



Uzay İçin Hareket Sistemleri Geliştirmek: Güvenilirlik, Ölçeklenebilirlik ve Görev Başarısına Yönelik Bilgiler

Uzay ekonomisi köklü bir dönüşüm geçiriyor. Alçak dünya yörüngesinin (LEO) hızla ticarileşmesinden Ay'ı, Mars'ı ve ötesini hedefleyen iddialı uzay görevlerine kadar inovasyon hızı hiç bu kadar yüksek olmamıştı.

Mühendislik ekiplerinden artık, akla gelebilecek en zorlu ortamlarda bile yıllarca çalışabilecek sistemler tasarlaması beklenirken, aynı zamanda hızlı bir şekilde prototip oluşturmaları, hızla güncellemeler yapmaları ve üretimlerini verimli bir şekilde ölçeklendirmeleri bekleniyor.

Sistem kinematiklerini biliyor ve hatta tork ile hız gereksinimlerini modellemiş olsanız bile, zorluk yalnızca uzaya uygun tasarım yapmakla sınırlı değildir. Bu durum, karada alınan kararların 240 mil yukarıda ve hatta ötesinde, yani bir gezegenin yüzeyinde herhangi bir soruna yol açıp açmayacağını bilmek anlamına gelir. Uzayda konvektif soğutma yoktur. Standart yalıtım sistemleri radyasyona maruz kaldığında bozulur. Laboratuvarlarda kusursuz performans gösteren malzemeler, vakum ortamında hassas optik cihazları kontamine edebilir.

Bu teknik doküman, karasal bir prototipi uzayda görev yapabilecek bir sistemden ayıran önemli kararları ve bu kararların etkili olabilmesi için nasıl erkenden uygulamaya konulması gerektiği ele almaktadır.



Uzay uygulamalarının temel alanları

Uzay, tek tip bir ortam değildir. Farklı görevler, hareket sistemlerini vakum, radyasyon, termal döngü, kontaminasyon riski ve çalışma ömrü gibi son derece farklı kombinasyonlara maruz bırakır. Evrensel bir “uzay motoru” tasarlamak genellikle teknik açıdan verimsiz, ekonomik açıdan da pratik değildir.

Kollmorgen, uzay uygulamalarını temel stres faktörlerine dayanarak altı farklı alana ayırır. Bu sınıflandırma, hareket tasarımını görev gerçekliğiyle uyumlu hâle getirmeye yardımcı olarak hem felaketle sonuçlanabilecek yetersiz tasarımı hem de maliyetli aşırı mühendisliği önler.

Ek 1: Uzay Hareket Kontrolünün Altı Alanı

Alan	Temel stres faktörleri	Tasarım etkileri	Uzay formülü yoğunluğu
Yer İstasyonları	Standart atmosfer, hava koşulları, 7/24 çalışma döngüsü	Piyasadan hazır temin edilebilen (COTS) endüstriyel sınıf bileşenler yeterlidir. Odak noktası; olağanüstü çalışma süresi, hassas izleme ve çevresel sızdırmazlık olmaya devam ediyor.	Düşük; standart veya az modifiye edilmiş ticari ürün
Karasal Prototip Oluşturma	Yer çekimi yüklemesi; zorlu çevresel koşullar yok	Standart gövdesiz servo motorlar kullanarak tork/ hız profillerini ve mekanik ayak izini doğrulayın. Uzaya uzanan ölçeklenebilir mimari yolunu koruyun.	Yok; buradaki mimari tercihler yükseltme kolaylığını belirler
Alçak Dünya Yörüngesi (LEO)	Sert vakum, hızlı termal döngü (-150 °C ila +120 °C), atomik oksijen erozyonu, orta düzeyde radyasyon	Vakum ortamında gaz salınımı uygunluğu gerekli. Atomik oksijen kaplamaları. Formül yoğunluğu, görev ömrüne göre değişir.	Düşük ile orta; görev ömrü (3-15 yıl), ne kadar uzay formülüne ihtiyaç duyulduğunu belirler.
Derin Uzay	Ekstrem kriyojenik soğuk, yoğun kozmik ışınlar, çok yıllık görevler (30+ yıl)	Tam vakum uyumluluğu, kriyojenik yağlama (MoS ₂), radyasyona dayanıklı tescilli kaplama. Termal performans için boyutlandırılmış motor.	Yüksek; maksimum uzay formülü
Uzay Habitatı	Nefes alınabilir ortam, ılıman sıcaklık, insanlara yakınlık, 30+ yıl ömür	Gaz salınımı, atmosferik bütünlük için kritiktir. Genellikle modifiye edilmiş ticari sınıf motorlarla elde edilebilir (tam uzay formülü gerekli olmayabilir).	Orta; uygulamaya özel modifikasyonlar
Dünya Dışı Yüzeyler	Aşındırıcı regolit, değişken yer çekimi, devasa günlük sıcaklık değişimleri, ekstrem radyasyon	Mekanik sızdırmazlık, toz kontrolü, ekstrem ısılara dayanıklılık. En yüksek standart: Sıfır bakım gereksinimiyle mutlak güvenilirlik için tasarlanmıştır.	En yüksek; tamamen özelleştirilebilir uzay formülü görevi

