

Petri Ağları ile Demiryolu Anlaşman ve Sinyalizasyon Tasarımı

Railway Interlocking and Signalization Design by Petri Nets

M. Seçkin Durmuş¹, M. Turan Söylemez²

^{1,2}Kontrol Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
mseckin@elk.itu.edu.tr, soylemez@elk.itu.edu.tr

Özet

Raylı sistemlerde güvenli ulaşımın sağlanmasında sinyalizasyon ve anlaşman sistemleri önemli rol oynamaktadır. Bu sistemler ile sağlanan emniyet sayesinde yolların ve trenlerin ulaşımı güvenli bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bununla birlikte farklı yöntemler ile tasarımı sağlanabilen bu sistemler yapıları itibarıyla Ayrık Olay Sistemleri (AOS) olarak sınıflandırılmaktadır. AOS'nin modellenmesinde ve analizinde sıkça kullanılan yöntemlerden birisi Petri Ağları'dır. Bu çalışmada demiryolu ray bölgesi geçişi için gereken anlaşman ve sinyalizasyon işlemlerinin Petri Ağları kullanılarak modellenebileceği gösterilmiştir. Örnek bir sistem için elde edilen model PLC üzerinde gerçekleştirilerek yöntemin doğruluğu test edilmiştir. Ülkemizde hâlihazırda kullanılan demiryolu sinyalizasyon sistemlerinin büyük bölümü yurtdışından temin edilmektedir, bu çalışmada gelecekte yapılacak olan çalışmalara öncü olacaktır.

Abstract

Signalization and interlocking systems plays an important role to provide safe transportation in railway systems. The transportation of passengers and trains can be achieved safely by the security which is provided by these systems. However, different methods can be used in designing these systems and because of their structures they can be classified as Discrete Event Systems (DES). One of the most commonly used method in modeling and analysis of Discrete Event Systems are Petri Nets. In this study, it is shown that railway track interlocking and signalization operations can be modelled by Petri Nets. Obtained model is implemented on PLC to verify the accuracy of the method on a sample system. The present railway signalization systems in our country are imported from abroad, this study will be a pioneer for future works.

1. Giriş

Otomatik imalat sistemleri, haberleşme ağları, çeşitli ulaşım ve taşıma sistemleri v.b. gibi yapısında eşzamanlılık, asenkron çalışma, olay sürümlülük, belirsizlik gibi özelliklere sahip olan sistemlere Ayrık Olay Sistemleri (AOS) denilmektedir [1].

Bu tür sistemlerin karmaşıklığının giderek artması sistemlerin kontrolünün de zorlaşmasına sebep olmuş ve bu nedenle daha etkin ve formal yöntemler önem kazanmıştır. Bu yöntemler arasında Petri Ağları(PA) [2-3], Sonlu Durum

Makinesi(SDM) [4] ve grafiksel bir programlama dili olan Grafcet [5] sayılabilir.

SDM yaklaşımında, sistem karmaşıklığının artması, durumların artmasına böylece grafik çizimlerinin karmaşıklaşmasına ve anlaşılabilirliğinin azalmasına sebep olduğundan yeteri kadar pratik bir çözüm değildir.

Bunun yanı sıra PA'ndan esinlenerek ortaya çıkan Grafcet yapıları da AOS modellenmesinde kullanılmıştır. Grafcet ile eşzamanlı ve birbirini etkileyen olayların tasarımı gerçekleştirilebilmektedir [5]. Fakat her durumda sadece bir tane jeton içeren basit sistemler bu yöntem ile tanımlanabilmektedir. Bu nedenle bu yaklaşım PA kadar esnek bir yaklaşım değildir [6-7].

Bu üç yaklaşıma ek olarak, AOS modelleme, tasarım ve analizinde PA yapısı biraz daha genişletilerek Otomasyon Petri Ağları (OPA) tanımlanmıştır [8]. PA, AOS modellenmesinde SDM ve Grafcet'e göre grafik çizimlerin daha anlaşılabilir olması ve herhangi bir ara adıma gerek duyulmadan PLC ile gerçekleştirilebilir olması sebebi ile birçok uygulama alanına sahiptir [6-7-8-9-10-11-12-13].

