

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ SONUÇ RAPORU

PROJE ADI:
Süper İletken Manyetik Yataklı Doğrusal Fırlatıcı Tasarımı ve
Deneyisel Uygulaması

PROJE YÜRÜTÜCÜSÜ: Dr.Öğr.Üyesi Sinan BAŞARAN
PROJE NOSU: 2020-01.BŞEÜ.03-01

BAŞLAMA TARİHİ: 16/07/2020

BİTİŞ TARİHİ: 16/07/2021

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
BİLECİK, 2021

GİRİŞ

Bu proje hali hazırda devam etmekte olan Tübitak 3501 kapsamında yürütülen Kariyer projesine destek olması açısından tamamlayıcı destek projesi olarak hazırlanmış ve sunulmuştur. Proje döneminde yürütülen çalışmalara yer vermeden tamamlayıcı BAP (Bilimsel araştırma projesi) sonuç raporunda bir kılavuz ve referans olması açısından önce proje konusu ve hedefleri aşağıda sunulmuştur.

Manyetik levitasyon teknolojisi, sunduğu temassız yataklama sayesinde son yıllarda çeşitli alanlarda uygulama sahası olan ileri bir teknolojidir. Manyetik levitasyon elektromıknatısların yanısıra süperiletken malzeme kullanılarak ta gerçekleştirilebilir. Oda sıcaklığında bulunan süperiletken malzeme eğer sıvı azot yardımı ile kritik sıcaklığa (-196 °C) kadar soğutulursa süperiletkenlik meydana gelir. Bu durumda süperiletken malzeme üzerine bir sabit mıknatıs getirilirse süperiletken içinde mıknatısın manyetik alanından dolayı süper akımlar ve mıknatısın görüntüsü oluşmaktadır. Bu durum kararlı bir manyetik levitasyon sağlamaktadır. Elektromıknatıslar ile yapılan aktif manyetik levitasyondan farklı olarak pasif bir şekilde levitasyon sağlandığı için süperiletken levitasyon karmaşık sürücü devreleri güç kaynağı ve kontrolör gibi ekipmanları gerektirmez. Bu teknoloji süperiletken manyetik yataklı rotorlar ya da Maglev taşıma araçları gibi lineer hareketin sağlandığı sistemlere uygulanabilir.

Bu çalışmada süperiletken manyetik yataklar ile yataklanmış bir doğrusal fırlatıcı sistem tasarımı gerçekleştirilecektir. Uçak gemisi üzerinden bir uçağın kalkışında ya da pilotların eğitilmesi amacı ile kullanılan hedef insansız hava araçlarının fırlatılmasında yardımcı ekipman olarak fırlatma sistemleri kullanılmaktadır. Bu fırlatıcı yapı mekanik olabildiği gibi elektromanyetik bir yapıya da sahip olabilir. Mekanik sapan prensipli fırlatıcılarda kontrol edilemeyen yüksek ivme değerleri fırlatılan hedef İHA'yı tahrip edebilir. Temel olarak elektromanyetik fırlatıcı sistem lineer motor prensibi ile çalışmaktadır. Projede elektromanyetik bir fırlatıcı sisteminin süperiletken manyetik yataklar ile yataklanarak mekanik temassız olarak çalışması ve farklı ivme durumları için kontrollerinin yapılması

planlanmaktadır. Ayrıca proje kapsamında süperiletken levitasyonun gerçekleştiği sabit mıknatıslardan oluşan kılavuz ray tasarımı süperiletken malzeme ile iki farklı yüzeyden levitasyon yapacak şekilde gerçekleştirilecektir. Bu sayede tek bir süperiletken malzemedan elde edilen katılık (stiffness) değeri arttırılmış ve lineer hareketi veren motorun yanal kuvvetleri desteklenmiş olacaktır.

Tasarımı ve üretimi yapılacak olan süperiletken manyetik yataklı fırlatıcı sistemi laboratuvar ortamında kullanılabilecek boyutta olacaktır. Fakat bu boyuttaki bir yapı bile küçük ve orta ölçekli insansız hava araçları için fırlatıcı bir düzenek olarak kullanılabilir. Ayrıca fırlatma rampası olarak istenilen bir eğime göre ayarlanabilecek yapısı sayesinde süperiletken levitasyonun eğimli yüzeydeki performansı mühendislik açısından incelenecektir. Tasarlanan sistem ayrıca maglev taşıt araçları gibi büyük çaplı sistemlere uygulanma potansiyeline sahiptir.

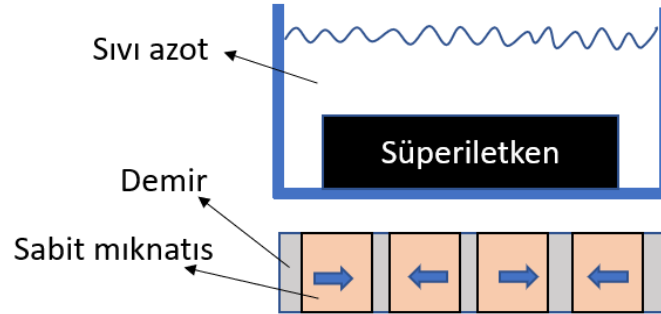
Süperiletken manyetik levitasyon:

Sıvı azot ile soğutulan yüksek sıcaklık süperiletkenleri kritik sıcaklıkta(-196 C) süperiletken durumuna geçmektedirler. Bu halde iken üzerlerine getirilen kalıcı mıknatıs hiçbir temas olmadan havada askıda kalabilmektedir. Bu olaya süperiletken levitasyon ismi verilmektedir (Şekil 1). Klasik manyetik levitasyon teknolojisinde elektromıknatısların akımları sürülerek oluşan elektromanyetik kuvvetlerle ferromanyetik bir cismin kararlı şekilde levitasyonu sağlanır. Süperiletken manyetik levitasyonda ise süperiletken malzemenin soğutulmasından sonra sabit mıknatısla kararlı levitasyon elde edilir. Süperiletken manyetik levitasyon kontrol sistemi, sürücü devresi, ve güç kaynağı gibi karmaşık ekipmanlara ihtiyaç duymaz. Sabit mıknatısların kararlı bir şekilde havada askıda kalması ile oluşan süperiletken manyetik yatak yapısı, yüksek hızlı MAGLEV trenleri, enerji depolama volan (flywheel) sistemleri ve benzeri levitasyon çalışmalarına uygulanma potansiyeline sahiptir[1-3]. Seçilen süperiletken malzemenin boyutlarına ve özelliklerine ve kullanılan sabit mıknatısın manyetik yoğunluğuna bağlı olarak elde edilen katılık değeri bu sistemler için kullanılabilir mertebededir ve klasik yataklama sistemlerine göre avantajlara sahiptir [4,5].



Şekil 1. Süperiletken Levitasyon

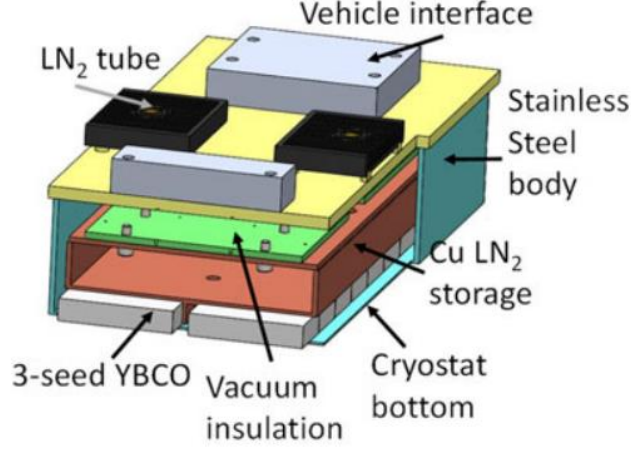
Bir mıknaş ray üzerinde doğrusal hareket ve yataklamanın yapıldığı uygulamalarda süperiletken malzeme taşıyıcı eleman üzerinde bulunur. Dolayısı ile bu tarz bir yapıda levite olan sabit mıknaş değil taşıyıcı olan süperiletken ve bağlı olduğu hareketli kütledir. Bu yapılarda sabit mıknaşlar ise hareketin gerçekleştirileceği yol boyunca uzanan kılavuz ray görevini görmektedir. Şekil 2'deki kesit gösterimde sabit mıknaşların belirli bir dizilimi ile elde edilen ray üzerinden sıvı azot kabı ile birlikte levite olmuş süperiletken malzeme gösterilmektedir.



Şekil 2. Süperiletken Levitasyon konfigürasyonu

Sıvı azotun süperiletken malzemelerin soğutulmasında nasıl uygulanacağı büyük önem arz etmektedir. Sıvı azotun süperiletkeni soğuttuğu kaplar açık doğrudan sıvı azotun döküldüğü kap şeklinde olabileceği gibi kapalı basınçsız vakumla izole edilmiş kriyostat şeklinde de olabilirler. Proje yürütücüsünün daha önce bursiyer olarak yer aldığı “Süperiletken Manyetik Yataklarda Donmuş Görüntü Esaslı Katılık Modellemesi ve Deneysel Çalışması” adlı TÜBİTAK projesinde elde ettiği deneyimler çerçevesinde süperiletken malzemenin doğrudan sıvı azot dökülerek soğutmanın yapıldığı durumda süperiletken malzemeye belirli bir süre sonra buzlanmadan ötürü zarar vermekte olduğunu

gözlemlenmiştir. Bu sebepten dolayı süperiletken malzemenin direk sıvı azot ile temasının olmadığı soğutma yöntemleri önem kazanmaktadır. Şekil 3’de proje kapsamında tasarlanacak sıvı azotun direk olarak süperiletken malzeme ile temas etmediği bir kriyostat yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3. Süperiletken vakum kriyostat yapısı

Bu kriyostat yapısı başka araştırma çalışmalarında MAGLEV taşıtlar için kullanılmıştır ve tasarlanacak fırlatıcı için de uygun gözükmektedir. Sıvı azotun depolandığı iletim katsayısı yüksek bakır depo sayesinde süperiletken malzeme ile ısı transferi prensibi ile soğutulmaktadır. Bu yapıda önemli olan sıvı azotun uzun süre soğutma sağlaması ve levitasyonun uzun süre devam edebilmesidir, ayrıca sistem vakum içine alınarak enerji kayıpları minimize edilmeye çalışılmıştır [6]. Süperiletken manyetik yataklı sisteminin uzun süreli çalışmasının gerekmediği durumlarda ise sistemi vakum içine almadan dış kabın yalıtım malzemeleri ile yalıtıldığı basınçsız bir kriyostat tasarımı da yapmak mümkündür.

Doğrusal fırlatıcı sistemler:

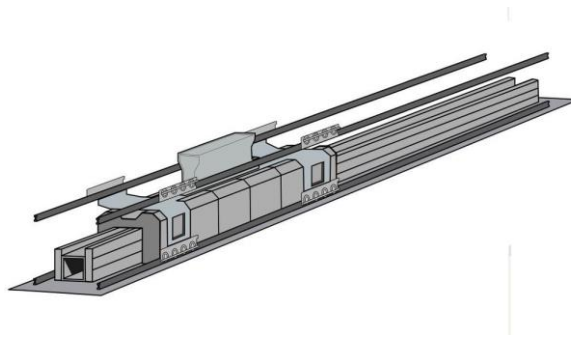
Hedef uçak veya insansız hava aracı gibi yapısı gereği kalkış sistemi bulunmayan araçlarda kalkış bir fırlatıcı sayesinde gerçekleştirilmektedir. İnsansız hava araçları için genel olarak mekanik tipte bir fırlatıcı sistem kullanılmaktadır [7]. Şekil 4’te temel bir mekanik fırlatıcı yapısı verilmektedir. Bu tip mekanik fırlatıcı sistemlerde hava aracının kalkış hızı sabit olmakta olup gerekli ivme ve hız kontrolü yapılamamaktadır. Burada hava aracının fırlatılması pnömatik bir sistem yardımı ile yapılmaktadır. Burada hava aracına uygulanan

pnömatik kuvvet büyüklüğü kalkış hızını belirlemektedir. Uygulanan pnömatik kuvvette herhangi bir geri besleme sistemi olmadığı için, hava aracına zarar vermeyecek büyüklükte olmalıdır. Buradan yola çıkarak daha kontrollü kalkışlar için son yıllarda yapılan çalışmalarda mekanik fırlatma sistemlerine alternatif olarak elektromanyetik fırlatıcı tasarımları yapılmaktadır [8]. Elektromanyetik fırlatıcılar sayesinde hava araçları daha kısa mesafelerden hızlandırılarak kalkış yapılması sağlanmakta ayrıca ivme ve kalkış hızının manyetik fırlatıcı ile kontrol edilmesi ile farklı tipte ve ortamda kalkış işleminin gerçekleşmesi sağlanmaktadır.



