımlamak amacıyla bir hibrit PA modeli geliştirmişlerdir.

Üretim sistemlerinin eşzamanlı faaliyetlerini modellemek için 2005 yılında hibrit bir model kullanan Giua et al., [115] mevcut bir maden suyu şişeleme tesisini ele alarak önerdikleri modelin söz konusu tesisin ana bileşenlerinden biri olan yüksek verimli üretim hatlarını tanımlamak için son derece uygun olduğunu göstermişlerdir. Konveyör hatlarının davranışını daha iyi tanımlamak için önerilen PA modelin bazı varyasyonlarını da tanıtmışlar ve ayrık olay dinamikleri yaklaşımı sayesinde, ele alınan tesisin söz konusu modelleme yöntemi kullanılarak verimli bir şekilde simüle edilebileceğini göstermişlerdir. Böylece, tesisin en yaygın kullanılan konfigürasyonları arasında, maksimum verim ve net kar açısından en uygun çalışma koşullarının belirlenmesini de sağlamıştır.

Zaman geçtikçe üretim sistemlerinin modellenmesindeki bütüncül çalışmalar yerini modüler yaklaşımlara bırakmaya başlamıştır. Üretim sistemlerinin her bir elamanı ayrı önem taşıdığından, modelleme ve analiz yaklaşımlarında bu birimlere ayrıca odaklanılmaya başlanmıştır. Ayrıca modelleme aşamasıyla birlikte hata düzeltme kavramları da gündeme gelmeye başlamıştır. Bir üretim sisteminde iş istasyonu, tipik olarak, bir veya daha fazla imalat ve montaj işlemini gerçekleştiren malzeme taşıma cihazlarıyla birbirine bağlanan bir dizi paralel makine olarak tanımlanır. 2005 yılında Odrey and Mejia [116] tarafından gerçekleştirilen çalışmada PA ile modellenmiş bir EÜS, iş istasyonu düzeyinde ele alınarak hata düzeltme sorunu kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

PA'ların tarihi boyunca, hiyerarşik temsillere ve model birleştirilebilirliğine izin veren yapılandırma mekanizmalarının tanıtılması yoluyla model boyutunu yönetmeye çalışan çok sayıda yaklaşım önerilmiştir. Üretim sistemlerinde çeşitli alanlarda modelleme ihtiyaçları oldukça beraberinde modelleme aracı ihtiyaçları da doğmaktadır. 2005 yılında Gomes and Barros [117] tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada PA'ların yapılandırma mekanizmaları için bir sınıflandırma sistemi önerilmiş ve her biri tartışılmıştır. Ayrıca çalışmada PA ile modelleme araçlarına da değinilmiştir.

Üretim sistemleri için mevcut PA modelleme ve analiz yaklaşımlarının çoğunun genel karmaşıklığının, dikkate alınan sistemin boyutu ve karmaşıklığı ile önemli ölçüde arttığını söyleyen Tsinarakis et al., [58] 2006'da hibrit zamanlı PA kullanarak çok işlemlili bir üretim sisteminin modellenmesi, performans analizi, sentezi ve performans değerlendirmesi üzerine çalışmışlardır. Çok işlemlili üretim sistemlerinin analizi ve performans değerlendirmesi sorunu tarafından motive edilen araştırmacılar çalışmalarında kullandıkları metodolojide her üretim sistemini ilk önce makine, çoklu montaj ve çoklu demontaj modüllerine ayırır, ardından bunlara karşılık gelen hibrit zamanlı PA modellerinin türetilmesi işlemini

gerçekleştirirler. Genel sistem için hibrit zamanlı PA modeli, sistem kısıtlamalarını karşılayan bireysel modül sentezi yoluyla elde edilmektedir. Söz konusu çalışmada model yapısını büyük ölçüde basitleştirmiş olan araştırmacılar sunulan yöntem, uygun şekilde uyarıldığı takdirde diğer DES'lere de uygulanabilen çok işlemlerli üretim sistemlerini incelemek için umut verici bir genel kullanım aracı sağlayacağını belirtmişlerdir.

2007'de Zeng and Wan [118] yaptıkları çalışmada EÜS'nin verimliliğinin artırılmasının sistemin tamamlanma süresine bağlı olduğunu belirterek bu tamamlanma süresinin azaltılmasına yönelik bir modelleme çalışması yapmayı amaçlamışlardır. EÜS için zamanlama faktörlerini içeren standart bir PA'ya sahip bir modelleme yöntemi önermişlerdir ve oluşturulan bu PA modeli ve erişilebilirlik grafiğine dayalı bir analiz yöntemi geliştirmişlerdir. Bütün bunlar sonucunda, ele alınan sistem için en iyi EÜS hattının nasıl olması gerektiğini ortaya koymuşlardır.

2008'de Lee et al. [119] hem kesikli hem de sürekli değişkenleri içeren hibrit dinamik sistemlerin modellenmesi ve simülasyonu üzerine gerçekleştirmiş oldukları bu çalışmada karmaşık olmayan ve anlaşılabilir bir modelleme yöntemi sunmayı amaçlamışlardır. Yazarlar bu çalışma kapsamında hibrit dinamik sistemleri modellemek için ilişkili durum denklemleriyle bir PA çerçevesi önermişlerdir. Geliştirilen yaklaşımın uygulanabilirliğini göstermek için bir uygulama yapmışlardır.

2010'da Tüysüz and Kahraman [120] bulanık kümelerle birlikte stokastik PA kullanarak kritik, dinamik ve karmaşık sistemlerin modellenmesi ve analizi için bir yaklaşım sunmuştur. Önerilen iki aşamalı yöntemin uygulanabilirliğini göstermek için bir EÜH'nin modellenmesi ve analizi yapılmıştır. Bu çalışmada sistem belirsizliğinin stokastik ve bulanık boyutları ele alınarak bir yeni bir yaklaşım önerilmiştir.

2010 yılında Wu and Zhou [121] çalışmalarında otomatik üretim sistemlerinin analizi, performans değerlendirmesi, simülasyonu ve kontrolü için kullanılan süreç odaklı ve kaynak odaklı PA modelleme yöntemlerini incelemişler ve bazı kritik özellikler açısından bu modellerin modelleme gücünü, analiz ve kontrol yapabilme yetenekleri açısından kıyaslamışlardır.

2010 yılında Meng [122] ise üretim sistemlerinin modellenmesi üzerine yaptığı çalışmada renkli zamanlı nesne yönelimli PA kullanmıştır. Üretim piyasalarındaki hızlı değişimler ile başa çıkabilmek için yeniden yapılandırılabilir üretim sistemlerinin (Reconfigurable Manufacturing Systems-RMS) gerekliliğine dikkat çeken araştırmacı, renkli zamanlı nesne yönelimli PA kullanılarak ve RMS'lerin konfigürasyonları ile EÜS'ler

arasındaki temel farka dayalı olarak, bir üretim sisteminin yeniden yapılandırılma sürecini ortaya koyan bir metodoloji geliştirmiştir.

2010 yılında Ahmad et al., [123] karmaşık üretim süreçlerindeki en yaygın problemler arasında yer alan çoklu kaynak paylaşımı ve kilitlenme problemleri üzerinde durmuşlardır. Bu problemin çözülmesi için EÜS'lerde sınırlı sayıda kaynağı paylaşan paralel işleme akışlarını PA ile modelleme yöntemi sunulmuştur. Bu amaçla bu tür EÜS'leri modellemek için "kaynaklı paralel süreç ağı (Parallel Process Net with Resources-PPNR)" adı verilen yeni bir PA sınıfı tanıtılmıştır ve kilitlenmeler için basit tanılama ve düzeltme prosedürlerini sunulmuştur.

2011 yılında Pouyan et al., [124] çalışmalarında sentezlenen sistemlerin temel davranışsal özelliklerinin yerine getirildiği ve korunduğu koşulları belirleyen bir sentez tekniğiyle sentezlenmiş bir PA modeli sunmuşlardır. Yeni bir sentez tekniği (knitting synthesis technique) olan bu yöntem sayesinde sentezlenen canlı, sınırlı ve tersinir özelliklere sahip yani kilitlenmeyen, kararlı ve döngüsel bir şekilde çalışması garanti edilen PA modelleri için EÜS'ler için gerçek zamanlı kontrolörler olarak uygulanabileceklerini söylemişlerdir.

2011 yılında Fathian et al., [125] PA grafiğine göre 2 makineli robotik hücrelerde parça dizilimi ve optimal robot hareket dizisini ele alan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Robotik hücrede optimal parça dizilimi ve robot hareket dizisini belirleyerek çevrim süresini enküçükmek amacıyla PA tabanlı bir modelleme yaklaşımı önermişlerdir.

2013 yılında Lee et al., [59], bu makalede dağıtılmış üretim ağlarını modellemek ve analiz etmek için simülasyon teknolojisiyle birlikte bir PA çerçevesi kullanmayı önermişlerdir. Risk modelleme ve değerlendirme üzerine yapılan bu çalışmada PA'ların farklı modelleme özellikleri ile dağıtık üretim sistemlerindeki potansiyel kalite risklerini belirleme ve değerlendirme yeteneğine sahip bir metodoloji ortaya koymuşlardır.

2013 yılında Ahmad et al., [126] yeni bir PA modeli tanıttıkları çalışmalarında alışılan diğer örneklerin dışında m adet kat ve n adet asansör içeren çoklu asansör kontrol sistemi için PA tabanlı modellemesi üzerine çalışmışlardır. Bu amaçla asansör kontrolü PA olarak bilinen yeni bir PA sınıfı tanıtmışlardır.

2013 yılında Coman and Ionescu [127] stokastik zamanlı PA kullanan bir EÜS'nin modellenmesi, simülasyonu ve performans analizi üzerine çalışmışlar, böylece makinelerin kullanım oranı, kilitlenme tespiti, çevrim süresi ve sistemin üretim hızı gibi çeşitli performans parametrelerini değerlendirmişlerdir.

Mal ve hizmet pazarının artan küresel karakterinin ulaşım, veri iletişim sistemleri ve üretim operasyonlarının otomasyonunda iyileştirmeler gibi faktörler tarafından teşvik edildiğini belirten Haleh and Bahari [128] tarafından yapılan 2014 yılındaki çalışmalarında bu özelliklerin sürekli performans analizine ve üretim sistemlerinin iyileştirilmesine ihtiyaç duyduğunu söylemişlerdir. Üretim sistemlerinin PA'lar kullanılarak yapılan performans analizlerinin değerlendirme açısından umut verici araçlardan birisi olduğunu söyleyen yazarlar bu çalışmada ülkelerindeki imalat sanayilerinden biri olan metalin üretim sürecinin PA kullanarak performansını analiz ederek makinelerin kullanım oranı, darboğaz tespiti, çevrim süresi ve verim oranı gibi çeşitli performans parametrelerini değerlendirmeye odaklanmışlar, sistemin optimum üretkenliğe ulaşması için çözüm ve öneriler sunmuşlardır.

Üretim işletmelerinin hem ekonomik hem de çevresel performanslarını iyileştirmek için enerji değerlendirmesi ve enerji performans hedeflerini dikkate alması ve uygulaması gerektiğini belirten Wang et al., [50] tarafından yapılan 2014 yılındaki çalışmada EÜS'lerin karmaşıklıkları ve veri toplama zorluğu nedeniyle enerji yönetimi için bir zorluk teşkil ettiğini de eklemiştir. Araştırmacılar bu zorluğun üstesinden gelmek için, renkli zamanlı PA'ya dayalı işleme sistemleri için pratik bir enerji modeli önerilmiştir. Bu amaçla çalışma kapsamında ilk olarak EÜS'nin enerji tüketimi analiz edilmiştir. Ardından, EÜS'lerin tüketimine ilişkin verilerin otomatik olarak toplanabilmesi için, görev atamasının belirsizliğinin ve çalışma süresinin değişkenliğinin PA işlevleri tarafından ele alındığı renkli zamanlamalı PA'ya dayalı bir EÜS enerji modeli önerilmiştir.

2014'te Julvez et al., [129] PA modellerini verimli ve sistematik bir şekilde geliştirmek ve analiz etmek için uygun yazılım araçlarına ihtiyaç olduğunu belirterek MATLAB üzerinde geliştirilmiş ve ayrık, sürekli ve hibrit sistemlerin modellenmesi ve analizi için ihtiyaçları kapsayan mevcut PA araçlarından bazılarını açıklamışlardır. Kesikli, sürekli ve hibrit PA'lar için modelleme, analiz ve simülasyon işlevleri sunan birtakım araçlar sunmuşlardır. Analiz ve simülasyon için mevcut algoritmaların yanı sıra kullanıcının araçların çalışma şeklini kavramasını kolaylaştıran bir sezgisel grafik arayüzü sunmuşlardır.

2014'te Ullah [130] kanban sistemini kullanarak satın alma, üretim ve paketlemenin entegrasyonu için yeni bir "Deterministik Zamanlı PA" modeli geliştirmiştir. Bu model, optimal iş süresini, teslim süresini, istasyon kullanımını ve sistemin üretim oranını belirlemek için entegre bir üretim sistemi konfigürasyonunun modellenmesine izin verilmek üzere geliştirilmiştir. Optimizasyonun amacının minimum iş süresi değerinin maksimum verime karşılık gelmesini sağlamak olduğunu belirten yazar, geliştirilen modelin entegre bir

üretim sisteminin yerleşimini tasarlamak, değerlendirmek ve optimize etmek için kullanılabilirliğini söylemiştir. Ayrıca geliştirdiği modelin bulanık PA veya renkli PA kullanılarak genişletilebileceğini eklemiştir.

2015'te Başak and Albayrak [46] bir otomotiv firmasında esnek bir otomotiv üretim sisteminin modellenmesi ve analizi için PA'ların kullanımını araştırmışlardır. Bu amaçla sistem zamanlı işaretli grafik olarak modellenmiş ve performans değerlendirmesi yapılmıştır. Araştırmacılar önerdikleri zamanlı işaretli grafik yöntemi ile daha yüksek hız ve daha yüksek esneklik seviyesine sahip bir sistem inşa ederek, üretim verimliliğini artırmayı hedeflemişlerdir. Önerilen tasarım sayesinde modelleme, niteliksel analiz ve performans değerlendirme gibi önemli konularda avantajlar sağlanacağı belirtilmiştir.

PA'ların eşzamanlı, paralel, senkron, dağıtılmış ve kaynak paylaşımli üretim sistemlerini modellemek, analiz etmek ve kontrol etmek için güçlü bir grafiksel araç olduğuna ve günümüzde yaygın olarak kullanıldığına 2015 yılında yaptıkları çalışmada dikkat çeken Kaid et al., [131] üretim sistemlerinin modellenmesi, analizi ve kontrolünde PA'ların uygulamaları ve uzantıları için kapsamlı bir genel bakış sunmuşlardır. 1988-2015 yılları arasında yayınlanan 25'ten fazla büyük üretim, operasyon yönetimi ve kontrol dergisi gözden geçirerek, araştırmalarını modelleme ve analiz ile PA uygulamaları incelenerek bu alandaki tarihsel ilerlemeyi vurgulamışlardır. Böylece bu çalışma ile okuyuculara bu alanda güncellenmiş sonuçlar sunulmuş ve mühendislerin endüstriyel senaryoları için uygun bir ilke veya teknik bulmasının kolaylaşması sağlanmıştır.

2015 yılında incelenen diğer çalışmalarda ele alınan sektörlerden farklı olarak Latorre-Biel et al., [132] tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada gıda sektöründe hizmet veren bir süt firması için PA'ya dayalı olarak dünya çapındaki rekabetçi pazarda süt işletmelerinin hayatta kalma şanslarını artırmak için bir karar destek sistemi (KDS) geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Araştırmacılar piyasadaki süt ürünlerinin çeşitliliğinin, bazılarının kısa vadeli son kullanma tarihlerinin oluşunun ve güçlü rekabetin varlığının, tesisin tasarımı ve işletilmesinin karmaşık bir hal almasına yol açtığını söylemişlerdir. Böyle bir tesisin tasarımı ve işletilmesi için bir KDS geliştirilmesi amacıyla PA'lar kullanılarak bir tesis modeli geliştirilebileceği savunulmuştur.

2016'da Long et al., [133] Endüstri 4.0'daki üretim sistemlerinin modellenmesi ve Yüksek Seviyeli PA (High Level Petri Net-HLPN) ile kullanılabilirliği üzerine yapmış oldukları çalışmada Endüstri 4.0 ile esnek ve etkili bir üretim için yeni olanaklar doğduğuna

vurgu yapmışlardır. Bu çalışmada ise üretim sistemini modellemek için “Genişletilmiş Renkli Stokastik PA” (Extended Coloured Stochastic Petri Net-ECSPN) kullanmışlardır.

2016’da Zhu et al., [134] yaptıkları çalışmada darboğaz istasyonuna sahip bir EÜS’yi PA ile modelleyerek darboğaz istasyonunu saptamayı ve EÜS’nin performans analizini yapmayı amaçlamışlardır. Bu amaçla endüstriyel örnekler kullanılmıştır. Sistemi modellemek ve dinamik davranışları yansıtabilmek için “Kaynak Odaklı PA” (Resource Oriented Petri Net-ROPN) kullanılmıştır. Önerilen metodoloji ile mevcut yönteme kıyasla çevrim süresinde önemli bir azalmanın elde edilebileceği gösterilmiştir.

More and Bhatwadekar [135]’a göre 2016 yılında yayınladıkları bu makalede EÜS’nin kavramsal bir modelinin PA modellemesini göstererek ve kilitlenme önleme politikası oluşturarak kilitlenme sorununu ele alan genel bir bakış açısı sunmuşlardır. Bu kapsamda üç makineli, iki ürün tipini işleyen tek robotlu kavramsal bir EÜS modeli, PA modelinin erişilebilirlik grafiği kullanılarak kilitlenme için analiz edilmiştir.

Yüksek oranda kaynak paylaşım probleminin olduğu sistemlerde kilitlenme sorununun ortaya çıkmasının kaçınılmaz olduğunu 2016 yılındaki çalışmalarında belirten Nie et al., [136] bu durumun üretim planlarında düzeltmeler gerektireceğini eklemiştir. Mevcut PA model teorileri ve model kurulumu için belirli simülasyon yazılımları kullanılarak, modelin yapısı ve ölçeğinin; parçalar, makineler ve robotlardaki değişikliklere göre değişebileceğini söylemişlerdir ve bu sorunu ele almak için jetonların hareketi odaklı PA model teorisi ortaya koymuşlardır. Ortaya koydukları metodolojide bir jetonun hareketleri, ateşleme koşullarının karşılanıp karşılanmadığını belirlemek için algılanır ve kilitlenmeyi önlemek için jeton, taşıma-geçiş durumuna girerken karar vermeden önce kaynak kullanımının durumunu tahmin eder. Buna göre, model çalıştırması sırasında, olaylar beklenen zamana karşı tetiklenecek ve böylece geçişler etkinleştirilecektir.

2016 yılında Al-Ahmari and Li [137] çok makineli bir EÜH’nin performansını analiz etmek için kullanılmak üzere genelleştirilmiş stokastik PA modeli geliştirmeyi amaçlamışlardır. Yazarlar tek ve üç makineli iki ayrı sistem tasarlayarak geliştirdikleri modeli bu sistemler üzerinde uygulamışlardır. Çalışma sonunda en iyi üretim oranlarının, konveyör teslimatı ve işleme oranları yüksek olduğunda elde edildiği sonucuna varılmıştır. Makine işleme oranının artırılmasının, üretim hızı ve robot kullanımı üzerinde olumlu, makine ve robot kullanımları üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Son olarak analiz, onarım oranı arttıkça üretim oranının, makine kullanımının ve robot kullanımının arttığını ve operatör kullanımının azaldığını göstermektedir.

2017 yılında Shah et al., [138] tarafından gerçekleştirilen çalışma sistemlerin analiz süresini azaltmak amacıyla toplam temel döngü sayısının azaltılması için bir üretim sisteminin renkli PA modeli ile basitleştirilmesine odaklanmaktadır. Çalışma çok makineli bir EÜS üzerinde gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen model kullanılarak çeşitli senaryolar incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Geliştirilen renkli PA modelinin yapısı, modeldeki toplam konum sayısını azaltan araçların gruplandırılmasına olanak tanır. Bu nedenle, geliştirilen renkli PA modelinin sistemin karmaşıklığının azalmasını sağladığı açıktır.

EÜS'lerin daha yüksek makine kullanımı, daha yüksek verimlilik, daha az envanter ve daha az üretim süresi gibi geleneksel sistemlere kıyasla çeşitli avantajlara sahip olduğunu 2017 yılındaki çalışmalarında söyleyen Taha et al., [139] pahalı ve karmaşık bir yapıya sahip olan EÜS'lerde oluşabilecek en büyük sorunlardan biri olarak kilitlenmeleri göstermiştir. Kilitlenmeleri modellemek ve tespit etmek için en etkili araçlardan biri PA olduğunu söyleyerek bu çalışma kapsamında bir ortak makine ile iki paralel hattaki kilitlenmeyi tespit etmek için PA'lar kullanılmıştır.

2017 yılında Long et al., [140] Endüstri 4.0'da EÜS'lerin kullanılabilirliğini analiz etmek, beklenmedik makine arızası ve ortaya çıkan kayıp risklerini azaltmak amacıyla yürüttükleri bu çalışmada, bir EÜS'yi modellemek için genişletilmiş renkli stokastik PA kullanmışlardır. Çalışmayı üç makineye ve iki paylaşımli taşıma robotuna sahip bir EÜS'de yapmışlardır. Makinelerin ve sistemin verimlilikleri ve kullanılabilirlikleri analiz edilmiştir. Yazarlar bu modelde sadece bağımsız makineler ve süreçler analiz etmişlerdir. Daha fazla makine ve süreç içeren karmaşık bir sistem modellenebileceği belirtilmiştir.

İmalat sistemlerinin işleyişini iyileştirmek için bir paradigmanın tanıtılması durumunda, pahalı ve zaman alıcı uygulamadan önce sistemin performansını tahmin etmek önemli olduğunu 2017 yılındaki çalışmalarında belirten Barenji et al., [141] bu çalışmada, bir montaj hattında takım besleme yönteminin olası avantajını ölçmek için PA'ların kullanımını bir örnek olay üzerinden sunmuşlardır. Çalışma kapsamında özellikle kaynak odaklı ve süreç odaklı modelleme yaklaşımlarının entegrasyonu ile PA geliştirilmiş ve ardından mevcut ve önerilen sistemin detaylı nicel analizi yapılmıştır.

2018 yılında Simon et al., [142] PA'ların üretim sistemlerinin modellenmesi için tasarımcılara daha fazla esneklik ve şeffaflık sağlaması ve güçlü matematiksel temellere dayanmasına rağmen, potansiyellerini tam anlamıyla gerçekleştirecek yazılım yeteneklerinden yoksun olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar bu çalışmada PA'ların sağladığı esneklik kazancının ve stokastikliğin üretim sistemlerinde kurulum ve arıza

süreleri üzerindeki etkilerine yeni bir bakış açısı sağladığını göstermişlerdir. Bu amaçla bir ayrık olay simülasyonu ortamında Zamanlı PA ile çalışmışlardır.

Bir EÜS'nin doğası gereği esnek olma özelliğinden dolayı orta aralıkta farklı parçaların otomatik üretimi ile ilgili olduğunu 2018 yılındaki çalışmalarında belirten Yadav and Jayswal [143] çalışmalarında EÜS'lerin daha iyi anlaşılması için araştırma ve geliştirmeye genel bir bakış ile bu sistemlerin modellenmesi alanındaki önceki çalışmalar hakkında bir fikir vermeyi amaçlamışlardır. Çalışma, EÜS alanındaki mevcut tekniklerin katkısını vurgulayarak EÜS modellenmesi alanında araştırma yapmak isteyen araştırmacılara yardımcı olmak üzere yazılmıştır. EÜS'lerin modellenmesi ve analizinin önemine değinen araştırmacı PA ile modellemenin avantajlarından bahsederek sistemlerde yaşanan özellikle kilitlenme sorunu için bu modelleme tekniğinin başarılarına dikkat çekmiş, grafiksel ve matematiksel bir yöntem olması nedeniyle de güçlü bir araç olarak benimsenildiğini vurgulamıştır.

2018'de EÜS'lerin modern tesisler için önemli bir yatırım ve yüksek derecede belirsizlik içerdiğine dikkat çeken Maurya and Kumar [144] çalışmalarında üretim esnekliğini ve üretkenliği birleştirmek amacıyla bir EÜS'nin tasarım kararlarının EÜS'nin sistem performansına dayanması gerektiğini vurgulamışlardır. Söz konusu EÜS'nin sistem performansının döngü yerleşim konfigürasyonları ile analiz edilmesi gerektiğini ifade ederek çalışmalarında döngü yerleşim modelini simüle etmek ve sistem performansını değerlendirmek için PA modelleme yöntemini kullanmışlardır. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada üretim sisteminin performans değerlendirmesi için bir vaka çalışması sunarak, PA ile modelleme yönteminin, kullanıcıların parça stilleri karışımına ve talep modellerindeki değişikliklere hızla yanıt vermelerine etkin bir şekilde yardımcı olabildiğini göstermişlerdir.

2018 yılında Liu and Zhang [145] Zamanlı PA'ların (Timed Petri Net-TPN) farklı sistemlerin simülasyonu ve analizi için eksik yönleri olduğunu belirterek, bu amaç doğrultusunda bir Genişletilmiş Zamanlı PA (Extended Timed Petri Net-ETPN) yaklaşımı önermişler ve ayrık olay sistemlerinin analizi için bir simülasyon algoritması sunmuşlardır. Genişletilmiş Zamanlı PA'ların, Zamanlı PA'ların modelleme kabiliyetlerini geliştirdikleri ortaya konulmuştur.

2018 yılındaki çalışmalarında Zamanlı PA ile, tampon yerleri içeren hibrit EÜS'lerin modellenmesi için sistematik bir yöntem öneren Cherif et al., [146] hibrit EÜS'leri bazıları atölyede ve diğerleri açık atölyede olmak üzere, operasyonların bir kombinasyonundan oluşan atölyeler olarak tanıtmışlardır. Önerilen metodoloji matrisleri, ilk işaretleme

vektörünü ve zamansal parametre vektörünü kullanarak genel kaynak ataması ve tampon yerleri olan karmaşık sistemlere uyarlanmıştır.

2018’de Ćapkoviĉ [147] yaptıkları ĉalıřmada PA’ya dayalı karmaşık EÜS’lerin modellenmesi ve kontrolüne yönelik bir yaklaşım sunmuş ve Konum/Geçiş PA ve Zamanlı PA olarak iki tür PA kullanmıştır. Bu ĉalıřmada hem Konum/Geçiş PA hem de Zamanlı PA’yı birlikte kullanan bir yaklaşım tanıtılmıştır.

2019’da Cao et al., [148] bu ĉalıřmalarında ayırık, sürekli, çelişkili, zaman gecikmeli ve stokastik özelliklere sahip sistemleri temsil etmek için bir “Hibrit Stokastik Zamanlı PA (Hybrid Stochastic Timed Petri Net-HSTPN)” önermişlerdir. Önerilen modelin bir EÜS için modellenebilirliği tartışılmış ve mevcut hibrit modellerden performans özelliklerini daha iyi yansıttığı ortaya konmuştur.

Üretim uygulamasında giderek daha esnek yapılara yönelik değişiklikler olmasının beraberinde üretim sistemlerinin modellenmesi için yeni stratejiler getirdiğini 2019 yılındaki ĉalıřmalarında belirten Wenzelburger and Allgöwer [149] bireysel siparişlerin üretildiği esnek bir üretim tesisini modellemek ve kontrol etmek amacıyla PA’ları kullanarak üretim probleminin kaba bir tanımından otomatik bir şekilde doğrusal bir ayırık zaman sistemi oluşturan bir metodoloji geliştirmişlerdir. ĉalıřmalarında modelin nasıl oluşturulduğu bir örnekle gösterilmiş ve modelin kullanılması ve geliştirilmesi için daha fazla olasılık tartışılmıştır.

2019 yılında Zahid Nabi and Aized [150] Renkli PA yaklaşımı ile karosel tabanlı, yönlendirme esnekliğine sahip, çok ürün üretebilen karma bir EÜS’yi modelleyip analiz etmişlerdir. Karosel tabanlı bir düzende beş üretim hücresi ve iki montaj hücresinden oluşan EÜS’nin modellenmesi Renkli PA yöntemi ile “CPN Tool aracı” kullanılarak yapılmıştır. Ortalama işleme süresi, ortalama yükleme/boşaltma süresi, arızalar arası işlem sayısı, onarım süresi gibi çeşitli parametrelerin farklı seviyeleri incelenerek, EÜS’nin optimum performansı için girdi kombinasyonları tartışılmıştır.

Yine Zahid Nabi and Aized [151] bir önceki ĉalıřmalarını geliştirmek amacıyla 2020 yılındaki ĉalıřmalarında aynı EÜS üzerinde Nesne Yönelimli Renkli PA ve deney tasarımı (DoE) yöntemlerini birleştiren bir metodoloji ortaya koymuşlardır. Bu araştırma ĉalıřmasında hiyerarşik modelleme uygulanmıştır. EÜS’nin performansını etkileyen faktörler belirlenmiş, bu girdi faktörlerinin farklı seviyeleri saptanmıştır. Çıktı verilerinin tutarsızlığını en aza indirmek için farklı değerlerde 10 seviye belirlenmiştir. Her bir girdi faktörünün 3 çıktı değişkeni üzerindeki etkisi (döngü süresi/verimlilik/parça sayısı)

simülasyon sonuçları ile gözlemlenmiştir. Optimum faktör seviyelerini belirlemek amacıyla sonuçlar minitab aracı kullanılarak deney tasarımı yapılmıştır. Model f testi, p testi, t testi, ANOVA ve pareto grafikleri ile istatistiksel testler için kapsamlı bir şekilde analiz edilerek 3 çıktı değeri için regresyon denklemleri kurulmuştur. Çalışmada hücrelerarası ve hücre içi yönlendirme esnekliğine sahip birden çok ürün için karma model bir EÜS analiz edilerek, üretim ve montajdaki olası varyasyonlarla birlikte karosel yapılandırılmış bir hücresele üretim sisteminin modellenmesi ve değerlendirilmesi için bir metodoloji geliştirilmiştir.

Büyük boyutlu bir PA'nın özelliklerini analiz etmek, çok sayıda erişilebilir işarete sahip bir PA için çok uzun ve karmaşık olabilir. PA'ların boyutu arttığında lineer cebir kurallarını uygulamak da çok zorlaşır. İndirgeme yöntemleri, büyük ölçekli PA'ları eşdeğer daha küçük ağlara basitleştirmek için kullanılır. PA sisteminin indirgeme yöntemleriyle belirlenmesi, son yıllarda birçok araştırmacı tarafından üzerinde durulmuş bir konudur. Bir sistemin daha hızlı analizini gerçekleştirmek için indirgeme yöntemlerinin önemi vurgulanır. Padma [152] tarafından 2021 yılında gerçekleştirilen bu çalışmada PA indirgeme kuralının kullanıldığı bir EÜS irdelenmektedir. Canlılık, sınırlılık, paylaşılan kaynaklar gibi birçok özellik eşdeğer daha küçük ağlarla kontrol edilir, EÜS'nin yapısı korunur.

2021'de Blaga et al., [153] yapmış oldukları çalışmada çok çeşitli sistemler için PA ile modelleme ve simülasyonun nasıl ele alındığı tartışılmıştır. Farklı endüstrilerden üretim sistemleri için genelleştirilmiş Stokastik PA kullanılarak modellemeler yapılmıştır. Öncelikle Zamanlı PA'ların üretim sistemlerinin performans analizinde nasıl kullanıldığını göstermişlerdir. Ardından ele alınan Zamanlı PA geliştirilerek Hiyerarşik Renkli PA'ya geçiş için bir metodoloji sunmuşlardır. Araştırmacılar bu metodolojinin Bulanık Zamanlı PA kullanılarak geliştirilebileceğini belirtmişlerdir.

2021'de Modgil [154] yaptıkları çalışma kapsamında bir üretim tesisindeki dört farklı alt sistemi ve bu sistemdeki belirsizlikleri modellemek amacıyla Genelleştirilmiş Stokastik Petri Ağı kullanmış ve sistemin en kritik bileşenini belirleyerek onarım oranının genel sistem kullanılabilirliği üzerindeki etkisi temelinde farklı bileşenlerin onarım önceliklerini önermek için bir girişimde bulunmuştur.

2022 yılında Jiang et al., [155] bulanıklık içeren PA'ların belirsiz bilgiler içeren sistemleri modellemek ve analiz etmek için güçlü bir araç olduğunu belirterek, son zamanlardaki bulanık PA çalışmalarını incelemişler, bulanık PA'lar için yapılan sınıflandırmayı ortaya koymuşlardır. Üretim sistemlerindeki bulanık PA uygulamalarına değinilmiş bir araştırma çalışmasıdır.

Xu and Chen [156], 2022 yılındaki çalışmalarında Konum-Zamanlı PA'ları kullanarak modelledikleri bir EÜS'yi, elde edilen PA modelindeki geçiş dizilerinin ateşlenmesindeki maliyetleri hesaplamak amacıyla sezgisel bir algoritma geliştirmişler ve ulaşılan tahmin fonksiyonu sayesinde modeldeki en düşük maliyete sahip geçiş ateşleme sıralamasını bulmayı hedeflemişlerdir.

2022 yılında Davidrajuh et al., [157] bu çalışmada büyük boyutlu ayırık olay sistemleri modellenirken ortaya çıkan karışıklıkların önüne geçebilmek ve anlaşılabilirliğini artırmak amacıyla modüler PA'ların kullanımının önemini vurgulamışlardır.

2022 yılında PA ile ilgili yapılan son çalışmalardan birinde ise Huang and Zhou [158] düşük ve orta hacimli ürün ailelerinin otomatik üretimini sağlamak amacıyla esnek bir yaklaşım sunması sebebiyle sıklıkla kullanılan robotik üretim hücrelerinin (Robotic Manufacturing Cell-RMC) Konum Zamanlı PA ile modellenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada robotik üretim hücrelerindeki çizelgeleme yükünü azaltmak amacıyla PA'ların erişilebilirlik grafiklerine dayalı yeni bir metodoloji ortaya konmaktadır.

Fujita and Ushio [159] konumlar, geçişler ve girdi çıktı oklarıyla ilişkilendirilmiş renkli zamanlı Petri ağlarını kullanarak bir üretim sisteminin zamanlı davranışlarını modellemeyi amaçlamışlardır. Renkli Zamanlı Petri ağının kontrolü problemini ele alan araştırmacılar, modelin optimal kontrolü için tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir.

5. UYGULAMA VE BULGULAR

Bu bölümde Başkent Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde bulunan bir esnek üretim hücrenin (EÜH) “Geçiş Zamanlı Petri Ağı” (Transition Timed Petri Net) tabanlı geliştirilen 3 farklı yaklaşım ile modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Modellenen sistemler MATLAB alt programı olan PN Toolbox kullanılarak çalıştırılmıştır. 3 farklı yaklaşıma ait her bir model çalıştırıldıktan sonra genel, davranışsal ve yapısal özellikleri bakımından incelenmişlerdir. Sisteme ait her bir model için performans analizi yapılmış, simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Sistemin gerçek yapısını yansıtması bakımından 3 farklı yaklaşım doğrultusunda hazırlanan bu modeller birbirleriyle kıyaslanarak bulgular değerlendirilmiştir.

Bu doğrultuda ilk başta uygulama amacı ve uygulamanın kapsamı verilmiş, uygulamaya ait kısıtlar tanıtılmıştır. Ardından modellenecek esnek üretim hücresi verilerek detaylıca açıklanmıştır. Özellikleri açıklanan esnek üretim hücrenin 3 farklı yaklaşım ile Petri ağ modellemeleri yapılarak analizler ve simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Böylece 3 farklı Petri ağ modeli yaklaşımının birbirleriyle kıyaslanabilirliği sağlanarak bulgular değerlendirilmiştir.

5.1. Bir Esnek Üretim Hücrenin Geçiş Zamanlı Petri Ağları ile Modellenmesi

5.1.1. Uygulamanın amacı

Bu tez kapsamında uygulamadaki amaç; bir esnek üretim hücrenin, “Geçiş Zamanlı PA” tabanlı bulanıklık içermeyen, kısmen içeren ve tamamen içeren 3 farklı yaklaşım ile modellenmesi yoluyla, esnek üretim hücrelerinin yapısal özelliklerinden doğan zamansal belirsizliklerin modele yansımaya ve gerçek sistemi en doğru şekilde modele yansıtma gücünü gözlemlemektir.

Temel hatlarıyla sistemin tanıtılmasından sonra konumlar ve geçişler belirlenmiş, gözlem yoluyla belirlenen operasyonlara ilişkin süreler ölçülmüştür. Her 3 modelde de ölçülerek saptanan işlem süreleri “geçişler” ile ilişkilendirilmiştir. Sistem sırasıyla;

- Geçiş Zamanlı Petri Ağı (Transition Timed Petri Net-TTPN)
- Kısmi-Bulanık Geçiş Zamanlı Petri Ağı (Partial-Fuzzy Transition Timed Petri Net-Partial FTTPN)

- Bulanık Geçiş Zamanlı Petri Ağı (Fuzzy Transition Timed Petri Net-FTTPN)

yaklaşımları ile modellenmiştir. Bulanıklık içeren modellerde öncelikle bulanık süreler hesaplanarak geçişler ile ilişkilendirildikten sonra modellemeler yapılmıştır. Oluşan her bir farklı modelin genel, davranışsal ve yapısal özelliklerinin elde edilmesi sonucu 3 farklı model için kıyaslamaların yapılması bakımından tüm veriler elde edilmiş olur. Böylece amaçlandığı üzere hangi yaklaşıma sahip modelin sistemi yansıtmaya gücünün yüksek olduğu kanısına varılabilecektir.

5.1.2. Uygulama adımları

Bu çalışma genel itibariyle aşağıdaki adımların takip edilmesiyle oluşturulmuştur:

- Sistemi tanımak amacıyla EÜH'nin elemanları belirlenerek çalışma prensipleri saptanır.

- Bir parçanın üretimi için iş istasyonlarında meydana gelen operasyonlar öncelik ilişkileri göz önüne alınarak sıralanır.

- Sıralanan operasyonların başlangıç ve bitişleri belirlenir.

- Her operasyon öncelik sırasına göre o operasyonu temsil edecek geçişlere atanır.

- Konumlar operasyonların başlangıç ve bitişinde oluşan durumları temsil eder. Bir geçişin girdi konumundaki durum, o geçişin temsil ettiği operasyonun başlamasından önceki durum iken, çıktı konumundaki durum ise o geçişin temsil ettiği operasyonun tamamlanmasıyla meydana gelen durumdur.