Endüstriyel uygulamalara ek olarak demiryollarında zaman çizelgesi [13], demiryollarında meydana gelen karşılaşmaların ve istasyonlara giriş çıkışların kontrolü [14], kargo terminallerinin modellenmesi [15], hemzemin geçit kontrolü [16], gibi alanlarda da PA kullanılmıştır.

Bu çalışmada bir demiryolu ray bölgesinde bulunan makasların konumu ve bu ray bölgesindeki sinyalizasyon lambalarının kontrolü OPA ile modellenmiştir. Elde edilen bu modelden yola çıkarak literatürde anlatılmış olan yöntemler yardımıyla PLC üzerinde bir anlaşmanyazılımı gerçekleştirilmiştir.

2. Otomasyon Petri Ağları (OPA)

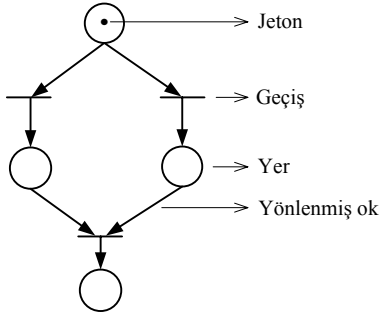
Basit bir İşaretlenmiş Petri Ağı yapısı Şekil 1'de görülmektedir ve aşağıdaki dördü ile ifade edilmektedir [8-12].

$$PA = (P, T, Pre, Post, M_0) \quad (1)$$

Burada,

- $P : \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ sonlu sayıda boş olmayan mevkiler kümesini ifade etmektedir.
- $T : \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ sonlu sayıda boş olmayan geçişler kümesini ifade etmektedir (N negatif olmayan tamsayılar kümesini göstermektedir).
- $Pre : (PxT) \rightarrow N$ yerlerden geçişlere olan yönelmiş sıradan okları tanımlayan giriş fonksiyonudur.
- $Post : (TxP) \rightarrow N$ geçişlerden yerlere olan yönelmiş sıradan okları tanımlayan çıkış fonksiyonudur.
- $M_0 : P \rightarrow N$ Başlangıç işaretlemesini ifade etmektedir.

Bu tanıma ek olarak OPA ise Şekil 2'de görülmektedir ve aşağıdaki yapı ile ifade edilmektedir.



Şekil 1: Basit Petri Ağı yapısı

$$OPA = (P, T, Pre, Post, In, En, \chi, Q, M_0) \quad (2)$$

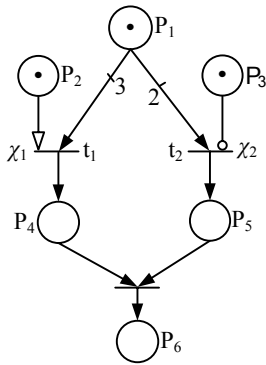
Burada, basit PA yapısına ek olarak aşağıdaki tanımlar yapılmıştır.

$In : (PxT) \rightarrow N$ yerlerden geçişlere olan yasaklama oklarını ifade eden giriş fonksiyonudur.

$En : (PxT) \rightarrow N$ yerlerden geçişlere olan yetkilendirme oklarını tanımlayan giriş fonksiyonudur.

$\chi : \{\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_m\}$ geçişlerin gerçekleşebilmesi için gerekli olan koşulları ifade etmektedir.

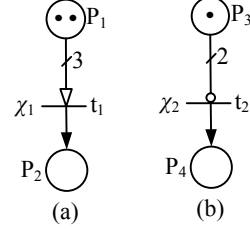
$Q : \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ yerlere atanmış olan sonlu sayıda faaliyetleri göstermektedir.



Şekil 2: Otomasyon Petri Ağı

OPA'nda sıradan yönelmiş oklara (\rightarrow) ek olarak yasaklama (\dashrightarrow) ve yetkilendirme (\dashleftarrow) okları kullanılmaktadır. Yasaklama ve yetkilendirme okları yerlerde bulunan jeton sayısına etki etmezken ilgili yer ile geçişler arasındaki geçişleri açık hale getirmekte veya yasaklamaktadır.