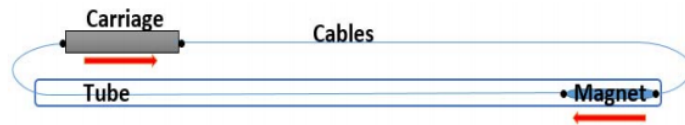
Şekil 4. Mekanik fırlatıcı yapısı

Tipik bir elektromanyetik fırlatıcı sistemi lineer motor prensibi ile çalışmaktadır. Dolayısı ile motora uygulanan geri beslemeli kontrol sayesinde daha kontrollü hava aracı kalkışları yapılabilmekte ve klasik yönteme nazaran hava aracı gövdesine zarar verme olasılıkları minimize edilmektedir. Şekil 5’te Amerikan ordusunda kullanılan General Atomics firması tarafından üretilmiş bir manyetik fırlatıcı sistemi (EMALS) gösterilmektedir [9]. Bu sistem uçak gemilerinde bulunan savaş uçaklarını fırlatan buhar gücü ile çalışan mekanik mancınık sistemine alternatif olması için üretilmiştir. Bu sistemin en büyük avantajı savaş uçağını daha kontrollü olarak ivmelendirip uçağın gövdesine zarar vermeyecek şekilde havalanmasını sağlamasıdır.



Şekil 5. Amerikan ordusunda kullanılan elektromanyetik fırlatıcı sistem (EMALS).

Elektromanyetik fırlatıcıların bir diğer avantajı ise klasik sistemlere göre daha az yer kaplaması ve operasyonel maliyetlerinin daha düşük olmasıdır [10,11]. Elektromanyetik fırlatıcılar, hava aracını fırlatmak için bir pist boyunca bir vagonu iten elektrik akımı ile çalışan doğrusal bir endüksiyon motorunu (linear induction motor) kullanırlar. Tipik çalışma mantığı Şekil 6’te gösterilmiştir. Fırlatma işlemi tamamlandıktan sonra fırlatıcı vagon kablo yardımı ile geri çekilerek ilk konumuna getirilmektedir. Uçak gemisi gibi yapılarda savaş uçaklarını fırlatmak için gereken enerji miktarı yüksek olmasına karşın uçak gemisinin hareketi için gereken güce nazaran epey düşük bir miktardadır. Elektromanyetik fırlatıcı sisteminin insansız hava araçları için kullanıldığı daha küçük ve daha az enerji tüketen bir sistem tasarlanabilir. Geri beslemeli kontrol için lineer motorun konumu hall etkili bir sensör yardımı ile kontrol edilmektedir.



Şekil 6. Elektromanyetik fırlatıcı sistemi çalışma yapısı.

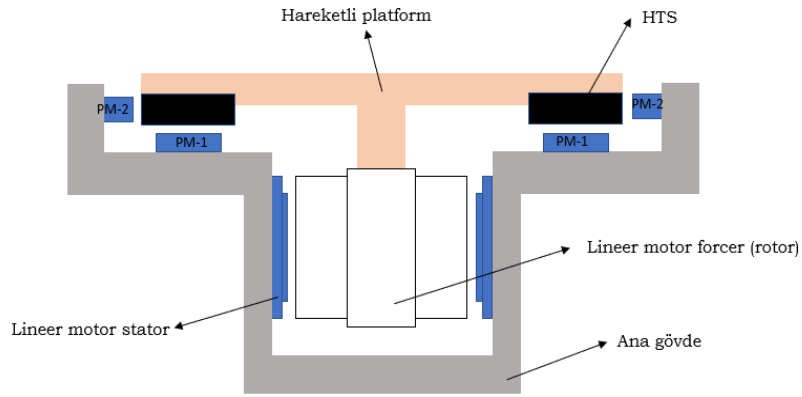
İki sistemin entegrasyonu:

Literatürde hali hazırda bu iki sistemin (süperiletken levitasyon ve elektromanyetik fırlatıcı) birleşimi üzerine çalışılan kısıtlı sayıda çalışma vardır. Bu çalışmalar da ise süperiletken malzemeni katılık değerleri ve modal davranışı incelenmiştir [12]. Süperiletken malzeme manyetik levitasyon çalışmalarında tel formunda da kullanılabilir. Elektromıknatıs prensibi ile süperiletken tel üzerinden akım geçirilerek levitasyonda gerçekleştirilebilir. Fakat bu

yapı kompleks sürücü devreleri ve güç kaynağı gerektirmektedir [13]. Literatürde bu yapıda manyetik fırlatıcı çalışmaları bulunmaktadır. Süperiletken malzemenin katı (bulk) formda kullanıldığı levitasyon sistemi ise bu projenin özgün bir yaklaşımı olacaktır. Bu iki farklı disiplinin konusu olan süperiletken manyetik yatak ve fırlatıcı sistemin bir arada bulunduğu ve bir sistem oluşturacak şekilde tasarlanmış bir çalışma bulunmamaktadır.

Süperiletken manyetik yataklı fırlatıcı sistemi:

Klasik mekanik fırlatıcı sistemler mevcut dezavantajları sebebi ile yerini elektromanyetik fırlatıcılara bırakmaktadır. Amerikan ordusunun hali hazırda kullandığı elektromanyetik fırlatıcı sistem EMALS uçak gemileri için tasarlanmış büyük ölçekli aktif olarak kullanılan bir sistemdir. Fakat bu sistemde lineer motorun yataklanması mekanik olarak gerçekleşmekte ve fırlatıcı vagonun geri hareketi kablolar sayesinde gerçekleşmektedir. Süperiletken manyetik yatakların temassız olarak yataklamayı sağladığı elektromanyetik fırlatıcı tasarımı henüz çalışılmamış bir konudur. Projemizde laboratuvar ölçekli süperiletken manyetik yataklı doğrusal fırlatıcı sistem tasarımı önerilmektedir. Bu yapı her ne kadar laboratuvar ölçekli olsa da aynı zamanda küçük ve orta ölçekli insansız hava araçlarını fırlatabilecek kapasitede olacaktır. Bu yapı aynı zamanda süperiletken manyetik yatakların farklı ivmelenme durumlarındaki davranışlarını inceleyeceği için daha büyük ölçekli manyetik levitasyonlu yolcu taşıma sistemleri gibi projeler için bir ön hazırlık ve bilgi birikimi oluşturacaktır.



Şekil 7. Süperiletken manyetik yataklı fırlatıcı şematik görünüşü.

Özgün değer:

Proje fırlatılacak yükün taşındığı platformun süperiletken manyetik yatakla levite edildiği ve doğrusal hareketin lineer motorla sağlandığı bir elektromanyetik fırlatıcı sistemi tasarımı ve deneysel doğrulama çalışmalarının yapılmasını kapsamaktadır. Klasik fırlatıcı sistemlere karşın projede ele aldığımız sistem hız ve ivme kontrollü sağlayabilmekte ve lineer motorun geri beslemeli kontrolcü sayesinde kontrollü bir hareket imkânı sunmaktadır. Ayrıca süperiletken malzemeler genel olarak literatürde Şekil 2’de gösterildiği gibi tek bir yüzey üzerinde sabit mıknatıslar ile levite edilmektedir. Proje önerisinde ise süperiletken malzemenin aktif yüzeyi olarak hem alt yüzeyi hem de yan yüzeyi kullanılacaktır (Şekil 7). Çok yüzeyli levitasyon [14,15] ismi verilen bu yapı ayrıca tek bir süperiletken malzemenin elde edilebilecek katılık değerini arttıracak ve lineer hareket esnasından yanal yüklerin bastırılmasını kolaylaştıracaktır. Soğutma işlemi için sıvı azot doğrudan süperiletken malzeme ile temas etmeyecek şekilde ve iletimle ısı transferi esaslı bakır kaptaki depolanan sıvı azotun soğutmayı sağladığı bir kriyostat yapısı kullanılacaktır. Ayrıca bakır sıvı azot kabı ile süperiletken malzeme arasına montaj sırasında kriyojenik termal macun sürülerek ısı iletiminin kusursuz olması sağlanacaktır. Hareketli vagon Aerojel içeren yalıtım malzemesi ile yalıtılacak basınçsız bir kriyostat olarak daha uzun süre süperiletken malzemenin kritik sıcaklıkta kalmasını sağlayarak levitasyon süresini uzatacaktır. Son olarak süperiletken levitasyon çalışmalarında farklı ivme profilleri için katılık değeri hesapları ve levitasyon boşluğu ölçümleri yapılacaktır. Literatürde bu gibi deneysel sonuç içeren bir çalışma yoktur. Önerilen süperiletken manyetik yataklı fırlatıcı tasarımı geliştirmeye açık Maglev taşıtı gibi projelere ön bilgi sağlayacak yapıdadır Kurulacak deneysel sistem tek başına küçük ve orta ölçekli insansız hava araçları için fırlatıcı sistem olarak kullanılabilmesi için bir yapı olacaktır. Ayrıca insansız hava aracını fırlatmak için rampa eğimi deneysel sisteme de uygulanacak ve eğimli durumda süperiletken manyetik yatakların davranışı deneysel olarak incelenecektir. Projede ele alınan yapı, bu hali ile patentlenebilir potansiyeline sahiptir.

Sekil 8 (b)'de gösterildiği gibi iki farklı boyutta sabit mıknatısın proje kapsamında satın alımı gerçekleştirilmiştir. Projede sabit mıknatıslar için ayrılan toplam bütçe 16900 TL olarak belirlenmiştir. Döviz kurundaki artışlar ve pandemi koşulları sonucunda artan gümrük masrafları nedeni ile sabit mıknatıslar en uygun yerli bir satıcı firmadan (Magnet Market) temin edilebilmiştir. Yapılan pazarlık sonucunda 540 adet 20 mm x 20 mm x 20 mm boyutunda PM1 ve 350 adet 40 mm x 10 mm x 5 mm PM2 sabit mıknatısı satın alınabilmiştir. Süperiletken manyetik yataklı lineer fırlatıcı sistemi satın alınması tamamlanan lineer motorun ölçüleri baz alınarak toplam ray uzunluğu 1600 mm olarak belirlenmiştir. Dolayısı ile mevcut konfigürasyon için 480 adet PM1 ve 320 adet PM2 tüm ray sistemini oluşturmak için yeterlidir. Sabit mıknatısların montaj esnasında kırılabileceği düşünülerek satın alınan miktarın yeterli olacağı görülmektedir. Ray konfigürasyonunda orta kısımda bulunan sabit mıknatısların ölçüsü 20 mm x 10 mm x 20 mm olarak düşünülmüştür. Fakat o ölçülerde hazır sabit mıknatısın olmayışı yeni üretim şeklinde gerçekleşen siparişinde bütçenin çok üzerinde kalmasından ötürü dört adet PM2 üstü üste konularak tasarım gerçekleşmesi sağlanmıştır. Aynı boyutları verecek üst üste konulmuş sabit mıknatıslar ile tek sabit mıknatısın vereceği etki hemen hemen aynı olduğu için bu şekilde bir çözüm yoluna gidilmiştir. Bu durumun sıkıntı çıkarıp çıkarmayacağı aynı zamanda Comsol programında 2 farklı analiz yapılarak tek mıknatıs ve üst üste konulmuş dört mıknatıs için analiz yapılmış ve uygunluğu doğrulanmıştır. Satın alınması gerçekleştirilen mıknatıslar Türkiye şartlarında temin edilebilecek en üst kalitede N35 grade özelliğine sahip mıknatıslardır. Alınan mıknatısların manyetik özellikleri aşağıdaki şekilde verilmiştir.

