

## EVSEL ATIK TOPLAMA AĞI TASARIMI VE GERİ KAZANIM SÜREÇLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Hande AYDIN, Deniz BAŞOĞLU, Melih DEMİREL, Ali GÜLEÇ, Ekin PALAOĞLU,

Aslı ŞİMŞEK, Bahar YETİŞ KARA\*

\*bkara@bilkent.edu.tr

Bilkent Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06800, Ankara

### ÖZET

Mevcut sistemin analizi neticesinde problem evsel atık toplama ve ayrıştırma süreçlerinin yüksek maliyetli olması olarak tanımlanmış ve bu süreçler için maliyetleri azaltacak iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca palet atölyesinin önceki yerleşiminin ayrıştırma süreçlerinin verimini olumsuz yönde etkilediği gözlemlendikten sonra firmanın isteğiyle yeni yapılacak palet atölyesi için bir yerleşim planı tasarlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda firmaya tüm problemlerin çözümüne yönelik öneriler sunulmuştur. Bu öneriler şu an uygulanmaktadır. Sunulan önerilerin uygulanması neticesinde palet atölyesi için malzemelerin dolaşma mesafelerinin ortalama %70 oranında azalması, ayrıştırma bandına eklenen teknolojik donanımlarla ayrıştırılan atık miktarının %17 oranında artması ve tasarımı bizlere ait *RotaÇiz* programı ile toplam toplama mesafesinin %42 oranında azalması beklenmektedir.

**Anahtar Sözcükler:** Evsel atık, yerleşim planı tasarımı, toplama ağı tasarımı, kapasiteli araç rotalama problemi, sezgiseller.

### RESIDENTIAL WASTE COLLECTION NETWORK DESIGN AND IMPROVEMENTS IN THE RECYCLING PROCESS

#### ABSTRACT

After the analysis of the current situation, the problem was defined as high costs in collection and separation processes and improvements are done in order to decrease these high costs. In addition to that, after the negative impact of disorder in pallet station to the separation process is observed, a new layout for the pallet station was designed. After many studies, some solutions are provided to the company. These suggested solutions are implemented in practice by the company. As a result of these applications, in the pallet station the distance materials travelled are reduced by 70%, the amount of materials separated are increased by 17% with the new mechanisms and with the program designed "*RotaÇiz*", total distance travelled by collection vehicles are decreased in average 42%.

**Keywords:** Residential waste, layout design, collection network design, capacitated vehicle routing problem, heuristics.

\* İletişim yazarı

Galatasaray Üniversitesi tarafından düzenlenen 28. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Ulusal Kongresinde Öğrenci Proje Yarışması düzenlenmiştir. Bu yarışmada birincilik ödülü kazanan çalışmayı ilgili öğretim üyesinin de katkılarıyla düzenlenmiş haliyle yayın politikası doğrultusunda yayınlıyoruz.

## 1. FİRMA TANITIMI

Sanayileşmenin hızlanması tüketimin giderek artması sebebiyle son yıllarda endüstriyel ve evsel atık miktarı giderek artmaktadır. Bu hızlı artış oluşan atıkların geri dönüştürülmesi ihtiyacını da tetiklemektedir. Benli Geri Dönüşüm, 35 yıl boyunca hurda ticaretiyle faaliyetlerini sürdürdükten sonra 2002 yılından itibaren 3.kuşak yönetim ile beraber geri dönüşüm sektöründe faaliyetlerine başlamıştır. Firma 2005 yılında müşterilerine profesyonel ve kurumsal atık yönetimi hizmetleri vermek üzere yeni yatırım kararı alarak Eskişehir Organize Sanayi Bölgesinde(EOSB) 10.848 m<sup>2</sup>lik bir alan üzerine Benli Geri Dönüşüm tesisini kurmuştur. Firma Odunpazarı Belediyesi , ÇEVKO ve Özçetin Kağıtçılık ile imzalanan sözleşmeler sonucunda 27.02.2007 tarihinde 'İleriye düşünüyoruz, geri dönüştürüyoruz' sloganı ile 'Odunpazarı Geri Kazanım' projesine başlamıştır.

## 2. PROJE TANIMI

Odunpazarı Belediyesiyle ortak yürütülen projede şu an Eskişehir Odunpazarı Belediyesine bağlı 5 mahalleden evsel atık toplanmaktadır. Benli Geri Dönüşüm'ün amacı tüm Odunpazarı Belediyesine yayılmak ve mevcut bölgeler içinde verimi arttırmaktır. Ancak evsel atık toplama süreci mevcut yöntemlerden ötürü çok maliyetli olduğundan, firmanın bu alanda zarar etmesine yol açmaktadır. Ayrıca mevcut rota tüm sokaklara erişim sağlayamamakta ve bazı bölgelerden atık toplanamamaktadır. Firma bu nedenlerden ötürü hizmet kalitesini arttırırken zararını en aza indirgeyecek bir toplama ağı tasarımına ve toplama süreçleri için bir iyileştirme çalışmasına ihtiyaç duymaktadır. Bu duruma ek olarak Benli Geri Dönüşüm tesislerine yapılan ziyaretler sırasında günlük olarak gelen evsel atığın da tamamıyla ayrıştırılmadığı gözlemlenmiştir. Toplama süreçlerinin iyileştirilmesi sonucunda tesise gelen atık miktarının artması beklenmektedir. Atık miktarında oluşacak

olası artışın karşılanabilmesi için ayrıştırma bandının kapasitesini arttıracak ve mevcut ayrıştırma süreçlerin maliyetini azaltacak bir iyileştirme çalışmasına da ihtiyaç olduğu tespit edilmiştir. Benli Geri Dönüşüm evsel atığın yanı sıra sanayiden gelen atıkları toplayıp geri kazandıran bir kuruluştur. Sanayiden toplanan paletleri ayrıştırıp geri kazandırmak, firma için önemli bir gelir kaynağıdır ve firmanın günlük iş yükünün büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Paletlerin geri kazanım süreçleri tesis içerisinde evsel atık ile ortak bir alanda gerçekleşmektedir ve paletle ilgili süreçlerin gerçekleştiği alanlar tesisi genelinde çok yer kaplamaktadır. Bu durum ayrıştırma süreçlerinde de verimsizliğe yol açmaktadır. Firma bu gözlem neticesinde paletlerin geri kazanımı için kullanılabilir alanın yarısında yeni bir yerleşke inşa etmeye karar vermiştir. Böylece firmanın da isteği doğrultusunda ayrıştırma süreçlerine müdahale etmeyecek şekilde oluşturulacak yeni bir palet atölyesinin yerleşim planını tasarlamak proje kapsamına dâhil olmuştur. Sonuç olarak proje kapsamı üç dala ayrılmıştır. Bunlar evsel atık ayrıştırma süreçlerinin iyileştirilmesi, yeni yapılacak palet atölyesi için bir yerleşim planı oluşturulması ve evsel atık toplama ağı tasarımı ve ilgili süreçlerinin iyileştirilmesidir.