- Sistemdeki kaynakları (CNC Freze Tezgâhı, Taşıma Robotu, Taşıma Paleti, Tampon Stok Alanı) temsil edecek konumlar belirlenir ve konumlar girdi geçişlerine yönlü ok ile bağlanır. Bu konumlar operasyon/operasyonların gerçekleşmesi için gerekli koşul/koşulları tanımlar.

- Operasyonun meydana gelmesi için gerekli tüm koşullar hazırsa söz konusu operasyonu temsil eden geçiş ateşlenir.

- Geçişlerin ateşlenme süreleri operasyonların gerçekleşme sürelerine eşittir. Bu nedenle operasyonlara ait süreler ilgili geçişlere atanır.

- Operasyonların tamamlanmasıyla serbest kalan kaynaklar operasyon bitiminde, geçişten kaynağa doğru bağlanmış olan yönlü ok aracılığıyla serbest bırakılır. Böylece o kaynağı kullanacak sıradaki operasyon için kaynak hazır durumda olacaktır.

- Son parçanın işlenmesi tamamlanıp operasyonlar bitene kadar geçişlerin ateşlenmesi devam eder.

- Operasyonların bitiminde 3 adet işlenmiş parça operatör tarafından teslim alınmak üzere hazır durumda beklemektedir.

- Modelin tanımladığı sisteme ait simülasyon modeli MATLAB yazılımının bir alt programı olan PN Toolbox paketi aracılığıyla gerçekleştirilir.

- Modelin tanımladığı sisteme ait performans analizi çalışması yapılır.

Yukarıdaki adımlar 3 adet işlenecek parça yüklü paletin sisteme girmesiyle başlayıp 3 adet işlenmiş parçanın operatör tarafından teslim alınmasıyla biten döngüyü anlatan adımlardır. Eğer üretim devam ettirilecekse sisteme yeni palet girişini tanımlayan bir konumun dahil edilmesiyle yeni parçaların işleme döngüsü devam ettirilebilir.

Bu adımlar 3 farklı model yaklaşımı için de aynı sırayla gerçekleştirilir. Her model yaklaşımında geçişlere atanan operasyon süreleri farklıdır. Geçiş Zamanlı PA (TTPN) Modeli'nde operasyon süreleri kesin değerler alırken, Kısmi-Bulanık Geçiş Zamanlı PA ve Bulanık Geçiş Zamanlı PA Modelleri için geçişlere atanacak operasyon süreleri benimsenen bulanık yaklaşımla yeniden hesaplanarak belirlenir.

5.1.3. Uygulama yapılan sisteme ait varsayımlar ve kısıtlar

Ele alınan EÜH, PA ile modellenirken bazı varsayımlar ve kısıtlar ile çalışılmıştır.

Varsayımlar:

- Sistemde tek tip parça üretilmektedir.
- Çalışma döngüsü başlamadan önce işlenecek 3 parça palet yerleştirilmiş bir şekilde konveyörde hazır beklemektedir.

- 3 adet parça işlendikten sonra sistem durur ve yeni palet girişi olmaz. Parça işlenmesine devam edilmek isteniyorsa sisteme yeni palet girişini tanımlayan yeni bir konum eklenir.

- Paletten hangi parçaların hangi sırayla alınarak işleneceği bilinmektedir.

Kısıtlar:

- Operasyonlar arasında bir öncelik ilişkisi söz konusudur. Sıraca daha önce olan bir operasyondan tamamlanmadan sıradaki operasyona başlanamaz.

- Bir operasyonun bir istasyondaki iş sürecinin tamamlanması için gereken süre çevrim zamanı (cycle time) olarak adlandırılır. Çevrim zamanı diğer bir ifadeyle parçanın

işlem görmek üzere istasyona giriş anı ile çıkış anı arasında geçen süredir. Çevrim zamanı, operasyon süresi ile planlı ya da plansız duruş sürelerini de içerir. Bir istasyona ait çevrim süresi, o istasyona atanan işlemler için gereken toplam süre tarafından aşılamaz.

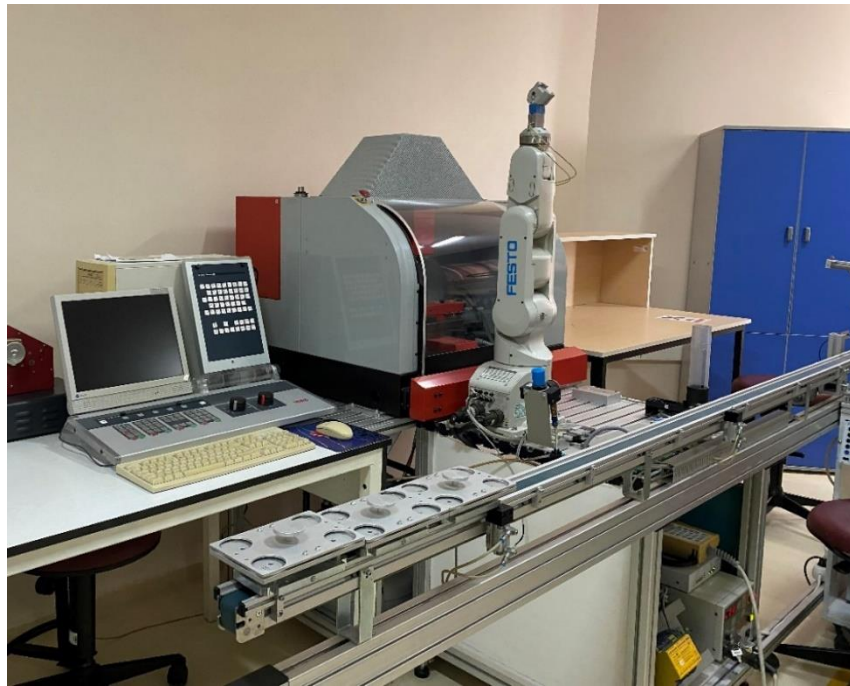
- Bir istasyonda bir operasyon gerçekleştirilirken başka bir operasyon atanamaz, yani istasyonlar aynı anda yalnızca bir operasyon gerçekleştirebilirler.

5.1.4. Modelleneyecek esnek üretim hücresinin tanımlanması

Modelleneyecek olan EÜH, Başkent Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde bulunan ve Endüstri Mühendisliği Bölümü tarafından aktif olarak kullanılan bir laboratuvarda konumlandırılmıştır. Bu EÜH;

- CNC Freze Tezgâhı
- Taşıma Robotu
- 3 Parça Yüklenilebilen Taşıma Paleti
- Hareketli Konveyör
- Tampon Stok Alanı

elemanları içermekte ve 1 operatör denetiminde çalışmaktadır. Şekil 5.1'de söz konusu EÜH'ye ait fotoğraf verilmiştir.

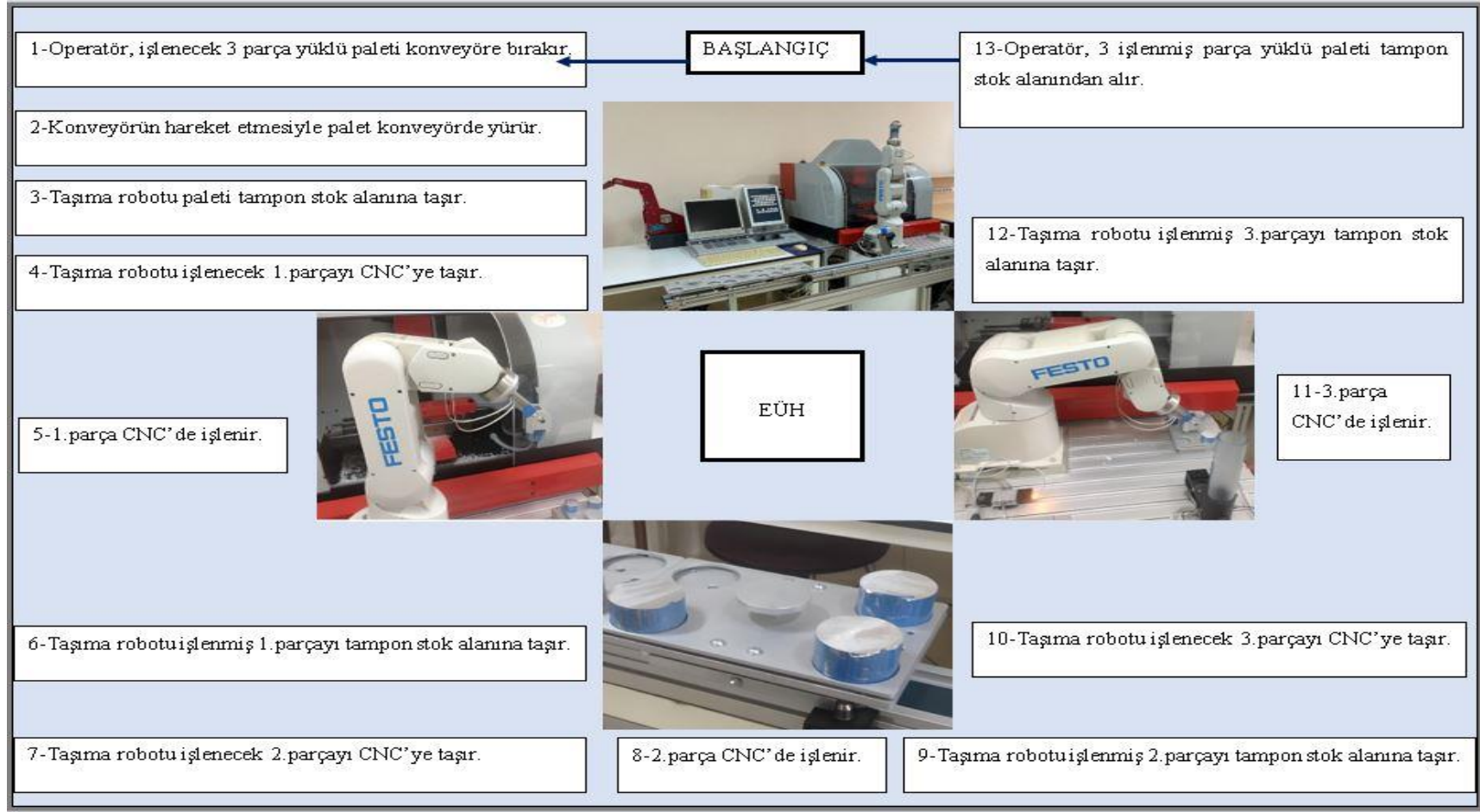


Şekil 5. 1. Modellemesi yapılan EÜH

Sistemin gerçekleştirilen uygulama kapsamındaki işleyişini kısaca anlatmak gerekirse; başlangıçta işlenecek olan 3 parça operatör tarafından palete bağlanmış ve hareketli konveyörün başına bırakılmış durumdadır. Parça yüklü palet, parçaların işlem göreceği tezgâha ve bitmiş ürünlerin depolanacağı tampon stok alanına hareketli konveyör aracılığıyla ulaşır. 3 parça yüklü palet hareket etmek için hazırdır ve konveyör hareket eder. Hareket sensörünün, gelmekte olan parça yüklü paleti görmesi sonucu hareketli konveyör durur. Hareketli konveyör durduğu anda parça yüklü palet taşıma robotunun önünde konumlanmıştır. Taşıma robotu hareket ederek konveyöre gelir ve 3 parça taşıyan paleti alarak tampon stok alanına bırakır. Hemen ardından taşıma robotu tampon stok alanında hazır durumda bulunan parça yüklü paletten işlenecek 1. parçayı alarak kapıları açık olan CNC freze tezgahına bırakır. Taşıma robotu yerine dönerek konumlanır ve böylece serbest kalır. Aynı anda CNC freze tezgahının kapıları kapanır ve 1. parça işlenmeye başlar. 1. Parçanın CNC freze tezgahındaki operasyon süresinin tamamlanmasıyla taşıma robotu gelerek işlenmiş 1.parçayı alır ve tampon stok alanında beklemekte olan palete yükler. Böylece palette işlenmek üzere bekleyen 2 parça ile birlikte 1 işlenmiş parça olmuştur. Taşıma robotu tampon stok alanında bulunan bu paletten işlenecek 2.parçayı alarak CNC freze tezgahına bırakır ve yerine dönerek beklemek üzere konumlanır. Bu esnada CNC freze tezgâhı kapılarını kapatır ve 2. parçayı işleme operasyonuna başlar. 2. parçanın da işlenmesinin tamamlanmasının ardından taşıma robotu gelerek işlenmiş 2. Parçayı alır ve tampon stok alanındaki palete yükler. Böylece palet hazır halde ve 2 işlenmiş ve 1 işlenmemiş parça ile yüklüdür. Taşıma robotu hazır haldeki paletten işlenecek 3. ve son parçayı da alarak CNC freze tezgahına bırakır. Taşıma robotu serbest kalarak geri döndükten sonra CNC freze tezgâhı parçayı işlemeye başlar. Parçanın tezgâhta işlenmesinin tamamlanmasının ardından taşıma robotu tekrar gelir ve işlenmiş 3. parçayı alıp tampon stok alanındaki bırakarak yerine döner. Son durumda artık depolama alanında 3 işlenmiş parça yüklü palet operatör tarafından alınmak üzere hazır haldedir. Böylece sistemin son durumuna ulaşılmış olur.

5.1.5. Esnek üretim hücrelerini modelleme hazırlıkları

Bölüm 5.1.4'te EÜH'de parçaların işlenmesine yönelik operasyonlar anlatılmıştır. Bu operasyonlara yönelik akış şeması Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5. 2. EÜH'ye ait akış şeması

Bu akış şeması ve sistemin işleyişi doğrultusunda belirlenmiş bazı kurallar dahilinde modellemeler yapılır. Buna göre modelleme esnasında takip edilecek esaslar şunlardır:

1. Her bir geçiş (t), operasyonları ya da işlem görmüş yarı mamul/bitmiş ürünlerin istasyonlar arasındaki taşınmasını tanımlar. Bu nedenle geçiş süreleri operasyon sürelerine eşittir. Buna göre model “Geçiş Zamanlı” (T-Timed) olarak kurulmalıdır.

2. Paylaşılan kaynaklar olan taşıma robotu, tampon stok alanı ve CNC freze tezgâhı konumlar tarafından temsil edilir. Bu konumlarda jeton bulunması söz konusu kaynağın müsaitlik durumunu belirtirken, jeton bulunmaması ise o kaynağın meşgul olduğu anlamına gelir.

3. Konumlar, paylaşılan kaynakların kullanımı sonucu gerçekleşen mevcut olayları da tanımlar.

4. Tek bir ürün tipi üretilmektedir.

5. Başlangıç anında, operatör tarafından 3 parça yerleştirilmiş palet başlangıç konumunda hazır olarak beklemektedir.

6. İşlem süreleri;

- Geçiş Zamanlı PA (Transition Timed PN/TTPN) için deterministik
- Kısmi-Bulanık Geçiş Zamanlı PA (Partial-Fuzzy Transition Timed PN/Partial FTTPN) için kısmi bulanık (sadece belirlenen bazı operasyonlar için bulanık süreler kullanılır.)

- Bulanık Geçiş Zamanlı PA (Fuzzy Transition Timed PN/FTTPN) için bulanık (bütün operasyonlar için bulanık süreler kullanılır.)

şeklindedir.

7. Modelleme aşamaları;

- Bütün işlem sürelerinin deterministik olduğu model; Geçiş Zamanlı PA Model (TTPN Model)

- Bazı işlem sürelerinin bulanık olduğu model; Kısmi-Bulanık Geçiş Zamanlı PA Model (Partial-FTTPN Model)

- Bütün işlem sürelerinin bulanık olduğu model; Bulanık Geçiş Zamanlı PA Model (FTTPN Model)

şeklinde yukarıdan aşağıda bu modelleme sırası takip edilerek yapılır.

8. Kurulan modeller MATLAB yazılımının bir alt programı olan PN Toolbox’a aktarılarak çalıştırılır.

Sistem çalışma döngüsündeki her operasyona ilişkin süreler, alınan ölçümlerin ortalamalarının hesaplanması neticesinde belirlenmiştir. Operasyonlar ve operasyonlara ilişkin işlem süreleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5. 1. Operasyon tanımları ve ortalama işlem süreleri

Operasyon Numarası	Operasyon Tanımı	Süre (Saniye)
1	Taşıma paletinin hareket sensörü algılayana kadar konveyörde yürümesi	5
2	Taşıma robotunun paleti tampon stok alanına taşınması	20
3	Taşıma robotunun işlenmemiş 1. Parçayı CNC tezgâha taşınması	10
4	CNC tezgâhta 1. Parçanın işlenmesi	600
5	Taşıma robotunun işlenmiş 1.parçayı tampon stok alanına taşınması	10
6	Taşıma robotunun işlenmemiş 2. Parçayı CNC tezgâha taşınması	11
7	CNC tezgâhta 2. Parçanın işlenmesi	900
8	Taşıma robotunun işlenmiş 2.parçayı tampon stok alanına taşınması	12
9	Taşıma robotunun işlenmemiş 3. Parçayı CNC tezgâha taşınması	13
10	CNC tezgâhta 3. Parçanın işlenmesi	1200
11	Taşıma robotunun işlenmiş 3.parçayı tampon stok alanına taşınması	10
12	İşlenmiş 3 parça yüklü paletin operatör tarafından tampon stok alanından kaldırılması	20
13	Operatörün işlenecek 3 yeni parça yüklü paleti konveyöre bırakması	-

Çalışmadaki her 3 yaklaşıma ait modelde de kullanılan tüm konumlar, geçişler ve bunlara ait açıklamalar Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5. 2. Konumlar, geçişler ve açıklamaları

KONUMLAR (P)	GEÇİŞLER (T)
Kaynaklar	Operasyonlar
PALET: Palet Kullanılabilir.	t_1 : Konveyörün hareket etmesiyle birlikte 3 işlenmemiş parça yüklü paletin konveyörde yürütmesi
TAŞIMA ROBOTU: Taşıma Robotu Kullanılabilir.	t_2 : Taşıma robotunun hareket ederek konveyöre gelmesi ve 3 işlenmemiş parça yüklü paleti alarak tampon stok alanına taşınması
TAMPON STOK ALANI: Tampon Stok Alanı Kullanılabilir.	t_3 : Taşıma robotunun işlenmemiş 1. parçayı depolama alanındaki paletten alarak CNC freze tezgahına taşınması
CNC FREZE TEZGÂHI: CNC Freze Tezgâhi Kullanılabilir.	t_4 : CNC freze tezgahında 1. parçanın işlenmesi
Olaylar	t_5 : Taşıma robotunun işlenmiş 1. parçayı CNC freze tezgahından alarak tampon stok alanına taşınması
p_1 : Hareket sensörünün durmasıyla birlikte konveyörde bekleyen 3 işlenmemiş parça yüklü palet	t_6 : Taşıma robotunun işlenmemiş 2. parçayı tampon stok alanındaki paletten alarak CNC freze tezgahına taşınması
P_2 : Tampon stok alanında bekleyen 3 işlenmemiş parça yüklü palet	t_7 : CNC freze tezgahında 2. parçanın işlenmesi
p_3 : CNC freze tezgahında işlemek üzere bulunan 1. parça	t_8 : Taşıma robotunun işlenmiş 2. parçayı CNC freze tezgahından alarak tampon stok alanına taşınması
P_4 : CNC freze tezgahındaki işleminden çıkmış işlenmiş 1. parça	t_9 : Taşıma robotunun işlenmemiş 3. parçayı tampon stok alanındaki paletten alarak CNC freze tezgahına taşınması
P_5 : Tampon stok alanında bekleyen 1 işlenmiş parça +2 işlenmemiş parça yüklü palet	t_{10} : CNC freze tezgahında 3. parçanın işlenmesi

Tablo 5.2. devam ediyor

P_6 : CNC freze tezgahında işlenmek üzere bulunan 2. Parça	t_{11} : Taşıma robotunun işlenmiş 3. parçayı CNC freze tezgahından alarak tampon stok alanına taşıması
P_7 : CNC freze tezgahındaki işlemden çıkmış işlenmiş 2. parça	t_{12} : İşlenmiş 3 parça yüklü paletin operatör tarafından tampon stok alanından alınması
P_8 : Tampon stok alanında bekleyen 2 işlenmiş parça+1 işlenmemiş parça yüklü palet	t_{13} : İşlenecek 3 yeni parça yüklü paletin operatör tarafından konveyöre bırakılması
P_9 : CNC freze tezgahında işlenmek üzere bulunan 3. Parça	
P_{10} : CNC freze tezgahındaki işlemden çıkmış işlenmiş 3. parça	
P_{11} : Tampon stok alanında bekleyen 3 işlenmiş parça yüklü palet	
P_{12} : Sisteme girmek için bekleyen 3 işlenmemiş parça yüklü palet	

5.1.6. Geçiş zamanlı Petri ağı ile modelleme

Zamanlı PA'ların (Timed Petri Net/TPN) literatürde en sık rastlanan çeşidi “Geçiş Zamanlı PA” (Transition Timed PN/TTPN) olarak adlandırılan sistemdeki sürelerin “geçişler” ile ilişkilendirildikleri modelleme yaklaşımıdır.

Bu çalışmada ele alınan sistemde gerçekleşen olayların aldıkları süreler her bir yaklaşımda geçişler ile ilişkilendirilerek modele yansıtılmıştır. Geçiş Zamanlı PA modelinde Tablo 5.1’de tanımlanan operasyonların sürelerini belirlemek için sistem gözlemlenerek ölçüm çalışması yapılmıştır. Bu çalışma neticesinde alınan ölçümlerin ortalamaları hesaplanarak ilgili operasyonlara ait süreler saniye cinsinden belirlenmiştir. Belirlenen süreler modelde direkt olarak ilgili geçişlere atanarak kullanılmıştır. Bir diğer ifadeyle Geçiş Zamanlı PA modelinde geçişler ile ilişkilendirilen süreler deterministiktir.

Geçiş Zamanlı PA modelinde sistemdeki kaynakları ve durumları tanımlamak için kullanılan konumlar (P) ile operasyonlar/yarı mamul/bitmiş ürünleri tanımlamak için

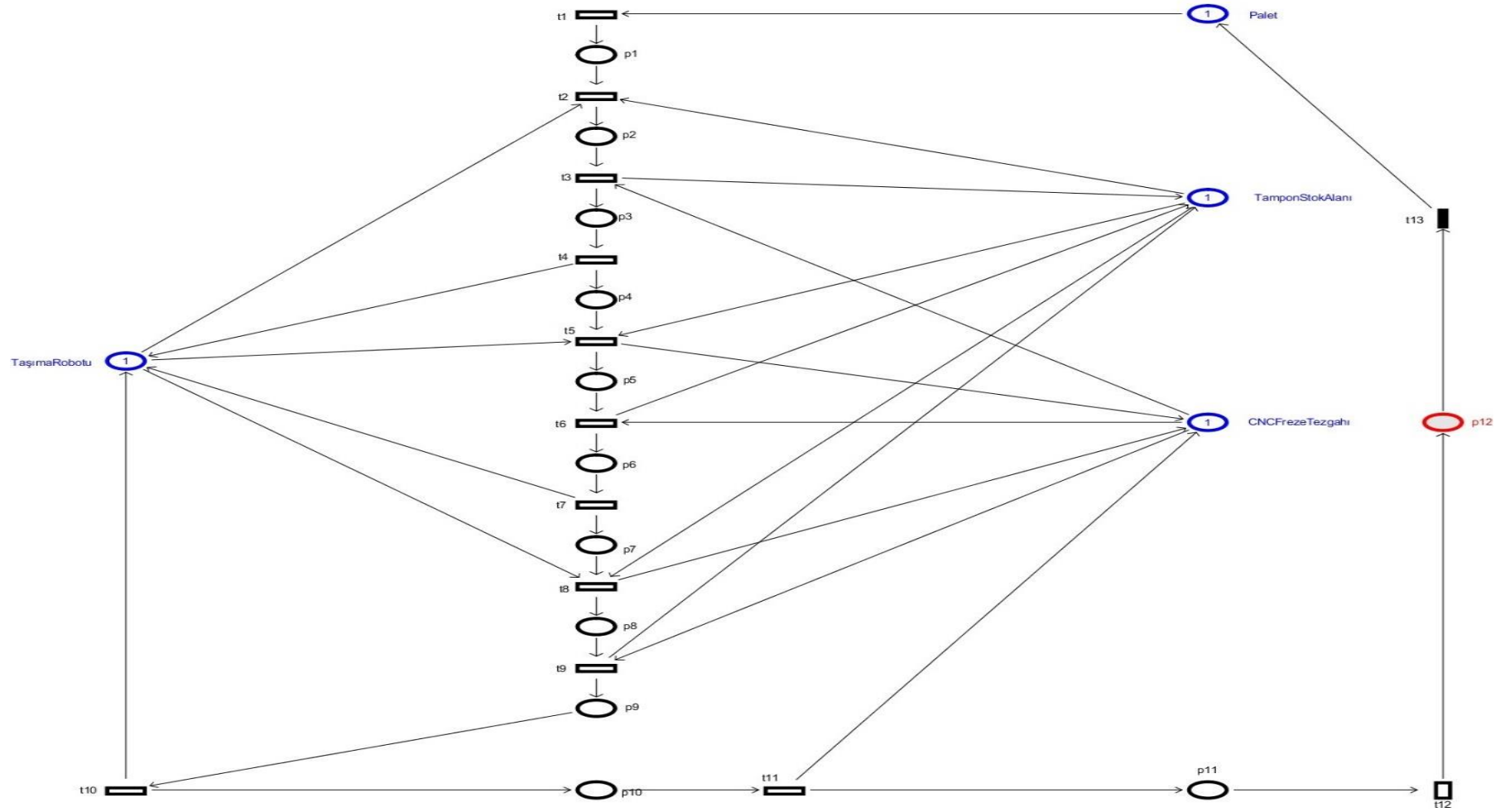
kullanılan geçişler (T) Tablo 5.2’de verilmiştir. Geçiş Zamanlı PA modelinde geçişlere atanan işlem süreleri ise Tablo 5.3’te verilmiştir.

Tablo 5. 3. Geçiş zamanlı PA model için kullanılan geçiş süreleri

Geçişler (t)	Süreler (<i>saniye</i>)
t_1	5
t_2	20
t_3	10
t_4	600
t_5	10
t_6	11
t_7	900
t_8	12
t_9	13
t_{10}	1200
t_{11}	10
t_{12}	20
t_{13}	-

Geçiş Zamanlı PA modelleme yaklaşımında, sistemin çalışma döngüsü gözlemlenerek saptanan mekanik sebeplerin neden olduğu (Bölüm 5.1.7’de detaylıca açıklanan) belirsizlikler neticesinde oluşan operasyon sürelerinde ve yarı mamul/bitmiş ürünlerin taşıma sürelerinde meydana gelen farklılıklar göz ardı edilerek deterministik süreler kullanılmıştır. Yani bu modelleme yaklaşımı EÜH’nin doğasından kaynaklanan mekanik belirsizlikleri yok sayarak modelleme yapmayı esas alır.

Bütün bu verilenler ve açıklamalar doğrultusunda EÜH’ye ait olan ve MATLAB PN Toolbox programı kullanılarak oluşturulmuş olan Geçiş Zamanlı PA modeli Şekil 5.3’teki gibidir.



Şekil 5. 3. EÜH'ye ait PA model

Bir palette taşınan 3 adet işlenecek parçanın tüm işlemlerden geçerek bitmiş ürün olarak sistemden ayrılması toplamda 2811 saniyede tamamlanmaktadır. Modelin çalıştırılmasıyla elde edilen program çıktısı Şekil 5.4'te verilmiştir.

Time:	2811
Event:	12
Model:	GeçişZamanlıPetriAğModeli.xml

Şekil 5. 4. Geçiş zamanlı PA model için PN Toolbox programı çıktısı

5.1.7. Kısmi-bulanık geçiş zamanlı Petri ağı ile modelleme

En yalın hali ile EÜS'ler merkezi bir otomatik taşıma sistemi ile birbirine bağlanmış bilgisayar destekli tezgahlar, robotlar ve çeşitli üretim araç-gereçlerinin oluşturduğu bütünleşik üretim sistemleridir. Böyle bütünleşik yapılarda, sistemde var olan birçok türde elemanın farklı mekanik yapılara ve farklı çalışma prensiplerine sahip olmalarından kaynaklanan ve kontrol edilemeyen belirsizliklerin yaşanması kaçınılmazdır. Çalışma kapsamında ele alınan EÜH'nin çalışma döngüsü ve prensipleri gözlemlendiğinde sistem elemanlarının yapısından doğan ve kontrol edilemeyen bazı belirsizlikler ortaya konmuştur.

Bunlar;

- Hava besleme verimliliği
- Elektrik güç verimliliği

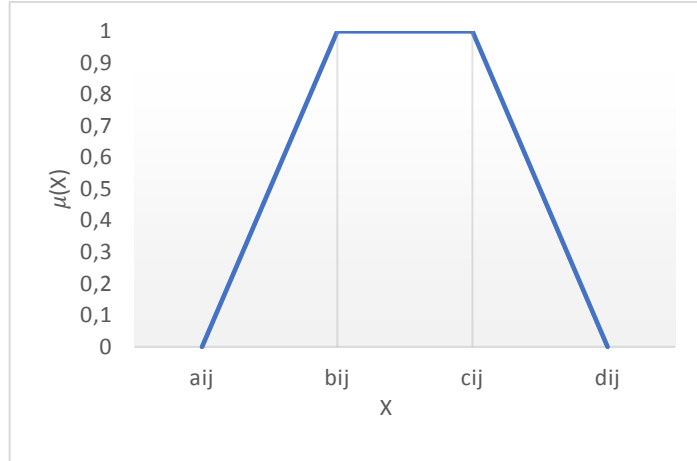
gibi mekanik sistemlerden kaynaklanan güç kayıpları olarak sayılabilir.

Sistemlerin modellenmesinde karşılaşılan belirsizlik durumları;

- Rassallık (Randomness)
- Bulanıklık (Fuzziness)

olmak üzere 2 farklı şekilde karşımıza çıkar. Çalışma kapsamında ele aldığımız sistemde gözlemlenen ve yukarıda listelenen belirsizlikler, “bulanıklık” kategorisine dahil edilebilir. Çünkü söz konusu belirsizliklerde ortaya çıkan sonuçlara olasılıklar etki etmez, dolayısıyla rassallıktan bahsedilemez. (Bölüm 3.13.4) Bahsedilen bu belirsizliklerin ortaya çıkmasında rassallık rol oynamaz. Kesinlik içermeyen bilgilerden kaynaklanan bu durumlar ancak “bulanıklık” kavramı ile açıklanabilir. Belirsizliklerin sisteme yansıtılması kullanılan parametrelerde de değişim gerektirir. Parametreler bulanık yaklaşım ile yeniden

hesaplanarak sisteme dahil edilmelidir. Operasyon süreleri ile ilişkilendirilen geçiş sürelerinin yeniden hesaplanması gerekir. Bu amaçla tez kapsamında geçiş sürelerinin bulanıklık dikkate alınarak hesaplanması için yamuksal üyelik fonksiyonunu (trapezoidal function) kullanan Negi Yaklaşımı (Negi's Approach) ile çalışılacaktır. [56] Yamuk üyelik fonksiyonunu (Şekil 5.5)



Şekil 5. 5. Negi Yaklaşımı'nda kullanılan yamuk üyelik fonksiyonu

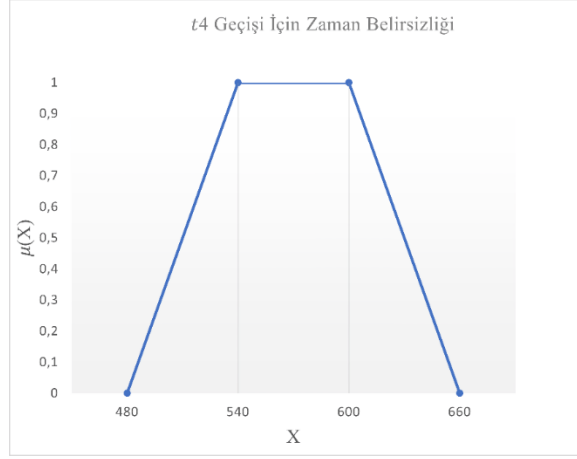
kullanan bir bulanık mantık yaklaşım olan bu metod ışığında süreç belirsizlikleri dikkate alınarak işlem sürelerini içeren “bulanık geçiş sürelerini” hesaplamak amacıyla Eşitlik (5.1)'deki

$$x'_t = \frac{(-a_{ij}^2 - b_{ij}^2 + c_{ij}^2 + d_{ij}^2 - a_{ij}b_{ij} + c_{ij}d_{ij})}{3 \times (-a_{ij} - b_{ij} + c_{ij} + d_{ij})}, \quad x'_t = t \text{ geçişi için hesaplanan} \quad (5.1)$$

durulaştırılmış işlem süresi

formülasyon tanımlanmıştır.

Sistemdeki kontrol edilemeyen belirsizlikler tüm EÜH'ye yayılmış olsa da “Kısmi-Bulanık Geçiş Zamanlı PA” modelleme yaklaşımı kapsamında Tablo 5.1'den görülebilecek olan CNC freze tezgahına ait olan en uzun işlem süreleri, bulanık sayılar olarak modellenmiştir. Bunun için Tablo 5.2'de t_4 , t_7 , t_{10} olarak tanımlanan ve CNC freze tezgahındaki operasyonları temsil eden geçişlere ait süreler, Negi metoda göre Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de olduğu gibi yeniden hesaplanarak bulanık sürelerle dönüştürülür.

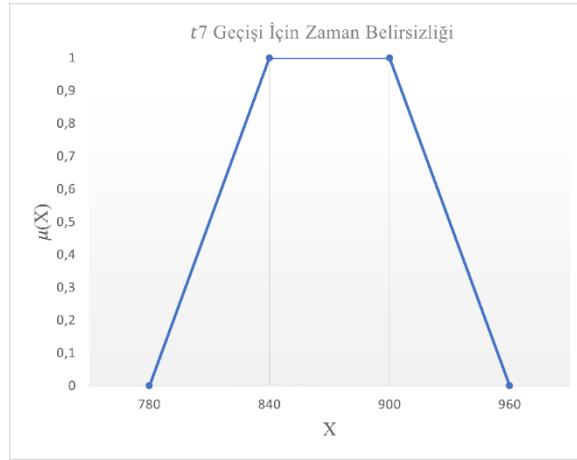


Şekil 5. 6. t_4 geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu

$$x_4' = \frac{(-480^2 - 540^2 + 600^2 + 660^2 - 480 \times 540 + 600 \times 660)}{3 \times (-480 - 540 + 600 + 660)} \quad (5.2)$$

$x_4' = t_4$ geçişi için hesaplanan durulaştırılmış işlem süresi

$x_4' = 570$ sn

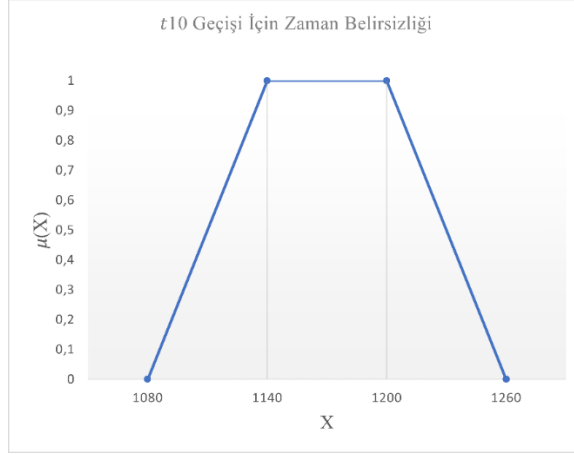


Şekil 5. 7. t_7 geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu

$$x_7' = \frac{(-780^2 - 840^2 + 900^2 + 960^2 - 780 \times 840 + 900 \times 960)}{3 \times (-780 - 840 + 900 + 960)} \quad (5.3)$$

$x_7' = t_7$ geçişi için hesaplanan durulaştırılmış işlem süresi

$x_7' = 870$ sn



Şekil 5. 8. t_{10} geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu

$$x_{10}' = \frac{(-1080^2 - 1140^2 + 1200^2 + 1260^2 - 1080 \times 1140 + 1200 \times 1260)}{3 \times (-1080 - 1140 + 1200 + 1260)}$$

$$x_{10}' = t_{10} \text{ geçişi için hesaplanan durulaştırılmış işlem süresi} \quad (5.4)$$

$$x_{10}' = 1170 \text{ sn}$$

Kısmi-Bulanık Geçiş Zamanlı PA modelinde sistemdeki kaynakları ve durumları tanımlamak için kullanılan konumlar (P) ile operasyonlar/yarı mamul/bitmiş ürünleri tanımlamak için kullanılan geçişler (T) Tablo 5.2'de verilmiştir. Kısmi-Bulanık Geçiş Zamanlı PA modelinde geçişlere atanan işlem süreleri ise Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5. 4. Kısmi-bulanık geçiş zamanlı PA model geçiş süreleri

Geçişler (t)	Süreler (<i>saniye</i>)
t_1	5
t_2	20
t_3	10
t_4	570
t_5	10
t_6	11
t_7	870

Tablo 5.4. devam ediyor

t_9	13
t_8	12
t_{10}	1170
t_{11}	10
t_{12}	20
t_{13}	-

Bütün bu verilenler ve açıklamalar doğrultusunda EÜH'ye ait olan ve MATLAB PNTtoolbox programı kullanılarak oluşturulmuş olan Kısmi-Bulanık Geçiş Zamanlı PA modeli Şekil 5.3'teki gibidir. Bir palette taşınan 3 adet işlenecek parçanın tüm işlemlerden geçerek bitmiş ürün olarak sistemden ayrılması toplamda 2721 saniyede tamamlanmaktadır. Modelin çalıştırılmasıyla elde edilen program çıktısı Şekil 5.9'da verilmiştir.

