

Doğal Gaz Boru İçi Denetleme Robotları İçin Enerji Depolama Sistemlerinin Tasarlanması

Hüseyin Ayhan YAVAŞOĞLU¹

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

e-posta: hayhan@yildiz.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8145-719X>

Geliş Tarihi: 05.01.2023 Kabul Tarihi: 13.02.2023

Öz

Anahtar kelimeler

Boru içi denetleme;
Robotik; Enerji
depolama sistemi;
Doğal gaz boru hattı;

Boru içi denetleme teknolojisi doğal gaz dağıtım hatlarında robotik sistemler ile gerçekleştirilebilmektedir. Robotik sistemlerin tasarlanmasındaki en büyük zorluklar, patlayıcı ortamdan korunma standartlarına (ATEX) uyum ve kritik operasyon sürelerine göre enerji depolama sistemlerinin boyutlandırılmasıdır. Bu çalışmada, robotik sistemler için enerji depolama sisteminin boyutlandırma adımları paylaşılmış, literatürdeki mevcut tasarım yöntemlerinden farklı olarak, tasarım ve üretim aşamalarını kolaylaştıracak iki ayrı maliyet etkin çözüm sunulmuştur. Önerilen tasarım yaklaşımları ATEX Bölge-1 tanımlı modüllere ihtiyaç duymamakta, özellikle küçük çaplı doğal gaz boru hatlarına yönelik tasarım çalışmalarını kolaylaştıracağı değerlendirilmektedir.

Energy Storage Systems for Natural Gas Pipeline In-line Inspection Robots

Abstract

Keywords

In-line inspection;
Robotics; Energy
storage system;
natural gas pipeline;

In natural gas distribution lines, robotic systems can be utilized to implement technology for in-line inspection. Compliance with explosive atmosphere protection standards (ATEX) and sizing energy storage systems for critical operating times are the greatest obstacles when designing robotic systems. In this study, the steps for sizing the energy storage system for robotic systems are outlined, and two cost-effective solutions, distinct from the existing design methods in the literature, are presented to facilitate the design and production phases. The proposed design approaches do not necessitate ATEX Zone-1 defined modules and are believed to facilitate design studies, particularly for natural gas pipelines with small diameters.

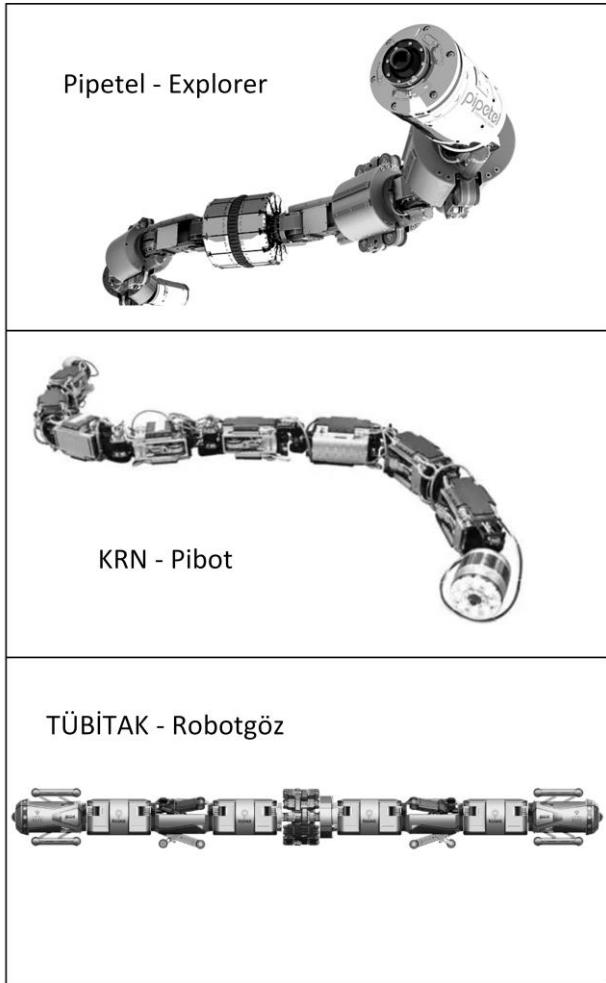
© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Doğal gaz enerjisinin kaynaktan tüketim noktalarına taşınması için yaygın olarak boru hatları kullanılmaktadır. Fakat boru hatlarında meydana gelebilecek arıza ve kazalar çevresel etkilere yol açabilir veya insan hayatına sebebiyet verecek kazalara neden olabilirler. Bu nedenle doğal gaz hatları belirli aralıklar ile denetlenmeli, kaza ve arızalar olmadan boru hattı üzerindeki anomaliler erkenden tespit edilmelidir. Gaz arzının devamlılığı ve operasyonel olarak faal olarak tutulabilmesi için yapılan tüm denetim, bakım ve onarım çalışmalarına boru hattı bütünlük programı denmektedir (PIM) (Khan *et al.* 2021). Bu kapsamda denetleme

faaliyetleri için en doğru ve en hassas sonuçlar ise boru içi denetleme (ILI) metodolojisi ile elde edilmektedir (Sheikh, *et al.* 2022). ILI kullanımı doğal gaz boru hattının karakteristiğine, başka bir deyişle iletim veya dağıtım hattı olmasına göre farklılık göstermektedir. İletim hatlarında pig adı verilen akış ile hareket eden cihazlar kullanılmaktadır. Bu cihazlar gelişmiş denetleme sensörlerine sahiptir ve boru içerisinde gaz akışı ile beraber hareket ederler. Hareket için bir enerji ihtiyacı olmadığı için basit bir enerji depolama sistemine (EDS) sahiptirler. Diğer yandan, doğal gaz dağıtım hatlarında ise birçok özel geçiş, arka arkaya dirsekler, sert dönüşler, Tee bağlantılar ve çap değişiklikleri bulunabilmektedir.