## 3. SİSTEMİN GENEL ANALİZİ

Benli Geri Dönüşüm, şu an aktif olarak Odunpazarı Belediyesine bağlı 5 mahalleye ait evlerden ve evsel atık çıkaran iş merkezlerinden atık toplamaktadır. Bu evlerin ve iş merkezlerinin her birinin belirli toplama günleri vardır ve her mahalledeki tüm binalar bu günlerde evsel atığını, Benli Geri Dönüşüm'ün dağıttığı 70\*100 cm<sup>2</sup>lik poşetler içerisinde, kendi binasının önüne çıkarmaktadır. Toplama 2 küçük (1.5 ton) ve 1 büyük (2 ton) kamyon ile haftanın 6 günü yapılmaktadır. Evsel atık toplama süreçlerinde toplam 10 işçi çalışmakta, her kamyon mesai saatleri içerisinde mahalleleri 3 işçi ile gezmektedir. Firma mahallelerden çıkan atık miktarına ve Odunpazarı Belediyesinin önceden belirlediği günlere göre hangi

kamyonların hangi mahallelere ne sıklıkta gideceğine karar vermiştir. Kamyonlar kendi kapasitesini doldurduktan sonra tesise geri dñnmektedir ve eğer bir kamyon kendi rotasını tamamlamadan kapasitesini doldurursa, yeni bir kamyon toplama sñreçlerine devam etmek için tesisten ayrılmaktadır. Firma yeni başlattığı barkodlu toplama sñreçleri ile birlikte, şu an atık toplamakta olduğu 2 mahalledeki her binanın önüne barkodlu konteynır koymuştur. Bunun sayesinde toplama sırasında her binadan çıkan evsel atık miktarına dair veriler poşet bazında tutulabilmektedir. Diğer mahallelerin bilgileri ise her mahalle için tartım sonucu sahip oldukları verilerle aylık olarak tutulmaktadır.

Evsel atık bünyesinde toplanan ambalaj atıkları; cam, kağıt, plastik, naylon, metal, OPP (oriented polypropylene), kompozit ve kartondan oluşmaktadır. Kamyonlar tarafından toplanan bu atıklar, gün içerisinde kamyon geldikçe atık sahasına boşaltılmakta ve bir işçi tarafından besleme bandına yüklenerek ayrıştırma bandına çıkmaktadır. Bantta her tür malzemeyi ayrıştırmakla görevli 10 kişi çalışmaktadır. Atıklardan karton, hacminin büyük olması nedeniyle ayrıştırıldıktan sonra büyük bir konteynırda tutulmakta ve kağıt, hiçbir işçi tarafından toplanmayan tek atık olarak bandın sonuna yerleştirilen bir başka konteynıra akmaktadır. Kağıt ve karton haricindeki atıklar bantta türlerine göre ayrıştırıldıktan sonra çuvallara yerleştirilir ve geri kazandırılmak üzere fabrika içinde başka istasyonlara veya başka kuruluşlara gönderilir.

Evsel atığa ek olarak EOSB'de yer alan kuruluşlardan da atık toplanmaktadır. Tahta paletler, çeşitliliği, geri kazanım için çok fazla operasyon gerektirmesi ve firma için önemli bir gelir kaynağı olması nedeniyle sanayi atıkları arasında en önemli yeri tutan atık türüdür. Firma kullanılmış paletleri alarak hasar durumuna göre ayrıştırdıktan sonra, bu paletleri tamir ederek veya kullanılabilir durumda olan malzemeleri ayırarak yeniden palet üretmekte, ürettiği

paletleri tekrardan sanayi kuruluşlarına satmaktadır. Ayrıca kullanılmayacak durumda olanları da parçaladıktan sonra odun olarak satmaktadır. Raporun devamında proje kapsamında yapılanlar her dal için ayrı bir başlık altında detaylı olarak anlatılacaktır. İlk olarak evsel atık ayrıştırma sñreçlerinin iyileştirmesi başlığı altında yapılanlar anlatıldıktan sonra yeni palet atölyesi için yerleşim planı tasarlanması alanında yapılanlar hakkında bilgi verilecektir. Sonrasında da toplama ağının tasarımı ve toplama sñreçlerinin iyileştirilmesi ile ilgili çalışmalar anlatılacak ve raporun bitiminde tüm dalları kapsayan genel bir değerlendirme yapılacaktır.

## **4. EVSEL ATIK AYRIŞTIRMA SÜREÇLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

### **4.1. Problem Tanımı ve Analiz**

Sñreç üzerinde yapılan incelemelerde ilk olarak günlük gelen atığın ayrıştırılmadığı ve bunun stok alanında birikmeye yol ağtığı görñlmüřtür. İkinci olarak, kartonun düzensiz stoklama nedeniyle banda tekrar çıktığı, hacminin büyüklüğu nedeniyle de bant üstünde karton dışındaki malzemeleri ayırmakla görevli işçilerin performansını düşürdüğu gözlenmiştir. Daha detaylı yapılan incelemelerde, poşet içerisinde gelen atığın banda giren toplam atığa oranının %50 olduğu görñlmüřtür. Bant üzerinde poşet açmakla yükümlü ilk personel hem poşet patlatmakta hem de kendi malzemesini ayrıştırmakta sorun yaşamaktadır. Bu durum aynı zamanda atığın bant üstünde homojen olmayan şekilde dağılmasına yol açmakta, bu sebeple işçilerin performansını düşürmekte ve bandın sık durmasına neden olmaktadır. Yapılan analizler ve firmadan alınan veriler neticesinde problem, ayrıştırma bandının kapasitesinin verimli kullanılmaması olarak tanımlanmış ve buna temel neden olarak bandın çok fazla insan gücüne dayalı çalışması gösterilmiştir. Ayrıca ayrıştırma sñreçlerinin maliyeti de çok fazladır. İş akışlarının ve bandın yerleşiminin (Ek 1.1) çıkarılmasından sonra, Arena

programıyla mevcut sistem için bir benzetim modeli oluşturulmuştur. Haftalık ayrıştırılan atık miktarları belirlenmiş ve bandın günde ortalama 82 dakika durduğu gözlemlenmiştir.

Probleme çözüm önerileri getirme aşamasında ilk olarak benzer bir kuruluş olarak Ankara'da hizmet veren Simat Geri Dönüşüm Fabrikası ziyaret edilmiştir. Daha sonra ODTÜ Çevre Mühendisliğiyle yapılan görüşmeler neticesinde alınan Tchobanoglous'un 'Kati Atık Mühendisliği' (1993) ve Vesilind'in 'Kati Atık Yönetimi' (2001) kitapları incelenmiştir.

#### 4.2. Önerilen Yöntem

Süreç için yapılan problem tanımından sonra problemi çözmek adına uygulanacak genel yaklaşımın insan gücüne bağlılığı mümkün olduğunca azaltmak olması gerektiğine karar verilmiştir. Yapılan literatür taramaları neticesinde, bu yaklaşımın uygulanmasını sağlayacak bir takım çözüm önerileri bulunmuş, bu önerilerin bir arada ve ayrı hallerde uygunluğu

- atığın poşette gelmesinin önlenmesi, atığın bant üstüne homojen olarak dökülmesinin sağlanması
- Bandın sonuna hava püskürtme (air blower) mekanizması ekleyerek, kâğıttan başka bir malzemenin daha bandın sonunda ayrıştırılması, bu malzemeyi ayrıştıran işçinin elenmesi