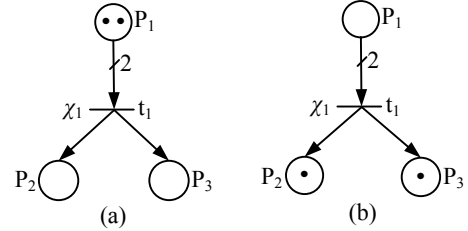
Şekil 3'de görüldüğü gibi eğer bir yer herhangi bir t geçişine yetkilendirme oku ile bağlanmış ise ilgili yerde bulunan jeton sayısı yetkilendirme oku sayısına eşit veya daha fazla olduğu durumda t geçişi açıktır. Tam tersi şekilde eğer bir yer t geçişine yasaklama oku ile bağlanmış ise ilgili yerde bulunan jeton sayısı yasaklama oku sayısından daha az olduğu durumlarda t geçişi açıktır.



Şekil 3: (a) p_1 'de bulunan jeton sayısı yetkilendirme ok sayısından daha az olduğu için t_1 geçişi kapalıdır. (b) p_3 'de bulunan jeton sayısı yasaklama ok sayısından daha az olduğu için t_2 geçişi açıktır [8].

Bir yere birden fazla faaliyet atanabilmekte ve yere jeton gelmesi ise atanmış bu faaliyetler aktif hale getirilmektedir. Bununla beraber herhangi bir t geçişinin gerçekleşebilmesi iki şarta bağlıdır. Bunlardan ilki ilgili yerden t geçişine yönelmiş sıradan ok sayısı kadar jeton bulunması, diğeri ise t geçişi ile ilişkilendirilmiş olan χ (sensörlerden gelen bilgi) geçiş koşulunun sağlanmasıdır.

Bu iki durum sağlandığında jeton bir yerden diğer yere t geçişi üzerinden geçer ve ilgili yerlerde yönlendirilmiş ok sayısı kadar jeton artırılır ve azaltılır. Bu durum ile ilgili örnek Şekil 4'de görülmektedir.



Şekil 4: Jeton geçişleri

Şekil 4(a)'da p_1 'de iki jeton ve p_1-t_1 arasında iki tane yönelmiş ok bulunduğundan t_1 geçişi açıktır. Eğer χ_1 şartı da sağlanır ise geçiş gerçekleşir ve p_1 'deki jeton sayısı iki (yönlendirilmiş ok sayısı kadar) azaltılır ve t_1 geçişine bağlı diğer durumların jeton sayıları (yönlendirilmiş ok sayısı kadar) bir artırılır. Bu durum Şekil 4(b)'de görülmektedir.

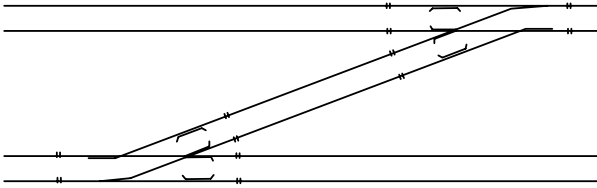
3. Demiryolu Sinyalizasyon Sistemi

Sinyalizasyon uygulamasında kullanılan başlıca öğeleri aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

3.1. S Makas

Demiryolu araçlarının diğer karayolu araçlarından önemli bir farkı da dümenlerinin olmayışıdır. Bu sebeple demiryolu araçlarının yol değiştirmeleri de yine yollar üzerine döşenen makaslar vasıtasıyla olur.

Birbirine paralel iki yoldan birinden diğerine geçişi sağlayan ve iki basit makastan oluşan yol grubuna S makas denir [17].



Şekil 5: S makas gösterimi [17]

3.2. Ray Devreleri

Trenlerin yerlerinin belirlenmesinde kullanılan elemanlardır. Yapı ve çalışma prensiplerine göre aks sayıcı, izole cebireli, hareketli blok gibi değişik çeşitleri bulunmaktadır [18].