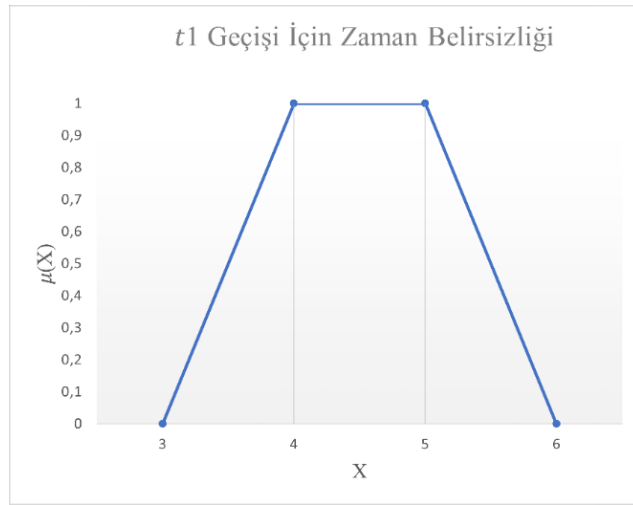
Time:	2721
Event:	12
Model:	KısmiBulanıkGeçişZamanlıPetriAğModeli.xml

Şekil 5. 9. Kısmi-bulanık geçiş zamanlı PA model için PNTtoolbox programı çıktısı

5.1.8. Bulanık geçiş zamanlı Petri ağı ile modelleme

Bu çalışma kapsamında ele alınan EÜH'de yer alan palet, taşıma robotu, tampon stok alanı ve CNC freze tezgâhı elemanlarına ait işlem sürelerinin, sistemin sahip olduğu mekanik özelliklerden doğan güç kullanım performansı, hava besleme verimliliği, elektrik güç verimliliği vb. nedenlerden dolayı belirsizlikler göstermiş olduğu gözlemlenmiştir. Mekanik özellikler taşıyan tüm sistemlerde gözlemlenmesi kaçınılmaz olan bu belirsizliklerde rassallık özelliği ile karşılaşmadığı, dolayısıyla da ancak bulanıklık ile açıklanabileceği söylenebilir. Bu sebeple geliştirilen metodolojide modeldeki “tüm geçiş süreleri” yamuk üyelik fonksiyonu kullanan Negi'ye ait [56] bulanık parametre hesaplama yaklaşımı ile yeniden hesaplanır. Hesaplama sonucu elde edilen bulanık geçiş süreleri modele entegre

edilir. Modelde yer alan tüm geçişlere ait süreler Negi Yaklaşımı'na göre yeniden Şekil 5.10 ile Şekil 5.21 aralığı boyunca görüldüğü gibi hesaplanmıştır:

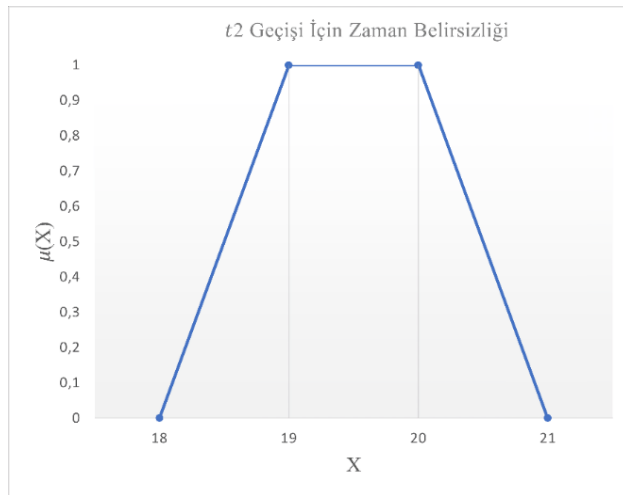


Şekil 5. 10. t_1 geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuksal üyelik fonksiyonu

$$x_1' = \frac{(-3^2 - 4^2 + 5^2 + 6^2 - 3 \times 4 + 5 \times 6)}{3 \times (-3 - 4 + 5 + 6)} \quad (5.5)$$

$x_1' = t_1$ geçişi için hesaplanan durulaştırılmış işlem süresi

$$x_1' = 4,5 \text{ sn}$$

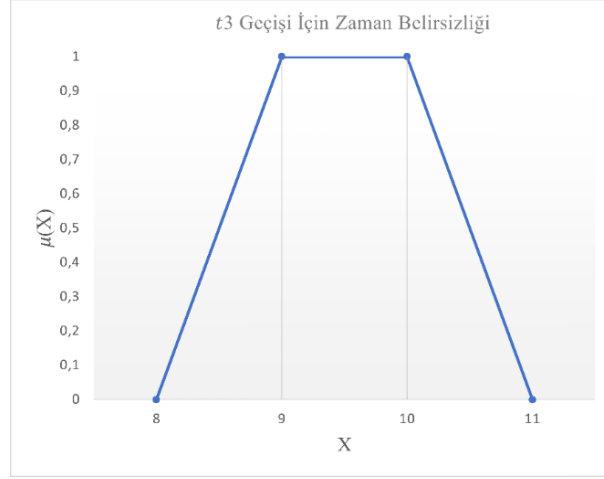


Şekil 5. 11. t_2 geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu

$$x_2 = \frac{(-18^2 - 19^2 + 20^2 + 21^2 - 18 \times 19 + 20 \times 21)}{3 \times (-18 - 19 + 20 + 21)} \quad (5.6)$$

$x_2 = t_2$ geçişi için hesaplanan durulaştırılmış işlem süresi

$$x_2 = 19,5 \text{ sn}$$

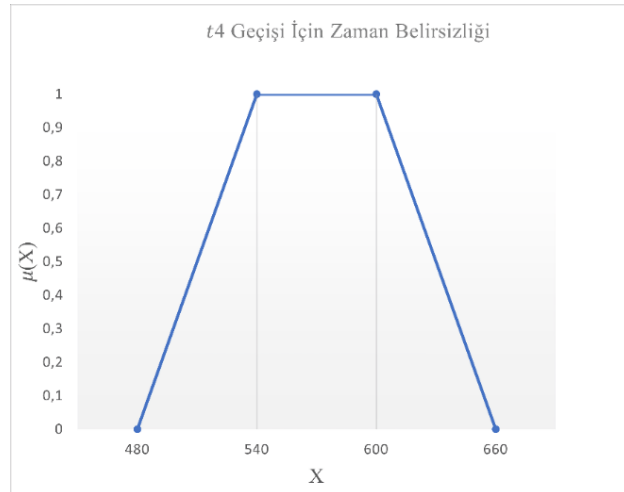


Şekil 5. 12. t_3 geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu

$$x_3 = \frac{(-8^2 - 9^2 + 10^2 + 11^2 - 8 \times 9 + 10 \times 11)}{3 \times (-8 - 9 + 10 + 11)} \quad (5.7)$$

$x_3 = t_3$ geçişi için hesaplanan durulaştırılmış işlem süresi

$$x_3 = 9,5 \text{ sn}$$

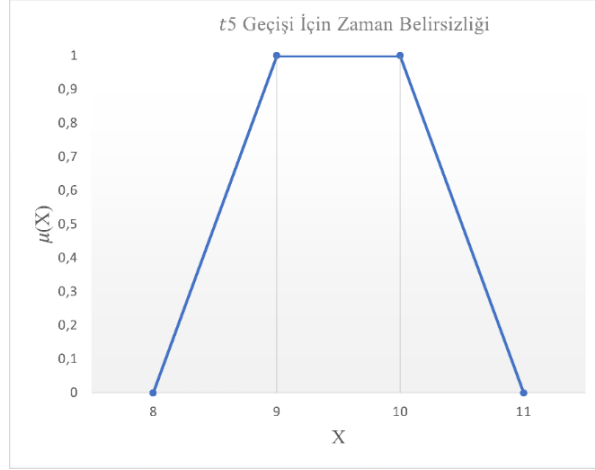


Şekil 5. 13. t_4 geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu

$$x_4 = \frac{(-480^2 - 540^2 + 600^2 + 660^2 - 480 \times 540 + 600 \times 660)}{3 \times (-480 - 540 + 600 + 660)}$$

$$x_4 = t_4 \text{ ge\u00e7i\u015fi i\u00e7in hesaplanan durula\u015ftirilm\u0131\u015f i\u015flem s\u00fcresi} \quad (5.8)$$

$$x_4 = 570 \text{ sn}$$

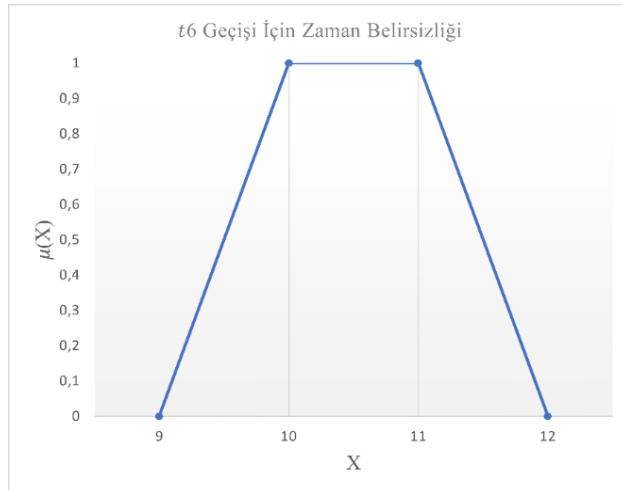


Şekil 5. 14. t_5 ge\u00e7i\u015fi i\u00e7in zaman belirsizli\u011fini g\u00f6steren yamuk \u00fcyelik fonksiyonu

$$x_5 = \frac{(-8^2 - 9^2 + 10^2 + 11^2 - 8 \times 9 + 10 \times 11)}{3 \times (-8 - 9 + 10 + 11)}$$

$$x_5 = t_5 \text{ ge\u00e7i\u015fi i\u00e7in hesaplanan durula\u015ftirilm\u0131\u015f i\u015flem s\u00fcresi} \quad (5.9)$$

$$x_5 = 9,5 \text{ sn}$$

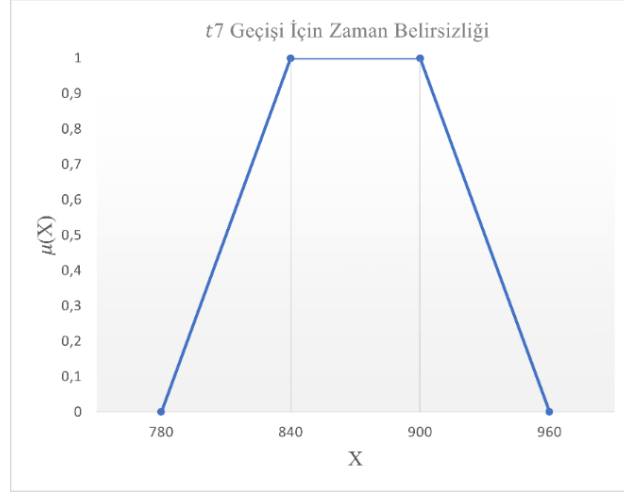


Şekil 5. 15. t_6 ge\u00e7i\u015fi i\u00e7in zaman belirsizli\u011fini g\u00f6steren yamuk \u00fcyelik fonksiyonu

$$x_6' = \frac{(-9^2 - 10^2 + 11^2 + 12^2 - 9 \times 10 + 11 \times 12)}{3 \times (-9 - 10 + 11 + 12)} \quad (5.10)$$

$x_6' = t_6$ geçişi için hesaplanan durulaştırılmış işlem süresi

$$x_6' = 10,5 \text{ sn}$$

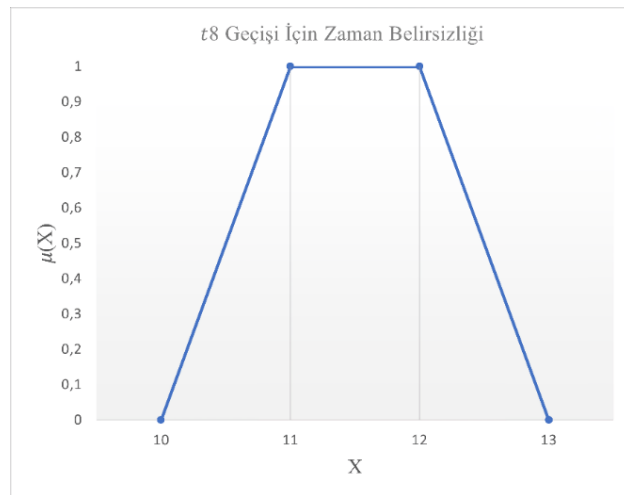


Şekil 5. 16. t_7 geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu

$$x_7' = \frac{(-780^2 - 840^2 + 900^2 + 960^2 - 780 \times 840 + 900 \times 960)}{3 \times (-780 - 840 + 900 + 960)} \quad (5.11)$$

$x_7' = t_7$ geçişi için hesaplanan durulaştırılmış işlem süresi

$$x_7' = 870 \text{ sn}$$

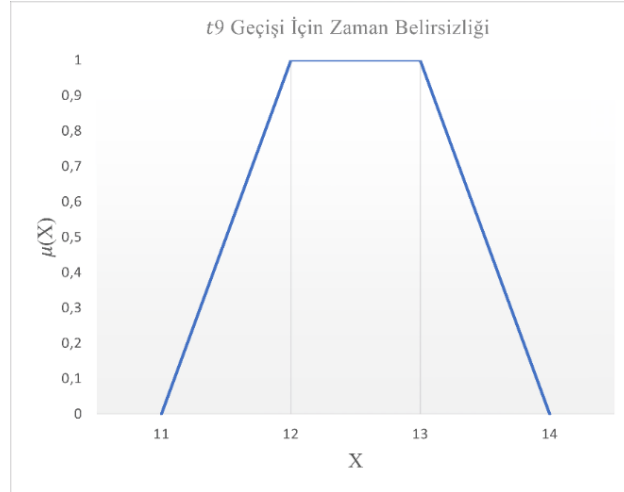


Şekil 5. 17. t_8 geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu

$$x_8 = \frac{(-10^2 - 11^2 + 12^2 + 13^2 - 10 \times 11 + 12 \times 13)}{3 \times (-10 - 11 + 12 + 13)} \quad (5.12)$$

$x_8 = t_8$ geçişi için hesaplanan durulaştırılmış işlem süresi

$$x_8 = 11,5 \text{ sn}$$

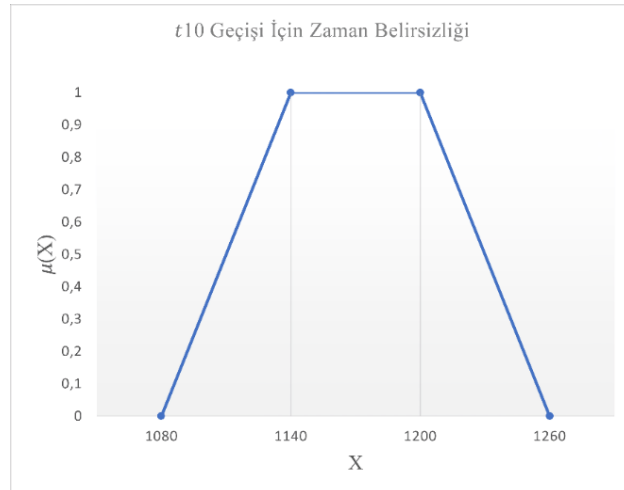


Şekil 5. 18. t_9 geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu

$$x_9 = \frac{(-11^2 - 12^2 + 13^2 + 14^2 - 11 \times 12 + 13 \times 14)}{3 \times (-11 - 12 + 13 + 14)} \quad (5.13)$$

$x_9 = t_9$ geçişi için hesaplanan durulaştırılmış işlem süresi

$$x_9 = 12,5 \text{ sn}$$

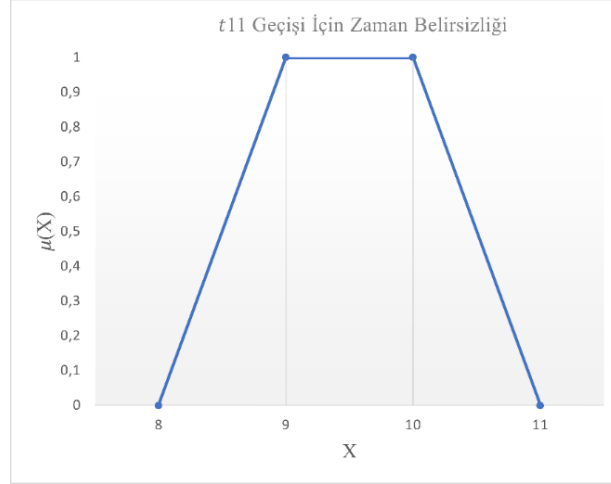


Şekil 5. 19. t_{10} geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu

$$x_{10}' = \frac{(-1080^2 - 1140^2 + 1200^2 + 1260^2 - 1080 \times 1140 + 1200 \times 1260)}{3 \times (-1080 - 1140 + 1200 + 1260)} \quad (5.14)$$

$x_{10}' = t_{10}$ geçişi için hesaplanan durulaştırılmış işlem süresi

$$x_{10}' = 1170 \text{ sn}$$

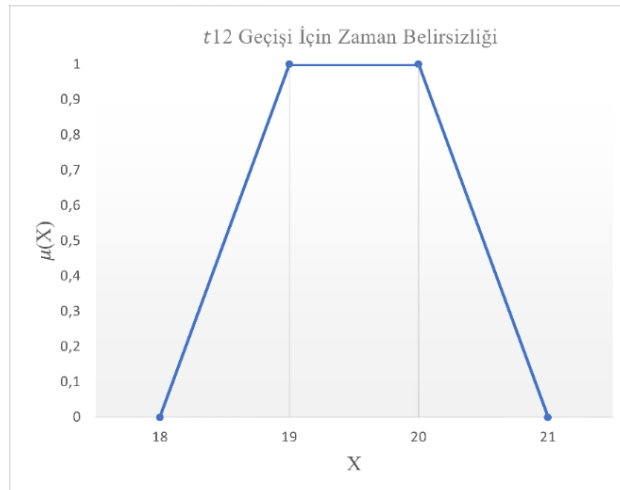


Şekil 5. 20. t_{11} geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu

$$x_{11}' = \frac{(-8^2 - 9^2 + 10^2 + 11^2 - 8 \times 9 + 10 \times 11)}{3 \times (-8 - 9 + 10 + 11)} \quad (5.15)$$

$x_{11}' = t_{11}$ geçişi için hesaplanan durulaştırılmış işlem süresi

$$x_{11}' = 9,5 \text{ sn}$$



Şekil 5. 21. t_{12} geçişi için zaman belirsizliğini gösteren yamuk üyelik fonksiyonu

$$x_{12}' = \frac{(-18^2 - 19^2 + 20^2 + 21^2 - 18 \times 19 + 20 \times 21)}{3 \times (-18 - 19 + 20 + 21)} \quad (5.16)$$

$x_{12}' = t_{12}$ geçişi için hesaplanan durulaştırılmış işlem süresi

$x_{12}' = 19,5$ sn

Bulanık Geçiş Zamanlı PA modelinde sistemdeki kaynakları ve durumları tanımlamak için kullanılan konumlar (P) ile operasyonlar/yarı mamul/bitmiş ürünleri tanımlamak için kullanılan geçişler (T) Tablo 5.2'de verilmiştir. Kısmi-Bulanık Geçiş Zamanlı PA modelde geçişlere atanan işlem süreleri ise Tablo 5.5'te verilmiştir

Tablo 5. 5. Bulanık geçiş zamanlı PA model geçiş süreleri

Geçişler (t)	Süreler (<i>saniye</i>)
t_1	4,5
t_2	19,5
t_3	9,5
t_4	570
t_5	9,5
t_6	10,5
t_7	870
t_8	11,5
t_9	12,5
t_{10}	1170
t_{11}	9,5
t_{12}	19,5
t_{13}	-

Bütün bu verilenler ve açıklamalar doğrultusunda EÜH'ye ait olan ve MATLAB PN Toolbox programı kullanılarak oluşturulmuş olan Bulanık Geçiş Zamanlı PA modeli Şekil 5.3'teki gibidir.

Bir palette taşınan 3 adet işlenecek parçanın tüm işlemlerden geçerek bitmiş ürün olarak sistemden ayrılması toplamda 2716,5 saniyede tamamlanmaktadır. Modelin çalıştırılmasıyla elde edilen program çıktısı Şekil 5.22’de verilmiştir.

Time:	2716.5
Event:	12
Model:	BulanıkGeçişZamanlıPetriAğModeli.xml

Şekil 5. 22. Bulanık geçiş zamanlı PA model için PN Toolbox programı çıktısı

5.2. Esnek Üretim Hücresine ait PA Modelin Sahip Olduğu Özelliklerin İncelenmesi

Modellenen EÜH’ye ait Petri ağı, $PA = (P, T, F, W, M_0)$ veya $PA = (P, T, I, O, M_0)$

şeklindeki matematiksel notasyonlar ile ifade edilebilir. Buna göre;

$$\bullet P = \left\{ \begin{array}{l} P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}, \\ Palet, TamponStokAlanı, CNCFrezeTezgahı, \\ TaşımaRobotu, p_{12} \end{array} \right\} \text{ olmak üzere toplam 16 adet}$$

konum ve

$$\bullet T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}\} \text{ olmak üzere toplam 13 adet geçiş}$$

içermektedir.

$$\bullet F \subset (P \times T) \cup (T \times P) \text{ yönlü oklar kümesini temsil eder.}$$

$$\bullet I : (P \times T) \rightarrow \mathbb{N} \text{ konumlardan geçişlere doğru olan yönlü oklar kümesini tanımlar ve;}$$

$$\begin{aligned}
I(Palet, t_1) &= 1, & I(p_1, t_2) &= 1, & I(TamponStokAlanı, t_2) &= 1, \\
I(TaşımaRobotu, t_2) &= 1, & I(p_2, t_3) &= 1, \\
I(CNCFrezeTezgahı, t_3) &= 1, & I(p_3, t_4) &= 1, \\
I(p_4, t_5) &= 1, & I(TamponStokAlanı, t_5) &= 1, \\
I(TaşımaRobotu, t_5) &= 1, & I(p_5, t_6) &= 1, \\
I(CNCFrezeTezgahı, t_6) &= 1, & I(p_6, t_7) &= 1, \\
I(p_7, t_8) &= 1, & I(TamponStokAlanı, t_8) &= 1, \\
I(TaşımaRobotu, t_8) &= 1, & I(p_8, t_9) &= 1, \\
I(CNCFrezeTezgahı, t_9) &= 1, & I(p_9, t_{10}) &= 1, \\
I(p_{10}, t_{11}) &= 1, & I(p_{11}, t_{12}) &= 1, & I(p_{12}, t_{13}) &= 1
\end{aligned}$$

olacak şekilde modellenmiştir

- $O: (T \times P) \rightarrow \mathbb{N}$ geçişlerden konumlara doğru olan yönlü oklar kümesini tanımlar ve;

$$\begin{aligned}
O(p_1, t_1) &= 1, & O(p_2, t_2) &= 1, & O(p_3, t_3) &= 1, \\
O(TamponStokAlanı, t_3) &= 1, & O(p_4, t_4) &= 1, \\
O(TaşımaRobotu, t_4) &= 1, & O(p_5, t_5) &= 1, \\
O(CNCFrezeTezgahı, t_5) &= 1, & O(p_6, t_6) &= 1, \\
O(TamponStokAlanı, t_6) &= 1, & O(p_7, t_7) &= 1, \\
O(TaşımaRobotu, t_7) &= 1, & O(p_8, t_8) &= 1, \\
O(CNCFrezeTezgahı, t_8) &= 1, & O(p_9, t_9) &= 1, \\
O(TamponStokAlanı, t_9) &= 1, & O(p_{10}, t_{10}) &= 1, \\
O(TaşımaRobotu, t_{10}) &= 1, & O(p_{11}, t_{11}) &= 1, \\
O(CNCFrezeTezgahı, t_{11}) &= 1, & O(p_{12}, t_{12}) &= 1, \\
O(Palet, t_{13}) &= 1
\end{aligned}$$

olacak şekilde modellenmiştir.

- $In \times s \begin{bmatrix} I_{ij} \end{bmatrix}$ şeklinde yazılabilen girdi matrisini (input matrix); $s =$ geçiş sayısı kadar

satır ve $n =$ konum sayısı kadar sütun oluşturur.

Bu matris;

$$\left[I_{ij} \right]_{13 \times 16} \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & I_{13} & \cdots & \cdots & \cdots & I_{1_{-16}} \\ I_{21} & I_{22} & I_{23} & \cdots & \cdots & \cdots & I_{2_{-16}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ I_{13_{-1}} & I_{13_{-2}} & I_{13_{-3}} & \cdots & \cdots & \cdots & I_{13_{-16}} \end{bmatrix}$$

şeklinde gösterilir ve MATLAB PN Toolbox programında “Incidence Matrix” sekmesi ile girdi matrisini (program çıktısında Input Matrix olarak görürüz) elde edebiliriz. Girdi matrisi için PN Toolbox programı sonucu Şekil 5.23’te verilmiştir. Girdi matrisi PN Toolbox programında A_i (13×16) şeklinde gösterilmiştir.

Input Matrix: Ai (13 x 16):

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1

Şekil 5. 23. PN Toolbox programı input matrix sorgulaması sonucu

- $O_{s \times n} \left[O_{ij} \right]$ şeklinde yazılabilen çıktı matrisini (output matrix) $s =$ geçiş sayısı

kadar satır ve $n =$ konum sayısı kadar sütun oluşturur.

Bu matris;

$$\left[O_{ij} \right]_{13 \times 16} \begin{bmatrix} O_{11} & O_{12} & O_{13} & \cdots & \cdots & \cdots & O_{1_{-16}} \\ O_{21} & O_{22} & O_{23} & \cdots & \cdots & \cdots & O_{2_{-16}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ O_{13_{-1}} & O_{13_{-2}} & O_{13_{-3}} & \cdots & \cdots & \cdots & O_{13_{-16}} \end{bmatrix}$$

şeklinde gösterilir ve MATLAB PN Toolbox programında “Incidence Matrix” sekmesi ile çıktı matrisini (program çıktısında Output Matrix olarak görürüz) elde edebiliriz. Çıktı

matrisi için PN Toolbox programı sonucu Şekil 5.24'te verilmiştir. Çıktı matrisi PN Toolbox programında A_o (13×16) şeklinde gösterilmiştir.

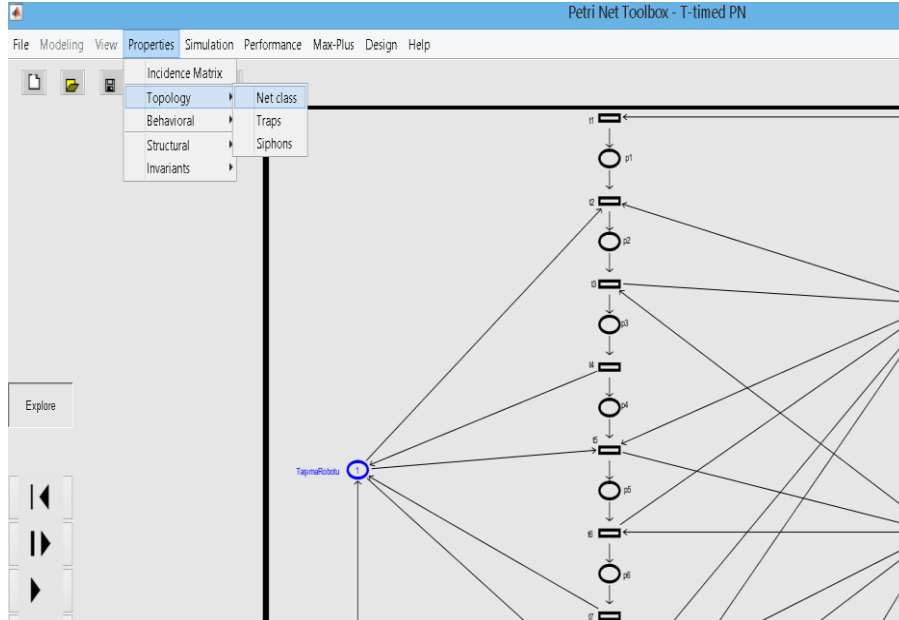
Output Matrix: A_o (13 x 16):

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

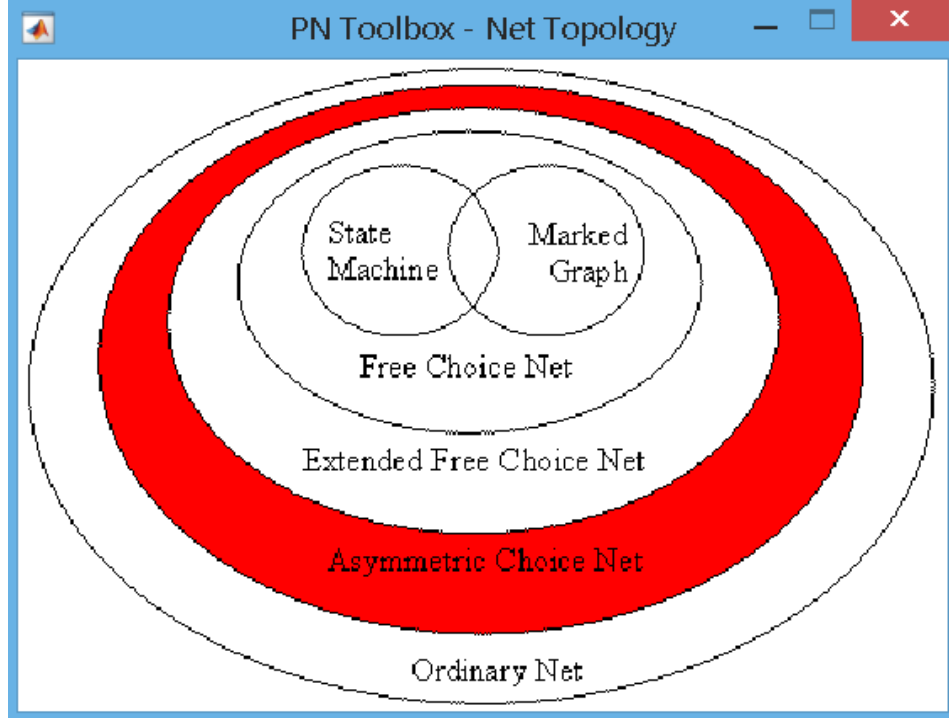
Şekil 5. 24. PN Toolbox programı output matrix sorgulaması sonucu

5.2.1. Esnek üretim hüresine ait PA modelinin sınıfı

Ele alınarak modellenmesi yapılan EÜH “asimetrik seçimli PA” sınıfına aittir. PA modelinin hangi sınıfa ait olduğunu saptamak için PN Toolbox programında Şekil 5.25'te gösterilen adımlardaki gibi yapılan “Topology” analizi sonucu Şekil 5.26'daki sonuç ekranına ulaşılır.



Şekil 5. 25. Topoloji analizinin yapılışı



Şekil 5. 26. Petri ağ modelinin ait olduğu sınıf

Simetrik karmaşa durumu yaratmayan [48] asimetrik seçimli PA sınıfı özelliği taşıyan bu modelde;

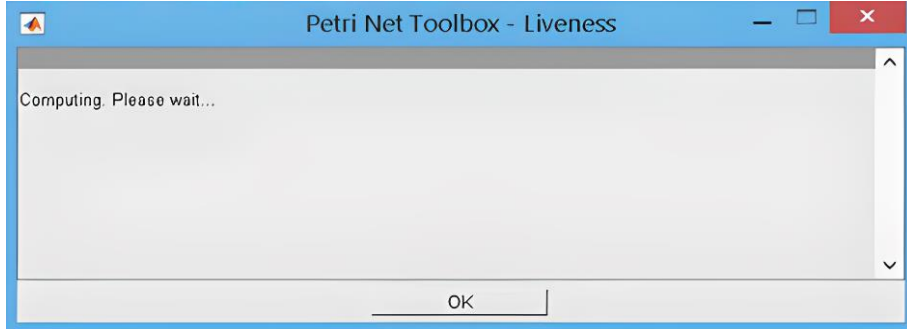
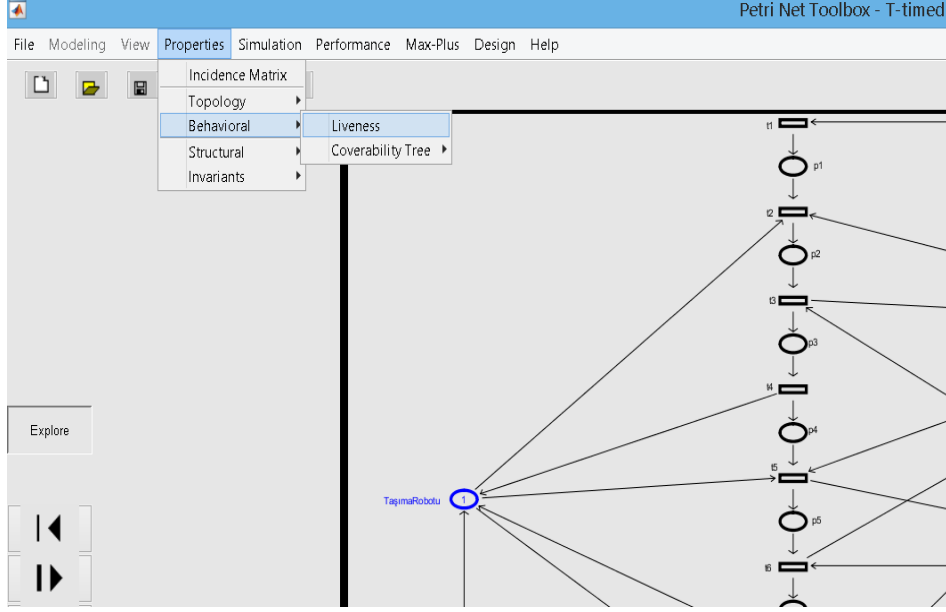
$$\begin{aligned}
 p_i \bullet \cap p_j \bullet \neq \emptyset &\Rightarrow p_i \bullet \subseteq p_j \bullet \text{ veya} \\
 p_j \bullet &\subseteq p_i \bullet, \forall i, j = 1, 2, \dots, 16 \text{ ve} \\
 p_{i,j} &\in P
 \end{aligned}
 \tag{5.17}$$

Eşitlik (5.17)'de verilen şart sağlanmaktadır.

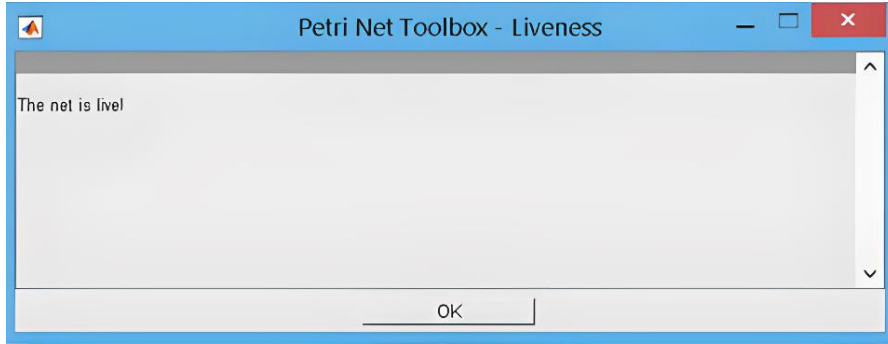
5.2.2. Esnek üretim hücrelerine ait PA modelinin davranışsal özellikleri

Bu başlık altında ulaşılan Petri ağ modelin PN Toolbox programı aracılığıyla davranışsal özellikleri incelenmiştir.

- Canlılık özelliğinin incelenmesi : Birçok sistemde aranan bir özellik olan canlılık özelliği için ulaşılan Petri ağı modelinde Şekil 5.27'deki adımlar takip edilerek yapılan analiz ile Şekil 5.28'deki sonuca ulaşılır.



Şekil 5. 27. Canlılık analizinin yapıışı



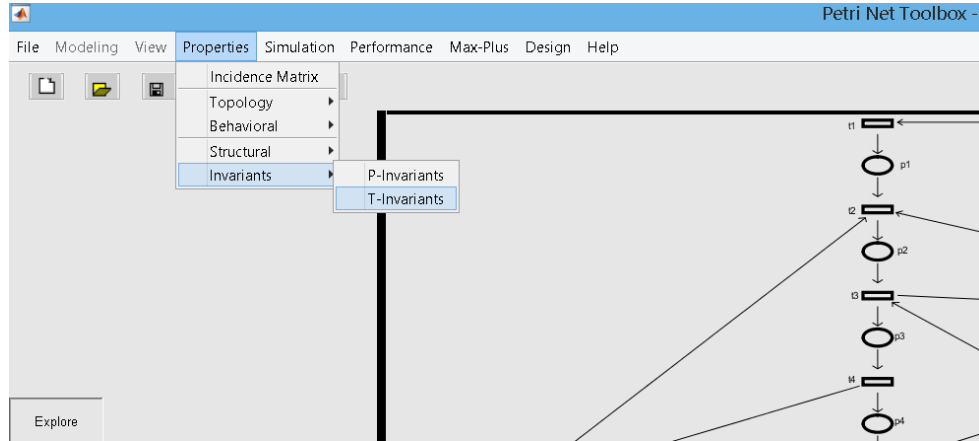
Şekil 5. 28. Canlılık analizi sonucu

PN Toolbox ile yapılan canlılık analizi ile oluşturulan PA modelinin “canlı” olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ağın canlılık özelliği taşıyabilmesi için gerekli olan tüm geçişlerin canlı olması kuralı sağlanmaktadır. Oluşturulan PA modeli çıkmaz (kilitleme) içermeyen bir ağ olarak tanımlanmıştır. Çünkü M_0 başlangıç işaretlemesinden ulaşılan

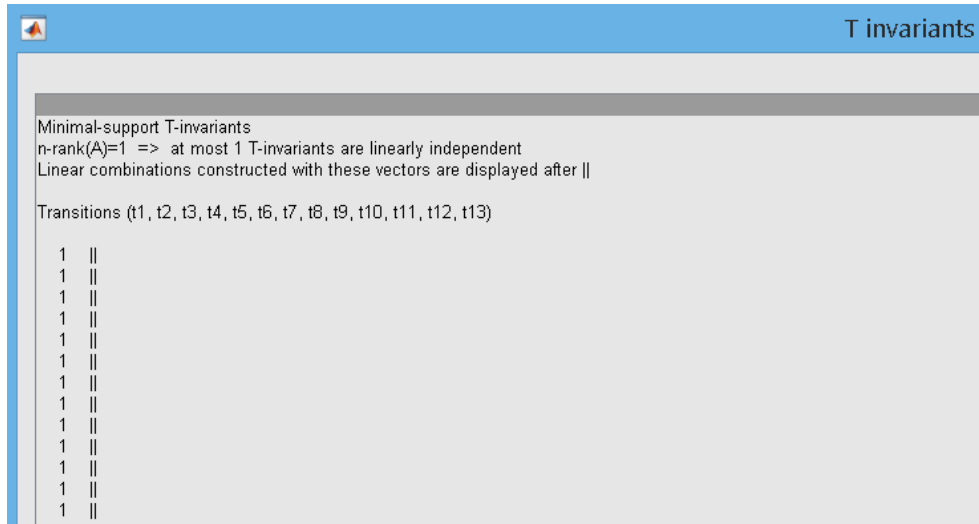
hiçbir işaretlemeye çıkmaz meydana gelmemektedir. Bu durum canlılık analizi ile ulaşılan “The net is live! (Ağ canlıdır!)” sonucu ile ispatlanmaktadır. Böylece EÜH’de çıkmaz olmaması garantilenmiş olur.

- Geri dönebilirlik özelliğinin incelenmesi

Geride dönebilirlik özelliğini incelemek üzere Şekil 5.29’daki adımlar takip edilerek elde edilen t-sabitleri (t-değişmezleri) Şekil 5.30’da verilmiştir.