Sunulan bütün önerilerin performanslarının ölçülmesi ve sisteme uyumlu olup olmadığının görülmesi için her bir öneri benzetim modeli üzerinde ayrı ayrı test edilmiştir. Yapılan maliyet analizleri neticesinde de elekli tambur yatırımının 4 ay, hava püskürtme mekanizması yatırımının da 3 ay içerisinde maliyetini karşılamakta olduğu ve sonraki aylarda firmayı kâra geçirmesinin beklendiği ortaya çıkmıştır. Yapılacak bu yatırımlar sayesinde iş yükünün azalması neticesinde bandın daha yüksek bir verimi daha az işçiyle yakalaması ve bu sayede maliyetin de azalması beklenmektedir. Benzetim ve maliyet analizleri sonucunda elde edilen çıktılar Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Benzetim ve Maliyet Analizi Çıktıları

Yatırım türü	Bir ayda bant durma süresinde azalma (dk)	Durma süresinde azalma (%)	Ayrıştırılan atık miktarında artış	Kâr (YTL)	Maliyet azalma (YTL)
Kartonun banda sokulmaması	638	%32	6472	1054	2000
Elekli tambur yatırımı	1348	%68	12924	2106	1000
Hava püskürtücü yatırımı	812	%58	9780	1594	1000

farklı senaryolar üzerinden benzetim modelinde test edilmiştir. Tüm çalışmalar sonucunda geliştirilen çözüm önerileri şunlardır:

- Beslemeyi dışardan yaparak, beslemeyi yapan çalışanla birlikte kartonu banda çıkmadan ayıracak ikinci bir işçinin bulunması
- Besleme bandının ayrıştırma bandına döküldüğü yere elekli tambur yerleştirerek ayrıştırma operasyonunun verimsiz olmasına sebep olan

#### 4.3. Sonuç Analizi ve Uygulama

Elekli tambur ile hava püskürtme mekanizmasının birlikte alınması ve kartonun bantta ayrıştırılmaması alternatiflerinin bir arada uygulanması halinde beklenen çıktılar benzetim modeli üzerinden hesaplanıp mevcut sisteminki ile karşılaştırıldığında ortaya çıkan sonuç Tablo 2'de görülmektedir.

**Tablo 2.** Ayrıştırma Bandında Mevcut ve Yeni Durum Karşılaştırması

	Ayda ayrıştırılan atık miktarı	Hat durma süresi	Kâr (YTL)	Sistemde çalışan işçi sayısı	Maliyet azalma (YTL)
Mevcut durum	69184	1976 dk/ay		11	
Yeni Durum	81176	532 dk/ay	4741	7	4000
Fark	<b>%17 artış</b>	<b>%73 azalma</b>			

Firma üç öneriyi de uygulamakta karar kılmıştır. Bu karar sonrasında elektrikli tambur ve hava püskürtme mekanizmaları yapılan literatür taramaları neticesinde tasarlanmış, ayrıştırma bandının yeni yerleşim planı oluşturulmuş (Ek 1.2) ve firmaya sunulmuştur. Ayrıca oluşabilecek değişik sonuçlar için benzetim modeli üzerinden senaryo ve maliyet analizi yapılmıştır (Ek 2). Firmadan alınan geri bildirimlere göre, ayrıştırma ile ilgili süreçlerde yapılan iyileştirmeler sorunsuz işlemektedir.

## 5. YENİ PALET ATÖLYESİ İÇİN YERLEŞİM PLANI

### 5.1. Problem Tanımı ve Analiz

Benli Geri Dönüşüm Tesisleri'ne yapılan ziyaretlerde palet geri kazanımı ile ilgili süreçlerin incelenmesi sonucunda; makine ve malzeme ara stok alanlarının, iş akışları ve operasyon sıraları göz önünde bulundurulmadan belirlendiği görülmüş bunun insan gücü ve makinelerin verimsiz kullanımına yol açtığı gözlenmiştir. Mevcut sisteme ait verilerin toplanması ve analiz edilmesinden sonra problem, makine ve malzeme ara stok alanlarının, iş akışları ve operasyon sıraları göz önünde bulundurulmadan belirlenmesinden ötürü malzemelerin fabrika içinde çok fazla dolaşması ve fabrika içerisinde düzensiz trafik akışı olarak tanımlanmıştır. Yapılan bu gözlemlerin geçerliliğini sınamak için ilk olarak mevcut sistemin yerleşim planı, daha sonra da tüm palet türleri için iş akışları çıkarılmıştır. Analizin doğruluğu, iş akışlarının takibiyle belirlenen malzeme akışlarının mevcut yerleşim planı üzerinde gösterilmesiyle ve literatür taramasıyla (Francis vd., 1991) desteklenmiştir.

### 5.2. Önerilen Yöntem

Yapılan problem tanımı neticesinde, çözüm için önerilecek yaklaşım, yeni yapılacak palet atölyesi için malzemelerin fabrika içinde dolaştığı mesafeleri azaltan, aynı zamanda fabrika içindeki trafiği düzenlerken makine ve insan gücünün de verimli kullanımını sağlayan bir yerleşim planı hazırlamak olarak tanımlanmıştır. Yeni yerleşim planı hazırlanırken birincil olarak malzeme akışı göz önüne alınacağından paletler hasar durumlarına göre hasarsız, az hasarlı, çok hasarlı ve hurda olmak üzere 4 gruba ayrılmış ve her gruptan çıkan malzemelerin çıkma yoğunlukları 'out-tree' yapısı diyagramları kullanılarak belirlenmiştir (Ek 3). Malzemelerin izledikleri yolların takip edilmesi, makinelerin lokasyonlarının belirlenmesi ve out-tree structure diyagramları sonucunda çıkan yoğunluklara göre mevcut yerleşim planı üzerinde malzemelerin akışı gösterilmiş, malzemelerin fabrikada dolaşma mesafeleri belirlenmiştir (Ek 4.1).

'Rank Order' Sınıflandırması çalışması neticesinde hücreyel yerleşimin bu problem için uygun olmayacağına karar verilmiş ancak hangi makinelerin birbirine yakın durması gerektiğinin tespiti mümkün olmuştur. Hangi makinelerin birbirine yakın durması gerektiğinin tespitinden sonra alternatif yerleşim planları oluşturulmuş, bu planlar malzemelerin fabrika içinde dolaşma mesafeleri göz önünde bulundurularak karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar neticesinde tüm alternatifler arasından en az dolaşma mesafesini veren planın firmaya sunulmasına karar verilmiştir.

### 5.3. Sonuç Analizi ve Uygulama

Firma yetkilileriyle yapılan görüşmeler neticesinde yerleşim planı atölye kısıtları da göz önünde bulundurularak uygulamaya konmak üzere son halini almıştır (Ek 4.2). Tablo 3’de uygulanmakta olan yerleşim planı ile eski yerleşim planının karşılaştırması görülmektedir.

**Tablo 3.** Mevcut ve Yeni Yerleşim Planı Karşılaştırması

	Tahta	Odun	Bel Palet
Eski yerleşim planında malzemenin dolaşma mesafesi(m)	361,4	154,9	67
Yeni yerleşim planında malzemenin dolaşma mesafesi(m)	47	47	22
Sonuç	%87 azalma	%70 azalma	%68 azalma

Belirlenen yerleşim planı Şubat 2008 itibarıyla yeni atölyenin inşasından sonra uygulanmaya konmuştur. Firmadan alınan geri bildirimlere göre, palet geri kazanımıyla ilgili süreçler yeni yerleşim planında sorunsuz işlemektedir. Yeni sunulan yerleşim planının daha verimli çalışabilmesi, palet üretiminin bir plan dahilinde yapılması ile mümkün olacaktır.

