

OTOMATİK YÖNLENDİRMELİ ARAÇ SİSTEMLERİNDE AKIŞ YOL TASARIMI

Yüksel TUNA* Arif DORUK* Ertan GÜNER* Tamer EREN**

*Gazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06570 Maltepe, Ankara

**Kırıkkale Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 71450 Kırıkkale

ÖZET

Otomatik yönlendirmeli araç sistemleri malzeme taşıma sistemleri içinde yüksek esnekliğe ve birçok avantajlara sahip bulunan, yük toplama/dağıtım istasyonları arasındaki yönlü rotalarda dolaşan, sürücüsüz araçlardır. Bu çalışmada malzeme taşıma sistemlerinde önemi gittikçe artan otomatik yönlendirmeli araçlar ele alınmıştır. Bu araçların tercih edilme sebepleri sürücü ihtiyacının olmaması, otomatik olarak yönlendirilebilmesi, fabrika ekipmanı ile hem mekanik hem de elektronik olarak etkileşim halinde bulunabilmesidir. Otomatik yönlendirmeli araç sistemlerinin tasarımında en iyi yol tasarımı, aracın toplam dolaşım uzaklığının en küçükleme, taşıma maliyetlerinin azaltılması, zamanın en iyi şekilde değerlendirilmesi, makine beklemelerinin azaltılması, ara stokların en küçükleme ve tam zamanında üretimin gerçekleştirilmesi bakımından önemli bir problemdir. Bu çalışmada amaç, verilen bir yerleşim planı üzerinde araçların toplam dolaşım uzaklığını en küçükleyecek en iyi akış yolunu bulmaktır. Bu amaca yönelik olarak araçların hareket yolunu belirleyen 0-1 tamsayı programlama ve kesişme grafik metotları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Otomatik yönlendirmeli araçlar, En iyi akış yolu tasarımı, Tamsayı programlama, Kesişme grafik metodu

FLOW PATH DESIGN FOR AUTOMATED GUIDED VEHICLE SYSTEMS

ABSTRACT

An automated guided vehicle systems (AGVs) is a battery-powered driverless vehicle with programming capabilities for destination, path selection, and positioning. The AGVs belongs to a class of highly flexible, intelligent and versatile material-handling systems used to transport materials from various loading locations to various unloading locations throughout the facility is able to interact with the facility equipments and machines both mechanically and electronically. To find the optimal path of AGVs ensuring the minimum total travel distance is an important problem for reducing costs and delay times of machines, using time efficiently, minimizing work-in-processes and achieving the goals of JIT system. In this study, 0-1 integer programming and intersection graph method were explained to find the path of vehicles ensuring the minimum total travel distance for a given facility layout.

KeyWords: Automated guided vehicle systems, Optimal flow path design, Integer programming, intersection graph method

1. GİRİŞ

Üretim sistemlerinde bilgisayar kontrollü makinelerin ve robot kullanımının yaygınlaşması, üretim hızının artmasını sağlamıştır. Artan üretim hızı malzeme taşıma sistemini de direkt olarak etkilemiş, iş istasyonlarının talep ettiği malzemelerin doğru zamanda ve doğru miktarda sağlanması işletmeler için önemli hale gelmiştir. İşletmelerin buldukları sektörde rekabet edebilmeleri, zamanı en iyi şekilde değerlendirmeleri ile sağlanabilmektedir. Bu amaca hizmet eden malzeme taşıma sistemlerinin başında otomatik yönlendirmeli araç (OYA) sistemi gelmektedir. Önceleri sadece depo sistemlerinde kullanılan bu

araçlar zamanla üretim alanına girerek, yarı mamullerin bir istasyondan diğer istasyona taşınmasında, ürünlerin montajlarının hareket eden bu araç üzerinde yapılmasında kullanılır hale gelmişlerdir. Ağır sanayi işletmelerinde (otomotiv, beyaz eşya vb.) malzemelerin bir yerden bir yere taşınmasında getirdiği kolaylıklar ve zaman kazancı ile önemli bir yer edinmiştir.