Şekil 5. 29. t-sabitlerinin elde edilmesi



Şekil 5. 30. Petri ağ modeline ait t-sabitleri

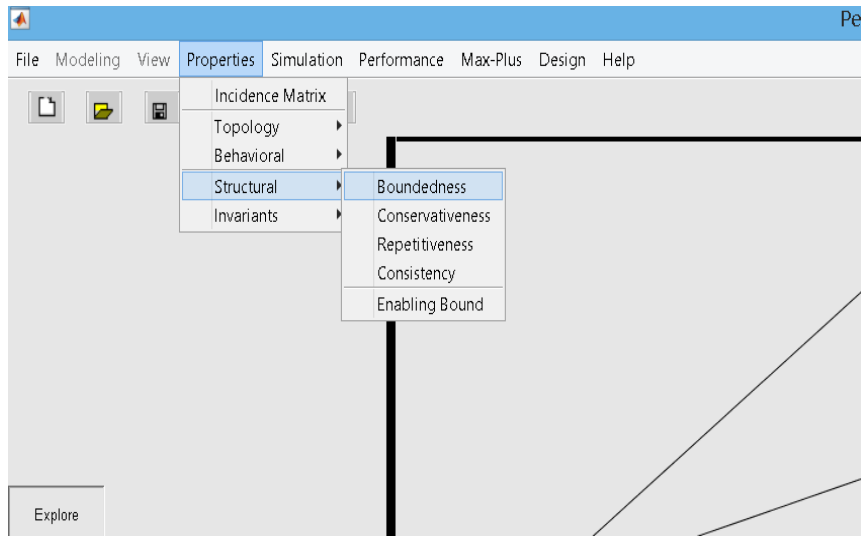
Elde edilen t-sabiti matrisine göre tüm $t \in T$ konumlarının “1” değerine sahip t-sabitleri olduğu görülebilir. Bu sonuca göre de EÜH’ye ait PA model geri dönebilirlik özelliği taşır. Yani $\forall t \in T$ 1 kez gerçekleştikten sonra tekrar M_0 başlangıç işaretlemesine ulaşılacaktır.

5.2.3. Esnek üretim hücresine ait PA modelinin yapısal özellikleri

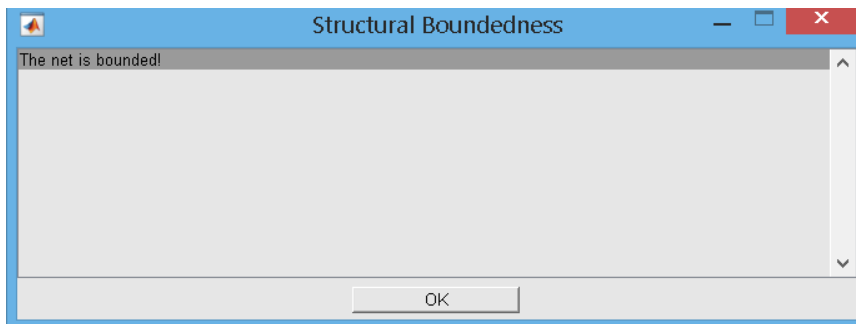
Bu başlık altında ulaşılan Petri ağ modelin PN Toolbox programı aracılığıyla yapısal özellikleri incelenmiştir.

- Sınırlandırılmışlık özelliğinin incelenmesi

Modellenen sistemlerde oluşan kararsızlık durumunu denetleyen ve kontrol altına alan sınırlandırılmışlık özelliği için PA modelde Şekil 5.31'deki adımlar takip edilerek yapılan analiz sonucu Şekil 5.32'de verilmiştir.

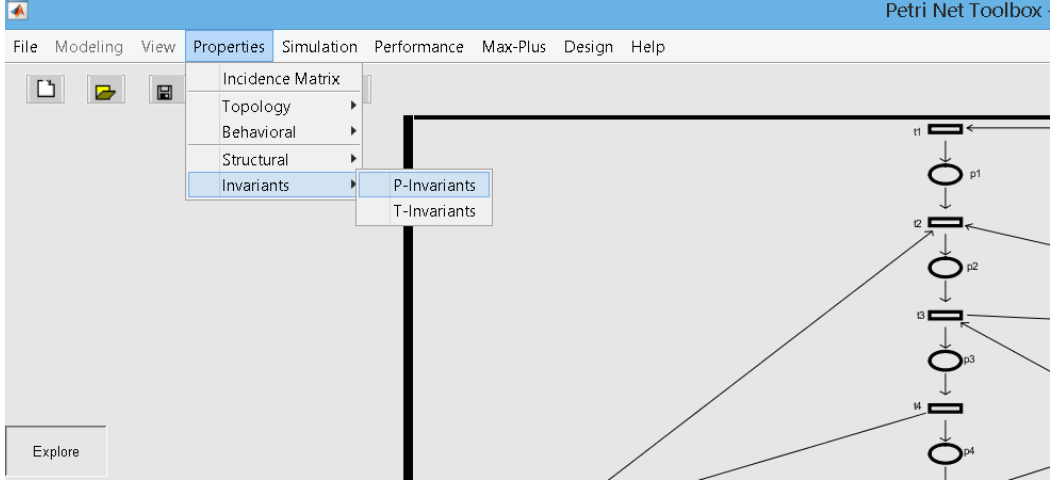


Şekil 5. 31. Sınırlandırılmışlık analizinin yapılışı

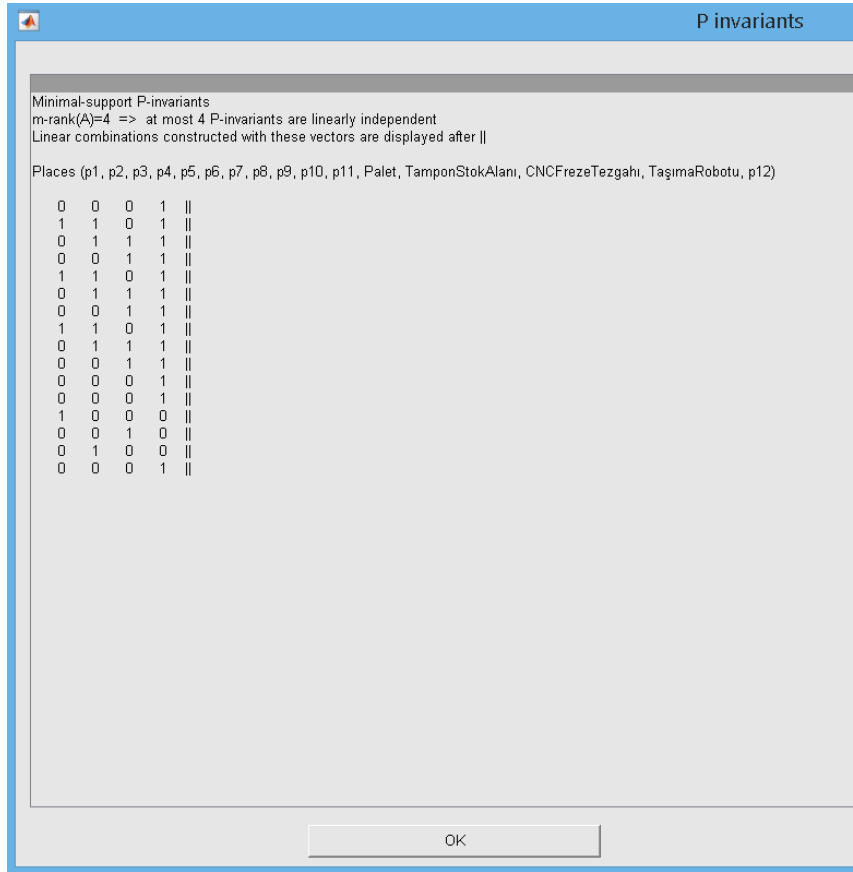


Şekil 5. 32. Sınırlandırılmışlık analizi sonucu

Buna göre EÜH'ye ait PA model sınırlandırılmışlık özelliği taşır. Ayrıca ağa ait sınırlılık özelliğini test etmek için p-sabitleri (p-değişmezleri) de kullanılabilir. Ağa ait p-sabitleri Şekil 5.33'teki adımlar takip edilerek elde edilmiş ve Şekil 5.34'te verilmiştir.



Şekil 5. 33. p-sabitlerinin elde edilmesi



Şekil 5. 34. Petri ağ modeline ait p-sabitleri

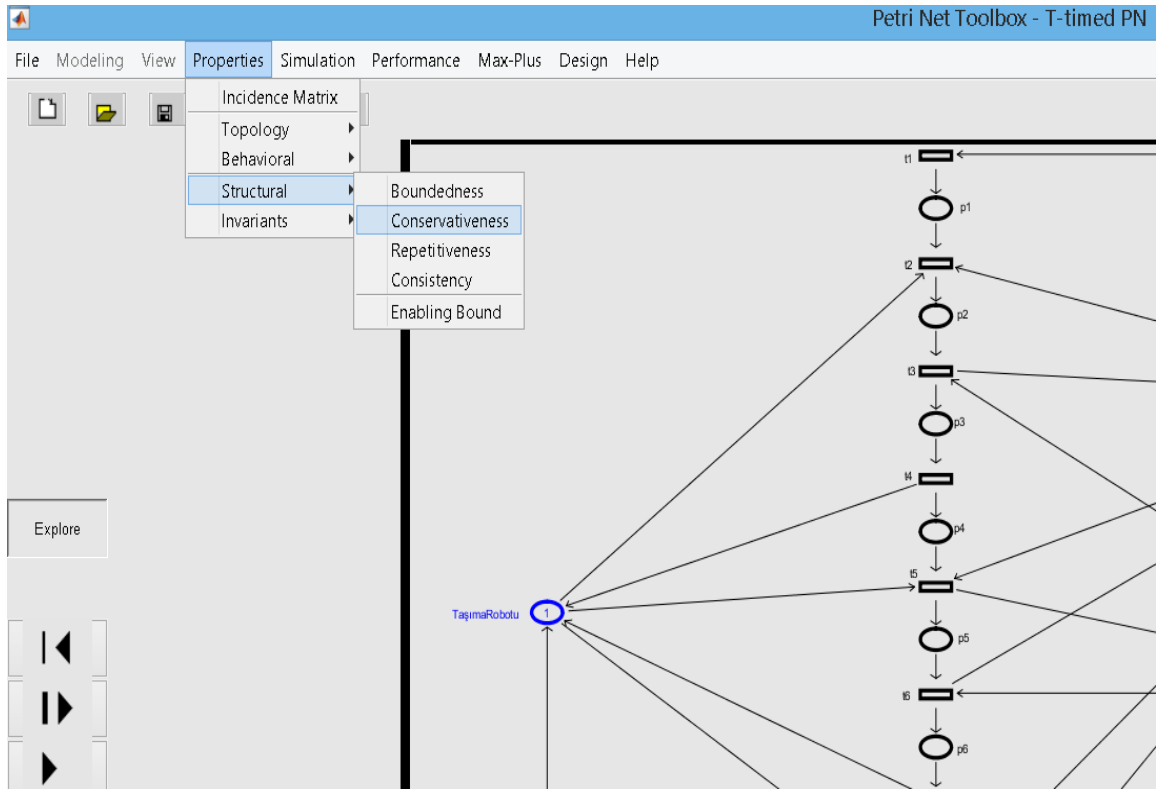
Elde edilen p-sabiti matrisine göre tüm $p \in P$ konumlarının “1” değerine sahip p-sabitleri olduğu görülebilir. Bu sonuca göre de EÜH’ye ait PA model sınırlandırılmışlık özelliği taşır. Ele alınan EÜH’de paylaşılan kaynaklar ve depolama alanı konumlar aracılığıyla modellenmiştir. Sağlanmış olan sınırlandırılmışlık özelliği sayesinde tanımlanan

kaynaklar ve kullanılan tampon stok alanında herhangi bir kapasite aşımı ve stok alanı yetersizliği söz konusu olmadığı söylenebilir. İleride yapılacak çalışmalarda kaynakların ve depolama alanının kapasitelerinin değiştirilmesi durumunda kapasite aşimleri ve stok alanının yeterliliği sınırlılık özelliği ile denetlenerek aşimların önüne geçilebilir.

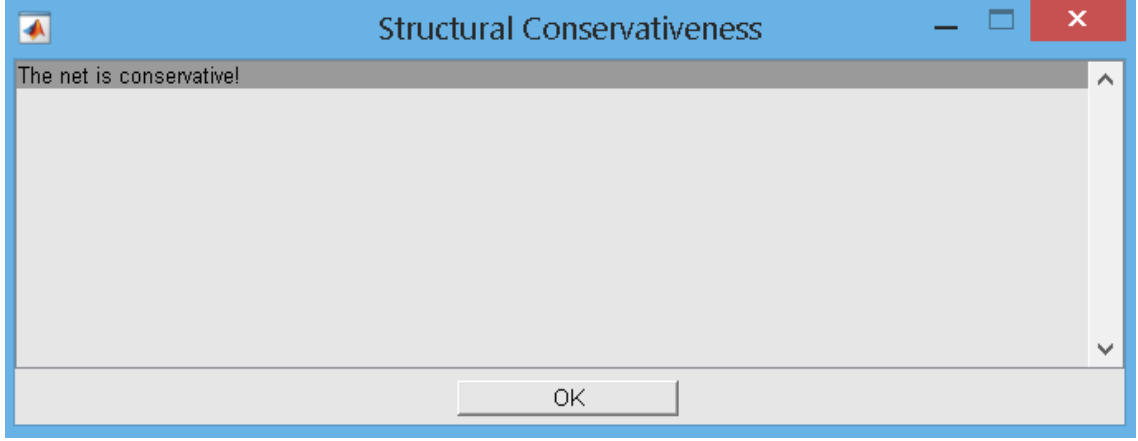
Ayrıca modellenen sisteme ait ağın sahip olduğu sınırlandırılmışlık özelliği, sistemde herhangi bir kararsızlık oluşmadığının da ispatıdır. Ağın herhangi bir noktasında jeton birikmesi yaşanmadığı, böylece kararsızlık meydana gelmediği söylenebilir.

- Korunumluluk özelliğinin incelenmesi

Modellenen EÜH'ye ait PA modelde aranılan özelliklerden biri olan korunumluluk özelliğinin sağlanıp sağlanmadığını kontrol etmek amacıyla Şekil 5.35'teki adımlar takip edilerek yapılan analiz sonucu Şekil 5.36'da verilmiştir.



Şekil 5. 35. Korunumluluk analizinin yapılışı

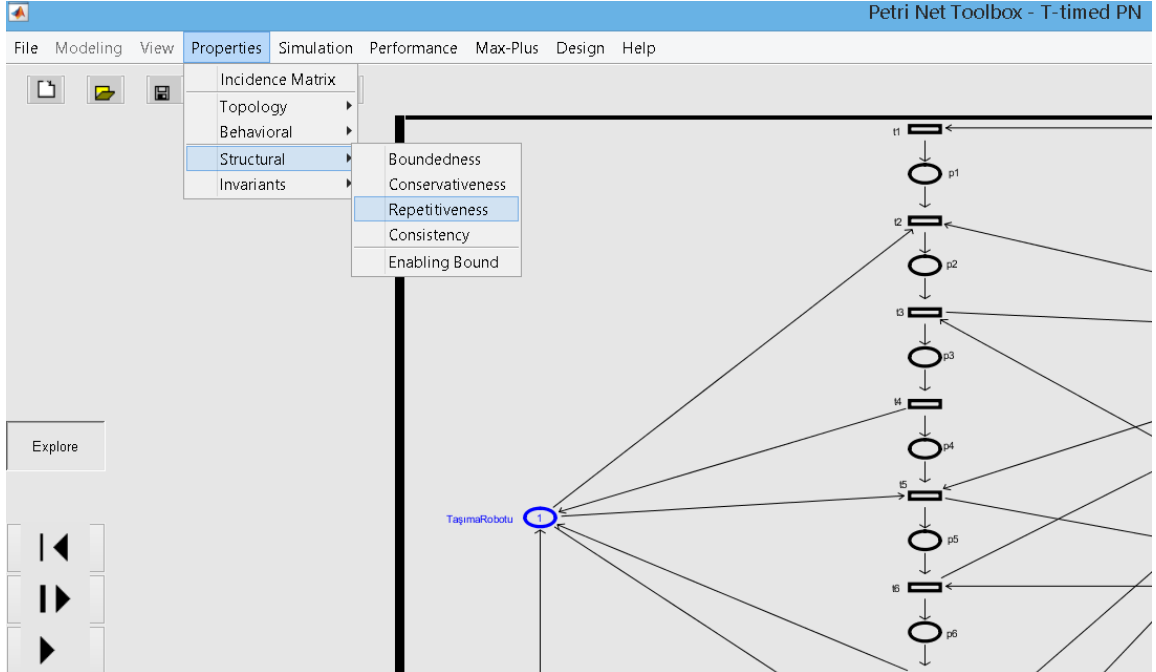


Şekil 5. 36. Korunumluluk analizi sonucu

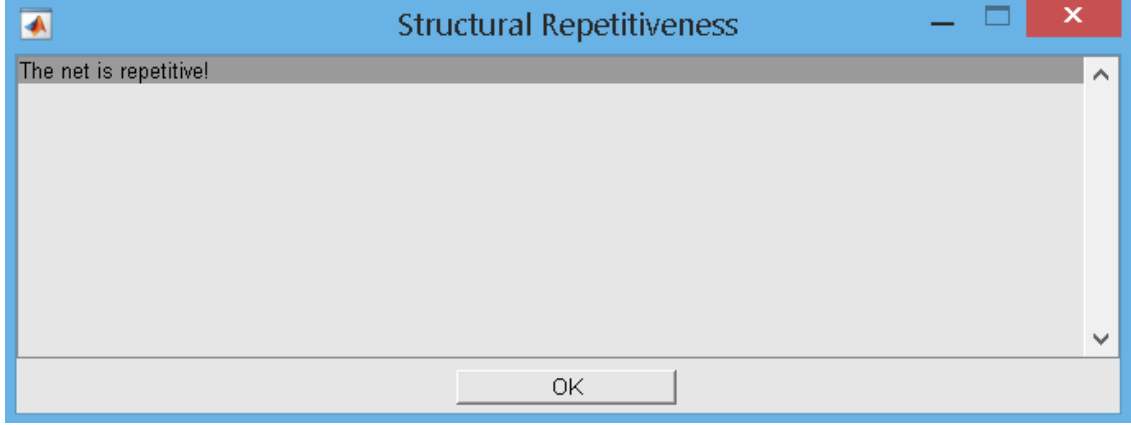
Analiz sonucuna göre EÜH'ye ait PA model korunumludur. Böylece ağdaki M_0 başlangıç işaretlemesinden itibaren ulaşılan her işaretlemedeki konumlarda bulunan toplam jeton sayısının aynı olduğu ve herhangi bir işaretleme anında değişmediği ispatlanmış olur.

- Tekrarlanabilirlik özelliğinin incelenmesi

EÜH'ye ait PA model için tekrarlanabilirlik özelliğinin sorgulanması amacıyla Şekil 5.37'deki gibi gerçekleştirilen adımlar sonucu Şekil 5.38'de verilmiştir.



Şekil 5. 37. Tekrarlanabilirlik analizinin yapılışı

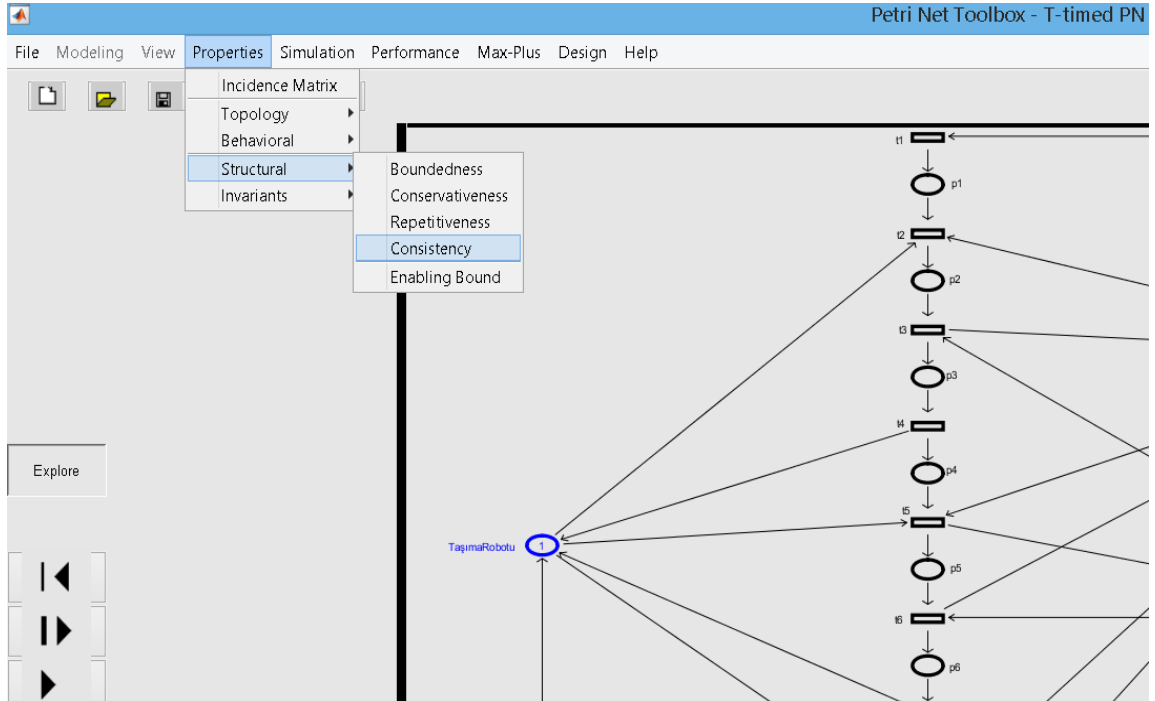


Şekil 5. 38. Tekrarlanabilirlik analizi sonucu

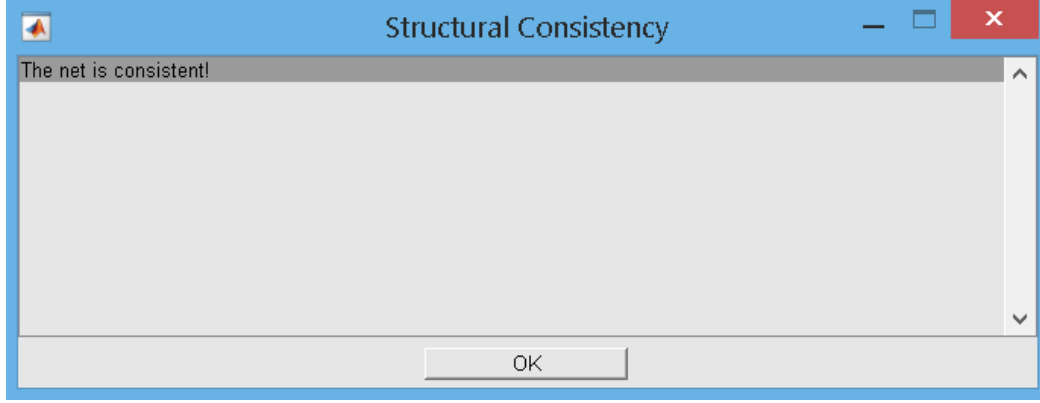
Bu sonuca göre model tekrarlanabilirlik özelliğine sahiptir. Elde edilen PA modelinde $R(M_0)$ kümesine dahil olan bazı işaretlemeler için geçerlilik taşıyan bu özellik ile, söz konusu bu işaretlemelerde tekrar eden operasyonlar ve/veya durumlar olduğu anlamı taşır.

- Tutarlılık özelliğinin incelenmesi

EÜH için oluşturulmuş PA model için PN Toolbox'ta yapılan tutarlılık özelliği Şekil 5.39'daki gibi araştırılmış ve sonucu Şekil 5.40'ta verilmiştir.



Şekil 5. 39. Tutarlılık analizinin yapılışı



Şekil 5. 40. Tutarlılık analizi sonucu

Buna göre PA model tutarlıdır. Yani $R(M_0)$ kümesine dahil olan bazı işaretlemeler döngüsellik gösterir denilebilir.

5.3. Esnek Üretim Hücrelerine ait PA Modeline Petri Ağ Analiz Yöntemlerinin Uygulanması

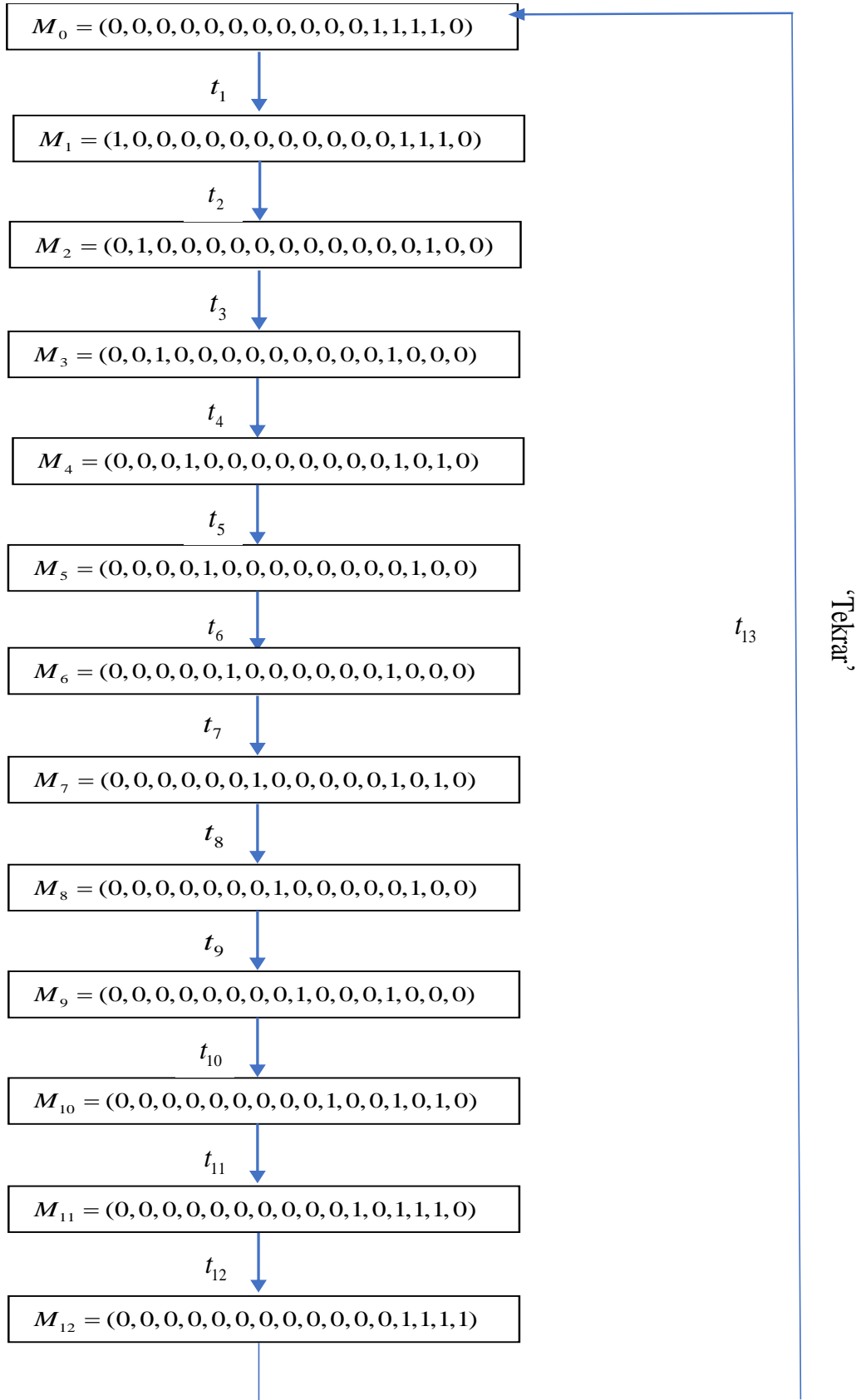
5.3.1. Modelin ulaşılabilirlik analizi

Başlangıç işaretlemesi M_0 'a dayalı bir yöntem olan ulaşılabilirlik analizi; sistemin M_0 başlangıç durumundan başlayarak elde edilebilecek tüm işaretlemelerin oluşturulmasına dayalı bir yöntemdir. Bölüm 3.11.1'de detaylıca incelenmiş olan bu yöntemi uygulayabilmek için gerekli olan tüm işaretlemeleri elde edebilmek amacıyla “Önce Derinlemesine” yöntem kullanılmıştır.

- Önce Derinlemesine (Depth First) Yöntem ile Ulaşılabilirlik Analizinin Uygulanması EÜH'ye ait modelde konumlar kümesi;

$$P = \left\{ \begin{array}{l} P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}, \\ Palet, TamponStokAlanı, CNCFrezeTezgahı, \\ TaşımaRobotu, p_{12} \end{array} \right\}$$

şeklinde tanımlanmıştır. Oluşturulan modele ait başlangıç işaretlemesinin ise;



Şekil 5. 41. Petri ağ modeline ait ulaşılabilirlik ağacı

$$M_0 = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0)$$

olduğu Şekil 5.3'ten de görülmektedir. Buna göre ulaşılabilirlik ağacı Şekil 5.41'deki gibidir. Bu yöntem ile başlangıç işaretlemesi M_0 'dan başlanarak ateşlemelerin gerçekleştirilmesiyle tüm işaretlemeler elde edilmiştir. Böylece ulaşılabilirlik ağacı aracılığıyla hangi ateşleme sonucu hangi işaretlemeye erişilebileceği saptanıp ve model izlenebilir hale getirilmiş olmuştur.

5.3.2. Modelin değişmez değer analizi (matris-denklemler yaklaşımı)

Değişmez değer analiz yöntemini uygulayarak (invariant analysis method) matrislerin ve buna bağlı denklemlerin oluşturulması yoluyla PA modelinin dinamik özellikleri incelenmiştir. Burada modeldeki tüm $p \in P$ konumları ile $t \in T$ geçişleri arasındaki bağlantıyı sağlayan yönlü okların ateşlenmeler neticesinde meydana gelen değişimlerini gözlemek ve bu yolla modelin dinamik özelliklerini açıklamak amaçlanmıştır. Buna göre;

$$\begin{aligned} I &= A_i = \text{Girdi matrisi (Input matrix)} \\ O &= A_o = \text{Çıktı matrisi (Output matrix)} \\ A &= O - I = A_o - A_i = \text{Yineleme matrisi (Incidence matrix)} \end{aligned}$$

olmak üzere tanımlanan A matrisi, $A_{(s \times n)}$ boyutunda ve $A = [A_{ij}]$ şeklinde de ifade edilebilen bir matristir. Burada

$$\begin{aligned} s &= \text{geçiş sayısı} \\ n &= \text{konum sayısı} \end{aligned}$$

değerlerini yansıtır ve A_{ij} elemanı $A_{(s \times n)}$ matrisindeki i . satır ile j . sütunun kesişimindeki elemandır. Ayrıca;

$$[A_{ij}] = A_{ij}^+ - A_{ij}^- \quad (5.18)$$

olmakla birlikte

$$\begin{aligned} A_{ij}^+ &= t_j \text{ geçişinden } p_i \text{ çıktı konumuna doğru olan yönlü okun ağırlığı} \\ A_{ij}^- &= p_i \text{ girdi konumundan } t_j \text{ geçişine doğru olan yönlü okun ağırlığı} \end{aligned}$$

olarak açıklanabilirler. Bu durumda;

$$A_{ij}^+ \in O \quad \text{ve} \quad A_{ij}^- \in I$$

olduğu söylenebilir. Tüm bunlar ışığında A yineleme matrisi (incidence matrix) PN Toolbox programı kullanılarak elde edilir, A yineleme matrisi Şekil 5.42’de verilmiştir.

Incidence Matrix: $A = A_o - A_i$

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0
0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0
0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	-1	0
0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0
0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	-1	1	-1	0
0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	1	-1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1

Şekil 5. 42. Yineleme matrisi

Buna göre yineleme matrisinin analizi;

$A_{11}^+ = 1 \rightarrow$ “ t_1 ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_1 ” konumuna 1 jeton eklenir.

$A_{1_{-12}}^- = -1 \rightarrow$ “ t_1 ” geçişinin ateşlenmesiyle “*Palet*” konumundan 1 jeton eksilir.

$A_{21}^- = -1 \rightarrow$ “ t_2 ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_1 ” konumundan 1 jeton eksilir.

$A_{22}^+ = 1 \rightarrow$ “ t_2 ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_2 ” konumuna 1 jeton eklenir.

$A_{2_{-13}}^- = -1 \rightarrow$ “ t_2 ” geçişinin ateşlenmesiyle “*TamponStokAlanı*” konumundan 1 jeton eksilir.

$A_{2_{-15}}^- = -1 \rightarrow$ “ t_1 ” geçişinin ateşlenmesiyle “*TaşımaRobotu*” konumundan 1 jeton eksilir.

$A_{32}^- = -1 \rightarrow$ “ t_3 ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_2 ” konumundan 1 jeton eksilir.

$A_{33}^+ = 1 \rightarrow$ “ t_3 ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_3 ” konumuna 1 jeton eklenir.

$A_{3_{-13}}^+ = 1 \rightarrow$ “ t_3 ” geçişinin ateşlenmesiyle “*TamponStokAlanı*” konumuna 1 jeton eklenir.

$A_{3_{-14}}^- = -1 \rightarrow$ “ t_3 ” geçişinin ateşlenmesiyle “*CNCFrezeTezgahı*” konumundan 1 jeton eksilir.

$A_{43}^- = -1 \rightarrow$ “ t_4 ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_3 ” konumundan 1 jeton eksilir.

$A_{44}^+ = 1 \rightarrow$ “ t_4 ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_4 ” konumuna 1 jeton eklenir.

$A_{4_{-15}}^+ = 1 \rightarrow$ “ t_4 ” geçişinin ateşlenmesiyle “*TaşımaRobotu*” konumuna 1 jeton eklenir.

$A_{54}^- = -1 \rightarrow$ “ t_5 ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_4 ” konumundan 1 jeton eksilir.

$A_{55}^+ = 1 \rightarrow$ “ t_5 ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_5 ” konumuna 1 jeton eklenir.

$A_{5_{-13}}^- = -1 \rightarrow$ “ t_5 ” geçişinin ateşlenmesiyle “*TamponStokAlanı*” konumundan 1 jeton eksilir.

$A_{5_{-14}}^+ = 1 \rightarrow$ “ t_5 ” geçişinin ateşlenmesiyle “*CNCFrezeTezgahı*” konumuna 1 jeton eklenir.

$A_{5_{-15}}^- = -1 \rightarrow$ “ t_5 ” geçişinin ateşlenmesiyle “*TaşımaRobotu*” konumundan 1 jeton eksilir.

$A_{65}^- = -1 \rightarrow$ “ t_6 ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_5 ” konumundan 1 jeton eksilir.

$A_{66}^+ = 1 \rightarrow$ “ t_6 ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_6 ” konumuna 1 jeton eklenir.

$A_{6_{-13}}^+ = 1 \rightarrow$ “ t_6 ” geçişinin ateşlenmesiyle “*TamponStokAlanı*” konumuna 1 jeton eklenir.

$A_{6_{-14}}^- = -1 \rightarrow$ “ t_6 ” geçişinin ateşlenmesiyle “*CNCFrezeTezgahı*” konumundan 1 jeton eksilir.

$A_{76}^- = -1 \rightarrow$ “ t_7 ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_6 ” konumundan bir jeton eksilir.

$A_{77}^+ = 1 \rightarrow$ “ t_7 ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_7 ” konumuna 1 jeton eklenir.

$A_{7_{-15}}^- = -1 \rightarrow$ “ t_7 ” geçişinin ateşlenmesiyle “*TaşımaRobotu*” konumundan 1 jeton eksilir.

$A_{87}^- = -1 \rightarrow$ “ t_8 ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_7 ” konumundan 1 jeton eksilir.

$A_{88}^+ = 1 \rightarrow$ “ t_8 ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_8 ” konumuna 1 jeton eklenir.

$A_{8_13}^- = -1 \rightarrow$ “ t_8 ” geçişinin ateşlenmesiyle “*TamponStokAlanı*” konumundan 1 jeton eksilir.

$A_{8_14}^+ = 1 \rightarrow$ “ t_8 ” geçişinin ateşlenmesiyle “*CNCFrezeTezgahı*” konumuna 1 jeton eklenir.

$A_{8_15}^- = -1 \rightarrow$ “ t_8 ” geçişinin ateşlenmesiyle “*TaşımaRobotu*” konumundan 1 jeton eksilir.

$A_{98}^- = -1 \rightarrow$ “ t_9 ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_8 ” konumundan 1 jeton eksilir.

$A_{99}^+ = 1 \rightarrow$ “ t_9 ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_9 ” konumuna 1 jeton eklenir.

$A_{9_13}^+ = 1 \rightarrow$ “ t_9 ” geçişinin ateşlenmesiyle “*TamponStokAlanı*” konumuna 1 jeton eklenir.

$A_{9_14}^- = -1 \rightarrow$ “ t_9 ” geçişinin ateşlenmesiyle “*CNCFrezeTezgahı*” konumundan 1 jeton eksilir.

$A_{10_9}^- = -1 \rightarrow$ “ t_{10} ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_9 ” konumundan 1 jeton eksilir.

$A_{10_10}^+ = 1 \rightarrow$ “ t_{10} ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_{10} ” konumuna 1 jeton eklenir.

$A_{10_15}^+ = 1 \rightarrow$ “ t_{10} ” geçişinin ateşlenmesiyle “*TaşımaRobotu*” konumuna 1 jeton eklenir.

$A_{11_10}^- = -1 \rightarrow$ “ t_{11} ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_{10} ” konumundan 1 jeton eksilir.

$A_{11_11}^+ = 1 \rightarrow$ “ t_{11} ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_{11} ” konumuna 1 jeton eklenir.

$A_{11_14}^+ = 1 \rightarrow$ “ t_{11} ” geçişinin ateşlenmesiyle “*CNCFrezeTezgahı*” konumuna 1 jeton eklenir.

$A_{12_11}^- = -1 \rightarrow$ “ t_{12} ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_{11} ” konumundan 1 jeton eksilir.

$A_{12_16}^+ = 1 \rightarrow$ “ t_{12} ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_{12} ” konumuna 1 jeton eklenir.

$A_{13_12}^+ = 1 \rightarrow$ “ t_{13} ” geçişinin ateşlenmesiyle “*Palet*” konumuna 1 jeton eklenir.

$A_{13_16}^- = -1 \rightarrow$ “ t_{13} ” geçişinin ateşlenmesiyle “ p_{12} ” konumundan 1 jeton eksilir.

şeklinde tamamlanarak yukarıdaki sonuçlara yalnızca bu matris aracılığıyla ulaşılabilir.