Bu nedenle bir uçtan diğer uca akış ile hareket edecek pig benzeri cihazlar, ILI kapsamında dağıtım hatlarında kullanılamamaktadır (Mirshamsi and Rafeeyan, 2019). Bu durumda manyetik akı kaçağı (MFL) sensörü gibi gelişmiş denetleme sensörlerinin dağıtım hatlarında kullanılabilmesi için robotik sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır (Verma *et al.*, 2022). Boru içi denetleme faaliyetleri için birçok robotik sistem geliştirilmiştir (Yavasoglu, *et al.* 2022). Fakat bu çalışmalar yukarıda bahsi geçen gelişmiş sensör teknolojisine sahip robotlar değildir. Gelişmiş denetleme sensörüne sahip robotların geliştirilmesi ise, istasyon ile haberleşme, birçok modülden oluşan yapının kontrol zorluğu, operasyonel menzil ve standartlar açısından gelişmiş EDS tasarımı gibi birçok zorluk içermektedir. Bu nedenle literatürde bu konu ile ilgili çok fazla çalışmaya rastlanamamaktadır.



Şekil 1. Gelişmiş sensörlü kablosuz boru içi denetleme robotları.

Gelişmiş sensör teknolojisine sahip kablosuz özellikteki ILI robotları için, Şekil-1' de gösterildiği gibi, ticari olarak geliştirilmiş Pipetel firmasına ait Explorer robotu, KNR tarafından geliştirilmekte olan Pibot (Kim *et al.*, 2017) ve TÜBİTAK tarafından geliştirilen Robotgöz çalışmaları bulunmaktadır (Tetik *et al.*, 2019).

Bu çalışmada, yüksek doğrulukta denetleme kabiliyetine sahip ILI teknolojisinin iletim hatlarında olduğu gibi dağıtım hatlarında da kullanılabilmesi için gerekli olan robotik sistemlerin geliştirilmesinde karşılaşılan, büyük zorluklar içeren iki önemli konu ele alınmıştır. MFL sensörüne sahip ILI robotları için EDS'nin boyutlandırılması ve patlamadan korunma standartlarına (ATEX) uygun olarak robotun tasarlanması incelenmiştir. Robotun operasyonlarda yapacağı hareket çeşitliliğine göre enerji tüketim hesaplaması, EDS' nin regülasyonlar açısından tasarım kriterleri ele alınmıştır.

Daha önce doğal gaz denetim robotları için EDS tasarımına yönelik bir çalışma bulunmaması ve ATEX standartlarına uygun tasarım çözümleri sunması açısından, bu makale ile literatüre katkı sağlanmaktadır.

Makale şu şekilde düzenlenmiştir: İkinci bölümde boru içi denetleme ve sensör teknolojileri hakkında bilgiler paylaşılmış, Üçüncü bölümde enerji depolama sistemi boyutlandırması ve güvenliği tartışılmış, dördüncü bölümde patlamadan korunma standartları çerçevesinde tasarım kriterleri tartışılmış, beşinci bölümde maliyet etkin alternatif tasarım önerileri sunulmuş ve altıncı bölümde çalışmanın sonuçları verilmiştir.

2. Boru içi Denetleme (ILI)

Doğal gaz boru hatlarının içeriden muayene edilmesine imkân kılan ILI teknolojileri, tahribatsız muayene (NDT) kapsamında değerlendirilen birçok metodu kapsamakta, bu sayede güvenli bir boru hattı işletmesi mümkün olmaktadır. Elde edilen veriler ile işletme açısından, tamir ve bakımlar için karar destek sistemi oluşturulabilmektedir.

2.1 ILI sensör teknolojileri

NDT kapsamında kullanılan birçok ILI sensör teknolojisi bulunmaktadır. Manyetik kaçak akı (MFL) sensörü, ultrasonik (UT), elektro manyetik akustik transduser (EMAT), girdap akımları (EC), Mekanik temas (MC), lazer profilometre (LP) teknolojileri en yaygın kullanılan sensör teknolojileridir (Feng *et al.*, 2017; Piao *et al.*, 2019).

Boru içi denetleme operasyonları sonrasında boruların hem iç yüzeyindeki, hem de çevresel etkilere daha çok maruz kalan dış yüzeyindeki kusurların tespit edilmesi beklenmektedir. Borunun her iki yüzeyindeki kusurların tespit edilmesi için, EMAT, UT veya MFL sensörlerinin herhangi birinin tek başına kullanımı yeterli olabilir. Fakat anomalilerin içte mi dışta mı olduğunu ayırt etmek için farklı sensör tiplerinin beraber kullanımı veya aynı sensör tipinin farklı ayarlarda kullanılması söz konusudur. Doğalgaz çelik boru hatlarında, boru içi denetleme faaliyetlerinde en çok kullanılan ve olgunlaşmış sensör teknolojisi ise MFL sensörüdür (Bhavani *et al.*, 2022). Bu nedenle bu çalışmada MFL sensörüne sahip ILI robotları temel alınmıştır.