Grade	Residual magnetism		Coercive field strength				Energy product		Max. operational temp. °C
	Br		bHc		iHc		(BxH)max		
	Gauss (G)	Tesla (T)	kOe	kA/m	kOe	kA/m	MGOe	kJ/m³	
N30	10800-11200	1.08-1.12	9.8-10.5	780-836	≥12	≥955	28-30	223-239	≤80
N33	11400-11700	1.14-1.17	10.3-11	820-876	≥12	≥955	31-33	247-263	≤80
N35	11700-12100	1.17-1.21	10.8-11.5	860-915	≥12	≥955	33-35	263-279	≤80
N38	12200-12600	1.22-1.26	10.8-11.5	860-915	≥12	≥955	36-38	287-303	≤80
N40	12600-12900	1.26-1.29	10.5-12.0	860-955	≥12	≥955	38-40	303-318	≤80
N42	12900-13200	1.29-1.32	10.8-12.0	860-955	≥12	≥955	40-42	318-334	≤80
N45	13200-13700	1.32-1.37	10.8-12.5	860-995	≥12	≥955	43-45	342-358	≤80
N48	13700-14200	1.37-1.42	10.8-12.5	860-995	≥12	≥955	45-48	358-382	≤80
N50	14000-14600	1.40-1.46	10.8-12.5	860-995	≥12	≥955	47-51	374-406	≤80
N52	14200-14700	1.42-1.47	10.8-12.5	860-995	≥12	≥955	48-53	380-422	≤65

Şekil 9. Sabit mıknatısların manyetik özellikleri.

b) Malzeme tanımı yapılarak oluşturulan sonlu elemanlar modeli ve levitasyon kuvvetleri hesabı:

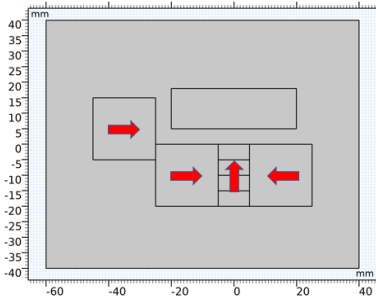
Seçilen manyetik ray konfigürasyonuna göre üretimi yapılacak olan ray kılavuz parçasının üzerine temin edilen sabit mıknatıslar yerleştirilecektir. N35 Grade bilgisine sahip sabit mıknatısın H_c değeri Şekil 9’de verildiği gibi 860 ile 915 kA/m arası olarak alınmaktadır. Yapılan çalışmalarda ise ortalama değer olarak 887.5 kA/m değeri seçilmiştir. Rapor dönemi içerisinde temin edilen sabit mıknatısların manyetik özellikleri dikkate alınarak sonlu elemanlar programı Comsol sayesinde sistemin levitasyon ve yanal kılavuz kuvvet değerleri hesaplanmıştır. Bir önceki rapor döneminde yapıldığı gibi yanal sabit mıknatısın hangi durumda çok yüzeyli levitasyonu kuvvetini en iyi şekilde oluşturacağını görmek adına 4 ayrı dizilim için analizler tekrar edilmiştir. Tablo 1’de sonlu elemanlar analizi sırasında kullanılan model parametreleri verilmektedir.

Tablo 1. Analiz ortamında kullanılan parametreler

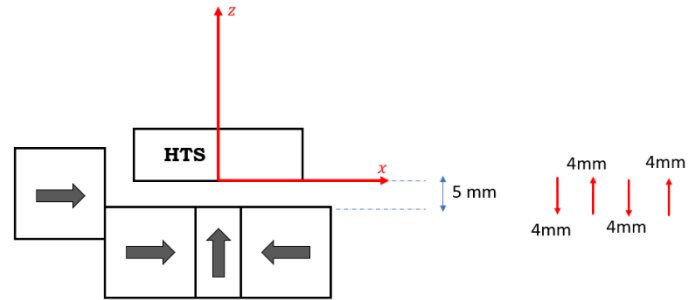
Sembol	Tanım	Değer	Birim
H_0	Model parametresi (0.37 T)	295149	$\frac{A}{m}$
J_{c0}	Sıfır-akım kritik akım yoğunluğu	2.4×10^8	$\frac{A}{m^2}$
E_c	Kritik Elektrik Alan	1×10^{-4}	$\frac{V}{m}$
n	Model parametresi	21	–
M_0	Sabit mıknatıs	8.875×10^5	$\frac{A}{m}$
μ_0	Geçirgenlik	$4\pi \times 10^{-7}$	$\frac{H}{m}$
l	Model derinliği	20	mm

Konfigürasyon -1

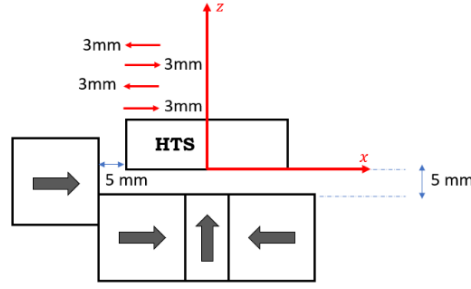
Birinci durum, yanal sabit mıknatısın polarizasyon yönünü $+x$ yönünde olduğu konfigürasyon durumu için incelemiştir. Şekil 10 (a)'da ilgili konfigürasyon durumu için kurulan analiz arayüzü ve sabit mıknatısların mıknatıslanma yönleri gösterilmiştir. Şekil 10 (b)'de süperiletken manyetik fırlatıcı sistemi için levitasyon kuvvetinin belirlenmesi adına simülasyon modelinde hareketli domain olarak tanımlanan sabit mıknatısların aksel yönde gerçekleştirdiği yerdeğiştirme sıralaması verilmiştir. Burada 4mm hareket, ileri ve geri art arda uygulanarak oluşacak histerisiz etkisi gözlemlenmesi hedeflenmiştir. Ayrıca ele alınan süperiletken manyetik yataklı lineer fırlatıcı sisteminde hareketli olarak düşünülen yapı vagon geometrisi yani süperiletken malzemedir. Fakat hareketli mesh yapısı ile çalışan sonlu elemanlar modelinde süperiletken malzeme yerine sabit mıknatısı hareket ettirmek daha uygun sonuç vermektedir. Son olarak Şekil 10 (c)'de ise yanal kılavuzlama kuvveti ölçümü için uygulanan yanal yerdeğiştirme sıralaması verilmiştir. Benzer şekilde histerisiz etkisi bu durumda da görülmektedir. Ele alınan sonuçlar Tablo 1'de sunulan malzeme bilgileri dikkate alınarak, 2 boyutlu olarak gerçekleştirilmiş ve sonlu elemanlar modeli derinliği projede kullanacağımız süperiletken malzemenin derinliği olan 40 mm olacak şekilde seçilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar tek bir süperiletken malzemeyi yani toplam sistemin çeyrek yapısını oluşturmaktadır. Bir sonraki bölümde tasarımsal detayları sunulduğu süperiletken manyetik yataklı doğrusal fırlatıcı sisteminde toplam dört adet süperiletken malzeme kullanılmaktadır. Dolayısı ile elde edilen sonuçlar toplam sistemin dörtte birini yansıtmaktadır.



(a)



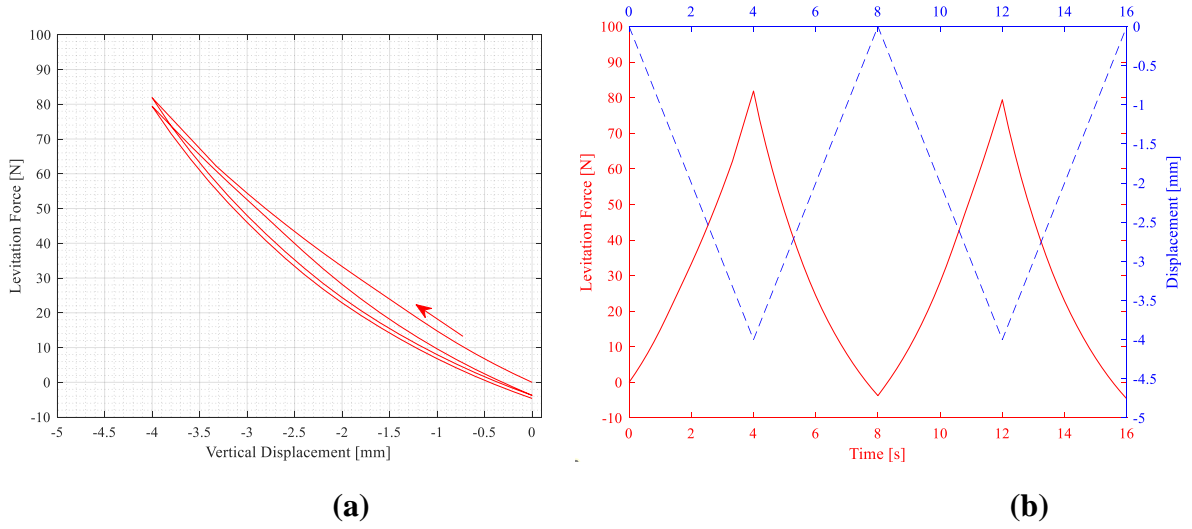
(b)



(c)

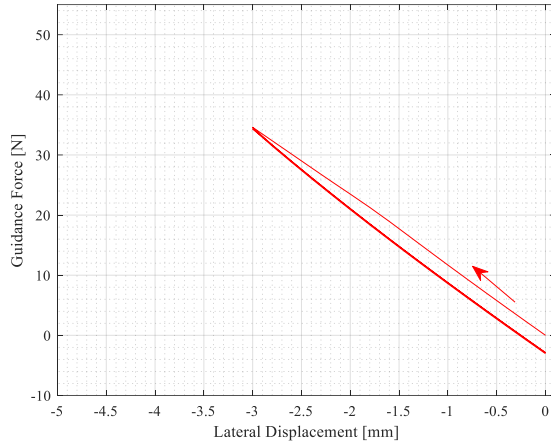
Şekil 10. Konfigürasyon-1.

Birinci analiz olarak süperiletken malzemenin levitasyon kuvvetinin belirlenebilmesi açısından sabit mıknatıslar 4mm yukarı ve aşağı olacak şekilde hareket domain içerisinde tanımlanmıştır. Comsol programında zamana bağlı olarak gerçekleştirilen bu analizlerde hareketli ağ örgü yapısı (moving mesh) kullanılmıştır. Zamana bağlı çözümlerde mesh hareketleri sırasında mesh kalitesinin düşmeye başladığı noktalarda ise programda otomatik yeniden mesh atma özelliği kullanılarak daha sağlıklı sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 11(a)'da birinci tasarım için elde edilen levitasyon kuvveti histerisiz etkisini de içerecek şekilde yer değiştirmeye bağlı olarak sunulmuştur. Maksimum 81.87 [N] olarak levitasyon kuvveti ölçülmüştür. Süperiletken manyetik yataklı lineer fırlatıcı sistem üzerinde toplam 4 adet süperiletken malzeme olduğu hareketli vagon sisteminin toplam levitasyon kuvveti değeri 331.48 [N] olacaktır. Şekil 11(b)'de ise tekbir süperiletken malzemedan oluşacak levitasyon kuvvetinin değişimi zamana bağlı olarak sunulmuştur. Aynı grafikte diğer ekseninde ise (mavi eksen) kuvvet ölçümü sırasında tanımlanan yer değiştirme hareketi fonksiyonu verilmiştir. Literatürde kabul görmüş bir yöntem olarak sabit mıknatısların hareketi üçgen bir fonksiyon tanımlanarak elde edilmiştir [17,18]. Verilen fonksiyonda görüldüğü gibi hareketin hızı 1 mm/sn olarak kurgulanmıştır. Dolayısı ile toplam simülasyon süresi 16 sn olmaktadır.

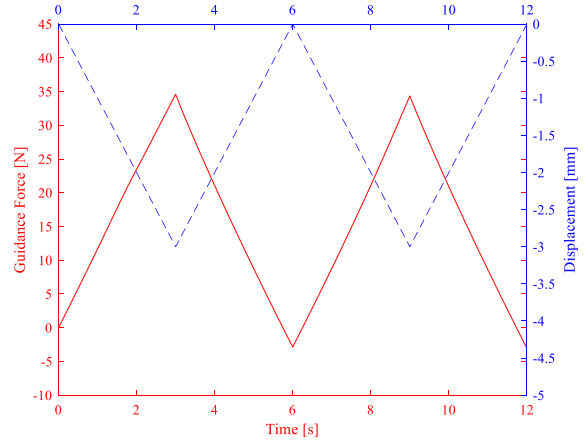


Şekil 11.(a) Birinci konfigürasyon için aksel yöndeki levitasyon kuvveti yerdeğiştirme cevabı **(b)** zaman cevabı ve uygulanan yerdeğiştirme fonksiyonu.

Levitasyon kuvvetinin hesabından sonra yanal kuvvetlerin belirlenebilmesi için sabit mıknatıslar Şekil 10(c)'de gösterildiğim gibi aynı yaklaşım ile x yönünde hareket ettirilerek analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 12 (a)'da birinci tasarım için elde edilen yanal kuvveti histerisiz etkisini de içerecek şekilde yerdeğiştirmeye bağlı olarak sunulmuştur. Maksimum 34.6 [N] olarak yanal kuvvet ölçülmüştür. Şekil 12(b)'de ise tek bir süperiletken malzemedan oluşacak yanal kuvvetinin değişimi zamana bağlı olarak sunulmuştur. Aynı grafikte diğer ekseninde ise (mavi esken) kuvvet ölçümü sırasında tanımlanan yer değıştirme hareketi fonksiyonu verilmiştir.