Tablo (Ek 1) ayrıca maliyet riskini de tanımlamaktadır. Örneğin, karasal prototipleme için kullanılan ticari bir motor, tamamen özelleştirilmiş, uzayda kullanıma hazır kriyojenik bir tasarımın maliyetinin çok küçük bir kısmına mal olabilir. Mühendislik ekibinin tasarım sürecinin başlarında alabileceği en etkili kararlardan biri, formülü göreve uygun şekilde boyutlandırmaktır.

Uzayda kullanıma uygun mu, uzayda kullanıma hazır mı?

Uzayda kullanıma uygun motorlar mevcuttur. Bu motorlar sertifikalandırılmış, belgelendirilmiş ve belirli çevresel koşullara dayanacak şekilde üretilmiştir. Ancak “uzayda kullanıma uygun” ifadesi bir motorun uzayda çalışabileceğini gösterse de, belirli bir uzay uygulaması için optimize edildiği anlamına gelmez.

Dört yıl boyunca görev yapacak bir LEO uydusu için tasarlanmış bir motorun gereksinimleri, Ay'ın karanlık tarafında çalışan bir Ay yüzeyi aracı için üretilen bir motordan temelde farklıdır. NASA'nın Artemis programında bile, çalışma koşulları görevin konumuna (aydınlık veya karanlık taraf) ve termal maruziyete bağlı olarak önemli ölçüde değişebilir. Dünya dışı yüzey görevinde LEO standartlarına uygun

bir motorun kullanılması, erken arızaya yol açabilirken kısa süreli bir LEO görevini derin uzay özellikleriyle aşırı tasarlamak, tek seferlik mühendislik (NRE) masraflarını ve diğer maliyetleri artırabilir.

Kollmorgen'ın yaklaşımı; Gemini, beşinci nesil Mars gezgini ve aradaki programlar boyunca 60 yılı aşkın bir geçmişe sahip, kanıtlanmış mekanik ve elektromanyetik bir temele dayanan, uzayda kullanılabilir bir mimariyle başlıyor. Bu temelden yola çıkarak, belirli bir alana, görev ömrüne, radyasyon ortamına ve termal döngü aralığına uyarlanmış bir uzay formülünü birlikte geliştiriyoruz. Sonuç olarak, karasal prototipten yörünge içine veya yörüngeye yerleştirme aşamasına kadar net ve doğrulanmış bir yol haritasına sahip, göreve uygun olarak tasarlanmış bir hareket sistemi ortaya çıkmıştır.

Kritik tasarım hususları

Alan belirlendikten sonra, mühendisler uzay ortamının fiziği ve malzeme bilimiyle başa çıkmak zorundadır. Karasal motor tasarımları konvektif soğutmaya, standart neodimyum mıknatıslara ve polimer bazlı yalıtımlara dayanır. Bu üç varsayım da uzayda geçerliliğini yitirir.