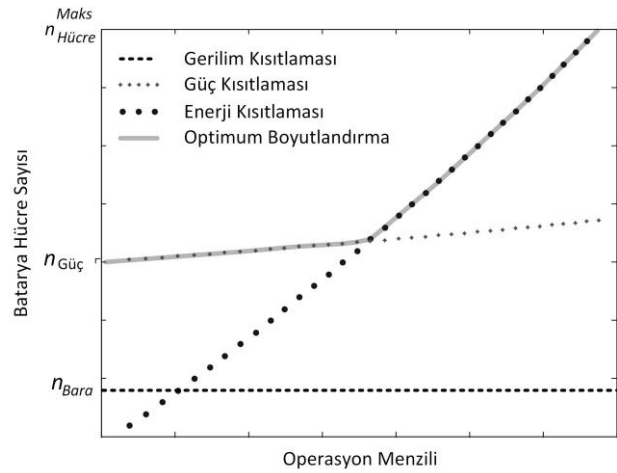
3. Enerji Depolama Sistemi

ILI robotlarında enerji depolama sistemi birden fazla batarya paketinin aynı baraya bağlanması ile oluşmaktadır. EDS'nin boyutlandırılması, batarya yönetim sistemi, hücre korumaları ve enerji ihtiyacının doğru bir şekilde hesaplanması operasyon güvenliği için önem arz etmektedir.

3.1 Batarya paket boyutlandırması

Mevcut ve geliştirilmekte olan gelişmiş sensörlü ILI robotlarının enerji depolama sistemi, genel olarak iki farklı birimden ve kimya olarak lityum bazlı hücrelerden oluşmaktadır. Boru içi denetleme cihazının yer altındaki konumunu, toprak üstünden takip edebilmek için 22 Hz frekansında sinyal yayan acil durum uyarı sistemi kullanılmaktadır. Robotun arıza vermesi durumunda yerinin belirlenmesi açısından bu birim kritik rol oynamaktadır. Robotun arıza vermesi durumunda ana sistemden ayrı olarak, acil durum sisteminin çalışabilmesi için kendine ait bir batarya paketi olması gerekmektedir. Bu birim kendi başına bağımsız çalışmakta ve batarya birimi

çoğu zaman sarf ürünü olarak değerlendirilmekte ve batarya boyutlandırma hesaplamalarına ihtiyaç duyulmamaktadır. Boru içi denetleme cihazının ana enerji depolama sistemi ise, anlık güç gereksinimi, operasyon süresince ihtiyaç duyulan enerji miktarı ve nominal voltaj gereksinimi değerleri göz önünde bulundurularak lityum hücreler kullanılarak optimum değerde boyutlandırılmalıdır. Optimum boyutlandırma tasarım fazında şekil-2'deki grafikte gösterildiği gibi toplam hücre, paralel ve seri kol sayıları belirlenir ve optimum boyutlandırma eğrisi kısıtlamalar göz önüne alınarak menzile göre değer alan bir fonksiyon olarak oluşturulur. Burada belirli bir seviyeye kadar kısıtlamaların (azami gerilim seviyesinin) ve güç ihtiyacının, eşik değerinden sonra ise enerji ihtiyacının batarya boyutunu belirlediği söylenebilir.



Şekil 2. Batarya boyutlandırma grafiği.

Burada $n_{Hücre}^{Maks}$ modül genişliği ve maliyet gibi kısıtlamalar sebebi ile kullanılacak azami hücre sayısını belirtmektedir. Lityum hücreler, nominal bara gerilimini sağlayacak kadar seri sayıda (n_{Bara}) ve operasyon gereksinimlerini sağlayacak kadar paralel kol sayısında kullanılarak, batarya paketini oluşturmaktadırlar. Tasarım fazında enerji depolama birimi olarak seçilen batarya modülünde hücre sayısı arttıkça robotun ana ağırlığının da artacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Şekil 2'de görüldüğü üzere hücre sayısı arttıkça anlık güç talebinin karşılanması için gerekli batarya hücre sayısında ($n_{Güç}$) da bir miktar artış gözlenmektedir. Özellikle eğimli boru hatlarında robotun hareketi

esnasında toplam çekiş kuvvetine etki eden tırmanma kuvveti (F_{Gr})

$$F_{Gr} = M \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (1)$$

ve yuvarlanma kuvveti (F_{RR})

$$F_{RR} = M \cdot g \cdot C_r \cdot \cos(\alpha) \quad (2)$$

büyükliklerin hesaplanmasında robotun toplam ağırlığının rolü bulunmaktadır (Fenre and Klein-Paste, 2021). Burada (M) robotun toplam ağırlığını, (α) robotun izleyeceği yoldaki eğimi, (g) yerçekimi ivmesini ve C_r yuvarlanma direnç katsayısını ifade etmektedir. Robot üzerinde N adet bulunan batarya modülü için toplam batarya ağırlığı ($M_{Batarya}$) şu şekilde formülize edilebilmektedir (Yavasoglu *et al.* 2017);

$$M_{Batarya} = n_{paralel} \cdot n_{seri} \cdot m_{hücre} \cdot P_f \quad (3)$$

Burada $m_{hücre}$ hücre ağırlığını, $n_{paralel}$ paralel hücre sayısını, n_{seri} seri hücre sayısını, P_f ise paketleme faktörünü ifade etmektedir. Batarya modülü içerisinde gerilim, akım ve sıcaklık sensörleri bulunmakta ve onlarca hücreden oluşabilmektedir. Batarya modülünde hücrelerarası elektriksel iletiminin sağlanması, aktif veya pasif soğutmanın yapılabilmesi, fiziksel olarak dış ortama karşı dayanıklı olması için çeşitli şekillerde tasarlanmaktadır. Bu tasarım nedeniyle batarya modülünün ağırlığı artmaktadır. Bu ağırlık artışını nitelendiren paketleme faktörü 1.4 değerlerine kadar çıkabilmektedir (Yavasoglu *et al.* 2015).