OYA günümüzün bir çok modern tesisinde sabit yönlü yollar boyunca otomatik olarak yönlendirilerek malzeme taşınmasında yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu araçların tercih edilmesinde en önemli sebepler; sürücü ihtiyacının olmaması, otomatik olarak yönlendirilebilmesi ve fabrika ekipmanı ile hem mekanik hem de elektronik olarak etkileşim halinde bulunabilmesidir. Günümüz sanayiinde büyük bir öneme sahip olan bu araçların etkin bir şekilde kullanılması ve zaman kayıplarının en küçük hale getirilmesi; akış yollarının en uygun şekilde düzenlenmesi, araç sayısının ve tipinin üretim tipine uygun seçilmesi ile mümkün olmaktadır (Barad and Sinriech, 1998; Blair ve diğerleri, 1987; Chang ve diğerleri 1986; Guzman ve diğerleri 1997).

OYA sisteminde en iyi akış yolunun bulunması için yapılan ilk çalışma Gaskins ve Tanchoco (1987) tarafından modellenen 0-1 tamsayı programlama metodudur. Onların modellerini kaynak olarak daha sonra çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bunların bazıları Sinriech ve Tanchoco (1991)'nin OYA yol düzenlemesi problemine alternatif bir formülasyon olarak önerdiği keşişme grafik metodudur. Bu çalışmalar optimal sonucu bulmanın yanı sıra problem boyutunun indirilmesine yönelik de olmuştur. Kaspi ve diğerleri (2002) ise aynı problemi yüklü ve yüksüz araçlar için karışık tamsayı programlama modeli ile çözmüşlerdir. Kullanılan bu modeller, her yerleşim planı için farklılık göstermektedir.

Bu çalışmada otomatik yönlendirmeli araçların iş istasyonları arasındaki dolaşım mesafesini en küçüklemek ve gereksiz hareketler ortadan kaldırmak için kullanılan yöntemler anlatılacaktır.

2. OTOMATİK YÖNLENDİRMELİ ARAÇ SİSTEMİNDE AKIŞ YOL TASARIMI

Malzeme taşıma sisteminin etkin ve verimli bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için araçların yol tasarımında iki önemli nokta vardır (Tanchoco and Sinriech, 1992):

1. Tasarım aşaması;
 - a) Yerleşim planı, akış yolu tasarımı ve toplama/dağıtım istasyonları sıfırdan oluşturulabilir.
 - b) Akış yolu tasarımı ve toplama/dağıtım istasyonları mevcut bir yerleşim planı üzerinde oluşturulabilir.
2. Amaç fonksiyonunun belirlenmesi;
 - a) Bölümler arasındaki malzeme akışını en küçük hale getirilebilir.
 - b) Otomatik yönlendirmeli araçların seyahat mesafesini veya zamanını en küçükleme yapılabilir.

Genel bir yol şebekesinde en iyi rotaları bulmak için yapılan zor hesaplamalar nedeniyle, birçok araştırmacı amaç fonksiyonu olarak yol tasarımını veya toplama/dağıtım (P/D) istasyonlarının dağıtımının belirlenmesine yönelik problemler üzerinde durmuşlardır. Eniyileme problemleri genellikle bu çalışmada açıklanan tamsayı programlama modelleri ile çözülebilir (Tanchoco and Sinriech, 1992).

2.1. Tamsayı Programlama Modeli

İlk olarak Gaskins ve Tanchoco (1987) tarafından, verilen tesis düzeni ve P/D istasyonları dikkate alınarak, yol tasarımı problemi 0-1 tamsayı programlama modeli olarak formüle edildi. Amaç, yüklü araçların toplam dolaşım uzaklığını en küçükleyecek en iyi akış yolunu bulmaktır. Gaskins ve Tanchoco (1987) tarafından gösterilen 0-1 tamsayı programlama ve dal-sınır modelini temel alarak, Kaspi ve Tanchoco (1990) OYA yol tasarımı problemine alternatif bir formülasyon önerdi. Yeni yaklaşım, P/D istasyonlarının yerleri ve tesis düzeni verilmesi şartıyla en iyi yol tasarımını belirlemektir. Keşişme grafik metodu olarak adlandırılan bu yaklaşım yol tasarımının hesaplanma zamanını azaltmıştır.