Gaz salınımı ve vakum ortamları

Uzayın yüksek vakumunda (ör. 10^{-7} Torr), birçok standart üretim malzemesi süblimleşir veya gaz salınımı gerçekleştirir. Bu gaz salınımı, hassas optik lensler, güneş panelleri ve sensörler üzerinde yoğunlaşarak görev yeteneklerini ciddi ölçüde azaltabilir.

- **Gaz salınımı standardı:** NASA-STD-6016A, kabul edilebilir gaz çıkışı sınırlarını belirler. Mühendisler iki temel ölçüte bakmalıdır: Toplam Kütle Kaybı (TML) %1,0'ın altında olmalıdır (hassas optikler için genellikle %0,5'in altına düşürülür) ve Toplanan Uçucu Yoğunlaşabilir Malzemeler (CVCN) %0,1'in altında olmalıdır.
- **Malzeme riski:** Standart polyester bazlı malzemeler, Mylar film, vinil, naylon, silikon kauçuk ve standart motor sargısı vernikleri vakumda kötü performans gösterir. Bu malzemelerdeki çapraz bağlı polimerler bozularak yalıtımın fiziksel bütünlüğünün bozulmasına neden olur.

Çözüm, özel olarak geliştirilmiş bir uzay formülünün parçası olarak uygulanan, tescilli kaplama süreçleri ve radyasyona dayanıklı malzemelerden oluşmaktadır. Birçok durumda, gerçek Malzeme Listesine (BOM) dayalı analitik testler, aylar süren fiziksel vakum testlerine gerek kalmadan TML ve CVCN'yi tahmin edebilir; bu da geliştirme sürelerini doğrudan hızlandırır.



Çoğu zaman gözden kaçan bir gaz salınımı riski, bazı motor standartları karşılıyor olsa bile sistemdeki diğer bileşenlerin bu standarda uymayabileceğidir. Kollmorgen, tedarik etmediğimiz bileşenler için ikincil kaplama ve termal fırınlama prosedürleri de dahil olmak üzere sistem düzeyindeki gaz salınımı riskini değerlendirmek için müşterileriyle birlikte çalışır.

Radyasyona dayanıklılık

Gama ve nötron radyasyonu uzay araçlarını sürekli olarak bombardımana tutar. Zamanla bu iyonlaştırıcı radyasyon, standart elektrik yalıtımını ve yapıştırıcıları tahrip eder.

- Motor kaplamasında tescilli, radyasyona dayanıklı e-cap malzemeler kullanılmalıdır.
- Standart neodimyum (Neo) mıknatıslar bazı görevler için uygun olsa da, diğerleri uzun vadeli çevresel kararlılık ve performans korunumu için optimize edilmiş alternatif malzemeler gerektirebilir.
- Malzeme seçimleri ilave tedarik ve teslim süresi gereksinimleri doğrular ancak tasarım sürecinin erken aşamalarında bir hareket kontrolü çözüm ortağıyla çalışmak, form faktörü kesinleşmeden önce farklı seçeneklerin avantaj ve dezavantajlarının değerlendirilmesine yardımcı olabilir.

Termal dinamikler ve kriyojenik

Termal yönetim, uzay hareket sistemleri tasarımında en çok hafife alınan zorluktur. Konvektif soğutmanın tamamen ortadan kalktığı ortamda, motor tarafından üretilen tüm ısıнын (bakır kayıpları, demir kayıpları) ve dış kaynaklı güneş radyasyonunun sadece iletim ve ışıınım yoluyla yönetilmesi gerekir.