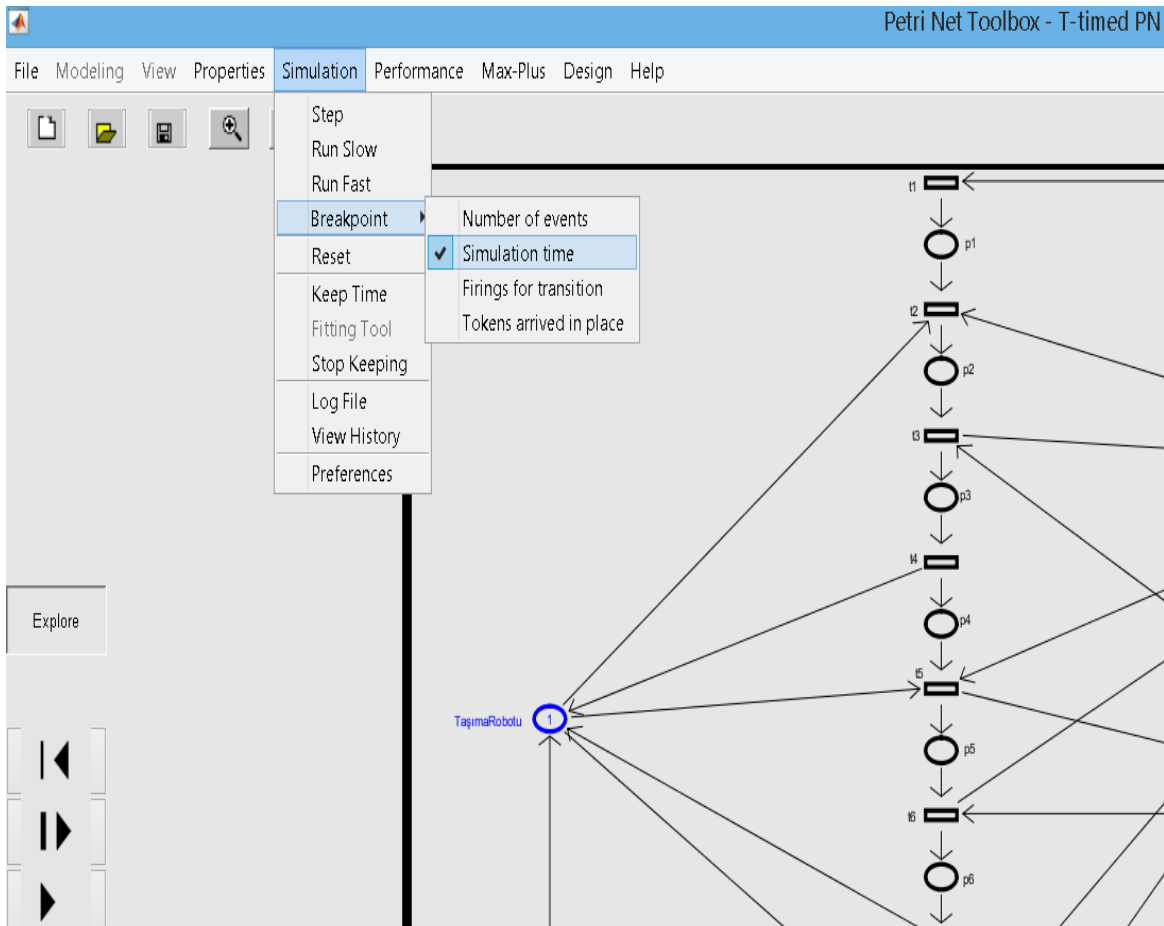
5.4.Esnek Üretim Hücresinin Performans Analizinin Gerçekleştirilmesi

Bu bölümde EÜH için geliştirilen PA modellerinin her birinin performans analizleri MATLAB PN Toolbox programı aracılığıyla yapılmıştır.

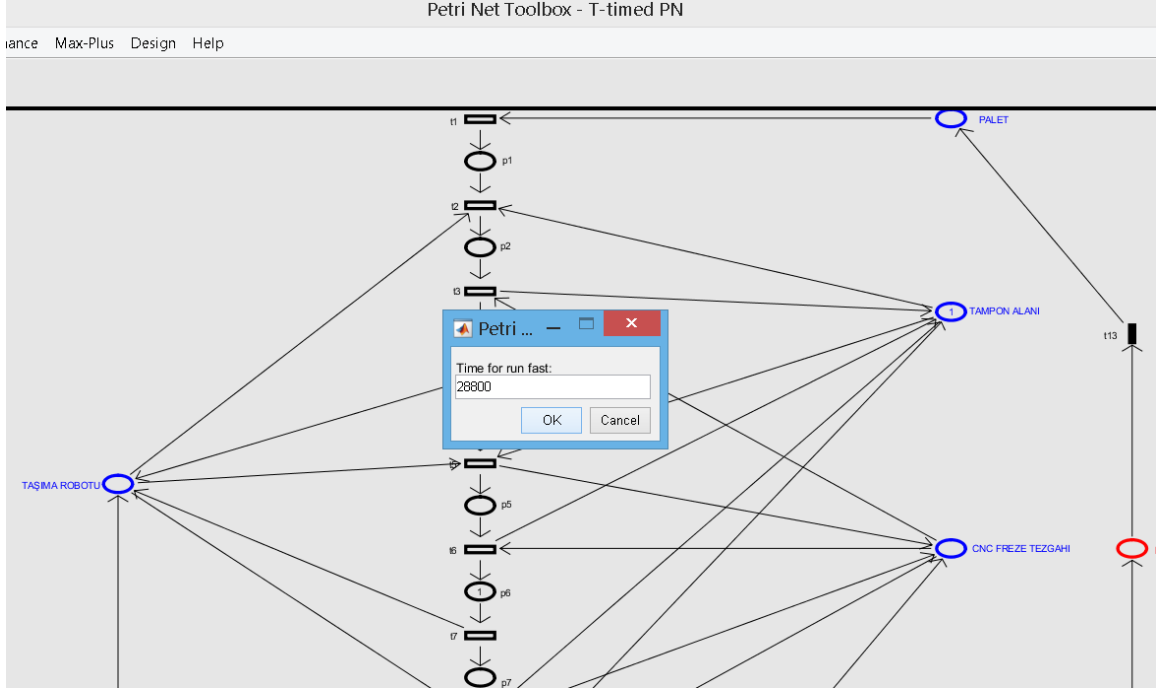
Simülasyon gerçekleştirilirken sistemin çalışması esnasında;

- 3 adet parça taşıyan paletin konveyörün başında beklediği
- Gerekli ekipmanın hazır bulunduğu

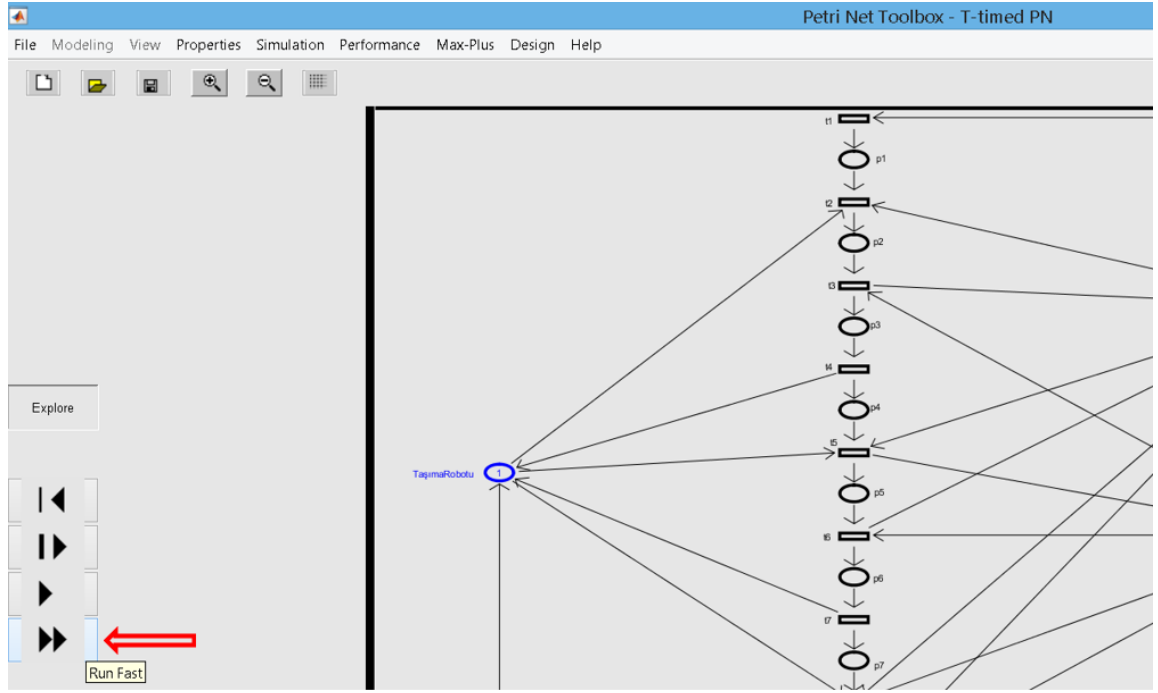
varsayılır. Buna göre her bir model PN Toolbox programında Şekil 5.43, Şekil 5.44, Şekil 5.45'teki adımlar takip edilerek çalıştırılır.



Şekil 5. 43. Petri ağ modelinin çalıştırılması adım 1



Şekil 5. 44. Petri ağ modelinin çalıştırılması adım 2



Şekil 5. 45. Petri ağ modelinin çalıştırılması adım 3

PN Toolbox programı ile yapılan simülasyon sonucu ulaşılan performans kriterleri konumlar ve geçişler aracılığıyla elde edilir. Elde edilen performans kriterleri ve taşıdıkları anlamlar Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5. 6. Ulaşılan performans kriterleri ve anlamları

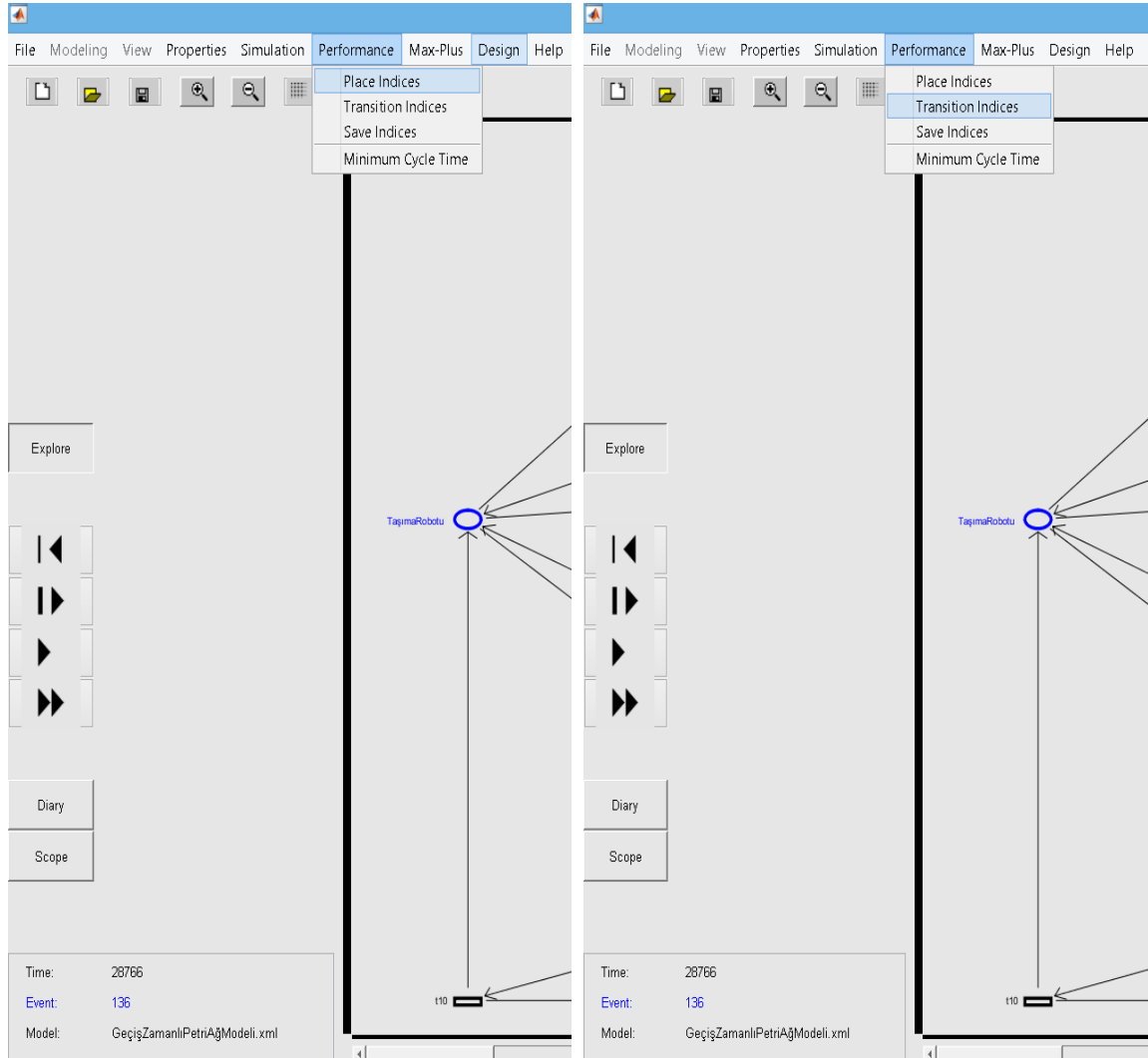
Performans Kriteri	Orijinal İsmi	Elde Edildiği Düğüm (Konum/Geçiş)	Taşıdığı Anlam
Variş Toplamı	Arrival Sum	Konum	Konuma giriş yapmış jeton sayılarının toplamını ifade eder.
Variş Aralığı	Arrival Distance	Konum	$\left(\frac{\text{Simülasyon Süresi}}{\text{Variş Toplamı}} \right)$ ile hesaplanır.
Variş Oranı	Arrival Rate	Konum	$\left(\frac{1}{\text{Variş Aralığı}} \right)$ ile hesaplanır. Bu oran konuma giren jetonların ne sıklıkta giriş yaptığını ifade eder.
Çıktı Toplamı	Throughput Sum	Konum	Konumdan çıkış yapmış jeton sayılarının toplamını ifade eder.
Çıktı Aralığı	Throughput Distance	Konum	$\left(\frac{\text{Simülasyon Süresi}}{\text{Çıktı Toplamı}} \right)$ ile hesaplanır.

Tablo 5.6. devam ediyor

Çıktı Oranı	Throughput Rate	Konum	$\left(\frac{1}{\text{Çıktı Aralığı}} \right)$ <p>ile hesaplanır. Bu oran jetonların ilgili konumdan ne sıklıkta çıkış yaptığını ifade eder.</p>
Bekleme Süresi	Waiting Time	Konum	Jetonların ilgili konumdaki ortalama bekleme süresini verir.
Kuyruk Uzunluğu	Queue Length	Konum	$\left(\frac{\text{Bekleme Süresi}}{\text{Çıktı Aralığı}} \right)$ <p>ile hesaplanır.</p>
Servis Toplamı	Service Sum	Geçiş	İlgili geçişin toplamda kaç kez gerçekleştiğini ifade eder.
Servis Aralığı	Service Distance	Geçiş	$\left(\frac{\text{Simülasyon Süresi}}{\text{Servis Toplamı}} \right)$ <p>ile hesaplanır.</p>
Servis Oranı	Service Rate	Geçiş	$\left(\frac{1}{\text{Servis Aralığı}} \right)$ <p>ile hesaplanır. Bu oran ilgili geçişin ne sıklıkta gerçekleştiğini ifade eder.</p>
Servis Süresi	Service Time	Geçiş	İlgili geçişin gerçekleşme sürelerinin ortalaması ile hesaplanan değerdir.

Geçiş zamanlı PA model toplamda 28766 saniye çalışmış ve 136 olay gerçekleşmiştir. Modelin tam olarak 28800 saniye çalışmamasının sebebi sistemdeki işlem süreleridir. Program, simülasyonu gerçekleştirirken vermiş olduğumuz 28800 saniye çalışma kısıtına en yakın çalışma süresiyle çalışır, aksi takdirde 8 saatlik süre aşılır.

Modeldeki konumlar ve geçişler aracılığıyla performans değerlerinin elde edilmesi aşamalarına Şekil 5.48’de yer verilmiştir.



Şekil 5. 48. Geçiş zamanlı PA modelden performans kriterlerinin elde edilmesi aşamaları

Modelin çalıştırılması sonucu elde edilen konumlara ait orijinal istatistikler Şekil 5.49’da verilmiştir.

PNTtoolbox - Global Statistics: Places

Location: file:///C:/Program%20Files/MATLAB/R2021b/toolbox/petrinet2.4/newnet/placelndices.html

Global Statistics: Places

Model:GeçişZamanlıPetriAğModeli.xml

Events:136

Time:28766

Place Name	Arrival Sum	Arrival Rate	Arrival Dist.	Throughput Sum	Throughput Rate	Throughput Dist.	Waiting Time	Queue Length
p1	11	0.0003824	2615.0909	11	0.0003824	2615.0909	20	0.0076479
p2	11	0.0003824	2615.0909	11	0.0003824	2615.0909	10	0.003824
p3	11	0.0003824	2615.0909	11	0.0003824	2615.0909	600	0.22944
p4	11	0.0003824	2615.0909	11	0.0003824	2615.0909	10	0.003824
p5	11	0.0003824	2615.0909	11	0.0003824	2615.0909	11	0.0042064
p6	11	0.0003824	2615.0909	10	0.00034763	2876.6	900	0.31287
p7	10	0.00034763	2876.6	10	0.00034763	2876.6	12	0.0041716
p8	10	0.00034763	2876.6	10	0.00034763	2876.6	13	0.0045192
p9	10	0.00034763	2876.6	10	0.00034763	2876.6	1200	0.41716
p10	10	0.00034763	2876.6	10	0.00034763	2876.6	10	0.0034763
p11	10	0.00034763	2876.6	10	0.00034763	2876.6	20	0.0069527
Palet	10	0.00034763	2876.6	11	0.0003824	2615.0909	5	0.001912
TamponStokAlanı	32	0.0011124	898.9375	32	0.0011124	898.9375	887.6563	0.98745
CNCFrezeTezgahı	31	0.0010777	927.9355	32	0.0011124	898.9375	26.125	0.029062
TaşımaRobotu	31	0.0010777	927.9355	32	0.0011124	898.9375	25.1563	0.027984
p12	10	0.00034763	2876.6	10	0.00034763	2876.6	0	0

Şekil 5. 49. Geçiş zamanlı PA modelin çalıştırılması sonucu elde edilen konumlara ait istatistikler

Elde edilen orijinal çıktıdaki performans değerlerinin Türkçe karşılıkları ile oluşturulan değerler ise Tablo 5.7'deki gibidir.

Tablo 5. 7. Geçiş zamanlı PA modelde konumların sağladığı performans kriterlerinin aldıkları değerler

Konumun İsmi	Variş Toplamı	Variş Oranı	Variş Aralığı	Çıktı Toplamı	Çıktı Oranı	Çıktı Aralığı	Bekleme Süresi	Kuyruk Uzunluğu
p1	11	0,0003824	2615,0909	11	0,0003824	2615,0909	20	0,0076479
p2	11	0,0003824	2615,0909	11	0,0003824	2615,0909	10	0,003824
p3	11	0,0003824	2615,0909	11	0,0003824	2615,0909	600	0,22944
p4	11	0,0003824	2615,0909	11	0,0003824	2615,0909	10	0,003824
p5	11	0,0003824	2615,0909	11	0,0003824	2615,0909	11	0,0042064
p6	11	0,0003824	2615,0909	10	0,00034763	2876,6	900	0,31287
p7	10	0,00034763	2876,6	10	0,00034763	2876,6	12	0,0041716
p8	10	0,00034763	2876,6	10	0,00034763	2876,6	13	0,0045192
p9	10	0,00034763	2876,6	10	0,00034763	2876,6	1200	0,41716
p10	10	0,00034763	2876,6	10	0,00034763	2876,6	10	0,0034763
p11	10	0,00034763	2876,6	10	0,00034763	2876,6	20	0,0069527
Palet	10	0,00034763	2876,6	11	0,0003824	2615,0909	5	0,001912
TamponStokAlanı	32	0,0011124	898,9375	32	0,0011124	898,9375	887,6563	0,98745
CNCFrezeTezgahı	31	0,0010777	927,9355	32	0,0011124	898,9375	26,125	0,029062
TaşımaRobotu	31	0,0010777	927,9355	32	0,0011124	898,9375	25,1563	0,027984
p12	10	0,00034763	2876,6	10	0,00034763	2876,6	0	0

Modelin çalıştırılması sonucu elde edilen geçişlere ait orijinal istatistikler Şekil 5.50’de verilmiştir.

Transition Name	Service Sum	Service Rate	Service Dist.	Service Time	Utilization
t1	11	0.0003824	2615.0909	5	0.024543
t2	11	0.0003824	2615.0909	20	0.029584
t3	11	0.0003824	2615.0909	10	0.025412
t4	11	0.0003824	2615.0909	600	0.23017
t5	11	0.0003824	2615.0909	10	0.0042064
t6	11	0.0003824	2615.0909	11	0.0042064
t7	10	0.00034763	2876.6	900	0.3793
t8	10	0.00034763	2876.6	12	0.070187
t9	10	0.00034763	2876.6	13	0.070083
t10	10	0.00034763	2876.6	1200	0.44101
t11	10	0.00034763	2876.6	10	0.026976
t12	10	0.00034763	2876.6	20	0.029757
t13	10	0.00034763	2876.6	0	0.022805

Şekil 5. 50. Geçiş zamanlı PA modelin çalıştırılması sonucu elde edilen geçişlere ait istatistikler

Elde edilen orijinal çıktındaki performans değerlerinin Türkçe karşılıkları ile oluşturulan tablo ise Tablo 5.8’deki gibidir.

Tablo 5. 8. Geçiş zamanlı PA modelde geçişlerin sağladığı performans kriterlerinin aldıkları değerler

Geçişin İsmi	Servis Toplamı	Servis Oranı	Servis Aralığı	Servis Süresi	Kullanım Oranı
t1	11	0,0003824	2615,0909	5	0,024543
t2	11	0,0003824	2615,0909	20	0,029584
t3	11	0,0003824	2615,0909	10	0,025412
t4	11	0,0003824	2615,0909	600	0,23017
t5	11	0,0003824	2615,0909	10	0,0042064
t6	11	0,0003824	2615,0909	11	0,0042064
t7	10	0,00034763	2876,6	900	0,3793
t8	10	0,00034763	2876,6	12	0,070187
t9	10	0,00034763	2876,6	13	0,070083
t10	10	0,00034763	2876,6	1200	0,44101
t11	10	0,00034763	2876,6	10	0,026976
t12	10	0,00034763	2876,6	20	0,029757
t13	10	0,00034763	2876,6	0	0,022805

- p_{12} konumundaki bekleme süresi sıfırdır. p_{12} konumu sisteme girmek için bekleyen 3 işlenmemiş parça taşıyan paleti simgeler. Bu durumda bir önce parti tamamlandıktan sonra yeni partinin hiç bekleme yaşamadan sisteme dahil olduğu söylenebilir.

- Bekleme sürelerine bakıldığında p_3, p_6, p_9 konumlarının temsil ettikleri durumlarda sırasıyla “600 sn, 900 sn, 1200 sn” bekleme yaşandığı görülür. Bu konumlar (p_3, p_6, p_9), CNC freze tezgahında işlenmek üzere bulunan Parça-1, Parça-2, Parça-3’ü temsil eder. Bekleme süreleri CNC freze tezgahındaki işlem görme süreleri ile eş değerdir. Sıradaki parçanın işlem süresi, CNC freze tezgahındaki hazırlık süresi nedeniyle bir önceki parçanın işlem süresinden her zaman uzundur.

- Tampon stok alanındaki bekleme süresi ise “887,6563 sn” ile sistemdeki bir diğer en yüksek bekleme süresi değerine sahiptir. Bunun sebebi bir parçanın işlendikten sonra tampon stok alanındaki palete bırakılarak paletin tamamının işlenmiş parça ile dolduğu zaman operatör tarafından kaldırılmasının beklenmesidir.

- Simülasyon sırasında 11 palet yani 33 adet parça sisteme dahil olmuştur. 31 adet parça işlenmiş olarak sistemden ayrılabilmişken, 32.parça işlenmek üzere tampon stok alanındadır. Bu durumda;

$$Devir Süresi = \frac{28766 \text{ sn}}{31 \text{ parça}} = 927,9355 \text{ sn / parça} \quad (5.19)$$

olarak Eşitlik (5.19)’daki gibi hesaplanır. Buna bağlı olarak;

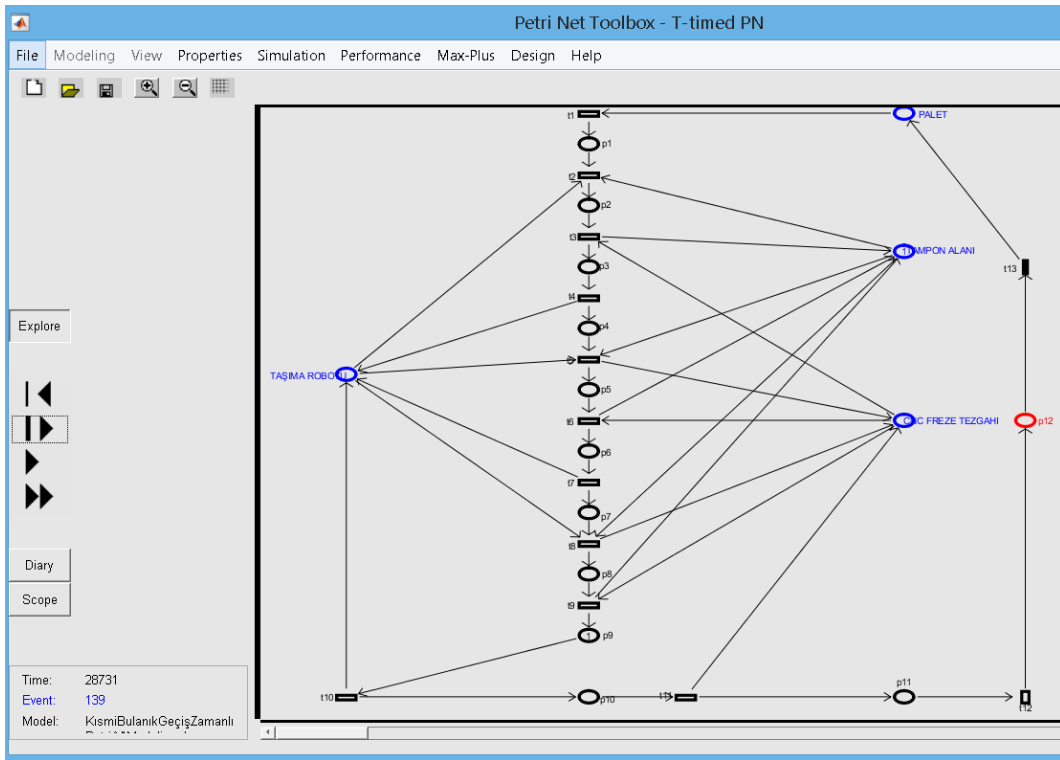
$$Çıktı Oranı = \left(\frac{1}{927,9355} \right) \times 60 \text{ dk} = 0,06466 \text{ parça / dk} \quad (5.20)$$

olarak elde edilir. Buna göre “Geçiş Zamanlı PA Model” ile modellenen EÜH, dakikada 0,06466 adet parçayı işlenmiş halde sistemden çıkarabilir.

5.4.2. Kısmi-bulanık geçiş zamanlı PA model için performans analizi

EÜH için hazırlanan, sadece CNC freze tezgahında gerçekleşen işlemlerin aldıkları sürelerin bulanık parametreler olarak hesaplandıkları “Kısmi-Bulanık Geçiş Zamanlı PA Model”, MATLAB PN Toolbox programında 8 saat yani yaklaşık 28800 saniye çalıştırılmıştır.

Modelin çalıştırılması sonucu Şekil 5.51 ve Şekil 5.52’de verilen çıktı ekranı ile karşılaştırılır.



Şekil 5. 51. Kısmi-bulanık geçiş zamanlı PA modelin çalıştırılması

Time:	28731
Event:	139
Model:	KısmiBulanıkGeçişZamanlıPetriAğModeli.xml

Şekil 5. 52. Kısmi-bulanık geçiş zamanlı PA model sonucu

Kısmi-bulanık geçiş zamanlı PA model 28731 saniye çalışmış ve 139 olay gerçekleşmiştir. Sistemdeki geçişlere entegre edilen işlem süreleri nedeniyle model 28800 saniye çalışmamış ve bizim koyduğumuz süre kısıtına en yakın çalışma süresiyle çalışmıştır. Modelin çalıştırılması sonucu elde edilen konumlara ait orijinal istatistikler Şekil 5.53’te verilmiştir.

PNTtoolbox - Global Statistics: Places

Location: file:///C:/Program%20Files/MATLAB/R2021b/toolbox/peternet2.4/newnet/placelndices.html

Global Statistics: Places

Model:KısmiBulanıkGeçişZamanlıPetriAğModeli.xml

Events:139

Time:28731

Place Name	Arrival Sum	Arrival Rate	Arrival Dist.	Throughput Sum	Throughput Rate	Throughput Dist.	Waiting Time	Queue Length
p1	11	0.00038286	2611.9091	11	0.00038286	2611.9091	20	0.0076572
p2	11	0.00038286	2611.9091	11	0.00038286	2611.9091	10	0.0038286
p3	11	0.00038286	2611.9091	11	0.00038286	2611.9091	570	0.21823
p4	11	0.00038286	2611.9091	11	0.00038286	2611.9091	10	0.0038286
p5	11	0.00038286	2611.9091	11	0.00038286	2611.9091	11	0.0042115
p6	11	0.00038286	2611.9091	11	0.00038286	2611.9091	870	0.33309
p7	11	0.00038286	2611.9091	11	0.00038286	2611.9091	12	0.0045943
p8	11	0.00038286	2611.9091	11	0.00038286	2611.9091	13	0.0049772
p9	11	0.00038286	2611.9091	10	0.00034806	2873.1	1170	0.40723
p10	10	0.00034806	2873.1	10	0.00034806	2873.1	10	0.0034806
p11	10	0.00034806	2873.1	10	0.00034806	2873.1	20	0.0069611
PALET	10	0.00034806	2873.1	11	0.00038286	2611.9091	5	0.0019143
TAMPON ALANI	33	0.0011486	870.6364	33	0.0011486	870.6364	859.303	0.98698
CNC FREZE TEZGAHI	32	0.0011138	897.8437	33	0.0011486	870.6364	25.7273	0.02955
TAŞIMA ROBOTU	32	0.0011138	897.8437	33	0.0011486	870.6364	24.7576	0.028436
p12	10	0.00034806	2873.1	10	0.00034806	2873.1	0	0

Şekil 5. 53. Kısmi-bulanık geçiş zamanlı PA modelin çalıştırılması sonucu elde edilen konumlara ait istatistikler

Elde edilen orijinal çıktındaki performans değerlerinin Türkçe karşılıkları ile oluşturulan değerler ise Tablo 5.9'daki gibidir.

Tablo 5. 9. Kısmi-bulanık geçiş zamanlı PA modelde konumların sağladığı performans kriterlerinin aldıkları değerler

Konumun İsmi	Varış Toplamı	Varış Oranı	Varış Aralığı	Çıktı Toplamı	Çıktı Oranı	Çıktı Aralığı	Bekleme Süresi	Kuyruk Uzunluğu
p1	11	0,00038286	2611,9091	11	0,00038286	2611,9091	20	0,0076572
p2	11	0,00038286	2611,9091	11	0,00038286	2611,9091	10	0,0038286
p3	11	0,00038286	2611,9091	11	0,00038286	2611,9091	570	0,21823
p4	11	0,00038286	2611,9091	11	0,00038286	2611,9091	10	0,0038286
p5	11	0,00038286	2611,9091	11	0,00038286	2611,9091	11	0,0042115
p6	11	0,00038286	2611,9091	11	0,00038286	2611,9091	870	0,33309
p7	11	0,00038286	2611,9091	11	0,00038286	2611,9091	12	0,0045943
p8	11	0,00038286	2611,9091	11	0,00038286	2611,9091	13	0,0049772
p9	11	0,00038286	2611,9091	10	0,00034806	2873,1	1170	0,40723
p10	10	0,00034806	2873,1	10	0,00034806	2873,1	10	0,0034806
p11	10	0,00034806	2873,1	10	0,00034806	2873,1	20	0,0069611
Palet	10	0,00034806	2873,1	11	0,00038286	2611,9091	5	0,0019143
TamponStokAlanı	33	0,00114860	870,6364	33	0,00114860	870,6364	859,303	0,98698
CNCFreze Tezgahı	32	0,00111380	870,6364	33	0,00114860	870,6364	25,7273	0,02955
TaşımaRobotu	32	0,00111380	870,6364	33	0,00114860	870,6364	24,7576	0,028436
p12	10	0,00034806	2873,1	10	0,00034806	2873,1	0	0

Modelin çalıştırılması sonucu elde edilen geçişlere ait orijinal istatistikler Şekil 5.54'te verilmiştir.

PNToolbox - Global Statistics: Transitions

Location: file:///C:/Program%20Files/MATLAB/R2021b/toolbox/petrinet2.4/newnet/transindices.html

Global Statistics: Transitions

Model:KısmiBulanıkGeçişZamanlıPetriAğModeli.xml

Events:139

Time:28731

Transition Name	Service Sum	Service Rate	Service Dist.	Service Time	Utilization
t1	11	0.00038286	2611.9091	5	0.05468
t2	11	0.00038286	2611.9091	20	0.059726
t3	11	0.00038286	2611.9091	10	0.05555
t4	11	0.00038286	2611.9091	570	0.25011
t5	11	0.00038286	2611.9091	10	0.035363
t6	11	0.00038286	2611.9091	11	0.035363
t7	11	0.00038286	2611.9091	870	0.33396
t8	11	0.00038286	2611.9091	12	0.0050468
t9	11	0.00038286	2611.9091	13	0.0049772
t10	10	0.00034806	2873.1	1170	0.46121
t11	10	0.00034806	2873.1	10	0.057116
t12	10	0.00034806	2873.1	20	0.0599
t13	10	0.00034806	2873.1	0	0.052939

Şekil 5. 54. Kısmi-bulanık geçiş zamanlı PA modelin çalıştırılması sonucu elde edilen geçişlere ait istatistikler

Elde edilen orijinal çıktıdaki performans değerlerinin Türkçe karşılıkları ile oluşturulan tablo ise Tablo 5.10'daki gibidir.

Tablo 5. 10. Kısmi-bulanık geçiş zamanlı PA modelde geçişlerin sağladığı performans kriterlerinin aldıkları değerler

Geçişin İsmi	Servis Toplamı	Servis Oranı	Servis Aralığı	Servis Süresi	Kullanım Oranı
t1	11	0,00038286	2611,9091	5	0,05468
t2	11	0,00038286	2611,9091	20	0,059726
t3	11	0,00038286	2611,9091	10	0,05555
t4	11	0,00038286	2611,9091	570	0,25011
t5	11	0,00038286	2611,9091	10	0,035363
t6	11	0,00038286	2611,9091	11	0,035363
t7	11	0,00038286	2611,9091	870	0,33396
t8	11	0,00038286	2611,9091	12	0,0050468
t9	11	0,00038286	2611,9091	13	0,0049772
t10	10	0,00034806	2873,1	1170	0,46121
t11	10	0,00034806	2873,1	10	0,057116
t12	10	0,00034806	2873,1	20	0,0599
t13	10	0,00034806	2873,1	0	0,052939

• Geçiş Zamanlı PA Model'in performans analizi çalışmasında incelendiği gibi bu modelde de P_{12} konumundaki bekleme süresi sıfırdır.

• En uzun bekleme süreleri olan p_3, p_6, p_9 konumlarının temsil ettikleri durumlar için sistemdeki bekleme süreleri sırasıyla “570 sn, 870 sn, 1170 sn” olarak ölçülmüştür. Bu konumlar Parça-1, Parça-2, Parça-3 için CNC freze tezgahındaki operasyonları temsil eder. Sisteme entegre edilen bulanık işlem süreleri p_3, p_6 ve p_9 konumlarındaki bekleme süreleri ile eş değerdir.

• Tampon stok alanındaki bekleme süresi ise “859,303 sn” olarak ölçülmüştür. Bu sürenin Geçiş Zamanlı PA Model'de ölçülen bekleme süresinden daha az olduğu göze çarpmaktadır.

• Simülasyon esnasında 11 palet yani 33 parça sisteme giriş yapmıştır. 32 adet parça işlenmiş olarak sistemden ayrılabilirken, simülasyon sonlandığında 33.parça işlenmek üzere tampon stok alanında beklemektedir. Bu durumda;

$$Devir Süresi = \frac{28731 \text{ sn}}{32 \text{ parça}} = 897,8438 \text{ sn / parça} \quad (5.21)$$

olarak Şekil 5.21'deki gibi hesaplanır. Buna bağlı olarak;

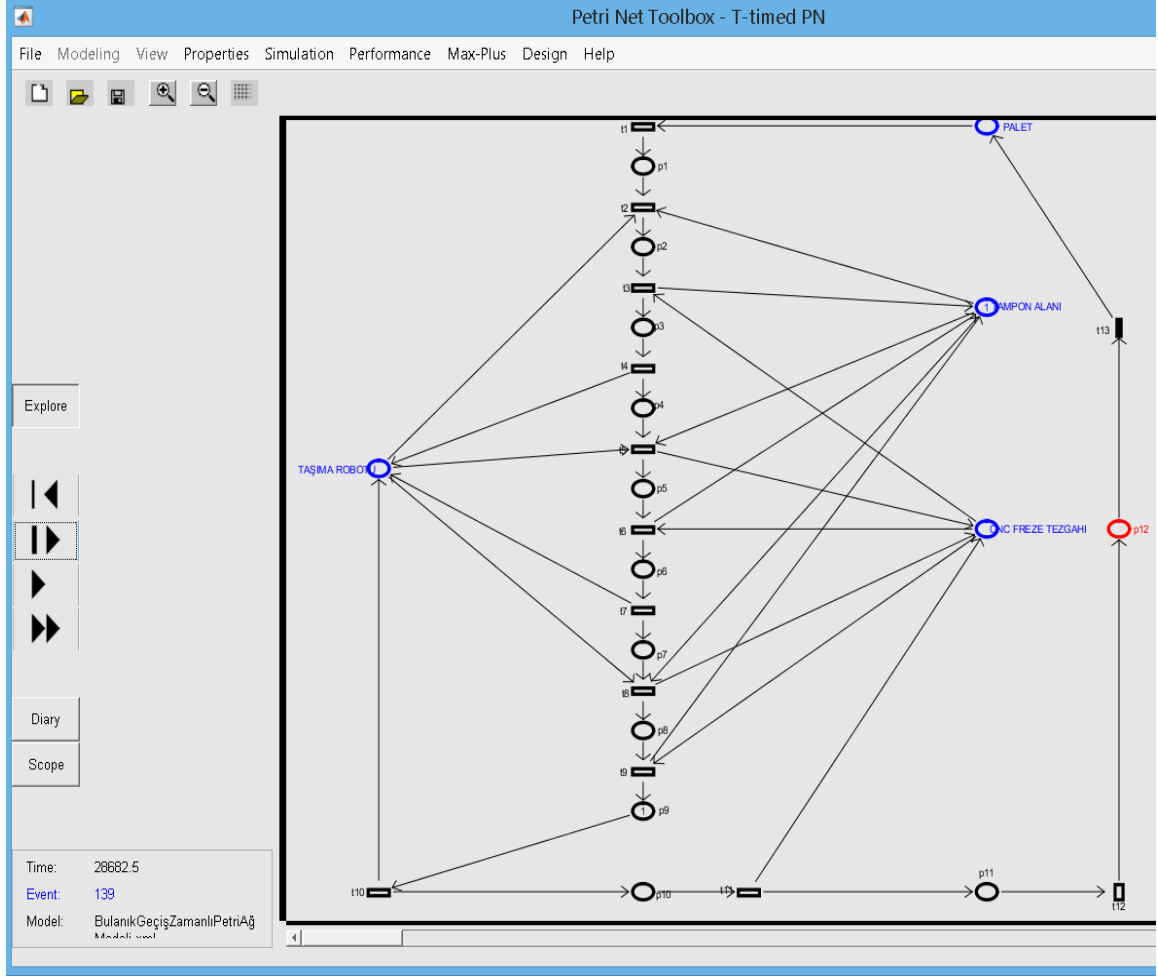
$$Çıktı Oranı = \left(\frac{1}{897,8438} \right) \times 60 \text{ dk} = 0,066827 \text{ parça / dk} \quad (5.22)$$

olarak elde edilir. Buna göre “Kısmi-Bulanık Geçiş Zamanlı PA Model” ile modellenen EÜH dakikada 0,066827 adet parçayı işlenmiş halde sistemden çıkarabilir.