(a)

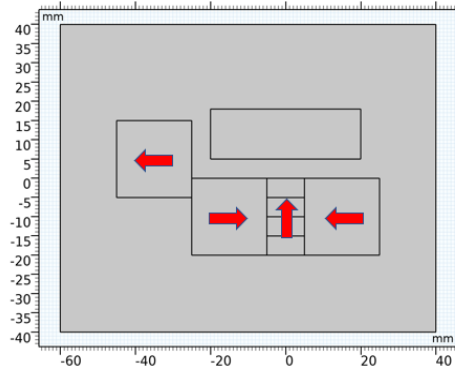


(b)

Şekil 12. (a) Birinci konfigürasyon için yanıl yöndeki levitasyon kuvveti yerdeğiştirme cevabı (b) zaman cevabı ve uygulanan yerdeğiştirme fonksiyonu.

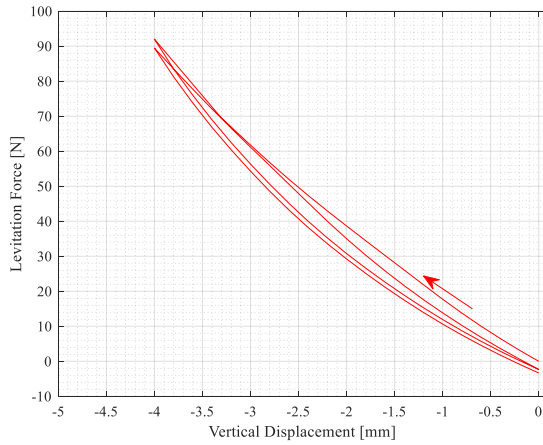
Konfigürasyon -2

İkinci durum, yanıl sabit mıknatısın polarizasyon yönünü -x yönünde olduğu konfigürasyon durumu için incelemiştir. Şekil 13’da ilgili konfigürasyon durumu için kurulan analiz arayüzü ve sabit mıknatısların mıknatıslanma yönleri gösterilmiştir. Şekil 10(b)’de verilen aksenal kuvvet ölçümü için oluşturulan yerdeğiştirme sırası ve Şekil 10(c)’de verilen yanıl kuvvet ölçümü için oluşturulan yerdeğiştirme sırası benzer şekilde konfigürasyon 2 içinde uygulanmıştır.

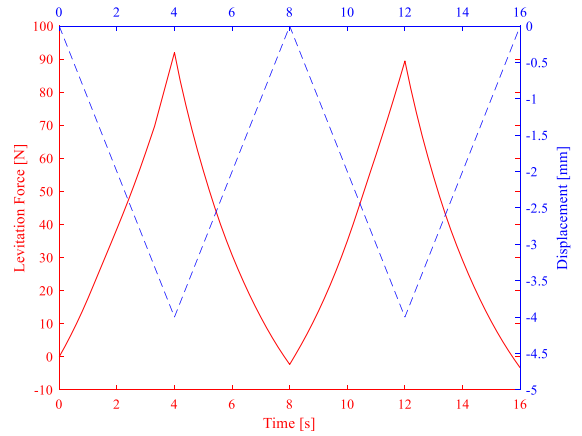


Şekil 13. Konfigürasyon-2.

Şekil 14(a)'da ikinci tasarım için elde edilen levitasyon kuvveti histerisiz etkiside içerecek şekilde yerdeğıştirmeye bağılı olarak sunulmuştur. Maksimum 91.99 [N] olarak levitasyon kuvveti ölçülmüştür. Benzer şekilde Şekil 14(b)'de ise süperiletken malzemeden oluşacak levitasyon kuvvetinin değışimi zamana bağılı olarak sunulmuştur. Aynı grafikte diğer eksende ise (mavi esken) kuvvet ölçümü sırasında tanımlanan yer değıştirme hareketi fonksiyonu verilmiştir.



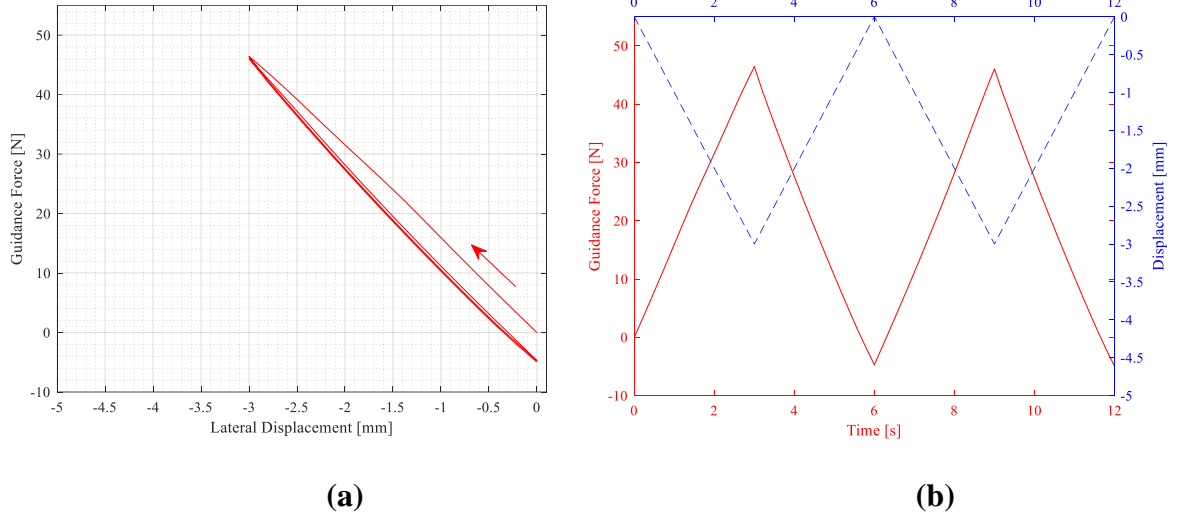
(a)



(b)

Şekil 14.(a) İkinci konfigürasyon için eksenel yöndeki levitasyon kuvveti yerdeğıştirme cevabı **(b)** zaman cevabı ve uygulanan yerdeğıştirme fonksiyonu.

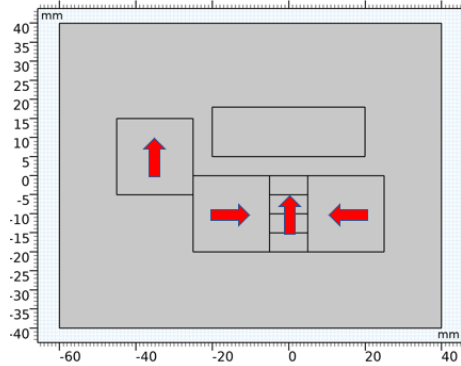
Şekil 10(c)'de gösterilen yaklaşım ile sabit mıknatıslar x yönünde hareket ettirilerek ikinci tasarım için yanal kuvveti verecek analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 15 (a)'da ikinci tasarım için elde edilen yanal kuvveti histerisiz etkisini de içerecek şekilde yerdeğıştirmeye bağılı olarak sunulmuştur. Maksimum 46.44 [N] olarak yanal kuvvet ölçülmüştür. Şekil 15(b)'de ise tek bir süperiletken malzemeden oluşacak yanal kuvvetinin değışimi zamana bağılı olarak sunulmuştur. İkinci durum için elde edilen yanal kuvvetin en büyük değerde olduğu gözlemlenmiştir.



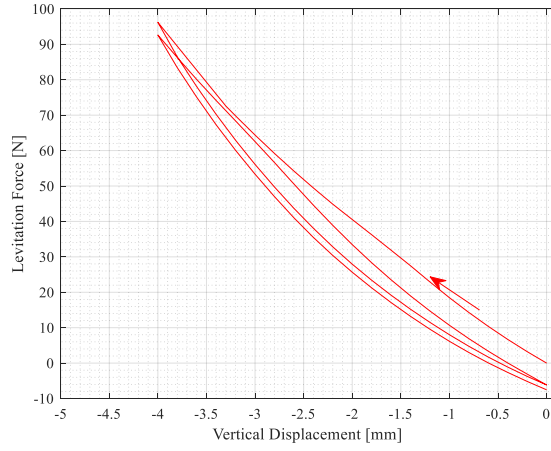
Şekil 15. (a) İkinci konfigürasyon için yanıl yöndeki levitasyon kuvveti yerdeğıştirme cevabı **(b)** zaman cevabı ve uygulanan yerdeğıştirme fonksiyonu.

Konfigürasyon -3

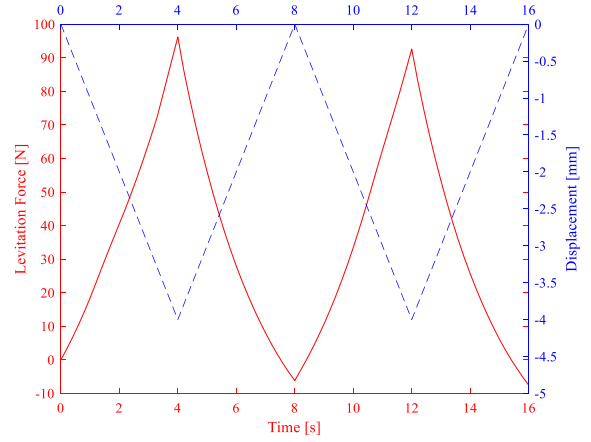
Üç numaralı tasarım için yani yanıl sabit mıknatısın polarizasyon yönünü +y yönünde olduğu durumda verilen numaralandırılmış ray geometrisi Şekil 16'da gösterilmiştir. Benzer şekilde levitasyon kuvveti ve yanıl kılavuzlama kuvvetini için yürütölen sonu elemanlar analiz sonuçları Şekil 17 ve 18'de sunulmuştur. Üç nolu konfigürasyonda durumlar arasında en yüksek levitasyon kuvveti 96.21 [N] olarak elde edilmiştir.



Şekil 16. Konfigürasyon-3.

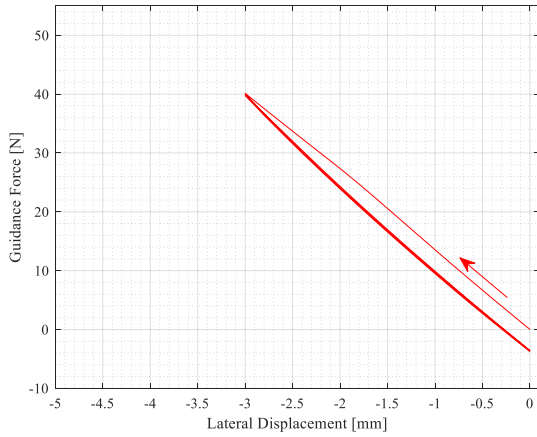


(a)

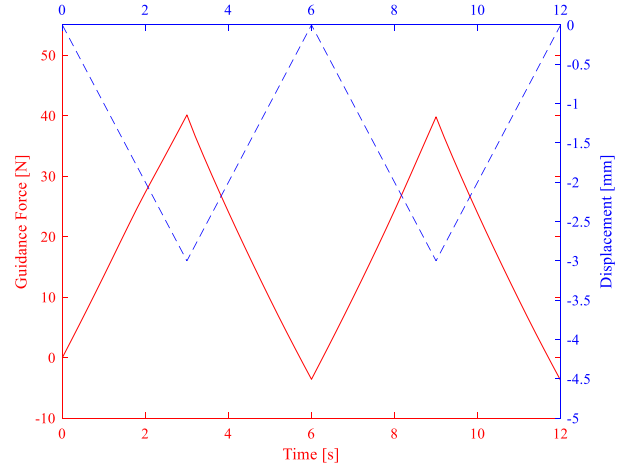


(b)

Şekil 17.(a) Üçüncü konfigürasyon için eksenel yöndeki levitasyon kuvveti yerdeğiştirme cevabı (b) zaman cevabı ve uygulanan yerdeğiştirme fonksiyonu.