## 6. EVSEL ATIK TOPLAMA AĞI TASARIMI VE TOPLAMA SÜREÇLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

### 6.1. Problem Tanımı ve Analiz

Süreç üzerinde yapılan incelemeler sonucunda kamyonların haftalık toplama zaman çizelgelerinin, firma sisteme yeni toplama noktaları ekledikçe, belirli bilimsel verilere dayandırılmadan oluşturulduğu görülmüştür. Bu zaman çizelgeleri doğrultusunda her kamyonun gideceği rota, kamyon şoförünün kendisi tarafından belirlenmektedir. Mevcut toplama ağının takibi sonucunda toplama lojistiğinin yetersiz kaldığı görülmüş, iş gücü, mazot ve zamanın verimsiz kullanımından dolayı sürecin yüksek maliyetli olduğu

gözlenmiştir. Bütün bu problemlerden dolayı, mevcut sistemde toplama süreçlerinin maliyetini azaltacak bir rotalama çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Sistemin çok değişkenli ve de birden çok parametreye sahip olmasından dolayı literatür taramaları ve internet araştırmaları uygulanabilirlik, hız ve kesinlik kısıtları göz önünde bulundurularak yapılmıştır.

### 6.2. Önerilen Yöntem

Yapılan literatür taramaları sonucunda, mevcut sisteme en iyi rotayı çıkarabilecek algoritmanın Eiselt vd. (1995) Amponsah vd. (2004) ve Vittorio’ya (2004) ait Kapasiteli Yol Rotalama Problemi olduğu görülmüştür (Ek 5.1). Mevcut rotaların takibiyle ilk olarak, algoritmanın ihtiyaç duyduğu verilerden biri olan sokakların yönlerinin ve girilebilirliğinin belirlenmesi için her sokak teker teker gezilerek bilgiler toplanmıştır. Sonrasında bölgelerin demografik ve sosyoekonomik durumları göz önünde bulundurularak her bir sokaktan çıkacak tahmini atık miktarları da saptanmıştır.

Ancak Kapasiteli Yol Rotalama Problemi’nin sezgisel çözüm yöntemleri yetersizdir ve bu yöntemlerin uygulanması çok zordur. Bu nedenle hem mevcut modele uygun hem de uygulaması daha kolay olan ve Kapasiteli Yol Rotalama Problemi’ne benzetilebilen Kapasiteli Araç Rotalama Problemi’nin problemi çözen algoritma olarak kullanılmasına karar verilmiştir (Ek 5.2). Kapasiteli Araç Rotalama Problemi dağıtımın belirli taşıma kapasitesi olan araçlar tarafından yapıldığı bir tümeleşik optimizasyon problemidir ve amaç

dağıtım maliyetini en aza indirmektedir. Bu problem için literatürde pek çok çözüm yöntemi geliştirildiği ancak bu yöntemlerin sadece düşük düğüm sayıları için çabuk ve iyi sonuçlar verdiği görülmüştür (Dantzig vd., 1959; Cordeau vd., 2002).

Bunun neticesinde Kapasiteli Araç Rotalama Problemi'nin sezgisel yöntemleri araştırılmış ve bunlardan biri olan Clarke&Wright sezgiselinin kullanılması uygun görülmüştür. Bu sezgiselin seçilmesindeki temel neden, problemin tüm kısıtlarına uygun olması, kısa zamanda sonuç vermesi ve en iyi çözüme çok yakın bir sonuç veriyor olmasıdır. Clarke&Wright sezgiselinin uygulanması sonucunda çıkan çözümü daha iyi bir değere çıkarmak için 3-Opt iyileştirme sezgiselinin de uygulanması öngörülmüştür (Clarke ve Wright, 1964; Cordeau vd., 2002; Silver, 2004). Bu sezgisellerin performansının test edilmesi için Kapasiteli Araç Rotalama Problemi ilk olarak Kurtuluş mahallesinin bir bölümüne belirlenen verilerle Xpress-MP optimizasyon programı kullanılarak uygulanmış ve uygulama 2 saat 43 dakikada çözüm vermiştir. Belirlenen sezgisel yöntemlerin modele uygulanmasından sonra da, Kapasiteli Araç Rotalama Problemi'nin en iyi sonucundan %2.8'lik sapması olan bir mesafeye sahip bir rota elde edilmiştir.

Geri Dönüşüm Projesine yeni mahallelerin katılacak olmasından dolayı, firmanın yeni rota tasarımları yapabilmesi, mevcut rotaları görebilmesi ve de bu rotalar üzerinde değişiklikler yapabilmesi için kullanımı kolay bir ara yüze ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyaç doğrultusunda, mevcut sisteme özgü algoritmanın kullanıcı için kullanımının kolay olması esas alınarak, Java yazılım programında ara yüzü de içeren bir program yazılmış ve 'RotaÇiz' olarak adlandırılmıştır. RotaÇiz programının kullanıcı ara yüzü oluşturulurken girilecek verilerin ulaşılabilir olmasına, veri girişinin kolay olmasına, birçok kısıta adapte edilebilecek olmasına ve çıkan sonuçların analizinin kolay olmasına özen gösterilmiştir.

### 6.3. RotaÇiz

RotaÇiz, Benli Geri Dönüşüm'ün Odunpazarı Belediyesi ve ÇEVKO ile yürüttüğü geri kazanım projesi için hazırlanmış bir programdır ancak benzer ihtiyaçları olan başka sistemler için de kullanılabilir. Programın temel girdisi bölgenin haritasıdır. İlk olarak, programın içerisinde bir proje başlatıldıktan sonra kullanılacak haritanın seçilmesi ve harita ölçeğine göre piksel metre oranının girilmesi gerekmektedir. Daha sonra deponun yeri harita üzerinde belirlenmelidir. Programın bir diğer girdisi harita üzerindeki toplama veya dağıtım noktalarıdır. Bu noktalar harita üzerinde belirlenmeli ve yerleştirilirken önceden belirlenmiş olan her noktadan çıkacak tahmini atık miktarları da beraberinde girilmelidir. Sonrasında bu noktalar arasındaki yollar tanımlanmalıdır.

Programın girdilerinden bir diğeri de toplama veya dağıtım araçlarının taşıma kapasitesidir. Atıkların hacmiyle ağırlığı arasındaki ilişki değişkenlik gösterdiği için toplanan atık miktarı ve kamyonun kapasitesi bu proje için poşet cinsinden belirlenmiştir. Harita üzerinde toplama noktaları ve atık miktarlarının belirlenmesinden sonra araçların kapasiteleri de belirlenerek program çalıştırılmalıdır. Program araç kapasitesinin dolduğu noktaya kadarki rotayı tamamladıktan sonra geri kalan toplama noktalarını ikinci bir araç kullanarak tamamlamaktadır. Kullanılacak araç sayısı da program çıktılarından bir tanesidir.

RotaÇiz programı toplama noktalarına ulaşımı daha az maliyetli hale getirmek amacıyla önce Clarke&Wright yapılandırma sezgiselini kullanarak en iyi çözüme en yakın sonuçlardan birini veren bir rota çıkarmakta ve bu rotayı 3-Opt iyileştirme sezgiselini kullanarak daha da iyileştirmektedir (Ek 6). Program toplama noktaları arasındaki geçiş sırasını belirledikten sonra bu sıra üzerinden haritadaki gerçek yolları kullanarak bir rota çizmektedir.