5.4.3. Bulanık geçiş zamanlı PA model için performans analizi

EÜH için hazırlanan, sistemde gerçekleşen tüm işlemlerin aldıkları sürelerin bulanık parametreler olarak hesaplandıkları “Bulanık Geçiş Zamanlı PA Model”, MATLAB PN Toolbox programında 8 saat yani yaklaşık 28800 saniye çalıştırılmıştır.

Modelin çalıştırılması sonucu Şekil 5.55 ve Şekil 5.56'da verilen çıktı ekranı ile karşılaştırılır.



Şekil 5. 55. Bulanık geçiş zamanlı PA modelin çalıştırılması

Time:	28682.5
Event:	139
Model:	BulanıkGeçişZamanlıPetriAğModeli.xml

Şekil 5. 56. Bulanık geçiş zamanlı PA model sonucu

Bulanık geçiş zamanlı PA model 28682,5 saniye çalışmış ve 139 olay gerçekleşmiştir. Sistemdeki geçişlere entegre edilen işlem süreleri nedeniyle model tam olarak 28800 saniye çalışmamış ve bu süreye en yakın çalışma süresini gerçekleştirmiştir. Modelin çalıştırılması sonucu elde edilen konumlara ait orijinal istatistikler Şekil 5.57’de verilmiştir.

PNToolbox - Global Statistics: Places

Location: file:///C:/Program%20Files/MATLAB/R2021b/toolbox/petrinet2.4/newnet/placeIndices.html

Global Statistics: Places

Model: BulanikGeçişZamanlıPetriAğModeli.xml

Events: 139

Time: 28682.5

Place Name	Arrival Sum	Arrival Rate	Arrival Dist.	Throughput Sum	Throughput Rate	Throughput Dist.	Waiting Time	Queue Length
p1	11	0.00038351	2607.5	11	0.00038351	2607.5	19.5	0.0074784
p2	11	0.00038351	2607.5	11	0.00038351	2607.5	9.5	0.0036433
p3	11	0.00038351	2607.5	11	0.00038351	2607.5	570	0.2186
p4	11	0.00038351	2607.5	11	0.00038351	2607.5	9.5	0.0036433
p5	11	0.00038351	2607.5	11	0.00038351	2607.5	10.5	0.0040268
p6	11	0.00038351	2607.5	11	0.00038351	2607.5	870	0.33365
p7	11	0.00038351	2607.5	11	0.00038351	2607.5	11.5	0.0044104
p8	11	0.00038351	2607.5	11	0.00038351	2607.5	12.5	0.0047939
p9	11	0.00038351	2607.5	10	0.00034864	2868.25	1170	0.40791
p10	10	0.00034864	2868.25	10	0.00034864	2868.25	9.5	0.0033121
p11	10	0.00034864	2868.25	10	0.00034864	2868.25	19.5	0.0067986
PALET	10	0.00034864	2868.25	11	0.00038351	2607.5	4.5	0.0017258
TAMPON ALANI	33	0.0011505	869.1667	33	0.0011505	869.1667	858.3333	0.98754
CNC FREZE TEZGAHI	32	0.0011157	896.3281	33	0.0011505	869.1667	24.7424	0.028467
TAŞIMA ROBOTU	32	0.0011157	896.3281	33	0.0011505	869.1667	23.7879	0.027369
p12	10	0.00034864	2868.25	10	0.00034864	2868.25	0	0

Şekil 5. 57. Bulanik geçiş zamanlı PA modelin çalıştırılması sonucu elde edilen konumlara ait istatistikler

Elde edilen orijinal çıktındaki performans değerlerinin Türkçe karşılıkları ile oluşturulan tablo ise Tablo 5.11'deki gibidir.

Tablo 5. 11. Bulanik geçiş zamanlı PA modelde konumların sağladığı performans kriterlerinin aldıkları değerler

Konumun İsmi	Variş Toplamı	Variş Oranı	Variş Aralığı	Çıktı Toplamı	Çıktı Oranı	Çıktı Aralığı	Bekleme Süresi	Kuyruk Uzunluğu
p1	11	0,00038351	2607,5	11	0,00038351	2607,5	19,5	0,0074784
p2	11	0,00038351	2607,5	11	0,00038351	2607,5	9,5	0,0036433
p3	11	0,00038351	2607,5	11	0,00038351	2607,5	570	0,2186
p4	11	0,00038351	2607,5	11	0,00038351	2607,5	9,5	0,0036433
p5	11	0,00038351	2607,5	11	0,00038351	2607,5	10,5	0,0040268
p6	11	0,00038351	2607,5	11	0,00038351	2607,5	870	0,33365
p7	11	0,00038351	2607,5	11	0,00038351	2607,5	11,5	0,0044104
p8	11	0,00038351	2607,5	11	0,00038351	2607,5	12,5	0,0047939
p9	11	0,00038351	2607,5	10	0,00034864	2868,25	1170	0,40791
p10	10	0,00034864	2868,25	10	0,00034864	2868,25	9,5	0,0033121
p11	10	0,00034864	2868,25	10	0,00034864	2868,25	19,5	0,0067986
Palet	10	0,00034864	2868,25	11	0,00038351	2607,5	4,5	0,0017258
TamponStokAlanı	33	0,0011505	869,1667	33	0,0011505	869,1667	858,3333	0,98754
CNCFrezeTezgahı	32	0,0011157	896,3281	33	0,0011505	869,1667	24,7424	0,028467
TaşımaRobotu	32	0,0011157	896,3281	33	0,0011505	869,1667	23,7879	0,027369
p12	10	0,00034864	2868,3	10	0,00034864	2868,25	0	0

Modelin çalıştırılması sonucu elde edilen geçişlere ait orijinal istatistikler Şekil 5.58'de verilmiştir.

Global Statistics: Transitions

Model: BulanıkGeçişZamanlıPetriAğModeli.xml

Events: 139

Time: 28682.5

Transition Name	Service Sum	Service Rate	Service Dist.	Service Time	Utilization
t1	11	0.00038351	2607.5	4.5	0.054476
t2	11	0.00038351	2607.5	19.5	0.059549
t3	11	0.00038351	2607.5	9.5	0.055382
t4	11	0.00038351	2607.5	570	0.25047
t5	11	0.00038351	2607.5	9.5	0.035178
t6	11	0.00038351	2607.5	10.5	0.035196
t7	11	0.00038351	2607.5	870	0.33449
t8	11	0.00038351	2607.5	11.5	0.0048462
t9	11	0.00038351	2607.5	12.5	0.0047939
t10	10	0.00034864	2868.25	1170	0.46183
t11	10	0.00034864	2868.25	9.5	0.056899
t12	10	0.00034864	2868.25	19.5	0.059705
t13	10	0.00034864	2868.25	0	0.052907

Şekil 5. 58. Bulanık geçiş zamanlı PA modelin çalıştırılması sonucu elde edilen geçişlere ait istatistikler

Elde edilen orijinal çıktıdaki performans değerlerinin Türkçe karşılıkları ile oluşturulan değerler ise Tablo 5.12'deki gibidir.

Tablo 5. 12. Bulanık geçiş zamanlı PA modelde geçişlerin sağladığı performans kriterlerinin aldıkları değerler

Geçişin İsmi	Servis Toplamı	Servis Oranı	Servis Aralığı	Servis Süresi	Kullanım Oranı
t1	11	0,00038351	2607,5	4,5	0,054476
t2	11	0,00038351	2607,5	19,5	0,059549
t3	11	0,00038351	2607,5	9,5	0,055382
t4	11	0,00038351	2607,5	570	0,25047
t5	11	0,00038351	2607,5	9,5	0,035178
t6	11	0,00038351	2607,5	10,5	0,035196
t7	11	0,00038351	2607,5	870	0,33449
t8	11	0,00038351	2607,5	11,5	0,0048462
t9	11	0,00038351	2607,5	12,5	0,0047939
t10	10	0,00034864	2868,25	1170	0,46183
t11	10	0,00034864	2868,25	9,5	0,056899
t12	10	0,00034864	2868,25	19,5	0,059705
t13	10	0,00034864	2868,25	0	0,052907

• Kısmi-Bulanık Geçiş Zamanlı PA Model’de de olduğu gibi bu model için de en uzun bekleme süreleri p_3, p_6, p_9 konumlarının temsil ettikleri durumlarda sırasıyla “570 sn, 870 sn, 1170 sn” olarak gerçekleşmiştir.

• Geçiş Zamanlı PA Model ve Kısmi-Bulanık Geçiş Zamanlı PA Model’in de performans analizlerinde olduğu gibi bu modelde de P_{12} konumundaki bekleme süresi sıfır değerini almıştır.

• Bir diğer en uzun bekleme süresi “858,3333” ile tampon stok alanındadır ve bu süre Geçiş Zamanlı PA Model ve Kısmi-Bulanık Geçiş Zamanlı PA Model’de ölçülen bekle sürelerinden daha az olarak ölçülmüştür.

• Simülasyon esnasında 11 palet yani 33 parça sisteme girmiş ve 32 adet parça işlenmiş olarak sistemden ayrılmıştır. Simülasyon tamamlandığı anda 33.parça ise işlenmek için taşıma robotu tarafından alınmak üzere tampon stok alanında beklemektedir. Bu durumda;

$$Devir Süresi = \frac{28682,5 \text{ sn}}{32 \text{ parça}} = 896,3281 \text{ sn / parça} \quad (5.23)$$

olarak Eşitlik (5.23)’teki gibi hesaplanır ve buna bağlı olarak;

$$Çıktı Oranı = \left(\frac{1}{896,3281} \right) \times 60 \text{ dk} = 0,06694 \text{ parça / dk} \quad (5.24)$$

olarak bulunur. Buna göre Bulanık Geçiş Zamanlı PA Model ile modellenen EÜH dakikada 0,06694 adet parçayı işlenmiş olarak sistemden çıkarabilmektedir.

5.5. Petri Ağ Modellerinin Performans Kriterleri Açısından İncelenmesi

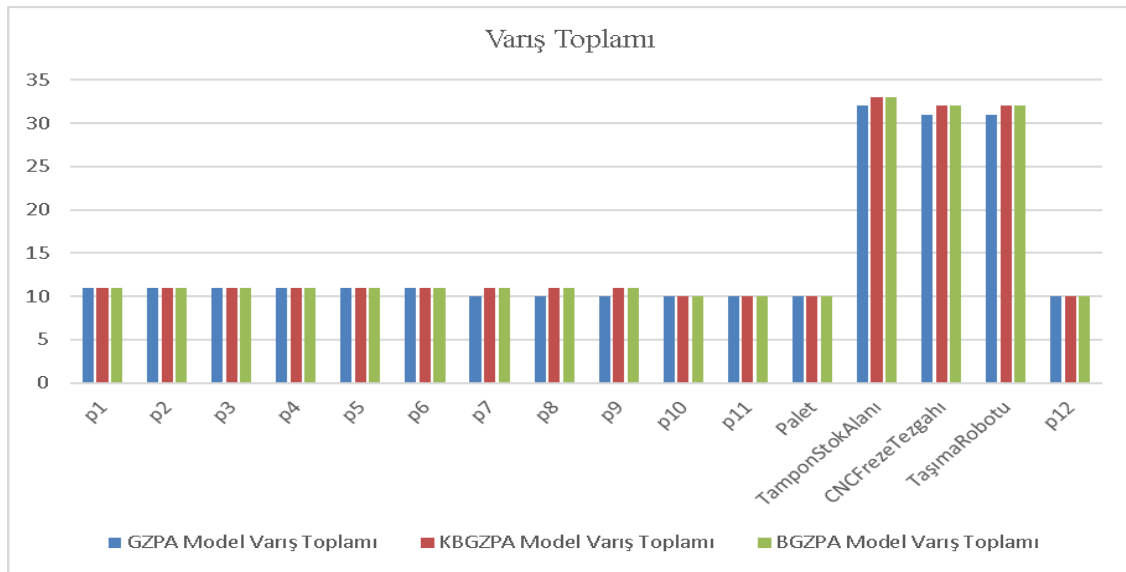
5.5.1. Variş toplamı performans kriteri

“Variş Toplamı” performans kriteri, söz konusu konuma giriş yapmış olan jeton sayılarının toplamını verir. Tablo 5.13’te her bir konum için Geçiş Zamanlı PA (GZPA) Model, Kısmi-Bulanık Geçiş Zamanlı PA (KBGZPA) Model ve Bulanık Geçiş Zamanlı PA (BGZPA) Model için gerçekleşen varış toplamları verilmiştir.

Tablo 5. 13. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için konumlarda gerçekleşen varış toplamı değerleri

Konumun İsmi	GZPA Model Varış Toplamı	KBGZPA Model Varış Toplamı	BGZPA Model Varış Toplamı
p1	11	11	11
p2	11	11	11
p3	11	11	11
p4	11	11	11
p5	11	11	11
p6	11	11	11
p7	10	11	11
p8	10	11	11
p9	10	11	11
p10	10	10	10
p11	10	10	10
Palet	10	10	10
TamponStokAlamı	32	33	33
CNCFrezeTezgahı	31	32	32
TaşınmaRobotu	31	32	32
p12	10	10	10

Buna göre Şekil 5.59’da her bir model için tüm konumlardaki varış toplamalarının işaretlenmesiyle oluşturulan grafik, bu performans kriteri için modeller arasında yaşanan değişkenliği gösterir.



Şekil 5. 59. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için varış toplamı grafiği

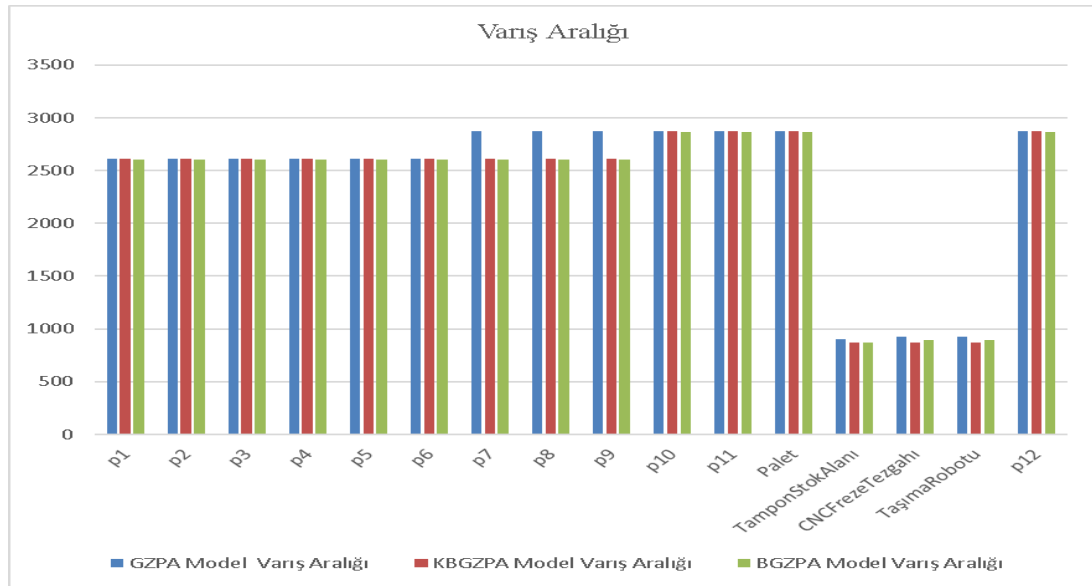
5.5.2. Varış aralığı performans kriteri

“Varış aralığı” performans kriteri, ilgili model için uygulanan simülasyon süresinin söz konusu konum için gerçekleşen “varış toplamı” değerine bölünmesi ile hesaplanır. Tablo

5.14'te GZPA Model, KBGZPA Model, BGZPA Model'in çalıştırılmalarıyla elde edilen varış aralıkları verilmiştir.

Tablo 5. 14. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için konumlarda gerçekleşen varış aralığı değerleri

Konumun İsmi	GZPA Model Varış Aralığı	KBGZPA Model Varış Aralığı	BGZPA Model Varış Aralığı
p1	2615,0909	2611,9091	2607,5
p2	2615,0909	2611,9091	2607,5
p3	2615,0909	2611,9091	2607,5
p4	2615,0909	2611,9091	2607,5
p5	2615,0909	2611,9091	2607,5
p6	2615,0909	2611,9091	2607,5
p7	2876,6	2611,9091	2607,5
p8	2876,6	2611,9091	2607,5
p9	2876,6	2611,9091	2607,5
p10	2876,6	2873,1	2868,25
p11	2876,6	2873,1	2868,25
Palet	2876,6	2873,1	2868,25
TamponStokAlanı	898,9375	870,6364	869,167
CNCFrezeTezgahı	927,9355	870,6364	896,328
TaşmaRobotu	927,9355	870,6364	896,328
p12	2876,6	2873,1	2868,3



Şekil 5. 60. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için varış aralığı grafiği

Şekil 5.60'ta verilen grafik, 3 model için de konumlarda gerçekleşen varış aralıkları değerlerini gösterir. Grafığe göre p_7, p_8, p_9 konumları için GZPA Model'deki varış aralıkları değerlerinin diğer iki modele göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

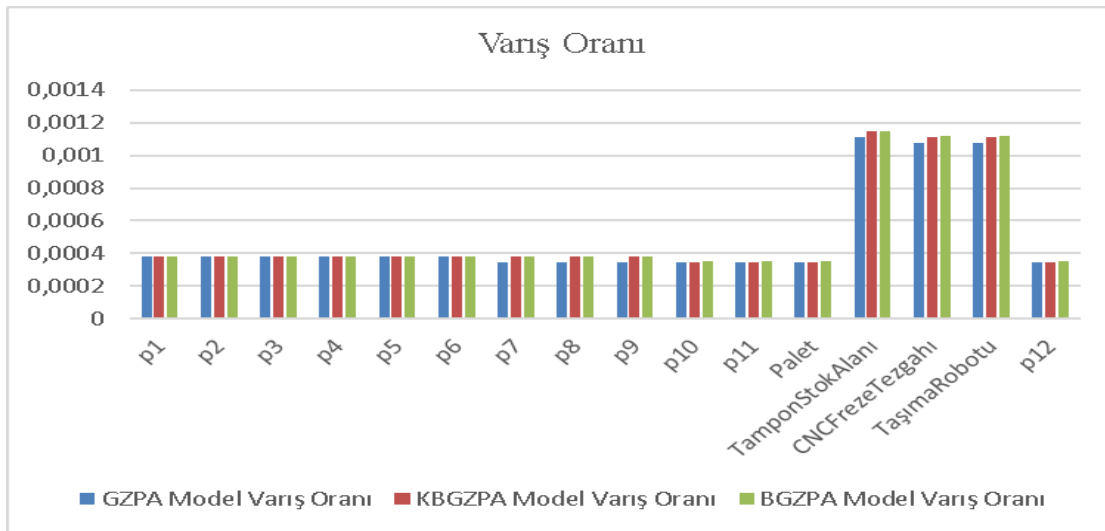
5.5.3. Varış Oranı Performans Kriteri

$\frac{1}{\text{Varış Aralığı}}$ formülasyonu kullanılarak hesaplanan “Varış Oranı” performans kriteri,

ilgili konuma giriş yapan jetonların giriş yapma sıklıklarını veren bir orandır. Tablo 5.15’te her bir konum için GZPA Model, KBGZPA Model, BGZPA Model için ayrı ayrı varış oranları verilmiştir.

Tablo 5. 15. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için konumlarda gerçekleşen varış oranı değerleri

Konumun İsmi	GZPA Model	KBGZPA Model	BGZPA Model
	Varış Oranı	Varış Oranı	Varış Oranı
p1	0,0003824	0,00038286	0,00038351
p2	0,0003824	0,00038286	0,00038351
p3	0,0003824	0,00038286	0,00038351
p4	0,0003824	0,00038286	0,00038351
p5	0,0003824	0,00038286	0,00038351
p6	0,0003824	0,00038286	0,00038351
p7	0,00034763	0,00038286	0,00038351
p8	0,00034763	0,00038286	0,00038351
p9	0,00034763	0,00038286	0,00038351
p10	0,00034763	0,00034806	0,00034864
p11	0,00034763	0,00034806	0,00034864
Palet	0,00034763	0,00034806	0,00034864
TamponStokAlanı	0,0011124	0,00114860	0,0011505
CNCFrezeTezgahı	0,0010777	0,00111380	0,0011157
TaşımaRobotu	0,0010777	0,00111380	0,0011157
p12	0,00034763	0,00034806	0,00034864



Şekil 5. 61. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için varış oranı grafiği

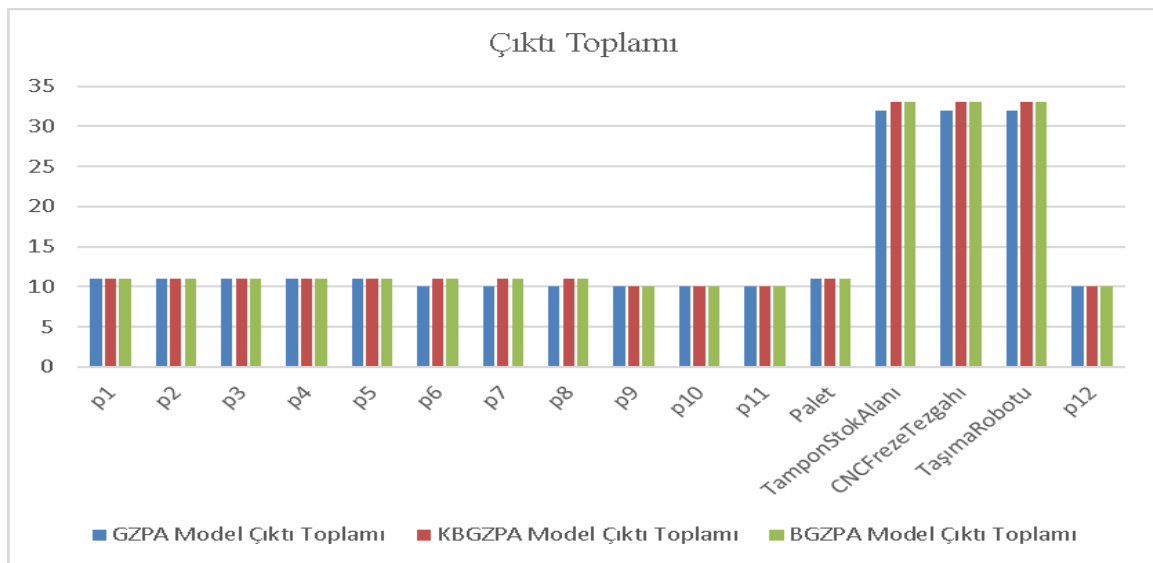
Tablo 5.15'e göre oluşturulan Şekil 5.61'deki grafikte ise uygulanan modellerin konumlardaki varış oranı performans kriteri için yarattığı değişiklikler gözlemlenebilir.

5.5.4. Çıktı toplamı performans kriteri

Konumlar için “Çıktı Toplamı” değeri, o konumdan çıkan jetonların toplam sayısını verir. Tablo 5.16'da GZPA Model, KBGZPA Model ve BGZPA Model için konumlardaki çıktı toplamaları gösterilmiştir.

Tablo 5. 16. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için konumlarda gerçekleşen çıktı toplamı değerleri

Konumun İsmi	GZPA Model Çıktı Toplamı	KBGZPA Model Çıktı Toplamı	BGZPA Model Çıktı Toplamı
p1	11	11	11
p2	11	11	11
p3	11	11	11
p4	11	11	11
p5	11	11	11
p6	10	11	11
p7	10	11	11
p8	10	11	11
p9	10	10	10
p10	10	10	10
p11	10	10	10
Palet	11	11	11
TamponStokAlamı	32	33	33
CNCFrezeTezgahı	32	33	33
TaşımaRobotu	32	33	33
p12	10	10	10



Şekil 5. 62. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için çıktı toplamı grafiği

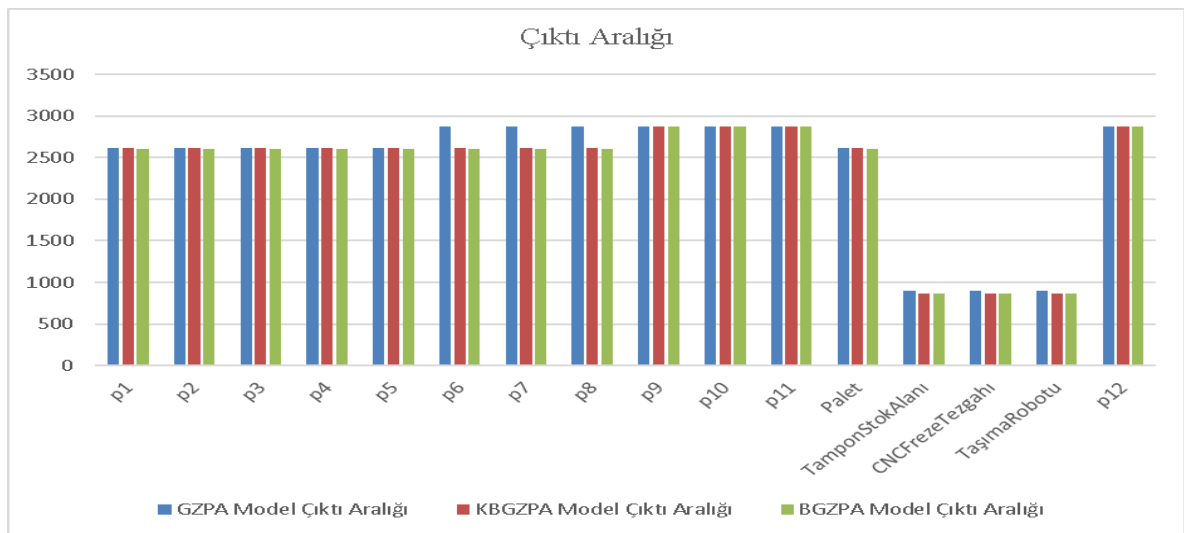
Tablo 5.16'ya göre oluşturulan grafik ise Şekil 5.62'de verilmiştir. Grafikte bu performans kriteri açısından modeller arasındaki değişkenlik gözlemlenebilir.

5.5.5. Çıktı aralığı performans kriteri

“Çıktı Aralığı” performans kriteri ilgili model için gerçekleşen simülasyon süresinin söz konusu konumdaki çıktı toplamı değerine bölünmesi ile hesaplanır. Tablo 5.17'de her 3 model için de simülasyon sonucunda konumlarda gerçekleşen çıktı aralıkları değerleri verilmiştir.

Tablo 5. 17. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için konumlarda gerçekleşen çıktı aralığı değerleri

Konumun İsmi	GZPA Model Çıktı Aralığı	KBGZPA Model Çıktı Aralığı	BGZPA Model Çıktı Aralığı
p1	2615,0909	2611,9091	2607,5
p2	2615,0909	2611,9091	2607,5
p3	2615,0909	2611,9091	2607,5
p4	2615,0909	2611,9091	2607,5
p5	2615,0909	2611,9091	2607,5
p6	2876,6	2611,9091	2607,5
p7	2876,6	2611,9091	2607,5
p8	2876,6	2611,9091	2607,5
p9	2876,6	2873,1	2868,25
p10	2876,6	2873,1	2868,25
p11	2876,6	2873,1	2868,25
Palet	2615,0909	2611,9091	2607,5
TamponStokAlamı	898,9375	870,6364	869,1667
CNCFrezeTezgahı	898,9375	870,6364	869,1667
TaşmaRobotu	898,9375	870,6364	869,1667
p12	2876,6	2873,1	2868,25



Şekil 5. 63. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için çıktı aralığı grafiği

Buna göre oluşturulan grafik ise Şekil 5.63'te verilmiştir. Bu grafiğe göre GZPA Model'deki p_6, p_7, p_8 konumlarındaki çıktı aralığı değerleri diğer iki modele göre daha yüksek çıkmıştır.

5.5.6. Çıktı oranı performans kriteri

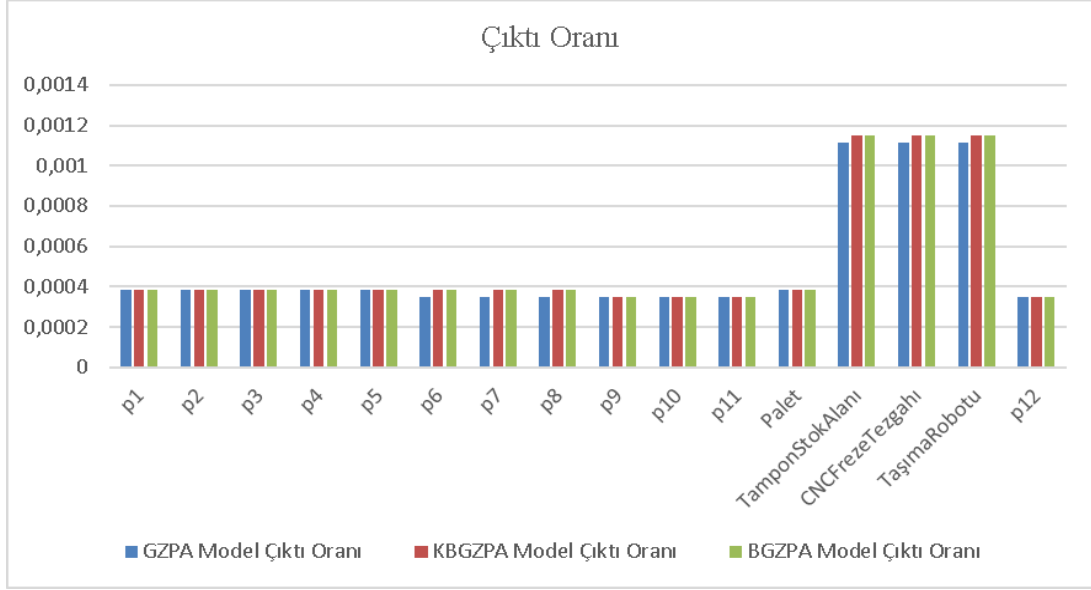
Konumlar aracılığıyla elde edilen bir diğer performans kriteri olan “çıktı oranı” ise $\frac{1}{\text{Çıktı Aralığı}}$ formülasyonu kullanılarak hesaplanır ve jetonların söz konusu konumdan çıkış yapma sıklığını verir.

Tablo 5.18’de simülasyon sonunda GZPA Model, KBGZPA Model ve BGZPA Model için elde edilen her bir konumdaki gerçekleşmiş çıktı oranı değerleri verilmiştir.

Tablo 5. 18. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için konumlarda gerçekleşen çıktı oranı değerleri

Konumun İsmi	GZPA Model Çıktı Oranı	KBGZPA Model Çıktı Oranı	BGZPA Model Çıktı Oranı
p1	0,0003824	0,00038286	0,00038351
p2	0,0003824	0,00038286	0,00038351
p3	0,0003824	0,00038286	0,00038351
p4	0,0003824	0,00038286	0,00038351
p5	0,0003824	0,00038286	0,00038351
p6	0,00034763	0,00038286	0,00038351
p7	0,00034763	0,00038286	0,00038351
p8	0,00034763	0,00038286	0,00038351
p9	0,00034763	0,00034806	0,00034864
p10	0,00034763	0,00034806	0,00034864
p11	0,00034763	0,00034806	0,00034864
Palet	0,0003824	0,00038286	0,00038351
TamponStokAlanı	0,0011124	0,00114860	0,0011505
CNCFrezeTezgalı	0,0011124	0,00114860	0,0011505
TaşınmaRobotu	0,0011124	0,00114860	0,0011505
p12	0,00034763	0,00034806	0,00034864

Tablo 5.18’e bağlı olarak oluşturulmuş Şekil 5.64’teki grafik aracılığıyla her bir konumdaki çıktı oranı değerinin modeller bazındaki değişkenliği gözlemlenebilir.



Şekil 5. 64. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için çıktı oranı grafiği

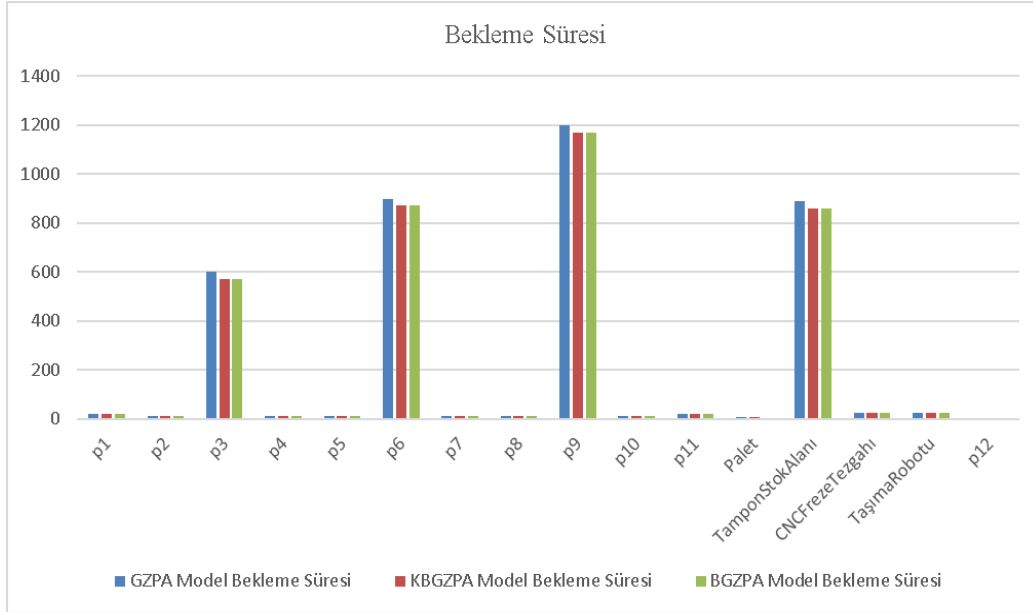
5.5.7. Bekleme süresi performans kriteri

“Bekleme Süresi”, jetonların o konumda geçirdikleri ortalama bekleme süresini veren orandır ve Tablo 5.19’da 3 model için de simülasyon sonucu konumlar için elde edilen bekleme sürelerini gösterir.

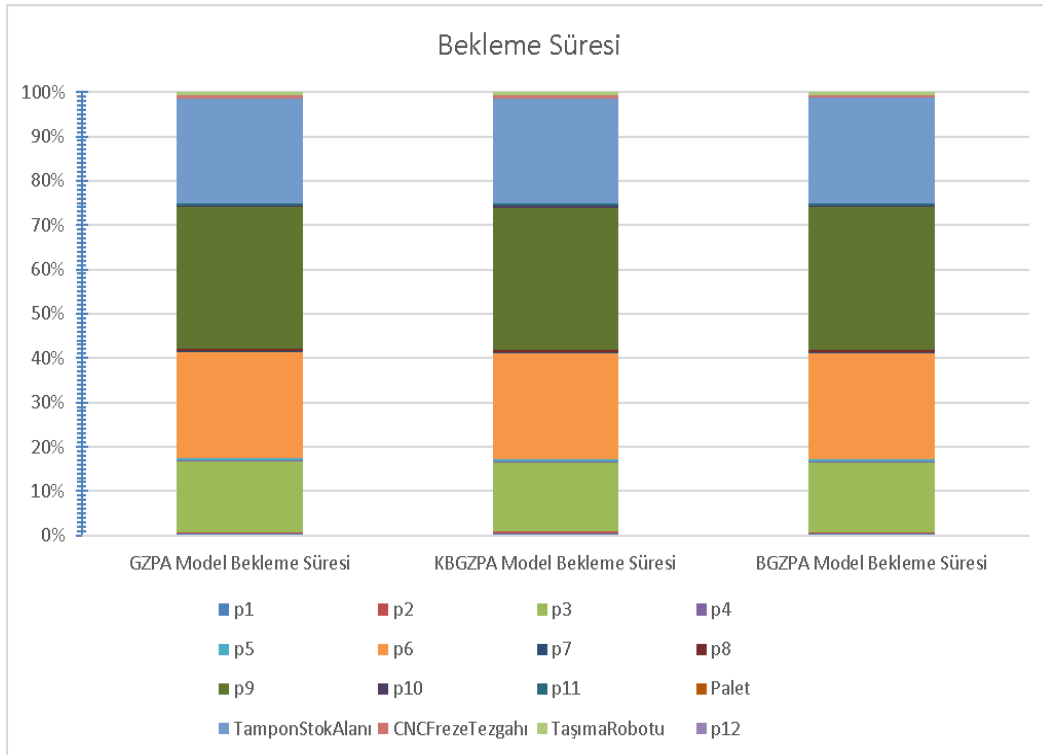
Tablo 5. 19. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için konumlarda gerçekleşen bekleme süresi değerleri

Konumun İsmi	GZPA Model Bekleme Süresi	KBGZPA Model Bekleme Süresi	BGZPA Model Bekleme Süresi
p1	20	20	19,5
p2	10	10	9,5
p3	600	570	570
p4	10	10	9,5
p5	11	11	10,5
p6	900	870	870
p7	12	12	11,5
p8	13	13	12,5
p9	1200	1170	1170
p10	10	10	9,5
p11	20	20	19,5
Palet	5	5	4,5
TamponStokAlanı	887,6563	859,303	858,3333
CNCFrezeTezgahı	26,125	25,7273	24,7424
TaşımaRobotu	25,1563	24,7576	23,7879
p12	0	0	0

Tablo 5.19 aracılığıyla Şekil 5.65'teki grafik elde edilmiştir. Grafiğe bakıldığında GZPA ile modellenen sistemde jetonların istasyonlardaki ortalama bekleme süresinin daha yüksek olduğu görülür.



