



ADIYAMAN ÜNİVERSİTESİ

Mühendislik Bilimleri Dergisi

Journal of Engineering Science
of Adiyaman University

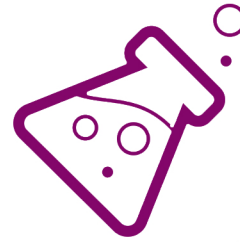
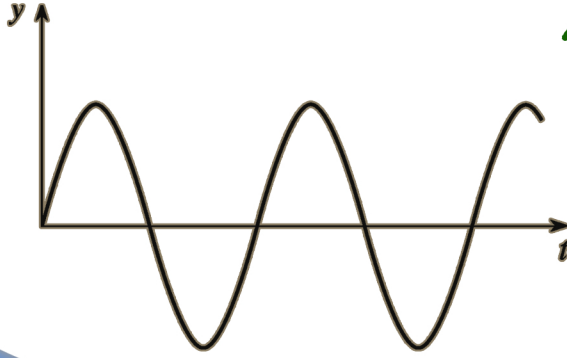
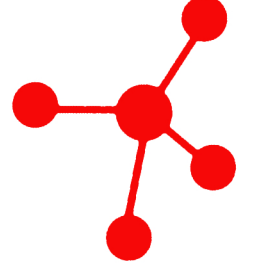
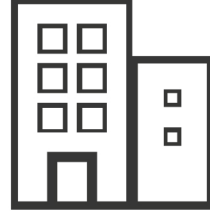
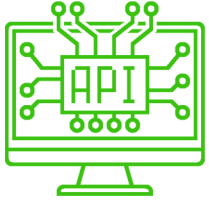
ISSN: 2149-0309

CİLT
VOLUME 4

SAYI
ISSUE 7

TEMMUZ
JULY

2017



ADIYAMAN ÜNİVERSİTESİ

Mühendislik Bilimleri Dergisi

Journal of Engineering Science of Adiyaman University

ISSN: 2149-0309

Cilt: 4 Sayı:7

Dergi Yöneticisi

Prof. Dr. Murat PALA

Baş Editör

Prof. Dr. Murat PALA

Editörler

Yar. Doç. Dr. Şerif ÇİTİL

Yar. Doç. Dr. Miraç UÇKUN

Yazışma Adresi / Correspondence Address

Adiyaman Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi Dekanlığı

e-mail: mbd@adiyaman.edu.tr

Tel: 0 (416) 223 38 08

Fax: 0 (416) 223 38 09

YAYIN KURULU/ EDITORIAL BOARD

- 1-Prof.Dr. Şemsettin TEMİZ(İnönü Üniversitesi)
- 2-Prof.Dr. Murat DEMİR AYDIN(Erzurum Teknik Üniversitesi)
- 3-Prof.Dr. İbrahim TÜRKMEN..... (İnönü Üniversitesi)
- 4-Prof.Dr. Naci ÇAĞLAR(Sakarya Üniversitesi)
- 5-Prof.Dr. Abdullah ÇEVİK(Gaziantep Üniversitesi)
- 6-Prof.Dr. Seyhan FIRAT(Gazi Üniversitesi)
- 7-Prof.Dr. Hasan OKUYUCU(Yıldırım Beyazıt Üniversitesi)
- 8-Prof.Dr. Eyüp DEBİK(Yıldız Teknik Üniversitesi)
- 9-Prof.Dr. Yusuf TUNÇTÜRK(Yüzüncü Yıl Üniversitesi)
- 10-Prof.Dr. Nevzat ARTIK(Ankara Üniversitesi)
- 11-Doç.Dr. Hamit ADİN(Batman Üniversitesi)
- 12-Doç.Dr. Halef DİZLEK(Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi)
- 13-Yrd. Doç.Dr. Yaşar AYZ(İnönü Üniversitesi)
- 14-Yrd. Doç.Dr. Aysun ŞENER(Adana Bilim Teknoloji Üniversitesi)

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|--------|
| Çöp Gazından Gelen Siloksonların Enerji Üretimindeki Sınırlamaları Ve Gazdan Uzaklaştırma Metotları | |
| Özge ÖSTÜRK, Orhan SEVİMOĞLU..... | 42-53 |
| Harran Ovasında Yapılan Arazi Toplulaştırma Çalışmalarına Sulama Tatbikat Projelerinin Gecikmesi Ve Sulama Sistemi Değişikliklerinin Etkileri | |
| Yaşar İNCEYOL, Tayfun ÇAY..... | 54-62 |
| Eğrisel Yüzeyle Boru Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi | |
| Şerif ÇİTİL, İsmail BOZKURT..... | 63-72 |
| Güç Kalitesi Bozulmalarının Hilbert Huang Dönüşümü Ve Gabor Dönüşümü Kullanarak Sınıflandırılması | |
| M. İsmail GÜRSOY, A. Serdar YILMAZ, S. Vakkas ÜSTÜN | 73-83 |
| Triglide Robotun Dinamik Denklemleri Kullanılarak Kayan Kipli Denetleyici İle Denetimi | |
| Muhammet AYDIN, Oğuz YAKUT..... | 84-98 |
| Ahp Yöntemi İle Konut Sayaçlarında Hataya Sebep Olan Faktörlerin Önem Sıralarının Belirlenmesi | |
| Salih YILMAZ, Özgür ÖZDEMİR, Cansu ORHAN, Mahmut FIRAT..... | 99-100 |

ÇÖP GAZINDAN GELEN SİLOKSONLARIN ENERJİ ÜRETİMİNDEKİ SINIRLAMALARI VE GAZDAN UZAKLAŞTIRMA METOTLARI

Özge ÖSTÜRK, Orhan SEVİMOĞLU*

Gebze Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, 41400, Türkiye
Geliş tarihi: 18.10.2017 Kabul tarihi: 17.11.2017

ÖZET

Siloksanlar, oksijen ve silisyum atomlarından oluşan ve alternatif olarak silisyumun yan zincirlerine hidrokarbon gruplarının bağlandığı bileşiklerdir. Siloksanların özellikle arıtma çamurlarında ve katı atık depolama alanlarında oluşan biyogazda bulunduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada, enerji üretimi esnasında çöp gazında bulunan siloksanların oksitlenmesi sonucu oluşan depozitlerin motorun yanma odasının çeperlerinde birikmesi değerlendirilmiştir. Siloksanların oksitlenmesi sonucu gaz motorunun parçalarında oluşan depozit, gaz motorunun işletme maliyetini arttırmaktadır. Bununla birlikte depozit oluşumundan kaynaklı olarak motor parçalarının temizlenmesi ve erken bakımdan dolayı enerji üretiminde kayıplara neden olması söz konusudur. Ayrıca çöp gazında bulunan siloksanların gazdan uzaklaştırılması amacıyla kullanılan metotlar incelenmiştir. Bu kapsamda, adsorpsiyon yönteminin kullanılan en yaygın metot olduğu görülmüştür. Ancak, adsorpsiyon ve soğutarak uzaklaştırma metotlarının da kullanıldığı yöntemler vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çöp gaz, siloksan, birikinti oluşumu, enerji üretimi, uzaklaştırma

LIMITATIONS OF SILOXANES FROM LANDFILL GAS ON ENERGY PRODUCTION AND REMOVAL METHODS FROM GAS

ABSTRACT

Siloxanes are compounds composed of oxygen and silicon atoms, and bonded to hydrocarbon side chains of silicon. It has been found that siloxanes are found in environments such as biogas from sewage sludge, solid waste storage areas. In this study, accumulation of deposits formed on the wall of the combustion chamber of the gas engine as a result of oxidization of siloxanes in landfill gas during the energy production that was evaluated. The oxidation of siloxanes increases the operating cost of the gas engines by forming deposits on engine parts. However, the deposits cause the loss of energy production due to cleaning of engine parts and early maintenance. In addition, removal methods of siloxanes in landfill gas were investigated. It has been understood that the most common method used in this context is the adsorption. However, it is emphasized that the other methods such as absorption and condensation.

Keywords: Landfill gas, siloxane, deposit formation, energy production, removal

1. Giriş

Son yıllarda, fosil yakıt kaynaklarına ilaveten alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi artmıştır. Bundan dolayı atıktan enerji üretimi projeleri gün geçtikçe artış göstermektedir. Özellikle, çöp

* e-posta: sevimoğlu@gtu.edu.tr

gazından elektrik enerjisi üretimi son zamanlarda yaygın bir metot olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, çöp gazının enerji üretmek amacıyla yakılması, atmosfere sera gazı salınımının azaltılmasına katkı sağlamaktadır [1]. Bununla birlikte çöp sahaları, gaz çıkarma sistemleri ve enerji üretim sistemleri birçok potansiyel saha ve işletme problemlerine sahiptir. Bu problemler atıktan enerji projelerinde birtakım zorlukları da beraberinde getirmektedir [2]. Enerji üretim tesisleri açısından en önemli problemlerden biri, motor yağı ve çöp gazının yanması esnasında yağdaki elementlerin ve çöp gazındaki organometalik bileşiklerin oksidasyonu sonucu oluşan parçacıkların motorun yanma odası çeperlerinde birikinti oluşturmasıdır [3].

Siloksanlar organik kimyasalların (metil grupları gibi) bağlı olduğu silisyum atomlarından oluşmaktadır [4]. Siloksanlar, yüksek oranda sıkıştırılabilirlik, düşük dereceli yanabilirlik, düşük yüzey gerilimi, su tutmama özelliği, yüksek ısı kararlılık ve bu özelliklerin sıcaklıkla sınırlı etkileşimi gibi sahip oldukları özelliklerinden dolayı kişisel bakım ürünlerinden deterjana, kâğıt endüstrisinden tekstile kadar geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Ayrıca siloksanların toksik ve alerjik etkisi oldukça düşük seviyededir ve atmosferde biyolojik olarak parçalandıkları için çevrede kalıcı bir etki yaratmazlar [3]. Ayrıca silikon içeren kaplamaların, aşınmayı ve küf oluşumunu engelleme özelliklerinden dolayı kullanımları gün geçtikçe artmaktadır [5]. Çöp sahalarında siloksanlar, silikoorganik bileşiklerin ayrışması esnasında oluşmaktadır [6].

Yanma odalarında silikat (SiO_2 ya da SiO_3) içeren birikinti oluşumundan dolayı siloksanlar motor aksamalarında hasara neden olmaktadır [7]. Ayrıca oluşan bu silikatlar yanma odasının yüzey sıcaklığını arttırarak vuruntu, kontrolsüz yanma ve motorun uzun süre çalışması durumunda piston başlarındaki materyallerin erimesi gibi problemlere yol açmaktadır [8]. Bununla birlikte çöp gazında en yüksek oranda bulunan oktametilsiklotetrasiloksan (D4) yanma odasında yüksek sıcaklık altında formaldehit ve silisit aside dönüşmektedir. Bu bileşikler çok aktif oldukları için piston ve silindir yüzeylerinde motor yağıyla ya da yakma odasının içinde çöp gazından gelen metan ile tepkimeye girmektedir [8].

Daha önce yapılan çalışmalarda, çöp gazında bulunan siloksanların uzaklaştırılarak motor performansı bakımından belirli bir derişim seviyesine indirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Çöp gazı yüksek miktarda metan içermesine rağmen, içeriğinde bulunan iz bileşenlerin (siloksanlar gibi) oksitlenmesi ve depozit oluşturması motor performansını olumsuz yönde etkilemektedir [9]. Bu kapsamda, siloksanları çöp gazından uzaklaştırmak amacıyla adsorpsiyon, absorpsiyon, soğutma, biyolojik, katalitik ve membran prosesler gibi yöntemlerin kullanıldığı raporlanmıştır [10], [11]. Bu yöntemler arasında yer alan adsorpsiyon metodu, basit ve kullanımı kolay olduğu için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [12]. Literatürde en fazla aktif karbon ile adsorpsiyon yapıldığı görülmüştür [13], [14], [15], [16]. Bununla birlikte aktif karbonun adsorpsiyon performansı biyogazın içeriğine ve kullanılan aktif karbonun türüne bağlı olarak değişmektedir. Çöp gazından siloksanların uzaklaştırılması amacıyla kullanılan yöntemler arasında absorpsiyon yöntemi ikinci sırada yer almaktadır. Teoride kimyasal absorpsiyon daha iyi sonuçlar verse de [10], fiziksel absorpsiyonda kullanılan çözücüler gelecek vaat etmektedir [17]. Siloksanları gidermek için yüksek potansiyele sahip diğer teknolojiler ise soğutma ve siloksan seçici membranlar ve katalizörlerdir [11].

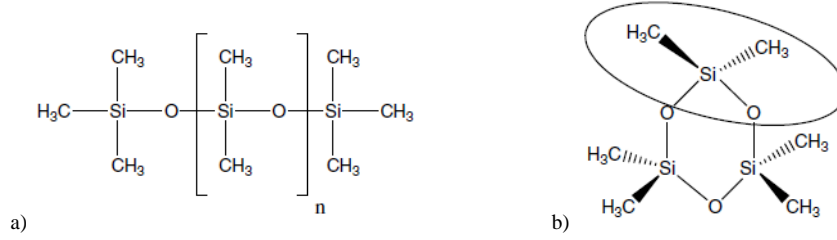
Bu çalışmada, İstanbul Odayeri çöp depolama sahasında kurulu olan, çöp gazından elektrik enerjisi üretimi tesisinde çalışan motorların yanma odasında oluşan birikintilerin sonuçları dikkate alınarak, siloksanların genel özellikleri ile uzaklaştırma teknikleri incelenmiştir.

2. Siloksanların Fiziksel ve Kimyasal Yapısı

2.1. Siloksanların Fiziksel Yapısı

Bir siloksanın yapısı, şekil 1'de görüldüğü üzere doğrusal (L) ya da halkalı (D) olabilmektedir. Doğrusal siloksanların genel formülü '(2n+6)metil-(n+1)siloksan' şeklindedir (Örneğin; n=1 için L=2).

Halkalı siloksanlarda ise ‘dimetilsiloksan’ birimi (D-birimi) temel alınarak isimlendirme yapılmaktadır (Örneğin; 3 tane D-birimi varsa D3) [3].



Şekil 1. Siloksanların yapısı, a) Doğrusal, b) Halkalı

2.2. Siloksanların Kimyasal Yapısı

Siloksanlar, Si-O-Si bağı içeren ve organosilikon kimyasına ait olan fonksiyonel bir gruptur. İki silisyum atomunun merkezinde yer alan ve silisyum atomlarını birbirinden ayıran oksijen atomları ile meydana gelen siloksanlar (bkz: Şekil 1) dallanmış bileşikler oluşturmaktadır ve bu durum siloksanlara belirli özellikler kazandırmaktadır. Çizelge 1’de en yaygın bulunan siloksanların CAS (Chemical Abstract Service) sayısı ve formülü ile molekül ağırlığı, kaynama noktası, buhar basıncı ve yoğunluğu gibi özellikleri yer almaktadır. Çöp gazındaki siloksanların uzaklaştırılması için kullanılan yöntemlerin etkinliği açısından siloksanların kimyasal özellikleri önem arz etmektedir.

2.3. Analiz Tekniği

Çöp depolama sahalarından gaz örneğinin alınması için çeşitli metotlar kullanılmaktadır. Metal kap ve Tedlar® torbası en yaygın kullanılan gaz numunesi toplama kaplarıdır. Toplanan çöp gazının içerisinde bulunan bileşenlerin gerek miktarı, gerekse niteliği farklı belirleme yöntemleriyle analiz edilmektedir. Bu yöntemler arasında, elektron tutma detektörlü gaz kromatografisi (GC-ECD), alev iyonlaşma detektörlü gaz kromatografisi (GC-FID), ısı iletkenlik detektörlü gaz kromatografisi (GC-TCD) ve kütle spektrometrisi detektörlü gaz kromatografisi (GC-MS) yer almaktadır. Bu yöntemlerden biri veya daha fazlası kullanılarak çöp gazının bileşimi analiz edilmektedir. Organik maddelerin ölçülmesi, siloksanlar ile beraber diğer organik madde gruplarını da (Hidrokloroflorohidrokarbon (HCFC), uçucu halojenli hidrokarbonlar (VHH), benzen, tolüen, etil benzen, ksilen (BTEX), florlu maddeler) kapsamaktadır. Bu maddelerin miktarları motor yağının kullanım ömrünü etkilemektedir.

Çizelge 1. Çöp gazından gelen siloksanların özellikleri.

| İsim | CAS sayısı | Formül | MA (g/mol) | KN (°C) | P (mmHg) | d (g/cm ³) |
|--|------------|--|------------|---------|----------|------------------------|
| Hekzametilsiklotrisiloksan (D ₃) | 541-05-9 | C ₈ H ₁₈ O ₃ Si ₃ | 222,46 | 134 | 10 | 1,02 |
| Oktametilsiklotetrasiloksan(D ₄) | 556-67-2 | C ₈ H ₂₄ O ₄ Si ₄ | 296,62 | 175 | 1,3 | 0,96 |
| Dekametilsiklopentasiloksan(D ₅) | 541-02-6 | C ₁₀ H ₃₀ O ₅ Si ₅ | 370,77 | 210 | 0,4 | 0,96 |
| Dodekametilsikloheksasiloksan(D ₆) | 540-97-6 | C ₁₂ H ₃₆ O ₆ Si ₆ | 444,92 | 245 | 0,02 | 0,97 |
| Hekzametildisiloksan (L ₂) | 107-46-0 | C ₆ H ₁₈ OSi ₂ | 162,38 | 101 | 31 | 0,76 |
| Oktametiltrisiloksan (L ₃) | 107-51-7 | C ₈ H ₂₄ O ₂ Si ₃ | 236,53 | 153 | 3,9 | 0,82 |
| Dekametiltetrasiloksan (L ₄) | 141-62-8 | C ₁₀ H ₃₀ O ₃ Si ₄ | 310,69 | 194 | 0,55 | 0,85 |
| dodekametilpentasiloksan (L ₅) | 141-63-9 | C ₁₂ H ₃₆ O ₄ Si ₅ | 384,84 | 230 | 0,07 | 0,88 |

MA: Molekül ağırlığı, KN: Kaynama noktası, P: Buhar basıncı, d: Yoğunluk

3. Siloksanların Enerji Üretimindeki Sınırlamaları

Çöp gazından elektrik enerjisi üretme yöntemi dünyada yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak çöp gazında bulunan kükürt, silisyum ve klor gibi elementlerin oluşturduğu bileşikler, enerji üretiminde birtakım dezavantajlar oluşturmaktadır. Bunların başında, oksitlenen parçacıkların piston başı, motor valfleri, buji ateşleme başları gibi motor parçalarında birikmesi gelmektedir [2], [9], [14]. Bu çalışmada, İstanbul Odayeri çöp depolama sahasında kurulu olan, çöp gazından elektrik enerjisi üretim tesisinde çalışan motorların yanma odasında oluşan birikintilerin, morfolojik yapısı incelenerek literatürde siloksanları çöp gazından uzaklaştırmak amacıyla kullanılan yöntemler araştırılmıştır.

Çöp gazı yakıldığında gazın içerisinde bulunan siloksanlar oksitlenerek silikatlara dönüşürken diğer elementler de oksitlenmektedir. Silikatlar ile diğer oksitlenmiş bileşikler Şekil 2 (a) ve (b)'de görüldüğü üzere, yanma süresince motorun silindir başlarında ve bujilerde birikmektedir. Oluşan bu birikinti neticesinde, motor aksamları zarar görmekte ve giderek işlevini kaybetme, dahası gerekli bakım yapılmaz ise üretim durma noktasına gelmektedir. Bu durumda gaz motorlarının belirlenen süreden önce bakıma alınması söz konusudur. Motorun belirlenen süreden önce bakıma alınması üretim kaybına neden olmakta ve enerji üretim tesisinin işletme maliyetini arttırmaktadır. Sonuç olarak çöp gazından gelen siloksanlar gaz motorunun parçalarında birikerek motor performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Gaz motorlarında biriken depozitin içeriğinde, çöpün kaynağına bağlı olarak değişmesine rağmen, ortalama %21 oranında silisyum olduğu göz önünde bulundurulduğunda siloksan kaynaklı oluşan birikintinin yüksek bir orana sahip olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır [9], [14].



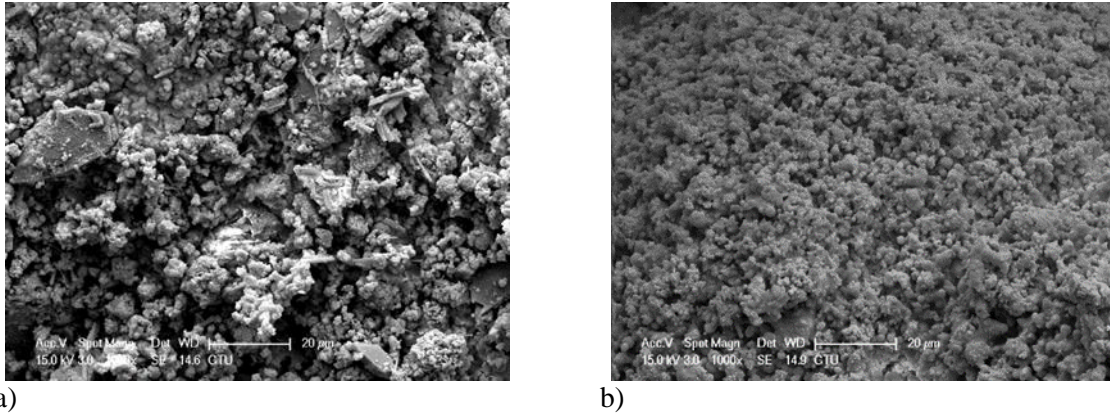
a)



b)

Şekil 2. Motor aksamlarında birikinti oluşumu, (a) Motorun baş kısmı, (b) Buji.

Çöp gazının gaz motorlarında yakılması neticesinde motor aksamlarında oluşan birikinti analiz edilmektedir. Bu kapsamda Enerji Dağılımlı İzge ölçümlü (EDS) Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) gibi metotlar kullanılarak motorun farklı kısımlarında oluşan birikintinin kimyasal bileşimi ile morfolojik özellikleri incelenmektedir [18]. İstanbul Odayeri Çöp Depolama Sahası'nda Kurulu olan biyogazdan enerji üretimi tesisinde çalıştırılan gaz motorlarının silindir başından ve piston başından alınan birikinti örneklerinin SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 3 (a) ve (b)'de yer almaktadır. Burada, SEM kullanılarak motor parçalarında oluşan depozitlerin morfolojisi ve mikro ölçekte analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında, motorun piston başından alınan örneğin silindir başından alınan örneğe göre daha homojen bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, elementsel analiz sonuçlarına göre depozitin içerisinde karbon, oksijen, silisyum ve fosfor elementlerinin yanı sıra az miktarda kükürt, kalsiyum ve demir elementlerinin bulunduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3. Motor parçalarından alınan birikinti örneklerinin SEM görüntüsü, a) Silindir başı, b) Piston başı.

4. Siloksanları Çöp Gazından Uzaklaştırma Yöntemleri

Çöp gazında, metan (CH_4) ve karbondioksit (CO_2) ek olarak hidrokarbonlar, siloksanlar, uçucu organik bileşikler ve hidrojen sülfür gibi birçok bileşen yer almaktadır. Bu ek bileşenlerin, gaz motoru ekipmanlarına zarar verdikleri için çöp gazından uzaklaştırılmaları gerekmektedir.

Çöp gazının içerisinde bulunan siloksanların uzaklaştırılması için kullanılan yöntemler ile bu yöntemlerin avantajları ve dezavantajları Çizelge 2’de verilmiştir. Siloksanlar parçacık formunda olmadıkları için filtre edilememektedir. Bundan dolayı siloksanlar adsorpsiyon, adsorpsiyon ve soğutma gibi yöntemler kullanılarak uzaklaştırılmaktadır. Siloksanları tutma özelliğine sahip malzemelerden oluşan yüzeyler kullanılarak, siloksanların biyogazdan uzaklaştırıldığı adsorpsiyon yöntemi bilinen en yaygın yöntem olmasının yanı sıra birtakım dezavantajlara sahiptir. Bunların başında kullanılan adsorbanın tekrar kullanılabilirliğinin olmaması gelmektedir. Çöp gazındaki siloksanları uzaklaştırmak amacıyla kullanılan mevcut teknolojilerde karşılaşılan sorunlar neticesinde, biyolojik, membran ve katalitik prosesler gibi yeni teknolojiler geliştirilmiştir. Ancak laboratuvar ölçeğinde olan bu yöntemlerin saha ölçeğinde uygulanabilirliğinin olması için daha ileri araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Çizelge 2. Siloksanları çöp gazından uzaklaştırma metotları [4], [17], [19].

| Kullanılan metot | Avantajları | Dezavantajları |
|------------------------------|--|--|
| Aktif karbon ile adsorpsiyon | Aktif karbon ucuz ve çeşitliliği fazla Gaza ön kurutma yapıldığında uzaklaştırma veriminde artış olmaktadır | Endüstriyel uygulamalarda aktif karbonun değiştirilmesinden kaynaklı aksaklık ve ek maliyet oluşmakta Çöp gazı için düşük adsorpsiyon kapasitesi |
| Silika jel ile adsorpsiyon | Tekrar kullanılabilirlik | Yaygın olarak kullanımı az |
| Fiziksel adsorpsiyon | Düşük toksik etki ve kolay uygulanabilirlik | Uçucu siloksanların desorpsiyonu mümkün Kimyasal adsorpsiyona göre düşük etkinlik |
| Kimyasal adsorpsiyon | Kullanılan güçlü asit ve bazlar ile yüksek sıcaklıklarda siloksanların tamamen uzaklaştırılması mümkün | Güvenlik ve korozyon kaygıları İnsan sağlığı ve çevre üzerine olumsuz etki Düşük sıcaklıklarda uzaklaştırma etkinliği az Kullanılan bazların karbonat oluşturması sonucu ekipmanlarda hasar oluşumu |
| Biyolojik prosesler | Düşük maliyetli Gazın koku kontrolü ve H_2S 'in uzaklaştırılması için uygun | Sadece düşük derişimdeki UMS'lerin uzaklaştırılmasında etkin |

| | | |
|---------------------|--|--|
| Katalitik prosesler | Biyogazın ön arıtımı için uygun | Daha fazla araştırma gerekli |
| Membran prosesler | İşletimi kolay ve maliyeti düşük | İşlem esnasında büyük oranda metan kaybı Siloksanların giderimi için daha fazla araştırma gerekli |
| Soğutma | Biyogazdan hem su hem de siloksanların uzaklaştırılması mümkün | Yüksek enerji tüketiminden dolayı maliyeti fazla Kirliliklerin giderilmesinde yetersiz |

4.1. Adsorpsiyon

Çöp gazında bulunan siloksanların gaz motorlarında yakılmadan önce uzaklaştırılması silikat oluşumunu engelleyecektir. Katı adsorban ile yapılan adsorpsiyon, kullanılan en yaygın bertaraf yöntemleri arasındadır. Adsorpsiyon yöntemi kullanılarak siloksanların uzaklaştırılması amacıyla gerçekleştirilen çalışmalar Çizelge 3’de verilmiştir. Buradan da görüldüğü üzere silika jel ve alümina gibi organik katılar ya da polimerik reçineler ilginç sonuçlar verse de, kullanılan en yaygın katı adsorban aktif karbondur [20]. Siloksanların aktif karbon ile adsorpsiyon kapasitesini etkileyen faktörler şunlardır: i) farklı aktif karbonların kullanımı, ii) çöp gazında bulunan diğer kirleticiler, iii) bir siloksan çeşidinin diğerine göre derişiminin fazla olması, iv) sıcaklık ve nem oranları [10]. Çizelge 3’de yer alan çalışmalar incelendiğinde, siloksanların adsorpsiyon prosesi ile uzaklaştırılması gerek gazda bulunan siloksanların çeşidine ve derişimine, gerekse kullanılan adsorbanın gözenek boyutu, gözenek hacmi ve spesifik yüzey alanı gibi özelliklerine bağlıdır.

Çizelge 3. Literatürde adsorpsiyon metodu kullanılarak siloksanların uzaklaştırılması için gerçekleştirilen çalışmalar

| Çalışmanın yapıldığı yer | Siloksan derişimi | Sıcaklık | Adsorban | Bulgular | Referans |
|--------------------------------|--|-------------------|---|---|----------|
| Laboratuvar ölçeğinde, Fransa | D4=30 ppmv | Oda sıcaklığı | Aktif karbon, silika jel ve zeolit | D4’ün uzaklaştırılmasında silika jel daha etkin | [23] |
| Laboratuvar ölçeğinde, Fransa | D4=400 ppmv | 27°C 45°C | Aktif karbon, silika jel ve zeolit | D4’ün uzaklaştırılması için kullanılan adsorbanlar arasında silika jel en etkin Sıcaklığın 27°C’den 45°C’a artırılması neticesinde silika jelin adsorpsiyon kapasitesinde %15 oranında azalma %70 oranında nemli olan gazın adsorpsiyon kapasitesinde kuru gaza kıyasla %90 oranında azalma | [22] |
| Laboratuvar ölçeğinde, İspanya | 1000 ppm | - | On iki farklı aktif karbon | D4’ün adsorpsiyon kapasitesi önemli ölçüde aktif karbonun dokusuna ait özelliklere bağlı | [15] |
| Tesis ölçeğinde, Türkiye | 9,5 mg/m ³ | Standart sıcaklık | Aktif karbon | Aktif karbon ile muamele sonrası silikon miktarında önemli ölçüde azalma, sülfür miktarında 2,5 kat artış | [14] |
| Laboratuvar ölçeğinde, Kore | L2=5,71 mg/L D4=7,14 mg/L D5=7,15 mg/L | 30°C | Üç farklı aktif karbon, Silika jel ve Alümina | Karbon tabanlı adsorbanlar L2’nin uzaklaştırılmasında, karbon tabanlı olmayan adsorbanlar D4 ve D5’in uzaklaştırılmasında daha etkin | [13] |

Mikro gözeneklere sahip karbon tabanlı adsorbanlar, silika jel ve alüminaya kıyasla L2'nin uzaklaştırılmasında daha etkindir. Mezo ve makro gözeneklere sahip silika jel ve alüminaya ise L2'nin giderilmesinde yetersiz olsa da D4 ve D5 için uygundur [13]. Ayrıca adsorban olarak silika jelin kullanılması önemli avantajlar sağlamaktadır. Bunlar: i) adsorbanın tekrar kullanılabilir olması, ii) aktif karbona kıyasla siloksanların yükleme kapasitesinde %50 artış sağlamasıdır [17]. Ayrıca silika jelin yüzey kimyasının siloksanlar ile benzerlik göstermesi adsorpsiyon kapasitesini olumlu yönde etkilemektedir [21]. Sigot vd. (2014) tarafından yapılan bir çalışmada D4'ün uzaklaştırılması için aktif karbon, silika jel ve zeolit kullanılmış ve bu üç adsorban arasında silika jel en etkin sonuçları vermiştir. Ancak silika jel yaygın olarak nem giderici madde olarak kullanılmaktadır. Sonuç olarak gazın nemli olması silika jelin adsorpsiyon kapasitesini %90 oranında azaltmaktadır. Ayrıca sıcaklığın 27°C'den 45°C'ye artırılması neticesinde adsorpsiyon kapasitesi düşmektedir [22]. Sigot vd. (2016) tarafından yapılan başka bir çalışmada biyogazda bulunan D4'ün uzaklaştırılması için yine aynı adsorban kullanılmıştır. Ancak bununla birlikte, adsorbanın kimyasal ve yapısal özelliklerinin adsorpsiyon kapasitesi üzerine etkisi incelenmiştir. D4'ün uzaklaştırılmasında silika jelin daha etkin olduğu sonucuna varılmıştır [23].

Siloksanların adsorpsiyonu üzerine aktif karbonun yüzey kimyası ve gözenek yapısı önemli bir etkiye sahiptir. Bu kapsamda siloksanların adsorpsiyon kapasitenin iyileştirilmesi amacıyla, aktif karbon çeşitli yöntemlerle (alkali, asit ve termal işlem) modifiye edilmektedir. Çöp gazında bulunan siloksanlar hidrofobik ve zayıf polar organik bileşikler oldukları için, hidrofobik yüzeyli aktif karbonun kullanılması siloksanların adsorpsiyon kapasitesini artırmaktadır. Aktif karbonun alkali karakteri genellikle hidrofobiziteyle ilişkilidir. Termal işlem ile karboksil grupların derişimi azaltılırken aktif karbonun alkali özelliği artırılmaktadır. Böylelikle D4'ün adsorpsiyon kapasitesi artmaktadır [15], [16]. Gerçekleştirilen bir çalışmada, D4 siloksanının uzaklaştırılması için 12 farklı aktif karbon kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında, siloksanların uzaklaştırılması için büyük BET (Brunauer–Emmett–Teller) yüzey alanı ile yüksek miktarlarda süper mikro gözeneklere (gözenek çapı < 1.7 nm) ve küçük mezo gözeneklere (gözenek çapı > 3.0 nm) sahip olan aktif karbonların uygun olduğu belirtilmiştir [24].