#### 6.4. Sonuç Analizi ve Uygulama

*RotaÇiz* programının ve oluşturulan algoritmanın sonuçlarının doğrulanması için, programda ilk olarak Kurtuluş mahallesinin verileri uygulanmıştır. Kurtuluş mahallesinin seçilmesinin nedeni bu bölgenin şehrin genel özelliklerini en iyi yansıtan bölge olmasıdır. Bunun sonucunda eskiden mahalle içinde 17 km mesafe gidilirken, *RotaÇiz* programı sayesinde 9 km mesafe gidilmektedir. Bu da %47'lik bir kazanım demektir. Uygulama sayesinde, oluşturulan sezgiselin performansının geçerli olduğu görülmüş, diğer mahalleler için de uygulanmasına karar verilmiştir. Ayrıca, *RotaÇiz* programının değişik senaryolar altında ne kadar verimle çalıştığını ölçmek için program değişik senaryolar altında test edilmiştir. Bu senaryo çalışması, farklı atık miktarlarının veya kamyon kapasitesinin değiştirilmesi ile yapılmıştır. Bu çalışmada amaç, o bölgeye küçük veya sokağa erişimi mümkünse büyük kamyon için ortaya çıkan rota farklarının gözlenmesi olarak belirlenmiştir. Toplama esnasında atık miktarının kapasiteyi aştığı durumlar da analiz edilmiştir. Bu çalışma sonucunda, programın çıktılarında biri olan, belirlenen bölge için kullanılacak kamyon sayısı da elde edilmiştir.

Yapılan performans ölçümü ve duyarlılık analizleri sonucunda oluşturulan algoritmanın ve de *RotaÇiz* programının uygulanabilir olduğu görülmüştür. Bunun sonucunda, *RotaÇiz* programı her mahalle için belirlenen ve toplanan veriler ve kısıtlar doğrultusunda uygulanmıştır. Uygulamaların sonucunda, eski ve yeni rota mesafeleri Tablo 4'de gösterilmektedir.

*RotaÇiz* programı ile elde edilen rotalar, Benli Geri Dönüşüm firmasına sunulmuştur. Firma önerilen

rotaları uygun görmüş ve de her birini uygulamaya başlayacağını söylemiştir. Bu aşamadan sonra, firmanın atık toplama frekanslarının uygulamasında verimi arttırması beklenmektedir.

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 7.1. Projenin Firmaya Olan Katkıları

Evsel atık ayrıştırma süreçleri için problemin kapsamı, sistemin insan gücüne dayalı olması nedeniyle bant kapasitesinin verimsiz kullanımı ve yüksek maliyet olarak tanımlanmıştır. Önerilen yöntem bilim neticesinde ayrıştırma işlemine eklenecek teknik donanımlarla ayrıştırılan atık miktarında yıllık ortalama %17 artış, maliyelerde %15 oranında azalma beklenmektedir. Ayrıca beslemenin dışarıdan yapılması ile fabrika içerisinde düzen sağlanmış ve bu alanda yapılan tüm çalışmalar sayesinde iş yükünün azalması, daha az işçiye ihtiyaç duyulması ve işçilerin performansını artması mümkün kılınmıştır.

Yeni palet atölyesinin tasarımı için problem, malzemelerin fabrika içerisinde çok fazla dolaşması ve düzensiz trafik olarak gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, hiçbir ek yatırıma ihtiyaç duymadan trafiği düzenlerken, malzemelerin akış mesafesini ortalama %70 oranında azaltan bir yerleşim planı firmaya sunulmuştur. Bu planın uygulanması neticesinde verimli alan, işçi ve makine kullanımı mümkün olmuş, iş yükünün azalması neticesinde daha az işçiyle daha yüksek bir üretim hızı yakalanmıştır.

Evsel atık toplama süreçleri için problem, plansız rotalama nedeniyle sürecin yüksek maliyetli

**Tablo 4.** Eski ve Yeni Rota Mesafeleri Karşılaştırması

	Eski rotada alınan mesafe (km)	Yeni rotada alınan mesafe (km)	Fark
Kurtuluş	17	9	<b>% 47 azalma</b>
Üniversite Evleri	5,5	3,7	<b>% 31 azalma</b>
Çankaya	11,8	5	<b>% 50 azalma</b>
Yenikent	14,7	10,7	<b>% 38 azalma</b>



olması olarak tanımlanmıştır. Önerilen yöntem bilim neticesinde planlı ve verimli bir rota edilmesini sağlayan *RotaÇiz* programı hazırlanmıştır. Program sayesinde şu an sistemde mevcut mahalleler için toplama mesafesinde %42'lik azalma gözlemlenmiştir. *RotaÇiz* kullanımı kolay, yeni mahallelerin de sisteme eklenmesini mümkün kılan ve benzer sistemlere adapte edilebilecek bir programdır. Dolayısıyla gereken veriler toplandıktan sonra başka projeler içinde kullanılabilir.

Yapılan tüm çalışmalar neticesinde proje kapsamını oluşturan üç dal için iyileştirme önerileri firmaya sunulmuştur. Sunulan tüm öneriler, farklı koşullar altında oluşması muhtemel senaryolar için test edilmiştir. Sonuç olarak üç dal içinde sistem iyileştirmesine yönelik yapılacak tüm yatırımların firmaya her durumda fayda sağladığı görülmüştür. Firma sunulan önerileri değerlendirdikten sonra tümünü uygulamaya koymuştur.

## 7.2. Projenin Topluma Olan Katkıları

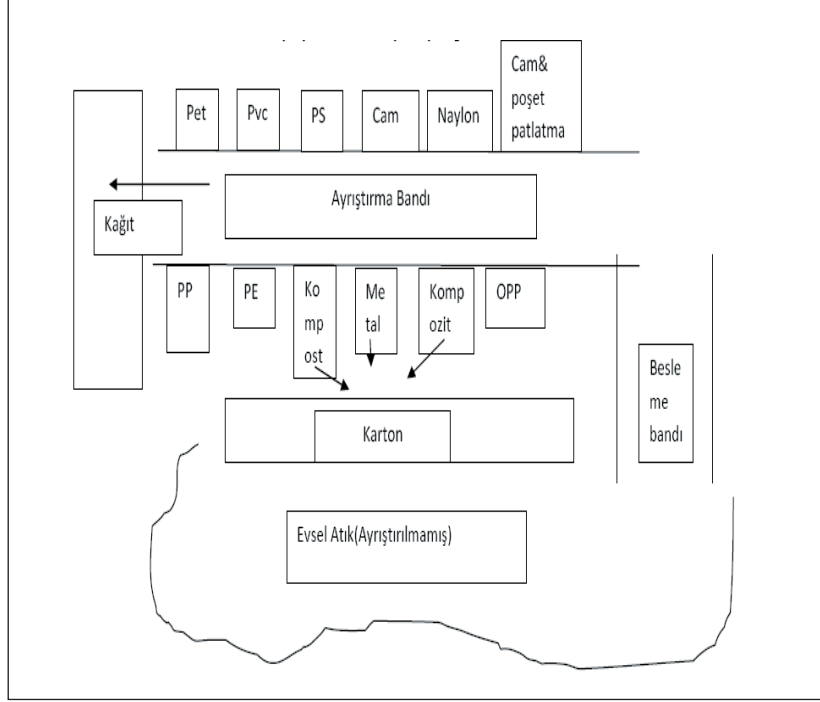
Bu proje kapsamında yapılan tüm iyileştirmelerin firmanın yanı sıra çevreye de katkıları olacaktır. Ayrıştırma süreçleri için yapılan tüm iyileştirmeler neticesinde her yıl 4.8 ton cam, 3.4 ton metal, 4.8 ton plastik hammaddesi tasarrufu ve her yıl daha fazla kağıdın ayrıştırılması sebebiyle 48 ağacın kesilmesinin önlenmesi beklenmektedir. Bu aynı zamanda tüm bu malzemelerin geri dönüşümü için harcanacak 71560 kWh elektrik enerjisinin kazanımı demektir. Palet atölyesi için tasarlanan yeni yerleşim planı sayesinde oluşan üretim sayısındaki artış sebebiyle beklenen sonuç her yıl ortalama 2400 ağacın kesilmesinin önlenmesidir. Son olarak *RotaÇiz*'in sayesinde elde edilen yeni rotalar ile her yıl 588 litre yakıtın tasarrufu ve buna bağlı olarak 1580 kg karbondioksit emisyonunun engellenmesi beklenmektedir.