Kaspi ve Tanchoco (1990), Gaskins ve Tanchoco (1987)'nin modelini geliştirmişler ve aşağıdaki modeli kullanmışlardır. Modellerinde düğümler köşeleri, keşişmeleri ve P/D istasyonlarını, yollar ise yollar boyunca mümkün dolaşım yönlerini gösterir. Buradaki asıl amaç toplam dolaşımı en küçükleme. Modelde iki tip kısıt söz konusudur. Birincisi bir düğüme giriş varsa çıkış da vardır. İkincisi ise bir düğümden diğer düğümlere ulaşılabilir.

Model Tanımı:

Akış yolu yerleşimi probleminin esası, şebeke içerisinde her bağlantı için akış yönünün bulunmasıdır. Şebeke içerisinde toplama/dağıtım istasyonları, iş istasyonları ve ara yol kesişimleri yer almaktadır. Burada araçların ara yollar üzerinde tek yönlü olarak hareket ettiği kabul edilmiştir.

Düğümlemler toplama ve dağıtım istasyonları ile ara yol kesişim noktalarını belirtir. Yay ise bir düğümden diğer düğüme mümkün olan akış yönünü belirtir. Her yay belirli bir uzunluğa sahiptir. Toplama ve dağıtım istasyonları arasındaki akış yoğunluğu yol matrisinde gösterilmektedir.

Modelde kullanılacak parametreler şöyledir;

n : Düğüm sayısı

f_{lm} : Toplama düğümü olan l 'den dağıtım düğümü olan m 'ye akış yoğunluğu

d_{ij} : Yay'ın uzunluğu (i - j arası)

Y_{lm} : Toplama düğümü olan l ile dağıtım düğümü olan m arasındaki mesafe

$$X_{ijlm} : \begin{cases} 1 & \text{Eğer } i-j \text{ yayı; toplama düğümü olan } l \text{ ile dağıtım düğümü olan } m \text{ arasında} \\ & \text{yol üzerinde olacak ise} \\ & \text{oluşturulacak} \\ & \text{yol} \\ 0 & \text{diğer} \\ & \text{durumlar için} \\ & \text{Zij} \\ 1 & \text{Eğer yay } i' \text{ den } j' \text{ ye ise} \\ 0 & \text{diğer} \end{cases}$$

Çözüm Modeli

Tek yönlü akış yolu yerleşimi probleminin amaç fonksiyonu aracın toplam dolaşımını en küçüklemektir.

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{En küçükleme } \sum_{l,m} f_{lm} Y_{lm}$$

Kısıtlar:

$$\sum_{i,j} X_{ijlm} D_{ij} = Y_{lm} \quad \forall l,m \quad (1)$$

$$X_{ijlm} \leq Z_{ij} \quad \forall l,m \forall i,j \quad (2)$$

$$Z_{ij} + Z_{ji} \leq 1 \quad \forall i,j \quad (3)$$

$$\sum_i Z_{ij} \geq 1 \quad \forall j \quad (4)$$

$$\sum_k Z_{jk} \geq 1 \quad \forall j \quad (5)$$

$$\sum_k X_{lklm} = 1 \quad \forall l,m \quad (6)$$

$$\sum_k X_{kmlm} = 1 \quad \forall l,m \quad (7)$$

$$\sum_i X_{ijlm} = \sum_k X_{jklm} \quad \forall l,m \quad \forall j \quad (8)$$