Çizelge 4'de, İstanbul Odayeri çöp depolama sahasında kurulan, çöp gazından elektrik enerjisi üretim tesisinde kullanılan çöp gazında tayin edilen siloksan derişimleri verilmiştir. Burada çoğunluğu L2, D4 ve D5'den oluşmak üzere çöp gazındaki toplam siloksan derişimi $9.5 \pm 0.4 \text{ mg/m}^3$ olarak tayin edilmiştir. Çöp gazı, aktif karbon sistemi ile arıtıldıktan sonra siloksanların derişimleri önemli ölçüde azalmıştır. Ancak bununla birlikte, gazdaki iyileştirme esnasında aktif karbonun tutulan kükürdü salmasından dolayı, birikintinin içindeki kükürt miktarının arttığı gözlemlenmiştir [14]. Sonuç olarak aktif karbon ile uzaklaştırma laboratuvar ölçeğinde iyi sonuçlar verse de, saha uygulamalarında ilave bazı sorunlar yaratmaktadır. Bu sorunların başında, maliyet, işçilik ve motorlarda oluşan ilave bakım masrafları gelmektedir. Bütün bu nedenlerden dolayı aktif karbonlu arıtma sistemi kullanımından vazgeçilmesine karar verilmiştir

Çizelge 4. Aktif karbon muamelesinden önce ve sonra çöp gazındaki siloksan derişimi [14].

| Bileşik | Çöp gazının derişimi ^a (mg/m ³) | |
|-----------------|--|----------------------------------|
| | Aktif karbon muamelesinden önce | Aktif karbon muamelesinden sonra |
| L2 | 1,6 ± 0,1 | <0,5 |
| L3 | <0,5 | <0,5 |
| L4 | <0,5 | <0,5 |
| D3 | <0,1 | <1,0 |
| D4 | 5,0 ± 0,2 | <0,5 |
| D5 | 2,9 ± 0,1 | <0,5 |
| D6 | <1,0 | <1,0 |
| Toplam siloksan | 9,5 ± 0,4 | 0,5 ± 0,5 |

a: Standart sıcaklık ve basınç altında

Atıktan enerji projelerinde karşılaşılan problemler ve gazda bulunan kirletici maddelerin uzaklaştırılması için kullanılan adsorpsiyon yöntemi ile ilgili çalışmaların derlendiği Kuhn vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada adsorbanın geri dönüştürülebilirliğini sağlamak için moleküler tasarımın oldukça ilgi çekici olduğu vurgulanmıştır. Bununla birlikte daha temiz gaz elde etmek için kullanılan metotların, beraberinde yüksek işletme maliyeti getirdiği belirtilmiştir. Bundan dolayı gazı saflaştırmak ve dönüştürmek için tümlşik ve çok fonksiyonlu yöntemlerin gerekli olduğu vurgulanmıştır. Sonuç olarak atıktan enerji projeleriyle ilgili gelecek yıllarda olası yenilikler arasında; kompozit adsorbanların yenilenme yeteneğine sahip olması, proses izleme ve kontrolünün geliştirilmesi, yan ürünlerin sentezi ve tekno-ekonomik analiz ile uygulanabilirliğin doğrulanması yer almaktadır [25].

4.2. Absorpsiyon

Absorpsiyon yöntemi, çöp gazından kirliliklerin uzaklaştırılması amacıyla kullanılan yöntemlerin arasında yer almaktadır. Fiziksel ve kimyasal absorpsiyon olmak üzere iki çeşidi bulunmaktadır. Absorpsiyon prosesi kullanılarak siloksanların uzaklaştırılması için gerçekleştirilen çalışmalar Çizelge 5’de verilmiştir. Buradan da görüldüğü üzere siloksanların absorpsiyonu için çeşitli sıvılar (yağlar, asitler ve su) yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte siloksanların uzaklaştırılması için kullanılan organik çözücüler arasında yer alan Selexol™ gelecek vaat eden bir absorbandır. [17]. Uçucu metil siloksanların su ile absorbe edilmesi başarılı olmasa da trimetilsilanol içeren ve suda çözünen kirlilikler bu yolla uzaklaştırılabilir. Dolayısıyla suyla yapılan absorpsiyon siloksanların biyogazdan uzaklaştırılmasından ziyade yaygın olarak adsorpsiyonun etkinliğini artırmak amacıyla ön basamak olarak kullanılmaktadır. Kimyasal absorpsiyonda kullanılan asit ve bazlar ise siloksanların giderilmesinde en etkin absorbanlardır. Ancak çevre ve insan sağlığı açısından güvenli bir yöntem olmaması ve korozyona sebebiyet vermesi nedeniyle işletme maliyetini artırmaktadır [7].

Halkalı ve doğrusal siloksanlar kimyasal ve biyokimyasal bozunmaya karşı dayanıklı bileşiklerdir. Ancak kullanılan güçlü asit ve bazlar Si-O bağlarının kırılmasını kolaylaştırmaktadır [26]. Biyogazdaki CO₂ içeriğinin yüksek olması bazik absorbanların kullanımını kısıtlamaktadır. Çünkü bazların CO₂ ile tepkimeye girerek oluşturdukları karbonatlar absorpsiyon birimlerinde birikerek birtakım problemlere neden olmaktadır [4]. Bundan dolayı siloksanların uzaklaştırılmasında sülfürik asit, fosforik asit, nitrik asit gibi asidik çözeltiler kullanılmaktadır.

Kimyasal absorpsiyon yöntemiyle, çöp gazında bulunan L2 ve D5 siloksanları 60°C’de %95 oranında gazdan uzaklaştırılmıştır. Sıcaklık 20°C’nin altındayken uzaklaştırma veriminin önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Kimyasal absorpsiyonda kullanılan asitlerin uzaklaştırma verimi yüksek olsa da, bu asitler insan sağlığı ve çevre üzerine potansiyel risk oluşturdukları için dikkatli bir şekilde kullanılmalıdır [19].

Siloksanların fiziksel absorpsiyonu, yüksek kaynama noktasına sahip organik çözücüler, su ve mineral yağlar kullanılarak yapılmaktadır [27], [28]. L2 ve D4 siloksanlarının absorpsiyonu için en iyi absorbanın, motor yağı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca uçucu metil siloksanların absorpsiyon yöntemiyle uzaklaştırılması işleminde, yüksek sıcaklıkların uygun olmadığı rapor edilmiştir. Bununla birlikte absorpsiyon etkinliğinin, absorbanın özelliğine ve gazda bulunan siloksan derişimine bağlı olarak değiştiği gibi, kalma süresi ve sıcaklık gibi işletme koşullarına bağlı olarak da değiştiği vurgulanmıştır [28]. Fiziksel absorpsiyon yönteminin başlıca dezavantajı, siloksanların tamamen uzaklaştırılmasının zor olmasıdır. Çünkü uçucu siloksanlar, yüksek gaz akış hızlarında çözücüden büyük oranda ayrılmaktadır. Eğer siloksanlar kimyasal olarak absorplanırsa, bu problemin ortadan kalkacağı düşünülmektedir [19].

Çöp gazında bulunan siloksanların absorpsiyon yöntemi ile uzaklaştırılması kapsamında kullanılan bir diğer teknoloji ise su yıkamalı kuledir. Finlandiya’da bulunan pilot tesiste yapılan çalışmaya göre su yıkamalı kule kullanılarak çöp gazında fazla miktarda bulunan D5 halkalı siloksanı ve trimetilsiloksanlar (TMS) sırasıyla %76,6 ve %90,8 oranında uzaklaştırılmıştır. Bununla birlikte başlangıç derişimine kıyasla L2 ve L3 siloksanlarının derişimleri sırasıyla %67 ve %108 oranında

artmıştır. Bu iki durum göz önünde bulundurulduğunda çöp gazındaki siloksanların toplamda %16,6 oranında uzaklaştırıldığı belirtilmiştir. Aynı çalışmada sisteme ticari bir gaz kurutma sistemi eklenerek çöp gazından kirliliklerin uzaklaştırılması üzerine etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak gaz kurutma sisteminin kullanımıyla çöp gazında bulunan siloksanların %99,1 oranında giderildiği gözlemlenmiştir [29].

Absorpsiyon yönteminin birçok açıdan daha detaylı açıklanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Yani gaz ile çözücünün temas süresi, gazdaki siloksanların difüzyon katsayısı, gazın boyutu, siloksanların absorpsiyon sıvısındaki çözünürlüğü gibi kinetik faktörlerin araştırılması gerekmektedir [30]. Ayrıca absorpsiyon, etkinliği yüksek bir yöntem olmasına rağmen saha çalışmalarında dikkatli bir şekilde uygulanmalıdır.

Çizelge 5. Literatürde absorpsiyon yöntemi kullanılarak siloksanların uzaklaştırılması için gerçekleştirilen çalışmalar

| Çalışmanın yapıldığı yer | Siloksan derişimi | Sıcaklık | Absorban | Bulgular | Referans |
|--------------------------------|--|----------------------|---|--|----------|
| Laboratuvar ölçüğünde, Almanya | L2: 1,1-4,4 g/m ³ D5: 1,0-4,3 g/m ³ | 20°C 60°C | H ₂ SO ₄ (%95-97), HNO ₃ (%65), H ₃ PO ₄ (%85) | Yüksek sıcaklıklarda gazda bulunan siloksanların %95 oranında giderimi | [26] |
| Laboratuvar ölçüğünde, Fransa | 500 mg/m ³ | Oda sıcaklığı | Silikon yağı, Seriola, Polialfaolefin | Siloksanları uzaklaştırma etkinliği bakımından en iyi absorban silikon yağı | [19] |
| Laboratuvar ölçüğünde, Fransa | L2: 800-4800 mg/m ³ D4: 800 mg/m ³ | 25°C 50°C 90°C | Motor yağı, kesme yağı, su-kesme yağı karışımı | L2 ve D4 için absorpsiyon kapasitesi en iyi olan absorban motor yağı Absorpsiyon prosesi absorbanın doğasına ve kalma süresi, sıcaklık gibi işletme koşullarına bağlı VMS'lerin absorpsiyonu için yüksek sıcaklıklar uygun değil | [28] |
| Pilot tesis, Finlandiya | 3,31 mg/m ³ | - | Su | %16,6 oranında toplam siloksan giderimi Gaz kurutma sisteminin kullanımıyla %99,1 oranında siloksan giderimi | [29] |

4.3. Soğutma

Biyogazda bulunan eser miktardaki uçucu bileşenlerin uzaklaştırması için hem kuru hem de yağ temas teknikleri kullanılmaktadır. Genellikle gaz ön muamele işlemlerinde ilk aşama, bir yoğunlaştırucu vasıtasıyla gazda bulunan su buharı ile diğer yoğunlaşmış sıvıların azaltılması veya tamamen yok edilmesidir.

Bu işlemin etkin bir şekilde yapılabilmesi için gaz sıcaklığının yaklaşık olarak -40°C olması gerekmektedir. Çünkü düşük sıcaklıklar uçucu metil siloksanların (UMS) uzaklaştırılması için uygun değildir. Daha uçucu siloksanların yoğunlaştırılması daha zordur. Dolayısıyla L2, D3 ve L3 gibi uçuculuğu yüksek olan siloksanların (bkz. Çizelge 1) biyogazdaki başlangıç derişimlerinin, soğutma yöntemiyle daha düşük değerlere düşürülmesi güçtür. D5, L4 ve D4 gibi siloksanların derişimlerini

kabul edilebilir seviyelere düşürmek içinse, sıcaklığın sıfırın altında 55°C-70°C aralığında olması gerekmektedir [10]. Bununla birlikte, daha yüksek uzaklaştırma verimine ulaşmak için yoğunlaştırma işlemi daha yüksek basınçlarda yapılmalıdır.

Çöp gazından UMS'lerin soğutma yoluyla uzaklaştırılması için gazın yoğunlaştırılması ve ardından soğuk gazın gaz motorlarında yakılmadan önce belli bir sıcaklık değerine ısıtılması işlemleri işletme açısından ek yatırım ve maliyet gerektirmektedir. Diğer saflaştırma teknolojilerine göre yüksek yatırım ve işletme maliyeti olmasından dolayı soğutma işleminin sadece yüksek akış hızlarında ve yüksek siloksan yüklerinde ekonomik olarak uygun olacağı kabul edilmektedir [7]. Sonuç olarak, hem kirlilikleri uzaklaştırma performansı yeterli olmadığı için, hem de pahalı bir işlem olduğu için soğutmayla kirliliklerin uzaklaştırılması tercih edilmemektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, çöp gazından gelen siloksanların enerji üretimindeki sınırlamaları ile gazdan uzaklaştırma yöntemleri incelenmiştir. Bu kapsamda, gazın içerisinde bulunan organometalik ve siloksanların motor aksamlarında oluşturduğu birikintinin, motor sistemini etkilediği ve enerji üretimindeki başlıca problemler arasında olduğu anlaşılmıştır. Literatür incelendiğinde meydana gelen bu birikintinin önemli bir kısmının siloksanlardan kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte oluşan birikintiden dolayı, motorun bakım periyodunun kısaldığı ve dolayısıyla işletme maliyetinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca motor aksamlarının zarar görmesiyle beraber, motorun istenilen performansta çalışmadığı vurgulanmıştır.

Gaz toplama kuyularından çıkarılan gazın bileşenlerinin derişimleri farklı olduğundan dolayı gaz motorun performansı etkilenmektedir. Günümüzde bu problemin bertaraf edilebilmesi amacıyla enerji üretim tesislerinde gaz balonları (depoları) kullanılmaktadır. İstanbul Odayeri çöp depolama sahasında kurulu olan çöp gazından elektrik enerjisi üretimi tesisinde sahadan gelen gazın bileşenlerinin dengelenmesi için çift balonlu gaz deposu kullanılmıştır. Bu sayede gaz toplama kuyularından çıkarılan çöp gazı, metan derişimi ve diğer bileşikler açısından homojen hale getirilmekte ve gaz motorlarında sürekli olarak aynı özelliğe sahip çöp gazı yakılmaktadır.

Atıktan-Enerji projelerinde karşılaşılan motorlarda birikinti probleminin çözülmesi amacıyla çöp gazından gelen siloksanların uzaklaştırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Kullanılan en yaygın uzaklaştırma yöntemleri arasında adsorpsiyon, absorpsiyon ve soğutma ağırlıklı olarak yer almaktadır. Bu yöntemlerin yanı sıra biyolojik, membran ve katalitik prosesler gibi istenmeyen maddeleri ayırma teknolojilerinin kullanıldığı az da olsa belirtilmiştir. Ancak laboratuvar ölçeğinde olan bu teknolojilerin saha ölçeğinde uygulanabilirliğinin olması için daha ileri araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu yöntemler incelendiğinde, soğutma ile siloksanların uzaklaştırılmasının hem pahalı olduğu hem de etkin bir yöntem olmadığı gerekçesiyle çok fazla tercih edilmediği anlaşılmıştır. Ayrıca absorpsiyon yöntemi ile siloksanların tamamen uzaklaştırılmasının zor olması nedeniyle siloksanların giderilmesi için önerilen en uygun bertaraf yönteminin katı adsorban kullanılarak yapılan adsorpsiyon yöntemi olduğu belirtilmiştir. Bu noktada katı adsorban olarak aktif karbonun kullanıldığı sistemler öne çıkmaktadır. Ancak aktif karbon ile muamelenin laboratuvar ölçeğinde iyi sonuçlar vermesiyle beraber pratikte uygulanmasının bazı sorunlar yarattığı vurgulanmıştır. Bu sorunların başında; i)aktif karbonun kükürt salmasından dolayı birikintideki kükürt miktarının artması, ii) turbo şarj gibi motor parçalarının zarar görmesi, iii) aktif karbonun değiştirilmesi esnasında sistemde aksama ve motorlarda oluşan ilave bakım masrafları, iv) aktif karbon uygulamasından dolayı fazladan maliyet ve işçilik gelmektedir.

Sonuç olarak, çöp gazından gelen siloksanların uzaklaştırılması için yapılması gereken, gazın içeriğinin belirlenmesi ve buna uygun pilot tesis yapılarak kullanılan yöntemin uzaklaştırma verimi, motor performansına olan etkisi ve ekonomisinin araştırılmasıdır. Bu işlemlerden sonra uygun arıtma metotları seçilerek ve tasarlanarak uygulamaya konabilir.

Kaynaklar

- [1] Zamorano M., Perez J.I.P., Paves I.A., Ridao A.R., Study of the energy potential of the biogas produced by an urban wastelandfill in Southern Spain, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(5), 909-922, 2007.
- [2] Sevimoğlu O., Assessment of limiting factors for potential energy production in waste to energy projects. *Fresenius Environmental Bulletin*, 24(7), 2362-2373, 2015.
- [3] Devil R., Appels L., Baeyens J., Energy use of biogas hampered by the presence of siloxanes, *Energy Conversion and Management*, 47, 1711-1722, 2006.
- [4] Huppmann R., Lohoff H.W., Schröder H.F., Cyclic siloxanes in the biological wastewater treatment process-determination, quantification and possibilities of elimination, *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 354(1), 66-71, 1996.
- [5] Tansel B., Surita S.C., Differences in volatile methylsiloxane (VMS) profiles in biogas from landfills and anaerobic digesters and energetics of VMS transformations, *Waste Management*, 34(11), 2271-2277, 2007.
- [6] Adanez J., Abad A., Garcia-Labiano F., Gayan P., de Diego L.F, Progress in chemical-looping combustion and reforming Technologies, *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(2), 215-282, 2012.
- [7] Urban W., Lohmann H., Gomez J.I.S., Catalytically upgraded landfillgas as a cost-effective alternative for fuelcells, *Journal of Power Sources*, 193(1), 359-366, 2009.
- [8] Florez-Alvarez J., Egusquiza E., Analysis of damage caused by siloxanes in stationary reciprocating internal combustion engines operating with landfill gas, *Engineering Failure analysis*, 50, 29-38, 2015.
- [9] Sevimoğlu O., Tansel B., Effect of persistent trace compounds in landfill gas on engine performance during energy recovery: A case study, *Waste Management*, 33(1), 74-80, 2013.
- [10] Ajhar M., Travasset S., Yüce S., Melin T., Siloxane removal from landfill and digester gas – A technology overview. *Bioresource Technology*, 101, 2913-2923, 2010.
- [11] Rasi S., Lantela J., Rintala J., Trace compounds affecting biogas energy utilization – A review, *Energy Conversion and Management*, 52, 3369-3375, 2011.
- [12] Arnold L., Reduction and monitoring of biogas trace compounds, VTT Technical Research Centre of Finland, 2009.
- [13] Nam S., Namkoong W., Kang J.H., Park J., Lee N., Adsorption characteristics of siloxanes in landfill gas by the adsorption equilibrium test, *Waste Management*, 33(10), 2091-2098, 2013.
- [14] Sevimoğlu O., Tansel B., Composition and source identification of deposits forming in landfill gas (LFG) engines and effect of activated carbon treatment on deposit composition, *Journal of Environmental Management*, 128, 300-305, 2013.
- [15] Cabrera-Codony A., Montes-Moran M.A., Sanchez-Polo M., Martin M.J., Gonzalez-Olmos R., Biogas upgrading: Optimal activated carbon properties for siloxane removal, *Environmental Science and technology*, 48, 7187-7195, 2014.
- [16] Gong H., Chen Z., Fan Y., Zhang M., Wu W., Surface modification of activated carbon for siloxane adsorption, *Renewable Energy*, 83, 144-150, 2015.
- [17] Wheless E., Pierce J., Siloxanes in Landfill and Digester Gas Update, SWANA 27th Landfill Gas Conference, San Antonio , North America; 2004.
- [18] Surita S.C., Tansel B., Preliminary investigation to characterize deposits forming during combustion of biogas from anaerobic digesters and landfills, *Renewable Energy*, 80, 674-681, 2015.
- [19] Schweigkofler M., Niessner R., Removal of siloxanes in biogases, *Journal of Hazardous Materials*, 83(3), 183-196, 2001.
- [20] Finocchio E., Montanari T., Garuti G., Pistarino C., Federici F., Cugino M., Busca G., Purification of biogases from siloxanes by adsorption: on the regenerability of activated carbonsorbents, *Energy & Fuels*, 23, 4156-4159, 2009.
- [21] Varaprath S., Stutts D.H., Kozerski G.E., A primer on the analytical aspects of silicones at trace levels-challenges and artifacts – a review, *Silicon Chem*, 3:79-102, 2006.

- [22] Sigot I., Ducom G., Benadda B., Laboure C., Adsorption of octamethylcyclotetrasiloxane on silica gel for biogas purification, *Fuel*, 135, 205-209, 2014.
- [23] Sigot I., Ducom G., Benadda B., Laboure C., Comparison of adsorbents for H₂S and D₄ removal for biogas conversion in a solid oxide fuel cell, *Environmental Technology*, 37:1, 86-95, 2016.
- [24] Yu M., Gong H., Chen Z., Zhang M., Adsorption characteristics of activated carbon for siloxanes, *Environmental Chemical Engineering*, 1, 1182-1187, 2013.
- [25] Kuhn J.N., Elwell A.C., Elsaed N.H., Joseph B., Requirments, techniques, and costs for contaminants removal from landfill gas, *Waste Management*, 2017 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.001>).
- [26] Gilbert A.R., Kantor S.W., Transient catalysts fort he polymerization of organosiloxanes, *Journal of Polymer Science*, 40(136), 35-58, 1959.
- [27] Ghorbel L., Tatin R., Couvert A., Relevance of an organic solvent for absorption of siloxanes, *Environmental Technology*, 35:3, 372-382, 2014.
- [28] Devia C.R., Subrenat A., absorption of a linear (L₂) and a cyclic (D₄) siloxane using different oils: application to biogas treatment, *Environmental Technology*, 34:23, 3117-3127, 2013.
- [29] Lantela J., Rasi S., Lehtinen J., Rintala J., Landfill gas upgrading with pilot-scale water scrubber: Performance assessment with absorption water recycling, *Applied Energy*, 92, 307-314, 2012.
- [30] Piechota G., Iglinski B., Buczkowski R., Development of measurement techniques for determination main and hazardous components in biogas utilised for energy purposes, *Energy Conversion and Management*, 68, 219-226, 2015.

HARRAN OVASINDA YAPILAN ARAZİ TOPLULAŞTIRMA ÇALIŞMALARINA SULAMA TATBİKAT PROJELERİNİN GECİKMESİ VE SULAMA SİSTEMİ DEĞİŞİKLİKLERİNİN ETKİLERİ

Yaşar İNCEYOL^{1*}, Tayfun ÇAY²

¹ Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Adıyaman, 02040, Türkiye

² Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Selçuklu-Konya, 42130, Türkiye

Geliş tarihi: 17.10.2017 Kabul tarihi: 17.11.2017

ÖZET

Kırsal arazi düzenlemelerinin temelini oluşturan arazi toplulaştırması projeleri sulama projeleriyle birlikte uygulanır. Bu nedenle bu projelerin hazırlanması ve uygulanması aşamalarında bazı sorunlarla karşılaşılır. Sulama tatbikat projeleri arazi toplulaştırma projelerindeki blok planlarının temel altlığıdır. Bu nedenle, sulama tatbikat projelerinin gecikmesi veya uygulama esnasında değiştirilmesi arazi toplulaştırma çalışmalarında önemli oranda aksamalara, gecikmelere ve işgücü kaybına neden olur. Bu çalışma, Harran Ovasında 1989-1997 yılları arasında yapılan arazi toplulaştırma çalışmalarını kapsamaktadır. Bu çalışmada, Harran Ovasında yapılan arazi toplulaştırma çalışmalarının sulama projeleri ile olan ilişkileri incelenmiş, sulama tatbikat projelerinin gecikmesi ve sulama sisteminin değiştirilmesinin arazi toplulaştırma çalışmaları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma 3 aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada arazi toplulaştırma proje alanlarının birden fazla sulama proje alanını kapsamaması nedeniyle oluşan sorunlar incelenmiş, ikinci aşamada ise sulama tatbikat projelerinin gecikmesinden kaynaklanan sorunlar ele alınmıştır. Üçüncü aşamada, tescil aşamasından sonra yapılan sulama sistemi değişiklikleri ve bunun arazi toplulaştırmasına etkisi üzerinde durulmuştur. Ayrıca, bu sorunların çözümü için uygulayıcı kurumların projelerin hangi aşamalarında koordinasyona gitmeleri gerektiği konusunda öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: *Harran Ovası, Arazi Topplulaştırması, Sulama tatbikat projesi, Koordinasyon*

THE EFFECTS OF DELAYS IN IRRIGATION IMPLEMENTATION PROJECTS AND IRRIGATION SYSTEM CHANGES ON LAND CONSOLIDATION WORKS PERFORMED IN HARRAN PLAIN

ABSTRACT

Land consolidation, which forms the basis of rural land regulations, is implemented together with irrigation projects. Accordingly, some problems are encountered during the preparation and application of both projects. Irrigation implementation projects form the basis of block plans in land consolidation projects. For this reason, delays or alterations during the implementation of irrigation projects causes considerable disruptions, delays and loss of labor in land consolidation studies. This study covers land consolidation studies conducted between 1989-1997 in Harran plain. In this study, the relationship between land consolidation and Irrigation implementation projects on Harran plain was investigated and also the effects of delays in Irrigation implementation projects and

* e-posta: yinceyol@adiyaman.edu.tr

changes of irrigation systems on land consolidation were studied. In the first stage, the problems that arise due to the coverage of multiple irrigation project areas by land consolidation project areas were examined. In the second phase, problems arising from the delay of Irrigation implementation projects were handled. In the third step, changes in the irrigation system after the registration phase and its impact on land consolidation were emphasized. Furthermore, proposals have been extended to implementing administrations to determine the phases of the projects that should be coordinated to resolve these problems.

Keywords: *Harran plaine, Land Consolidation, Irrigation implementation projects, Coordinations*

1. Giriş

Sürdürülebilir kırsal arazi düzenlemelerinin uygulanmasında en etkili araçlardan birisi arazi toplulaştırmasıdır (AT). AT, kırsal alanda çiftçilere ait dağınık halde ve çoğunlukla bozuk geometrik şekillerdeki tarım parsellerinin bir araya toplanarak modern tarım tekniklerinin uygulanmasına imkân verecek düzgün geometrik şekilli parseller haline getirilmesi ve bu parsellerin yol ve sulama ağına bağlanması sürecidir.

AT çalışmaları, ayrıca, kırsal kalkınmanın sağlanması ve toprak kullanım etkinliğini arttırmak için kırsal yaşamın doğal işleyişine hukuksal ve kamusal bir müdahale ile toprak mülkiyetini yeniden planlayan bir araçtır [1-3]. AT, dinamik yapısı ile gıda güvenliğini sağlamak, çevreyi korumak, mülkiyet ve sınırlarla ilgili çatışmaları çözmek, kırsal yapının gelenek ve kültür değerlerini canlı tutmak, arazi yönetimi politikaları ve uygulamaları için optimum sonuçlar elde etmek, fiziksel çevrenin düzenlenmesi sağlamak gibi işlevlere de sahiptir [4]. AT projeleri, maliklerin kişi başına ortalama parsel boyutunu arttırmak ve tarım alanlarındaki tarım gelirlerini arttırmak için yapılan çalışmaları da kapsar [5,6]. Bütün bu kapsam dikkate alındığında kırsal alanda çalışanların yaşam koşullarının iyileştirilmesi, tarımda beklenen verim artışının sağlanması, kırsal alanda önemli bir sorun olan mülkiyet sorunlarının çözülmesi ve doğal çevrenin korunması için AT çalışmalarının vazgeçilmez bir araç olduğu söylenebilir.

Harran Ovasındaki AT çalışmaları “3083 sayılı Sulama Alanlarında Arazi Düzenlemesine Dair Tarım Reformu Kanunu” kapsamında yürütülmektedir. Bölgede sulama yapılacak alanların planlanması, haritalarının ve projelerinin hazırlanması, sulama tesis ve inşaatının yapımına başlanması, Devlet Su İşleri (DSİ) idaresi tarafından yürütülmektedir. Arazi toplulaştırma işlerinin planlanması, harita ve projelerinin hazırlanması ve uygulanması, Tarım Reformu Genel Müdürlüğü (TRGM) tarafından yürütülmektedir. Bu bağlamda her iki kamu kurumu hem kendi aralarında hem de yüklenici firmalarla sürdürülebilir bir koordinasyon içinde olmak durumundadır.

Sulama projeleri ile arazi toplulaştırma projelerinin birbirini etkiler biçimde eşgüdümlü ve paralel karşılaştırılması ve yürütülmesi gerekli bulunmaktadır [7]. Arazi düzenleme çalışmalarında, sulama ve drenaj tesisleri ile ulaşım ağı AT projelerinin iskeletini oluşturan özel bir öneme sahiptir. Yeni toprak düzeni bu iskelet üzerine yerleştirilmektedir. Arazi düzenleme sonrası oluşacak parsellerin yerleştirilmekte olduğu bloklar, kanallar ve yollarla sınırlanan arazi kısımları olmaktadır [8]. Bu nedenle AT projelerinin başlama zamanlamasının çok iyi ayarlanması gerekir. En azından sulama tatbikat projelerinin, arazi toplulaştırma çalışmalarına başlamadan önce bütün uygulama alanında bitirilmesi gerekmektedir. Sulama tatbikat projeleri AT projeleri başladıktan sonra değiştirilmemeli, çok zorunlu durumlarda ilgili kurumla mutlaka koordinasyona gidilmelidir.

Sulama inşaatlarının DSİ, arazi toplulaştırma çalışmalarının TRGM tarafından yürütülmesi sonucu her iki işin projelerinin hazırlanması, ödeneklerin temin edilmesindeki darboğazların olması, başlama ve bitiş tarihleri arasındaki değişiklikler ve işlerin farklı yükleniciler tarafından yapılması sonucunda uygulamanın tıkanması noktasına gelen eşgüdüm sorunları ortaya çıkarmaktadır. [7].

Bu çalışmada; Harran Ovasında 1989-1997 yılları arasında yapılan AT projeleri ile sulama projeleri arasındaki ilişkiler incelenmiş, sulama tatbikat projelerinin gecikmesi ve sulama sisteminin değiştirilmesinin AT çalışmaları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Harran Ovasında AT proje alanlarının birden fazla sulama proje alanını kapsamaması nedeniyle oluşan sorunlar incelenmiştir. Sulama tatbikat projelerinin gecikmesi ve AT projelerinin tescil aşamasından sonra yapılan sulama sistemi değişikliklerinin, AT proje uygulamalarını nasıl etkilediği örneklerle ele alınmıştır. Ayrıca, bu sorunların çözümü için uygulayıcı kurumların projelerin hangi aşamalarında koordinasyona gitmeleri gerektiği konusunda öneriler sunulmuştur.

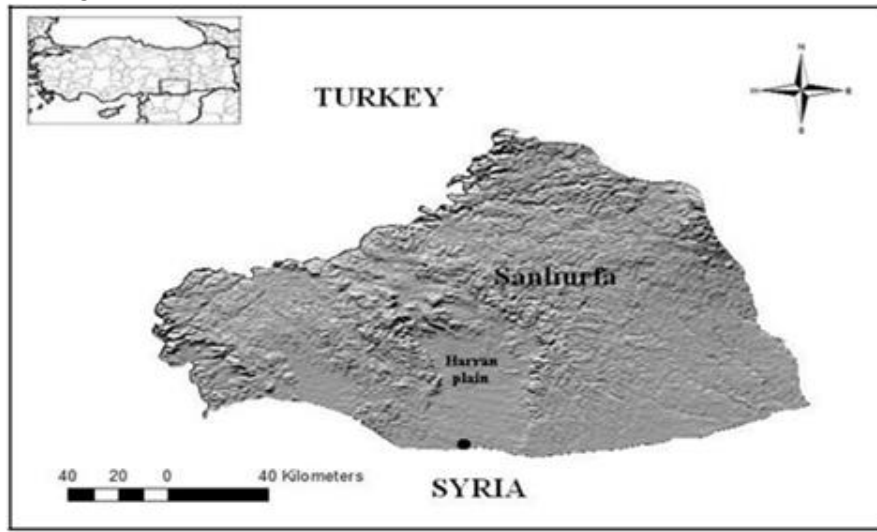
2. Çalışmanın Önemi

Proje başlangıcında 80 000 hektarlık alanı kapsayan Harran Ovası Arazi Toplulaştırma Projesi, 40 000 hektarlık iki kısım halinde iki firmaya yaptırılmıştır. Daha sonra yapılan ilavelerle 1. kısım 45 750 hektara, 2. kısım da 42 703 hektar olmak üzere toplam proje alanı 88 453 hektara çıkarılmıştır. Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP) alanında sulanacak olan 1.822 milyon hektarlık alanın 932 250 hektarı Şanlıurfa ilindedir. Buna göre GAP projesinde sulanacak alanın yaklaşık %51'i Şanlıurfa'dadır. Harran Ovasındaki AT çalışmaları bu alanın yaklaşık %9,5'idir. 1961-2002 yılları arasında Türkiye'nin tamamında biten AT miktarı ise 450 423 hektardır [9]. Harran Ovası AT miktarının tüm Türkiye'de biten AT miktarına oranı ise yaklaşık %24,4'tür. Ayrıca Türkiye'de toplam 14 milyon hektar sulu ve kuru tarım arazisinde AT uygulamalarına ihtiyaç duyulmaktadır [9]. Bu oranlar dikkate alındığında; Harran Ovasındaki AT projeleri bölgede yapılan ilk AT çalışması, Türkiye'de ise tek seferde yapılan en büyük AT projesi olma özelliğine sahiptir. Bu nedenle Harran Ovasındaki AT uygulamasının ve uygulama sonrasındaki durumun çok iyi analiz edilmesi gerekir. Bu analiz sonuçları, önümüzde yapılacak olan çok büyük miktarlardaki AT çalışmaları için yol gösterici olacaktır.