- **Isı uzaklaştırma:** Uzay araçları, iletilen ısıyı motordan derin uzay radyatör dizilerine taşımak için genellikle sıvı soğutma devreleri kullanır. Yalıtım arızalarını önlemek amacıyla motorlar, gerçek termal performansları dikkate alınarak son derece hassas bir şekilde boyutlandırılmalıdır.
- **Kriyojenik değişim:** Geçmişte, malzeme bilimi -145°C 'nin altındaki sıcaklıklarda güvenilir çalışmayı garanti edemediğinden, alt sistemler bu sıcaklığın üzerinde kalacak şekilde yapay olarak ısıtılırdı. Ancak yeni nesil dünya dışı görevlerde (örneğin Ay'ın karanlık yüzünü araştıran görevlerde), ortam sıcaklıklarının -185°C ile -220°C arasında olması hedeflenmektedir.
- **Termal yorgunluk:** Sıcaklığın dinamik aralığı, mutlak soğuk kadar yıkıcıdır. Kriyojenik soğuktan güneş ışıınlarıyla oluşan yüksek sıcaklıklara tekrar tekrar geçiş, alüminyum muhafazalar, çelik laminasyonlar ve bakır sargılar üzerinde aşırı termal yorulmaya neden olur. Yalıtım sistemleri, bu şiddetli genleşme ve büzülme döngülerine çatlamadan dayanabilecek şekilde yüksek derecede özelleştirilmiş olmalıdır.

Şok, titreşim ve boyut/ağırlık optimizasyonu

Uzay hareket sistemleri, yoğun fırlatma kuvvetlerine ve uzun süreli çalışmaya dayanırken genel yük kütlelerini en aza indirmelidir. Bunu başarmak için mühendislerin yapısal dayanıklılık, performans ve üretilebilirlik arasında stratejik bir denge kurması gerekir.

- **Fırlatma dayanımı:** Fırlatma sırasında oluşan şok ve titreşim yükleri, uzay aracı yörüngeye ulaşmadan önce bile sargı bütünlüğünü, mıknatısların sabitlenmesini ve mekanik hizalamayı etkileyebilir.
- **Ağırlık azaltma:** Yüke eklenen her gram, fırlatma maliyetlerini ve yakıt gereksinimlerini artırır. Bu nedenle kompakt ve hafif aktüatör tasarımları kritik önem taşır.
- **Tork yoğunluğu dengeleri:** Boyut ve ağırlığın azaltılması, performans veya güvenilirlikten ödün verilmesi anlamına gelmemelidir. Hareket sistemleri, görev gereksinimlerini karşılamak için gerekli torku, sertliği ve termal performansı sağlamaya devam etmelidir.



Neden gövdesiz motorları tercih etmelisiniz?

Uzay uygulamalarında, ortadan kaldırılabilir her bileşen ortadan kaldırılmalıdır. Gövdesiz motorlar gereksiz muhafazaları, milleri ve kaplinleri ortadan kaldırırken mühendislerin motoru doğrudan aktüatör tasarımına entegre etmesine olanak tanıyarak hareket mimarilerini basitleştirir.

Gövdeli servo motorların aksine, gövdesiz motorlar sadece stator ve rotordan oluşur. Bu, mühendislere görevin özel termal, mekanik ve çevresel taleplerine göre çevre yapıyı optimize etme konusunda daha fazla esneklik sağlar.

Gövdesiz doğrudan tahrik mimarilerinin bazı önemli avantajları şunlardır:

- Gereksiz mekanik bileşenleri ortadan kaldırarak ve kompakt aktüatör entegrasyonunu sağlayarak boyut ve ağırlığın azaltılması
- Aktüatör gövdesinin iletken ısı yolunun bir parçası haline gelmesine olanak tanıyarak termal yönetimin iyileştirilmesi

- Uygulamaya özel sızdırmazlık, malzeme seçimi ve kontaminasyonu azaltma stratejileri yoluyla daha fazla çevresel uyum
- Hareket sistemindeki boşluğu ve esnekliği azaltarak daha yüksek hassasiyet ve uyumluluk
- Karasal prototiplemeden görev kabiliyetine sahip tasarımlara kadar sürekliliği destekleyen ölçeklenebilir geliştirme yolları

Kollmorgen, farklı uzay uygulaması önceliklerini destekleyen birden fazla gövdesiz motor modeli sunmaktadır. TBM ve KBM motorlar genellikle kompakt robotik eklemlerde, gimballarda ve hassas konumlandırma sistemlerinde kullanılırken TBM2G motorlar, termal olarak kısıtlanmış tasarımlarda iyileştirilmiş termal performans için optimize edilmiştir. RBE motorlar, uzun vadeli güvenilirlik gerektiren yüksek torklu, düşük hızlı uygulamalar için boyut aralığı ve kanıtlanmış bir geçmiş sunmaktadır.