3.3. Sinyalizasyon

Her ray bölgesi makasların başlangıcında trenlerin ilerlemesini veya durmasını sağlayan kırmızı ve yeşil ışıklar bulunmaktadır [18]. Trafik ışıklarına benzer olarak kırmızı dur yeşil ise geç komutu yerine kullanılmaktadır. Tren eğer kırmızı ışık yanmasına rağmen yoluna devam ederse otomatik olarak durdurulabilmektedir.

3.4. Anlaşman (Kilitleme)

Demiryolu trafiği ray devreleri yardımı ile Trafik Kumanda Merkezi (TKM) tarafından takip edilmektedir. TKM herhangi bir geçiş bölgesine ulaşan trenin gideceği güzergaha göre varsa makasları uygun konuma getirilir ve güzergah üzerinde bulunan ışıklar yeşil konumuna getirilerek geçişe izin verilir. Bunun dışındaki tüm geçişler yasaklanarak herhangi bir olası karşılaşma veya çarpışmanın önüne geçilmiş olur.



Şekil 6: Trafik kumanda merkezi.

Tren kendisi için tanzim edilen yolu izleyerek geçişini tamamladıktan sonra yasaklanmış bölgeler serbest hale getirilmektedir. Eğer yasaklanmış olduğu halde başka bir tren

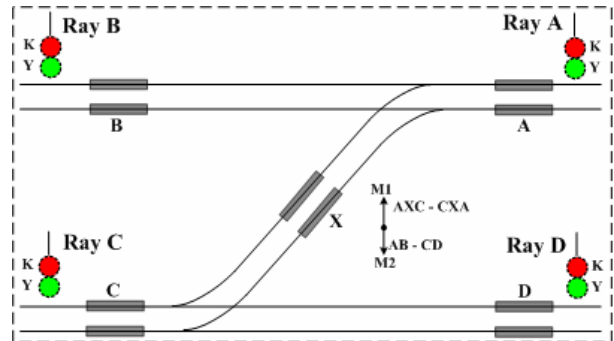
ray bölgesine girerse TKM tarafından takip edilerek otomatik olarak durdurulmaktadır [18].

4. Anlaşman ve Sinyalizasyon Tasarımı

Uygulama için Şekil 7'de görülen ray bölgesi kullanılmıştır. Senaryo olarak bu ray bölgesini dört tane trenin kullandığı varsayılmıştır. Bu trenler, A→B, C→X→A, C→D ve A→X→C yollarını kullanmaktadırlar.

Ray bölgesinde bulunan A, B, C, D ve X ray devreleri yardımı ile trenin ray bölgesine nereden geldiği belirlenmekte ve TKM'nin belirlemiş olduğu güzergaha göre tren ilgili raylardan yoluna devam etmektedir.

Şekil 7'de bulunan M1 ve M2 S-makasın konumunu belirtmektedir. Makas M1 konumunda iken paralel yollardan birinden diğerine geçiş izni verilmekte makas M2 konumunda iken bu geçişe izin verilmemektedir.