Pig tarzı ILI cihazlarında batarya paketi tek bir modül içerisinde yer alabilmektedir (Piao *et al.*, 2019). Gelişmiş ILI sensörlü robotlarda ise, robot boyu piglere nazaran daha uzun olmakla beraber özel geçişlerden geçebilecek esnek yapıya sahip olabilmeleri ve tek bir operasyon sırasında birden fazla çapı muayene edebilmeleri için robot çapı piglere nazaran daha düşüktür. Robotlar, hem gerekli fonksiyonların yerine getirilebilmesi hem de istenen serbestlik derecesine sahip olabilmesi için birçok modülün bir araya gelmesi ile uzun ve eklemeli bir yapıdan oluşmaktadır. Bu nedenle gelişmiş ILI robotlarında batarya paketinin tek bir modül

içerisinde bulunması mümkün olamaz. Diğer yandan operasyon güvenliği açısından, batarya modülünün tek bir modül içerisinde yer alması istenen bir tasarım yaklaşımı değildir. Batarya paketlerinin farklı bölgelere dağılmış olması, bir pakette meydana gelen arızanın tüm sistemi etkilemesini engeller. Diğer paketler robotun hareket kabiliyetini sağlayarak, robotun boru içerisinde kalmadan operasyonu tamamlamasını mümkün kılabilir. Doğal gaz iletim hatlarında kullanılan pig cihazının enerjisi operasyon tamamlanmadan tükenmesi durumunda hattın geri kalan kısmı ölçülmeden operasyon tamamlanır. Bu durum hat güvenliği açısından bir sorun teşkil etmez. Sadece pigin enerjisiz kaldığı boru hattı için denetleme yapılamamış olur. Robot operasyonlarında ise batarya paketinden alınan enerji ile tahrik motorları robotun tekerleklerine güç aktarımı sağlamaktadır. Robotun enerjisiz kalması durumunda, robot boru içerisinde hareketini sağlayamaz. Bu durumda robotun acil durum sinyali takip edilerek, yerinin tespit edilmesi ve kazı çalışması sonucu boru hattı kesilerek robotun hat dışına taşınması gerekmektedir. Bu durum robot operasyonlarında en kötü senaryo olarak değerlendirilebilir. Dolayısı ile ILI robotları için EDS tasarımı ve boyutlandırılması büyük önem arz etmektedir.

3.1 Batarya modülü

Batarya modülleri, lityum hücrelerden oluşmaktadır. Her bir batarya modülüne ait verilerin izlenmesi ve güvenlik önlemlerinin alınabilmesi için batarya yönetim sistemi (BMS) kullanılmaktadır (Sylvestrin *et al.*, 2021). BMS aşırı sıcaklık, aşırı gerilim, aşırı akım gibi birçok önemli durumu izleyip gerekli durumlarda enerji akışını kesebildiği gibi, hücrelerin şarj esnasında yüksek gerilime maruz kalmaması için dengeli şarj imkânı sağlamaktadır. Günümüzde bazı batarya hücreleri kendinden koruma sistemlerine sahip olabilmektedir. Batarya hücreleri aşırı akıma karşı koruma sistemi (CID) ve yüksek sıcaklık koruma tertibatı (PTC) gibi güvenlik katmanlarına sahip olarak üretilebilmektedir (Augeard *et al.*, 2015). CID bir sigorta gibi davranmaktadır. Hücre içinde gaz basıncı daha önceden belirlenmiş olan ve batarya hücresinin

çalışma koşullarını aşan tehlikeli seviyelere ulaştığında akımı keser. PTC daha çok hücre dışında oluşacak kısa devre tehlikelerine karşı tasarlanmış bir koruma metodudur. Hücre içerisinde ince bir metal ile lamine edilmiş polietilen halka olarak tasarlanan bu yapı aşırı akıma maruz kaldığında ısınır ve direnci artar, kısa devre tehlikesi geçtikten sonra PTC soğur ve elektriksel olarak tekrar iletken duruma geri döner. PTC ve CID korumalarına sahip hücre kullanımı, BMS ile sağlanan güvenlik koşullarını arttırmaktadır.

Günümüzde, hücrelerin neredeyse tamamen eşdeğer olmasına imkân verecek üretim teknolojileri ile beraber, yapısal farklılıkların minimize edilmesi hücre dengelemesi ihtiyaçlarını azaltsa da, bataryanın şarj edildiği sabit gerilim evresinde BMS'in hücre dengeleme özelliği batarya ömrü açısından önem teşkil etmektedir (Augeard *et al.* 2015).

Batarya modülleri genel olarak patlamadan korunma tedbirleri gereği kapalı bir muhafaza içerisinde bulunur, basınç ve sızdırmazlık özelliklerine sahip bir yapı içerisine alınırlar. Bölüm 5'de daha detaylı olarak koruma yöntemleri ve önerilen tasarım yaklaşımları sunulmuştur.