3. Materyal ve Metot

3.1. Çalışma alanı

Harran Ovası'nın çevresi kuzeyde Urfa dağları, batıda Fatik dağları, doğuda ise Tektek dağları ile çevrilmiştir. Ovanın deniz seviyesinden yüksekliği 350-500 metre arasında değişmektedir. Eğim kuzeyden güneye doğru olup Şanlıurfa merkez yerleşim yerinin bulunduğu yerden yaklaşık 500 metreden başlamakta ve Akçakale bölgesinde 350 metreye kadar düşmektedir [10]. Şekil 1'de çalışma alanının konumu gösterilmiştir.



Şekil 1. Harran Ovasının konumu

3.2. Yöntem

Devlet Su İşleri (DSİ) bölge müdürlüğünden alınan sulama haritası üzerine sulama bölgeleri ve AT bölgeleri farklı renklerde çizilerek çakışma durumları gösterildi (Şekil 2). Şekil 2'deki gösterimlere göre sulama tatbikat projelerinin gecikmesi ve sulama sisteminin değiştirilmesinin AT çalışmaları nasıl etkilediği bölüm 3.2.1 ve 3.2.2'de incelendi. Ayrıca Şekil. 3'de söz konusu alandaki AT projelerinin tescil edilmesinden sonra yapılan sulama sistemi değişikliklerinin AT proje alanlarında hangi bölgeleri etkilediği gösterilerek, ikinci kez AT projesi hazırlanan bölgeler ve bu durumun AT çalışmalarına etkileri bölüm 3.2.1'de incelendi.

3.2.1. Sulama tatbikat projelerinin gecikmesinden kaynaklanan sorunların incelenmesi

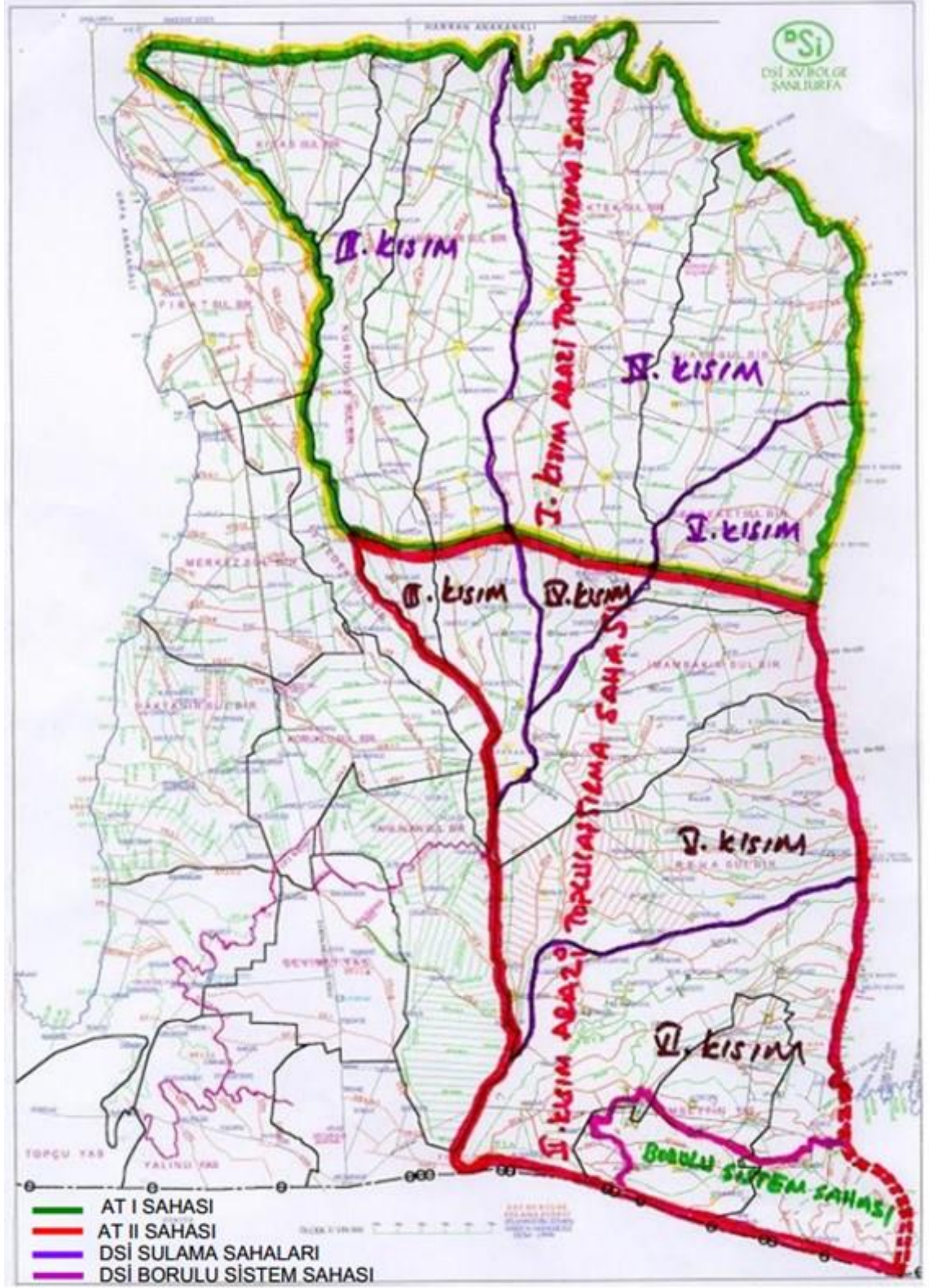
Devlet Su İşleri GAP'ta sulama projelerini havza bazında ele almakta; toprak, su ve bitki kaynaklarını ele alarak, bu kaynakların birbiriyle olan ilişkileri inceleyip sulama kriterleri ve yöntemleri geliştirmektedir. Arazi toplulaştırma uygulamasının kararlaştırıldığı 148 000 hektarlık Şanlıurfa ve Harran Ovalarında [11] projelendirme çalışmaları ve sulama inşaatı, bu kriterler doğrultusunda devam etmektedir. Çok büyük yatırımları gerektiren, çok amaçlı ve/veya çok üniteli bir projenin aşamalı olarak gerçekleştirilmesine çalışılması çok doğaldır. Ancak projenin aşamalı olarak gerçekleştirilmesinin getirip götürdükleri planlama raporlarında ayrıntılı olarak irdelenmiş olmalı, diğer bir deyişle planlama raporları, uygulamaya yönelik karar alıcılara, projenin ekonomisinde olumsuzluğa yol açmayacak biçimde aşamalı gerçekleştirmeye olanak verecek esnekliği sağlamalıdır [12].

Harran Ovasında topoğrafik yapıya göre hazırlanan DSİ sulama projeleri ile köy sınırları esas alınarak belirlenen arazi toplulaştırma proje sınırları birbiri içine girmiş durumdadır (Şekil 2). Şekil 2'de sınırları gösterilen 45 750 hektarlık Harran Ovası AT I. kısım proje sahasında; DSİ 3., 4., ve 5. kısım sulama projeleri kısmen yer almaktadır. Bu proje 1991'de başladığında, DSİ 4. kısım sulama sahasının yer teslimi yüklenici firmaya ancak 1996 yılında yapmıştır [13]. Bu alanda geciken sulama tatbikat projeleri onaylandıktan sonra AT I. kısım proje sahasında blok planları tamamlanabilmiştir [14].

Şekil 2'de sınırları gösterilen Harran Ovası AT II. kısım proje sahasında; DSİ 3., 4., 5., ve 6. kısım sulama alanlarının bir kısmı yer almaktadır. Harran Ovası AT II. kısım işi (42 703 hektar) 1991'de başladığında, DSİ 3., 4. ve 5. kısım sulama bölgelerindeki işler başlamış ancak DSİ 6. kısım sulama bölgesindeki işler (19 000 hektarlık alan) henüz ihale bile edilmemiştir. DSİ 3., 4. ve 5. kısım sulama bölgelerindeki 24 845 hektarlık alanın tatbikat projeleri (%58) onaylandığı için ancak bu sahaya ait blok planları tamamlanabilmiştir. Bu iş alanının 19 000 hektar gibi büyük bir kısmını kapsayan 6. kısım sulama sahası (%42), DSİ tarafından ancak 1994 yılında ihale edilmiştir. Bu nedenle bu bölgede blok planı hazırlama çalışmalarına 1995 yılında başlanabilmiştir. AT proje sahasında hem birden fazla sulama proje sahasının olması hem de 6. kısım sulama bölgesinin AT proje işi başladıktan 3 yıl sonra ihale edilmesi, blok planlarının hazırlanmasında gecikmelere neden olmuştur. Blok planları AT çalışmalarının temel dayanağı olduğu ve hemen her çalışma blok planlarına bağlı olduğu için, tüm AT projesinin hazırlanma süresi gecikmeye uğramıştır [13]. Bu durum önemli bir planlama ve koordinasyon eksikliği olarak, AT 2 proje işinin bir bütün olarak ele alınmasını engellemiştir.

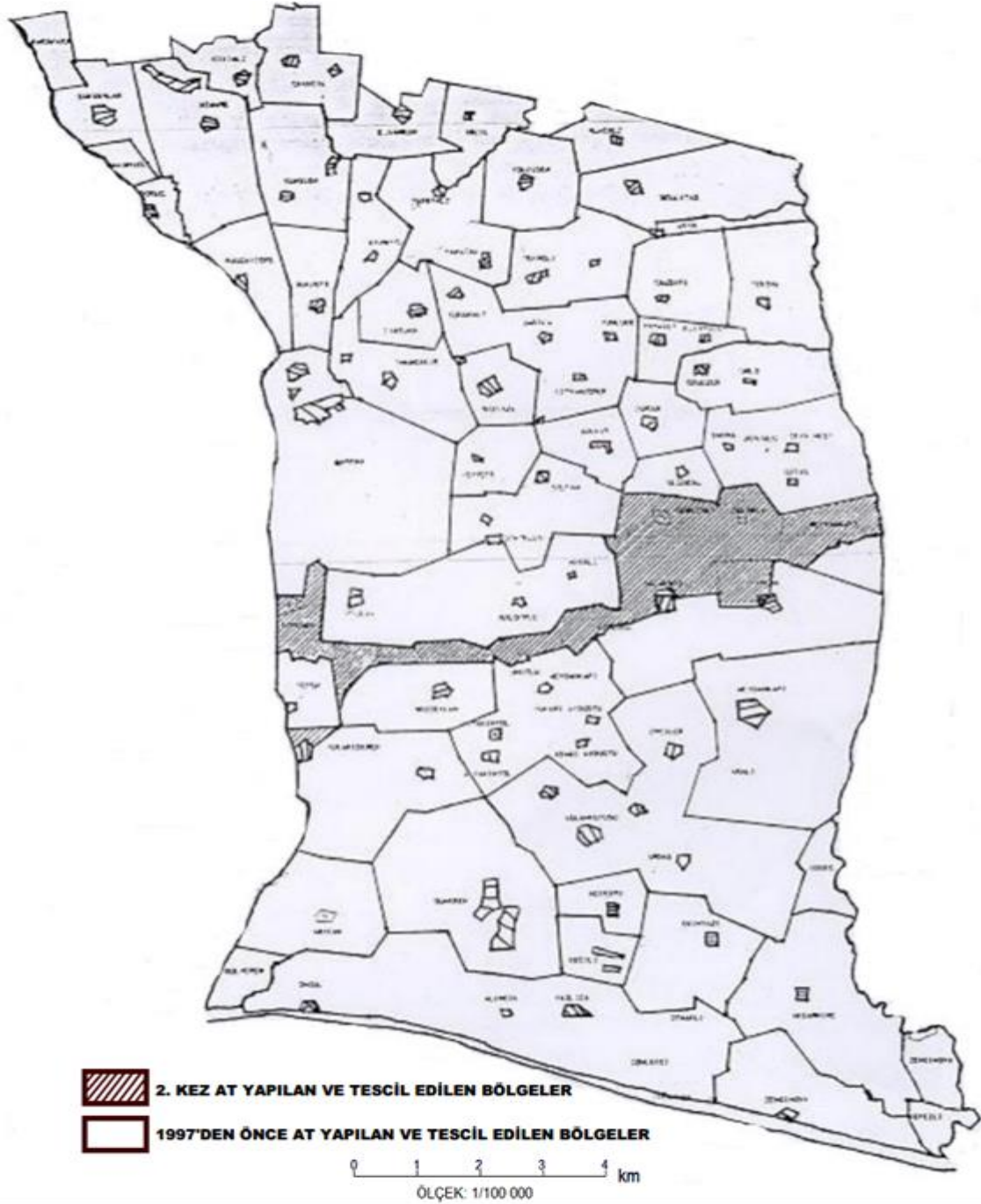
AT II proje sahasında sulama tatbikat projelerinin gecikmesinden kaynaklanan bir diğer sorun tescil ve yer teslimi aşamasından sonra ikinci kez AT ve tescil işleminin yapılmasıdır. DSİ 4. kısım sulama bölgesinin 1996'da yer tesliminin yapılması nedeniyle sulama tatbikat projeleri ancak bu tarihten sonra onaylanmıştır. AT yüklenici firması işe 1991'de başlaması ve 2 yıllık proje tamamlama süresini geçirmesi nedeniyle şu şekilde bir yol izlemiştir. 4. kısım sulama sahası sınırında kalan Yukarı Deren, Küplüce, Meydankapı, Yukarı Yakınyol, Cepkenli, Gazlıkuyu ve Avlak köylerinde yol parsel sınırı gibi sabit tesisler dikkate alınarak genel sınırlar oluşturulmuş ve bu sınırlar içinde AT çalışması yapılmış ve 1996'da tescil işlemleri yapılarak yer teslimleri yapılmıştır. 1996'daki tescil işleminden sonra 4. kısım

sulama tatbikat projeleri onaylandığı için AT yüklenici firması işini bitirdiği ve yer teslimi yapmasına rağmen söz konusu alanlarda ikinci kez AT yapmak zorunda kalmıştır. Bu köylerde yapılan AT projeleri 1997'de tekrar tescil edilmiş ve yer teslimleri yapılmıştır [13]. İkinci defa AT yapılan köyler Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Harran Ovasının sulama bölgeleri ve AT bölgelerinin çakışma durumu [15]

AT proje sahasında sulama tatbikat projelerinin gecikmesinden kaynaklanan bir diğer sorun da uygulamanın 7 yıla sarkmasıdır. Bu durum, 1991-1992 yıllarında güncelleştirilen haritaların, ölçümü yapılan bina ve diğer tesislerin uygulamanın son yıllarında yetersiz duruma düşmesine neden olmuş ve son yıllarda haritaların yeniden güncelleştirilmesini gerekli kılmıştır [13].



Şekil 3. Harran Ovası AT II sahasında ikinci kez AT yapılan köyler [15]

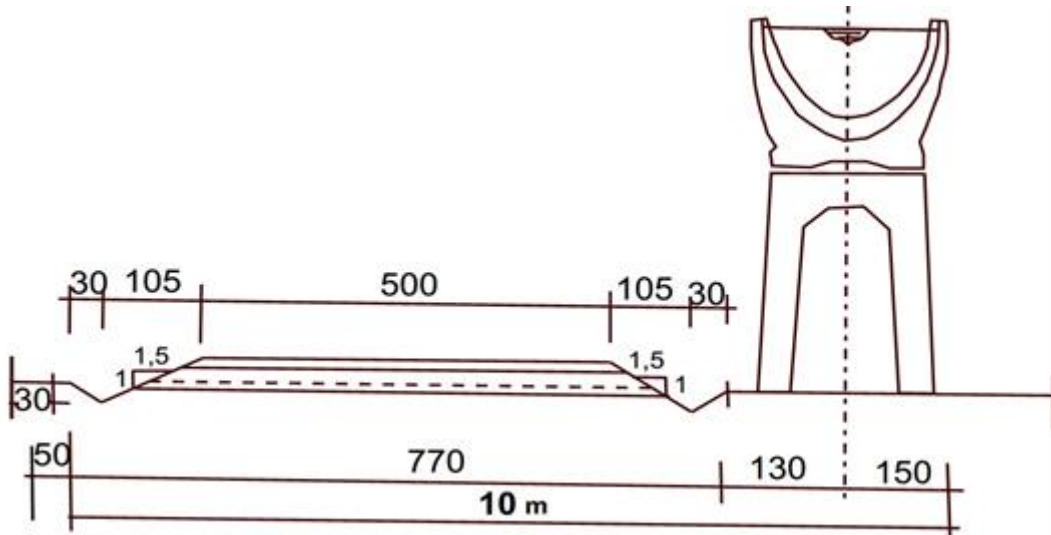
3.2.2. Sulama sisteminin değiştirilmesinden kaynaklanan sorunların incelenmesi

DSİ sulama projelerinde genelde talep sistemi ve yüzeysel sulama yöntemlerini (açık kanallı şebeke, kanaletli şebeke) esas almaktadır. Ancak ülkemizdeki nüfus artışı, göç ve birim nüfus bazına düşen su talebinin artması, su kaynaklarının kullanımında su tasarrufunu gündeme getirmiştir [16]. Büyük sulama projelerini tesis eden DSİ 'de, 1990'lardan sonra su tasarrufu için sulama projelerinde, su kaynaklarının optimum seviyede kullanımını sağlayan basınçlı sulama yöntemlerini (borulu sistemler) tercih etmeye başlamıştır.

DSİ bu amaçla Harran Ovası 6. kısım sulamasının güneydoğu bölümünde sistem değişikliğine giderek açık kanallı sistemden kapalı sisteme yani borulu sisteme geçme kararı almıştır. Bu saha Şekil 2' de gösterilmiştir. DSİ bu bölgede borulu sisteme geçme kararını, AT II tescil çalışmaları bitirildikten sonra (1997) [13] vermiştir. Borulu sistemde, sutaşıma boruları arazi topoğrafyasına göre en ekonomik olacak şekilde yeraltından geçirilmekte ve parsel sınırlarına uyma zorunluluğu bulunmamaktadır. Ancak arazi toplulaştırması bittiği ve parsel sınırları tescil olduğu için DSİ'nin blok planlarındaki tescilli parsel sınırlarına uyma zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. DSİ ile yapılan görüşmelerde borulu sistem uygulanacak alanda, tescilli parsel sınırlarına uyularak, bu güzergâhlarda kazı yapıp boruların yeraltından geçirilmesi şeklinde bir çözümün bulunduğu belirtilmiştir. Bu çözüm şeklinde, açık sisteme göre projelendirilen sulama kanalı güzergâhları, borulu sistemdeki güzergâhlar olarak aynen alınacaktır.

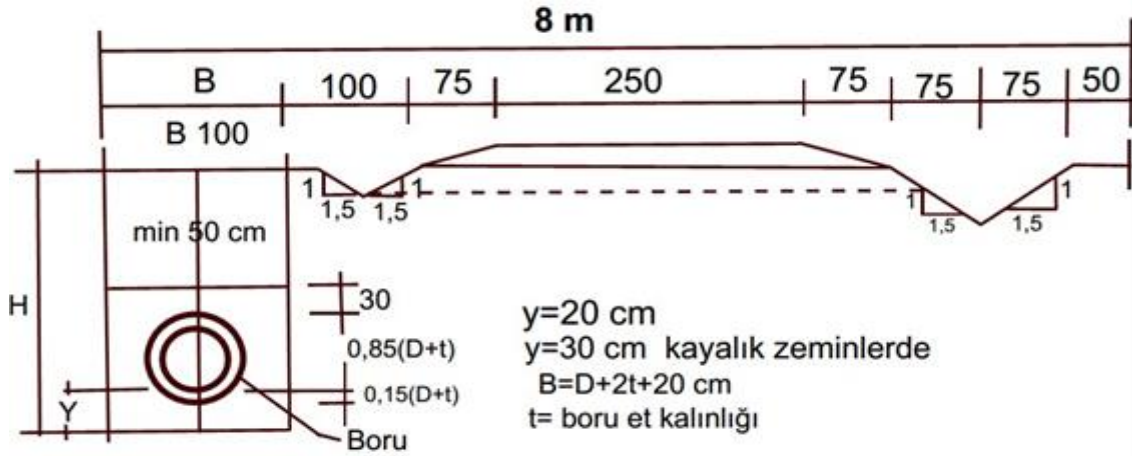
Borulu şebekelerin, arazi kaybı olmaması, geçit yapılarına gerek görülmemesi, bakım ve onarım giderlerinin düşük olması ve su kayıplarının az olması gibi üstünlükleri vardır. Boru hatlarının tarla sınırlarını dolaşması zorunlu olmadığından, kanaletli hatlara göre boylar kısalmaktadır. Eğimli arazilerde uygun basınç sağlanarak küçük boyutlu borular kullanılabilir ve borulu şebekeler ekonomik olmaktadır [17]. Tescil nedeni ile borulu sistemde kanaletli sistem güzergâhlarına uyma zorunluluğu, en azından borulu sistemi ekonomik olma amacından uzaklaştırır.

Sulama sistemi değişikliğinin neden olduğu bir diğer sorun da borulu sistem ile kanaletli sistem arasındaki kesit genişliği farkıdır. DSİ'nin diğer bölgelerde uyguladığı borulu sistem tatbikat projelerine göre, borulu sistem kesit genişliği işletme bakım yolu ile birlikte (kullanılacak boru çapına bağlı olarak) yaklaşık 8 m olarak görülmektedir (Şekil 5). AT sahasındaki kanaletli sistemde, kanal kesit genişlikleri ise işletme bakım yolu ile birlikte 10 m'dir (Şekil 4). Bu 10 m'lik kesit genişliği, kanaletli sistemde kanal ve tarla içi ulaşımı sağlayan yol genişliği olarak ayrılmış ve tescil edilmiştir. DSİ, bu bölgede, tescil edilen kanaletli güzergâhlara uyduğunda, kesit genişliğine de uymak durumundadır. Bu halde de borulu sistem maliyeti artacaktır. Kesit genişliğine uyulmaması durumunda ise, AT açısından yol ve kanallar için, sulama projesinde öngörülenden daha fazla alanlar bırakılmış olacaktır.



Şekil.4 Kanaletli Sistemde Tip Kesit

Kesit genişlikleri karşılaştırılırken bir hususun daha göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Kanaletli sistemde işletme bakım yolunda platform genişliği 5 m olarak belirlenmişken (Şekil 4), borulu



sistemde platform genişliği 2.50 m alınmıştır (Şekil 5). Kanal kenarlarındaki işletme bakım yolları aynı zamanda tarla içi ulaşımı sağlayan yollar olarak kullanılacaktır. Bu durumda yüklü araçların karşılıklı geçişleri düşünüldüğünde, 2.50 m platform genişliğinin yeterli olmadığı görülecektir.

Şekil.5 Borulu Sistemde Tip Kesit

4. Sonuç ve Öneriler

Sulama tatbikat projeleri, AT projelerindeki blok planlarının iskeletini oluşturmaktadır. Sulama tatbikat projelerinin gecikmesi, başlangıçta iki yıl olarak öngörülen AT çalışmalarını 7 yıla uzatmıştır. Bu durum AT projelerinin bir bütün olarak ele alınmasını engellemiş, Yukarı Deren, Küplüce, Meydankapı, Yukarı Yakınyol, Cepkenli, Gazlıkuyu ve Avlak köylerinde iki kez toplulaştırma yapılmasına neden olmuştur. Sorunun çözümü için, DSİ ve TRGM hem projelerin hazırlanması ve ihale aşamalarında hem de uygulama sırasında etkileşimli bir koordinasyona gitmelidir. Bu koordinasyonda, her sulama bölgesi tek bir AT alanı olarak belirlenmelidir. DSİ sulama tatbikat projeleri onaylandıktan sonra AT projeleri ihale edilmelidir. Ayrıca sulama tatbikat projeleri AT amaç ve ilkeleri de göz önünde bulundurularak hazırlanmalıdır.

AT I ve AT II proje sahasında sulama tatbikat projelerinin gecikmesi uygulamanın 7 yıla sarkmasına neden olmuştur. Bu durum, 1991-1992 yıllarında güncelleştirilen haritaların, ölçümü yapılan bina ve diğer tesislerin uygulamanın son yıllarında yetersiz duruma düşmesine neden olmuş ve son yollarda haritaların yeniden güncelleştirilmesini gerekli kılmıştır.

DSİ, AT II sahasının tescilinden sonra 6. kısım sulamasının güneydoğu bölümünde açık kanallı sistemden borulu sisteme geçerek, sistem değişikliği kararı almıştır. Bu durum, sulama tekniğince tatbikat projelerinde güzergâh değişikliğini de öngörmektedir. Ancak arazi toplulaştırma projeleri tescil edildiğinden, bu bölgede açık sisteme göre hazırlanan tatbikat projelerindeki güzergâhlara uyma zorunluluğunu doğurmuştur. AT çalışmaları başladıktan sonra DSİ zorunlu nedenlerle sulama sistemi değişikliği yapacaksa, DSİ ve TRGM koordinasyona giderek bu bölge AT sahası dışında bırakılmalıdır. Sistem değişikliği yapılan alandaki tatbikat projeleri onaylandıktan sonra, toplulaştırma çalışmaları devam ettirilebilir. Tescil aşamasından sonra kararlaştırılan sulama sistemi değişiklikleri için, DSİ ve TRGM ortak görüşmeler yoluyla söz konusu alanlarda ikinci kez AT yapılması yoluna gidilebilir.

Teşekkür

Bu makale; “Güneydoğu Anadolu Projeleri’nde (GAP) Yapılan Arazi Toplulaştırma Çalışmalarında Koordinasyon ve Planlama Sorunları” adlı yüksek lisans tezinden yararlanılarak hazırlanmıştır.

Kaynaklar

- [1] Crecente R. Alvarez C. Fra U. Economic, social and environmental impact of land consolidation in Galicia. Land use policy 2002; 19(2):135–147.
- [2] Sklenicka P. Applying evaluation criteria for the land consolidation effect to three contrasting study areas in the Czech Republic. Land use policy 2006; 23(4):502–510.
- [3] Sonnenberg J. K. B. Fundamentals of Land Consolidation as an Instrument to Abolish Fragmentation of Agricultural Holdings. In: Proceedings of the FIG 12th International Congress, Washington, D.C. USA, 2002.
- [4] Gür M. Çağdaş V. Demirel Z. Land Consolidation as a Tool of Rural Sustainable Development. In: 2. FIG Regional Conference, Marrakech, Morocco; 2003.
- [5] Cay T. Ayten T. İscan F. Effects of different land reallocation models on the success of land consolidation projects: Social and economic approaches. Land use policy 2010; 27(2010): 262–269.
- [6] Jansen L. J. M. Karataş M. Küsek G. The Computerised Land Re-Allotment Process in Turkey and the Netherlands in Multi-Purpose Land Consolidation Projects. In: FIG Congress 2010 Facing the Challenges – Building the Capacity Sydney, Australia; 2010.
- [7] Bayram M. Erkan H. Türkiye’de Arazi Toplulaştırması, Uygulamalar, Sorunlar, Öneriler. HKMO 6. Harita Kurultayı, Ankara; 1997.
- [8] Volkan F. Erkan H. Arazi toplulaştırmada Sulama-Ulaşım Ağı İlişkileri ve Eşgüdüm Sorunları. HKMO 6. Harita Kurultayı, Ankara; 1997.
- [9] Küsek G. Arazi Toplulaştırma. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 2. Kadastro Kongresi, Ankara; 2008.
- [10] Çullu ve ark. 2000; Aktaran: Aydoğdu A. Tarini M. Akçar H. T. Aydemir A. Harran Ovasında Coğrafi Bilgi Sistemleri Ve Uzaktan Algılama İle Tarım Arazilerinde Amaç Dışı Kullanımın Tespiti. TMMOB Coğrafi Biği Sistemleri Kongresi, İzmir; 2009.
- [11] Faikoğlu S. DSİ Güneydoğu Anadolu Projesinin Tanıtımı. GAP 1. Urfa - Harran Kalkınma Sempozyumu, Ankara; 1988.
- [12] Güner R. Abidoğlu A. Sulama Stratejisinin İrdelenmesi ve Ana Master Plan Hazırlanması. DSİ Su ve Toprak Kaynaklarını Geliştirme Projeleri Planlama Semineri, Şanlıurfa; 1990.
- [13] Anonymous 1998B. STFA Harita A.Ş. Şanlıurfa Harran Ovası Arazi Düzenleme Projesi II. Kısım İşi Proje Sonuç Raporu, İstanbul; 1998.
- [14] Anonymous 1998A. Üçer İnş. Tic. Ltd. Şti. Şanlıurfa Harran Ovası Arazi Düzenleme Projesi I. Kısım İşi Proje Sonuç Raporu, İstanbul; 1998.
- [15] İnceyol Y. Güneydoğu Anadolu Projeleri’nde (GAP) Yapılan Arazi Toplulaştırma Çalışmalarında Koordinasyon ve Planlama Sorunları. Yüksek Lisans Tezi, Konya Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2000.
- [16] Özkanoğlu M. Yüksek Basıncılı Şebekelerde Yağmurlama Sulaması Yönetiminin Uygulama Esasları. DSİ Proje ve İnşaat Dairesi Yayını, Ankara; 1997.
- [17] Kızılkaya T. Sulama ve Drenaj. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı DSİ Genel Müdürlüğü Yayını, 2. Baskı, Ankara; 1998.

EĞRİSEL YÜZEYLİ BORU BAĞLANTILARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Şerif ÇİTİL, İsmail BOZKURT*

Adiyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adiyaman, 02040, Türkiye
Geliş tarihi: 17.10.2017 Kabul tarihi: 23.10.2017

ÖZET

Yapıştırma bağlantıları endüstrinin hemen hemen her sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Su, doğalgaz, petrol gibi maddeleri taşıyan tesisat sistemleri de bu sektörlerden biridir. Yapıştırma bağlantıları, düzgün gerilme dağılımı, sızdırmazlık, korozyon, farklı türden parçaları birleştirebilme özellikleri ve daha birçok avantajlarından dolayı perçin, cıvata ve özellikle kaynak gibi geleneksel birleştirme tekniklerine bir alternatif olmuştur. Bu çalışmada iç basınca maruz borularda bağlantı modeli olarak eğrisel yüzeyli bindirme bağlantıları düşünülmüş olup, bu bağlantı tiplerinin mukavemeti üzerinde etkileri incelenmiştir. Bunun için çelik borular (St37) üzerine eğrisel bindirme bağlantıları oluşturularak yapıştırıcı (DP810) ile birleştirilmiştir. Daha sonra oluşturulan bağlantı modellerine iç basınç uygulanmış ve bağlantıların mekanik davranışları nümerik olarak incelenmiştir. Ayrıca yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların gerilme analizi için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Oluşturulan bağlantı modelleri boru cidar kalınlığına ve bindirme uzunluğuna bağlı olarak karşılaştırılarak sonuçlar verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Yapıştırıcılar, eğrisel yüzeyli bağlantılar, sonlu elemanlar, borular, gerilme analizi*

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF CURVED SURFACE PIPE CONNECTIONS

ABSTRACT

Adhesive connections are widely used in almost every sector of the industry. Plumbing systems that carry materials such as water, natural gas and oil are among these sectors. Adhesive joints are an alternative to traditional joining techniques such as rivets, bolts and especially welding due to their uniform stress distribution, sealing, corrosion, their ability to join different types of pieces, and many other advantages. In this study, curved surface overlay connections are considered as the connection model in exposed pipes in internal pressure and the effects on the strength of these connection types are investigated. For this purpose, curved lap joints are formed on the steel pipes (St37) and joined with the adhesive (DP810). Internal pressure was then applied to the connection models created and the mechanical behavior of the connections was numerically investigated. Furthermore, finite element method was used for stress analysis of adhesives bonded joints. The results were given by comparing the created connection models according to pipe wall thickness and overlap length.

Keywords: *Adhesive, curved-lap joint, finite elements, pipe, stress analysis*

1. Giriş

Su, doğal gaz, petrol gibi maddeleri taşıyan tesisat sistemlerinde boru bağlantıları genellikle klasik yöntem olan vida bağlantılarıyla veya kaynak teknolojileri kullanılarak yapılmaktadır. Vida ile

* e-posta: ibozkurt@adiyaman.edu.tr

birleştirme bağlantılarında özellikle sızdırmazlık problemleri yaşanmaktadır. Ayrıca vidanın açıldığı bölgede borunun kesit alanı azalmakta ve mukavemet açısından zayıflamasına sebep olmaktadır. Kaynakla birleştirme bağlantısında ise, kaynak yapılan bölgenin ani soğuması sonucunda artık gerilmeler oluşmakta ve ani basınç değişimi sonucunda kaynağın olduğu bölgede hasara sebep olmaktadır. Yapıştırma bağlantıları ise düzgün gerilme dağılımı, sızdırmazlık, korozyon, farklı türden parçaları birleştirebilme özellikleri ve daha birçok avantajlarından dolayı geleneksel birleştirme tekniklerine bir alternatif oluşturmaktadır [1-2]. Yapıştırma bağlantıları dikdörtgen kesitli malzemelerin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanıldıkları gibi, dairesel kesitli olan boruların birleştirilmesinde ve hasarlı boruların tamirinde de yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Boru bağlantıları ve boruların onarımı ile ilgili literatürde birçok çalışmalar yapılmış olmasına rağmen [3-14] konfigürasyonla ilgili yeterince çalışma mevcut değildir. Yapıştırma bağlantılarında bağlantının mukavemeti, bağlantının tipine, bağlantının boyutlarına, birleştirilen malzemenin türüne ve yapıştırıcının özelliklerine bağlıdır. Endüstride özellikle dikdörtgen kesitli parçaların yapıştırıcı ile birleştirilmesinde birçok bağlantı tipleri mevcuttur. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş boru bağlantılarında ise, farklı bağlantı tipleri ile ilgili çok fazla çalışma mevcut değildir. Zou ve Taheri [3] yapmış olduğu çalışmada, boru bağlantılarında bağlantının mukavemet olarak en zayıf olduğu bölgenin bağlantı bölgesi olduğunu ve yapıştırıcı ile birleştirilmiş boru bağlantılarında en yaygın olarak kullanılan bağlantı tiplerinin soket, boru bindirme, flaşlı bağlantılar olduğunu söylemiştir. Yapıştırıcılar boruların birleştirilmesinde kullanıldığı gibi hasarlı boruların tamiri içinde kullanılmaktadır. Çitil vd. [7] tarafından yapılan çalışmada hasarlı boruların tamirinde hızlı ve pratik bir yöntem olarak yama önerilmiştir. Ayaz vd. [14] tarafından yapılan çalışmada hasarlı boruların tamirinde yapıştırma bağlantılarıyla hızlı bir çözüm olduğu ileri sürülmüştür. Zarrinzadeh vd. [15] çatlak oluşmuş borularda çatlak ilerlemesini yavaşlatmak için polimer kompozitlerle tamir edilmesini önermişlerdir. Parashar ve Mertiny [16] yapıştırıcıyla birleştirilmiş kompozit boru bağlantılarında farklı yük koşulları altında farklı bağlantı modelleri oluşturarak bağlantı tiplerinin hasar analizini yapmışlardır.