(a)



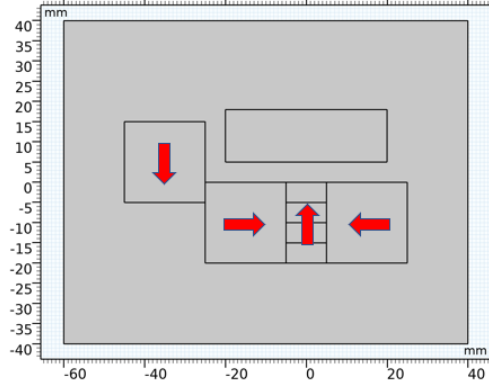
(b)

Şekil 18. (a) Üçüncü konfigürasyon için yanal yöndeki levitasyon kuvveti yerdeğiştirme cevabı (b) zaman cevabı ve uygulanan yerdeğiştirme fonksiyonu.

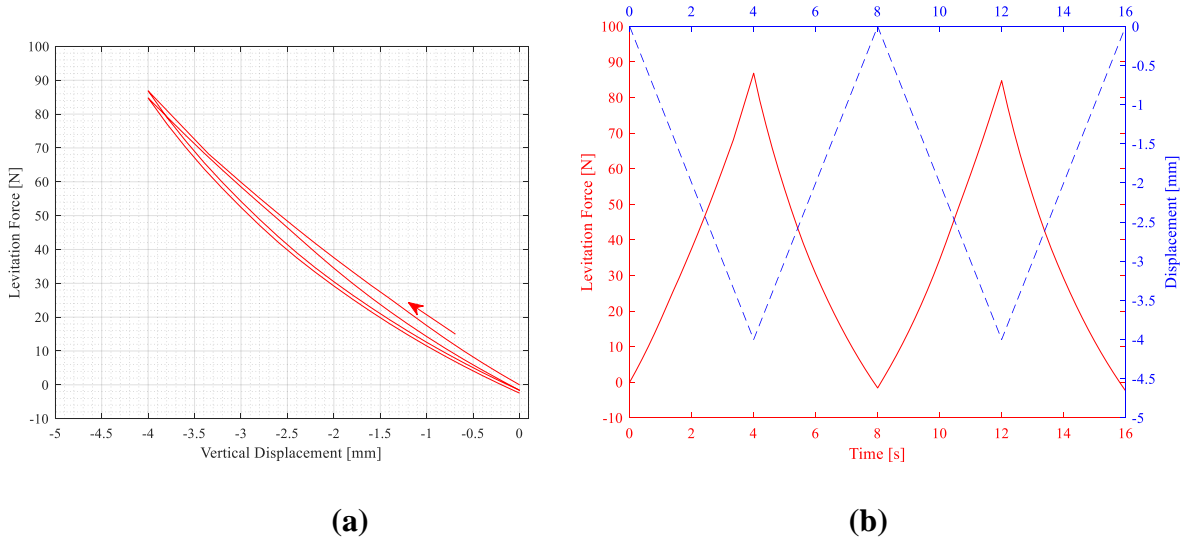
Konfigürasyon -4

Son olarak dördüncü tasarım için verilen yanal mıknatısı -y yönünde yer aldığı ray geometrisi Şekil 19'de gösterilmiştir. Benzer şekilde analiz prosedürleri uygulanarak

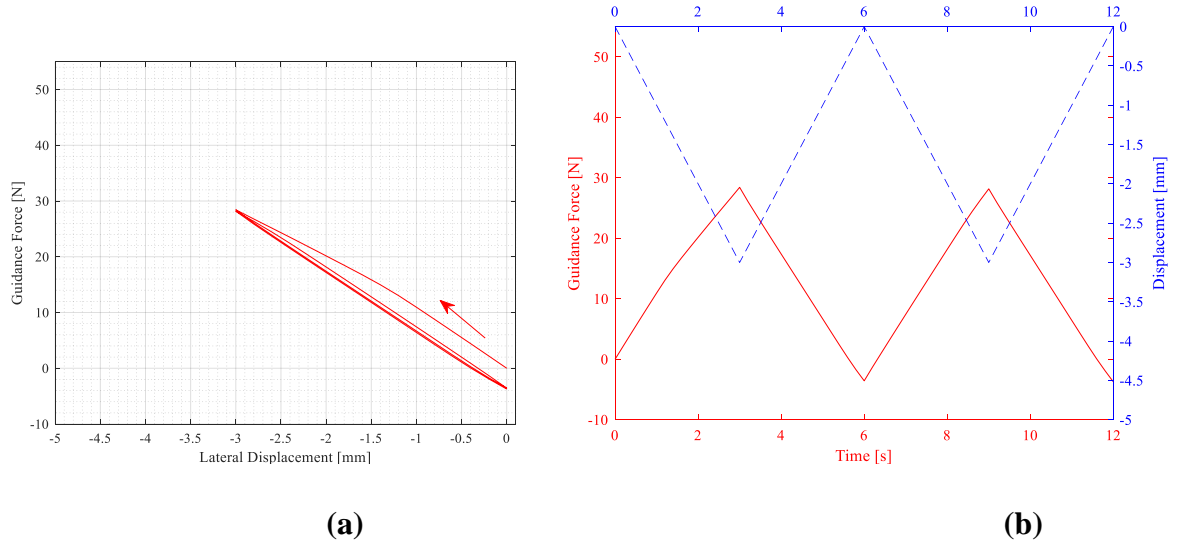
levitasyon kuvveti ve yanal kılavuzlama kuvvetini için yürütülen sonu elemanlar analiz sonuçları Şekil 20 ve 21’de sunulmuştur.



Şekil 19. Konfigürasyon-4.



Şekil 20.(a) Dördüncü konfigürasyon için eksenel yöndeki levitasyon kuvveti yerdeğiştirme cevabı (b) zaman cevabı ve uygulanan yerdeğiştirme fonksiyonu.



Şekil 21. (a) Dördüncü konfigürasyon için yanal yöndeki levitasyon kuvveti yerdeğiştirme cevabı **(b)** zaman cevabı ve uygulanan yerdeğiştirme fonksiyonu.

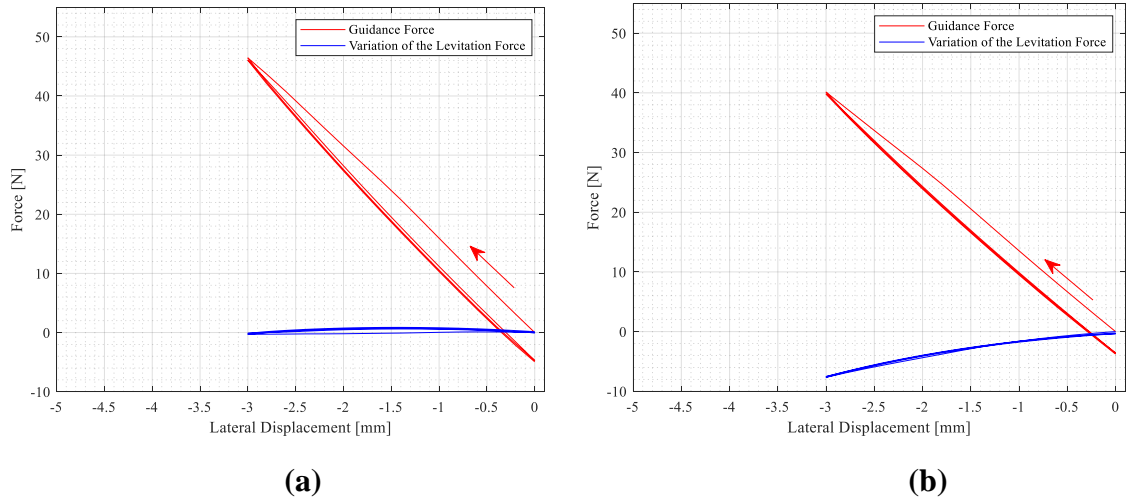
c) Nihai mıknatıs konfigürasyonunun seçilmesi:

Yapılan analizler sonucunda elde edilen en yüksek levitasyon kuvvetleri Tablo 2’de özet olarak verilmiştir. Tabloya bakıldığında en yüksek eksenel levitasyon kuvvetinin üç numaralı konfigürasyonda ve en yüksek yanal kuvvetin ise iki numaralı konfigürasyonda ölçüldüğü görülmektedir. Nihai bir seçim yapmak için bu iki durum tekrar değerlendirilmiştir. Süperiletken manyetik yataklı lineer fırlatıcı sisteminde lineer motor hareketi dikkate alındığında yanal yerdeğiştirmelerin daha az olacağı ön görülmektedir.

Tablo 2. Tüm durumlar için elde edilen maksimum levitasyon ve yanal kuvvetler.

	Case1	Case2	Case3	Case4
Maksimum Levitasyon kuvveti	81.87 [N]	91.99 [N]	96.21 [N] *	86.86 [N]
Maksimum Kılavuz kuvveti	34.6 [N]	46.44 [N] *	40.13 [N]	28.42 [N]
* Tüm durumlar arasında elde edilen maksimum kuvvetler				

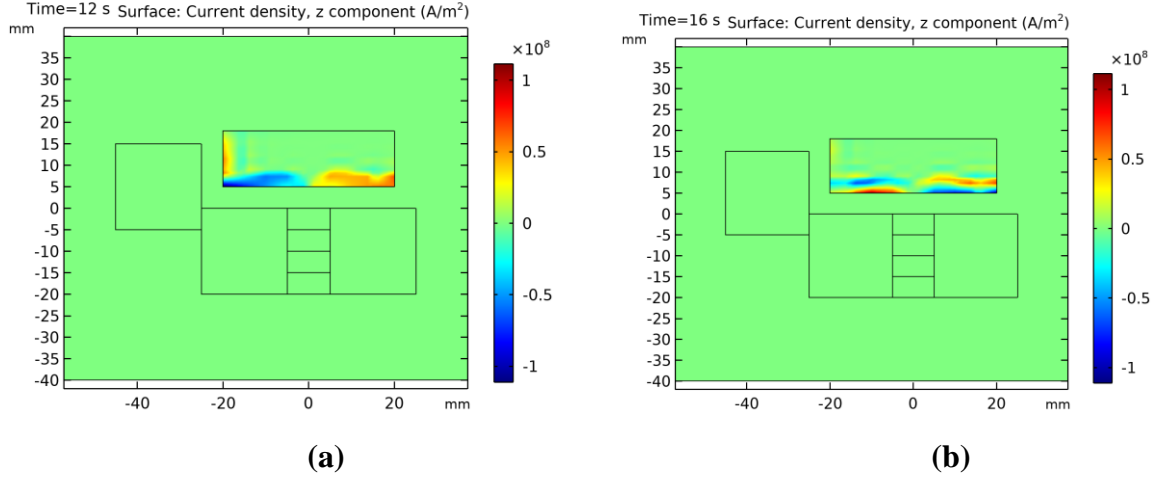
Süperiletken malzemelerin üç boyutlu katılık karakteristiği gereği yapılan analizlerde yanal yerdeğiştirme sırasında eksenel kuvvetin ne şekilde etkilendiği ölçülmüştür. Şekil 22’te her iki durum için yanal kuvvetin belirlenmesi sırasında eksenel kuvvetin ne şekilde değiştiğini görmek için aynı grafik üzerinden sonuçlar sunulmuştur. Tasarım 3’te yanal yerdeğiştirme sırasında eksenel kuvvetin Negatif yönde 9 [N] kadar etkilendiği görülmüştür. Tasarım 2’de ise bu kuvvet değişimi minimum seviyede olduğu görülmüştür. Dolayısı ile süperiletken manyetik yataklı lineer fırlatıcı sistemi için tasarım 2’de sunulan sabit mıknatıs konfigürasyonu seçilmiştir.



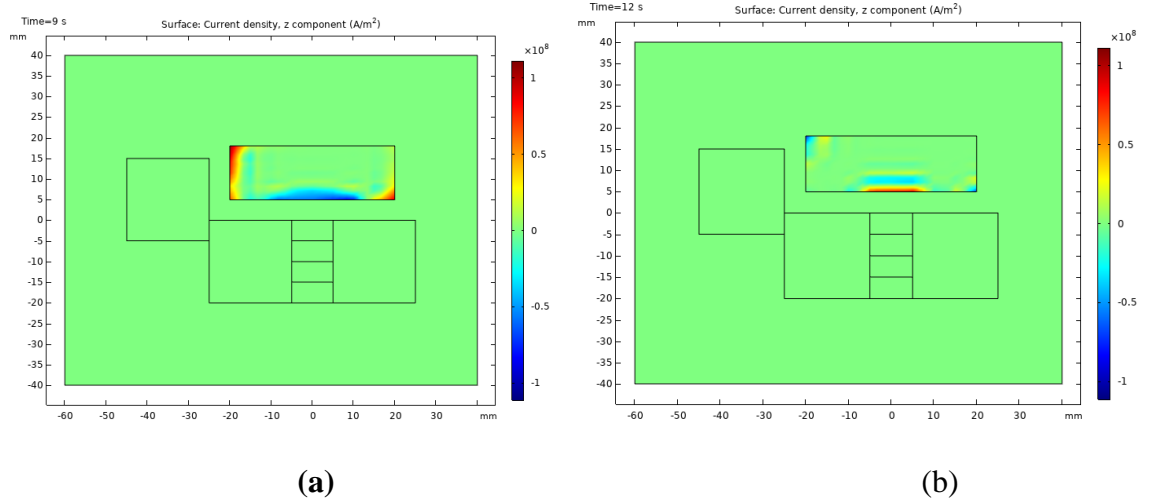
Şekil 22. Yanal yerdeğiştirme durumunda eksenel kuvvetin değişimi **(a)**Tasarım-2 **(b)** Tasarım-3.