Uzaya ulaşma süresini hızlandırma

Uzay pazarına giren mühendislik ekipleri için en önemli içgörü, karada doğruladığınız mekanik muhafazanın uzaya gidenle aynı olması gerektiğidir. Bu, ilk günden itibaren doğru motor mimarisini gerektirir.

1. Karasal ortamda başlayın, mimari açıdan düşünün

En verimli yaklaşım; özelleştirilmiş uzay donanımı maliyetinin çok daha düşük bir kısmına mal olacak şekilde fiziksel prototipler oluşturmak, tork ve hız profillerini belirlemek ve yapısal ayak izini birkaç hafta içinde tamamlamak için standart ticari sınıf gövdesiz motorlarla (Kollmorgen TBM veya KBM serisi gibi) başlamaktır. Önemli olan, yerleşik bir yükseltme yeteneğine sahip bir motor ailesi seçmektir.



Genel prototip teslim süreleri, standart gövdesiz motorlar (50 mm-115 mm) için 2-3 haftayken daha büyük, özelleştirilmiş yer tabanlı sistemler için 12-20 haftadır.

2. “Uzay formülünü” birlikte tasarlayın

Form faktörü ve elektromanyetik performans karasal ortamda doğrulandıktan sonra, hareket kontrol uzmanları doğru “uzay formülünü” uygulamak üzere OEM mühendislik ekipleriyle birlikte çalışır. Bu süreç, temel motor mimarisini ve mekanik ayak izini korurken belirli miknatıs tiplerine, radyasyona dayanıklı yalıtım sistemlerine ve düşük gaz salınımına sahip kaplama çözümlerine geçiş yapılmasını içerebilir. Mühendislik ekipleri, aktüatör geometrisini ve entegrasyon noktalarını koruyarak yeniden tasarım için harcanan eforu azaltabilir ve karasal prototiplemeden görev kabiliyetli sistemlere geçişi hızlandırabilir.

3. Sistem düzeyinde azaltma

Platformu kendileri inşa etmeseler bile, uzman hareket ortakları sistem düzeyinde azaltma stratejileri sağlayabilirler. Örneğin, Kollmorgen'da, aktüatör muhafazası içindeki ikincil kaplama teknikleri konusunda veya sistem fırlatma aracına yüklenmeden önce Dünya'da gaz salımını zorlamak için belirli termal “fırınlama” prosedürleri oluşturma konusunda tavsiyelerde bulunuyoruz. Mühendisler arası iş birliği modelinin gerçek değeri de burada ortaya çıkar. Amaç, ekiplerin tasarım kararlarını görev açısından kritik sorunlar haline gelmeden önce riskten arındırmalarına yardımcı olmaktır.

Günümüzdeki uzay pazarı için tasarlanmış bir ortak mühendislik modeli

Uzay pazarında iki farklı mühendislik felsefesi ortaya çıkıyor. Görev başarısızlığının maliyetini bilen, uzun yıllara dayanan deneyime sahip ve dikkatli ilerleyen geleneksel OEM mühendisleri. Hızlı hareket eden, agresif biçimde prototipleme yapan ve başarısızlıktan öğrenme yaklaşımını benimseyen ticari şirketler ve startup ekipleri. Kollmorgen, her iki yaklaşımı da desteklemek amacıyla hızlı bir prototipten uzay formülüne geçiş süreci, 60 yılı aşkın ortak mühendislik deneyimi ve belgelenmiş malzeme doğrulama yetkinliği sunmaktadır.