## KAYNAKÇA

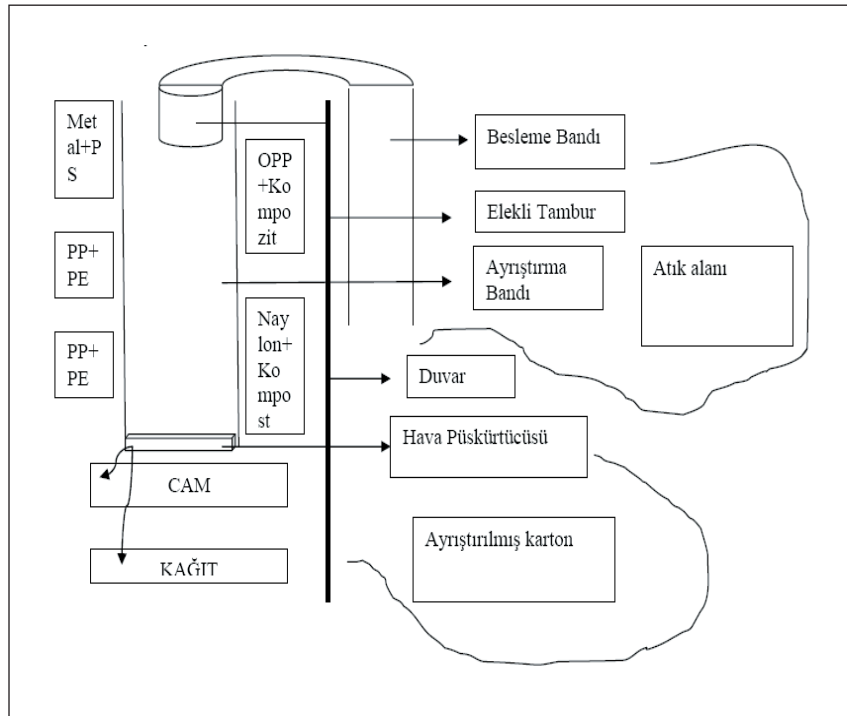
1. Amponsah, S.K., Salhi, S. 2004. "The Investigation of a Class of Capacitated Arc Routing Problems: The Collection of garbage in developing countries", *Waste Management*, 24(7), 711-721.
2. Clarke, G., Wright, J.W. 1964. "Scheduling of Vehicles From a Central Depot to a Number of Delivery Points", *Operations Research*, 12, 568-581.
3. Cordeau, J.F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J.Y., Semet, F. 2002. "A Guide to Vehicle Routing Heuristics", *The Journal of the Operational Research Society*, 53 (5), 512-522.
4. Dantzig, G.B., Ramser, J.H. 1959. "The Truck Dispatching Problem", *Management Science*, 6, 80-91.
5. Eiselt, H.A., Gendreau, M., Laporte, G. 1995. "Arc Routing Problems. Part I. The Chinese postman problem", *Operations Research*, 43, 231-242.
6. Eiselt, H. A., Gendreau, M., Laporte, G. 1995, "Arc Routing Problems, Part II: The Rural Postman Problem", *Operations Research*, 43 (3), 399-414.
7. Francis, R.L., McGinnis, F., White, J.A. 1991. *Facility Layout and Location: An Analytical Approach*. Prentice Hall, New Jevseg.
8. Silver, E.A. 2004. "An Overview of Heuristic Solution Methods", *The Journal of the Operational Research Society*, 55 (9), 936-956.
9. Tchobanoglous, T., Vigil, S.A. 1993. *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill, Boston.
10. Vesilind, P.A., Worrel, W.A., Reinhart, D.R. 2001. *Solid Waste Engineering*, Cengage-Engineering.
11. Vittorio, M. 2004. "Algorithms For Large Directed CARP Instances: Urban Solid Waste Collection Operational Support", *Teknik Rapor. Bilgisayar Bilimleri Bölümü, Bolonya Üniversitesi, İtalya*.

**EKLER**

**Ek 1.1.** Evsel Atık Ayrıştırma Bandı Mevcut Yerleşim Planı



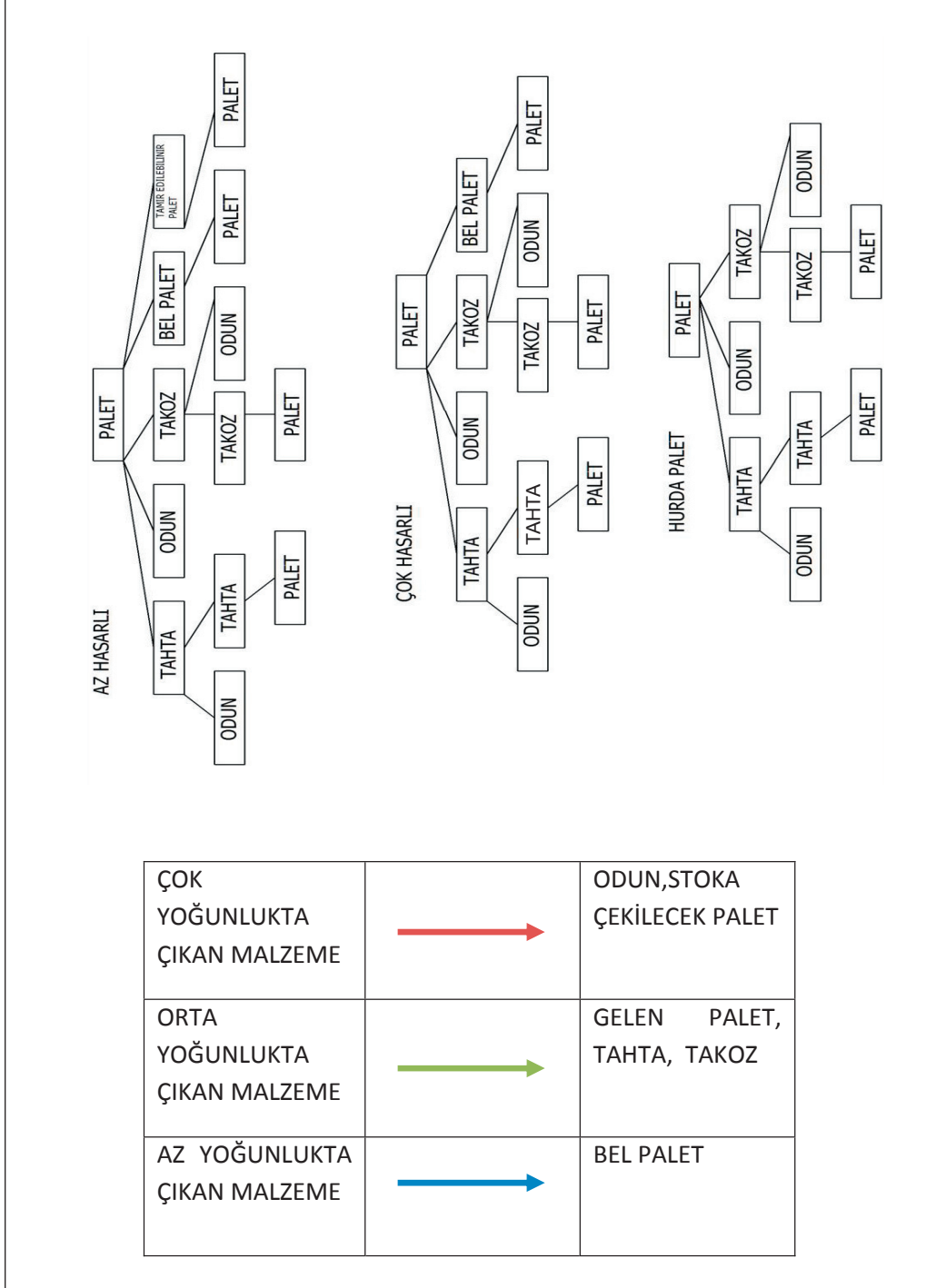
**Ek 1.2.** Evsel Atık Ayrıştırma Bandı Yeni Yerleşim Planı