3.2 Enerji ihtiyacının hesaplanması

Boru içi denetleme robotlarında enerji ve anlık güç ihtiyacının belirlenmesi operasyon süresi ve menzil ölçütlerinin karşılanması açısından önemlidir.

Teorik olarak boru içi denetleme robotunun enerji ihtiyacı ön tasarım aşamasında şu şekilde hesaplanır. Öncelikle robotun fonksiyonel olarak farklı çalışma şekillerine sahip olabileceği bölgeler belirlenir. Bunlar düz boru hattında ilerleme, tırmanma, dirsek geçme, vb. olarak sıralanabilir. Bu bölgeler için toplam anlık güç ihtiyacı n adet bileşene sahip robot için aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

$$\sum_{k=1}^n NG_k \cdot KS_k \cdot TF_k \quad (4)$$

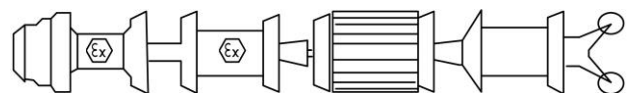
Burada NG , KS ve TF sırası ile bileşene ait nominal gücü, talep faktörünü ve kullanım sıklığını belirtmektedir. Her bir bölgedeki anlık güç ihtiyacı belirlendikten sonra toplam enerji ihtiyacı hangi bölgelerde ne kadar süre ile bulunabileceği göz önüne alınarak hesaplanır. Prototip aşamasında

yapılacak deneyler sonrasında elde edilen verilere göre ön tasarım hesapları güncellenir ve batarya paketi boyutlandırması tamamlanır.

4. Enerji Depolama Sistemleri ve Operasyon Güvenliği

Denetleme robotları ve pigler doğal gaz boruları içerisinde denetim yaptıkları için patlamadan korunma standartlarına (ATEX) uygun olarak dizayn ve imal edilmeleri gerekmektedir (ChenS *et al.*, 2020). Başka bir ifade ile boru içi denetleme cihazları tehlikeli bölgelerde çalışırken tutuşturucu kaynak oluşturmamaları gerekmektedir. Doğal gaz borularının içi yanıcı gazlar ihtiva etmesine karşın, yakıcı madde içermediği için ATEX bölgesi olarak tanımlanmamaktadır. Fakat piglerin ve robotların hatta verilir, hattan alındığı bölgeler ATEX bölgeleri içerisinde kalmakta ve Bölge-1 tanımına göre güvenlik önlemlerinin alınması beklenmektedir (Europe, 2019).

Bu durumda güvenlik standartlarına uygun denetim cihazlarını üretmek için genel olarak iki yol izlenebilmektedir. Birincisi cihaz üzerindeki tüm muhafazaların, açıkta kalan elektronik cihazların ATEX standartları dâhilinde olmasıdır. Bu durumda cihaz operasyon yapacağı ATEX bölgesine yönelik sertifikalı birimler kullanılarak üretilir veya ilgili testler yapılarak ürünün istenen özelliklere sahip olduğu doğrulanır. İkinci yol ise, patlayıcı ortam ile denetleme cihazlarının neden olabileceği tutuşma kaynaklarının olası temaslarından kaçınmaktır. Bu konuda literatür incelendiğinde, ILI teknolojisinde önde gelen firmalardan Rosen Grub'un ATEX yaklaşımı maliyet etkin bir çözüm sunmaktadır. Rosen tasarım yaklaşımında, robot veya pig kısmen ATEX'e uygun üretilmesi, ATEX'e uygun olmayan modüllerin ise boru içerisinde yani ATEX tarafından bölge olarak tanınmamış alanda çalıştırılarak ATEX'e uyumlandırılmasıdır. Rosen Grup yaklaşımına göre yapılan pig tasarımı aşağıdaki diagram ile verilmiştir (Wolbeck and Beuker, 2011)



Şekil 3. ATEX uyumlu sistem tasarımı.

ATEX uyumlu sistem tasarımında Şekil 3'de ifade edildiği gibi ilk iki modül ATEX standartları kapsamında, geri kalan modüller ATEX standartından bağımsız olarak üretilmiştir. ATEX standartında üretilmeyen modüller boru içine yani tehlikesiz bölgeye alındıktan sonra enerjilendirilmekte böylece tüm sistem için ATEX uyumlandırması sağlanmaktadır. Burada ilk iki modülün batarya ve verici modülleri olduğu diğer modüllerin ise ölçüm ve elektronik komponentleri muhafaza eden modüller olduğu söylenebilir. Böyle bir yapı pigler için uygun bir çözüm olsa da, çok daha fazla modüle sahip robotlar için daha farklı çözümlerin kullanılması gerekmektedir. Birden fazla modül içerisinde batarya paketi bulduran robotlarda, sistemin tamamen ATEX standardı dışında geliştirilerek, ATEX bölgesi dışında enerjilenebilmesi için bataryanın mekanik yollar ile açılıp kapanmasını tetikleyecek unsurlar kullanılabilir.

Bu tetikleyiciler robotun hatta alınıp verildiği kısım olan launcher içerisinde iken mekanik bir kol yardımı ile tetiklenmesini sağlayabilecek bir yol olabileceği gibi belirli bir basınç altında olduğunu başka bir deyiş ile doğal gaz ortamına ulaştığını anlayabilecek basınç anahtarları da kullanılabilir. Ayrıca, Genel olarak modüler yapıda dizayn ve imal edilen boru içi denetleme cihazlarının muhafazaları içerisinde soğutma sıvısı kullanılması, ATEX ortama girdiği takdirde enerjilenen modüllerin içerisinde yakıcı madde bulunmasını engelleyerek standartlara uyumu kolaylaştırmaktadır.