Kısıt 1; l düğümünden m düğüme olan mesafeyi gösterir. Kısıt 2'de ise toplama noktası l 'den dağıtım noktası m 'e giderken i - j yolunu ve i 'den j 'ye yol olup olmadığı sorusunu cevaplar. Kısıt 3 ise tek yönlülük kısıtıdır. Kısıt 4, en az bir giriş olması gerektiğini ifade eder. Kısıt 5'te de bir düğümden en az bir çıkış olacağını gösterir. Kısıt 6; bir düğümden çıkarken tek bir taraftan çıkmayı belirtir. Kısıt 7'de de bir düğüme sadece bir taraftan girme olabileceğini söyler ve Kısıt 8 de giriş yaylarının çıkış yaylarına eşitliğini sağlar.

2.2. Dal-Sınır Yaklaşımı

Kaspi ve Tanchoco (1990) dal-sınır metodunu temel alarak bir yaklaşım önermişlerdir. Yeni yaklaşım, P/D istasyonlarının yerleri ve tesis düzeni verilmesi şartıyla en iyi yol tasarımını belirlemektedir. Algoritmada yol tasarımının modellenme zamanı azalmıştır.

Bu teknik 8 aşamalı gerçekleştirilmektedir. Algoritmada kullanılan üst sınır (ÜS) amaç fonksiyonunun mevcut olan en iyi değeridir. Yeni bulunan değer eskisinden daha iyi ise bulunan değer yeni ÜS olur. Alt sınır (AS) ise tüm yaylar için kısıt 2 sağlandıktan sonra elde edilen amaç fonksiyonunun en iyi değeridir.

AS dalları etiketleme içinde kullanılır. Herhangi bir zamanda AS, ÜS'den eşit veya büyükse ÜS'den bu dal kesilir. Bu yaklaşımda;

D : Yönlü yayların seti

U : Yönlü olmayan yayların seti

A : Tüm yayların kümesi. örneğin $\{U\} \cup \{D\} = A$, $\{U\} \cap \{D\} = \emptyset$

A' : Bir toplama/dağıtım düğümü ile bağlantılı tüm yayların kümesini göstermektedir.

Araştırma Prosedürü

Dal-sınır tekniği ile ilgili bir örnek aşağıda verilmiştir. Bölümsel yerleşim Şekil1(a)'da, malzeme akışı ise Tablo 1'de gösterilmiştir. Buradaki ε değeri çok küçük bir değerdir. Öyle ki her toplama/dağıtımdan diğer toplama/dağıtım istasyonuna akış vardır ve ulaşılabilir.

Adım 1: Şekil 1 (b) de düğüm-yay şebekesi gösterilmiştir. Öncelikle tüm yaylar;

$A = (1-4, 4-1, 1-5, 5-1, 2-4, 4-2, 2-5, 5-2, 3-4, 4-3, 3-5, 5-3)$

Şu anda tüm yaylar yönsüzdür. $U = A$ ve yönlü yay hiç yoktur. $D = \emptyset$ ÜS = ∞

Adım 2: Dallanma

Bir toplam/dağıtım düğümünden başlanır.

1. $Z_{ij} = 1$, $Z_{ji} = 0$ veya $Z_{ij} = 0$, $Z_{ji} = 1$
2. $U = U - (i-j, j-i)$
 $k=1$ 1.dal $Z_{14} = 1$, $Z_{41} = 0$ kabul edilir.
 $k=2$ 2.dal $Z_{14} = 0$, $Z_{41} = 1$ kabul edilir.

Adım 3: Etiketleme

İki yeni daldan her biri için akış yolu problemi çözüldü. Gerçekte bu prosedür toplama noktasından dağıtım noktasına olan en kısa yolu (Y_{lm}) araştırır. Sonra her dalın alt sınırları hesaplanır:

$$AS_k = \sum F_{lm} Y_{lm}$$

$k=1$ dalı için ($Z_{14} = 1$, $Z_{41} = 0$)

En kısa yollar: $Y_{12} = 17$, $Y_{13} = 29$, $Y_{21} = 23$, $Y_{31} = 31$, $Y_{32} = 18$ ve en düşük sınır $LB_1 = 1400$ 'dür.