Tasarım gerçekleri ve ödünler

Uzay için hareket sistemi tasarlanırken verilen her karar bir sonraki kararı etkiler. Ekiplerin sıklıkla karşılaştığı bazı zorluklar ve erken planlama ile daha hızlı uygulama için önerilen yaklaşımlar aşağıda verilmiştir.

Zorluk	Önerilen strateji
Hazır bir “uzayda kullanıma uygun” motor arama	Özelleştirilmiş bir uzay formülüyle geliştirilebilecek uzay uyumlu mimarileri tercih edin. Her görevin termal, radyasyon ve vakum gereksinimleri benzersizdir; bu nedenle hareket sistemi, uygulamanın özel gereksinimlerini karşılamalıdır.
Kriyojenik soğuğu hafife alma	Standart malzemelerin, doğrulama yapılmadan -200 °C'ye kadar olan dinamik termal döngüye dayanacağını varsaymayın. Derin kriyojenik soğuk, uzay hareket sistemi tasarımlarında en sık göz ardı edilen arıza nedenidir.
LEO için aşırı özelleştirme	Dört yıllık bir LEO uydusunda derin uzay için gerekli tüm radyasyon ve gaz salınımı standartlarını uygulamak maliyetleri ve NRE'yi önemli ölçüde artırır. Kullanılacak formülü görev süresi ve görev alanına uygun şekilde belirleyin.
Tasarımın geç aşamalarına kadar termal yönetimi göz ardı etme	Uzayda konvektif soğutma olmadığından, ısı uzaklaştırma tasarımı temel girdilerinden biri olmalıdır. Motoru en baştan termal performansa göre boyutlandırın ve sıvı soğutma devresini erken aşamada planlayın.
Yükseltme yeteneği olmayan karasal bir prototip motor seçme	Yerleşik, ölçenebilir yola sahip bir motor ailesi seçin. Karada doğruladığınız mekanik muhafazanın uzaya gidenle aynı olması gerekir.

Görev için tasarlandı

Uzay ekonomisi, onu destekleyen iş gücünden daha hızlı büyüyor. Programlar, on yıllara yayılan geliştirme döngülerinden hızlı yinleme süreçlerine geçiş yapıyor. Maliyet baskısı kendini hissettiriyor. Prototip ile üretim arasındaki süre giderek kısalıyor. Hareket sistemiyle ilgili doğru kararların erken aşamalarda alınması, yeniden tasarım ve tekrar çalışmaları ortadan kaldırarak, NRE'yi azaltarak ve uzaya ulaşma süresini hızlandırarak tüm programa fayda sağlar.

Kollmorgen, 60 yılı aşkın alan uzmanlığını ve kendini kanıtlanmış gövdesiz motor mimarilerini; hareketi üreten, ileten ve kontrol eden sürdürülebilir çözümlerden oluşan kapsamlı bir portföyle bir araya getiriyor. Mühendislik ekibinizin bir uzantısı olarak çalışır, hızlı inovasyonun, hassas termal yönetimin ve yüksek ölçeklenebilirliğe sahip üretimin karmaşıklıklarını yönetmenize yardımcı oluruz. Hata payı olmadığının farkındayız ve görev başarısı için doğru “uzay formülünün” belirlenmesini sağlamaya yardımcı olmak üzere yanınızdayız.

Fırlatmaya hazır mısınız?

İhtiyaçlarınızı ve hedeflerinizi bir Kollmorgen gövdesiz motor uzmanıyla tartışmak için [Kollmorgen ile iletişim kurun](#).

Kollmorgen Hakkında

Bir Regal Rexnord Markası olan Kollmorgen, sektörün en yüksek performanslı, en güvenilir motorları, sürücüleri, AGV kontrol çözümleri ve otomasyon platformlarında kanıtlanmış 100 yılı aşkın hareket deneyimine sahiptir. Eşsiz bir performans, güvenilirlik ve kullanım kolaylığına sahip üstün çözümler sunuyor, makine üreticilerine kesin bir pazar avantajı sunuyoruz.