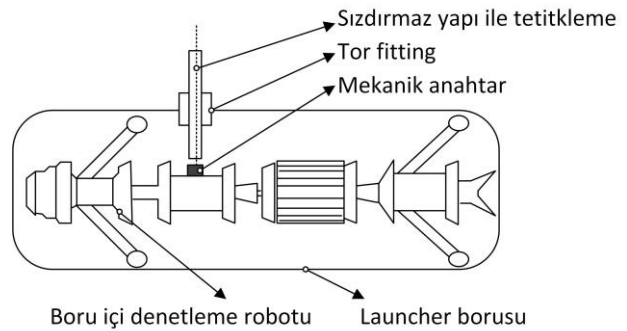
5. Alternatif ATEX'e Uyumluluk Yöntemleri

Bu kısımda, 4. Bölümde anlatılan mevcut ticari sisteme alternatif olarak, ATEX standartlarına uyumluluk sağlayarak robotik sistem geliştirebilmeye imkan sağlayan çözüm yöntemleri önerilmektedir. Robotik sistemlere, Rosen Grubun metodolojisi (Wolbeck and Beuker, 2011) temel alınarak birçok farklı yaklaşım uyarlanabilir. Buradaki amaç ATEX tanımlı bölgelerden kaçınarak operasyonun gerçekleştirilmesini sağlayacak bir yöntem izlenmesi ve bu sayede tasarım, üretim kolaylığı sağlayan maliyet etkin çözümlerin elde

edilmesidir. Bu çalışmada önerilen yöntemlerin Rosen yaklaşımından farkı, ATEX Bölge-1 sertifikalı modüle ihtiyaç duyulmamasıdır.

5.1 Mekanik tetikleyici anahtar kullanımı

Alternatif ilk tasarım önerisi, mekanik anahtar kullanımıdır. Dışarıdan tetiklenecek bir mekanik anahtar ile, robot güvenli ortam olan boru içine alındıktan sonra enerjilenmesi sağlanabilir. Robotik sistemlere boru dışından mekanik olarak müdahale edilebilir. Buna en iyi örnek robotların sandviç vanayı geçebilmek için kullandıkları boru içi yüzey kaplamanın dışarıdan hareket ettirilebilmesidir (Jang *et al.* 2022). Robotlar boru hattına hot-tap adı verilen noktaya sandviç vana ile bağlanan launcher adı verilen bir boru ile girebilmektedir. Sandviç vana açık olduğunda boru iç yüzeyinde büyük bir açıklık oluşturmaktadır. Bu açıklıktan robot kollarının takılmadan geçebilmesi için boru içini kaplayacak dışarıdan hareket ettirilebilen bir mekanik parça kullanılmaktadır. Aynı prensip kullanılarak robot enerjisiz halde hatta alındıktan sonra ve basınç manometreleri ve sensörler yardımı ile launcher biriminin tamamen güvenli olduğu anlaşılınca, şekil-4'te verildiği gibi tor fitting (tor vanası) içerisinde hareket edecek bir mekanik anahtar ile batarya ile ana bara arasındaki elektriksel devre tamamlanarak robot enerjilendirilebilir. Bahsi geçen tor fitting robotun doğal gaz hattına alınacağı sandviç vanaya bağlanacak olan launcher boru hattı üzerinde bulunacaktır.



Şekil 4. Mekanik anahtar kullanımı.

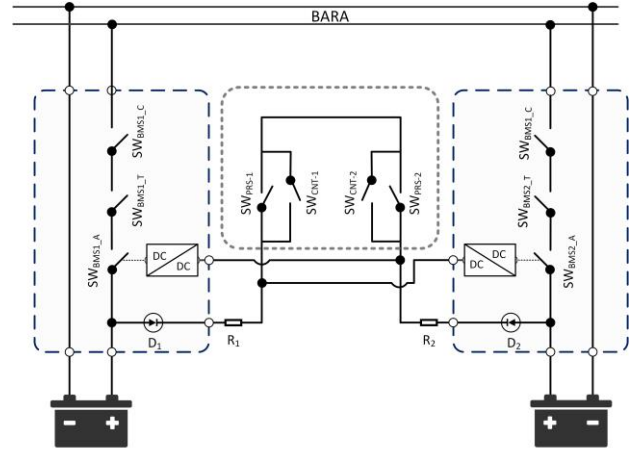
Burada tor fitting denilen yapılar, doğal gaz borularından branşman alabilmek canlı hat üzerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Özel tasarımlar ile bu birimlerden boru içerisine ATEX standartları dahilinde ulaşmak mümkündür.

5.2. Basınç anahtarı kullanımı

5.1' de verilen tasarım önerisi, ILI denetim cihazlarının üretimi açısından kolaylık sağlasa da, operasyon kolaylığı açısından doğal gaz dağıtım işletmeleri tarafından öncelikle tercih edilen bir yaklaşım olmayabilir.

Bu çalışmada sunulan, ikinci tasarım önerisi basınç anahtarı kullanımıdır. Bu tasarım önerisi, ilk sunulan tasarım alternatifine göre operasyonel kolaylığı sağlamaktadır. İkinci tasarım önerisi doğal gaz borularındaki pozitif basınca dayanmaktadır.