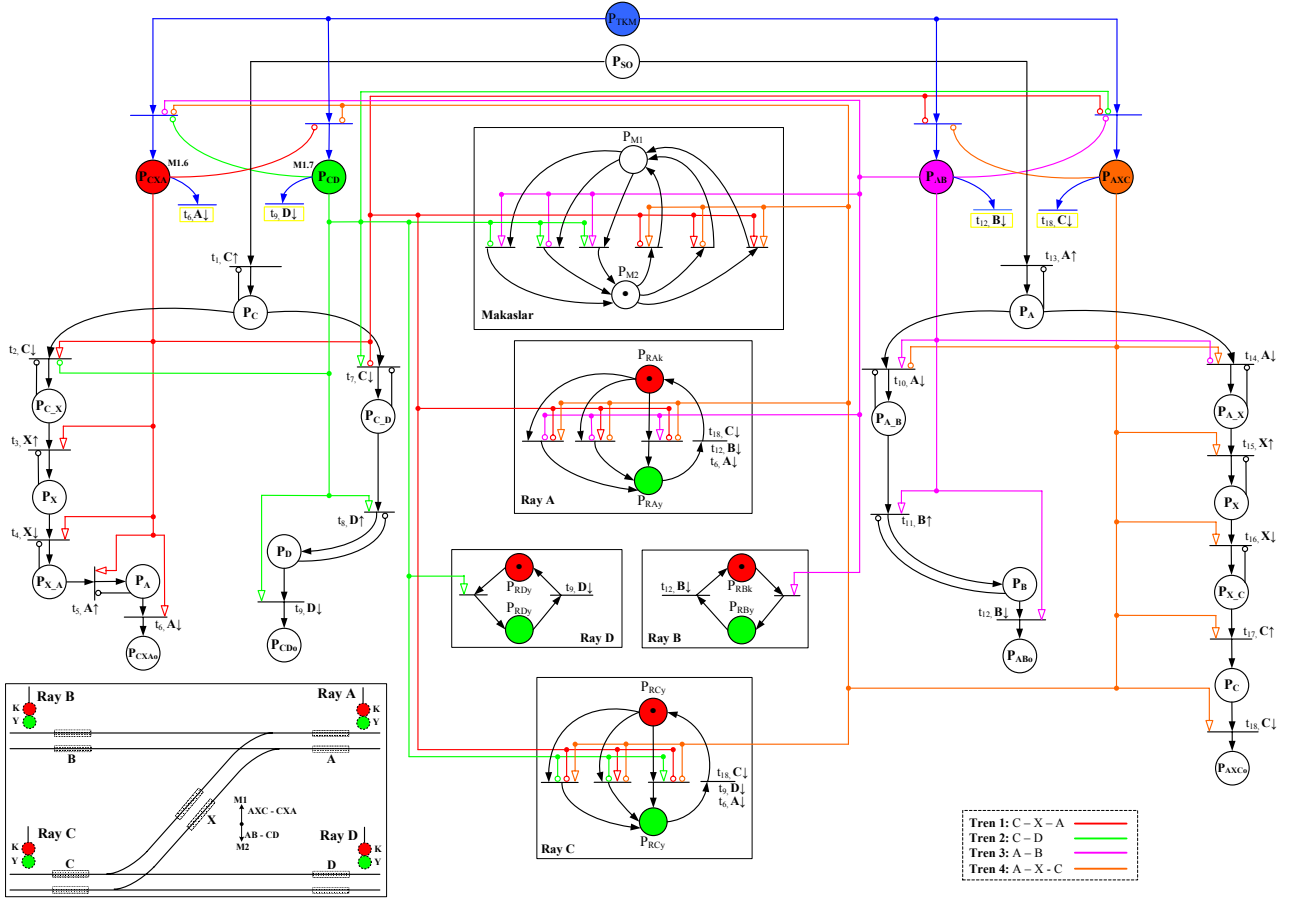
Şekil 7: Uygulama yapılan ray bölgesi.

Birbirlerinin geçişlerini etkilememesinden dolayı sadece A→B ve C→D güzergâhında hareket eden trenlerin ray bölgesine aynı anda girişlerine izin verilmektedir. Bu durumda makas M2 konumuna alınmakta ve tüm sinyalizasyon ışıkları yeşil olmaktadır. Şekil 7'de verilmiş olan bu ray bölgesi ve trenler için sinyalizasyon OPA modeli Şekil 8'de verilmiştir.

Burada her bir ray devresi için PLC S7-200 üzerinde M bellek ayrılmıştır. Trenlerin çıkış noktaları ise geçen tren sayısının tutulabilmesi amacı ile VW belleklere yazılmaktadır. Ray devrelerinden gelen yükselen kenar (↑) veya alçalan kenar (↓) bilgileri PLC girişlerine bağlanmakta ve bu girişlerden gelen bilgiler ile TKM'nin belirlemiş olduğu yol bilgileri karşılaştırılarak ilgili ışıkları yeşile çevirmekte diğerlerini kırmızıda bırakmaktadır.

Tren geçişini tamamladıktan sonra makaslar başlangıç konumuna alınarak tüm ışıklar kırmızı yapılmaktadır. Başlangıçta ray bölgesinde tren yokken tüm ışıkların kırmızıda ve makasın M2 konumunda olduğu kabul edilmiştir.