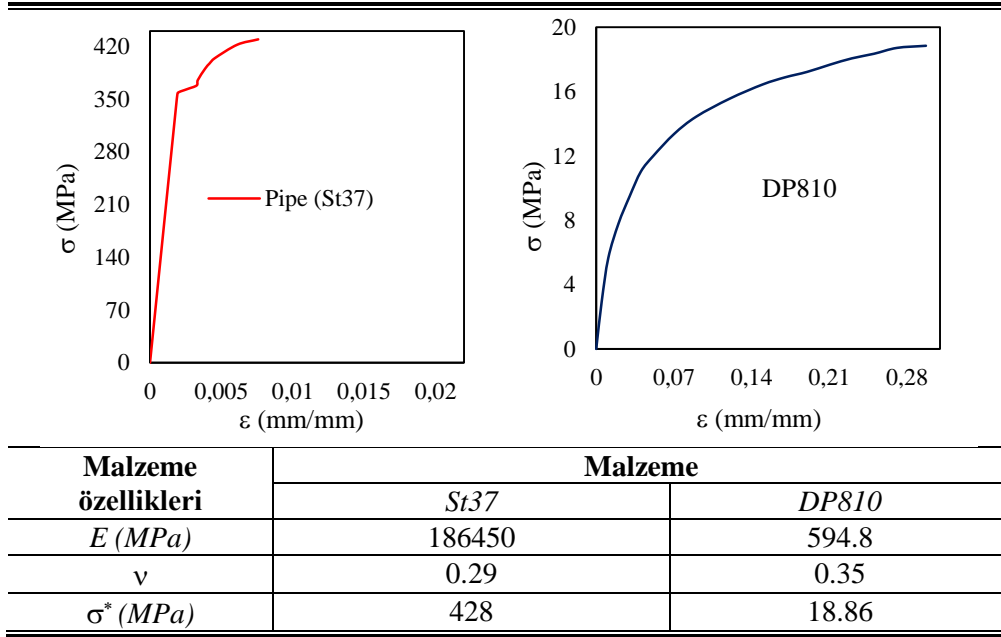
Dayanıklı bir yapıştırma bağlantısının oluşturulması, yapıştırıcının ve birleştirilen parçaların türüne, uygulandığı yüzeye, bindirme uzunluğuna, kalınlığa, sıcaklığa ve bağlantı modelinin tipine bağlıdır. Ayrıca hasar yüküne ve bağlantı tipine bağlı olarak oluşan gerilmeleri azaltılması yapıştırma bağlantılarında emniyetli ve dayanıklı bir yapıştırma bağlantısının oluşturulması modelin uygun bir şekilde tasarlanmasına bağlıdır. Yapıştırma bağlantıları için model büyük önem arz etmektedir. Bunun için literatürde özellikle kare kesitli parçaların birleştirilmesi ile ilgili birçok önemli çalışmalar yapılmıştır. Yapıştırma bağlantılarında, yapıştırıcının uygulandığı yüzey alanının artması genellikle taşınmış oldukları hasar yüklerinde ciddi manada artışa sebep olmaktadır. Fakat yapıştırıcının uygulandığı yüzey alanının artması her bağlantı modelini daha mukavemetli hale getireceği anlamına gelmemektedir. Çünkü bağlantı modeli soyulma gerilmelerine maruz kaldığı takdirde bağlantının yüzey alanının arttırmak bir çözüm önerisi değildir. Bu istenmeyen gerilmelerin ortadan kaldırılması için birçok bilim adamını uygun bağlantı modellerini tasarlamaya ve çözüm üretmeye zorlamıştır.

Bu çalışmada aynı bindirme uzunluğuna ve kalınlığa sahip borular üzerine yeni bir bağlantı tipi olan eğrisel bindirme bağlantısı oluşturulmuştur. Eğrisel tip bindirme bağlantısının kullanılmasının amacı, yapıştırıcının uygulandığı yüzey alanının artırılmasıdır. Düz, açılı ve eğrisel bağlantı tipleri sırasıyla yüzey alanı gitgide artırılmış olup, artan yüzey alanına bağlı olarak bağlantı tiplerinin mukavemet üzerine etkileri karşılaştırılmıştır. Bunun için galvanizli çelik borular üzerine aynı bindirme uzunluğuna ve kalınlığa sahip olacak şekilde eğrisel yüzeyli bağlantı modelleri oluşturulmuş ve oluşturulan modeller yapıştırıcı ile birleştirilerek iç basınca maruz bırakılmıştır. İç basınca maruz bırakılan bağlantı tipleri nümerik olarak incelenmişlerdir. Ayrıca oluşturulan bağlantı modellerin boru et kalınlığı, bindirme uzunluğu gibi parametrelere bağlı olarak da mukavemet üzerine etkileri incelenmiştir.

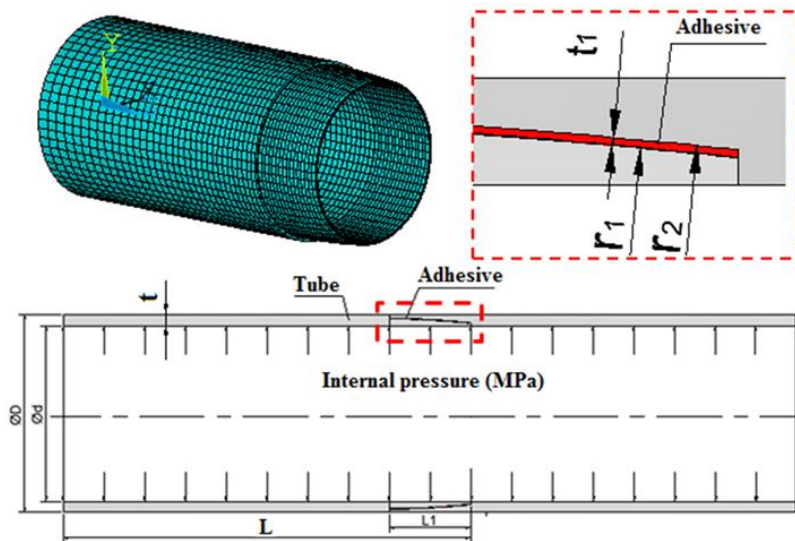
2. Materyal ve Metod

Bu çalışmada malzeme olarak özellikle tesisat sistemlerinde kullanılan St37 Galvanizli çelik borular ve birleştirme elemanı olarak nemli ortama dayanıklı iki bileşenli akrilik yapısal yapıştırıcı olan DP810 kullanılmıştır. Yapıştırıcının mekanik verileri, ISO 527 [17-18] standartlarına göre üç adet bulk numunesi oluşturularak 1 mm/dak çekme hızı ile çekilerek elde edilmiştir. Yapıştırıcı (DP810) ve galvanizli çelik borunun (St37) mekanik özellikleri Tablo 1 de verilmiştir.

Tablo 1. Boru (St37) ve yapıştırıcının (DP810) mekanik ve fiziksel özellikleri



Lineer olmayan sonlu eleman modeli için, Tablo 1’de mekanik özellikleri verilmiş olan galvanizli çelik boru (St37) ve yapıştırıcı (DP810) analizleri elasto-plastik olmak üzere ANSYS 15 paket programı kullanılmıştır [19]. Yapılan analizlerde yapıştırma bağlantısı, üç boyutlu dikdörtgen prizmalı 20 düğüm noktasına sahip solid186 eleman kullanılarak modellenmiştir. Gerilme dağılımları açısından kritik bölge

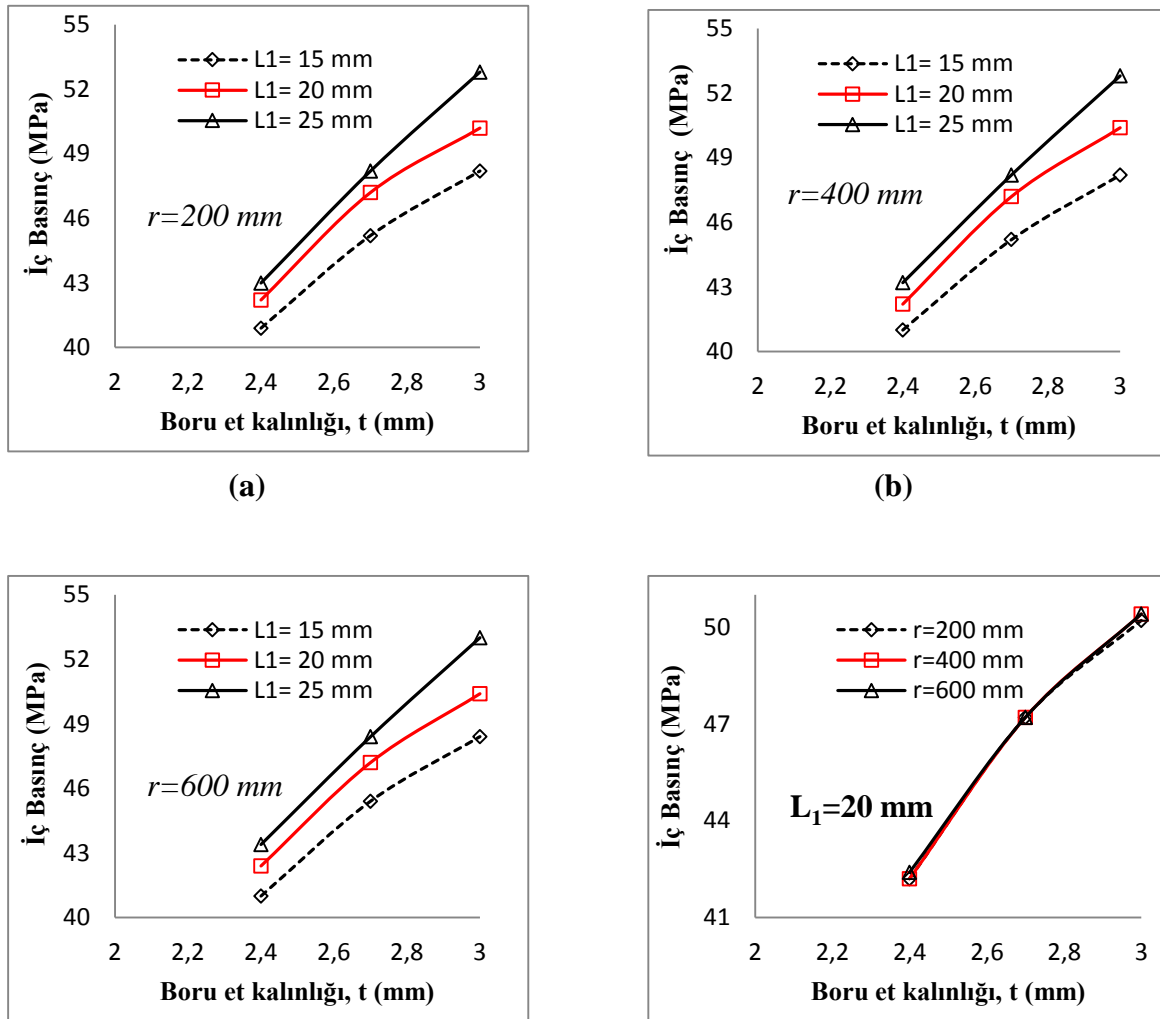


Şekil 1. Numunelerin sonlu elemanlarla modellenmesi

olan yapıştırma işleminin gerçekleştirildiği bölge, daha küçük elemanlara bölünmüştür (Şekil 1). Ayrıca yapıştırıcı ve boru üzerinde meydana gelen eşdeğer gerilme dağılımlarının elde edilmesi için Hidrostatik basınca göre kullanılarak elde edilmiştir.

3. Araştırma Bulguları

Sonlu eleman çözümlerinden elde edilen yapıştırıcı ile birleştirilmiş boru bağlantı modelinin boru cidar kalınlıkları (t) sırasıyla 2.4, 2.7, 3 mm dir. Bindirme uzunlukları ise $L_1=15, 20$ ve 25 mm'ye sahiptir. Ayrıca eğrisel yüzeylerin eğrilik yarıçapları $r=200$ mm için ($r_1=199.9$ $r_2=200.1$ mm), $r=400$ mm için ($r_1=399.9$ $r_2=400.1$ mm), $r=600$ mm için ($r_1=599.9$ $r_2=600.1$ mm) alınmış olup, eğrisel bindirme bağlantılarının nümerik çekme hasar yükleri Şekil 2'de verilmiştir.

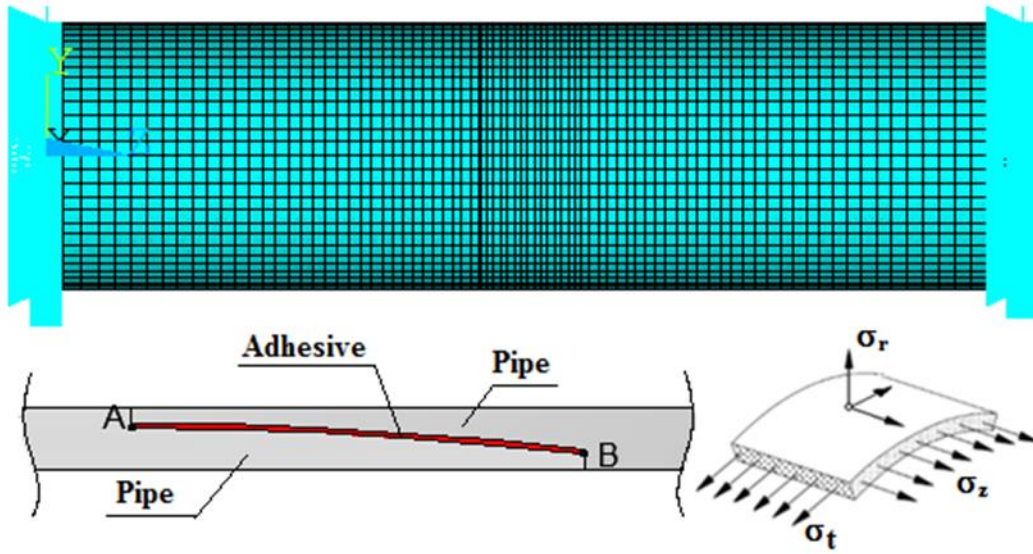


Şekil 2. Nümerik hasar yükü sonuçları

Şekil 2'de verilen hasar yükü sonuçları incelendiğinde, eğrisel yüzeyli boru bindirme bağlantılarında, bindirme uzunluğu ve boru dış çapının artmasına bağlı olarak taşınmış oldukları iç basınçta önemli ölçüde artış sergilediği görülmektedir. Boru içerisinde iç basınç arttıkça boru çapı teğetsel ve radyal yönde şekil değiştirmeye zorlanmaktadır. Boru çapı arttıkça borunun et kalınlığı artmaktadır. Boru et kalınlığı arttıkça da teğetsel ve radyal yönde borunun şekil değiştirmesi zorlaşmaktadır. Buna bağlı olarak da taşınmış oldukları iç basınç da ciddi ölçüde artış sergilenmiştir.

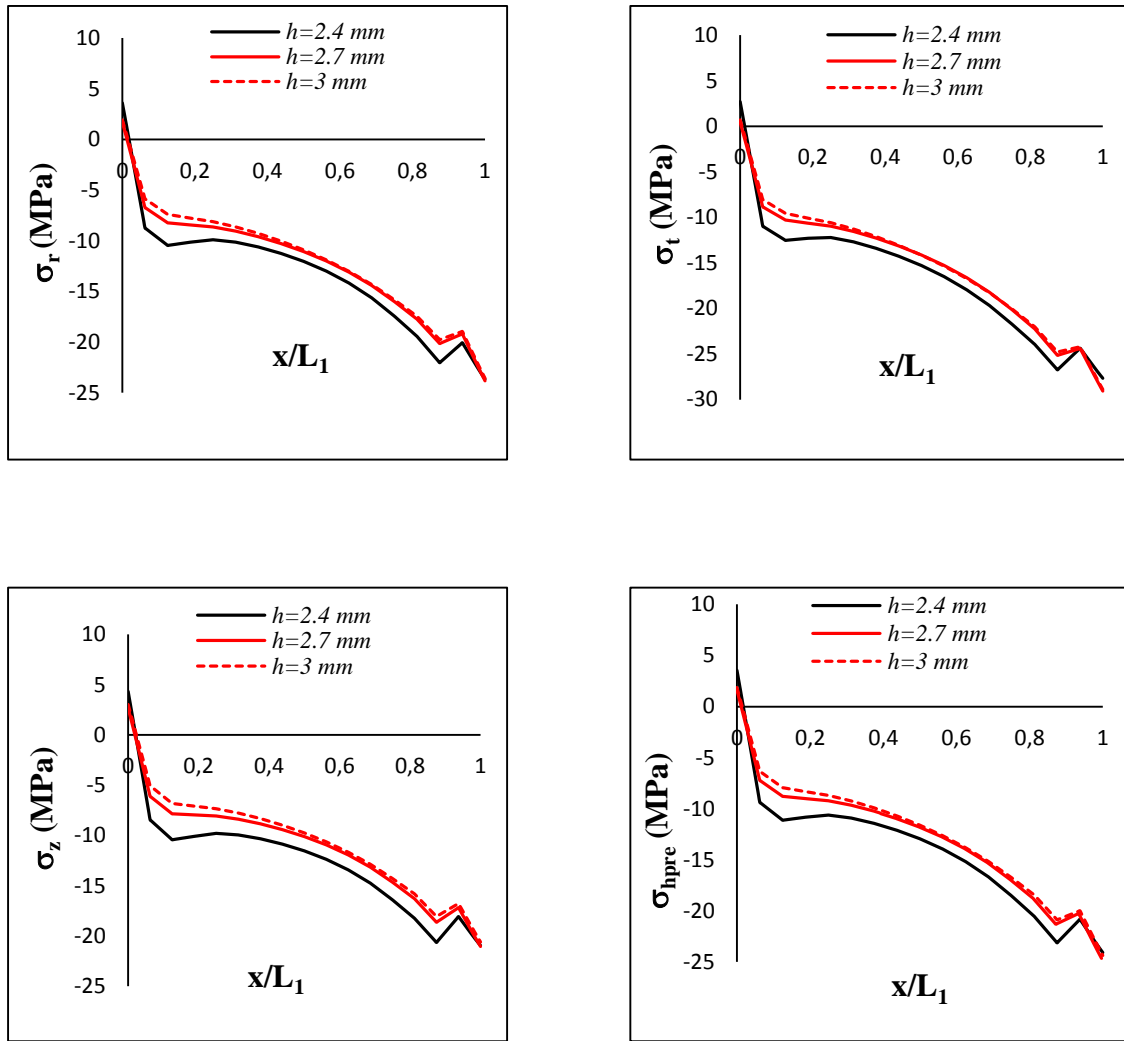
Şekil 2.a-b-c bindirme uzunluğuna bağlı olarak incelediğinde, bindirme uzunluğu arttıkça taşınmış oldukları iç basıncın arttığı görülmektedir. Boru bindirme bağlantılarında yapıştırıcının uygulandığı bindirme uzunluğu arttıkça, yapıştırıcının uygulandığı yüzey alanın artacağı anlamına gelmektedir. Yapıştırıcının yüzey alanının artması boru bindirme bağlantısının daha fazla iç basınç taşımaya neden olmuştur. Şekil 2.d' de ise boru bindirme bağlantılarının eğrilik yarıçapına bağlı olarak taşınmış oldukları iç basıncın karşılaştırılması yapılmıştır.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş eğrisel boru bindirme bağlantısına uygulanan iç basınç ve sınır şartları Şekil 3'de verilmiştir. İç basınç radyal (r) ve teyetsel (t) yönde yönünde uygulanmıştır. Yapıştırma modeli için bindirme uzunluğu bölgesinde bulunan A-B hattı boyunca bindirme uzunluğu, parça kalınlığı ve eğriliğe bağlı olarak yapıştırıcıya ait gerilme dağılımlarının (σ_r , σ_t , σ_z ve σ_{hpre}) karşılaştırılması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.

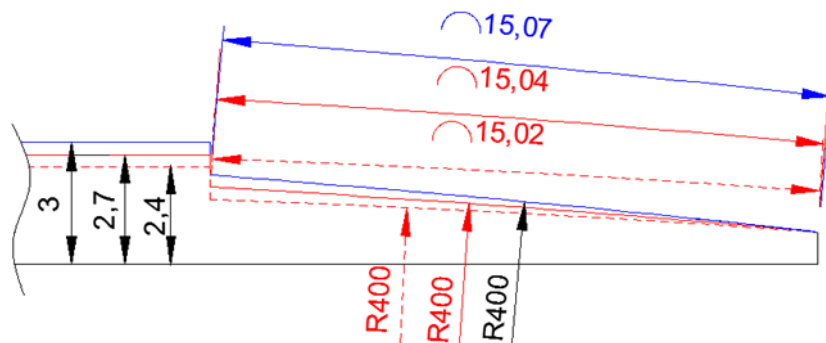


Şekil 3. Eğrisel boru bindirme bağlantısı (Sınır şartları ve A-B hattı)

Şekil 4, 6 ve 7 incelendiğinde gerilmelerin A noktasında minimum olduğu ve B noktasına doğru gidildiğinde ise gerilmelerin (σ_r , σ_t , σ_z ve σ_{hpre}) artarak maksimum değer aldığı gözlenmektedir. Ayrıca AB Hattı boyunca gerilmelerin bası karakterli olduğuda gözlenmektedir. Şekil 8'de aynı bindirme uzunluğuna ($L=20$ mm) ve iç çapa sahip ($d=43$ mm) boru bindirme bağlantılarının cidar kalınlığına göre karşılaştırılmaları yapılmıştır. Şekil 4'deki gerilme dağılımları incelendiğinde boru cidar kalınlığı azaldıkça radyal (σ_r) teğetsel (σ_t) ve z eksenini (σ_z) yönündeki gerilmelerle hidrostatik eşdeğer gerilmelerin (σ_{hpre}) arttığı gözlenmektedir. AB hattı boyunca A noktasından B noktasına doğru gidildikçe gerilmelerin (σ_r , σ_t , σ_z ve σ_{hpre}) arttığı ve B noktasında maksimum olduğu görülmektedir.



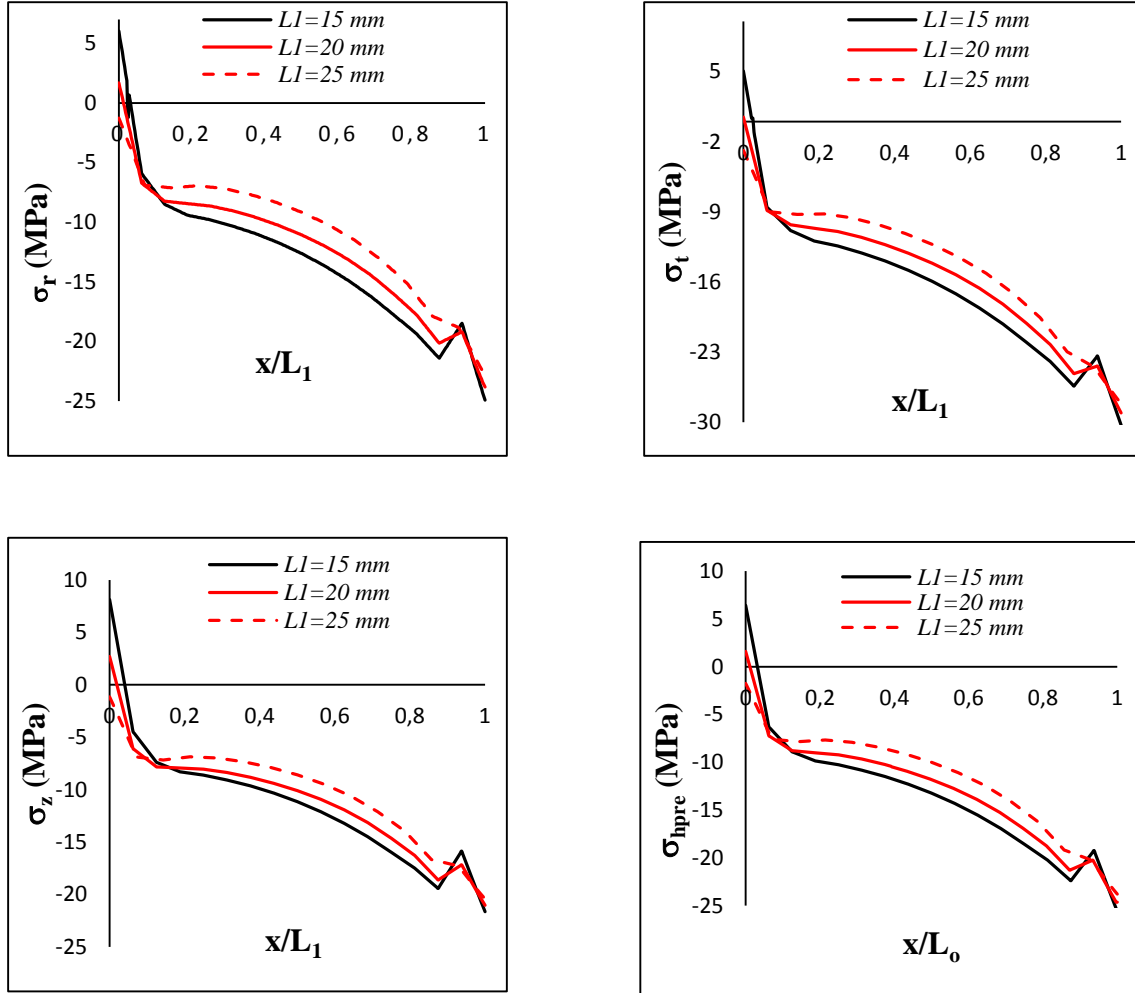
Şekil 4. $L_1=20$ mm bindirme uzunluğu ve $r=400$ mm eğrisellik yarıçapına sahip eğrisel yüzeyli boru bindirme bağlantılarında cidar kalınlığına bağlı olarak A-B hattı boyunca gerilme dağılımları



Şekil 5. Boru cidar kalınlığına bağlı olarak yay uzunlukları

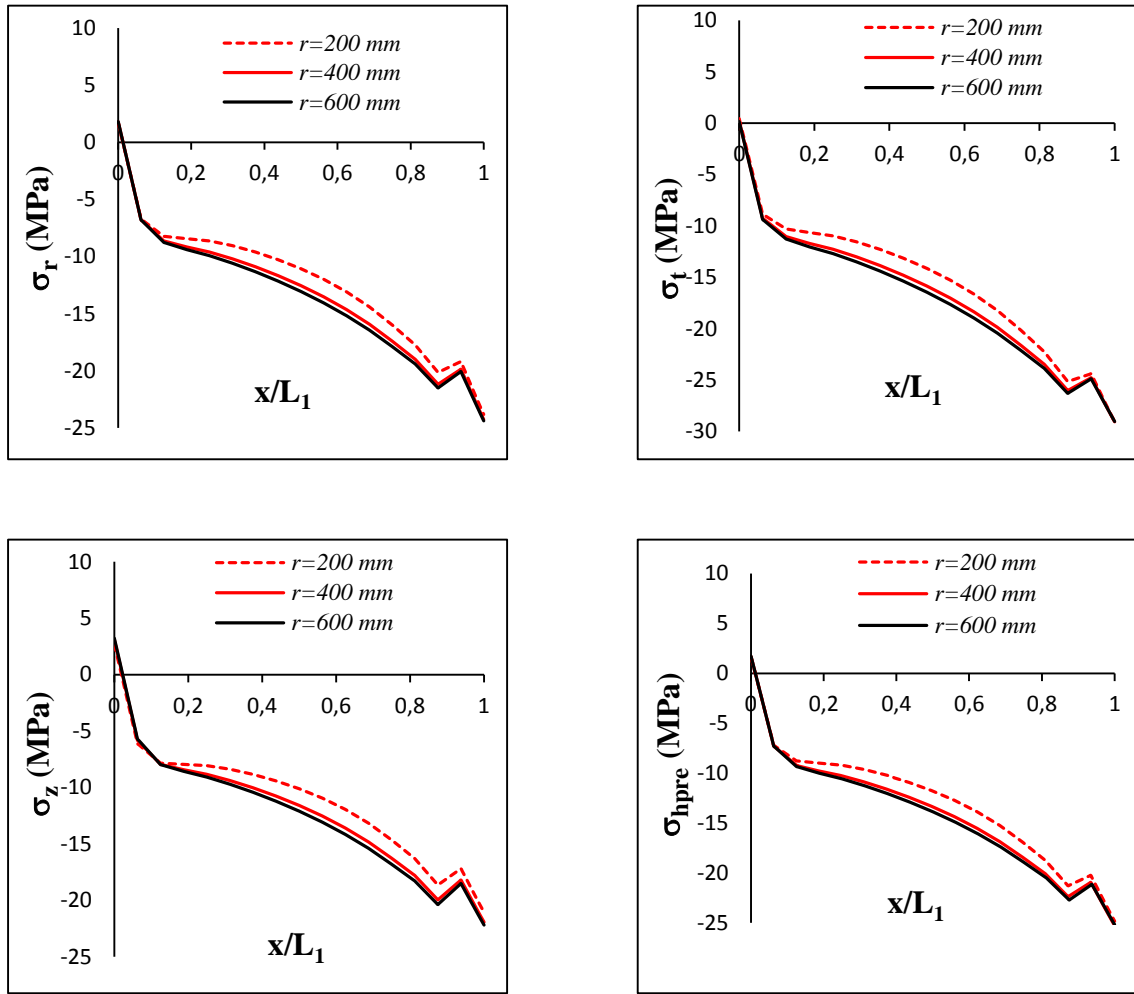
İç basınca maruz yapıştırıcı ile birleştirilmiş boru bağlantılarında, iç basıncın uygulandığı yüzeye yakın bölgede (B noktası) hasarın başladığı görülmektedir. İç basınca maruz eğrisel yüzeyli boru bindirme bağlantılarında boru cidar kalınlığı arttıkça şekil değiştirmesi zorlaşmaktadır. Ayrıca Şekil

5’de görüleceği üzere cidar kalınlığı arttıkça boru bindirme bağlantılarının aynı eğrisellik yarıçapına sahip olsalar bile aynı yay uzunluğuna (\sim) sahip olmadığı görülmektedir. Boru cidar kalınlığı arttıkça yay uzunluğuda (\sim) artmaktadır. Dolayısıyla yapıştırıcının uygulandığı yüzey alanı artmakta ve taşımış oldukları iç basınçta artış göstermektedir.

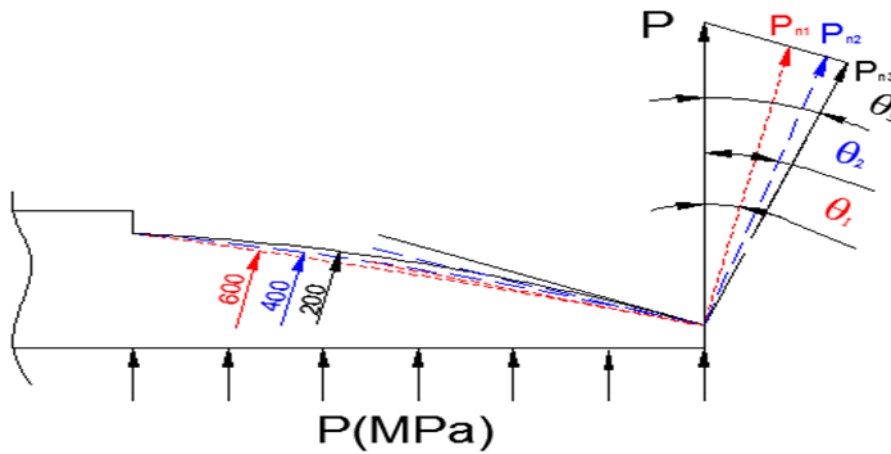


Şekil 6. $t = 2.7$ mm cidar kalınlığı ve $r = 400$ mm eğrisellik yarıçapına sahip eğrisel yüzeyli boru bindirme bağlantılarında bindirme uzunluğuna bağlı olarak A-B hattı boyunca gerilme dağılımları

Şekil 6’da aynı cidar kalınlığına sahip ($t = 2.7$ mm) farklı bindirme uzunluğuna ($L1 = 15, 20, 25$ mm) bağlı olarak gerilme dağılımlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Bindirme uzunluğuna bağlı olarak gerilme dağılımları (σ_r , σ_t , σ_z , ve σ_{hpre}) incelendiğinde bindirme uzunluğu arttıkça gerilmelerin düştüğü gözlenmiştir. Bindirme uzunluğu arttıkça yapıştırıcının uygulandığı yüzey alanı ciddi miktarda artmaktadır, dolayısıyla da taşımış oldukları yük miktarı artmıştır. Buda gerilmelerin düşmesi anlamına gelmektedir.