Tasarımı kesinleşen konfigürasyona ait süperiletken malzeme içinde indüklenen yüzey akım yoğunluğu zamana bağlı olarak hareketli domain içinde yer alan sabit mıknatısların oluşturduğu etki için farklı zamanlarda elde edilebilir. Şekil 23 (a)’da 12. saniye için elde edilen yüzey akım yoğunluğu gösterilmektedir. 12. saniye sabit mıknatısın süperiletken malzemeye 2. kez en yakın konumda olduğu zamanı temsil etmektedir. Ayrıca simülasyon süresinin en son zamanı olan yani süperiletken ile sabit mıknatıs arasındaki mesafenin tekrar manyetik alan içinde soğutma (field cooling) miktarına geldiği 16. saniye Şekil 23 (b)’de

gösterilmiştir. Benzer sonuçlar yanal hareket içinde aynı şekilde en yakın ve en uzak noktalar için 9.ve 12. saniye için Şekil 24’de gösterilmiştir.



Şekil 23. Süperiletken malzeme için yüzey akım yoğunlukları aksel hareket durumunda.

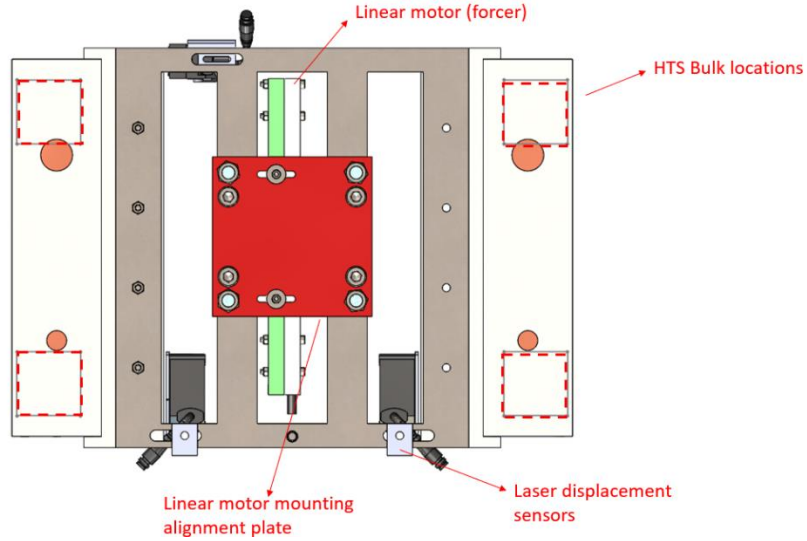


Şekil 24. Süperiletken malzeme için yüzey akım yoğunlukları yanal hareket durumunda.

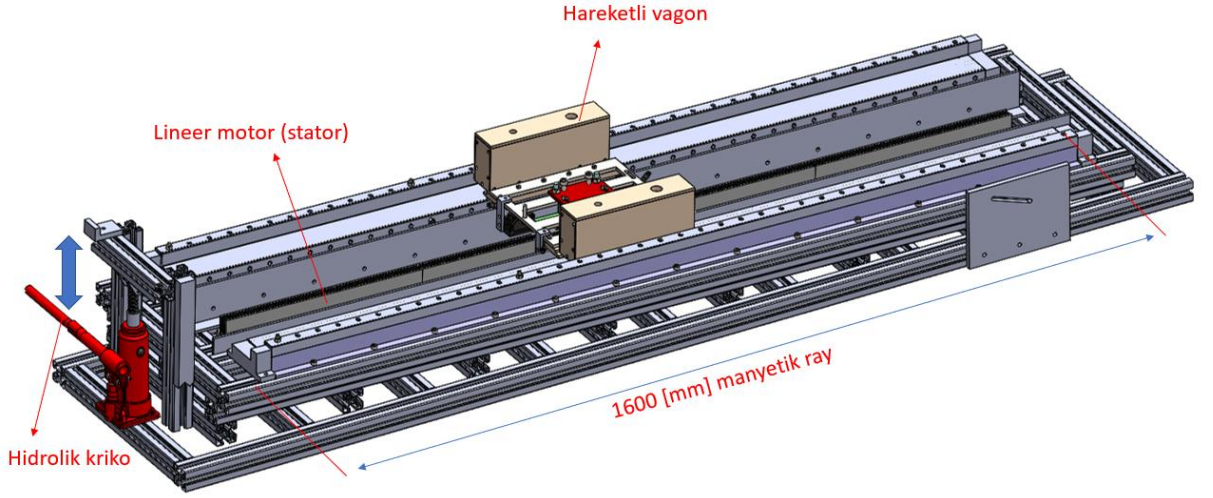
d) Mekanik tasarım ve üretim hakkındaki gelişmeler:

Mekanik üretim aşamasına bu rapor döneminde geçileceği bir önceki raporda belirtilmişti. Fakat hammadde fiyatlarının özellikle hareketli vagon parçalarında kullanılan PEEK malzemenin ve alüminyum malzemenin fiyatlarının çok yükselmesi sebebi ile uygun bir fiyat teklifinde anlaşılammış olmasından ötürü üretim süreci biraz aksamıştır. Hareketli vagon geometrisinde daha önceki proje deneyimlerimizde de kullandığımız [14-15] PEEK

malzemedan yapılmış sıvı azot tankı için sadece üretimi yapılacak plastik levha hammaddesine işçilik hariç en uygun (kdv hariç) 600 Euro yaklaşık 7500 TL fiyat verilmiştir. Dolayısı ile tasarımda toplam bütçenin dahilinde kalınabilmesi için bazı değişikliklere gidilmiştir. PEEK malzeme yerine daha ucuz kestamit plastik malzeme seçimi yapılmıştır. PEEK malzemenin tercih edilmesi termal büzülme katsayısının düşük oluşuydu. Sıvı azot ortamında çalışan geometri için soğutma sırasında sağlıklı bir şekilde sıvı azotu haznesinde tutabilmeli ve bakır taban sayesinde süperiletken malzemeyi soğutabilmesi önemlidir. Üretimi yaptıracığımız firma ile görüşmelerimiz sonucunda kestamit plastikten üretilen sıvı azot haznesini kademeli olarak tasarlayıp birbirine geçecek şekilde bir geometri tasarlanmıştır ve montaj öncesinde temas yüzeylerine sıvı azota dayanıklı sıvı conta sürülerek sızdırmazlık sorununa çözüm sağlanmıştır. Ayrıca proje kapsamında temin edilen buhar bariyerli aerojel katkılı yalıtım battaniyesi hareketli vagon geometrisi üzerinde gerekli yerlere kaplanarak daha uzun süre soğutma sağlanacaktır. Şekil 25’de hareketli vagon geometrisinin üstten görünüşü gösterilmektedir. Şekil üzerinde süperiletken malzemelerinin konumları ayrıca belirtilmiştir. Şekil 26’da ise sistemin genel görünüşü görülmektedir.



Şekil 25. Süperiletken manyetik yataklı lineer fırlatıcı sistemi hareketli vagon tasarımı.



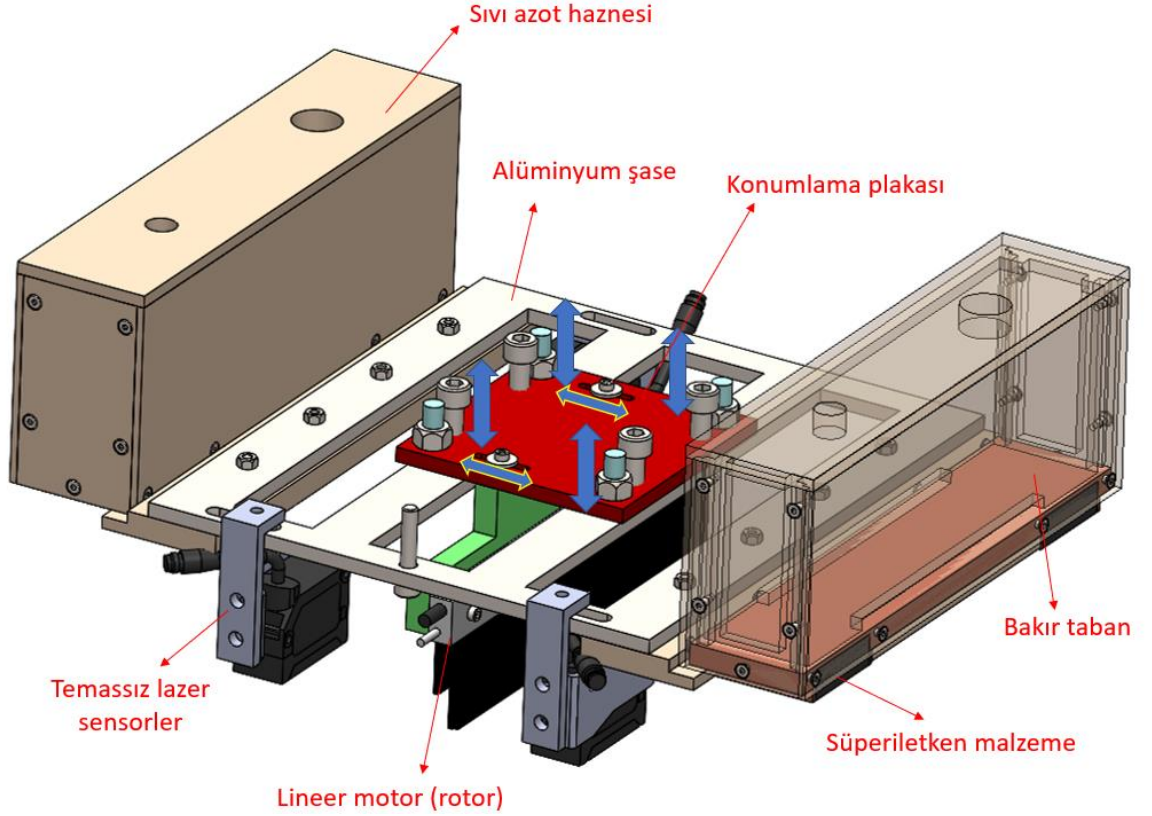
Şekil 26. Süperiletken manyetik yataklı lineer fırlatıcı sistemi genel görünüşü.

Üretim için çeşitli firmalar ile iletişime geçilmiş olup en uygun teklifi Bilecik Osmaniye ilçesinde yer alan bir firma 44.000 TL olarak vermiştir. Projede toplam bütçemiz ise 30.000 TL olduğu için tasarımdaki bazı parçaların üretimi üniversite bölüm imkanları ile gerçekleştirilecektir. Firma ile proje bütçesi üzerinden anlaşma sağlanmış olup ağustos ayı içerisinde üretimin tamamlanması beklenmektedir.

Şekil 26’da verilen ana sistem geometrisinde proje önerisinde belirtildiği gibi belirli bir açıda eğim verilerek levitasyonun eğimli hareket durumu incelenecektir. Sistemin toplam ağırlığı 200 kg civarında olduğu için bu eğimli durumu sağlayabilmek adına şekilde de gözüktüğü gibi sistemin uç tarafına bir adet hidrolik kriko ilave edilmiştir. Dolayısı ile sistem istenilen açıda sabit tutulacaktır.