Yerler için PLC S7-200'de ayrılan bellekler ve ne amaçla kullanıldıkları Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 2'de ise PLC S7-200 için giriş ve çıkış bağlantı noktaları görülmektedir.



Şekil 8: Ray Bölgesi OPA Modeli.

Tablo 1: OPA modelinden kullanılan yerler

OPA'nda Kullanılan Yerler	Açıklama	S7-200 Bellek Alanları
Pc	Tren ilk olarak C rayında	M0.0
CXA Pc x	(CXA)Tren C - X arasında	M0.1
CXA Px	(CXA)Tren X rayında	M0.2
CXA Px a	(CXA)Tren X - A arasında	M0.3
CXA Pa	(CXA)Tren A rayında	M0.4
CD Pc d	(CD)Tren C - D arasında	M0.5
CD Pd	(CD)Tren D rayında	M0.6
Pa	Tren ilk olarak A rayında	M0.7
AB Pa b	(AB)Tren A - B arasında	M1.0
AB Pb	(AB)Tren B rayında	M1.1
AXC Pa x	(AXC)Tren A - X arasında	M1.2
AXC Px	(AXC)Tren X rayında	M1.3
AXC Px c	(AXC)Tren X - C arasında	M1.4
AXC Pc	(AXC)Tren C rayında	M1.5
openCXA	CXA yolu açıldı	M1.6
openCD	CD yolu açıldı	M1.7
openAB	AB yolu açıldı	M2.0
openAXC	AXC yolu açıldı	M2.1
makas_M1	Makas M1 konumunda	M2.2
makas_M2	Makas M2 konumunda	M2.3
Ray_A k	A kırmızı	M2.4

Ray_A y	A yeşil	M2.5
Ray_B k	B kırmızı	M2.6
Ray_B y	B yeşil	M2.7
Ray_C k	C kırmızı	M3.0
Ray_C y	C yeşil	M3.1
Ray_D k	D kırmızı	M3.2
Ray_D y	D yeşil	M3.3
Pcxa_o	CXA yolundan tren ayrıldı	VW200
Pcd_o	CD yolundan tren ayrıldı	VW202
Pab_o	AB yolundan tren ayrıldı	VW204
Paxc_o	AXC yolundan tren ayrıldı	VW206

Tablo 2: PLC bağlantıları

PLC Giriş Çıkışları	Açıklama
I0.0	Ray Devresi A
I0.1	Ray Devresi B
I0.2	Ray Devresi C
I0.3	Ray Devresi D
I0.4	Ray Devresi X
I0.5	CXA yolu açıldı
I0.6	CD yolu açıldı
I0.7	AB yolu açıldı
I1.0	AXC yolu açıldı
Q0.0	X rayı devrede
Q0.1	X rayı devre dışı

Q0.2	A lambası kırmızı
Q0.3	A lambası yeşil
Q0.4	B lambası kırmızı
Q0.5	B lambası yeşil
Q0.6	C lambası kırmızı
Q0.7	C lambası yeşil
Q1.0	D lambası kırmızı
Q1.1	D lambası yeşil

5. Sonuçlar

Bu çalışmada Otomasyon Petri Ağları kullanılarak bir demiryolu anlaşılan ve sinyalizasyon tasarımı gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir. OPA'nın Ayrık Olay Sistemlerin modellenmesine getirdiği görsellik ve kolay geliştirilebilir olmasının yanı sıra oluşturulan OPA yapısının kolayca PLC koduna dönüştürülebilmesi sebebiyle hata takibi ve farklı senaryolar için modelin genişletilmesi çok rahat bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. İleriye yönelik olarak şehir içi hafif raylı sistemler veya metro sistemlerinin güzergahları ve bu güzergahlarda bulunan sinyalizasyon sistemleri bu yöntem ile modellenerek daha rahat hata takibi ve kontrolü gerçekleştirilebilir. Yapılan testler sonucunda bu yapı kullanılarak elde edilen PLC kodunun hatasız çalıştığı değişik senaryolar üzerinde test edilerek gösterilmiştir. Verilen komut ile komutun gerçekleştirilmesi arasındaki zaman farkını da göz önüne alan daha gerçekçi durumlar için modelin geliştirilerek gerçek sistemler üzerinde denemeye hazır programların oluşturulması bundan sonra yapılması planlanan çalışmalar arasındadır.