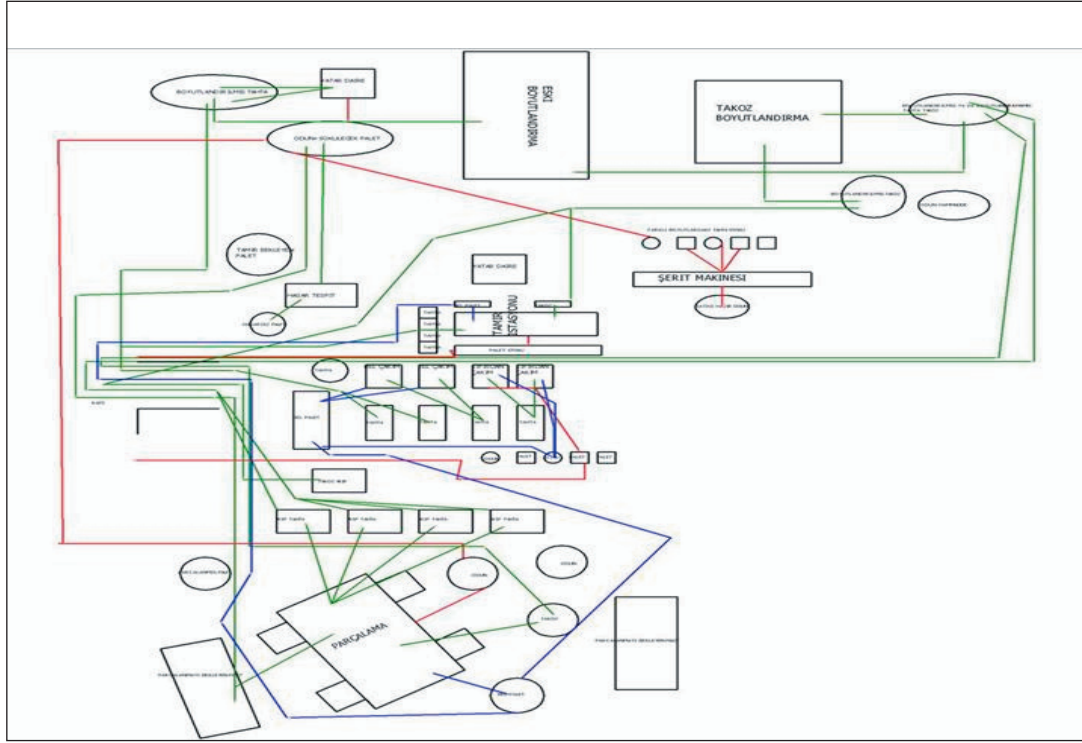
**Ek 2.** Farklı Atık Miktarları ve İŞçi Performansları İcın Benzetim Modeli Sonucunda YapılmıŐ Olan Senaryo Sonuğları

	Bant üstünde doğru malzemeyi yakalama olasılığı <b>%85(mevcut)</b>	Bant üstünde doğru malzemeyi yakalama olasılığı <b>%90</b>	Bant üstünde doğru malzemeyi yakalama olasılığı <b>%95</b>
Gelen atık miktarı <b>4 ton</b>	Yatırımlar 5 ay icerisinde maliyetini karŐılar, ayrıştırma maliyetlerinde 4000 YTL'lik azalma ve 5.aydan sonra 282YTL kazanç,	Yatırımlar 4 ay icerisinde maliyetini karŐılar, ayrıştırma maliyetlerinde 4000 YTL'lik azalma ve 4.aydan sonra 883YTLkazanç,	Yatırımlar 3 ay icerisinde maliyetini karŐılar, ayrıştırma maliyetlerinde 4000 YTL'lik azalma ve 3.aydan sonra 2262 YTL kazanç,
Gelen atık miktarı <b>5 ton</b>	Yatırımlar 5 ay icerisinde maliyetini karŐılar, ayrıştırma maliyetlerinde 4000 YTL'lik azalma ve 5.aydan sonra 284YTL kazanç,	Yatırımlar 4 ay icerisinde maliyetini karŐılar, ayrıştırma maliyetlerinde 4000 YTL'lik azalma ve 4.aydan sonra 1232YTLkazanç,	Yatırımlar 3 ay icerisinde maliyetini karŐılar, ayrıştırma maliyetlerinde 4000 YTL'lik azalma ve 3.aydan sonra 2630YTL kazanç,
Gelen atık miktarı <b>6 ton</b>	Yatırımlar 4 ay icerisinde maliyetini karŐılar, ayrıştırma maliyetlerinde 4000 YTL'lik azalma ve 4.aydan sonra 387YTL kazanç,	Yatırımlar 4 ay icerisinde maliyetini karŐılar, ayrıştırma maliyetlerinde 4000 YTL'lik azalma ve 4.aydan sonra 1223YTLkazanç,	Yatırımlar 3 ay icerisinde maliyetini karŐılar, ayrıştırma maliyetlerinde 4000 YTL'lik azalma ve 3.aydan sonra 2630 YTL kazanç,