$k=2$ dalı için ($Z_{14} = 0$, $Z_{41} = 1$) en düşük değer $AS_2 = 1360$ 'dir.

Adım 4: Sınır belirleme

k dalı kesilir. Eğer;

1. $AS_k > \text{ÜS}$
2. Toplama noktasından dağıtım noktasına uygun yol yoksa
3. Her hangi bir düğüm için, bu düğüm sadece giriş veya sadece çıkış varsa ya da diğer bir deyişle 4 ve 5 kısıtları ihlal ediliyorsa.

Adım 5: Dal seçimi;

İki daldan en düşük AS a sahip olan seçilir. Eğer her iki dalda sınırlı ise geri dönüş prosedürüne (adım 7 ye) geçilir.

$k = 1$ dalının AS si 1400 ve $k=2$ için AS 1360 olduğundan $k=2$ dalı seçilir. Dallanmaya bu dal üzerinden devam edilir. Her defasında elde edilen AS lar eldeki AS lar ile karşılaştırılıp o dal üzerinden devam edilir. Dallanmada hep küçük olan seçilir.

Adım 6: Üst sınır yenilemesi

2. kısıt ihlal edilmediği sürece çözüm 5 adımda bulunur. Bu çözüm akış yol tasarımı problemi için uygun çözümdür. Eğer bu çözüm amaç fonksiyonun değeri AS_k , $\bar{U}S$ dan daha az ise; burada $\bar{U}S$ amaç fonksiyonun en iyi değeridir. O zaman $\bar{U}S = AS_k$ olur.

Örneğin $\bar{U}S_{12} = 1700$ 'dür ve yayların hiç biri yön ihlalinde bulunmaz ve tüm kısıtları sağlar.

Bu yüzden uygun çözüm budur. Bu noktaya kadar, $\bar{U}S = \infty$ idi, şimdi 1700'e eşit oldu.

Adım 7: Geri dönüş

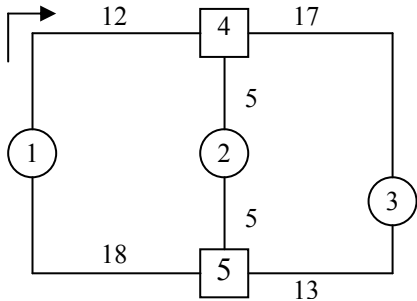
Uygun çözüme ulaşıldığı zaman veya uygun bir dal sınırlandığı zaman geri dönme işlemidir. Bunların kaynak dallarına geri dönülür ve oradan devam edilir.

Adım 8: Sona erme

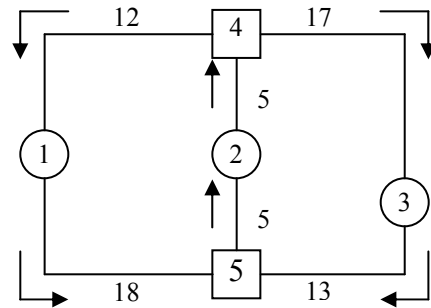
Geri dönme işlemi baştaki $k=0$ dalına gelince yani $k=1$ ve $k=2$ daha fazla devam etmiyorsa araştırma bitmiştir. Bu işlemler sonunda hala $\bar{U}S = \infty$ ise uygun çözüm yok demektir. Diğer durumda en iyi çözüm $\bar{U}S$ ye eşittir.

$K=1$ için ($Z_{14}=1$, $Z_{41}=0$) durumu için en kısa yolun bulunması

$Y_{12}=17$ $Y_{13}=29$ $Y_{32}=18$ $Y_{21}=23$ $Y_{31}=31$ Akış yoğunluğu ile çarpınca $LB_1=1400$ (Araçın istasyonlar arasındaki en küçük dolaşım mesafelerinin (Y_{lm}) değerleri, 1-4 yolunun kullanılması kısıtı altında, yukarıdaki gibidir) olur. Diğer adımlara ilişkin hesaplamalar benzer şekilde yapılmış olup, son adımda elde edilen çözüm Şekil 3 (b) de verilmiştir. Şekilde görüleceği gibi amaç fonksiyon değeri 1600 olarak bulunmuştur.