En basit manada, ILI cihazları önce launcher borusuna alınmakta, launcher kapağı kaptılmakta sonrasında launcher borusu azot gazı ile süpürülmekte, ortamdaki yakıcı gaz uzaklaştırılmakta, sonrasında doğal gaz launcher borusu basınçlandırılmaktadır. Daha sonra sandviç vana açılarak launcher ve doğal gaz boru hattı birleştirilmekte ve ILI cihazı böylece hatta girebilmektedir. Robot launcher borusuna alınırken ve launcher borusu içerisinde iken atmosfer basıncına maruz kalmaktadır. Ancak boru hattı süpürülüp, içerisi doğal gaz ile doldurulduğu durumda basınçlı ortama maruz kalmaktadır. Ölçülebilir çaplardaki boru hatlarının basıncı, işletme tarafından belirlenmekte ve genel olarak 20 bar ve üzerinde olmaktadır. Dolayısı ile seçilecek belirli bir eşik değeri sonrası tetiklenecek mekanik bir basınç anahtarı batarya ile ana bara arasındaki enerji akışını kontrol edebilir. Böylece robot ortam doğal gaz ile basınçlanıncaya kadar enerjisiz kalacak ve bir tutuşturma kaynağı teşkil etmeyecektir. Birden fazla basınç anahtarının seri bağlanarak bataryaların tetiklenmesi ile güvenlik katsayısı arttırılabilir. Şekil-5'te iki batarya modülüne ve iki basınç anahtarına sahip bir robotik sistem için, Bataryalara bağlı BMS'lerin aktif olmasını sağlayan pinlerini tetikleyen iki basınç anahtarının seri olarak kullanımı gösterilmiştir.



Şekil 5. Basınç anahtarı ile batarya modüllerinin devreye alınması.

Burada $k=1,2$ olmak üzere $SW_{BMSk,T}$ ve $SW_{BMSk,C}$ sırası ile batarya yönetim sisteminin aşırı sıcaklık ve akım koruma anahtarlarını simgelemektedir. $SW_{BMSk,A}$ ise basınç anahtarları vasıtası ile tetiklenerek açılan batarya yönetim sisteminin ana anahtarıdır. SW_{PRS-K} ile belirlenen basınç değerinde robotun aktif olabilmesi için kullanılan basınç anahtarlarını simgelemektedir. SW_{CNT-K} ile ise basınçsız ortamda tamir ve bakımlar için robotun çalıştırılabilmesi için kullanılan manuel anahtarları simgelemektedir. Bu yaklaşım daha fazla basınç anahtarının seri bağlanması ile güvenlik katsayısı arttırılabilir, ikiden fazla batarya modülüne sahip robotlarda ikiyeşerli gruplar veya üçerli gruplar halinde bağlantı devresi güncellenebilir.

6. Tartışma ve Sonuç

Çelik doğal gaz iletim hatlarında, boru içi denetleme faaliyetleri uzun yıllardan beri ülkemizde ve dünyada gerçekleştirilmektedir. Dağıtım hatlarında ise, bu teknolojinin uygulanması olgunlaşmamıştır. Çelik doğal gaz dağıtım hatlarının denetiminde, MFL benzeri gelişmiş sensörlere sahip robot uygulamalarına ihtiyaç olsa da, geliştirilmelerindeki zorluklar nedeni ile günümüzde sadece bir firmanın ticari ürünü bulunmaktadır (Yang *et al.* 2022). Bu robotların geliştirilmesindeki zorluklardan en önemlisi ATEX ortamda çalışacak şekilde tasarlanabilmesi ve EDS'lerinin optimize edilmesidir.

Bu çalışmada batarya paketlerinin optimize edilebilmesi için bir tasarım grafiği oluşturulmuştur.

Diğer yandan robotik sistemin en kritik parçası olan batarya modülünün güvenliği, batarya yönetim sistemi ile beraber PTC ve CID korumalı hücrelerin kullanımı ile arttırılabileceği değerlendirilmiştir.

Robotlar ATEX standartları açısından güvenli bir bölge olan, boru içerisinde operasyon yapmalarına karşın, boru hattına girerken ve boru hattından alınırken kısmi süreli de olsa ATEX tanımlı bölgelerde bulunmaktadır. Bu bölgeler ile temasları tasarım güvenlik standartlarını arttırmakta ve üretimleri zorlaşmaktadır. Bu makalede robotların ATEX bölgelerde enerjisiz kalacağı ve güvenli bölgelerde aktif olacağı kontrol sistemleri önerilmiştir. Bu sistemler ticari olarak kullanılan bir metodolojiyi temel aldığı için güvenilir ve mevcut yöntemlere nazaran daha basit çözümler sunmaktadır.

Bu makale ile önerilen, mekanik anahtar veya basınç anahtarı kullanımı, robotik sistemlerin ancak doğal gaz boru hattı içerisinde aktif olmasını sağlamaktadır. Böylece literatürdeki mevcut yöntemlerde sunulan en az bir modülün ATEX standartlarında olması koşuluna gerek kalmadan, ATEX bölgelerinde çalışmaktan kaçınabilen bir yaklaşım önerilmiştir. Bu şekilde maliyet etkin basit, etkili ve güvenli bir çözüm sunulmaktadır.

Robotlarda kullanılması gereken, ATEX Bölge-1 standartlarında üretilen birçok bileşen, aynı özellikteki standart ticari ürünlere göre 6 kata kadar büyük hacim gerektirebilmektedir. Önerilen alternatif tasarım yaklaşımları, mevcut ticari bileşenlerin kullanımını mümkün kılmakta, bu nedenle özellikle küçük boyutlu boru çapları için ILI teknolojisini kullanan robotların tasarımını kolaylaştırmaktadır.