6. Kaynakça

- [1]. Cassandras C.G. ve Lafortune S., "Introduction to Discrete Event Systems", Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [2]. Murata T., "Petri Nets: Properties, Analysis and Applications", *Proc. of IEEE*, Vol: 77, No: 4, pp. 541-580, 1989.
- [3]. Petri C.A., "Kommunikation mit Automaten Schriften des Rheinisch", Westfälischen Inst. für Instrumentelle Mathematik und der Universität Bonn, İngilizce çeviri, C.F. Green, Applied Data Research Inc., Suppl 1 to Tech report RADC-TR-65-337, NY, 1962.
- [4]. Ramadge P.J., Wonham W.M., "The Control of Discrete Event Systems", *Proc. of IEEE*, Vol: 77, No: 1, pp. 81-89, 1989.
- [5]. David R., "Grafcet: A Powerful Tool for Specification of Logic Controllers", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol: 3, No: 3, pp.253-269, 1995.
- [6]. Jones A.H., Uzam M., Khan A.H., Karımzadgan D. ve Kenway S.B., "A General Methodology for Converting Petri Nets into Ladder Logic: The TPLL Methodology", *Proc. of the 5th Int. Conference on Computer Integrated Manufacturing and Automation Technology-CIMAT'96*, 1996, pp. 357-362.
- [7]. Uzam M. ve Jones A.H., "Design of a Discrete Event Control System for a Manufacturing System Using Token Passing Ladder Logic", *Proc. of the Symposium on Discrete Events and Manufacturing Systems, CESA '96 IMACS Multiconference*, 1996, pp. 513-518.
- [8]. Uzam M. ve Jones A.H., "Discrete Event Control System Design Using Automation Petri Nets and Their Ladder Diagram Implementation", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol: 14, No: 10, pp. 716-728, 1998.
- [9]. Uzam M. ve Jones A.H., "Conversion of Petri Net Controllers for Manufacturing Systems into Ladder Logic Diagrams", *Proc. of the IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation - ETFA '96*, 1996, Vol:2, pp. 649-655.
- [10]. Zurawski R. ve Zhou M.C., "Petri Nets and Industrial Applications: A Tutorial", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol: 41, No: 6, pp. 567-583, 1994.
- [11]. Uzam M., Gelen G., Koç İ.B. ve Aksebzeci B.H., "Ayrık Olay Kontrol Sistemlerinin Petri Ağları ile Tasarımı ve Programlanabilir Lojik Denetleyicilerle Gerçekleştirilmesi", *III. Otomasyon Sempozyumu*, 2005.
- [12]. Gelen G., Aksebzeci B.H., Koç İ.B. ve Uzam M., "Basit Otomasyon Petri Ağları Kullanılarak Ayrık Olay Sistemlerin Modellenmesi", *III. Otomasyon Sempozyumu*, 2005.
- [13]. Ren X. ve Zhou M., "Tactical Scheduling of Rail Operations: A Petri Net Approach", *IEEE Int. Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 1995, pp. 3087-3092.
- [14]. Giua A. ve Seatzu C., "Supervisory Control of Railway Networks with Petri Nets", *Proc. of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, 2001, Vol: 5, pp. 5004-5009.
- [15]. Febbraro A.D., Porta G. ve Sacco N., "A Petri Net modelling approach of intermodal terminals based on Metrocargos[®] system", *Proc. of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, 2006.
- [16]. Einer S., Slovak R. ve Schneider E., "Modeling Train control systems with Petrinets - An Operational Specification", *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2000, Vol: 4, pp. 3207-3211.
- [17]. <http://www.karaca.tr.gg/>
- [18]. Söyler H. ve Açıkbaş S., "Raylı Toplu Taşımda Sinyalizasyon Sistemleri", *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi*, 2005.