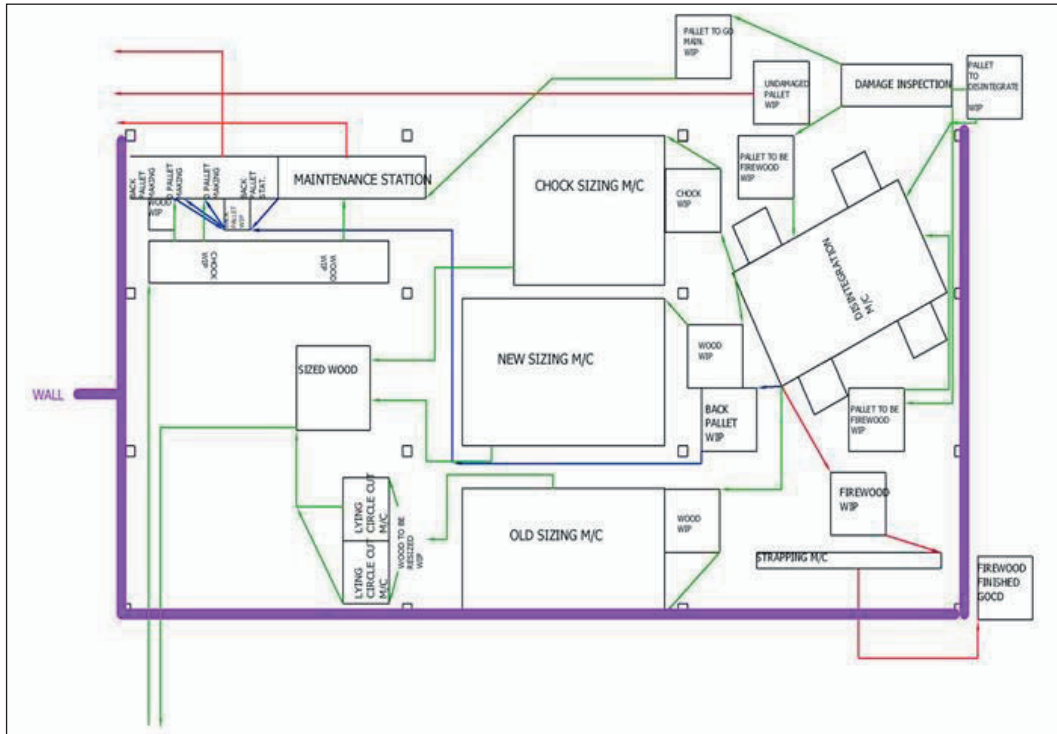
**Ek 3.** Out-tree Structure Diyagramı ve Malzeme Yoğunlukları



**Ek 4.1.** Yoğunluklara Göre Eski Yerleşim Planı AutoCAD Çizimi



**Ek 4.2.** Yoğunluklara Göre Yeni Yerleşim Planı AutoCAD Çizimi



**Ek 5.1.** Kapasiteli Yol Rotalama Problemi

Algoritma belirlenen noktadan başlayarak, kendisine kendisinden farklı(rotada olmayan) en yakın olan yolu araştırır. Eğer mevcut kapasite o yolun isteminden büyük ise bu yol rotaya eklenir. Bu süreç, rotaya eklenecek yol kalmayana kadar devam eder. Eğer eklenecek yol kalmazsa rota başladığı noktaya dönerek tamamlanır. Bunun sonucunda minimum mesafeye sahip, bütün yolları sadece bir kez geçen bir rota oluşmaktadır.

$$\min \sum_{(i,j) \in E} \sum_{k=1}^K c_{ij} x_{ijk} \quad (\text{A.1})$$

subject to

$$\sum_{p \in V} x_{pik} - \sum_{p \in V} x_{ipk} = 0 \quad \forall i \in V, k=1,2,\dots,K, \quad (\text{A.2})$$

$$\sum_{k=1}^K y_{ijk} = 1 \quad \forall (i,j) \in R, \quad (\text{A.3})$$

$$x_{ijk} \geq y_{ijk} \quad \forall (i,j) \in R, k=1,\dots,K, \quad (\text{A.4})$$

$$\sum_{(i,j) \in R} q_{ij} y_{ijk} \leq W, \quad \forall k=1,\dots,K, \quad (\text{A.5})$$

$$M \sum_{i \in V[S], j \in V[S]} x_{ijk} \geq \sum_{(j,p) \in S} x_{jpk} \quad \begin{cases} \forall S \subseteq R, \\ O \in V[S], \\ \forall k=1,2,\dots,K, \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

**Ek 5.2.** Kapasiteli Araç Rotalama Problemi

Algoritma belirlenen noktadan başlayarak, kendisine kendisinden farklı(rotada olmayan) en yakın olan noktayı araştırır. Eğer mevcut kapasite o noktanın isteminden büyük ise bu nokta rotaya eklenir. Eğer kapasite dolarsa yeni araç bu noktadan itibaren geri kalan noktalar için bir rota oluşturur. Bu süreç, rotaya eklenecek nokta kalmayana kadar devam eder. Eğer eklenecek nokta kalmazsa rota başladığı noktaya dönerek tamamlanır. Bunun sonucunda minimum mesafeye sahip, bütün noktaları sadece bir kez geçen bir rota oluşmaktadır.

$$\min \sum_{e \in E} c_e x_e$$

$$\sum_{e=\{0,j\} \in E} x_e = 2k \quad (1)$$

$$\sum_{e=\{i,j\} \in E} x_e = 2 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{\substack{e=\{i,j\} \in E \\ i \in S, j \notin S}} x_e \geq 2b(S) \quad \forall S \subset N, |S| > 1 \quad (3)$$

$$0 \leq x_e \leq 1 \quad \forall e = \{i,j\} \in E, i,j \neq 0 \quad (4)$$

$$0 \leq x_e \leq 2 \quad \forall e = \{0,j\} \in E \quad (5)$$

$$x_e \text{ integral } \forall e \in E. \quad (6)$$

**Ek 6.** Clarke&Wright ve 3-Opt Sezgisel Metotları İçin Adımlar

```

PROCEDURE Clark&Wright Construction Heuristic
    ct is the capacity of the truck
    Cij is the distance between nodes i and j
    k is the number of vehicles
    Sij is the savings of i and j
    SM(i,j) is the matrix that holds sij
    cw(i,j) is the matrix that holds each street's amount of waste
    cw the total waste collected
    rk is the number of vehicles that is needed
    routem(i,j) is the matrix that holds the route
    TD is the total distance traveled by routem(i,j)
INITIALIZE k to zero
INITIALIZE cw to zero
    FOR all i not equal to j DO
        Define route (i,0) and (0,j) and (i,j)
        Define  $S_{ij} = C_{i0} + C_{0j} - C_{ij}$ 
        Put  $S_{ij}$  into SM
        Sort SM in a non-decreasing way
    end FOR
    FOR all i not equal to j DO
        Define route (0,i,0)
        Add one to k
    end FOR

    FOR all  $S_{ij}$  in SM DO
        FOR first value of SM DO
            WHILE ( $ct \geq cw$ )
                IF the route (0,j) and (i,0) are defined,
                    DELETE (0,j) and (i,0) from SM
                    SUBTRACT 1 from k
                    CREATE (i,j)
                    PUT (i,j) into routem
                    ADD cw(i,j) to cw
                    ADD distance of route (i,j) to TD
                end IF
            OTHERWISE
                ADD 1 to rk
                DO cw equal to zero
            END WHILE
        END FOR
    END FOR
END FOR
PROCEDURE 3-OPT improvement heuristic
    TDN is total distance created for new routes
    Initialize TDN to 0
    DELETE randomly 3 (i,j) from 'route' matrix
    REPEAT
        DO new routes between remaining fragments of the tour by adding 3 new edges
        TDN= Total Distance of the new route
        IF TDN<TD
            ADD new edges to 'route' matrix
        ELSE
            ADD deleted edges to 'route' matrix
        END IF
    until no further improvements are done

```