Şekil 7. $L_1=20$ mm bindirme uzunluğu, $t=2.7$ mm cidar kalınlığına sahip eğrisel yüzeyli boru bindirme bağlantılarında eğrissellik yarıçapına bağlı olarak A-B hattı boyunca gerilme dağılımları



Şekil 8. Eğrissellik yarı çapına bağlı olarak bağlı olarak iç basıncın yüzeyin normali ile yapmış olduğu açı ($\theta_1 < \theta_2 < \theta_3$)

Şekil 7’de, $L_1=20$ mm bindirme uzunluğu, $t=2.7$ mm cidar kalınlığı için eğrisel yüzeyin eğrilik yarıçapına bağlı olarak ($r=200, 400, 600$ mm) gerilme dağılımlarının ($\sigma_r, \sigma_t, \sigma_z, \text{ve } \sigma_{hpre}$) karşılaştırılması yapılmıştır. Gerilme dağılımları incelendiğinde eğrilik yarıçapı arttıkça gerilmelerin ($\sigma_r, \sigma_t, \sigma_z, \text{ve } \sigma_{hpre}$) arttığı görülmektedir. Bunun sebebi ise eğrilik yarıçapı azaldıkça eğrisel yüzeyin normaline uygulanan basıncın azalmasıdır. Şekil 8’de eğrilik yarı çapı arttıkça eğrisel yüzeyin normali ile uygulanan iç basınç arasındaki açının azaldığı $\theta_1 < \theta_2 < \theta_3$ görülmektedir. Açı azaldıkça yüzeyin normaline uygulanan basınçta artmaktadır. Dolayısıyla da eğrilik yarıçapı azaldıkça radyal (r), teyetsel (t) ve z ekseni yönündeki gerilmelerde azaldığı görülmektedir

4. Sonuçlar

Bu çalışmada iç basınca maruz eğrisel yüzeyli boru bindirme bağlantılarının nümerik olarak araştırılması yapılmıştır. Eğrisel bindirme bağlantılarında eğrilik yarıçapı, bindirme uzunluğu ve boru cidar kalınlığına bağlı olarak mukavemet üzerinde etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak, eğrilik yarıçapı azaldıkça bağlantıların daha mukavemetli hale gelerek taşımış oldukları hasar yüklerinin önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Eğrilik yarı çapı arttıkça uygulanan iç basıncın, eğrisel yüzeyin normaline olan iz düşüm açısı küçülmüştür. İz düşüm açısına bağlı olarak da yüzeyin normaline uygulanan iç basınçta azalma olduğu görülmüştür. Ayrıca, bindirme uzunluğu arttıkça yapıştırıcı ile birleştirmiş eğrisel yüzeyli boru bindirme bağlantılarının taşımış oldukları iç basınçta ciddi miktarda artış olmuştur. Bununla birlikte, boru cidar kalınlığı arttıkça eğrisel yüzeyli bindirme bağlantıların taşımış oldukları iç basınç artmıştır. Boru cidar kalınlığı arttıkça aynı bindirme uzunluk ve eğrisellik yarıçapına sahip olsalar bile yay uzunluklarının arttığı gözlenmiştir. Yay uzunluğu arttıkça yapıştırıcının uygulanmış olduğu yüzey alanı ve taşıdıkları iç basınç artmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma; Adıyaman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi birimi tarafından MÜFMAP/2015-0002 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Campilho RDSG, Banea MD, Pinto AMG, daSilva LFM, deJesus AMP. Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modeling. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2011; 31: 363–372.
- [2] Liao L, Huang C. Numerical analysis of effects of adhesive type and geometry on mixed-mode failure of adhesive joint. *International Journal of Adhesion&Adhesives*2016; 68: 389–396.
- [3] Zou GP, Taheri F. Stress analysis of adhesively bonded sandwich pipe joints subjected to torsional loading. *International Journal of Solids and Structures* 2006; 43: 5953–5968.
- [4] Das RR, Pradhan B. Adhesion failure analyses of bonded tubular single lap joints in laminated fibre reinforced plastic composites. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2010; 30: 425–438.
- [5] Parashar A, Mertiny P. Adhesively bonded composite tubular joints: Review. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2012; 38: 58–68.
- [6] LeBono J, Barton L, Birkett M. Low temperature tensile lap-shear testing of adhesively bonded polyethylene pipe. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2017; 74: 57–63.
- [7] Çitil Ş, Ayaz Y, Temiz Ş, Aydın MD. Mechanical behaviour of adhesively repaired pipes subject to internal pressure. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2017; 75: 88–95.
- [8] Hashim SA, Cowling MJ, Laerty S. The integrity of bonded joints in large composite pipes. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 1998; 18: 421-429.

- [9] Esmael RA, Taheri F. Influence of adherend's delamination on the response of single lap and socket tubular adhesively bonded joints subjected to torsion. *Composite Structures* 2011; 93: 1765–1774.
- [10] Woo KS, Ahn JS, and Yang SH. Cylindrical discrete-layer model for analysis of circumferential cracked pipes with externally bonded composite materials. *Composite Structures* 2016; 143: 317–323.
- [11] Grassi M, Cox B, Zhang X. Simulation of pin-reinforced single-lap composite joints. *Composites Science and Technology* 2006; 66: 1623–1638.
- [12] Li H, Zhang X, Qi D, Cai X, Ding N, Wei B, Qi G. Failure analysis of the adhesive metal joint bonded on anticorrosion plastic alloy composite pipe. *Engineering Failure Analysis* 2015; 47: 49–55.
- [13] Das RR, Baishya N. Failure Analysis of Bonded Composite Pipe joints subjected to internal Pressure and Axial loading. *Procedia Engineering* 2016; 144: 1047 – 1054.
- [14] Ayaz Y, Çitil Ş, Şahan MF. Repair of small damages in steel pipes with composite patches. *Materials Science & Engineering Technology* 2016; 47: 503-511.
- [15] Zarrinzadeh H, Kabir MZ, Deylami A. Experimental and numerical fatigue crack growth of an aluminium pipe repaired by composite patch. *Engineering Structures* 2017; 133: 24–32.
- [16] Parashar A, Mertiny P. Adhesively bonded composite tubular joints: Review. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2012; 38: 58–68.
- [17] ISO 527–1: Plastics-determination of tensile properties. Part 1: General principles, 1993.
- [18] ISO 527–2: Plastics-determination of tensile properties. Part 2: Test conditions for moulding and extrusion of plastics. 1993.
- [19] ANSYS. The general purpose finite element software (version 15) Inc., 275 Technology Drive, Canonsburg, PA, USA, 15317, 2015.

GÜÇ KALİTESİ BOZULMALARININ HILBERT HUANG DÖNÜŞÜMÜ VE GABOR DÖNÜŞÜMÜ KULLANARAK SINIFLANDIRILMASI

M. İsmail GÜRSOY^{1*}, A. Serdar YILMAZ², S. Vakkas ÜSTÜN³

¹ Adiyaman Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Adiyaman, 02040, Türkiye

² Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, 46000, Türkiye

³ Adiyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Adiyaman, 02040, Türkiye

Geliş tarihi: 26.09.2017 Kabul tarihi: 21.11.2017

ÖZET

Güç kalitesini etkileyen olayların belirlenmesi ve incelenmesi oldukça önemlidir. Gerilimlerdeki ani yükselmeler, gerilim çökmeleri ve gerilim harmonikleri Güç Kalitesindeki bozulmalardan bir kısmını ifade etmektedir. Bu çalışma ile güç kalitesindeki bozulmaları belirlemede, Görgül Kip Ayrışımı (GKA) ve Hilbert Dönüşümü (HD) metotlarının birleşiminden oluşan Hilbert Huang Dönüşümü (HHD) metodu ve Zaman Frekans analiz tekniklerinden spektrogram ve Gabor Dönüşümü metotları kullanılmıştır. Lineer olmayan sinyallerin analizinde kullanılan yeni bir sinyal işleme yöntemi olan GKA ile güç kalitesi bozulmalarının olduğu sinyal Öz Kip Fonksiyonu (ÖKF) bileşenlerine ayrılmaktadır. Bu ÖKF bileşenleri ile Güç Kalitesi bozulmalarının anlık frekans ve anlık genlik değerleri hesaplanmaktadır. Çalışma sonucu olarak, sinüzoidal dalga şeklindeki değişimleri belirlemede etkin olan HHD yönteminin, Güç Kalitesi Bozulmalarında da etkin olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güç Kalitesi, Hilbert Huang Dönüşümü (HHD), Gabor Dönüşümü (GD)

CLASSIFICATION OF POWER QUALITY DISTURBANCES USING HILBERT HUANG TRANSFORM AND GABOR TRANSFORM

ABSTRACT

It's very important to identify and analysis the events that effect the Power Quality. Sudden increases in voltages, voltage sags and voltage harmonics express some of the disturbances in Power Quality (PQ). In this study, used to determine the disturbances in PQ, The Hilbert Huang Transform (HHT) method, which is a combination of the Empirical Mode Decomposition (EMD) and Hilbert Transform methods, Spectrogram and Gabor Transform methods from time frequency analysis techniques. EMD, which is a new signal processing method used in the analysis of nonlinear signal, decomposes the signals of PQ disturbances into IMF components. These IMF components are used in the calculation of the amplitude and frequency of PQ disturbances. As a result of HHT method which can detect the variations of the sinusoidal waveform is an efficient way of detecting PQ disturbances.

Keywords: Power Quality, Hilbert Huang Transform, Gabor Transform

* e-posta: mgursoy@adiyaman.edu.tr

1. Giriş

Teknolojinin gelişmesi ile üretilen yeni cihazlar ve kullanılmakta olan eski cihazlar tüketicinin yaşam kalitesini arttırsa da, bu cihazlar beslendikleri şebekelerin güç kalitesinde ciddi bozulmalara yol açmaktadır. Güç sistemleri, arızalar ile karşılaştığında veya doğrusal olmayan yüklerin etkisinde kaldığında, şebeke gerilimi saf sinüs dalga şeklinden uzaklaşmaktadır[1]. Bu durum endüstride fabrikaların çalışmasını olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca güç sistemlerindeki ekipmanların veya yüksek teknoloji içeren cihazların tahribatı gibi birçok soruna neden olmaktadır[2].

Güç kalitesinde meydana gelen bozulmalar, gerilimin genliği, frekansı veya dalga biçimi üzerindeki herhangi bir bozulma olarak ortaya çıkmaktadır[3]. Elektriksel güç kalitesini tanımlayan parametreler IEC 61000-4-30 standardında kısa süreli gerilim yükselmeleri / düşmeleri, frekans salınımları, yüksek ve düşük gerilimler, harmonikler, fazlar arası gerilim dengesizliği ve gerilim dalgalanmaları olarak sıralanmaktadır.[4].

Güç sistemleri, belirli genliğe ve frekansa sahip sinüzoidal gerilim referans alınarak tasarlanmıştır. Güç kalitesinde meydana gelen bozulmalar, gerilimin genliği, frekansı veya dalga biçimi üzerindeki herhangi bir bozulma olarak ortaya çıkmaktadır[3]. Elektriksel güç kalitesini tanımlayan parametreler IEC 61000-4-30 standardında kısa süreli gerilim yükselmeleri / düşmeleri, frekans salınımları, yüksek ve düşük gerilimler, harmonikler, fazlar arası gerilim dengesizliği ve gerilim dalgalanmaları olarak sıralanabilir[4].

Standartlar doğrultusunda güç kalitesi bozulmalarını belirlemek için, literatürde farklı analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Bu analiz yöntemleri; Fourier Dönüşümü (FD), Kısa Dönem Fourier Dönüşümü (KDFD) ve Dalgacık Dönüşümü (DD) şeklinde sıralanabilir. FD analiz yöntemi çoğunlukla harmonik analizlerinde kullanılmaktadır. Ancak FD, yalnızca zamanla değişmeyen işaretlerde başarılı olmaktadır. KDFD yönteminde ise sabit bir pencere fonksiyonu kullanılmaktadır. Buda KDFD kullanımında fazla miktarda analiz işlemleri gerektirmektedir. DD yöntemi de durağan olmayan sinyallerin analizlerinde kullanılmaktadır. Fakat gürültülü sinyallerde DD yönteminin performansı azalmaktadır[5-6].

Güç sistemlerindeki kalitenin analizindeki amaç, tüketici ve yüklerin meydana getirdiği bozulmaların sebeplerinin belirlenmesidir.

2. Hilbert Huang Dönüşümü

HHD ilk olarak Norden E. Huang ve ark. tarafından geliştirilmiştir. HHD'nin doğrusal ve durağan olmayan sinyallerin analizinde yaygın kullanımı vardır. Bu yöntem, iki ana bölümden oluşmaktadır. Görgül Kip Ayrışımı ve Hilbert Dönüşümü [7].

2.1. Görgül Kip Ayrışımı (GKA)

GKA yöntemi ile sinyaller farklı frekanslardaki bileşenlerine ayrılmaktadır. Bu yöntem ile sinyal sıfır ortalamalı Genlik Modülasyonu ve Faz Modülasyonu bileşenlerinin toplamı şeklinde ifade edilmektedir.

GKA yöntemi ile elde edilen bu bileşenlere Öz Kip Fonksiyonu (ÖKF) denilmektedir. Huang'a göre, asıl sinyal ile aynı uzunluktaki ÖKF bileşenlerinin iki temel özelliği bulunmaktadır[8].

(1) Eksremum noktalarının sayısı ile sıfır noktasından geçiş sayısı birbirine eşittir ya da en fazla bir birim kadar farklıdır.

(2) Yerel maksimum ve Yerel minimum olarak tanımlanan zarfın ortalama değeri sıfıra eşittir.

İncelenen giriş sinyali $x(t)$ olmak üzere;

(1) $x(t)$ giriş sinyalindeki bütün maksimum ve minimum noktalar bulunarak işaretlenir. Bulunan alt ekstramum noktaları ve üst ekstramum noktaları ara değerlendirme yöntemi ile birleştirilerek bir alt zarf

ve bir üst zarf elde edilir. Elde edilen Zarfların ortalaması alınarak $x(t)$ giriş sinyalinin ortalama zarfı $m1 = [v1(t)+v2(t)]/2$ elde edilir.

(2) Ortalama zarf $x(t)$ sinyalinden çıkartılarak düşük frekanslı yeni bir sinyal $h1$ elde edilir. Elde edilen $h1$ sinyali ÖKF özelliklerini sağlamıyorsa ilk adım $h1$ sinyali üzerine tekrar uygulanır. Sonraki aşamada $h1$ veri olarak ele alınır ve $h11 = h1 - m11$ elde edilir. Bu şekilde işlemler tekrarlanır. $h1k = h1(k-1) - m1k$. Eğer ortalama zarf sinyali ÖKF özelliklerini sağlıyorsa eleme işlemi durdurulur. Eleme işlemini durdurma kriteri olarak iki farklı ölçüt kullanılabilir [10-12]. Bir kere durdurma ölçütü seçildikten sonra, ilk ÖKF bileşeni $c1=h1k$ elde edilmiş olur. $c1$ sinyalin en iyi ölçeğini veya en yüksek frekans bileşenini içermektedir.

(3) Giriş sinyalinden ilk ÖKF1 bileşeni çıkarılarak artık sinyal $r1$ elde edilir. $r1$ sinyali, giriş sinyalindeki düşük frekanslı bileşenleri içerdiğinden yeni bir veri olarak ele alınır yeni bir eleme işlemi başlatılır. $r2=r1-c2, \dots, rn=rn-1-cn$. Bu işlemler tüm sonraki rj 'ler için tekrarlanır. Geriye kalan sinyal ise artık sinyal olarak değerlendirilir (rn).

(4) Son aşamada eleme işlemi artık sinyal rn daha önceden belirlenen değerden daha küçük olduğunda veya monoton bir fonksiyon olduğunda durur.

Giriş sinyali, Denklem (1)'de ÖKF bileşenlerinin ve artık sinyalin toplamı olarak gösterilmektedir.

$$x(t) = r_n + \sum_{j=1}^n c_j \quad (1)$$

Burada $x(t)$ analiz edilen giriş sinyali, n ölçek sayısı, c_j ise j ninci ölçekteki ÖKF değeridir. r_n ise işlemler sonucunda geriye kalan artık sinyaldir.

2.2. Hilbert Dönüşümü (HD)

GKA işlemleri sonucunda oluşan ÖKF bileşenlerine HD işlemleri uygulanır. Bütün ÖKF bileşenlerine HD yöntemi uygulanarak yeni veri seti Denklem (2) ile elde edilir.

$$y_j(t) = \frac{1}{\pi} P.V. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_j(\tau)}{t - \tau} dt \quad (2)$$

Denklem (2)'de verilen P.V. bu integralin Cauchy temel değerini ifade etmektedir. Bu tanımda analitik sinyal Denklem (3) ile oluşturulmaktadır.

$$z_j(t) = c_j(t) + jy_j(t) = a_j(t)e^{i\theta_j(t)} \quad (3)$$

Burada hesaplanan $z_j(t)$ değeri ile anlık genlik değerini Denklem (4), anlık açısal frekans değerini Denklem (6) ve anlık frekans Denklem (7) değerleri hesaplanabilir [8].

$$a_j(t) = \sqrt{c_j^2(t) + y_j^2(t)} \quad (4)$$

$$\theta_j(t) = \arctan \frac{y_j(t)}{c_j(t)} \quad (5)$$

$$w_j(t) = \frac{d\theta_j(t)}{dt} \quad (6)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_j(t)}{dt} \quad (7)$$

3. Gabor Dönüşümü (GD)

Gabor dönüşümü KDFD yönteminin geliştirilmiş bir fonksiyonudur. Giriş sinyali seçilecek olan bir zaman değişkeni ile oluşturulan pencere fonksiyonunun FD'si alınarak elde edilen zaman – frekans analizi olarak ifade edilir. GD genel olarak Denklem (8) ile ifade edilir.

$$G_z(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \overline{\phi_{t,f}(\tau)} d\tau \quad (8)$$

$$\phi_{t,f}(\tau) = \phi(\tau - t) e^{j2\pi f\tau}$$

Denklem (8) de üst çizgi, kompleks ifadenin eşleniği olarak gösterilmektedir.

GD'nin pencere fonksiyonu Gaussian fonksiyonu kullanılırsa Denklem (9) elde edilmiş olur.

$$G_z(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-\pi(\tau-t)^2} e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (9)$$

Denklem (9) da; GD, Gaussian Pencere Fonksiyonu kullanılarak KDFD'nün özel bir hali elde edilmiş olur.

KDFD'de olduğu gibi GD'nin de önemli eksikliği zaman - frekans çözünürlüğü arasında uyuşma bulunmamasıdır. Eğer pencere kısa seçilirse, elde edilen bilgi zamana iyi yerleşmiş olacak fakat frekans çözünürlüğü zayıflayacaktır. Benzer şekilde daha büyük pencere kullanımı frekans çözünürlüğünü arttırırken zaman çözünürlüğünün zayıflamasını da beraberinde getirmektedir [9].

4. Araştırma Bulguları

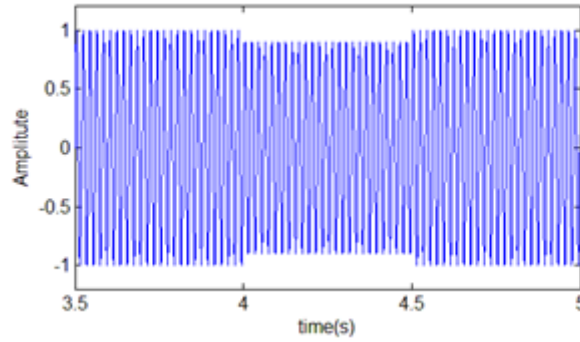
Güç Kalitesi analizlerinden en iyi analiz tekniği zaman-frekans analizleridir. Çünkü dünyadaki bütün güç sistemlerinin kaynakları sinüzoidal şekildedir. Bu dalga şeklinin de şiddeti ve frekansı standart ve değeri kesinlikle sabittir[10].

Bu bölümde, Güç Kalitesi olaylarından gerilim çökmesi, gerilim yükselmesi ve harmoniklerin HHD ve GD yöntemleri ile analiz edilmiştir. Bu analizler MATLAB programı ile gerçekleştirilmiştir.

4.1. Gerilim Çökmesi

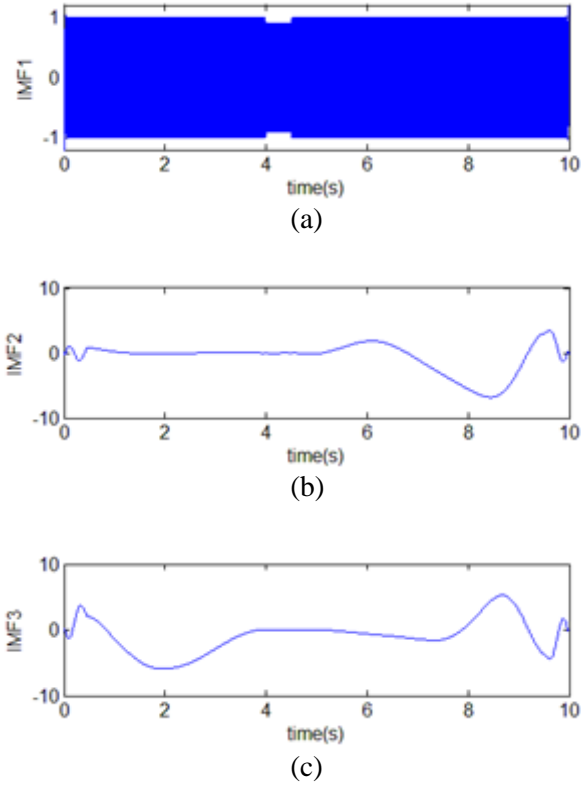
Gerilim çökmesi, güç şebekesi gerilimlerinin genliğinde, 0.5 peryot ile 1 dakika arasında meydana gelen olaylar kısa süreli bozulmalar olarak adlandırılmaktadır. Gerilimin genliğinde meydana gelen %10 düşüş sonucu gerilim çökmesi meydana gelmektedir. Giriş sinyali 10 kHz örnekleme

frekansına sahiptir. Toplamda 10 s olan giriş sinyalinin 4.0 s ve 4.5s arasında genliği 1 birimden 0.9 birime düşürülmüştür.



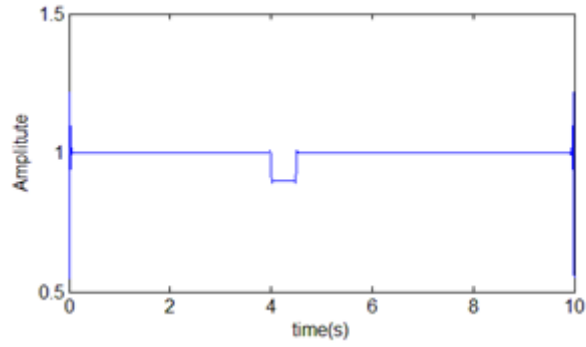
Şekil 1. Gerilim Çökmesi Sinyali (genlik %10, süre 0.5s)

Şekil 1. de gerilim çökmesi sinyali gösterilmektedir. Şekil 2’de Giriş sinyaline GKA uygulandıktan sonra oluşan ÖKF1, ÖKF2 ve ÖKF3 grafikleri gösterilmektedir.

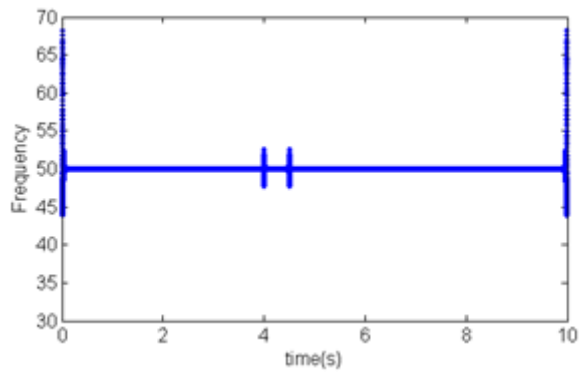


Şekil 2. Gerilim Çökmesi sinyaline GKA yöntemi uygulandıktan sonra oluşan ÖKF bileşenleri (a) ÖKF1; (b) ÖKF2; (c) ÖKF3

Elde edilen ÖKF sinyallerine HD uygulandığında; genlik ve frekans sinyalleri Şekil 3. ‘de gösterilmiştir.



(a)

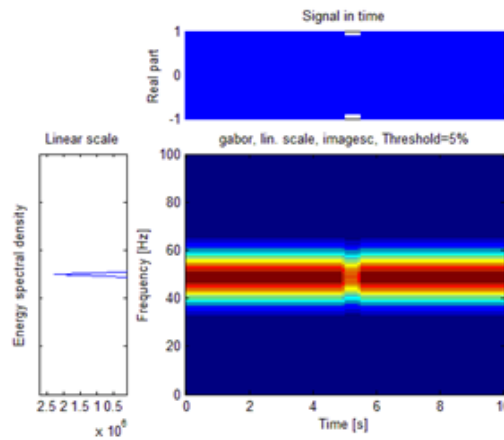


(b)

Şekil 3. (a) Giriş Sinyalinin anlık genliği; (b) giriş sinyalinin anlık frekans bileşeni

Şekil 3a'da, gerilim çökmesinin başlama ve bitiş anlarında meydana gelen genlik değişimi ve Şekil 3b de gösterilen frekans değişikliği Hilbert Huang Dönüşümü yönteminin gerilim çökmesi bozulmalarının tespit edilmesinde iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

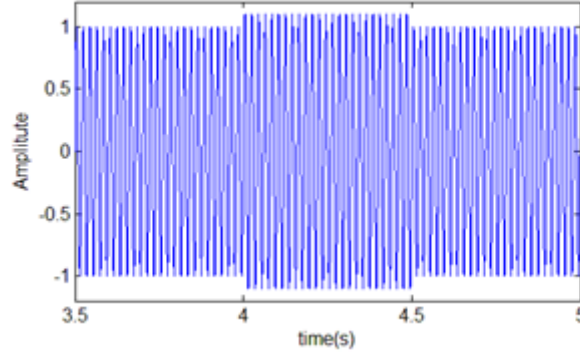
10 kHz örnekleme frekansına sahip toplamda 10 s olan giriş sinyalinin 5.0 s ve 5.5s arasında genliği 1 birimden 0.9 birime düşürülmüştür. Bu giriş sinyaline GD analizi uygulandıktan sonra oluşan spektrum grafiği Şekil 4' de gösterilmiştir.



Şekil 4. 0.1 s pencere genişliği kullanılarak Gerilim Çökmesi Sinyaline uygulanan GD

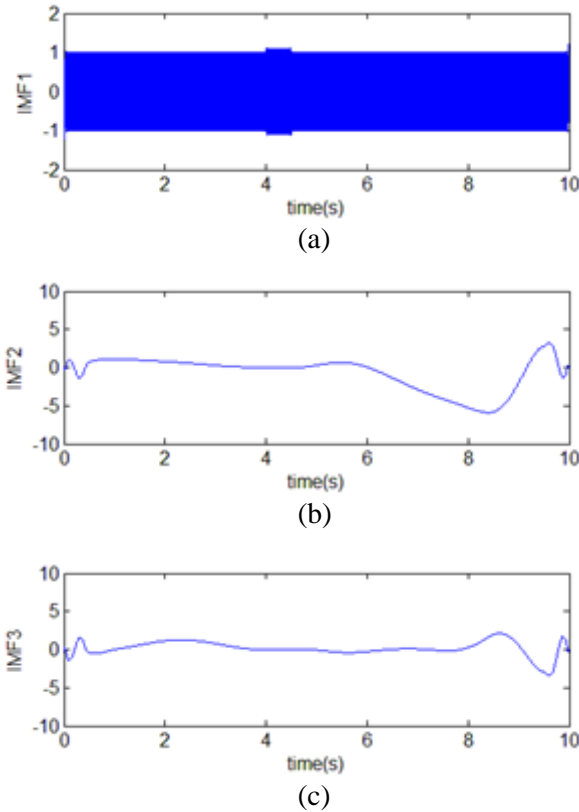
4.2. Gerilim Yükselmesi

Kısa süreli güç kalitesi olaylarından gerilim yükselmesi, Şebeke gerilim sinyallerinin genliğinde kısa süreli %10 artış olmasıyla meydana gelmektedir. Giriş sinyali 10 kHz örnekleme frekansına sahiptir. Toplamda 10 s olan giriş sinyalinin 4.0 s ve 4.5s arasında genliği 1 birimden 1.1 birime yükseltilmiştir.



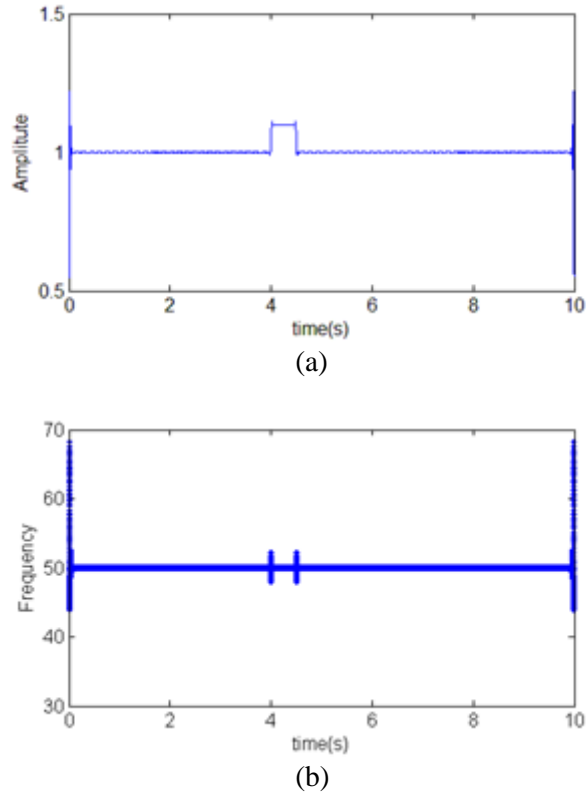
Şekil 5. Gerilim Yükselmesi Sinyali (genlik %10, süre 0.5s)

Şekil 6'da Giriş sinyaline GKA uygulandıktan sonra oluşan ÖKF1, ÖKF2 ve ÖKF3 grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 6. Gerilim Yükselmesi sinyaline GKA yöntemi uygulandıktan sonra oluşan ÖKF bileşenleri; (a) ÖKF1; (b) ÖKF2; (c) ÖKF3.

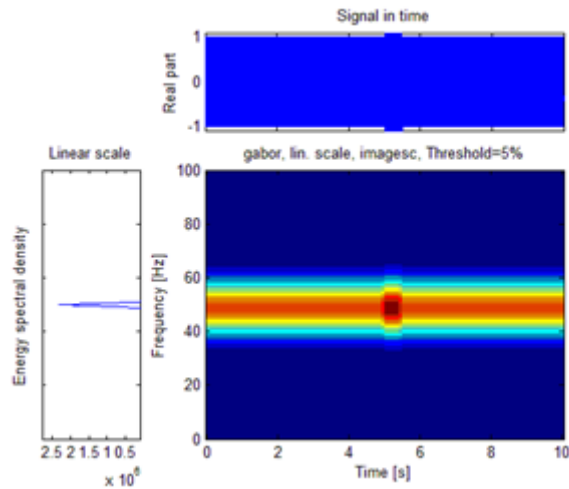
Elde edilen ÖKF sinyallerine HD uygulandığında; genlik ve frekans sinyalleri Şekil 7. 'de gösterilmiştir.



Şekil 7. (a) Giriş Sinyalinin anlık genliği; (b) giriş sinyalinin anlık frekans bileşeni.

Şekil 7a'da, gerilim yükselmesi sinyalinin başlama ve bitiş zamanlarında meydana gelen genlik değişimi gösterilmektedir. Şekil 7b'de 4. saniye ile 4.5 saniye arasında gerilim yükselmesi olayında meydana gelen frekans değişikliği görülmektedir. Yapılan analizlerde Hilbert Huang Dönüşümü yönteminin genlik ve frekans bilgileri ile gerilim yükselmesi bozulmalarının tespit edilmesinde iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

10 kHz örnekleme frekansına sahip toplamda 10 s olan giriş sinyalinin 5.0 s ve 5.5s arasında genliği 1 birimden 1.1 birime yükseltilmiştir. Bu giriş sinyaline GD analizi uygulandıktan sonra oluşan spektrum grafiği Şekil 8. de gösterilmiştir.