Şekil 5. 65. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için bekleme süresi grafiği



Şekil 5. 66. GZPA, KBGZPA ve BGZPA modelde bekleme sürelerinin dağılımı

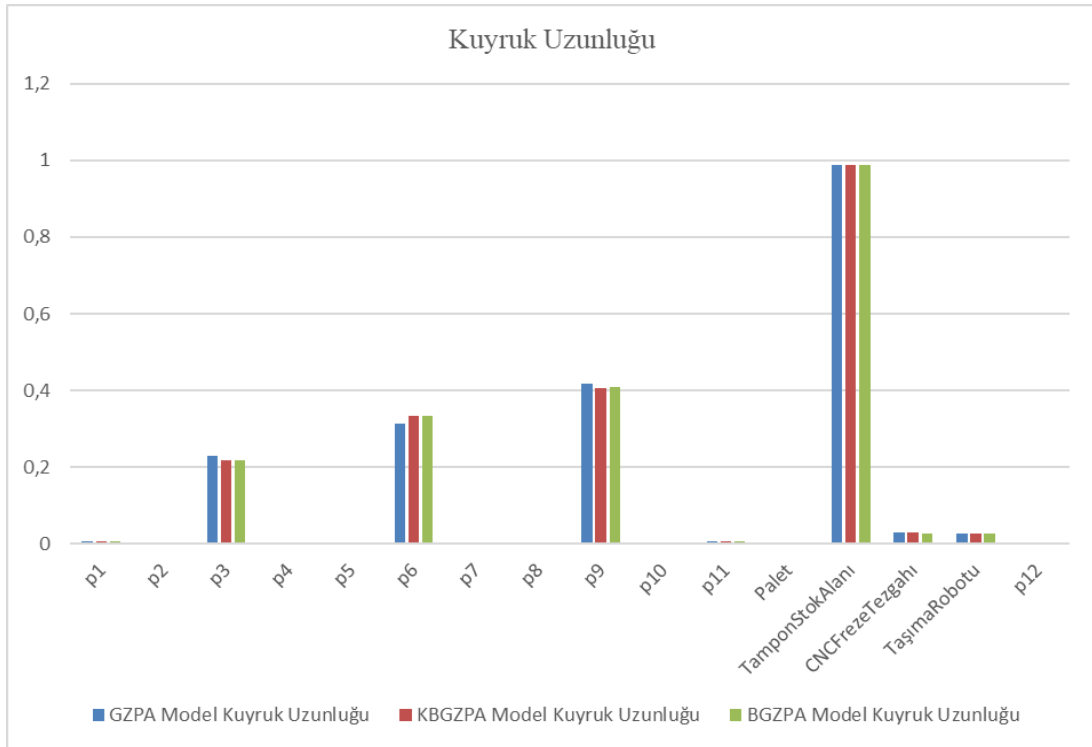
Şekil 5.65'teki grafikte p_3, p_6, p_9 ve *TamponStokAlanı* konumlarındaki bekleme sürelerinin her 3 modelde de diğer tüm konumlardan daha yüksek olduğu göze çarpar. Bunu dikkate alarak oluşturulan Şekil 5.66'daki grafikte ise her 3 model için de ölçülen p_3, p_6, p_9 ve *TamponStokAlanı* konumlarındaki bekleme sürelerinin tüm sistemdeki bekleme süresinin yaklaşık %98'ini oluşturduğu gözlemlenebilir.

5.5.8. Kuyruk uzunluğu performans kriteri

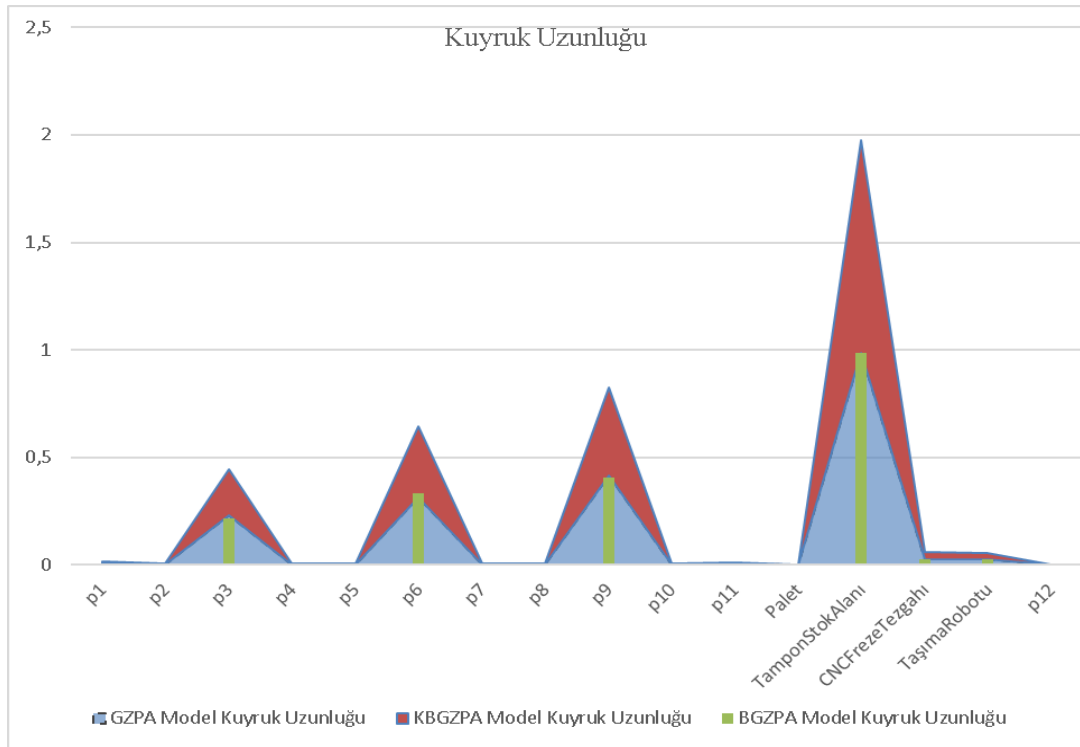
Konumlar aracılığıyla elde edilen son performans kriteri olan “kuyruk uzunluğu” ise ilgili konumda gerçekleşen bekleme süresinin çıktı aralığı değerine bölümü ile hesaplanır. Tablo 5.20’de GZPA, KBGZPA ve BGZPA modeller için kuyruk uzunluğu değerleri her bir konum için verilmiştir.

Tablo 5. 20. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için konumlarda gerçekleşen kuyruk uzunluğu değerleri

Konumun İsmi	GZPA Model Kuyruk Uzunluğu	KBGZPA Model Kuyruk Uzunluğu	BGZPA Model Kuyruk Uzunluğu
p1	0,0076479	0,0076572	0,0074784
p2	0,003824	0,0038286	0,0036433
p3	0,22944	0,21823	0,2186
p4	0,003824	0,0038286	0,0036433
p5	0,0042064	0,0042115	0,0040268
p6	0,31287	0,33309	0,33365
p7	0,0041716	0,0045943	0,0044104
p8	0,0045192	0,0049772	0,0047939
p9	0,41716	0,40723	0,40791
p10	0,0034763	0,0034806	0,0033121
p11	0,0069527	0,0069611	0,0067986
Palet	0,001912	0,0019143	0,0017258
TamponStokAlanı	0,98745	0,98698	0,98754
CNCFrezeTezgahı	0,029062	0,02955	0,028467
TaşmaRobotu	0,027984	0,028436	0,027369
p12	0	0	0



Şekil 5. 67. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için kuyruk uzunluğu grafiği



Şekil 5. 68. Bulanıklık içeren modellerin kuyruk uzunluğu kriterine etkisi

Tabloya bağılı oluşturulan ve Şekil 5.67’de gösterilen grafiğe göre özellikle p_3, p_6, p_9 ve *TamponStokAlanı* konumları için bulanıklık içeren modellerde kuyruk uzunluklarının GZPA Model’e göre daha az oldukları göze çarpar. Bu konumlar sistemdeki en yüksek kuyruk uzunlukları değerlerine sahip olduklarından geliştirilen modellerde kuyruk uzunluklarını azaltmak önem taşır.

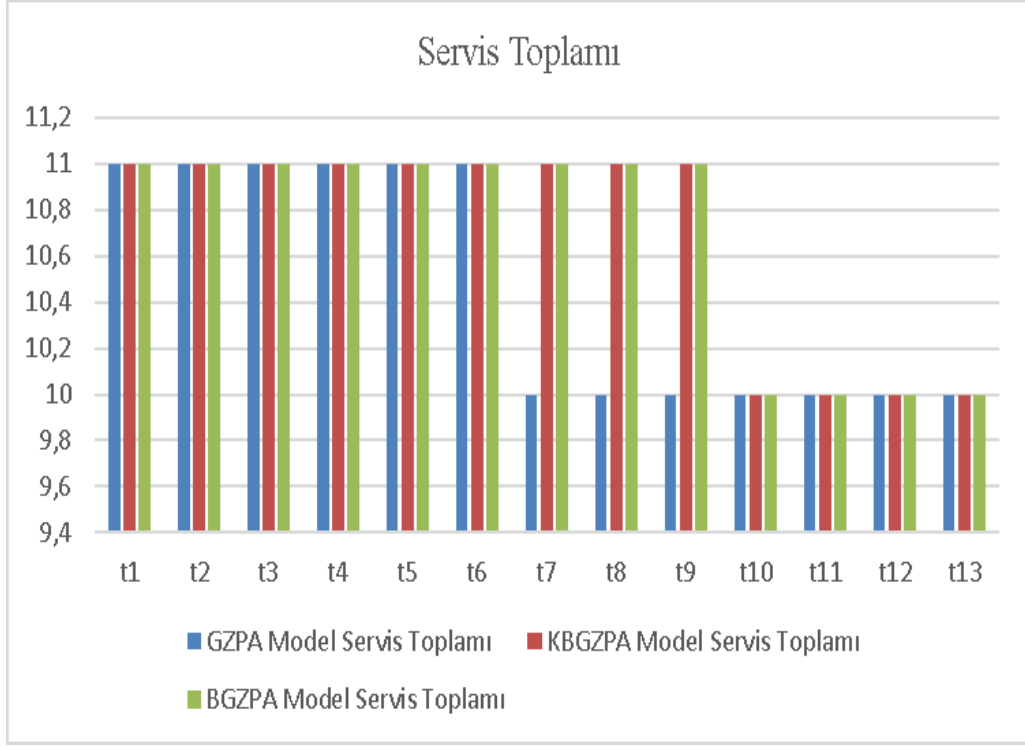
Bulanıklık içeren modellerin (KBGZPA Model ve BGZPA Model), GZPA Model’e göre p_3, p_6, p_9 ve *TamponStokAlanı* konumlarındaki kuyruk uzunluklarına olan etkisi, Şekil 5.68’de verilen grafikten rahatlıkla görülebilir.

5.5.9. Servis toplamı performans kriteri

Sistemdeki geçiş düğümleri aracılığıyla elde edilen “servis toplamı”, söz konusu geçişin simülasyon süresi boyunca toplamda kaç kez ateşlendiğini gösterir. Tablo 5.21’de GZPA Model, KBGZPA Model ve BGZPA Model için geçişlerde gerçekleşen servis toplamları verilmiştir.

Tablo 5. 21. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için geçişlerde gerçekleşen servis toplamı değerleri

Geçişin İsmi	GZPA Model Servis Toplamı	KBGZPA Model Servis Toplamı	BGZPA Model Servis Toplamı
t1	11	11	11
t2	11	11	11
t3	11	11	11
t4	11	11	11
t5	11	11	11
t6	11	11	11
t7	10	11	11
t8	10	11	11
t9	10	11	11
t10	10	10	10
t11	10	10	10
t12	10	10	10
t13	10	10	10



Şekil 5. 69. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için servis toplamı grafiği

Tablo 5.21 aracılığıyla elde edilen grafik ise Şekil 5.69’da verilmiştir. Grafiğe göre t_7, t_8 ve t_9 geçişlerinin ateşlenme sayılarına bakıldığında GZPA Model’de bulanıklık içeren modellere göre çok daha az sayıda ateşleme gerçekleştiği görülür.

Modelin kurgulanması esnasında geçişlerin, sistemdeki operasyonlar ve operasyonların başlangıç ve bitişleri ile ilişkilendirildikleri düşünüldüğünde bulanıklık içeren modellerin “servis toplamı performans kriteri” üzerindeki pozitif etkisi anlaşılabilir.

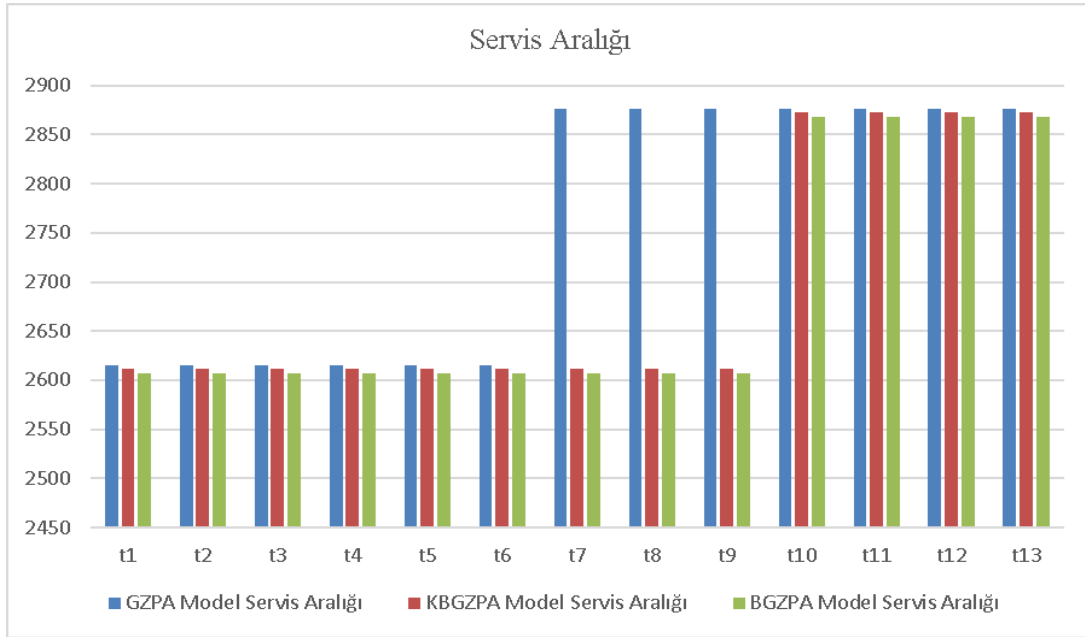
5.5.10. Servis aralığı performans kriteri

Model çalıştırılırken gerçekleştirilen simülasyon süresinin servis toplamı değerine bölünmesiyle elde edilen her bir geçiş için gerçekleşen “servis aralığı” değerleri Tablo 5.22’de GZPA Model, KBGZPA Model ve BGZPA Model için verilmiştir.

Tablo 5.22’ye göre oluşturulan grafik Şekil 5.70’te verilmiştir. İlgili geçiş için arzu edilen durumun en düşük servis aralığının sağlanması olduğu düşünülürse, t_7, t_8 ve t_9 geçişleri için bulanıklık içermeyen GZPA Model’de bu geçişlerin servis aralıklarının diğer 2 modele göre çok daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir.

Tablo 5. 22. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için geçişlerde gerçekleşen servis aralığı değerleri

Geçişin İsmi	GZPA Model Servis Aralığı	KBGZPA Model Servis Aralığı	BGZPA Model Servis Aralığı
t1	2615,0909	2611,9091	2607,5
t2	2615,0909	2611,9091	2607,5
t3	2615,0909	2611,9091	2607,5
t4	2615,0909	2611,9091	2607,5
t5	2615,0909	2611,9091	2607,5
t6	2615,0909	2611,9091	2607,5
t7	2876,6	2611,9091	2607,5
t8	2876,6	2611,9091	2607,5
t9	2876,6	2611,9091	2607,5
t10	2876,6	2873,1	2868,25
t11	2876,6	2873,1	2868,25
t12	2876,6	2873,1	2868,25
t13	2876,6	2873,1	2868,25



Şekil 5. 70. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için servis aralığı grafiği

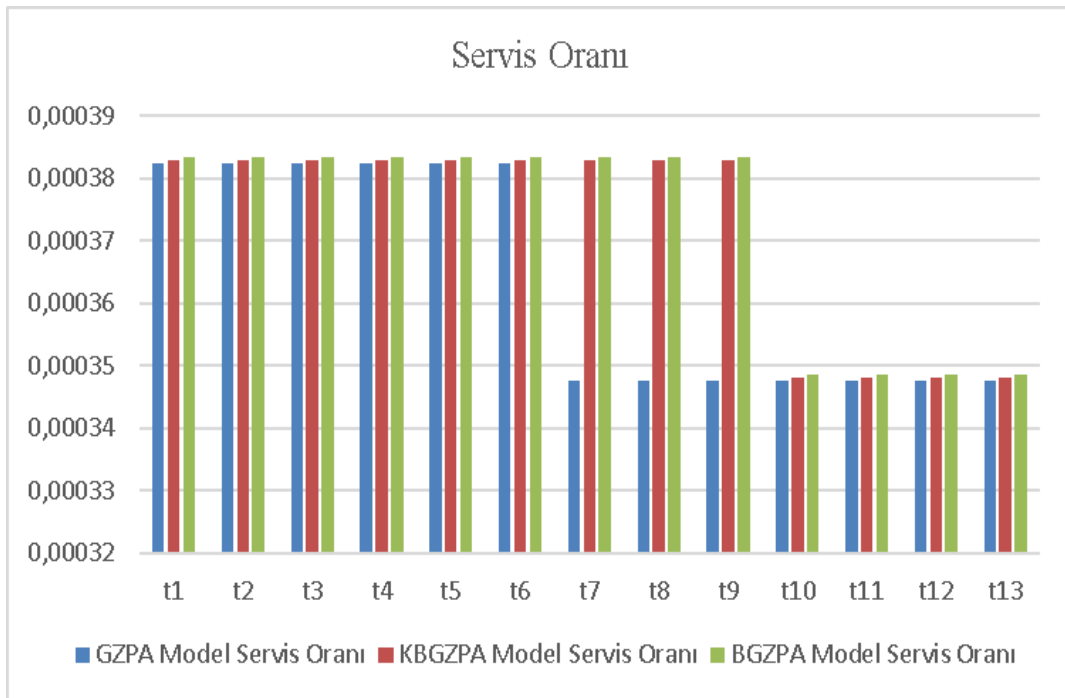
5.5.11. Servis oranı performans kriteri

“Servis Oranı”, $\frac{1}{\text{Servis Aralığı}}$ formülasyonu ile elde edilir ve ele alınan 3 model için

de simülasyon sonucu her bir geçiş için elde edilen servis oranları Tablo 5.23’te verilmiştir.

Tablo 5. 23. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için geçişlerde gerçekleşen servis oranı değerleri

Geçişin İsmi	GZPA Model Servis Oranı	KBGZPA Model Servis Oranı	BGZPA Model Servis Oranı
t1	0,0003824	0,00038286	0,00038351
t2	0,0003824	0,00038286	0,00038351
t3	0,0003824	0,00038286	0,00038351
t4	0,0003824	0,00038286	0,00038351
t5	0,0003824	0,00038286	0,00038351
t6	0,0003824	0,00038286	0,00038351
t7	0,00034763	0,00038286	0,00038351
t8	0,00034763	0,00038286	0,00038351
t9	0,00034763	0,00038286	0,00038351
t10	0,00034763	0,00034806	0,00034864
t11	0,00034763	0,00034806	0,00034864
t12	0,00034763	0,00034806	0,00034864
t13	0,00034763	0,00034806	0,00034864



Şekil 5. 71. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için servis oranı grafiği

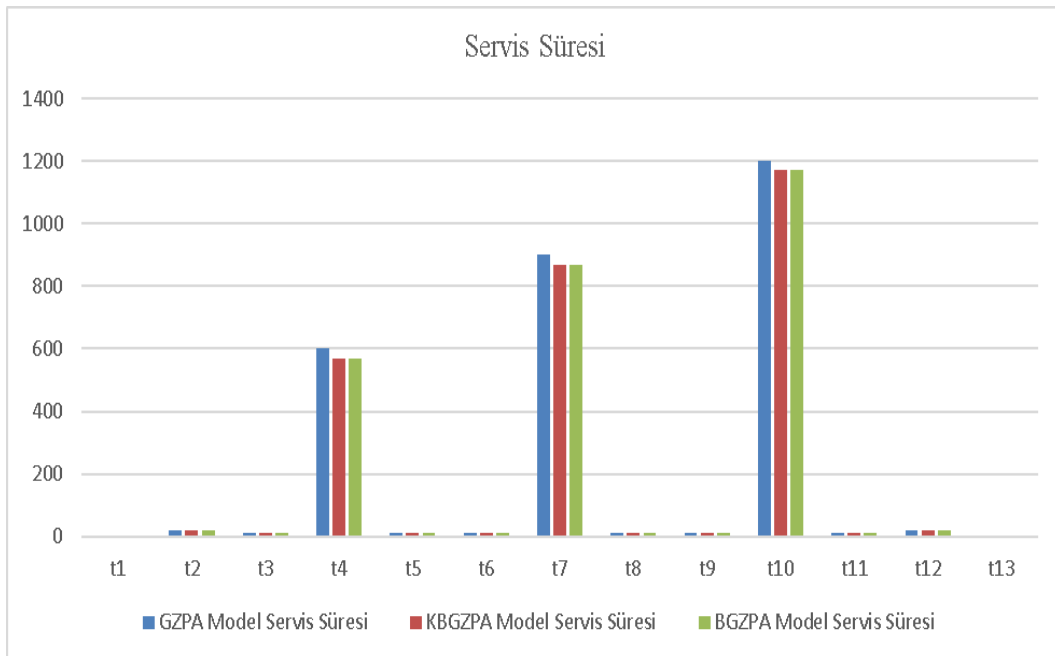
Buna göre elde edilen Şekil 5.71'deki grafik ise servis oranlarının modeller bazında geçişler üzerindeki değişkenliğini gösterir.

5.5.12. Servis süresi performans kriteri

“Servis süresi” değeri, ilgili geçişin ateşlenme süreleri ortalamaları alınarak hesaplanan bir değerdir. Oluşturulan modeller için geçişlerde gerçekleşen servis süreleri simülasyonun sonunda Tablo 5.24’teki gibi ölçülmüştür.

Tablo 5. 24. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için geçişlerde gerçekleşen servis süresi değerleri

Geçişin İsmi	GZPA Model Servis Süresi	KBGZPA Model Servis Süresi	BGZPA Model Servis Süresi
t1	5	5	4,5
t2	20	20	19,5
t3	10	10	9,5
t4	600	570	570
t5	10	10	9,5
t6	11	11	10,5
t7	900	870	870
t8	12	12	11,5
t9	13	13	12,5
t10	1200	1170	1170
t11	10	10	9,5
t12	20	20	19,5
t13	0	0	0



Şekil 5. 72. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için servis süresi grafiği

Tablo 5.24’e göre oluşturulan Şekil 5.72’deki grafik modeller bazında geçişlerdeki servis sürelerini gösterir. Modeller kurgulanırken geçişlerin operasyonlar ile

ilişkilendirilmesi neticesinde ise servis sürelerinin işlem süreleri ile eşdeğer oldukları da görülebilir. GZPA Model'deki işlem sürelerinin, bulanıklık içeren diğer iki modele göre daha fazla olduğu özellikle t_4, t_7 ve t_{10} geçişlerine bakılarak gözlemlenebilir.

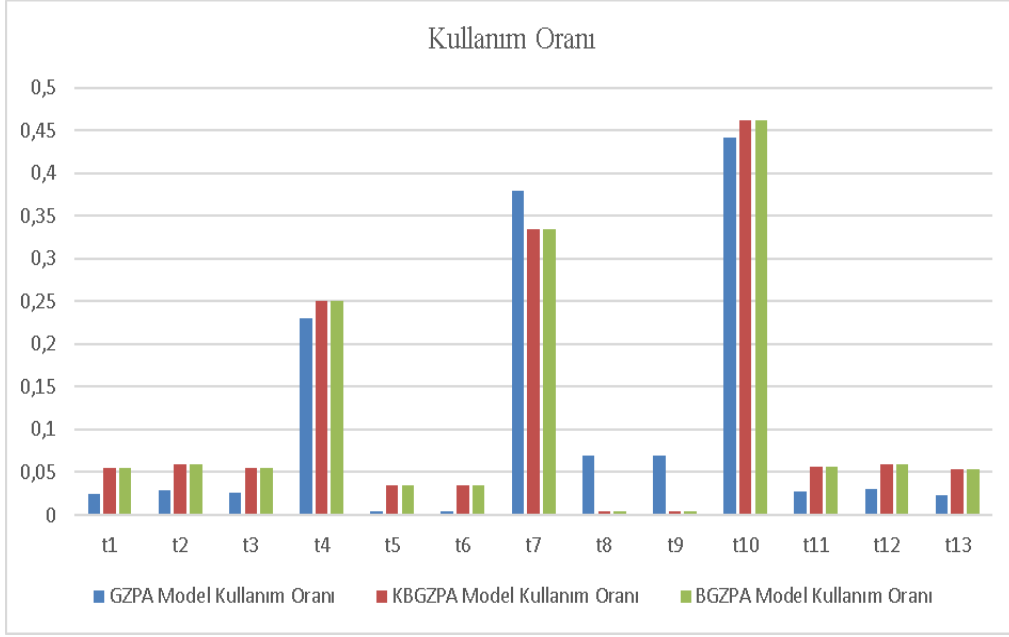
5.5.13. Kullanım oranı

Geçişler aracılığıyla elde edilen son performans kriteri sistemlerde incelenen en önemli oranlardan biri olan “kullanım oranı”dır. Geçişler için kullanım oranları GZPA Model, KBGZPA Model ve BGZPA Model için Tablo 5.25'te verildiği gibidir.

Tablo 5. 25. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için geçişlerde gerçekleşen kullanım oranı değerleri

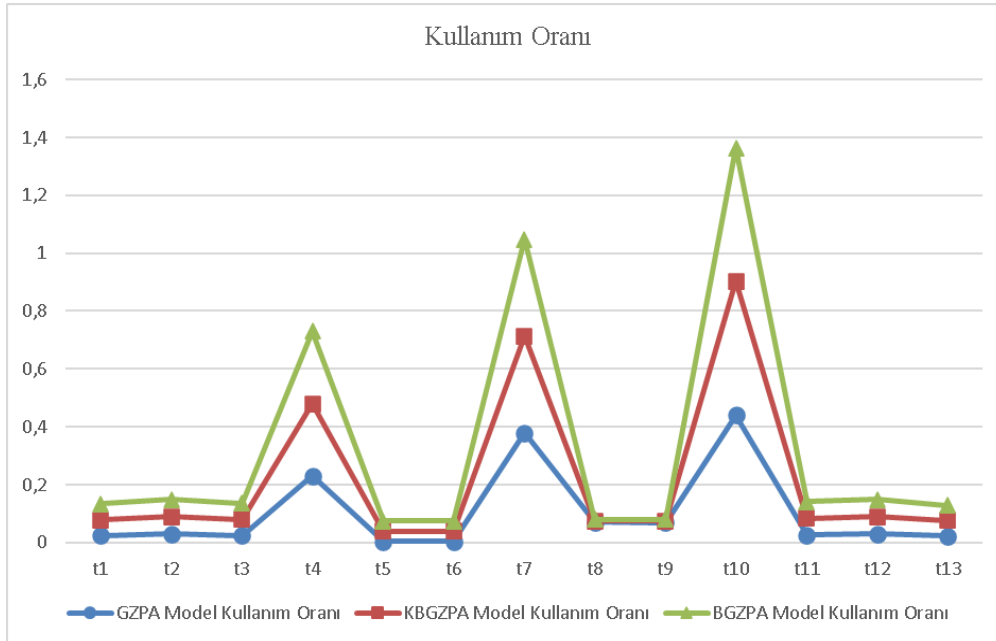
Geçişin İsmi	GZPA Model Kullanım Oranı	KBGZPA Model Kullanım Oranı	BGZPA Model Kullanım Oranı
t1	0,024543	0,05468	0,054476
t2	0,029584	0,059726	0,059549
t3	0,025412	0,05555	0,055382
t4	0,23017	0,25011	0,25047
t5	0,0042064	0,035363	0,035178
t6	0,0042064	0,035363	0,035196
t7	0,3793	0,33396	0,33449
t8	0,070187	0,0050468	0,0048462
t9	0,070083	0,0049772	0,0047939
t10	0,44101	0,46121	0,46183
t11	0,026976	0,057116	0,056899
t12	0,029757	0,0599	0,059705
t13	0,022805	0,052939	0,052907

Tablo 5.25'ten elde edilen Şekil 5.73'teki grafik GZPA Model, KBGZPA Model ve BGZPA Model'in sistemdeki kullanım oranlarına etkisini gösterir.



Şekil 5. 73. GZPA, KBGZPA ve BGZPA model için kullanım oranı grafiği

Tüm geçişlere entegre edilen bulanık parametreler ile oluşturulan BGZPA Model'in diğer iki modele göre sistemdeki kullanım oranlarına olan pozitif etkisi Şekil 5.74'teki grafikten anlaşılabilir.



Şekil 5. 74. Bulanıklık içeren modellerin kullanım oranı kriterine etkisi

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında ele alınan bir EÜH, hücre elemanlarının mekanik ve elektriksel bileşenlerinden kaynaklanan belirsizliklerin sistem performansına etkilerinin analizi amacıyla bulanıklık içermeyen, kısmen içeren ve bulanıklık içeren 3 farklı Petri ağ modeli ile modellenmiş, performans analizleri yapılmış ve sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmıştır.

Bu amaçla “zaman ögesi” sisteme Petri ağlarının geçiş elemanı aracılığıyla entegre edilerek temelde “Geçiş Zamanlı Petri Ağları” nı kullanan bir metodoloji uygulanmıştır.

Aşağıda çalışmada önerilen metodoloji ve performans analizi çalışmasının kısa bir özeti ile çalışmanın literatüre sunduğu katkı ve ardından gelecek çalışmalar ile ilgili öneriler açıklanmıştır.

Ele alınan EÜH’de mekanik sistemlerin neredeyse tamamında kaçınılmaz olan ve sonucunda birtakım belirsizlikler doğuran güç kayıplarının yaşandığının gözlenmesi ile sistemin bulanıklık içeren PA ile modellenmesine karar verilmiştir. Bu karar beraberinde geliştirilen PA modellerinin bulanıklık içermeye derecelerinin sistemin gerçek yapısını nasıl yansıttığı sorusunu da getirdiğinden, sistem;

- Geçiş Zamanlı Petri Ağ Modeli (Bulanıklık içermez.)
 - Kısmi-Bulanık Geçiş Zamanlı Petri Ağ Modeli (Sadece bazı parametreler bulanıklaştırılmıştır.)
 - Bulanık Geçiş Zamanlı Petri Ağ Modeli (Tüm parametreler bulanıklaştırılmıştır.)
- olmak üzere 3 farklı şekilde modellenmiştir.

Her 3 model için de performans analizi çalışmaları yapılmış ve performans kriterlerinin değerleri, geliştirilen modeller bazında kıyaslanmıştır. Yapılan tüm performans analizi çalışmaları neticesinde Bulanık Geçiş Zamanlı PA (BGZPA) modelin sistemin gerçek yapısını en iyi şekilde yansıtan model olduğu sonucuna varılmıştır.

Şu ana kadar yapılan EÜS’lerin PA’lar ile modellenmesi çalışmalarında sistemdeki belirsizlikler modele stokastiklik ile veya stokastiklik ve bulanıklık ile birlikte olacak şekilde entegre edilmiştir. Yaptığımız çalışmada ise, ele alınan sistem belirsizlikleri, içerisinde stokastiklik barındırmadığından, yalnızca “bulanık küme” teorisi ile modellenmiştir.. Bu çalışma zamanın sadece geçiş elemanları aracılığıyla sisteme entegre edilip, zaman değeri taşıyan geçiş parametrelerinin “Yamuksal Bulanık Küme” yöntemiyle bulanıklaştırılmış olması açısından literatürdeki diğer çalışmalardan ayrılır.

Çalışma kapsamında bulanıklık sadece “Yamuksal Bulanık Küme” (Trapezoidal Fuzzy Set) şeklinde ele alınmış, başka bulanık küme çeşitleriyle çalışılmamıştır. Gelecek çalışmalarda farklı bulanık kümelerin kullanılması yoluyla EÜS’lerde belirsizliğin modellenmesi ve bu çalışmada sunulan yamuksal bulanık sayılarla modelleme sonuçlarıyla karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] R. Manzini, M. Gamberi, A. Regattieri, and A. Persona, “Framework for Designing a Flexible Cellular Assembly System,” *Int J Prod Res*, vol. 42, no. 17, pp. 3505–3528, Sep. 2004, doi: 10.1080/00207540410001696023.
- [2] N. Singh and D. Rajamani, *Cellular Manufacturing Systems Design, Planning and Control*, Second., no. 6. Springer, 1996. [Online]. Available: www.tandfonline.com/doi/full/10.1057/palgrave.jors.2600414
- [3] J. Slomp, “The Design and Operation of Flexible Manufacturing Shops,” in *The Planning and Scheduling of Production Systems*, Boston, MA: Springer US, 1997, pp. 199–226. doi: 10.1007/978-1-4613-1195-9_7.
- [4] B. L. Maccarthy and J. Liu, “A New Classification Scheme for Flexible Manufacturing Systems,” *Int J Prod Res*, vol. 31, no. 2, pp. 299–309, Feb. 1993, doi: 10.1080/00207549308956726.
- [5] C. S. Askin, R.G., and Standridge, *Modeling and Analysis of Manufacturing Systems*, 1st ed. New York: John Wiley & Sons INC, 1993.
- [6] M. Zhou and K. Venkatesh, *Modeling, Simulation, and Control of Flexible Manufacturing Systems*, vol. 6. MA, Danvers: World Scientific, 1999. doi: 10.1142/3376.
- [7] S.-H. (Gary) Teng and J. Zhang, “A Petri Net Based Decomposition Approach in Modelling of Manufacturing Systems,” *Int J Prod Res*, vol. 31, no. 6, pp. 1423–1439, Jun. 1993, doi: 10.1080/00207549308956799.
- [8] R. Zurawski and M. Zhou, “Petri Nets and Industrial Applications: A Tutorial,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 41, no. 6, pp. 567–583, Dec. 1994, doi: 10.1109/41.334574.
- [9] B. W. Choi, “Petri Net Approaches for Modeling, Controlling, and Validating Flexible Manufacturing Systems,” Doctor of Philosophy, Iowa State University, Ames, Iowa, 1994. doi: 10.31274/rtd-180813-9957.
- [10] C. Petri, “Kommunikation Mit Atomata,” Technische Universität Darmstadt, 1962.
- [11] Hüseyin Avunduk, *Esnek Üretim Sistemleri*, no. 1. İstanbul: Kriter Yayınevi, 2018.
- [12] R. A. Maleki, *Flexible Manufacturing Systems: The Technology and Management*, 3rd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1991.

- [13] A. Sethi and S. Sethi, "Flexibility in Manufacturing: A Survey," *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, vol. 2, no. 4, pp. 289–328, Jul. 1990, doi: 10.1007/BF00186471.
- [14] H. Tempelmeier and H. Kuhn, *Flexible Manufacturing Systems: Decision Support for Design and Operation*, vol. 1. New York: Wiley, 1993.
- [15] J. A. Buzacott, "Fundamental Principles of Flexibility in Manufacturing Systems," in *Proceedings of the 1st International Conference on Flexible Manufacturing Systems*, Oct. 1982, pp. 13–22.
- [16] G. K. Rand and N. R. Greenwood, "Implementing Flexible Manufacturing Systems," *J Oper Res Soc*, vol. 40, no. 6, p. 611, Jun. 1989, doi: 10.2307/2583551.
- [17] J. Talavage and R. G. Hannam, *Flexible Manufacturing Systems in Practice Applications, Design and Simulation*, 1st ed. New York: Taylor & Francis, 1987.
- [18] P. Ranky, *The Design and Operation of FMS: Flexible Manufacturing Systems.*, no. 1. Bedford: IFS Publications Ltd., 1983. doi: 10.1046/j.1365-2532.2000.00264.x.
- [19] J. A. Buzacott and D. D. Yao, "Flexible Manufacturing Systems: A Review of Analytical Models," *Manage Sci*, vol. 32, no. 7, pp. 890–905, Jul. 1986, doi: 10.1287/mnsc.32.7.890.
- [20] H. K. Shivanand, M. M. Benal, and V. Koti, *Flexible Manufacturing Systems*, 3rd ed. New Delhi: New Age International Limited, 2006.
- [21] A. Raouf and M. Ben-Daya, "Flexible Manufacturing Systems: Recent Developments," in *Manufacturing Research and Technology 23*, Elsevier., Amsterdam, 1995, pp. 1–316.
- [22] G. Kıran, "Bulut Üretim İçin Endüstri 4.0'da Bir Kolektif Farkındalık Sistemi," Tezli Yüksek Lisans, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2018.
- [23] M. Zhou and F. DiCesare, *Petri Net Synthesis for Discrete Event Control of Manufacturing Systems*. Boston, MA: Springer US, 1993. doi: 10.1007/978-1-4615-3126-5.
- [24] M. Zhou and A. D. Robbi, "Applications of Petri Net Methodology to Manufacturing Systems," in *Computer Control of Flexible Manufacturing*

- Systems*, 1st ed., S. B. Joshi and J. S. Smith, Eds. Springer Science, 1994, pp. 207–231. doi: 10.1007/978-94-011-123.
- [25] T. Murata, “Petri Nets : Properties , Analysis and Applications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, no. 4, pp. 541–580, Apr. 1989.
- [26] Y. Yavuz, “Esnek Üretim Sistemlerinin Kilitlenmesiz Çizelgelenmesinde Petri Ağlarına Dayanan Sezgisel Bir Çözüm Yaklaşımı,” Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kayseri, 2011.
- [27] C. Başkocagil, “Petri Ağlarının İncelenmesi ve Örnek Bir Kontrol Sistemine Uygulanması,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2004.
- [28] E. Çınaroğlu, “Petri Ağları Yöntemi ve Üretim Planlaması Problemi Uygulaması,” Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kayseri, 2008.
- [29] R. Y. Al-Jaar and A. A. Desrochers, “Performance Evaluation of Automated Manufacturing Systems Using Generalized Stochastic Petri Nets,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 6, no. 6, pp. 621–639, Dec. 1990, doi: 10.1109/70.63259.
- [30] F. DiCesare, G. Harhalakis, J. M. Proth, M. Silva, and F. B. Vernadat, *Practice of Petri Nets in Manufacturing*, 1st ed., vol. 1. Dordrecht: Springer Netherlands, 1993. doi: 10.1007/978-94-011-6955-4.
- [31] M. Uzam, “Petri Net Based Supervisory Control of Discrete Event Systems and Their Ladder Logic Diagram Implementations,” Degree of Doctor of Philosophy, Telford Research Institute, Salford, 1998.
- [32] M. Zhou, *Petri Nets in Flexible and Agile Automation*. Boston, MA: Springer US, 1995. doi: 10.1007/978-1-4615-2231-7.
- [33] W. M. Zuberek and W. Kubiak, “Throughput Analysis of Manufacturing Cells Using Timed Petri Nets,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Oct. 1994, vol. 2, pp. 1328–1333. doi: 10.1109/ICSMC.1994.400029.
- [34] A. Koç, “Esnek Üretim Sistemlerinin Süreç Tabanlı Petri Ağları ile Modellenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2017.