Şekil 3 (a) Dal-sınır çözümü (K=1 için)



Şekil 3 (b) Dal-sınır çözümü (K=13 için)

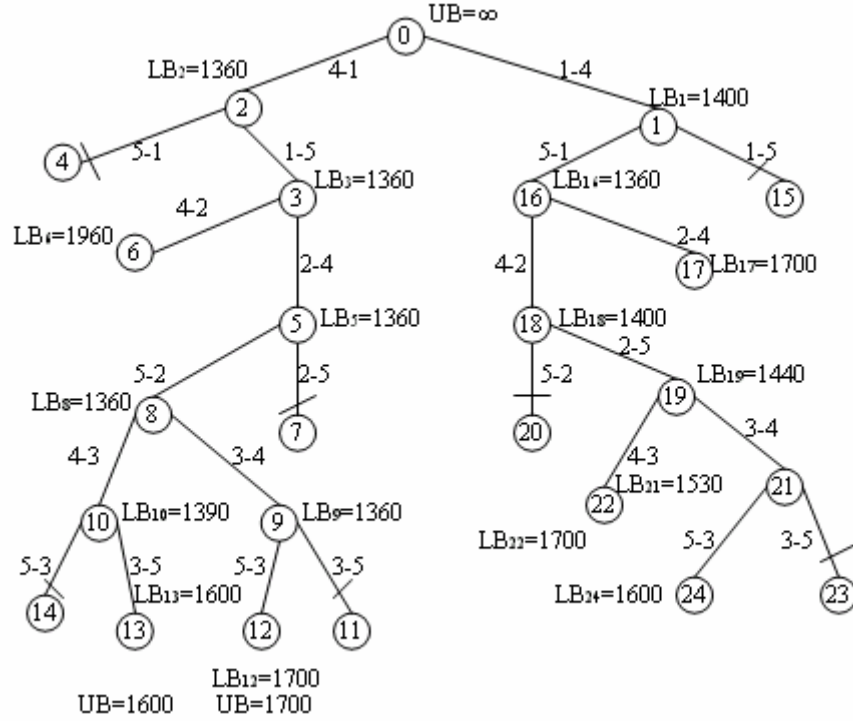
Tüm kesme işlemlerine ilişkin dal-sınır diyagramı Şekil 4'de verilmiştir. Amaç fonksiyon değeri 1600 olarak bulunmuştur. Bu çözüme ilişkin eniyi akış Şekil 2 ile aynı sonuçtur.

2.3. Kesişme Grafik Metodu

Sinriech ve Tanchoco (1991), Kaspi ve Tanchoco (1990)'nun OYA akış yolu en iyileme modelini çözmek için bir kesişme grafik metodu sunmuşlardır. Bu metod akış şebekesindeki bütün noktaların azaltılmış bir kümesini göz önünde tutan, dal- sınır tekniğine dayalı bir yöntemdir ve en iyi sonucu bulmak için sadece kesişme noktalarını dikkate alır. Bu metotta, asıl problemin dal sayısı, Kaspi ve Tanchoca (1990)'nın metodunda uygulananın sadece yarısıdır. Bu nedenle büyük yerleşim şebekelerinde kullanımı daha uygundur.

Ancak, yol şebekesindeki kesişme noktalarının kullanılması nedeniyle, algoritma bazı en iyi çözümleri kaçırabilir.