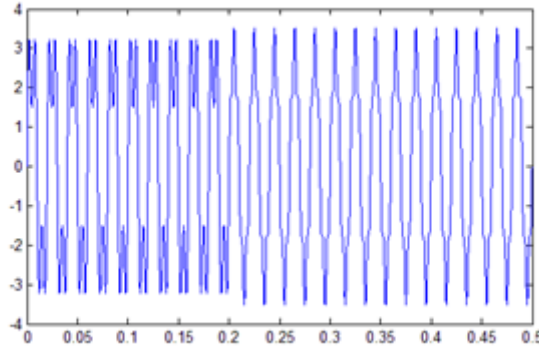


Şekil 8. 0.1 s pencere genişliği kullanılarak Gerilim Çökmesi Sinyaline uygulanan GD.

4.3. Harmonik

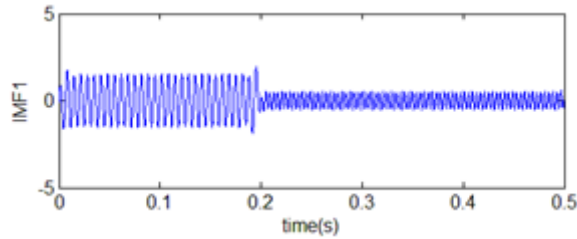
Giriş sinyali $x(t)$, 20 kHz örnekleme frekansına sahip ve 0-0.2 s aralığında 150 Hz ve 0.2 ile 0.5 aralığında ise 250 Hz bileşenlere sahiptir. $x(t)$ sinyali Denklem (10) 'da gösterilmiştir.

$$x(t) = \begin{cases} 3 \sin(2\pi 50t) + 1.5 \sin(2\pi 150t) & 0 \leq t \leq 0.2 \\ 3 \sin(2\pi 50t) + 0.5 \sin(2\pi 250t) & 0.2 \leq t \leq 0.5 \end{cases} \quad (10)$$

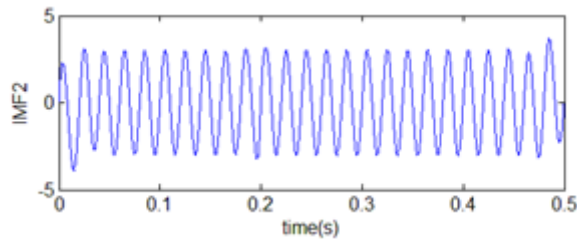


Şekil 9. Harmonik bileşen içeren giriş sinyali.

Giriş sinyali $x(t)$ GKA analizi sonucunda elde edilen ÖKF1 bileşeni giriş sinyalinde en yüksek frekansa sahip bileşendir. ÖKF2 bileşeni ise frekansı küçük olan bileşendir. Şekil.10.'de GKA işlemleri sonunda elde edilen ÖKF1 ve ÖKF2 bileşenleri gösterilmektedir.



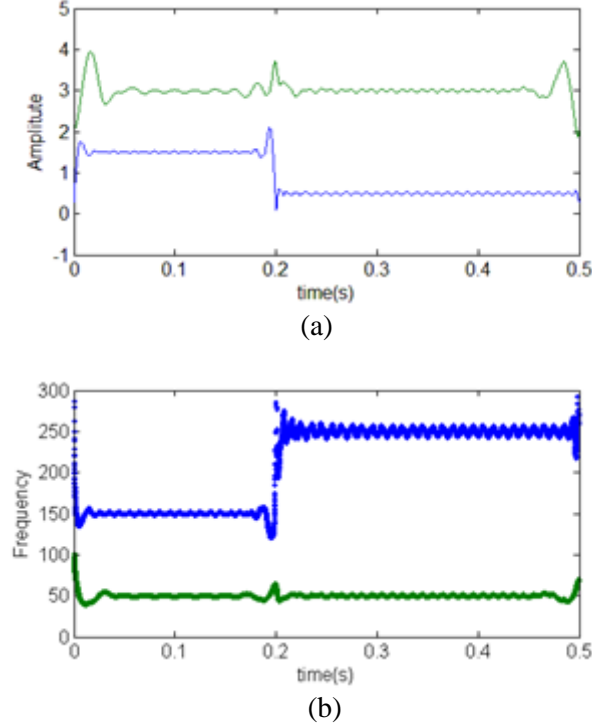
(a)



(b)

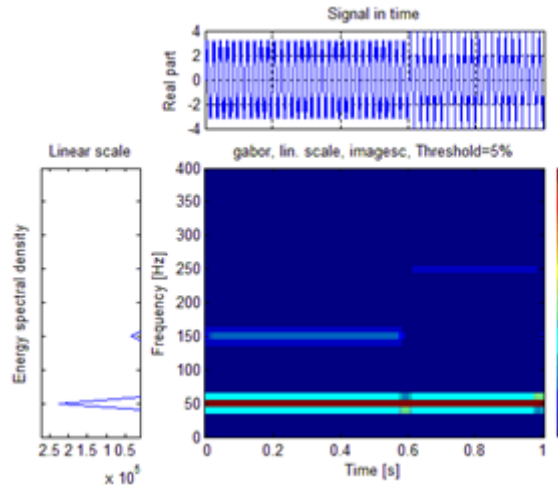
Şekil 10. Harmonik sinyale GKA yöntemi uygulandıktan sonra oluşan ÖKF bileşenleri; (a) ÖKF1; (b)ÖKF2

Giriş sinyalinin GKA analizi sonucu elde edilen ÖKF1 150 Hz ve 250 Hz yüksek frekansa sahip bileşenleri, ÖKF2 ise 50Hz düşük frekansa sahip bileşeni Şekil 10'da göstermektedir. Harmonikler ve temel sinyal GKA sonucunda ayrıştırılmaktadır. Şekil 11.'de HD kullanılarak ÖKF1 ve ÖKF2 bileşenlerinden sinyallerin genlikleri ve frekansları elde edilmektedir.



Şekil 11. (a) Giriş Sinyalinin anlık genliği; (b) giriş sinyalinin anlık frekans bileşeni

Giriş sinyali $x(t)$, 1 kHz örnekleme frekansına sahip ve 0-0.6 s aralığında 150 Hz ve 0.6 ile 1 aralığında ise 250 Hz bileşenlere sahiptir. $x(t)$ sinyaline GD analizi uygulandıktan sonra oluşan spektrum grafiği Şekil 12. de gösterilmiştir.



Şekil 12. 0.1 s pencere genişliği kullanılarak Harmonik Sinyaline uygulanan GD

5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada güç kalitesindeki olayları belirlemek ve değerlendirmek için HHD ve GD dayalı bir yöntem önerilmektedir. HHD durağan olmayan ve lineer olmayan verilerin analizinde güçlü bir yöntem olarak kullanılmaktadır. GD ise zaman – frekans analizlerinde çok kullanılan KZFD yönteminin gelişmiş bir formudur.

Güç Kalitesindeki olayları belirlemek için; GKA yöntemi kullanarak sinyalin ÖKF bileşenlerine ayrıştırılmaktadır. Daha sonra HT kullanılarak ÖKF den bozulmaların genliği ve frekansı belirlenmektedir. Çalışmalar sonucunda meydana gelen güç kalitesi olaylarının doğru bir şekilde tespit edilmesinde ve olayların başlangıç ve bitiş zamanlarının belirlenmesinde yöntemlerin başarılı olduğu görülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Onal, Y., Ö.N. Gerek, D.G. Ece, Detection of Voltage Flicker and Voltage Harmonic Using Hilbert Huang Transform, 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, Antalya, September 2014, 805-810.
- [2] Erişti, H., Demir, Y., Gerçek Zamanlı Güç Kalitesi İzleme Sistemleri ile Elektrik Dağıtım Sistemlerindeki Güç Kalitesinin İncelenmesi, Elektrik – Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu 2011, Elazığ, 351-356.
- [3] Isıklı Esener, İ., Yüksel, T., Kurban, M., Wavelet Transform in Power System Analysis, II. Uluslararası Avrasya Matematik Bilimleri ve Uygulamaları Konferansı (IECMSA'13) Ağustos 2013, Saraybosna, Bosna-Hersek.
- [4] IEC 61000-4-30, Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques Section 30: Power quality measurement methods, International Electrotechnical Commission, Switzerland, 2003.
- [5] Poisson, O., Rioual, P. Meunier, M. “Detection and measurement of power quality disturbances using wavelet transform,” IEEE Trans. Power Del., vol. 15, no. 3, pp. 1039–1044, Jul. 2000.
- [6] Chandrasekar, P. Kamaraj, V. “Detection and Classification of Power Quality Disturbance Waveform Using MRA Based Modified Wavelet Transform and Neural Networks”, Elect. Engineering, vol. 61, no. 4, pp. 235–240, 2010.
- [7] Y. Onal, D.G. Ece, O.N. Gerek, “Analysis of voltage flicker using Hilbert-Huang Transform”, IEEE 19th Conf., Signal Processing and Communications Applications (SIU), 20 April 2011.
- [8] N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, et al. “The Empirical Mode Decomposition and The Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non- Stationary Time Series Analysis”, Proc R. Soc. Lond A., vol. 454, pp. 903-995, 1998.
- [9] Abdullah, A.R., Sha’ameri, A.Z., Saad, N.M., Power Quality Analysis Using Spectrogram and Gabor Transformation, Asia – Pacific Conference on Applied Electromagnetic Proceedings, Melaka, MALAYSIA, 2007.
- [10] Uyar, M., Yıldırım, S., Gençoğlu, M.T., “Güç Kalitesi Bozulmalarının Sınıflandırılmasında Dalgacık Dönüşümüyle Enerji Dağılımına Dayalı Özelliklerin İncelenmesi”, 12. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi, 2007, S: 596-600.

TRIGLIDE ROBOTUN DİNAMİK DENKLEMLERİ KULLANILARAK KAYAN KIPLİ DENETLEYİCİ İLE DENETİMİ

Muhammet AYDIN^{1*}, Oğuz YAKUT²

¹Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ, 23119, Türkiye

²Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ, 23119, Türkiye

Geliş tarihi: 04.06.2017 Kabul tarihi: 10.10.2017

ÖZET

Bu çalışmada, delta paralel robot ailesinden olan üç serbestlik dereceli triglide paralel robotun ters ve düz kinematik denklemleri ile dinamik denklemleri kullanılarak kayan kipli denetleyici ile denetimi gerçekleştirilmiştir. Kayan kipli denetleyicinin katsayıları Matlab Toolbox ında yer alan hazır genetik algoritma kodları kullanılarak optimizasyonla bulunmuştur. Kayan kipli denetleyicinin paralel robot üzerindeki başarısını ortaya koymak amacıyla üç farklı referans noktası için denetimler tekrarlanmıştır. Kayan kipli denetleyicinin yapısında yer alan sign işaret fonksiyonunun yol açtığı çatlama problemi, saturasyon fonksiyonu kullanılarak azaltılmaya çalışılmıştır. Sayısal çözümler için Matlab paket programı kullanılmıştır. Triglide paralel robota uygulanan denetimlerle sistem cevapları grafiksel olarak elde edilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Dinamik, Genetik algoritma, Kayan kipli denetim, Kinematik, Triglide*

CONTROL BY SLIDING MODE CONTROL METHOD USING DYNAMIC EQUATIONS OF TRIGLIDE ROBOT

ABSTRACT

In this paper, triglide parallel robot which is family of delta parallel robot has been realized control by using sliding mode controller via the obtained inverse-forward kinematics equations and dynamic equations of it. The coefficients of the sliding mode controller were calculated with optimization by using genetic algorithm method which is available in Matlab Toolbox. The controls have been repeated for three different reference points to demonstrate the success of the sliding mode controller on triglide parallel robot. The chattering problem caused by the sign function in the structure of the sliding mode controller has been tried to reduce using saturation function. Matlab package program has been used for numerical solutions. The system responses have been obtained graphically with the controls applied to the triglide parallel robot and the results have been examined.

Keywords: *Dynamics, Genetic algorithm, Kinematics, Sliding mode control, Triglide*

1. Giriş

Paralel manipulatörler birkaç avantaj ve dezavantaj sergilerler. Paralel robotların dezavantajları sınırlı çalışma hacmi, düşük beceri kabiliyeti, karmaşık direk kinematik çözüm ve tekilliklerdir. Ancak paralel robotlar yüksek rijitlik, ters kinematik çözümün kolaylığı, hafiflik, yüksek doğruluk, hareketli

* e-posta: muhammeta@firat.edu.tr

bölgelerin düşük ataleti ve yüksek çeviklik gibi avantajlara sahiptir. Ters kinematik çözümün kolay olması kontrol edebilme kolaylığı sağlamaktadır [1].

Seri yapılarla karşılaştırıldıkları zaman paralel yapıların başka bir avantajını kullanmak mümkündür. Paralel yapılar ölçeklendirme etkisine çok daha az hassasdır, bu nedenle mikro robotlar için uygundur. Tıbbi uygulamalar için, özellikle endoskopi için bu durum uygundur [2].

Eğer doğru tasarlanırsa paralel robotların kısmen küçük çalışma hacmi önemli bir güvenlik vasfı ortaya çıkarabilir. Paralel robotlar güvenli bir şekilde yakın tekillikle hareket eder. Robot tekil bir konuma doğru bir yol izlediği zaman, motorlardan ihtiyaç duyulan kuvvetler yüksek değerlere ulaşır. Seri robotlarda tekil konumlar mafsallarda hızlarının çok yüksek değerleriyle birlikte anılır. Bu durum tehlikeli bir unsuru ortaya çıkarır. Paralel robotlar, aynı duyarlılığa sahip seri robotlarla karşılaştırıldığı zaman daha düşük fiyatlarla duyarlılığı sağlar. Bazı duyarlılık bölümleri seri robotlarla başarılamayabilir [3-6].

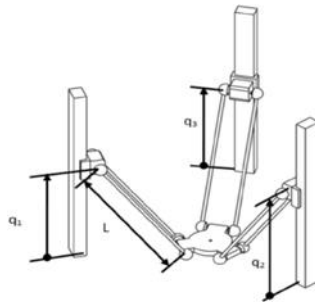
Aktarmada 3 serbestlik dereceli paralel robotlar toplama ve yerleştirme, makine işlemleri gibi durumlarda çoğunlukla kullanılırlar.



Şekil 1. Delta paralel robot [7].

Üç serbestlik dereceli en popüler robot Şekil 1’de gösterilen deldadır. İlk olarak bu robot Clavel tarafından Ecole Polytechnique Lausanne de geliştirilmiştir.

Delta robot son yıllarda dünyada yoğun uygulama alanı bulmuş olan paralel manipülatör türlerinden biridir. Delta robot sisteminde, sabit bir uzuv üzerine monte edilmiş 3 motor vasıtasıyla bir plakanın (uç işlevci) çalışma uzayı içerisindeki herhangi bir konuma (x,y,z) hareketi sağlanabilmektedir. Her motora bağlanan kol tahrik edilmektedir ve kollar uç işlevci plakasına paralelogram mekanizmaları ile bağlıdır. Dolayısı ile sabit düzlem ile hareketli plaka her zaman paralel olmak durumundadır. Motorların küçük bir hareketi ile sistem yüksek ivmelere çıkabilir ve çok hızlı konumlanabilir. Sistemin rijitliği seçilen kolların rijitliğine ve mafsallardaki boşluklara bağlıdır. İmalat kalitesindeki en küçük sapmalar sistemin tekrarlama hassasiyetini yüksek miktarda etkiler. Triglide, delta robotun biraz daha basitleştirilmiş hali olup 3 serbestlik dereceli paralel bir robottur. Triglide paralel robotta 3 kol mevcut olup, bu kollar lineer motorlarla hareket ettirilebilmektedir. Şekil 2’de triglide paralel robot görülmektedir. Triglide paralel robotun en büyük avantajı z yönünde sonsuz bir hareket alanına imkan vermesidir. x ve y yönünde sınırlı bir alanda hareket edebilmesine rağmen, lineer delta robot kullanım amacına göre uygun bir robot tercihi olabilir [6-8].

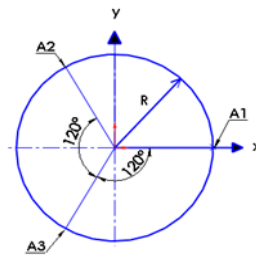


Şekil 2. Triglide paralel robot [8].

Bu çalışmada üç serbestlik dereceli paralel robot triglide için ters ve düz kinematik çözümler ile dinamik denklemler kullanılarak kayan kipli denetleyici ile denetimler sağlanmıştır. Uygulanan kayan kipli denetleyicinin gerekli olan denetim katsayıları, genetik algoritma tekniği kullanılarak optimize edilmiştir. Bunun için Matlab paket programının genetik algoritmalar araç kutusundan faydalanılmıştır. Katsayıları optimize edilmiş kayan kipli denetleyicinin sistem üzerindeki başarısını ortaya koyabilmek için robotun üç farklı referans konumuna yönelik denetimler tekrarlanarak gerçekleştirilmiştir. Kayan kipli denetleyici, yapısında yer alan sign işaret fonksiyonu ile sisteme uygulanmış ve sistem cevapları grafiksel olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlarla çatırdamalı sistem cevapları bu denetleyicinin pratikteki uygulamalarda bir dezavantajı olarak karşımıza çıkmaktadır. Çatırdama problemini azaltmak ve pratikte kullanılabilirliğini arttırmak amacıyla kayan kipli denetleyici, saturasyon fonksiyonu kullanılarak sisteme yeniden uygulanmıştır. Matlab ortamında hazırlanan program ile sayısal çözümler yapılarak sistemin grafiksel sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen grafiksel sonuçlarla denetleyicinin başarısı irdelenerek yorumlanmıştır.

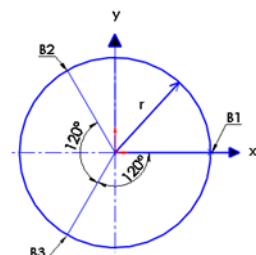
2. Triglide Paralel Robotun Kinematığı

Şekil 3’de gösterilen sabit platform, lineer motorların hareket ettiği sabit direklerin en alt noktası olarak seçilmiştir. Sabit eksen takımı ise sabit platformun orta noktasına Şekil 3’de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. z yönü yerçekimine ters doğrultuda seçilmiştir.



Şekil 3. Sabit platform.

Sabit ve hareketli platform üzerindeki 1, 2 ve 3 indisleri Şekil 2’de gösterilen q_1 , q_2 ve q_3 değişkenlerinin bulunduğu sabit direklere paralel olarak seçilmiştir. Sabit direkler aralarında 120° lik açı olacak şekilde konumlandırılmıştır.



Şekil 4. Hareketli platform.

Sabit platformun oluştururken takip edilen yöntemin benzeri şekil 4 deki hareketli platform içinde uygulanmıştır. Sabit ve hareketli platform üzerindeki noktalar yardımıyla daha önce yapılan çalışmalarda Triglide paralel robot için kinematik denklemler elde edilerek yayınlanmıştır [9]. Elde edilen düz ve ters kinematik çözümler aşağıda verilmiştir.

Ters kinematik çözümler;

$$q_1 = z_p + \sqrt{L^2 - (r - R + x_p)^2 - y_p^2} \quad (1)$$

$$q_2 = z_p + \sqrt{L^2 - \left(\frac{(R-r)}{2} + x_p\right)^2 - \left(\frac{\sqrt{3}(r-R)}{2} + y_p\right)^2} \quad (2)$$

$$q_3 = z_p + \sqrt{L^2 - \left(\frac{(R-r)}{2} + x_p\right)^2 - \left(\frac{\sqrt{3}(R-r)}{2} + y_p\right)^2} \quad (3)$$

Düz kinematik çözümler;

$$x_p = \frac{2q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 - (4q_1 - 2q_2 - 2q_3)z_p}{6(R-r)} \quad (4)$$

$$y_p = \frac{q_2^2 - q_3^2 + 2(q_3 - q_2)z_p}{2\sqrt{3}(R-r)} \quad (5)$$

$$z_{p1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (6)$$

Denklem (6)'daki a, b ve c ifadeleri sırasıyla aşağıda verilmiştir.

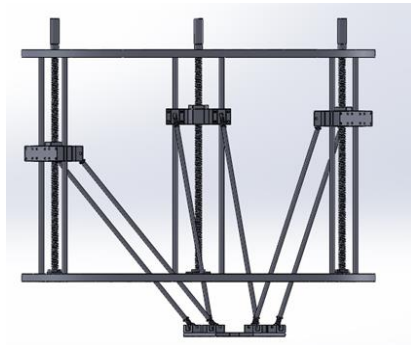
$$a = 1 + \frac{(4q_1 - 2q_2 - 2q_3)^2}{36(R-r)^2} + \frac{(q_1 - q_2)^2}{3(R-r)^2} \quad (7)$$

$$b = \frac{2(-q_1 - q_2 - q_3)}{3} - \frac{(2q_1^2 - q_2^2 - q_3^2)(2q_1 - q_2 - q_3)}{9(R-r)^2} + \frac{(q_2^2 - q_3^2)(q_3 - q_2)}{3(R-r)^2} \quad (8)$$

$$c = -L^2 + (R-r)^2 + \frac{(q_1^2 + q_2^2 + q_3^2)}{3} + \frac{(2q_1^2 - q_2^2 - q_3^2)^2}{36(R-r)^2} + \frac{(q_2^2 - q_3^2)^2}{12(R-r)^2} \quad (9)$$

3. Triglide Paralel Robotun 3B Tasarımı

Triglide paralel robotun Solidworks programında katı modellemesi yapılmıştır. Şekil 5 ve Şekil 6'da bu katı modellemeye ait üstten ve yandan görünüşler görülmektedir. Robotun bu tasarım boyutları kullanılarak kontrolü yapılmıştır.



Şekil 5. Triglide paralel robotun Solidworks’de katı modellemesinin yandan görünüşü.



Şekil 6. Triglide paralel robotun Solidworks’de katı modellemesinin üstten görünüşü.

4. Triglide Paralel Robotun Dinamiği

Çizelge 1. Triglide paralel robot uzuvlarının ağırlık merkezi koordinatları.

| | |
|--------------------|--|
| 1.Motor | $(R, 0, q_1)$ |
| 2.Motor | $\left(-\frac{R}{2}, \frac{R\sqrt{3}}{2}, q_2\right)$ |
| 3.Motor | $\left(-\frac{R}{2}, -\frac{R\sqrt{3}}{2}, q_3\right)$ |
| 1.Paralelogram | $\left(\frac{(x_p + r + R)}{2}, \frac{y_p}{2}, \frac{(z_p + q_1)}{2}\right)$ |
| 2.Paralelogram | $\left(\frac{(2x_p - R - r)}{4}, \frac{(2y_p + R\sqrt{3} + r\sqrt{3})}{4}, \frac{(z_p + q_2)}{2}\right)$ |
| 3.Paralelogram | $\left(\frac{(2x_p - R - r)}{4}, \frac{(2y_p - R\sqrt{3} - r\sqrt{3})}{4}, \frac{(z_p + q_3)}{2}\right)$ |
| Hareketli Platform | (x_p, y_p, z_p) |

Çizelge 1’de Triglide paralel robot için ağırlık merkezi koordinatları verilmiştir. Sistemin dinamiği, uzuvların ağırlık merkezi koordinatları kullanılarak Lagrange yöntemiyle elde edilmiştir. Sürtünmeler ihmal edilmiştir.

Toplam kinetik enerji motorlar, paralelogramlar ve hareketli platform dikkate alınarak çıkarılmıştır.

$$T = \frac{1}{8}m_p(3(\dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2 + \dot{z}_p^2) + 2\dot{z}_p(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3) + \dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2) + \frac{1}{2}m_{motor}(\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2) + \frac{1}{2}m_{tabla}(\dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2 + \dot{z}_p^2) \quad (10)$$

Aynı şekilde toplam potansiyel enerji denklem (11) de olduğu gibi hesaplanmıştır.

$$V = m_{motor}g(q_1 + q_2 + q_3) + m_p g \left(\frac{q_1 + q_2 + q_3}{2} + \frac{3z_p}{2} \right) + m_{tabla}gz_p \quad (11)$$

Bu aşamadan sonra robot için Lagrange fonksiyonu oluşturularak gerekli ifadelerle ait kısmi ve zamana göre türevler alındıktan sonra robotun 1. kolu için hareket denklemi aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} m_{motor}\ddot{q}_1 + \frac{3}{4}m_p\ddot{x}_p \frac{\partial \dot{x}_p}{\partial \dot{q}_1} + \frac{3}{4}m_p\ddot{y}_p \frac{\partial \dot{y}_p}{\partial \dot{q}_1} + \frac{3}{4}m_p\ddot{z}_p \frac{\partial \dot{z}_p}{\partial \dot{q}_1} + \frac{1}{4}m_p \frac{\partial \dot{z}_p}{\partial \dot{q}_1}(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3) + \frac{1}{4}m_p\ddot{z}_p + \frac{1}{4}m_p\ddot{q}_1 + m_{tabla}\ddot{x}_p \frac{\partial \dot{x}_p}{\partial \dot{q}_1} \\ + m_{tabla}\ddot{y}_p \frac{\partial \dot{y}_p}{\partial \dot{q}_1} + m_{tabla}\ddot{z}_p \frac{\partial \dot{z}_p}{\partial \dot{q}_1} + A_1 = F_1 \end{aligned} \quad (12)$$

$$A_1 = \frac{3}{4}m_p \left(\dot{x}_p \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \dot{x}_p}{\partial \dot{q}_1} \right) + \dot{y}_p \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \dot{y}_p}{\partial \dot{q}_1} \right) + \dot{z}_p \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \dot{z}_p}{\partial \dot{q}_1} \right) \right) + \frac{1}{4}m_p \left(\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \dot{z}_p}{\partial \dot{q}_1} \right) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3) \right)$$

$$+ \frac{1}{4}m_p \left(\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \dot{z}_p}{\partial \dot{q}_1} \right) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3) \right) + m_{tabla} \left(\dot{x}_p \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \dot{x}_p}{\partial \dot{q}_1} \right) + \dot{y}_p \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \dot{y}_p}{\partial \dot{q}_1} \right) + \dot{z}_p \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \dot{z}_p}{\partial \dot{q}_1} \right) \right)$$

$$- m_{tabla} \left(\dot{x}_p \frac{\partial \dot{x}_p}{\partial \dot{q}_1} + \dot{y}_p \frac{\partial \dot{y}_p}{\partial \dot{q}_1} + \dot{z}_p \frac{\partial \dot{z}_p}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{1}{4}m_p \left(3 \left(\dot{x}_p \frac{\partial \dot{x}_p}{\partial \dot{q}_1} + \dot{y}_p \frac{\partial \dot{y}_p}{\partial \dot{q}_1} + \dot{z}_p \frac{\partial \dot{z}_p}{\partial \dot{q}_1} \right) + \frac{\partial \dot{z}_p}{\partial \dot{q}_1} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3) \right)$$

$$+ m_{motor}g + m_p g \left(\frac{1}{2} + \frac{3}{2} \frac{\partial z_p}{\partial q_1} \right) + m_{tabla}g \frac{\partial z_p}{\partial q_1} \quad (13)$$

Gerekli işlemler yapıldığı takdirde kısaltmalar kullanılarak (14) nolu denklem aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$a_1\ddot{q}_1 + b_1\ddot{q}_2 + c_1\ddot{q}_3 = d_1 \quad (14)$$

Triglilde paralel robotun diğer kolları içinde benzer adımlar yapıldığı takdirde aşağıdaki denklemler elde edilebilir.

$$a_2\ddot{q}_1 + b_2\ddot{q}_2 + c_2\ddot{q}_3 = d_2 \quad (15)$$

$$a_3\ddot{q}_1 + b_3\ddot{q}_2 + c_3\ddot{q}_3 = d_3 \quad (16)$$

Bu üç denklem kullanılarak ivme ifadelerini veren denklemler elde edilebilir.

$$\ddot{q}_1 = \frac{d_3(b_1c_2 - b_2c_1) - d_2(b_1c_3 - b_3c_1) + d_1(b_2c_3 - b_3c_2)}{(a_1b_2c_3 - a_1b_3c_2 - a_2b_1c_3 + a_2b_3c_1 + a_3b_1c_2 - a_3b_2c_1)} \quad (17)$$

$$\ddot{q}_2 = \frac{d_2(a_1c_3 - a_3c_1) - d_3(a_1c_2 - a_2c_1) - d_1(a_2c_3 - a_3c_2)}{(a_1b_2c_3 - a_1b_3c_2 - a_2b_1c_3 + a_2b_3c_1 + a_3b_1c_2 - a_3b_2c_1)} \quad (18)$$

$$\ddot{q}_3 = \frac{d_3(a_1b_2 - a_2b_1) - d_2(a_1b_3 - a_3b_1) + d_1(a_2b_3 - a_3b_2)}{(a_1b_2c_3 - a_1b_3c_2 - a_2b_1c_3 + a_2b_3c_1 + a_3b_1c_2 - a_3b_2c_1)} \quad (19)$$

Triglide paralel robotun dinamiği ile ilgili olarak daha önceden yapılmış yayınlarda daha detaylı bilgilere ulaşılabilir. Yukarıdaki kısaltma ifadeleri bu yayınlarda açık bir şekilde ifade edilmiştir[10].

5. Triglide Robotun Kayan Kipli Denetleyici ile Denetimi

Kayan kipli denetim yüksek hızlı, doğrusal olmayan bir geri besleme ile önceden belirlenen bir kayma yüzeyi üzerinde zamanda süresiz bir şekilde anahtarlama yapılarak elde edilen, belirgin, doğrusal olmayan, dayanıklı bir denetim yöntemidir [11]. Bir sisteme ait parametreler değişken olduğu veya modellenemediği için tam ölçülemediği ve sisteme dışarıdan etki eden bozucular varsa kayan kipli denetim bunların sınır değerleri bilindiği sürece dayanıklı denetim sağlar.

Kayan kipli denetleyici tasarımı süreci iki adımlı bir yordam olarak düşünülebilir. Bu adımlar sırasıyla; kayma yüzeyinin belirlenmesi ve belirlenen kayma yüzeyine ulaşmayı sağlayan bir denetim kuralının elde edilmesidir. Kayma yüzeyine ulaşmak için geçen süre ulaşma zamanı ve faz yörüngesinin bu bölgesi ise ulaşma kipi olarak adlandırılır. Ulaşma kipinde sistem, parametre belirsizlikleri ve dış bozuculara karşı duyarlıdır [12]. Kayma yüzeyine ulaşıldığı zaman sistem yörüngelerinin parametre belirsizlikleri ve dış bozuculara karşı duyarsız olduğu kayma kipi başlar. Kayan kipli denetim uygulamalarından meydana gelen çatırtı, sistemin ulaşmak istediği denge noktası etrafında meydana gelen osilasyonlardan kaynaklanır ve sistemin modellenmemiş yüksek frekanslı dinamiklerini ortaya çıkarır [13].

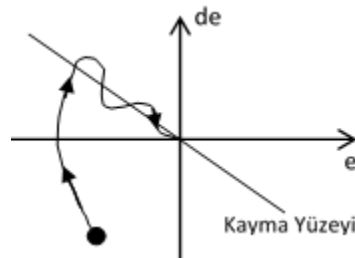
Bir işaret fonksiyonuna sahip kayan kipli denetim ifadesi;

$$U = -K \text{sign}(S) \quad (20)$$

olarak yazılabilir. Burada S ifadesi kayma yüzeyi fonksiyonudur ve sistem cevabından alınan hata (e) ve hatanın zamana göre değişimine (de) bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir. Buradaki K değeri 600 olarak alınmıştır.

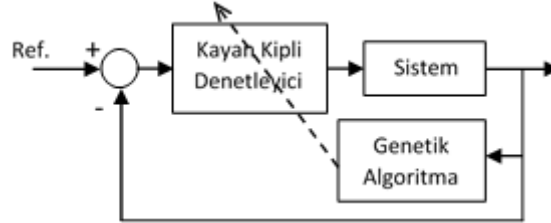
$$S = Ce + de \quad (21)$$

Kayma yüzeyi Şekil 7'de görüldüğü gibi belirli bir eğime sahip olur. Bu eğim (21) nolu denklemde yer alan C katsayısı ile belirtilir.



Şekil 7. Kayma yüzeyi

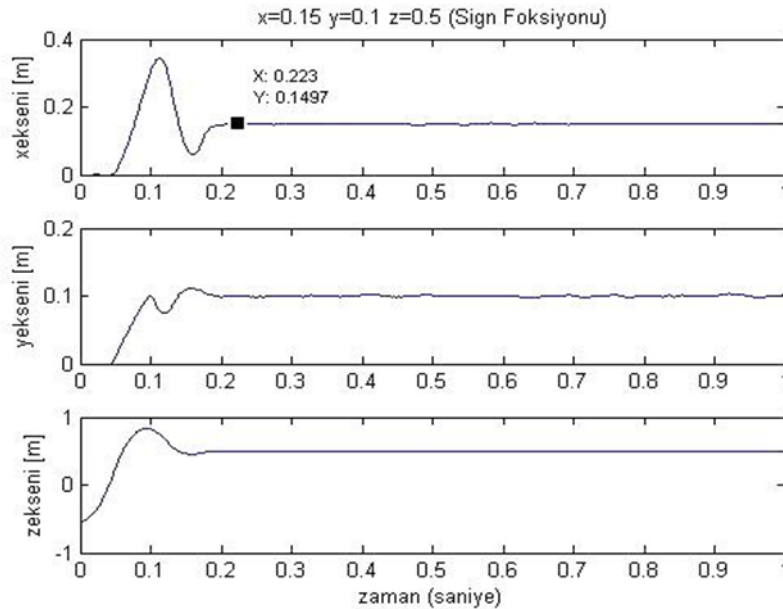
Denetleyicinin başarısı, belirtilen bu eğimin en uygun değerinin tespit edilmesi ile sağlanır. Bu çalışmada kayan kipli denetleyicinin bu kayma yüzeyi eğim katsayıları genetik algoritma kullanılarak optimize edilmiştir. Şekil 8’de denetleyiciye ait katsayıların genetik algoritma tekniği ile optimize edildiği gösterimin blok şeması yer almaktadır.