- [35] F. Bulduk, “Petri Ağları ile Üretim Sistemleri Modellemesi Üzerine Bir Araştırma,” Yüksek Lisans Tezi , Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir, 2011.
- [36] M. A. Marsan, G. Balbo, G. Conte, S. Donatelli, and G. Franceschinis, “Petri Nets and their Properties,” in *Modelling with Generalised Stochastic Petri Nets*, 1st ed., no. 2, New York, USA: John Wiley & Sons, 1994, pp. 29–65. doi: 10.5555/561155.
- [37] R. David and H. Alla, “Properties of Petri Nets,” in *Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets*, 2nd ed., no. 1, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2010, pp. 21–60. doi: 10.1007/978-3-642-10669-9_2.
- [38] R. Bouyekhf and A. el Moudni, “On the Analysis of Some Structural Properties of Petri Nets,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans*, vol. 35, no. 6, pp. 784–794, Nov. 2005, doi: 10.1109/TSMCA.2005.851323.
- [39] C. G. Cassandras and S. Lafortune, “Introduction to Discrete Event Systems,” *IEEE Control Syst*, vol. 30, no. 6, pp. 223–266, Dec. 2010, doi: 10.1109/MCS.2010.938477.
- [40] M. Zhou and F. DiCesare, “Petri Nets and Manufacturing Systems,” in *Petri Net Synthesis for Discrete Event Control of Manufacturing Systems*, 1st ed., Y. C. Ho, Ed. Boston, MA: Springer US, 1993, pp. 13–29. doi: 10.1007/978-1-4615-3126-5.
- [41] Jean-Marie Proth and Xiaolan Xie, *Petri Nets: A Tool for Design and Management of Manufacturing*, 1st ed. Wiley, 1997. doi: 10.1016/S0278-6125(98)80015-0.
- [42] M. Zhou and K. Venkatesh, “Fundamentals of Petri Nets,” in *Modeling, Simulation, and Control of Flexible Manufacturing Systems*, 1st ed., vol. 6, F.-Y. Wang, Ed. MA, Danvers: World Scientific, 1999, pp. 59–90. doi: 10.1142/3376.
- [43] J. Wang, “Petri Nets for Dynamic Event-Driven System Modeling,” in *Handbook of Dynamic System Modeling*, P. A. Fishwick, Ed. Gainesville, USA: Chapman&Hall, 2007, pp. 24.1-24.17. doi: 10.1201/9781420010855.ch24.
- [44] F. Tüysüz, “Petri Ağları ile İmalat Sistemlerinin Modellenmesi Ve Analizinde Yeni Bir Yaklaşım,” Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.

- [45] G. Liu and L. Chen, “Deciding the Liveness for a Subclass of Weighted Petri Nets Based on Structurally Circular Wait,” *Int J Syst Sci*, vol. 47, no. 7, pp. 1533–1542, May 2016, doi: 10.1080/00207721.2014.938788.
- [46] Ö. Başak and Y. E. Albayrak, “Petri Net Based Decision System Modeling in Real-Time Scheduling and Control of Flexible Automotive Manufacturing Systems,” *Comput Ind Eng*, vol. 86, no. SI, pp. 116–126, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.cie.2014.09.024.
- [47] R. David and H. Alla, “Bases of Petri Nets,” in *Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets*, 2nd ed., Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2010, pp. 1–20. doi: 10.1007/3-540-26821-9_1.
- [48] S. Çayır, “Petri Ağlarında Değişmez Analizi,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2004.
- [49] G. Tunçel, “A High-Level Petri Net Based Decision Support System for Real Time Scheduling and Control of Flexible Manufacturing Systems: An Object-Oriented Approach,” Ph.D Thesis, Dokuz Eylül University, 2005. doi: 10.1007/11428831_105.
- [50] Q. Wang, X. Wang, and S. Yang, “Energy Modeling and Simulation of Flexible Manufacturing Systems Based on Colored Timed Petri Nets,” *J Ind Ecol*, vol. 18, no. 4, pp. 558–566, Aug. 2014, doi: 10.1111/jieec.12180.
- [51] L. Hu, R. Wu, and S. Shao, “Analysis of Dynamical Systems Whose Inputs are Fuzzy Stochastic Processes,” *Fuzzy Sets Syst*, vol. 129, no. 1, pp. 111–118, 2002, doi: 10.1016/S0165-0114(01)00073-2.
- [52] B. Möller and W. Graf, “Fuzzy Randomness-Towards a New Modeling of Uncertainty,” in *The Fifth World Congress Computational Mechanics*, Jul. 2002, pp. 1–10.
- [53] M. K. Molloy, “Performance Analysis Using Stochastic Petri Nets,” *IEEE Transactions on Computers*, vol. C-31, no. 9, pp. 913–917, Sep. 1982, doi: 10.1109/TC.1982.1676110.
- [54] G. Balbo and S. C. Bruell, “Combining Queueing Networks and Generalized Stochastic Petri Nets for the Solution of Complex Models of System Behavior,” *IEEE Transactions on Computers*, vol. 37, no. 10, pp. 1251–1268, Oct. 1988.
- [55] L. A. Zadeh, “Fuzzy Sets,” *Information and Control*, vol. 8, pp. 338–353, 1965, doi: 10.1061/9780784413616.194.

- [56] S.-J. Chen and C.-L. Hwang, “Negi’s Approach,” in *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods*, M.Beckmann and W.Krelle, Eds. Berlin: Springer, 1992, pp. 395–406. doi: 10.1007/978-3-642-46768-4_5.
- [57] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, 3rd ed. Spokane, Washington: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- [58] G. J. Tsinarakis, N. C. Tsourveloudis, and K. P. Valavanis, “Modeling, Analysis, Synthesis, and Performance Evaluation of Multioperational Production Systems With Hybrid Timed Petri Nets,” *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 29–46, Jan. 2006, doi: 10.1109/TASE.2005.857655.
- [59] C. K. M. Lee, Y. Lv, and Z. Hong, “Risk Modelling and Assessment for Distributed Manufacturing System,” *Int J Prod Res*, vol. 51, no. 9, pp. 2652–2666, Jan. 2013, doi: 10.1080/00207543.2012.738943.
- [60] J. L. Peterson, “Petri Nets,” *Computing Surveys*, vol. 9, no. 3, pp. 223–251, Sep. 1977, doi: 10.1007/978-3-319-68400-0_5.
- [61] R. Valette, M. Courvoisier, and D. Mayeux, “Control of Flexible Production Systems and Petri Nets,” in *Applications and Theory of Petri Nets*, 66th ed., A. Pagnoni, Ed. Berlin: Springer, 1983, pp. 264–277. doi: 10.1007/978-3-642-69028-0_18.
- [62] D. Dubois and K. E. Stecke, “Using Petri Nets to Represent Production Processes,” in *Proceedings of the 22nd IEEE Conference on Decision and Control*, Dec. 1983, vol. 22, no. 15, pp. 1062–1067.
- [63] H.Alla, P.Ladet, J.Martinez, and M.Silva-Suarez, “Modeling and Validation of Complex Systems by Colored Petri Nets: An Application to a Flexible Manufacturing System,” in *Advances in Petri Nets*, Springer, Berlin, Heidelberg, 1984, pp. 15–31. doi: 10.1007/3-540-15204-0_2.
- [64] Y. Narahari and N. Viswanadham, “A Petri Net Approach to the Modelling and Analysis of Flexible Manufacturing Systems,” *Ann Oper Res*, vol. 3, no. 8, pp. 449–472, 1985, doi: 10.1007/BF02023780.
- [65] F. Feldbrugge and K. Jensen, “Petri Net Tool Overview,” in *Proceedings of an Advanced Course on Petri Nets: Central Models and Their Properties, Advances in Petri Nets 1986-Part II*, Sep. 1986, pp. 20–61.

- [66] G. Bruno and G. Marchetta, "Process-Translatable Petri Nets for the Rapid Prototyping of Process Control Systems," *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. 12, no. 2, pp. 346–357, Feb. 1986.
- [67] M. Silva and R. Valette, "Petri Nets and Flexible Manufacturing," in *European Workshop on Applications and Theory in Petri Nets*, Jun. 1988, vol. 3, pp. 374–417. doi: 10.1007/3-540-52494-0_38.
- [68] M. Barad and D. Sipper, "Flexibility in Manufacturing Systems : Definitions and Petri Net Modelling," *Int J Prod Res*, vol. 26, no. 2, pp. 237–248, Oct. 1988, doi: 10.1080/00207548808947856.
- [69] R. Y. Al-Jaar, "Performance Evaluation of Automated Manufacturing Systems Using Generalized Stochastic Petri Nets," Doctor of Philosophy, Rensselaer Polytechnic Institute, 1989.
- [70] K. P. Valavanis, "On the Hierarchical Modeling Analysis and Simulation of Flexible Manufacturing Systems with Extended Petri Nets," *IEEE Trans Syst Man Cybern*, vol. 20, no. 1, pp. 94–110, Jan. 1990, doi: 10.1109/21.47812.
- [71] A. Bobbio, "System Modelling with Petri Nets," in *Systems Reliability Assessment*, vol. 13, no. 1, A. G. Colombo and A. S. de Bustamante, Eds. 1990, pp. 103–143. doi: 10.1016/0304-3975(81)90113-4.
- [72] M. Zhou, F. Dicesare, and D. Guo, "Modeling and Performance Analysis of a Resource-Sharing Manufacturing System Using Stochastic Petri Nets," in *Proceedings. 5th IEEE International Symposium on Intelligent Control 1990*, Sep. 1990, pp. 1005–1010. doi: 10.1109/ISIC.1990.128577.
- [73] M. Zhou and F. Dicesare, "Parallel and Sequential Mutual Exclusions for Petri Net Modeling of Manufacturing Systems with Shared Resources," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 4, pp. 515–527, Aug. 1991, doi: 10.1109/70.86081.
- [74] I. Koh and F. Dicesare, "Synthesis Methods Using Deviation Bounds in Automated Manufacturing Systems," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 1992, pp. 1025–1030. doi: 10.1109/ROBOT.1992.220213.
- [75] M. Zhou, F. Dicesare, and A. A. Desrochers, "A Hybrid Methodology for Synthesis of Petri Net Models for Manufacturing Systems," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 8, no. 3, pp. 350–361, Jun. 1992, doi: 10.1109/70.143353.

- [76] M. Zhou, F. Dicesare, and D. L. Rudolph, "Design and Implementation of a Petri Net Based Supervisor for a Flexible Manufacturing System," *Automatica*, vol. 28, no. 6, pp. 1199–1208, Nov. 1992, doi: 10.1016/0005-1098(92)90061-J.
- [77] M. der Jeng and F. Dicesare, "A Review of Synthesis Techniques for Petri Nets with Applications to Automated Manufacturing Systems," *IEEE Trans Syst Man Cybern*, vol. 23, no. 1, pp. 301–312, Jan. 1993, doi: 10.1109/21.214792.
- [78] W. M. Zuberek and W. Kubiak, "Timed Petri Net Models of Flexible Manufacturing," in *36th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Aug. 1993, pp. 922–925. doi: 10.1109/MWSCAS.1993.343219.
- [79] K. R. Raju and O. V. K. Chetty, "Design and Evaluation of Automated Guided Vehicle Systems for Flexible Manufacturing Systems : An Extended Timed Petri Net-Based Approach," *Int J Prod Res*, vol. 31, no. 5, pp. 1069–1096, May 1993, doi: 10.1080/00207549308956776.
- [80] M. Zhou, K. McDermott, and P. A. Patel, "Petri Net Synthesis and Analysis of a Flexible Manufacturing System Cell," *IEEE Trans Syst Man Cybern*, vol. 23, no. 2, pp. 523–531, Mar. 1993, doi: 10.1109/21.229464.
- [81] K. Lee and M. Jung, "Petri Net Application in Flexible Process Planning," in *16th Annual Conference on Computers and Industrial Engineering*, Sep. 1994, vol. 27, no. 1–4, pp. 505–508. doi: 10.1016/0360-8352(94)90345-X.
- [82] H. Shiizuka and M. Suzuki, "Modeling of AGV Networks in Flexible Manufacturing Systems," *Comput Ind Eng*, vol. 27, no. 1–4, pp. 81–86, Sep. 1994, doi: 10.1016/0360-8352(94)90242-9.
- [83] D. Y. Lee and F. DiCesare, "Integrated Scheduling of Flexible Manufacturing Systems Employing Automated Guided Vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 41, no. 6, pp. 602–610, Dec. 1994, doi: 10.1109/41.334577.
- [84] K. Venkatesh, M. Zhou, M. Kaighobadi, and R. Caudill, "A Petri Net Approach to Investigating Push and Pull Paradigms in Flexible Factory Automated Systems," *Int J Prod Res*, vol. 34, no. 3, pp. 595–620, Mar. 1996, doi: 10.1080/00207549608904922.
- [85] T. Murata, "Temporal Uncertainty and Fuzzy-Timing High-Level Petri Nets," in *Application and Theory of Petri Nets*, Billington J. and Reisig W., Eds.

- Osaka: Springer, Berlin, Heidelberg, 1996, pp. 11–28. doi: 10.1007/3-540-61363-3_2.
- [86] A. H. Jones, M. Uzam, and N. Ajlouni, “Design of Discrete Event Control Systems for Programmable Logic Controllers Using T-timed Petri Nets,” *Proceedings of the IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design*, vol. 4, no. 20, pp. 212–217, Sep. 1996.
- [87] D. S. Yeung, J. N. K. Liu, S. C. K. Shiu, and G. S. K. Fung, “Fuzzy Coloured Petri Nets in Modelling Flexible Manufacturing Systems,” in *Proceedings Mexico-USA Collaboration in Intelligent Systems Technologies*, Nov. 1996, pp. 100–107.
- [88] M. Koriem and L. M. Patnaik, “A Generalized Stochastic High-Level Net Model for Performance Analysis,” *J. Systems Software*, vol. 36, no. 3, pp. 247–265, Mar. 1997, doi: 10.1016/0164-1212(95)00083-6.
- [89] M. der Jeng, “A Petri Net Synthesis Theory for Modeling Flexible Manufacturing Systems,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, vol. 27, no. 2, pp. 169–183, Apr. 1997, doi: 10.1109/3477.558787.
- [90] L. E. Holloway, B. H. Krogh, and A. Giua, “A Survey of Petri Net Methods for Controlled Discrete Event Systems,” *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, vol. 7, no. 2, pp. 151–190, Apr. 1997, doi: 10.1023/A:1008271916548.
- [91] J. Proth, L. Wang, and X. Xie, “A Class of Petri Nets for Manufacturing,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 13, no. 3, pp. 317–326, Jun. 1997, doi: 10.1109/70.585895.
- [92] J. Ezpeleta and J. M. Colom, “Automatic Synthesis of Colored Petri Nets for the Control of FMS,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 13, no. 3, pp. 327–337, Jun. 1997, doi: 10.1109/70.585896.
- [93] H.-S. Yan, N.-S. Wang, X.-Y. Cui, and J.-G. Zhang, “Modeling, Scheduling and Control of Flexible Manufacturing Systems by Extended High-Level Evaluation Petri Nets,” *IIE Transactions*, vol. 29, no. 2, pp. 147–158, Jul. 1997, doi: 10.1080/07408179708966322.
- [94] M. der Jeng, “Petri Nets for Modeling Automated Manufacturing Systems with Error Recovery,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 13, no. 5, pp. 752–760, Oct. 1997, doi: 10.1109/70.631236.

- [95] E. Gündoğar and M. İpek, “Petri Ağları ile Modelleme Esasları,” *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 1, Sakarya, pp. 23–27, 1997.
- [96] M. Allam and H. Alla, “Modeling and Simulation of an Electronic Component Manufacturing System Using Hybrid Petri Nets,” *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 11, no. 3, pp. 374–383, Aug. 1998, doi: 10.1109/66.705372.
- [97] L.-C. Wang and S.-Y. Wu, “Modeling with Colored Timed Object-Oriented Petri Nets for Automated Manufacturing Systems,” *Computers ind. Engng*, vol. 34, no. 2, pp. 463–480, 1998, doi: 10.1016/S0360-8352(97)00145-9.
- [98] M. Zhou and M. der Jeng, “Modeling, Analysis, Simulation, Scheduling, and Control of Semiconductor Manufacturing Systems: A Petri Net Approach,” *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 11, no. 3, pp. 333–357, Aug. 1998, doi: 10.1109/66.705370.
- [99] A. Fanni and A. Giua, “Discrete Event Representation of Qualitative Models Using Petri Nets,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics- Part B: Cybernetics*, vol. 28, no. 6, pp. 770–780, Dec. 1998, doi: 10.1109/3477.735387.
- [100] A. Zimmermann and G. Hommel, “Modelling and Evaluation of Manufacturing Systems Using Dedicated Petri Nets,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 15, pp. 132–138, Feb. 1999, doi: 10.1007/s001700050050.
- [101] M. Jeng and M. Zhou, “Petri Nets in Semiconductor Manufacturing Automation: A Review,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 32, no. 2, pp. 473–478, Jul. 1999, doi: 10.1016/S1474-6670(17)56081-4.
- [102] D. Lefebvre, “Estimation of the Firing Frequencies in Discrete and Continuous Petri Nets Models,” *Int J Syst Sci*, vol. 32, no. 11, pp. 1321–1332, Jan. 2001, doi: 10.1080/00207720110051987.
- [103] A. Zimmermann and D. Rodrigues, “A Two Phase Optimisation Method for Petri Net Models of Manufacturing Systems,” *J Intell Manuf*, vol. 12, no. 5, pp. 409–420, Oct. 2001, doi: 10.1023/A:1012292102123.
- [104] W. M. Zuberek, “Timed Petri Nets in Modeling and Analysis of Cluster Tools,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 17, no. 5, pp. 562–575, Oct. 2001, doi: 10.1109/70.964658.

- [105] M. Uzam, “An Optimal Deadlock Prevention Policy for Flexible Manufacturing Systems Using Petri Net Models with Resources and the Theory of Regions,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 19, no. 3, pp. 192–208, Feb. 2002, doi: 10.1007/s001700200014.
- [106] Guixiu Qiao, C. McLean, and F. Riddick, “Simulation System Modeling for Mass Customization Manufacturing,” in *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, Dec. 2002, vol. 2, pp. 2031–2036. doi: 10.1109/WSC.2002.1166506.
- [107] I. ben Abdallah and H. A. Elmaraghy, “Deadlock-Free Scheduling in Flexible Manufacturing Systems Using Petri Nets,” *Int J Prod Res*, vol. 40, no. 12, pp. 2733–2756, Nov. 2002, doi: 10.1080/00207540210136496.
- [108] J. Chen and F. F. Chen, “Performance Modelling and Evaluation of Dynamic Tool Allocation in Flexible Manufacturing Systems using Coloured Petri Nets: An Object-Oriented Approach,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 21, no. 2, pp. 98–109, Jan. 2003, doi: 10.1007/s001700300012.
- [109] M. Uzam, “The Use of the Petri Net Reduction Approach for an Optimal Deadlock Prevention Policy for Flexible Manufacturing Systems,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 23, no. 3–4, pp. 204–219, Feb. 2004, doi: 10.1007/s00170-002-1526-5.
- [110] P. Buchholz, “Adaptive Decomposition and Approximation for the Analysis of Stochastic Petri Nets,” *Performance Evaluation an International Journal*, vol. 56, no. 1–4, pp. 23–52, Mar. 2004, doi: 10.1016/j.peva.2003.07.001.
- [111] S. M. Koriem, T. E. Dabbous, and W. S. El-Kilani, “A New Petri Net Modeling Technique for the Performance Analysis of Discrete Event Dynamic Systems,” *Journal of Systems and Software*, vol. 72, no. 3, pp. 335–348, Aug. 2004, doi: 10.1016/S0164-1212(03)00211-5.
- [112] D. Rodriguez, A. Zimmermann, and M. Silva, “Two Heuristics for the Improvement of a Two-Phase Optimization Method for Manufacturing Systems,” in *2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No.04CH37583)*, Nov. 2004, vol. 2, no. 2, pp. 1686–1692. doi: 10.1109/ICSMC.2004.1399874.

- [113] Z. Ding, H. Bunke, M. Schneider, and A. Kandel, "Fuzzy Timed Petri Net Definitions, Properties and Applications," *Math Comput Model*, vol. 41, no. 2–3, pp. 345–360, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.mcm.2003.02.015.
- [114] Z. Wang, J. Zhang, and F. T. S. Chan, "A Hybrid Petri Nets Model of Networked Manufacturing Systems and its Control System Architecture," *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 16, no. 1, pp. 36–52, Jan. 2005, doi: 10.1108/17410380510574077.
- [115] A. Giua, M. T. Piloni, and C. Seatzu, "Modelling and Simulation of a Bottling Plant Using Hybrid Petri Nets," *Int J Prod Res*, vol. 43, no. 7, pp. 1375–1395, Feb. 2005, doi: 10.1080/00207540412331299602.
- [116] N. G. Odrey and G. Mejia, "An Augmented Petri Net Approach for Error Recovery in Manufacturing Systems Control," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, vol. 21, no. 4–5, pp. 346–354, Aug. 2005, doi: 10.1016/j.rcim.2004.11.004.
- [117] L. Gomes and J. P. Barros, "Structuring and Composability Issues in Petri Nets Modeling," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 1, no. 2, pp. 112–123, May 2005, doi: 10.1109/TII.2005.844433.
- [118] Q. Zeng and L. Wan, "Modeling and Analysis for a Kind of Flexible Manufacturing System Involving Time Factors," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 34, no. 3–4, pp. 346–352, Sep. 2007, doi: 10.1007/s00170-006-0600-9.
- [119] J. Lee, M. Zhou, and P. Hsu, "Multiparadigm Modeling for Hybrid Dynamic Systems Using a Petri Net Framework," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics- Part A: Systems and Humans*, vol. 38, no. 2, pp. 493–498, Mar. 2008, doi: 10.1109/TSMCA.2007.914747.
- [120] F. Tüysüz and C. Kahraman, "Modeling a Flexible Manufacturing Cell Using Stochastic Petri Nets with Fuzzy Parameters," *Expert Syst Appl*, vol. 37, no. 5, pp. 3910–3920, May 2010, doi: 10.1016/j.eswa.2009.11.026.
- [121] N. Wu and M. Zhou, "Process vs. Resource Oriented Petri Net Modeling of Automated Manufacturing Systems," *Asian J Control*, vol. 12, no. 3, pp. 267–280, May 2010, doi: 10.1002/asjc.184.
- [122] X. Meng, "Modeling of Reconfigurable Manufacturing Systems Based on Colored Timed Object-Oriented Petri Nets," *J Manuf Syst*, vol. 29, no. 2–3, pp. 81–90, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.jmsy.2010.11.002.

- [123] F. Ahmad, H. Huang, and X. Wang, "Petri Net Modeling and Deadlock Analysis of Parallel Manufacturing Processes with Shared-Resources," *Journal of Systems and Software*, vol. 83, no. 4, pp. 675–688, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.jss.2009.11.705.
- [124] A. A. Pouyan, H. T. Shandiz, and S. Arastehfar, "Synthesis a Petri Net Based Control Model for a FMS Cell," *Comput Ind*, vol. 62, no. 5, pp. 501–508, Jun. 2011, doi: 10.1016/j.compind.2011.01.001.
- [125] M. Fathian, I. Nakhai Kamalabadi, M. Heydari, and H. Farughi, "A Petri Net Model for Part Sequencing and Robot Moves Sequence in a 2-Machine Robotic Cell," *Journal of Software Engineering and Applications*, vol. 4, no. 11, pp. 603–608, Jan. 2011, doi: 10.4236/jsea.2011.411071.
- [126] F. Ahmad, I. Fakhir, and S. Afzal, "Petri Net-Based Modeling and Control of the Multi-Elevator Systems," *Neural Comput Appl*, vol. 22, no. 5, pp. 1601–1612, Apr. 2013, doi: 10.1007/s00521-013-1391-1.
- [127] D. Coman and A. Ionescu, "Simulation and Performance Analysis of a FMS/CIM Using Stochastic Timed Petri Nets," *Adv Mat Res*, vol. 837, pp. 322–327, Nov. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.837.322.
- [128] H. Haleh, A. Bahari, and B. Moody, "Performance Analysis of Manufacturing Systems Using Deterministic and Stochastic Petri Nets," *Journal of Mathematics and Computer Science*, vol. 11, no. 01, pp. 1–12, Jul. 2014, doi: 10.22436/jmcs.011.01.01.
- [129] J. Julvez, M. H. Matcovschi, and O. Pastravanu, "MATLAB Tools for the Analysis of Petri Net Models," in *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*, Sep. 2014, pp. 1–12. doi: 10.1109/ETFA.2014.7005053.
- [130] H. Ullah, "A Petri Net Model for the Integration of Purchasing, Production and Packaging Using Kanban System," *Advances in Production Engineering & Management*, vol. 9, no. 4, pp. 187–200, Dec. 2014, doi: 10.14743/apem2014.4.187.
- [131] H. Kaid, A. M. El-tamimi, E. A. Nasr, S. Arabia, and S. Arabia, "Applications of Petri Nets Based Models in Manufacturing Systems: A Review," in *Proceedings of the 2015 International Conference on Operations Excellence and Service Engineering*, Sep. 2015, no. 1, pp. 516–528.

- [132] J. I. Latorre-Biel, E. Jiménez-Macías, J. Blanco-Fernández, E. Martínez-Cámara, J. C. Sáenz-Díez, and M. Pérez-Parte, “Decision Support System, Based on the Paradigm of the Petri Nets, for the Design and Operation of a Dairy Plant,” *International Journal of Food Engineering*, vol. 11, no. 6, pp. 767–776, Dec. 2015, doi: 10.1515/ijfe-2015-0063.
- [133] F. Long, P. Zeiler, and B. Bertsche, “Modelling the Production Systems in Industry 4.0 and their Availability with High-Level Petri Nets,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 12, pp. 145–150, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.07.565.
- [134] Q. Zhu, N. Wu, Y. Qiao, and M. Zhou, “Optimal Scheduling of Complex Multi-Cluster Tools Based on Timed Resource-Oriented Petri Nets,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 2096–2109, Apr. 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2549546.
- [135] Shashank Satish More and Dr. S. G. Bhatwadekar, “Analysis of Flexible Manufacturing System Using Petri Nets to Design a Deadlock Prevention Policy,” *International Journal of Engineering Research and*, vol. V5, no. 09, pp. 448–453, Sep. 2016, doi: 10.17577/IJERTV5IS090396.
- [136] X. D. Nie, X. D. Chen, and X. Chen, “Simulation Study of Flexible Manufacturing Cell Based on Token-Oriented Petri Net Model,” *International Journal of Simulation Modelling*, vol. 15, no. 3, pp. 566–576, Sep. 2016, doi: 10.2507/IJSIMM15(3)CO14.
- [137] A. Al-Ahmari and Z. Li, “Analysis of a Multimachine Flexible Manufacturing Cell Using Stochastic Petri Nets,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 11, pp. 1–9, Nov. 2016, doi: 10.1177/1687814016680168.
- [138] S. A. Shah, E. L. J. Bohez, K. Shah, I. ul Haq, K. Azam, and S. Anwar, “Colored Petri Net Model for Significant Reduction of Invariants in Flexible Manufacturing Systems,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 88, no. 5–8, pp. 1775–1787, Feb. 2017, doi: 10.1007/s00170-016-8864-1.
- [139] A. H. Taha, M. H. F. al Hazza, and E. Y. T. Adesta, “Modelling and Analysing Deadlock in Flexible Manufacturing System Using Timed Petri Net,” *International Journal of Engineering Materials and Manufacture*, vol. 2, no. 1, pp. 11–15, Mar. 2017, doi: 10.26776/ijemm.02.01.2017.02.

- [140] F. Long, P. Zeiler, and B. Bertsche, “Modelling the Flexibility of Production Systems in Industry 4.0 for Analysing their Productivity and Availability With High-Level Petri Nets,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 5680–5687, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1118.
- [141] R. Vatankhah Barenji, B. Yuksel Ozkaya, and A. Vatankhah Barenji, “Quantifying the Advantage of a Kitting System Using Petri Nets: A Case Study in Turkey, Modeling, Analysis, and Insights,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 93, no. 9–12, pp. 3677–3691, Dec. 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0430-y.
- [142] E. Simon, J. Oyekan, W. Hutabarat, A. Tiwari, and C. J. Turner, “Adapting Petri Nets to DES: Stochastic Modelling of Manufacturing Systems,” *International Journal of Simulation Modelling*, vol. 17, no. 1, pp. 5–17, Mar. 2018, doi: 10.2507/IJSIMM17(1)403.
- [143] A. Yadav and S. C. Jayswal, “Modelling of Flexible Manufacturing System: A Review,” *Int J Prod Res*, vol. 56, no. 7, pp. 2464–2487, Apr. 2018, doi: 10.1080/00207543.2017.1387302.
- [144] A. K. Maurya and A. Kumar, “Modeling Analysis and Performance Measurement of FMS Using Petri-Net,” in *International Conference on Advances and Soft Computing Applications in Design and Manufacturing*, Jun. 2018, pp. 107–112.
- [145] F. Liu and H. Zhang, “A Class of Extended Time Petri Nets for Modeling and Simulation of Discrete Event Systems,” *Simulation*, vol. 94, no. 8, pp. 753–762, Aug. 2018, doi: 10.1177/0037549717742716.
- [146] G. Cherif, E. Leclercq, and D. Lefebvre, “Modeling Hybrid Manufacturing Systems Using T-TPN with Buffers,” in *2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Sep. 2018, pp. 480–487. doi: 10.1109/ETFA.2018.8502579.
- [147] F. Capkovic, “Modelling and Control of Complex Flexible Manufacturing Systems by Means of Petri Nets,” in *2018 IEEE 18th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI)*, Nov. 2018, no. 3, pp. 000125–000130. doi: 10.1109/CINTI.2018.8928197.
- [148] R. Cao, L. Hao, F. Wang, and Q. Gao, “Modelling and Analysis of Hybrid Stochastic Timed Petri Net,” *Journal of Control and Decision*, vol. 6, no. 2, pp. 90–110, Apr. 2019, doi: 10.1080/23307706.2017.1419079.

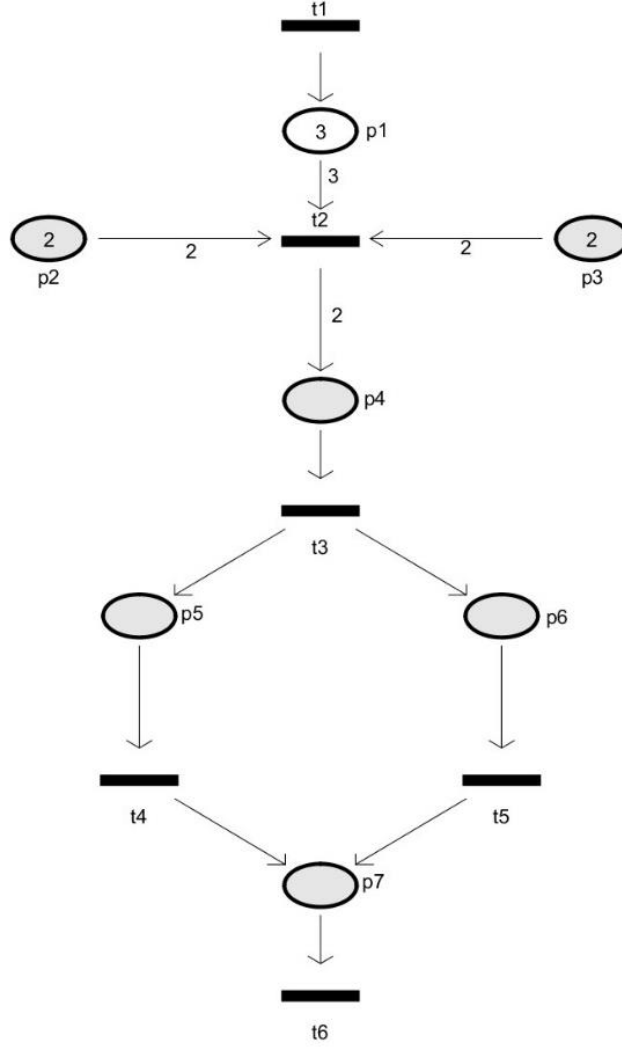
- [149] P. Wenzelburger and F. Allgöwer, “A Petri Net Modeling Framework for the Control of Flexible Manufacturing Systems,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 492–498, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.11.111.
- [150] H. Z. Nabi and T. Aized, “Modeling and Analysis of Carousel-Based Mixed-Model Flexible Manufacturing System Using Colored Petri Net,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 11, no. 12, pp. 1–14, Dec. 2019, doi: 10.1177/1687814019889740.
- [151] H. Z. Nabi and T. Aized, “Performance Evaluation Of a Carousel Configured Multiple Products Flexible Manufacturing System Using Petri Net,” *Operations Management Research*, vol. 13, no. 1–2, pp. 109–129, Jun. 2020, doi: 10.1007/s12063-020-00151-2.
- [152] V. Padma, “A Study on Flexible Manufacturing Systems Using Petri Net Reduction,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1130, no. 1, pp. 1–12, Apr. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1130/1/012060.
- [153] F. S. Blaga, A. Pop, V. Hule, and C. I. Indre, “The Efficiency of Modeling and Simulation of Manufacturing Systems Using Petri Nets,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1169, no. 1, pp. 1–27, Aug. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1169/1/012005.
- [154] V. Modgil, “Modelling and Availability Analysis of Container Manufacturing Industry with Petri Nets,” *Mater Today Proc*, vol. 56, no. SI, pp. 2730–2734, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.09.408.
- [155] W. Jiang, K. Q. Zhou, A. Sarkheyli-Hägele, and A. M. Zain, “Modeling, Reasoning, and Application of Fuzzy Petri Net Model: a Survey,” *Artif Intell Rev*, vol. 55, no. 8, pp. 6567–6605, Feb. 2022, doi: 10.1007/s10462-022-10161-0.
- [156] G. Xu and Y. Chen, “Petri-Net-Based Scheduling of Flexible Manufacturing Systems Using an Estimate Function,” *Symmetry (Basel)*, vol. 14, no. 5, May 2022, doi: 10.3390/sym14051052.
- [157] R. Davidrajuh, D. Krenczyk, and B. Skolud, “Modeling Production Systems as Modular Systems: A Petri Nets Based Approach,” in *7th International Scientific-Technical Conference on Manufacturing*, Jul. 2022, pp. 3–12. doi: 10.1007/978-3-030-99310-8_1.
- [158] B. Huang and M. Zhou, “Symbolic Scheduling of Robotic Cellular Manufacturing Systems with Timed Petri Nets,” *IEEE Transactions on Control*

Systems Technology, vol. 30, no. 5, pp. 1876–1887, Sep. 2022, doi: 10.1109/TCST.2021.3123963.

- [159] K. Fujita and T. Ushio, “Optimal Control of Colored Timed Petri Nets Under Generalized Mutual Exclusion Temporal Constraints,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 110849–110861, Oct. 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3216043.

EKLER

EK 1: ÖRNEK BİR PA İÇİN MATEMATİKSEL NOTASYONLARIN AÇIKLANMASI



Şekilde verilen PA'nın matematiksel notasyonlar kullanılarak yapılan açıklaması şöyledir :

- Konum kümesi $P = (p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7)$
- Geçiş kümesi $T = (t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6)$
- Girdi okları $I(p_1, t_2) = 3, I(p_2, t_2) = 2, I(p_3, t_2) = 2, I(p_4, t_3) = 1,$

$$I(p_5, t_4) = 1, I(p_6, t_5) = 1, I(p_7, t_6) = 1$$

$$\bullet \text{ Çıktı okları } O(p_1, t_1) = 1, O(p_4, t_2) = 2, O(p_5, t_3) = 1,$$

$$O(p_6, t_3) = 1, O(p_7, t_4) = 1, O(p_7, t_5) = 1$$

$$\bullet \text{ Girdi matrisi } [I]_{7 \times 6} = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & I_{13} & I_{14} & I_{15} & I_{16} \\ I_{21} & I_{22} & I_{23} & I_{24} & I_{25} & I_{26} \\ I_{31} & I_{32} & I_{33} & I_{34} & I_{35} & I_{36} \\ I_{41} & I_{42} & I_{43} & I_{44} & I_{45} & I_{46} \\ I_{51} & I_{52} & I_{53} & I_{54} & I_{55} & I_{56} \\ I_{61} & I_{62} & I_{63} & I_{64} & I_{65} & I_{66} \\ I_{71} & I_{72} & I_{73} & I_{74} & I_{75} & I_{76} \end{bmatrix}_{7 \times 6} = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\bullet \text{ Çıktı matrisi } [O]_{7 \times 6} = \begin{bmatrix} O_{11} & O_{12} & O_{13} & O_{14} & O_{15} & O_{16} \\ O_{21} & O_{22} & O_{23} & O_{24} & O_{25} & O_{26} \\ O_{31} & O_{32} & O_{33} & O_{34} & O_{35} & O_{36} \\ O_{41} & O_{42} & O_{43} & O_{44} & O_{45} & O_{46} \\ O_{51} & O_{52} & O_{53} & O_{54} & O_{55} & O_{56} \\ O_{61} & O_{62} & O_{63} & O_{64} & O_{65} & O_{66} \\ O_{71} & O_{72} & O_{73} & O_{74} & O_{75} & O_{76} \end{bmatrix}_{7 \times 6} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\bullet \text{ Başlangıç işaretlemesi } M_0 = (3, 2, 2, 0, 0, 0, 0)$$