Şekil 27’de lineer motor (rotor), sıvı azot haznesi ve süperiletken malzemeleri içeren hareketli vagon yapısı gösterilmektedir. Süperiletken malzemeler soğutulup levitasyon sağlandıktan sonra proje için en önemli adım lineer motorun çalıştırılması olacaktır. Levitasyon manyetik alan içerisinde soğutma yöntemi ile gerçekleşecektir. Soğutma sağlandıktan sonra vagonun ağırlığı ile belirli bir statik çökme gerçekleşecektir. Gerçekleşecek bu yer değişimi sistem üzerinde bağlı olan temassız yerdeğiştirme sensörleri ile ölçülecektir. Oluşan bu yer yerdeğiştirme lineer motor rotor ve stator arasındaki boşluğu etkileyecektir. Bu durumu önlemek için lineer motor rotor kısmı hareketli vagona

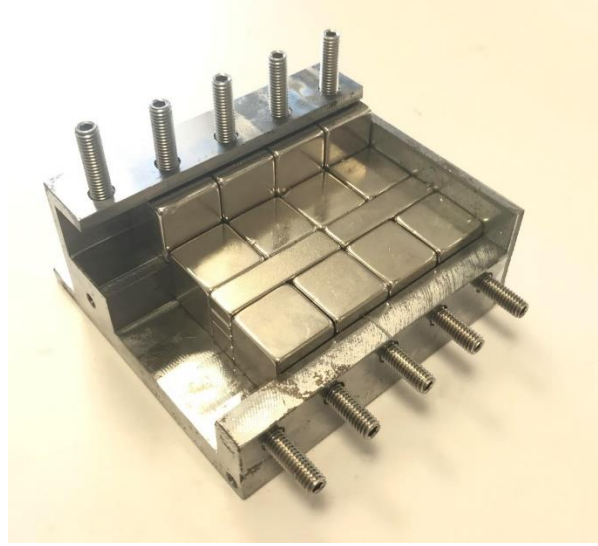
konumlama plakası ile bağlanacaktır. Bu konumlama plakası levitasyon sağlandıktan sonra oluşan yer değiştirmeleri konumlama yapmaya imkân tanıyacak şekilde Şekil 27’de gösterilen mavi renkli oklar doğrultusunda ayar yapmaya yarayacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 27. Detaylı hareketli vagon tasarımı.

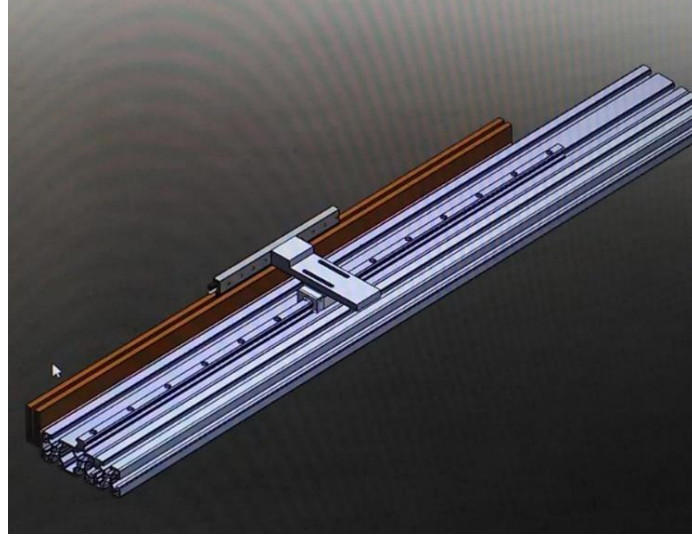
Bir önceki bölümde anlatılan ray tasarımı çalışmaları sonucunda elde edilen sabit mıknatıs konfigürasyonuna sahip rayın kısa bir kesiti rapor döneminde üretilerek bir ön çalışma gerçekleştirilmiştir. Şekil 28’de 100 mm uzunluğa sahip bir kısmı görülen ray ve tasarım-2’ye göre dizilmiş sabit mıknatısların yer aldığı manyetik ray gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi her bir sabit mıknatıs sırası 1 adet vida ile sıkıştırılarak sabitlenmiştir. Burada kullanılan sabitleme civataları asıl tasarımda daha kısa ve ray ile uyumlu olarak seçilecektir. Lineer fırlatıcı sistem toplamda 1600mm uzunluğa sahip raylardan oluşacaktır. Dolayısı ile her bir sabit mıknatıs tek tek sıkıştırma yerine 2li gruplar halinde sıkıştırma laması yardımı ile sabit mıknatıslar montaj edilecektir. Proje kapsamında hareketli vagonun dört köşesinde yer alan süperiletken malzemeler 40 mm x 40 mm taban alanına sahiptir. Dolayısı ile üretilen

kısa ray üzerinde süperiletken soğutularak karakterizasyon çalışmaları sürdürülecektir. Projenin özgün noktalarından birisi olan çok yüzeyli levitasyon sayesinde süperiletken malzeme ile elde edilebilecek katılık değerinin artması deneysel olarak doğrulanacaktır. Proje önerisinde kuvvet sensörü için bütçe ayrılmamıştır. Bu laboratuvar imkanları ile karşılanacaktır.



Şekil 28. Karakterizasyon için kullanılacak üretimi yapılan mini ray.

Lineer motor rapor dönemi içerisinde temin edilmiştir. Lineer motor kullanımı Türkiye şartlarında yaygın değildir. Lineer motorun temin edildiği firma her ne kadar Omron firmasının yetkili distribütörü olsa da lineer motor hakkında deneyimsizdir. Dolayısı ile Omron Almanya ile görüşmeler sonucunda lineer motorun önce sistem üzerine monte edilmeden ayrı bir şekilde çalıştırılması uygun olacağı kanaatine varılmıştır. Dolayısı ile Şekil 29’de tasarımı verilen lineer motor mıknatıs yuvalarından sadece bir tanesini kapsayacak şekilde bir test düzeneği kurulmuştur. Asıl tasarımda üç adet motor mıknatıs yuvası vardır.



Şekil 29. Lineer motor test düzeneği tasarımı.

Şekil 30'te üretimi yapılan lineer motor test düzeneği gösterilmektedir. Bu düzenek sayesinde lineer motor konusuna daha hakim olunması ve projenin kritik noktalarından biri olan demirsiz ve fırçasız lineer motor ana sisteme montajı ve devreye alınması yolunda bilgi birikimi elde edilmiştir. Şekil 31'te ise hem lineer motor test düzeneğinde kullanılan hem de projedeki süperiletken manyetik yataklı lineer fırlatıcı sistemi için tasarlanmış olan motor kontrol paneli gösterilmektedir. Bu kontrol paneli lineer motor asıl sisteme bağlandıktan sonra aynı şekilde kullanılarak operasyon işlemleri gerçekleştirilecektir.



(a)

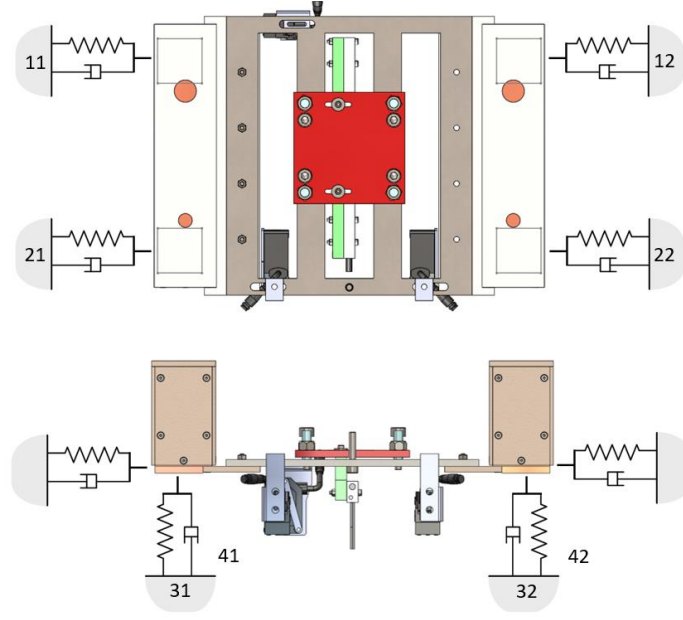


(b)

Şekil 30. (a) Lineer motor (b) Lineer motor kontrol paneli.

e) Matematiksel modelleme:

Rapor döneminde son olarak sistem dinamik modelleme çalışmalarına yer verilmiştir. Modellemede esas alınan yapı Şekil 24’te gösterilmektedir. Beş serbestlik dereceli olarak kurgulanan sisteme ait enerji denklemleri denklem 1-3 arasında verilmiştir. Lagrange yöntemi uygulanarak elde edilen hareket denklemleri ise denklem 4-8 arasında verilmiştir. Deneysel veriler elde edildikten sonra kurulan matematiksel model simulink modeline aktarılıp gerçekçi simülasyon modeli kurulacaktır.



Şekil 31. Modellemeye esas alınan yapı.

Sistemin potansiyel enerji denklemi:

$$\begin{aligned}
 U = & \frac{1}{2}k_{11}(x - L_y \sin\theta_z)^2 + \frac{1}{2}k_{12}(x - L_y \sin\theta_z)^2 \\
 & + \frac{1}{2}k_{21}(x + L_y \sin\theta_z)^2 + \frac{1}{2}k_{22}(x + L_y \sin\theta_z)^2 \\
 & + \frac{1}{2}k_{31}(z + L_x \sin\theta_y - L_y \sin\theta_x)^2 \\
 & + \frac{1}{2}k_{32}(z - L_x \sin\theta_y - L_y \sin\theta_x)^2 \\
 & + \frac{1}{2}k_{41}(z + L_x \sin\theta_y + L_y \sin\theta_x)^2 \\
 & + \frac{1}{2}k_{42}(z - L_x \sin\theta_y + L_y \sin\theta_x)^2
 \end{aligned} \tag{1}$$

Sistemin kinetik enerji denklemi:

$$T = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m\dot{z}^2 + \frac{1}{2}I_x\dot{\theta}_x^2 + \frac{1}{2}I_y\dot{\theta}_y^2 + \frac{1}{2}I_z\dot{\theta}_z^2 \tag{2}$$

Sistemdeki sönümün denklemi:

$$\begin{aligned}
D = & \frac{1}{2}c_{11}(\dot{x} - L_y\dot{\theta}_z)^2 + \frac{1}{2}c_{12}(\dot{x} - L_y\dot{\theta}_z)^2 + \frac{1}{2}c_{21}(\dot{x} + L_y\dot{\theta}_z)^2 \\
& + \frac{1}{2}c_{22}(\dot{x} + L_y\dot{\theta}_z)^2 + \frac{1}{2}c_{31}(\dot{z} + L_x\dot{\theta}_y - L_y\dot{\theta}_x)^2 \\
& + \frac{1}{2}c_{32}(\dot{z} - L_x\dot{\theta}_y - L_y\dot{\theta}_x)^2 + \frac{1}{2}c_{41}(\dot{z} + L_x\dot{\theta}_y + L_y\dot{\theta}_x)^2 \\
& + \frac{1}{2}c_{42}(\dot{z} - L_x\dot{\theta}_y + L_y\dot{\theta}_x)^2
\end{aligned} \tag{3}$$

Lagrange yöntemi ile elde edilen hareket denklemleri:

$$\begin{aligned}
m\ddot{x} + k_{11}(x - L_y\sin\theta_z) + k_{12}(x - L_y\sin\theta_z) + k_{21}(x + L_y\sin\theta_z) \\
+ k_{22}(x + L_y\sin\theta_z) + c_{11}(\dot{x} - L_y\dot{\theta}_z) + c_{12}(\dot{x} - L_y\dot{\theta}_z) \\
+ c_{21}(\dot{x} + L_y\dot{\theta}_z) + c_{22}(\dot{x} + L_y\dot{\theta}_z) = 0
\end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
m\ddot{z} + k_{31}(z + L_x\sin\theta_y - L_y\sin\theta_x) + k_{32}(z - L_x\sin\theta_y - L_y\sin\theta_x) \\
+ k_{41}(z + L_x\sin\theta_y + L_y\sin\theta_x) \\
+ k_{42}(z - L_x\sin\theta_y + L_y\sin\theta_x) \\
+ c_{31}(\dot{z} + L_x\dot{\theta}_y - L_y\dot{\theta}_x) + c_{32}(\dot{z} - L_x\dot{\theta}_y - L_y\dot{\theta}_x) \\
+ c_{41}(\dot{z} + L_x\dot{\theta}_y + L_y\dot{\theta}_x) + c_{42}(\dot{z} - L_x\dot{\theta}_y + L_y\dot{\theta}_x) = mg
\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
I_x\ddot{\theta}_x - L_yk_{31}(z + L_x\sin\theta_y - L_y\sin\theta_x)\cos\theta_x \\
- L_yk_{32}(z - L_x\sin\theta_y - L_y\sin\theta_x)\cos\theta_x \\
+ L_yk_{41}(z + L_x\sin\theta_y + L_y\sin\theta_x)\cos\theta_x \\
+ L_yk_{42}(z - L_x\sin\theta_y + L_y\sin\theta_x)\cos\theta_x - L_yc_{31}(\dot{z} + L_x\dot{\theta}_y \\
- L_y\dot{\theta}_x) \\
- L_yc_{32}(\dot{z} - L_x\dot{\theta}_y - L_y\dot{\theta}_x) + L_yc_{41}(\dot{z} + L_x\dot{\theta}_y \\
+ L_y\dot{\theta}_x) + L_yc_{42}(\dot{z} - L_x\dot{\theta}_y + L_y\dot{\theta}_x) = 0
\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
& I_y \ddot{\theta}_y + L_x k_{31} (z + L_x \sin \theta_y - L_y \sin \theta_x) \cos \theta_y \\
& \quad - L_x k_{32} (z - L_x \sin \theta_y - L_y \sin \theta_x) \cos \theta_y \\
& \quad + L_x k_{41} (z + L_x \sin \theta_y + L_y \sin \theta_x) \cos \theta_y \\
& \quad - L_x k_{42} (z - L_x \sin \theta_y + L_y \sin \theta_x) \cos \theta_y \\
& \quad + L_x c_{31} (\dot{z} + L_x \dot{\theta}_y - L_y \dot{\theta}_x) - L_x c_{32} (\dot{z} - L_x \dot{\theta}_y - L_y \dot{\theta}_x) \\
& \quad + L_x c_{41} (\dot{z} + L_x \dot{\theta}_y + L_y \dot{\theta}_x) - L_x c_{42} (\dot{z} - L_x \dot{\theta}_y + L_y \dot{\theta}_x) \\
& = 0
\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
& I_z \ddot{\theta}_z - L_y k_{11} (x - L_y \sin \theta_z) \cos \theta_z - L_y k_{12} (x - L_y \sin \theta_z) \cos \theta_z \\
& \quad + L_y k_{21} (x + L_y \sin \theta_z) \cos \theta_z + L_y k_{22} (x + L_y \sin \theta_z) \cos \theta_z \\
& \quad - L_y c_{11} (\dot{x} - L_y \dot{\theta}_z) - L_y c_{12} (\dot{x} - L_y \dot{\theta}_z) \\
& \quad + L_y c_{21} (\dot{x} + L_y \dot{\theta}_z) + L_y c_{22} (\dot{x} + L_y \dot{\theta}_z) = 0
\end{aligned} \tag{8}$$

DESTEKLEYEN DİĞER KURULUŞLARLA SÜRDÜRÜLEN İŞBİRLİĞİ

Bu proje Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel araştırma projelerinden Tamamlayıcı Destek Projeleri kapsamında yürütücünün sürdürmekte olduğu **119M131** numaralı Süperiletken Manyetik Yataklı Doğrusal Fırlatıcı Tasarımı ve Deneysel Uygulaması adlı **TÜBİTAK 3501** projesine tamamlayıcı destek sağlaması için hazırlanmıştır. Bilindiği üzere TÜBİTAK gibi dış kaynaklı kurumlardan proje çıkartmak her geçen gün daha da zorlaşmakta ve çıkan projeler de ciddi bir bütçe kısıtlamasına gidilmektedir. Başvurduğum projede de TÜBİTAK 50000 TL daha fazla bir miktarda bütçede kısıtlamaya gitmiştir. Projenin sağlıklı bir şekilde yürütülebilmesi için arada kalan kısımlar Tamamlayıcı Destek Projeleri Kapsamında Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi bilimsel araştırma projesi ile bir nebze telafi edilmiştir.

BİLİMSEL ETKİNLİKLER

Elde edilen bulgular yüksek yüksek lisans öğrencisinin deneyleri tekrar etmesi halinde yüksek lisans tez içeriğine dahil olacak ve bir sci makalesinde sunulacaktır.

MALİ ETKİNLİKLER

Projenin önerilen 29,957.84 TL bütçesine olmasına karşın onaylanan 20,970.00 TL bütçesi bulunmaktadır. Dolayısı ile satın alma işleri yürütülürken muadil ürün ve satıcı firma ile pazarlık yoluna gidilerek projede teklif edilen tüm altyapı cihazları temin edilmiştir. Tüm satın alımlar tamamlanmış olup proje içindeki mali etkinlikler sona ermiştir. Proje kapsamında satın alınan ekipmanalar hakkında aşağıda çeşitli teknik detaylar verilmiştir.



Şekil 32. RMS Multimetre Ölçü Aleti

Projede yer alan linear motor ve sensörlerin besleme gerilim ölçümleri için multimetre kullanılacaktır. Ayrıca gerekli elektriksel bağlantıların kontrolü için gereklidir.



Şekil 33. Gaussmetre PCE-MFM 3500

Milli-Gaussmetre, mevcut manyetik alanı ölçmek için güvenilir bir ölçüm cihazıdır. Bu Milli-Gaussmetre, hem statik hem de alternatif manyetik alanların ölçülmesi için uygundur. Milli-Gaussmetrede ki harici probun düz probu operatörün çok küçük açıklıklarda bile ölçüm yapmasını sağlamaktadır. Milli-Gaussmetrede 30.000 G'ye kadar olan ölçüm aralığı, çok çeşitli ölçüm işlemlerini kapsamaktadır. Manyetik alanın ölçülmesinin yanı sıra, Milli-Gaussmetre aynı zamanda sıcaklığı da ölçmektedir. Milli-Gaussmetre ayrıca ayarlanabilir bir alarm fonksiyonuna sahiptir. Milli-Gaussmetrede bu ayarlanabilir alarm fonksiyonu ile, ölçülen bir değer aşıldığında operatör derhal uyarılmaktadır.



Şekil 34. Lutron LCR-9184 LCR Metre

Projede kullanılan lineer motor ve güç elektroniği ekipmanlarının direnç ve kapasite ölçümleri için gereklidir.



Şekil 35. Unit UTG 1010A Keyfi Dalga Biçimi Üretici ve AATech ADS-3102B - Dijital Osiloskop(100MHz, 2 Kanal)

Projede yer alan lineer motor ve sensörlerin kalibrasyonu ve operasyonu sırasında kullanılacaktır. Ayrıca lineer motorun operasyonu sırasındaki bobinler arasındaki faz farkları kontrolü için gereklidir. Sinyal üretici ise Rampa ve Step inputlar da sistemin davranışının gözlenebilmesi için sinyal üretilecektir.



Şekil 36. Lutron FG-5020 - İtme ve Çekme Kuvvet Ölçer

Levitasyon sırasında süperiletken malzemelerin ne kadar katılık değeri verdiğini tespit edebilmek için gereklidir.



Şekil 37. AATech ADC-3050DD - Yüksek Hassasiyetli Ayarlanabilir DC Güç Kaynağı

Projede yer alan sensörlerin beslenmesinde ve diğer ekipmanların güç ihtiyacını karşılamada gereklidir.



Şekil 38. PCE-LCT 2 Akım ölçüm penci

Elektriksel bağlantılarda ve kablolarda çekilen akımların ölçümleri için gereklidir.



Şekil 39. ZD-917, Vakumlu Havya İstasyonu

Projede kullanılan kablo ve elektriksel bağlantıların yapılabilmesi için gereklidir. Lineer motor sistemin entegrasyonu sırasında çok fazla kablo ve lehim ihtiyacı olacaktır.

Proje Sonucunda Elde Edilen Kazanımlar

Proje sonucunda laboratuvar imkanlarına katkı sağlayacak şekilde çeşitli ekipmanlar sağlanmıştır. Elde edilen kazanımlar asıl devam etmekte olan 3501 kariyer Tübitak projesini bir nebze rahatlatmış ve orda uygulanan bütçe kısıtlamaları telafi etmiştir. Proje kapsamında alınan tüm ürünler başka projelere kapı açacak ve bir çok sistemde kullanılabilecek yapıya sahiptir.

SONUÇ

Sonuç olarak Süper İletken Manyetik Yataklı Doğrusal Fırlatıcı Tasarımı ve Deneysel Uygulaması isimli Tübitak projesi, takvimine uygun olarak ilerlemektedir. Pandemi sebebi ile satın alma ve firmalar ile görüşmeler ciddi sıkıntıya uğrasa yaşanan gecikmelerin telafi edileceği öngörülmemektedir. Ayrıca döviz kurundaki artış bir alt model seçme ya da firmalar ile pazarlık yapma gibi çözümler ile aşılmıştır. Ayrıca projede bir yüksek lisans öğrencisi için tez konusu olması planlanmış ve deneysel çalışmaların bir kısmının yüksek lisans öğrencisi tarafından yürütülmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda yüksek lisans öğrencisi tezini şekillendirmeye başlamış ve asıl proje bitmeden önce savunmaya girmesi düşünülmektedir.

REFERANSLAR

- [1] Werfel, F., Floegel-Delor, U., Rothfeld, R., Riedel, T., Wippich, D., Schirrmeister, P., & Koenig, R. (2014). "HTS bulk magnetic application in flywheel energy storage systems FESS and MAGLEV transportation". In Proc. of the 22nd Int. Conf. on Magn. Lev. Sys. and Linear Drives (pp. D2PM-4a).
- [2] Sotelo, G. G., Dias, D. H. N., de Andrade, R., & Stephan, R. M. (2011). "Tests on a superconductor linear magnetic bearing of a full-scale maglev vehicle". IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 21(3), 1464-1468.
- [3] Strasik, M., Hull, J. R., Mittleider, J. A., Gonder, J. F., Johnson, P. E., McCrary, K. E., & McIver, C. R. (2010). "An overview of Boeing flywheel energy storage systems with high-temperature superconducting bearings". Superconductor Science and Technology, 23(3), 034021.

- [4] Koshizuka, N. (2006). "R&D of superconducting bearing technologies for flywheel energy storage systems". *Physica C: Superconductivity and its applications*, 445, 1103-1108.
- [5] Werfel, F. N., Floegel-Delor, U., Rothfeld, R., Riedel, T., Goebel, B., Wippich, D., & Schirrmeister, P. (2011). "Superconductor bearings, flywheels and transportation". *Superconductor Science and Technology*, 25(1), 014007.
- [6] Floegel-Delor, U., Schirrmeister, P., Riedel, T., Koenig, R., Kantarbar, V., & Werfel, F. N. (2018). Bulk Superconductor Levitation Devices: Advances in and Prospects for Development. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28(4), 1-5.
- [7] Novaković, Z., & Medar, N. (2013). Analysis of a UAV bungee cord launching device. *Sci. Tech. Rev*, 63, 41-47.
- [8] Fahlstrom, P., & Gleason, T. (2012). *Introduction to UAV systems*. John Wiley & Sons.
- [9] Doyle, M. R., Samuel, D. J., Conway, T., & Klimowski, R. R. (1995). Electromagnetic aircraft launch system-EMALS. *IEEE Transactions on Magnetics*, 31(1), 528-533.
- [10] Kondratiuk, M., & Ambroziak, L. (2016). Concept of the magnetic launcher for medium class unmanned aerial vehicles designed on the basis of numerical calculations. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 54(1), 163-177.
- [11] Reck, B. (2003). First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range. *IEEE transactions on magnetics*, 39(1), 310-313.

- [12] Yang, W., Liu, Y., Wen, Z., Chen, X., & Duan, Y. (2008). Dynamic force properties of a high temperature superconducting Maglev test vehicle. *IEEE transactions on applied superconductivity*, 18(2), 799-802.
- [13] Liang, S., Fang, Y., & Huang, X. (2016). Simulation of an electromagnetic launcher with a superconducting inductive pulsed power supply. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26(4), 1-5.
- [14] Basaran, S., & Sivrioglu, S. (2017). Radial stiffness improvement of a flywheel system using multi-surface superconducting levitation. *Superconductor Science and Technology*, 30(3), 035008.
- [15] Sivrioglu, S., Basaran, S., & Yildiz, A. S. (2016). Multisurface HTS-PM Levitation for a Flywheel System. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26(8), 1-6.
- [16] Zhang, J., Zeng, Y., Cheng, J., & Tang, X. (2008). Optimization of permanent magnet guideway for HTS maglev vehicle with numerical methods. *IEEE transactions on applied superconductivity*, 18(3), 1681-1686.
- [17] Sass, F., Sotelo, G. G., de Andrade Junior, R., & Sirois, F. (2015). H-formulation for simulating levitation forces acting on HTS bulks and stacks of 2G coated conductors. *Superconductor Science and Technology*, 28(12), 125012.
- [18] Quéval, L., Liu, K., Yang, W., Zermeño, V. M., & Ma, G. (2018). Superconducting magnetic bearings simulation using an H-formulation finite element model. *Superconductor Science and Technology*, 31(8), 084001.