Şekil 8. Denetleyici katsayılarının optimizasyonu blok şeması.

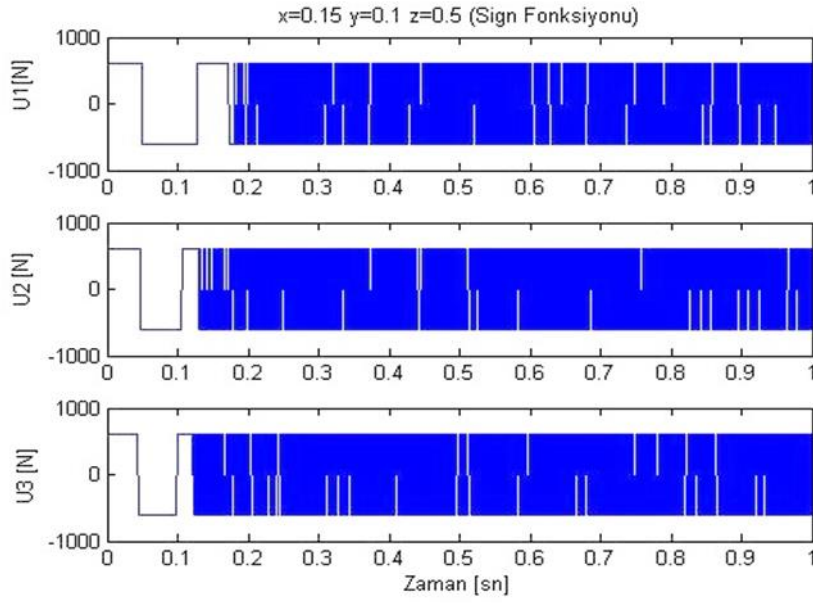
Optimizasyon için Matlab paket programında yer alan genetik algoritmalar araç kutusundan yararlanılmıştır. Rastgele belirlenen bir referans nokta için sistemin çıkışlarından elde edilen hataların karelerinin toplamını sıfıra götürecek bir fonksiyon, genetik algoritma amaç fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Denetleyiciye ait katsayıların optimum değerleri bu yöntemle tespit edildikten sonra genetik algoritma devre dışı bırakılarak denetleyici uygulamaya hazır hale getirilmiştir.

Robotumuz 3 eksenli olduğundan her bir motora uygulanan kayan kipli denetimin katsayıları sırasıyla 21 nolu denkleme göre $C1=96.7157$, $C2=93.8287$ ve $C3=96.2995$ olarak tespit edilmiştir. Bu katsayılarla kayan kipli denetleyici sisteme 3 farklı referans konum için uygulanmış ve sistem cevapları grafiksel olarak elde edilmiştir. İlk uygulamada robot ucunu $x=0.15$ m, $y=0.1$ m ve $z=0.5$ m referans konumlarına götürmek için kayan kipli denetim uygulandığında sistemin deplasman cevapları Şekil 9’da görüldüğü gibi grafiksel olarak elde edilmiştir. Şekil 10’da her bir motorun uygulaması gereken kontrol kuvvetlerinin zamana göre değişimini veren grafik yer almaktadır.

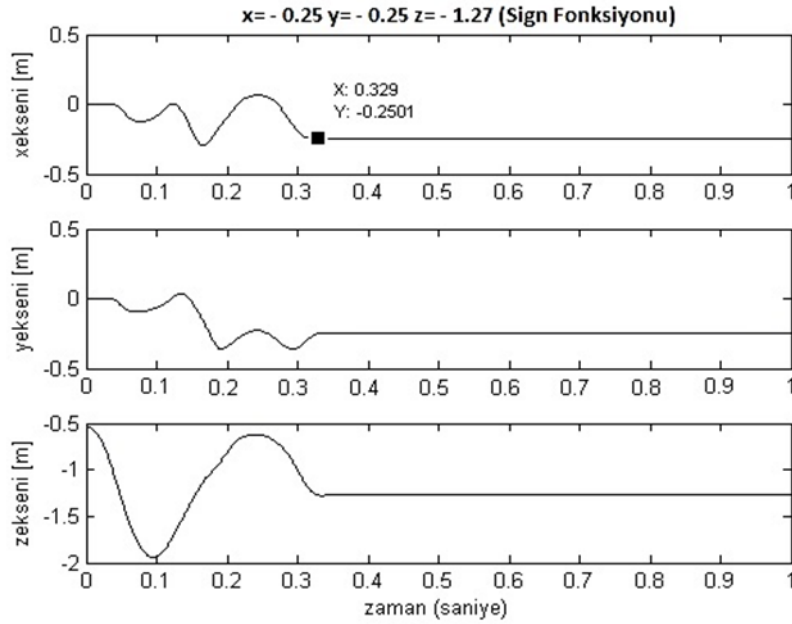


Şekil 9. Birinci uygulama için sistemin deplasman cevapları (Sign Fonksiyonu).

Benzer olarak ikinci uygulamada robot ucunu $x=-0.25$ m, $y=-0.25$ m ve $z=-1.27$ m referans konumlarına götürmek için kayan kipli denetim uygulanmıştır. Buna göre Şekil 11’de sistemin deplasman cevapları ve Şekil 12’de uygulanan kontrol kuvvetlerinin zamana göre değişimini veren grafiksel sonuçlar görülmektedir.

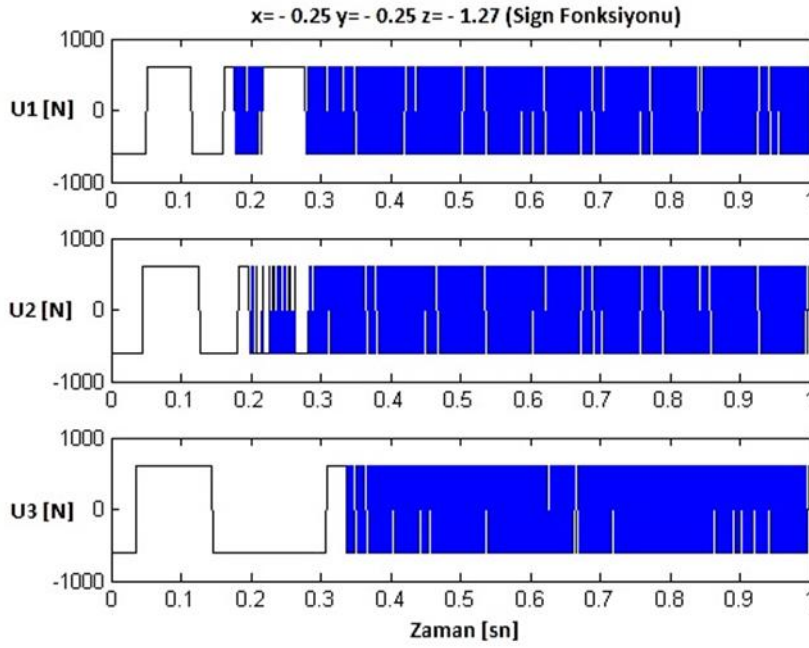


Şekil 10. Birinci uygulama için sisteme uygulanan kontrol kuvvetleri (Sign Fonksiyonu)

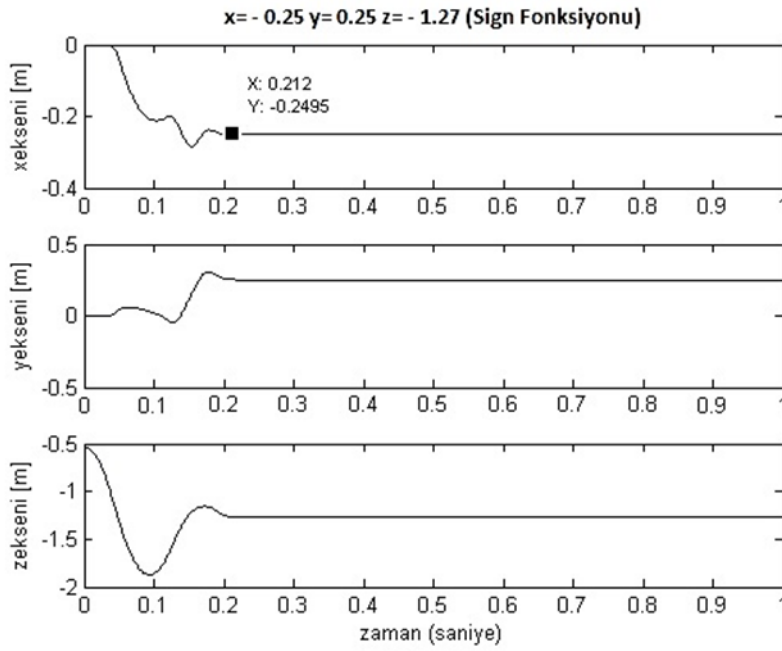


Şekil 11. İkinci uygulama için sistemin deplasman cevapları (Sign Fonksiyonu)

Üçüncü uygulamada robot ucunu $x = - 0.25$ m, $y = 0.25$ m ve $z = - 1.27$ m referans konumlarına götürmek için kayan kipli denetim uygulanmıştır. Buna göre Şekil 13’de sistemin deplasman cevapları ve Şekil 14’de uygulanan kontrol kuvvetlerinin zamana göre değişimini veren grafiksel sonuçlar görülmektedir.

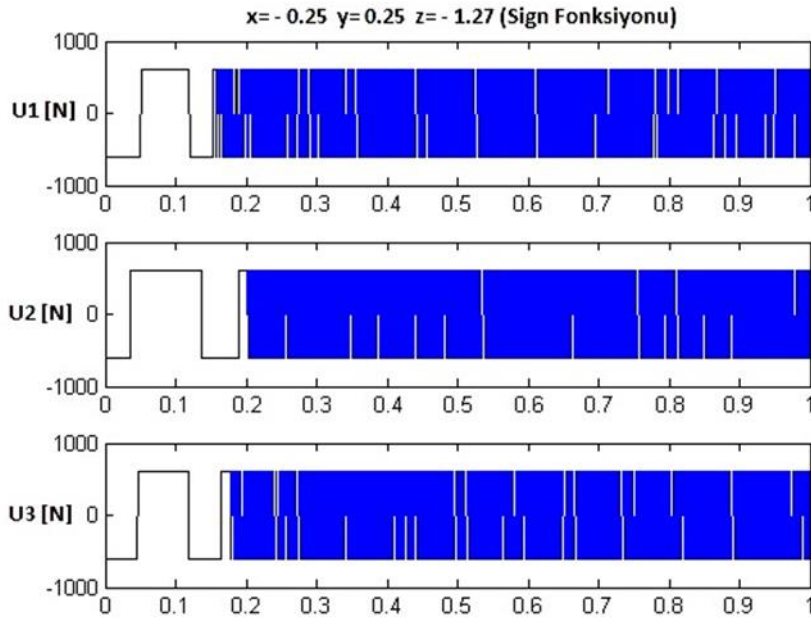


Şekil 12. İkinci uygulama için sisteme uygulanan kontrol kuvvetleri (Sign Fonksiyonu).



Şekil 13. Üçüncü uygulama için sistemin deplasman cevapları (Sign Fonksiyonu)

Kayan kipli denetim algoritması ile oldukça başarılı sonuçların elde edildiği açıkça görülmektedir. Ancak grafiklerden de görüldüğü gibi denetim sinyallerinde çok sık frekansta çatlardamalar oluşmaktadır. Bu çatlardamaların sıklığı denetleyicinin pratikte kullanılabilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu da kayan kipli denetimin dezavantajı olarak karşımıza çıkmaktadır.



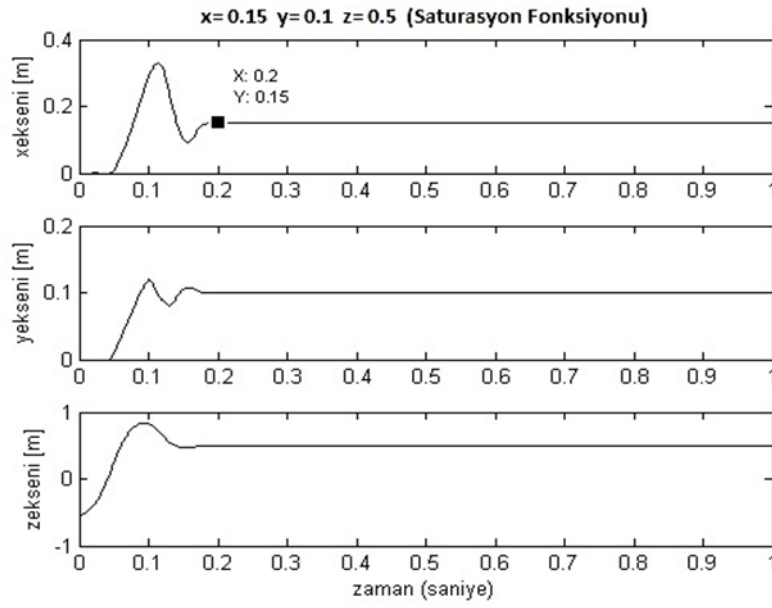
Şekil 14. Üçüncü uygulama için sisteme uygulanan kontrol kuvvetleri (Sign Fonksiyonu).

Kayan kipli denetleyicinin bu dezavantajını gidermeye yönelik birçok teknik kullanılabilir. Bu tekniklerden en yaygın olanı, işaret fonksiyonunun yerine saturasyon fonksiyonunun kullanımıdır. Saturasyon fonksiyonunda kayma yüzeyi boyunca ε genişliğinde bir bant tanımlanır. Bu durumda kayan kipli denetimin ifadesi;

$$U = -ksat(S/\varepsilon) \quad (22)$$

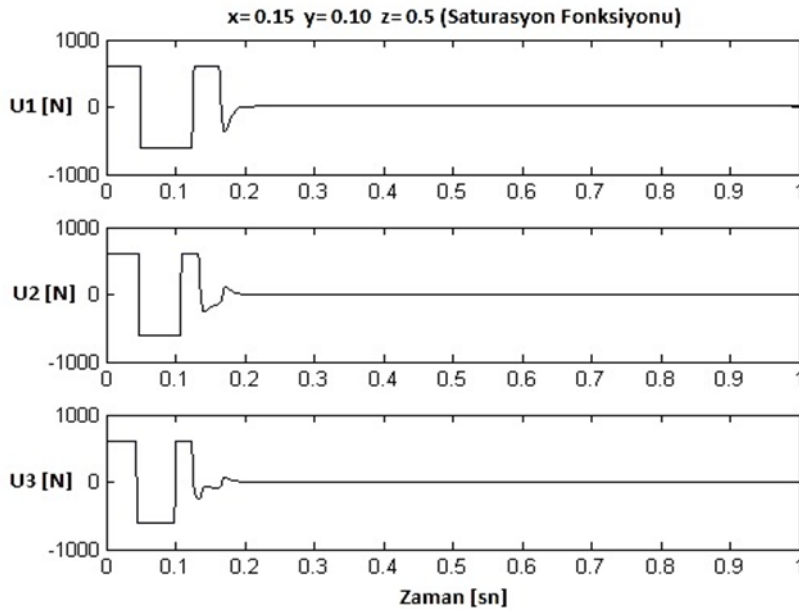
biçiminde yazılabilir. Bu bant genişliği yeterince büyük seçildiğinde çatırdama frekansında ciddi bir azalma oluşacak ve denetleyicinin pratikte uygulanabilirliği artırılmış olacaktır. Ancak denetim başarısında bir miktar düşüş yaşanması da beklenecektir. k değeri 600, ε değeri 0.3873 olarak alınmıştır.

İlk uygulamada robot ucunu $x=0.15$ m, $y=0.1$ m ve $z=0.5$ m referans konumlarına götürmek için saturasyon fonksiyonuna sahip kayan kipli denetim uygulandığında sistemin deplasman cevapları Şekil 15’de görüldüğü gibi grafiksel olarak elde edilmiştir.



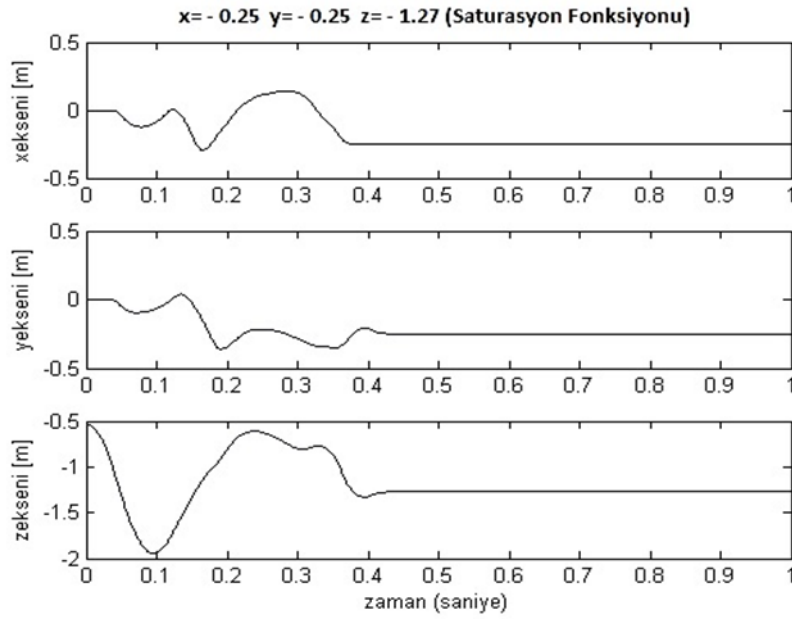
Şekil 15. Birinci uygulama için sistemin deplasman cevapları (Saturasyon Fonksiyonu).

Şekil 16’da her bir motorun uygulaması gereken kontrol kuvvetlerinin zamana göre değişimini veren grafik yer almaktadır.

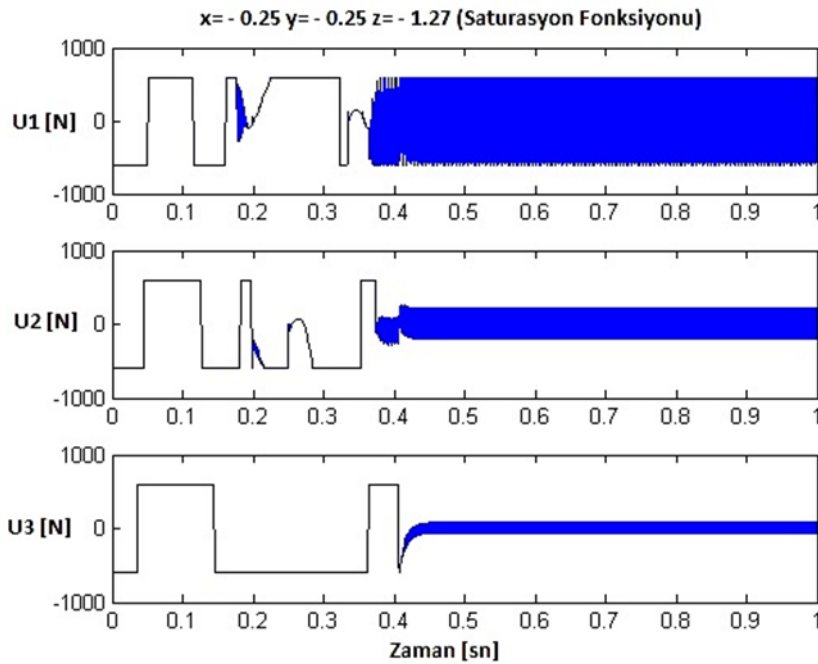


Şekil 16. Birinci uygulama için sisteme uygulanan kontrol kuvvetleri (Saturasyon Fonksiyonu).

İkinci uygulamada robot ucunu $x = -0.25$ m, $y = -0.25$ m ve $z = -1.27$ m referans konumlarına götürmek için saturasyon fonksiyonlu kayan kipli denetim uygulanmıştır. Buna göre Şekil 17’de sistemin deplasman cevapları ve Şekil 18’de uygulanan kontrol kuvvetlerinin zamana göre değişimini veren grafiksel sonuçlar görülmektedir.

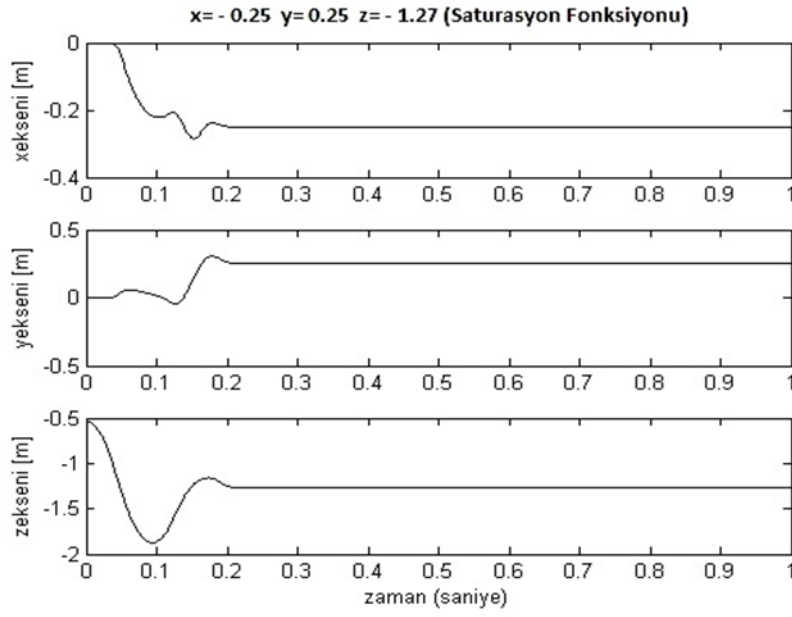


Şekil 17. İkinci uygulama için sistemin deplasman cevapları (Saturasyon Fonksiyonu).

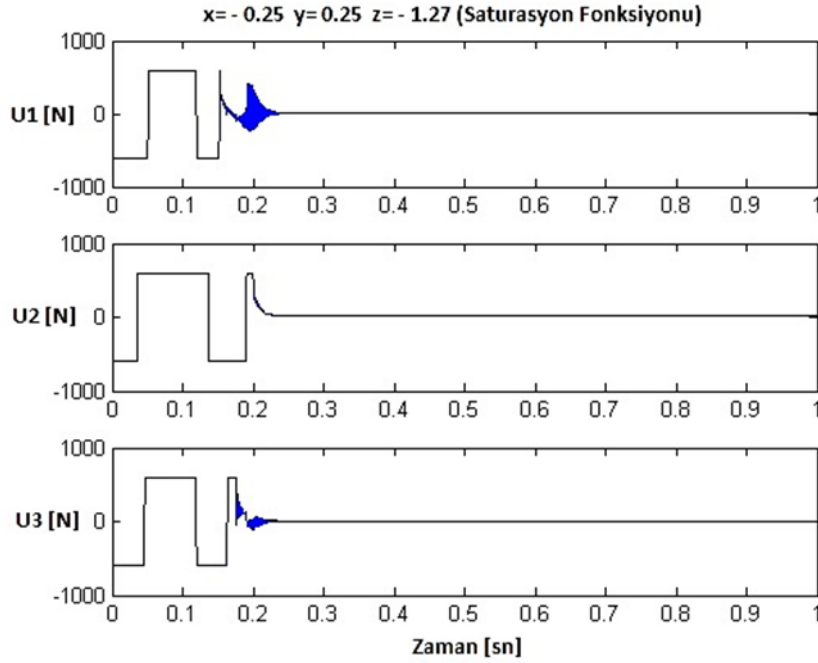


Şekil 18. İkinci uygulama için sisteme uygulanan kontrol kuvvetleri (Saturasyon Fonksiyonu).

Üçüncü uygulamada robot ucunu $x = - 0.25$ m, $y = 0.25$ m ve $z = - 1.27$ m referans konumlarına götürmek için saturasyon fonksiyonlu kayan kipli denetim uygulanmıştır. Buna göre Şekil 19 ve 20’de sistemin deplasman cevapları ile uygulanan kontrol kuvvetlerinin zamana göre değişimini veren sonuçlar görülmektedir.



Şekil 19. Üçüncü uygulama için sistemin deplasman cevapları (Saturasyon Fonksiyonu).



Şekil 20. Üçüncü uygulama için sisteme uygulanan kontrol kuvvetleri (Saturasyon Fonksiyonu).

Kayan kipli denetimde saturasyon fonksiyonunun kullanılması ile gerçekleştirilen denetimlerde elde edilen kontrol kuvveti grafikleri incelendiğinde çarptamanın çok büyük oranda azaldığı açıkça görülmektedir. Bununla birlikte deplasman cevaplarına bakıldığında denetleyicinin oldukça başarılı bir biçimde sistemi kontrol edebildiği görülmektedir.

6. Sonuçlar

Triglide paralel robotun kayan kipli denetim sonuçları incelendiği zaman x , y ve z 'nin istenilen referans değerlere yaklaşık 0.2 ile 0.5 sn aralıklarında değişen sürelerde ulaştığı görülmektedir.

Kayan kipli denetleyicinin yapısında sign işaret fonksiyonunun kullanılması ile kontrol kuvveti grafiklerinde büyük oranda çarırdamalar görülmüştür. Bu sonuç denetleyicinin pratikte uygulanabilirliğini kötüleştirmektedir. Kayan kipli denetleyicide saturasyon fonksiyonunun kullanılması ile kontrol kuvveti grafiklerinde çarırdamalar büyük oranda azaltılmış ve böylece denetleyicinin pratikte kullanılabilirliğinin iyileştirildiği görülmüştür.

Bu çalışma triglide paralel robotun daha önceki çalışmalarda elde edilmiş olan kinematik ve dinamik çözümleri kullanılarak kayan kipli denetleyici ile denetimi gerçekleştirilmiştir. Sisteme kayan kipli denetleyici uygulanırken genetik algoritma ile denetleyici katsayıları optimize edilmiştir. Signum ve saturasyon fonksiyonları denetleyicide ayrı ayrı kullanılarak sisteme etkisi gözlemlenmiştir. Literatüre Triglide robotun denetiminin kayan kipli denetim yöntemi ile gerçekleştirilmesi konusunda katkı sağlanmıştır.

Kaynaklar

- [1] Sciavicco L, Siciliano B. Modeling and Control of Robot Manipulator. 2nd ed. London: Springer; 2000.
- [2] Merlet JP. Parallel Robots. 2nd ed. The Netherlands: Springer, 2006, p. 75-76.
- [3] Merlet JP. On the infinitesimal motion of parallel manipulators in singular configurations. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France, 1992.
- [4] Bi ZM, Lang SYT. Joint workspace of parallel kinematic machines. Robotics and Computer Integrated Manufacturing 2009; 25:57-63.
- [5] Merlet JP. Determination of the orientation workspace of parallel manipulators. Journal of Intelligent and Robotic Systems 1995; 13: 143-160.
- [6] Mustafa M, Misuari R, Daniyal H. Forward kinematics of 3 degrees of freedom delta robot. In: The 5th Student Conference on Research and Development, Malasia, 11-12 December 2007.
- [7] <http://www.parallelic.org/Reviews/Review002.html>, Delta Parallel Robot, 6 Mayıs 2001.
- [8] Merlet JP. Parallel Robots. 2nd ed. The Netherlands: Springer, 2006, p. 31-34.
- [9] Aydın M, Alli H. Üç serbestlik dereceli Triglide paralel robotun ters ve düz kinematik çözümlerinin analitik olarak elde edilmesi. TOK2012, Nigde, Turkey, 2012.
- [10] Aydın M, Alli H. The Obtaining of Dynamic Equations for Three Degree of Freedom Parallel Robot. In: Proc. of the International Conference on Advances in Mechanical and Automation Engineering - MAE 2016, Roma, İtaly, 2016.
- [11] Young, K.D., Utkin, V.I., Ozguner, U. A Control Engineer's Guide to Sliding Mode Control. IEEE Transactions on Control Systems Technology 1999; 7 (3): 328-342
- [12] Edwards C, Spurgeon S K. Sliding Mode Control: Theory and Applications. London: Taylor and Francis; 1998.
- [13] Aydın M, Yakut O, Alli H. Yapay Sinir Ağı Kayan Kipli Kontrolün Dönel Ters Sarkaç Sistemine Uygulanması. Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi 2013; Özel sayı 5:39-50.

AHP YÖNTEMİ İLE KONUT SAYAÇLARINDA HATAYA SEBEP OLAN FAKTÖRLERİN ÖNEM SIRALARININ BELİRLENMESİ

Salih YILMAZ¹, Özgür ÖZDEMİR², Cansu ORHAN³, Mahmut FIRAT^{4*}

^{1,2}Malatya Su ve Kanalizasyon İdaresi (MASKİ) Genel Müdürlüğü, Malatya, 44900, Türkiye

^{3,4}İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, 44000, Türkiye

Geliş tarihi: 05.08.2017 Kabul tarihi: 30.11.2017

ÖZET

İçme suyu dağıtım sistemlerinde abone sayaçlarından kaynaklanan su kayıp hacminin azaltılması için sayaçların analiz edilmesi ve arızaya sebep olan faktörlerin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada, konutlarda kullanılan yasal abonelere ait sayaçlarda meydana gelen hataya sebep olan faktörlerin önem derecesinin belirlenmesi için çoklu ölçütlü karar verme yaklaşımı olarak ifade edilen Analitik Hiyerarşi Proses (AHP) yöntemi uygulanmıştır. Bunun için literatürde yapılan farklı çalışmalar incelenmiş ve sayaç hatası üzerinde etkili olabileceği düşünülen toplamda 11 faktör belirlenmiştir. Belirlen bu faktörlerin sayaç hatası üzerindeki etkisi için, akademisyen, Su ve Kanal İdaresi ve Belediye Yöneticisi/Çalışanı olmak üzere toplam 88 kişinin görüşleri alınmış ve 1'den 10'a kadar puan verilmesi istenmiştir. Uzman görüşleri esas alınarak, ikili karşılaştırma puanlandırmaları ve matrisleri oluşturulmuştur. Bu puanlandırmalar kullanılarak AHP yöntemi ile her bir faktör için ağırlık katsayısı hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalara göre, "Sayaç bağlantılarındaki hatalar" faktörü 0.129 değeri en yüksek ağırlık katsayısına sahip olurken en düşük değer 0.038 ile "Su kalitesi" faktörü için hesaplanmıştır. Ayrıca, elde edilen sonuçlara, "Şebeke basıncı", "Sayaç yaşı" ve "Sayaç sınıfı" faktörlerinin 0.114 ile benzer ağırlığa sahip oldukları görülmüştür. Bu sonuçlara göre sayaç hataları üzerinde işçilik kalitesinin oldukça önemli olduğu söylenebilir. Sonuç olarak bu çalışmadan elde edilen çıktılar özellikle sayaç yönetiminde Su ve Kanal İdareleri için referans teşkil edeceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Gelir getirmeyen su, Abone sayaçlar, Sayaç hataları, AHP

DETERMINATION OF THE IMPORTANCE RANKING OF THE FACTORS CAUSING THE INACCURACIES IN THE CUSTOMER WATER METERS BY AHP METHOD

ABSTRACT

In water distribution systems, it is very important to analyze the customer water meters and determine the factors causing the failures to reduce the water loss volume occurred by the meters inaccuracies. In this study, the Analytical Hierarchy Process (AHP) method, which is expressed as a multi-criteria decision-making approach, was applied to determine the importance ranking of the factors causing the inaccuracies in the meters belonging to the legal subscriptions used in the houses. For this, different studies in the literature were reviewed and a total of 11 factors considered to be effective on the water meter errors were determined. To understand the effect of these factors on the water meters, it is received opinion from 88 persons, who are academicians, the Water and Sewerage Administration and the Municipality Manager / Employee, and asked them to score from 1 to 10. Based on expert opinions, pairwise comparison scores and matrices were created. Each factor weight coefficient was calculated by the AHP method using these scorings. According to the calculations, the "Meter connection errors" factor has the highest weight coefficient of 0.129, while the lowest value is calculated for the "water quality" factor

* e-posta: mahmut.firat@inonu.edu.tr

of 0.038. In addition, it was observed that the "network operational pressure", "meter age" and "meter class" factors had similar weight to the results obtained with 0.114. According to these results, it can be said that workmanship quality is very important on meter errors. As a result, the outputs obtained from this study are considered to be a reference for Water and Sewerage Administrations, especially in meter management.