ÜS(Upper bound=UB)
AS(Lower bound=LB)



Şekil 4 dal-sınır Diyagramı

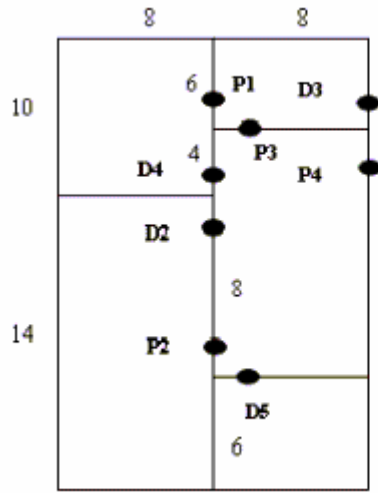
Sinriech ve Tanchoco (1991), Kaspi ve Tanchoco (1990) tarafından ele alınan akış yolu modelinin aynı kısıt ve amaç fonksiyonunu kullanmışlardır. Ancak sadece toplama ve dağıtım istasyonlarını, kesişim merkezlerine getirerek yay sayısında meydana gelen azalmadan yaralanmış ve böylece büyük yerleşim problemlerini daha kısa sürede çözüme kavuşturmuşlardır. Bu konuda aşağıda verilen uygulamaya yer verilmiştir.

Uygulama II

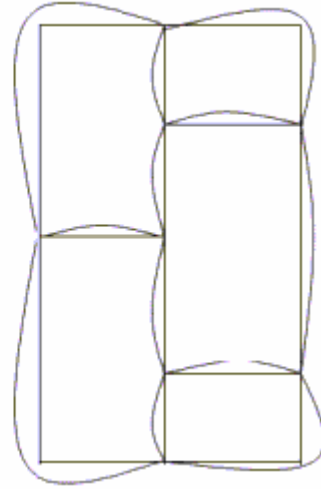
Yerleşim planı şekil 5(a)' da verilen işletme için kesişme grafik metodu kullanarak en iyi akış yolunun bulunması istenmektedir. Şekil 5(a)'da yerleşim planı ve üzerinde düğümler arası mümkün yaylar gösterilmiştir.Şekil 5(b)'de yerleşim planı üzerinde sadece kesişim noktaları ele alınarak düğümler arası mümkün yaylar gösterilmiştir. Probleme ilişkin akış matrisi ise Tablo 2'de verilmiştir.

Şekil 5(a) ve 5(b)' de görüldüğü üzere düğümler arası yay sayısı kesişme grafik metodu ile 20'den 12'ye düşürülerek tamsayı programlama modeli oluşturulmuştur. Bu indirgeme çözüm de ki kısıt sayısının azaltılmasına ve dolayısıyla çözümün kolaylaşmasına imkan sağlamıştır.

Verilen problem için oluşturulan kesişme grafik modeli HYPER LINDO/PC 6.01 programı kullanılarak Pentium 4 CPU 2.00 GHz bilgisayarda çözülmüş, Şekil 5(c)'de verilen eniyi akış yolu şebekesi elde edilmiştir.



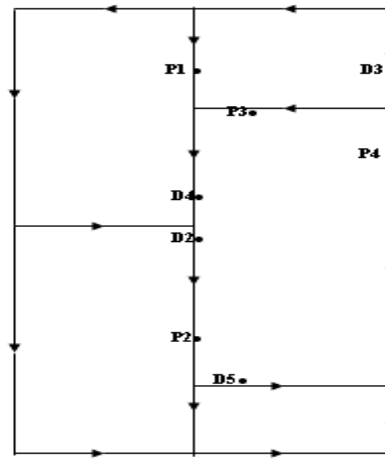
Şekil 5 (a)



Şekil 5 (b)

Tablo 2. Akış Matrisi

P-D	1	2	3	4	5
1	-	9	8	10	0
2	0	-	2	5	7
3	0	10	-	10	0
4	0	8	10	-	2
5	0	0	0	0	-



Şekil 5(c)