7. Kaynaklar

Augeard, A., Singo, T. Desperes, P., Perisse, F., Menecier, S. and Abbaoui M., 2015. Arc analysis to the CID of lithium battery cells in high-current applications. *Electrical Contacts, Proceedings of the Annual Holm Conference on Electrical Contacts*, New Orleans, USA doi:10.1109/HOLM.2014.7031038.

Bhavani, N., Senthilkumar, G., Kunjumohamad, S.

Pazhani, A. and Kumar R., 2022. Real-Time Inspection in Detection Magnetic Flux Leakage by Deep Learning Integrated with Concentrating Non-Destructive Principle and Electromagnetic Induction. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, **25(7)**, pp. 48–54. doi:10.1109/MIM.2022.9908257.

Chen, J., Westwood, S. and Heaney, D., 2020. A Feature-Specific Probabilistic Assessment of Pipeline Defect Size From ILI MFL Signal Using Convolutional Neural Network. *Proceedings of the 2020 13th International Pipeline Conference*. **(1)**. Virtual, Online. September 28–30, doi.org/10.1115/IPC2020-9331.

Europe, W., 2019. ATEX equipment and zones explained *World Pumps*, **2019(3)**, pp. 22–23. doi:10.1016/s0262-1762(19)30034-3.

Feng, Q., Li R., Nie B., Liu, S., Zhao L. and Zhang H., 2017. Literature Review: Theory and Application of In-Line Inspection Technologies for Oil and Gas Pipeline Girth Weld Defection, *Sensors*, **17(1)** doi.org/10.3390/s17010050

Fenre, M.D. and Klein-Paste, A., 2021. Bicycle rolling resistance under winter conditions, *Cold Regions Science and Technology*, **187**, p. 103282. doi:10.1016/j.coldregions.2021.103282.

Jang, H., Kim T., Lee C., Kim J., Lee H. and Choi H., 2021. Journal of Pipeline Science and Engineering Risk-based pipeline integrity management : A road map for the resilient pipelines, *Journal of Pipeline Science and Engineering*, **1(1)**, pp. 74–87. doi:10.1016/j.jpse.2021.02.001.

Kim, D., Yoo, H., Cho, S., Koo, S. Kim, D., Yoo, J. and Rho, Y., 2017. Inspection of Unpiggable Natural Gas Pipelines Using In-Pipe Robot, *AETA 2016: Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences*, Springer International Publishing, **415** pp. 364–373.

Mirshamsi, M. and Rafeeyan, M. 2019. Speed control of inspection pig in gas pipelines using sliding mode control, *Journal of Process Control*, **77**, pp. 134–140. doi:10.1016/j.jprocont.2019.03.001.

Piao, G., Guo, J., Hu, T., Deng, Y. and Leung, H., 2019. A novel pulsed eddy current method for high-speed pipeline inline inspection, *Sensors and Actuators*, **295**, pp. 244–258. doi:10.1016/j.sna.2019.05.026.

- Sheikh, T., Sampath, S. and Bhattacharya, B., 2022. Sensors and Actuators : A . Physical Bimorph sensor based in-line inspection method for corrosion defect detection in natural gas pipelines, *Sensors and Actuators: A. Physical*, **347**, p. 113940. doi:10.1016/j.sna.2022.113940.
- Sylvestrin, G.R., Scherer, H.F. and Hideo Ando Junior, O., 2021. Hardware and Software Development of an Open Source Battery Management System, *IEEE Latin America Transactions*, **19(7)**, pp. 1153–1163. doi:10.1109/TLA.2021.9461844.
- Tetik, Y.E. Yavasoglu H. A., Gokce, K. ve diğ., 2019. BİDR : Boru İçi Denetleme Robotu, *Türkiye Robotbilim Konferansı*, İstanbul, Türkiye.
- Verma, A., Kaiwart, A., Dubey, D. N., Naseer, F. and Pradhan S., 2022. A review on various types of in-pipe inspection robot, *Materials Today: Proceedings*, **50**, pp. 1425–1434. doi:10.1016/j.matpr.2021.08.335.
- Wolbeck, S. and Beuker, T., 2011. ATEX-Compliant In-Line Inspection Services, *6 th Pipeline Technology Conference*, pp. 1–7, Berlin, Germany.
- Yang, Y., Gao, B., Liu, D., Ma, Q., Li, H. and Woo H., 2022. Electromagnetic Pigging System Based on Sandwich Differential Planar Coil, *IEEE Sensors Journal*, **(22)19**, pp. 18903-18913, 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3201093.
- Yavasoglu H. A., Ünal İ., Koksoy A., Tetik Y. E., G.K., 2022. *Long Range Wireless Communication for Natural Gas Pipeline Inspection Robot*. 3rd SDEWES LA Conference Sao paulo.
- Yavasoglu, H. A., Shen, J., Shi, C., Gokasan, M. and Khaligh, A., 2015. Power Split Control Strategy for an EV Powertrain With Two Propulsion Machines, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, **1(4)**, pp. 382–390. doi:10.1109/TTE.2015.2504406.
- Yavasoglu, H. A., Shi, C. and Gokce, K., 2017 Energy storage systems for EVs with two propulsion machines, *IEEE Transportation and Electrification Conference and Expo, Chicago, USA*, pp. 696–700. doi:10.1109/ITEC.2017.7993354.