Keywords: *Non-revenue water, Customer water meters, Meter errors, AHP*

1. Giriş

Su temini sistemlerinde, sisteme verilen ancak parası ödenmeyen su, "gelir getirmeyen su ya da su kaybı" olarak ifade edilmektedir (Farley 2003; Farley et al., 2008; IWA, 2007; AWWA, 2009). Konutlarda kullanılan ve yasal kayıtlı abonelere ait sayaçlarda çeşitli sebeplerden dolayı arıza meydana gelmektedir. Bu arızalar bazen sayacın olması gerekenden daha fazla okumasına sebep olurken bazen de eksik okuma yapmaktadır. Özellikle sayaç yaşının fazla olduğu bölgelerde genelde sayaçlarda eksik okuma gözlenmekte ve bu da Su ve Kanal İdareleri için "İdari Kayıp" olarak ifade edilen gelir getirmeyen suya sebep olmaktadır. İdari kayıpların en önemli bileşeni, kaçak kullanım görünse de esasında yasal kayıtlı abonelerin sayaçlarından meydana gelen arızalar, eksik okumalar ve/veya hiç okuma yapmaması gibi faktörler önemli kayba sebep olmaktadır. Sayaç hatalarının en aza indirilmesi ve bu sayaç hatalarından kaynaklanan ve Kurum için doğrudan gelir kaybı anlamına gelen gelir getirmeyen su oranının azaltılması için sayaçlarda hatalara sebep olabilecek faktörlerin araştırılması ve analiz edilmesi önem taşımaktadır. Sayaç hatalarının ortaya konulması ve buna bağlı olarak yapılacak çalışmalar gelir getirmeyen su oranını azaltacağından önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Literatürde sayaç hataları ve bu hataların su kayıplarına etkileri gibi konularda farklı çalışmalar yapılmıştır. Davis (2005) yaptığı çalışma ile IWA (International Water Association) su denetim metodolojisinin önemli bileşenlerinden biri olan müşteri sayaçlarının yanlış ölçüm yapması kaynaklı kayıpları incelemiştir. Sayaç değişimlerinde belli standartların olmadığını ve genellikle 10 ila 20 yıl arasında değişim yapıldığını belirtmiştir. Cabrera vd. (2006) aboneye iletilen, tüketilen ve faturalandırılmayan her su hacminin su dağıtım kurumunda çok önemli bir etkiye neden olduğunu belirtmiştir. IWA/AWWA su dengesi tablolarında bu kayıpları kaçak kullanım, ölçüm hataları gibi iki ana başlık altında incelemiştir. Çalışmada, ölçüm hataları bileşeninin sayaçların doğru tipte ve boyutta seçilmesine doğrudan bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Mutikanga vd. (2011a) yaptıkları çalışmada idari kayıplara sebep olan faktörlerin analiz edilmesi amacıyla sahada yapılan ölçümler ve işletme verileri dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda, sayaç doğruluğunun su tüketimi üzerine önemli rol oynadığı vurgulanmıştır. Stoker vd. (2012) konutlarda kullanılan sayaçların doğruluğuna ve bozulmasına etki eden faktörlerin araştırılması amacıyla yaptıkları çalışmada, sayaçlarda bozulmanın, su kalitesi, su hızı, hacim, monte edilme şekli gibi etkenlerin bir fonksiyonu olduğu belirtilmiştir.

Arregui vd. (2015) yaptıkları çalışmada konutlardaki su sayaçlarında ölçüm hatalarının değerlendirilmesi amaçlanmış ve evsel su tüketim karakteristiklerinin idari kayıpları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, ölçüm hatasının, konut sayaç modeli ve kullanıcı karakteristiğinin bir fonksiyonu olduğu vurgulanmıştır. Fontanazza vd. (2015) konutlarda kullanılan sayaçların bozulmalarına sebep olan faktörlerin araştırılmasında, sayaç yaşı ve konutlardaki su depoları dikkate alınmış ve deneysel ve teorik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada konutlarda kullanılan ve yasal abonelere ait sayaçlarda meydana gelen hataya sebep olabilecek faktörlerin etki/önem derecesinin Analitik Hiyerarşi Proses (AHP) yöntemi ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için toplamda 11 faktör göz önünde bulundurulmuş ve önem sıralaması belirlenmeye çalışılmıştır.

2. Sayaç Hataları

İçme suyu sistemlerinde suyun tüketiciye ulaşana dek geçirdiği birçok aşama mevcuttur. Kaynaktan çıkan su kullanıcıya ulaşana kadar, fiziksel ve idari kayıplara uğramaktadır. Fiziksel kayıplar; depo vb. sanat yapılarında meydana gelen kaçaklar ile boru ve ek parçalarında meydana gelen hasarlar nedeniyle oluşan kayıpların bütünü olarak tanımlanabilirler. İdari kayıplar ise sayaç hataları, okuma hataları ve kaçak kullanımı kapsamaktadır. Verilerin standartlaştırılması amacıyla Uluslararası Su Birliği (IWA) ile Amerikan Su İşleri Birliği (AWWA) performans göstergelerini tanımlamış ve “Su Bütçesi” tablosunu oluşturmuşlardır. IWA/AWWA tarafından önerilen su bütçesi ya da dengesi Çizelge 1’de verilmiştir.

Su kaynaktan aboneye ulaşana kadar çeşitli işletme ve üretim maliyetleri doğuracaktır. Su sayaçları bu ücretlerin kullanıcılardan adil bir şekilde yapılabilmesi için kullanılan aletlere denmektedir. Su sayaçlarının ölçüm doğrulukları sürdürülebilir su yönetimi için çok önem arz etmektedir. İçmesuyu dağıtım şebekelerinde bulunan su sayaçları istenilen koşullarda kullanılmadığında hata oluşabilir. Hata nedenleri genel olarak; montaj pozisyonu, yanlış tip seçimi, borudaki hava, imalat hataları, tahribat, sudaki katı maddeler, servis ömrü, dışarıdan sayaca müdahale edilmesi ve basınç şeklinde verilebilir (Yılmaz, 2017).

Çizelge 1. IWA/AWWA Yöntemine Göre Su Bütçesi Tablosu (IWA, 2007)

| | | | | | |
|--|---------------|-----------------------------------|---|------------------|---------------------|
| Sisteme Giren Hacim | Yasal Tüketim | Faturalandırılmış Yasal Tüketim | Faturalandırılmış Ölçülmüş Tüketim | Gelir Getiren Su | |
| | | | Faturalandırılmamış Ölçülmüş Tüketim | | |
| | | Faturalandırılmamış Yasal Tüketim | Faturalandırılmamış Ölçülmüş Tüketim | | Gelir Getirmeyen Su |
| | | | Faturalandırılmamış Ölçülmemiş Tüketim | | |
| | Su Kayıpları | İdari Kayıplar | Yasadışı Tüketim | | |
| | | | Sayaç Hatası | | |
| | | | Okuma Hatası | | |
| | | Fiziksel Kayıplar | İletim ve Dağıtım Hatlarındaki Kaçaklar | | |
| Depolardaki Kaçaklar | | | | | |
| Sayaç ile Dağıtım Borusu Arasında Bağlantı Hatlarındaki Kaçaklar | | | | | |

Doğru bir ölçüm için doğru sayaç tipi seçilmeli ve kullanım yeri ve türüne göre doğru sayaç çapı belirlenmelidir. Sayaçların su kalitesine göre en az B sınıfı sayaçlar olması sayaç montajlarının kolon sistemine dik 90 derece olacak şekilde yere paralel montajının yapılması gerekmektedir (Varer, 2008). Boru içinde kalan hava ya da suda çözünen gazların sayaçlardan geçmeleri hatalı ölçümlere neden olacaktır. Sayacın imal edilme aşamasında yapılacak bir hata yanlış ölçüm yapmaya neden olacaktır. Ayrıca, sayacın dış etkenler nedeniyle zarar görmesi ölçümün doğruluğunu etkileyecektir. İçme suyu hatlarında çok azda olsa bulunan katı maddelerin sayacın önü ya da içinde çökmesi nedeniyle sayaçlar doğru ölçüm yapamayacaktır. Sayaçlar imal edildikten sonra 2-4 yıl arasında kalibre edilmek şartıyla 10-14 yıl arasında kullanılabilirler. Servis ömrünü tamamlayan veya kalibre edilmemiş sayaçlar yanlış ölçüme neden olacaktır. Sayaca yapılan bilinçli/bilinçsiz müdahaleler sayaçların yanlış ölçmesine neden olabilir (Yılmaz vd., 2017).

Su bütçesi tablosuna göre “Sayaçlardaki Ölçüm Hataları” idari kayıplar alt başlığıyla su kayıpları bölümünde değerlendirilmekte ve gelir getirmeyen su olarak tanımlanmaktadır. Bu bileşenin oluşturduğu su kaybı Kurumlar için doğrudan gelir kaybına sebep olmaktadır. Ayrıca sayaç hataları gelir

getirmeyen suyun yanı sıra aşırı su tüketimi gibi olumsuzluklara sebep olmaktadır. Bu nedenle bu bileşene ait hacmin azaltılması oldukça önem taşımaktadır.

3. Analitik Hiyerarşi Proses İle Sayaç Hatası Üzerinde Etkili Değişkenlerin Önem Derecesinin Belirlenmesi

Çoklu-ölçütlü karar verme, incelenen problem üzerinde etkili olduğu düşünülen tüm faktörleri göz önünde bulunduran ve değişkenler problem üzerindeki önem derecesini belirlemede kullanılan yöntem olarak açıklanabilir. Literatürde farklı amaçlar için uygulanan ve önerilen çoklu-ölçütlü karar verme yöntemleri kullanılmaktadır. Önerilen bu çalışmada da çoklu-ölçütlü karar verme yöntemi olarak ifade edilen AHP yöntemi uygulanmıştır. AHP yöntemi ilke defa Saaty (1980) tarafından önerilmiş olup farklı alanlarda yaygın bir şekilde uygulanan bir yöntemdir. AHP yönteminde temel işlem adımları; (i) problem üzerinde etkili faktör ve/veya alt faktörlerin belirlenmesi, (ii) ikili karşılaştırma puanlandırmalarının oluşturulması, (iii) ikili karşılaştırma matrislerinin oluşturulması, (iv) ağırlık katsayılarının belirlenmesi, (v) tutarlılık analizinin gerçekleştirilmesi şeklinde verilebilir.

AHP yöntemi ile sayaç hataları üzerinde etkili olduğu düşünülen faktörlerin etki derecesinin belirlenmesi için uzmanlar tarafından verilen görüşler esas alınmıştır. Bu çalışma Yılmaz (2017) tarafından yapılan Yüksek Lisans tezinden üretilmiş tezin çıktısı olarak yayınlanmıştır. Çalışma kapsamında, 26-28 Ekim 2016 tarihleri arasında Malatya’da düzenlenen Uluslararası Kentsel Su ve Atıksu Yönetimi Sempozyumu (UKSAY) kapsamında, Akademisyen ve Su ve Kanal İdaresi ve Belediye Yöneticisi/Çalışanı olmak üzere toplam 88 kişinin görüşleri alınmış ve 1’den 10’a kadar puan verilmesi istenmiştir. Çalışma kapsamında hazırlanan ve uzmanlara sorulan sorular Şekil 1’de gösterilmiştir. Şekil 1’de verildiği gibi, Sayaç Sınıfının Yanlış Seçilmesi (D1), Sayaç Yaşı (D2), Sayaç Malzemesinin Kalitesi (D3), Sayaç Bağlantılarında Yapılan Hatalar (D4), Kullanıcı Su Tüketim Profili (D5), İklim (D6), Şebeke Basıncı (D7), Kat Yüksekliği (D8), Şebekedeki Arıza ve Diğer Nedenlerden Dolayı Meydana Gelen Kesintiler (D9), Sayaçların Kalibre Edilmemesi (D10) ve Su Kalitesi (D11) olmak üzere toplamda 11 faktör göz önünde bulundurulmuştur. AHP yöntemi ile değişkenlerin etki derecelerinin belirlenmesi için her bir uzmana ait görüşler aşağıda verilen işlem adımlarına göre analiz edilmiştir (Yılmaz, 2017).

3.1. Adım 1: İkili Karşılaştırma Matrislerinin Kurulması

Faktörlerin faktörlerle kıyaslandığı matristir. Bu işlem adımında her bir katılımcı için ayrı ayrı ikili karşılaştırma matrisleri kurulmaktadır. Matrisler kurulurken Saaty (1980) tarafından önerilen puanlandırma esasları kullanılmakta ve her bir faktörün kendisiyle kıyaslandığı hücreler bir olacak şekilde ve her bir puanın matristeki karşı hücrelerine tersi yazılarak puanlandırma işlemi tamamlanmaktadır (Yaralıoğlu, 2001). Aşağıda bir katılımcının yaptığı puanlamalar doğrultusunda ikili karşılaştırma matrisi kurulmuş ve Çizelge 2’de verilmiştir.

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \quad (1)$$



Sayaç Hatalarına Neden Olan Etmenlere İlişkin Görüşlerin Değerlendirilmesi

- A. Bu bölümde, sizden çalıştığınız kurum ve kendiniz hakkında genel bilgiler vermeniz istenmektedir. Lütfen aşağıdaki soruları okuyarak cevaplayınız.

Adınız – Soyadınız :

Mesleğiniz :

Çalıştığınız Kurum ve Birim :

Göreviniz :

Eğitim Durumunuz Lisans Lisansüstü

- B. Bu bölümde sayaçlarda ki hatalara neden olan değişkenler hakkındaki düşünceleriniz sorulmaktadır. İlgili parametrenin sayaçlarda meydana gelen hatalara etkisini 1'den 10'a kadar puanlandırınız.
(1) Etkisiz (10) Çok Etkili

| No | Sorular | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 1 | Sayaç Sınıfının Yanlış Seçilmesinin, Sayaçlarda meydana gelen hatalar üzerindeki etkisi hakkında ne düşünüyorsunuz? | | | | | | | | | | |
| 2 | Sayacın Yaşının, Sayaçlarda meydana gelen hatalar üzerindeki etkisi hakkında ne düşünüyorsunuz? | | | | | | | | | | |
| 3 | Sayaç Malzeme Kalitesinin, Sayaçlarda meydana gelen hatalar üzerindeki etkisi hakkında ne düşünüyorsunuz? | | | | | | | | | | |
| 4 | Sayaç bağlantılarında yapılan hataların, Sayaçlarda meydana gelen hatalar üzerindeki etkisi hakkında ne düşünüyorsunuz? | | | | | | | | | | |
| 5 | Kullanıcı Su Tüketim Profilinin, Sayaçlarda meydana gelen hatalar üzerindeki etkisi hakkında ne düşünüyorsunuz? | | | | | | | | | | |
| 6 | İklimin, Sayaçlarda meydana gelen hatalar üzerindeki etkisi hakkında ne düşünüyorsunuz? | | | | | | | | | | |
| 7 | Şebeke Basıncının, Sayaçlarda meydana gelen hatalar üzerindeki etkisi hakkında ne düşünüyorsunuz? | | | | | | | | | | |
| 8 | Kat Yüksekliğinin, Sayaçlarda meydana gelen hatalar üzerindeki etkisi hakkında ne düşünüyorsunuz? | | | | | | | | | | |
| 9 | Şebekedeki Arıza veya Diğer Nedenlerden Dolayı Meydana Gelen Kesintilerin, Sayaçlarda meydana gelen hatalar üzerindeki etkisi hakkında ne düşünüyorsunuz? | | | | | | | | | | |
| 10 | Sayaçların Kalibre Edilmemesinin, Sayaçlarda meydana gelen hatalar üzerindeki etkisi hakkında ne düşünüyorsunuz? | | | | | | | | | | |
| 11 | Su Kalitesinin, Sayaçlarda meydana gelen hatalar üzerindeki etkisi hakkında ne düşünüyorsunuz? | | | | | | | | | | |

Şekil 1. Çalışma Kapsamında Uzmanlara Sorulan Sorular (Yılmaz, 2017)

3.2. Adım 2: Tercih Matrislerinin Oluşturulması

Tercih Matrisleri oluşturulurken ikili karşılaştırma matrisinde her bir sayı kendi sütun toplamına bölünmüş ve matris oluşturulmuştur (Çizelge 3).

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

Bu denklemlerde, i; satır sayısı, j; sütun sayısı, A_{ij} esas matrisi ve b_{ij} ; birim matris elemanları olarak ifade edilebilir.

Çizelge 2. İkili Karşılaştırma Matrisinde Değişkenlerin Puanları

| Değişken | D 1 | D 2 | D 3 | D 4 | D 5 | D 6 | D 7 | D 8 | D 9 | D 10 | D 11 |
|----------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|
| D 1 | 1 | 1 | 3 | 1/6 | 1/3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1/6 | 3 |
| D 2 | 1 | 1 | 3 | 1/6 | 1/3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1/6 | 3 |
| D 3 | 1/3 | 1/3 | 1 | 1/9 | 1/6 | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1/9 | 1 |
| D 4 | 6 | 6 | 9 | 1 | 3 | 9 | 9 | 9 | 6 | 1 | 9 |
| D 5 | 3 | 3 | 6 | 1/3 | 1 | 6 | 6 | 6 | 3 | 1/3 | 6 |
| D 6 | 1/3 | 1/3 | 1 | 1/9 | 1/6 | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1/9 | 1 |
| D 7 | 1/3 | 1/3 | 1 | 1/9 | 1/6 | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1/9 | 1 |
| D 8 | 1/3 | 1/3 | 1 | 1/9 | 1/6 | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1/9 | 1 |
| D 9 | 1 | 1 | 3 | 1/6 | 1/3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1/6 | 3 |
| D 10 | 6 | 6 | 9 | 1 | 3 | 9 | 9 | 9 | 6 | 1 | 9 |
| D 11 | 1/3 | 1/3 | 1 | 1/9 | 1/6 | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1/9 | 1 |
| Toplam | 19.67 | 19.67 | 38.0 | 3.39 | 8.83 | 38.0 | 38.0 | 38.0 | 19.67 | 3.39 | 38.0 |

Çizelge 3. Değişkenler İçin Oluşturulan Standart Tercih Matrisi

| Değişken | D 1 | D 2 | D 3 | D 4 | D 5 | D 6 | D 7 | D 8 | D 9 | D 10 | D 11 |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| D 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D 4 | 1/3 | 1/3 | 1/4 | 2/7 | 1/3 | 1/4 | 1/4 | 1/4 | 1/3 | 2/7 | 1/4 |
| D 5 | 1/7 | 1/7 | 1/6 | 0 | 1/9 | 1/6 | 1/6 | 1/6 | 1/7 | 0 | 1/6 |
| D 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D 10 | 1/3 | 1/3 | 1/4 | 2/7 | 1/3 | 1/4 | 1/4 | 1/4 | 1/3 | 2/7 | 1/4 |
| D 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

3.3. Adım 3: Ortalama Matris (W Sütun Vektörü)

Ortalama matrislerde tercih matrisindeki değerler ondalık sayılara dönüştürülüp her bir faktörün ağırlık katsayısını veren ortalama değerler (her bir satır için) hesaplanmış ve Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Değişkenler İçin Ortalama Matris (W Sütun vektörü)

| Değişken | D 1 | D 2 | D 3 | D 4 | D 5 | D 6 | D 7 | D 8 | D 9 | D 10 | D 11 | ORT |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| D 1 | 0.05 | 0.05 | 0.08 | 0.05 | 0.04 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.05 | 0.05 | 0.08 | 0.06 |

| | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| D 2 | 0.05 | 0.05 | 0.08 | 0.05 | 0.04 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.05 | 0.05 | 0.08 | 0.06 |
| D 3 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 |
| D 4 | 0.31 | 0.31 | 0.24 | 0.30 | 0.34 | 0.24 | 0.24 | 0.24 | 0.31 | 0.30 | 0.24 | 0.28 |
| D 5 | 0.15 | 0.15 | 0.16 | 0.10 | 0.11 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.15 | 0.10 | 0.16 | 0.14 |
| D 6 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 |
| D 7 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 |
| D 8 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 |
| D 9 | 0.05 | 0.05 | 0.08 | 0.05 | 0.04 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.05 | 0.05 | 0.08 | 0.06 |
| D 10 | 0.31 | 0.31 | 0.24 | 0.30 | 0.34 | 0.24 | 0.24 | 0.24 | 0.31 | 0.30 | 0.24 | 0.28 |
| D 11 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 |

3.4. Adım 4: Geometrik Ortalama

Yukarıdaki işlemler doğrultusunda her katılımcı için ikili karşılaştırma matrisleri ayrı ayrı kurulduktan sonra AHP işlem adımları tüm matrisler için uygulanıp ağırlık katsayıları hesaplanmıştır. Tüm bu oluşturulan matrisleri tek bir matrise indirgeyip sonuç matrisini oluşturmak ve tutarlılık hesabı yapabilmek için ise; her bir matriste matrislerin aynı hücrelerinin geometrik ortalamaları alınıp ve tek bir matris oluşturulacaktır (Çizelge 5).

Çizelge 5. Değişkenler İçin Geometrik Ortalama Matrisi

| Değişken | D 1 | D 2 | D 3 | D 4 | D 5 | D 6 | D 7 | D 8 | D 9 | D 10 | D 11 |
|----------|------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
| D 1 | 1.00 | 1.02 | 1.06 | 0.87 | 2.55 | 2.02 | 1.01 | 1.66 | 1.96 | 1.11 | 2.93 |
| D 2 | 0.98 | 1.00 | 1.05 | 0.87 | 2.56 | 2.06 | 1.02 | 1.65 | 1.98 | 1.05 | 3.06 |
| D 3 | 0.95 | 0.96 | 1.00 | 0.84 | 2.66 | 2.06 | 0.97 | 1.70 | 1.89 | 1.05 | 2.95 |
| D 4 | 1.15 | 1.15 | 1.18 | 1.00 | 2.93 | 2.39 | 1.09 | 1.83 | 2.20 | 1.15 | 3.30 |
| D 5 | 0.39 | 0.39 | 0.38 | 0.34 | 1.00 | 0.75 | 0.38 | 0.61 | 0.71 | 0.42 | 1.09 |
| D 6 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.42 | 1.34 | 1.00 | 0.46 | 0.79 | 0.87 | 0.50 | 1.38 |
| D 7 | 0.99 | 0.98 | 1.03 | 0.91 | 2.60 | 2.16 | 1.00 | 1.66 | 1.83 | 1.10 | 2.92 |
| D 8 | 0.60 | 0.60 | 0.59 | 0.55 | 1.65 | 1.27 | 0.60 | 1.00 | 1.12 | 0.63 | 1.93 |
| D 9 | 0.51 | 0.50 | 0.53 | 0.45 | 1.40 | 1.14 | 0.55 | 0.89 | 1.00 | 0.54 | 1.58 |
| D 10 | 0.90 | 0.95 | 0.95 | 0.87 | 2.40 | 2.00 | 0.91 | 1.58 | 1.84 | 1.00 | 2.89 |
| D 11 | 0.34 | 0.33 | 0.34 | 0.30 | 0.92 | 0.72 | 0.34 | 0.52 | 0.63 | 0.35 | 1.00 |
| Toplam | 8.31 | 8.37 | 8.59 | 7.43 | 22.00 | 17.6 | 8.34 | 13.9 | 16.04 | 12.03 | 32.37 |

Bulunan sonuç matrisi için de AHP' nin işlem adımları tekrar uygulanarak tercih ve ortalama matrisleri bulunmuştur (Çizelge 6 ve 7).

Çizelge 6. Sonuç Matrisi İçin Oluşturulan Tercih Matrisi

| | D 1 | D 2 | D 3 | D 4 | D 5 | D 6 | D 7 | D 8 | D 9 | D 10 | D 11 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| D 1 | 1/8 | 1/8 | 1/8 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/8 | 1/8 | 1/8 | 0 | 0 |

| | | | | | | | | | | | |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|-----|
| D 2 | 1/8 | 1/8 | 1/8 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/8 | 1/8 | 1/8 | 0 | 0 |
| D 3 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/8 | 1/9 | 1/9 | 1/8 | 1/8 | 0 | 0 |
| D 4 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/8 | 1/7 | 1/8 | 1/8 | 1/7 | 0 | 1/9 |
| D 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D 7 | 1/8 | 1/8 | 1/8 | 1/8 | 1/8 | 1/8 | 1/8 | 1/8 | 1/9 | 0 | 0 |
| D 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D 10 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 0 | 0 |
| D 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Çizelge 7. Sonuç Matrisi İçin Oluşturulan Ortalama Matris

| Değişken | D 1 | D 2 | D 3 | D 4 | D 5 | D 6 | D 7 | D 8 | D 9 | D 10 | D 11 | ORT |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| D 1 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.09 | 0.09 | 0.11 |
| D 2 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.09 | 0.09 | 0.11 |
| D 3 | 0.11 | 0.11 | 0.12 | 0.11 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.09 | 0.09 | 0.11 |
| D 4 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.13 | 0.13 | 0.14 | 0.13 | 0.13 | 0.14 | 0.10 | 0.10 | 0.13 |
| D 5 | 0.05 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.04 |
| D 6 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.05 |
| D 7 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.11 | 0.09 | 0.09 | 0.11 |
| D 8 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.05 | 0.06 | 0.07 |
| D 9 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | 0.06 | 0.05 | 0.05 | 0.06 |
| D 10 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.12 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.08 | 0.09 | 0.11 |
| D 11 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.04 |

3.5. Adım 5: Tutarlılık Analizi

Oluşturulan sonuç matrisinin tutarlılığının ölçüleceği işlem adıdır. Tutarlılık Analizinde, kurulan ikili karşılaştırma matrisi ile bulunan faktör ağırlıklarını gösteren ağırlık sütununun matris çarpımı yapılarak D Sütun Matrisi elde edilmektedir. E Sütun değerleri için ise D matrisindeki değerler faktörün kendi ağırlık katsayısına bölümü yapılarak elde edilmektedir. λ Temel Değer'in hesabı için, E sütun matrisinin toplamının aritmetik ortalaması hesaplanmaktadır (Lamata, 2006). AHP yönteminde tutarlılık analizinde kullanılan RI için değişken sayısına göre standart değerler önerilmiş ve Çizelge 8'de verilmiştir (Alonso, 2006).

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (3)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

Çizelge 8. Tutarlılık Analizinde Değişken Sayısına Bağlı RI Değerleri (Alonso, 2006)

| | | | | | | | | | | | | |
|----|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| N | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| RI | 0 | 0 | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.41 | 1.45 | 1.49 | 1.51 | 1.48 | 1.56 |

Çizelge 9. Tutarlılık Analizinde Hesaplanan D ve E Matrisleri

| | | | | | | | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|
| D | 1.26 | 1.26 | 1.23 | 1.41 | 0.47 | 0.6 | 1.26 | 0.76 | 0.66 | 1.18 | 0.42 |
| E | 11.01 | 11.01 | 11.01 | 10.99 | 11.01 | 10.99 | 11.01 | 11.02 | 11 | 11.01 | 11 |

Çalışma kapsamında tutarlılık analizi sonucunda λ değeri 11.0038, CI değeri 0.004 ve CR değeri ise 0.0003 olarak hesaplanmıştır. Tutarlılık oranı olan CR'ye ait değerlerin sınır değer olan 0.1'den küçük olması, yapılan işlemlerin ve kurulan ikili karşılaştırma matrislerinin doğru olduğunu göstermektedir. Tutarlılık Analizi kontrolü yapıldıktan sonra faktörlerin ağırlıklarına ulaşılmaktadır. AHP ile sayaçlara etki eden faktörlerin ağırlık katsayıları ve öncelik sıralamaları Çizelge 10'daki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 10. Sayaç Hatalarına Sebep Olan Faktörlerin Önem Sıralaması (Yılmaz, 2017)

| Değişkenler | Ağırlık Katsayısı (w_i) | Öncelik Sıralaması | | | | |
|-------------|---------------------------------|--------------------|-------------|------|---------------------------------|-------|
| | | Sıra No | Değişkenler | | (w_i) | |
| D 1 | Sayaç Sınıfı | 0.114 | 1 | D 4 | Sayaç Bağlantılarındaki Hatalar | 0.129 |
| D 2 | Sayaç Yaşı | 0.114 | 2 | D 7 | Şebeke Basıncı | 0.114 |
| D 3 | Sayaç Malzeme Kalitesi | 0.112 | 3 | D 2 | Sayaç Yaşı | 0.114 |
| D 4 | Sayaç Bağlantılarındaki Hatalar | 0.129 | 4 | D 1 | Sayaç Sınıfı | 0.114 |
| D 5 | Kullanıcı Su Tüketim Profili | 0.043 | 5 | D 3 | Sayaç Malzeme Kalitesi | 0.112 |
| D 6 | İklim | 0.054 | 6 | D 10 | Sayacın Kalibre Edilmemesi | 0.108 |
| D 7 | Şebeke Basıncı | 0.114 | 7 | D 8 | Kat Yüksekliği | 0.069 |
| D 8 | Kat Yüksekliği | 0.069 | 8 | D 9 | Su Kesintileri | 0.06 |
| D 9 | Su Kesintileri | 0.06 | 9 | D 6 | İklim | 0.054 |
| D 10 | Sayacın Kalibre Edilmemesi | 0.108 | 10 | D 5 | Kullanıcı Su Tüketim Profili | 0.043 |
| D11 | Su Kalitesi | 0.038 | 11 | D 11 | Su Kalitesi | 0.038 |

Çizelge 10’da verilen sonuçlara göre, konutlarda kullanılan sayaçlarda meydana gelen hatalar üzerinde en yüksek etkiye sahip faktör 0.129 ağırlık katsayısı ile “Sayaç bağlantılarındaki hatalar” faktörü belirlenmiştir. Diğer taraftan en düşük etkiye sahip faktörün 0.038 ile “Su kalitesi” faktörü olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre sayaç hataları üzerinde işçilik kalitesinin oldukça önemli olduğu söylenebilir. Bu durum özellikle eski olan konutlarda sayaçların aboneler tarafından düşük işçilik kalitesi ile takıldığı dönemlerde yüksek hata oranlarının oluşabileceği ve bunun da gelir getirmeyen su oranını arttıracığı düşünülmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, konutlarda yasal aboneler tarafından kullanılan su sayaçlarında meydana gelen hataya sebep olan faktörlerin önem derecelerinin belirlenmesi için AHP yöntemi uygulanmıştır. Bunun için toplamda 11 değişken için Su ve Kanal İdarelerinde çalışan yönetici ve mühendisler, Üniversitelerden akademisyenlerden oluşan uzmanların görüşleri alınmıştır. Uzman görüşleri temel alınarak faktörler için puanlandırma ve ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmuştur. AHP yöntemi ile tercih ve sonuç matrisi oluşturulduktan sonra tutarlık analizi gerçekleştirilmiş ve CI (tutarlılık indeksi) değeri 0.004 ve CR (tutarlılık oranı) değeri ise 0.0003 olarak hesaplanmıştır. Tutarlılık analizi sonucunda elde edilen CR’ye ait değerlerin sınır değer olan 0.1’den küçük elde edilmiştir ve bu da yapılan işlemlerin ve kurulan ikili karşılaştırma matrislerinin doğru olduğunu göstermektedir. Çalışma kapsamında son olarak AHP yöntemi ile tüm faktörler için ağırlık katsayısı hesaplanmış ve her bir faktörün sayaç hatası üzerindeki etki derecesi belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan hesaplamalara göre, “Sayaç bağlantılarındaki hatalar” faktörü 0.129 değeri en yüksek ağırlık katsayısına sahip olurken en düşük değer 0.038 ile “Su kalitesi” faktörü için hesaplanmıştır. Ayrıca, elde edilen sonuçlara, “Şebeke basıncı”, “Sayaç yaşı” ve “Sayaç sınıfı” faktörlerinin 0.114 ile benzer ağırlığa sahip oldukları görülmüştür. Bu sonuçlara göre sayaç hataları üzerinde işçilik kalitesinin oldukça önemli olduğu söylenebilir. Sonuç olarak bu çalışmadan elde edilen çıktıların özellikle sayaç yönetiminde Su ve Kanal İdareleri için referans teşkil edeceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, 2017 yılında Salih YILMAZ tarafından tamamlanan Yüksek Lisans Tezinden üretilmiştir. Çalışma, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, İÜ-BAP 2016/135 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Yazarlar, Desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi’ne teşekkür etmektedir.

Kaynaklar

- [1] Arregui, F., Balaguer, M., & Soriano, J. (2015). Quantifying measuring errors of new residential water meters considering different customer consumption patterns. *Urban Water Journal*, 12: (1–13).
- [2] AWWA (American Water Works Association). 2009. *Water Audits and Loss Control Programs*, 3rd Ed. (Manual of Water Supply Practice M-36). Denver, CO: American Water Works Association.
- [3] Cabrera, E., Cobacho, R., Garcı-a-Serra, J. (2006). *Reducing Apparent Losses Caused By Meters Inaccuracies*. IWA, (2006).
- [4] Davis, S.E. (2005). *Residential water meter economics. Leakage 2005*. Halifax, Canada.
- [5] Farley, M. (2003) *Non Revenue Water - International Best Practice for Assessment, Monitoring and Control*. 12th Annual CWWA Water, Wastewater & Solid Waste 1–18.
- [6] Farley, M., Wyeth, G., Ghazali, Z.B., Istandar, A., Singh, S. (2008). *The Manager’s Non-Revenue Water Handbook. A Guide to Understanding Water Losses*.

- [7] Fontanazza, C. M., Notaro, V., Puleo, V., & Freni, G. (2015). The apparent losses due to metering errors: a proactive approach to predict losses and schedule maintenance. *Urban Water Journal*, 12(3): 229–239.
- [8] IWA Water Loss Task Force. (2007). *Leak location and repair guidance notes*. London, UK: IWA.
- [9] Mutikanga, H. E., Sharma, S. K., & Vairavamoorthy, K. (2011). Assessment of apparent losses in urban water systems. *Water Environmental Journal*. 25: 327–335.
- [10] Saaty TL (1980) *The analytic hierarchy process*. Mc Graw Hill, New York.
- [11] Stoker, D. M., Barfuss, S. L., & Johnson, M. C. (2012). Flow measurement accuracies of in-service residential water meters. *Journal - American Water Works Association*. 104(12): 637–642.
- [12] Yılmaz, S. (2017). *Müşteri Sayaçlarının Su Kayıplarına Etkisinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. İnönü Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. 105s.