3. SONUÇLAR

Malzeme taşıma sistemlerinde, ekonomik ve verimli çalışmayı etkileyecek olan kısıtlara en iyi cevap veren sistem otomatik yönlendirmeli araç sistemleridir. Bu nedenle malzeme taşıması OYA'lar tarafından gerçekleştirildiğinde, malzeme akış yollarının düzenlenmesi, akış yönlerinin belirlenmesi, ekonomik bir tasarıma ulaşılması; sistemin verimli ve en az maliyet ile çalışması açısından önemlidir. Halen kullanılmakta olan ve çağın gelişen koşullarına göre ilkel sayılan taşıma araçları, malzemelerin ve ürünlerin hasara uğramasına, birçok işçinin zor koşullarda çalışmasına, zaman, enerji ve verimlilik kaybının yaşanmasına neden olmaktadır. OYAS ise gerçek zaman kontrolü, tesis işlem kolaylığı, işgücü maliyetlerinde azalma, iş çevresinin iyileşmesi, kalitenin artması, enerji maliyetlerinin ve ürün hasarlarının azalması, stok kontrolünün etkinleşmesi gibi avantajlar ve tasarruflar sağlamaktadır.

Otomatik yönlendirmeli araç sistemi (OYA) akış yol tasarımı ile aracın toplam dolaşım uzaklığı en küçüklenmekte, zaman en iyi şekilde değerlendirilmekte, makine beklemleri azalmakta, ara stoklar en küçükleme hale getirilmekte ve tam zamanında üretim gerçekleştirilebilmektedir.

Bu çalışmada otomatik yönlendirmeli araçların fabrika içindeki malzeme taşıma görevlerini yerine getirirken en uygun akış yolunun bulunması problemi dikkate alınmıştır. Amaç fonksiyonu araçların iş istasyonları arasındaki dolaşım mesafesini en küçüklemek ve gereksiz hareketler ortadan kaldırılmaktır. Bu çalışmada en

iyi akış yolunun belirlenmesinde kullanılan tamsayı programlama ve kesişme grafik metotları incelenerek, kesişme grafik metodu ile daha büyük boyutlu problemlerin çözümü eniyi çözümden küçük bir sapma ile mümkün olduğu bulunmuştur.

KAYNAKLAR

1. Barad, M. and Sinriech, D., "A Petri Net Model for The Operational Design and Analysis of Segmented Flow Topology (SFT) AGV System", **International Journal of Production Research**, Volume 36, pp. 1401-1426, 1998.
2. Blair, E. L., Charnsethikul, P. and Vasques, A., "Optimal Routing of Driverless Vehicles in a Flexible Material Handling System", **Material Flow**, Volume, 4, pp. 73-83, 1987.
3. Chang, Y. L., Sullivan, R. S. and Wilson, J. R., "Using SLAM to Design The Material System of Flexible Manufacturing System", **International Journal of Production Research**, Volume 24, pp. 15-26, 1986.
4. De Guzman, M. C., Prabhu, N. and Tanchoco, J. M. A., "Complexity of The AGV Shortest Path and Single-loop Guide Path Layout Problems", **International Journal of Production Research**, Volume 35, pp. 2083-2092, 1997.
5. Gaskins, R. J. and Tanchoco, J.M. A., "Flow Path Design for Automated Guided Vehicle Systems", **International Journal of Production Research**, Volume 25, pp. 667-676, 1987.
6. Kaspi, M., Kesselman, U., and Tanchoco, J. M. A., "Optimal Solution for The Flow Path Design Problem of a Balanced Unidirectional AGV System", **International Journal of Production Research**, Volume 40, No: 2, pp. 389-401, 2002.
7. Kaspi, M. and Tanchoco, J. M. A., "Optimal Flow Path Design of Unidirectional AGV Systems", **International Journal of Production Research**, Volume 28, pp. 1023-1030, 1990.
8. Sinriech, D. and Tanchoco, J. M. A., "Intersection Graph Method for AGV Flow Path Design", **International Journal of Production Research**, Volume 29, pp. 1725-1732, 1991.
9. Tanchoco, J. M. A. and Sinriech, D., "OSL Optimal Single-loop Guide Paths for AGVS", **International Journal of Production Research**, Volume 30, pp. 665-681, 1992.