

HABERLEŞME VE GÖZLEM UYDULARI ÖN TASARIM SİSTEMATİĞİ VE UYGULAMASI

Abdullah Emre Aksoy¹, Muhammed İsmail Aydınlioğlu², Yusuf Şamil Işılga³, Mehmet Şahin⁴, Hasan Akçe⁵ ve Atayıl Koyuncu⁶
TUSAŞ, Ankara

Zahit Mecitoğlu⁷
İTÜ, İstanbul

ÖZET

Uydu Konsept/Ön Yapısal Tasarım Hesaplayıcısı Geliştirme Projesi kapsamında haberleşme ve gözlem uyduları üzerinde yoğunlaşarak bir uydunun yapısal ön tasarımını gerçekleştirecek bir program hazırlanması ve bu programın Python program dili üzerinden tasarımı gerçekleştirilen kullanışlı bir ara yüz aracılığıyla kullanıcıya sunulması hedeflenmiştir. Yapılacak olan tasarımda kullanıcı tarafından tercih edilen fırlatıcıların ve ECSS standartlarının getirdiği kısıtlamaların yanında gerekli olan parametrelerin çok büyük oranda kullanıcıdan alınmasıyla tekdüzelikten kurtulmak ve dinamik bir çıktı amaçlanmıştır. Yapılan araştırma ve kaynak analizleri sonrasında elde edilen ve çeşitli kaynaklardan doğrulanan denklemler; katılık, burkulma ve akma gibi farklı yapısal kriterler doğrultusunda uydu yapısal tasarımının yol göstericisi olmaktadır. Tasarım sonrasında program tarafından Nastran yazılımı aracılığıyla koşturulan analiz sayesinde tasarımın geçerliliği kullanıcı tarafından irdelenebilmektedir.

GİRİŞ

Uydular genellikle ana olarak 8-10 alt sistemlerden oluşan sistemlerdir. Başlıca alt sistemler, yapısal, faydalı görev yükü, elektrik güç, itki, yörünge kontrol, telemetri ve tele-kontrol, anten, ısı kontrol, uydu kontrol bilgisayar ve diğer alt sistemlerden oluşur. Uydu tasarımları görev tipi ve süresi, görev yükü ve gereksinimleri, fırlatıcı, fırlatıcı mekanik ve çevresel gereksinimleri, standartlar, alt sistem seçimleri ve kullanılacak yapısal malzemelere göre şekillenir. Uydu görevi ve görev alt sistemi kapasitesi uydunun ana tasarım parametrelerini belirler. Haberleşme uydularında genellikle faydalı görev yük kapasitesine göre platformlar önceden tasarlanır ve prototipleri üretilip ve test edilerek platform ve servis modülünün (BUS sisteminin) uygunluğu teyit edilir. Elektro-optik ve SAR gözlem uydularının faydalı yükü kamera ve SAR anteni ve ilgili alt sistemleri ebat olarak uydu boyutunu etkileyen ana parametrelerdir. Kamera veya SAR anteni kütle olarak da uydu toplam fırlatma kütlelerinin yaklaşık 1/3-1/4 aralığında olabilmektedir.

Uydu yapısal alt sistemi uyduların ana taşıyıcı ve tüm alt sistemlerin üzerine tutturulduğu alt sistem olması nedeniyle uydunun ebadını belirler ve kütleli olarak en fazla kütleli ilk uç alt sistem içerisinde yer alır. Bu nedenle bahsedilen bu tür uyduların görev yüklerinin tiplerinin belirlenmesi durumunda diğer alt sistemlerinin kütle ve ebat bilgileri genel karakterleri göz önünde bulundurarak yapısal ön

1 Mühendis, TUSAŞ, E-posta: abduhahemre.aksoy2@tai.com.tr

2 Mühendis, TUSAŞ, E-posta: muhammedismail.aydinlioglu2@tai.com.tr

3 Mühendis, TUSAŞ, E-posta: yusufsamil.isilga2@tai.com.tr

4 Dr., TUSAŞ, E-posta: mehmet.sahin2@tai.com.tr

5 Yük. Müh., TUSAŞ, E-posta: hasan.akce@tai.com.tr

6 Müd., TUSAŞ, E-posta: atayil.koyuncu@tai.com.tr

7 Prof. Dr., Uçak Müh. Böl., E-posta: mecit@itu.edu.tr

tasarımlarını yapmak mümkün olabilmektedir. Bu çalışma, bu tür uyduların genel özelliklerini kullanarak uydu ön yapısal tasarımlarının sistematığının oluşturulması, uygulanması ve pratik uygulama için python programlama dilinde programlanarak pratik kullanım için ara yüz oluşturulması çalışmasıdır.

Uydu alt sistemlerin kütle ve ebatları görev yüküne bağlıdır. Haberleşme ve gözlem uydularındaki alt sistemlerin toplam kütle içerisindeki kütle oranları hemen hemen sabit veya düşük sapmalı oranlardadır. Bu özellikleri nedeniyle ön tasarım çalışmalarında yüksek bir doğrulukla sistem ve alt sistemlerin ön tasarımının yapılabilmesini mümkün olabilmektedir. Alt sistem kütle oranlarının elde edilebilmesi için istatistik çalışma yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada yaygın olarak kullanılan kütlesi 500 kg'dan büyük haberleşme ve gözlem uyduları ön tasarımı göz önünde bulundurulmuştur. Haberleşme uyduları ticari uydular olup görev ömürleri 13-17 yıl aralığında olup uydu operatörleri tarafından yaygın kullanılan uydulardır. Son yıllarda haberleşme uydularında yüksek verimli uydu konsepti ile verimleri ve kullanım seçenekleri artırılmış bulunmaktadır. Gözlem uyduları ise LEO yörüngede görev yapan ve hizmet ömürleri yaklaşık 6-7 yıl olup gerektiğinde yenilenmesi gereken uydulardır. Çalışmada ana uydu tasarım parametrelerinin belirlenmesi için gerekli parametrelerin istatistik çalışmaları referans olarak kullanılıp, yaklaşım formülleri ile alt sistem boyut ve kütlelerinin tahmin ederek tüm uydunun boyut ve kütlelerinin belirlenmesi sağlanacaktır. Bu bilgilerle uydu ana taşıyıcı yapısal elemanlar olan merkezi silindir, paneller ve diğer ana yapısal parçaların boyutları belirlenmiş olacaktır.

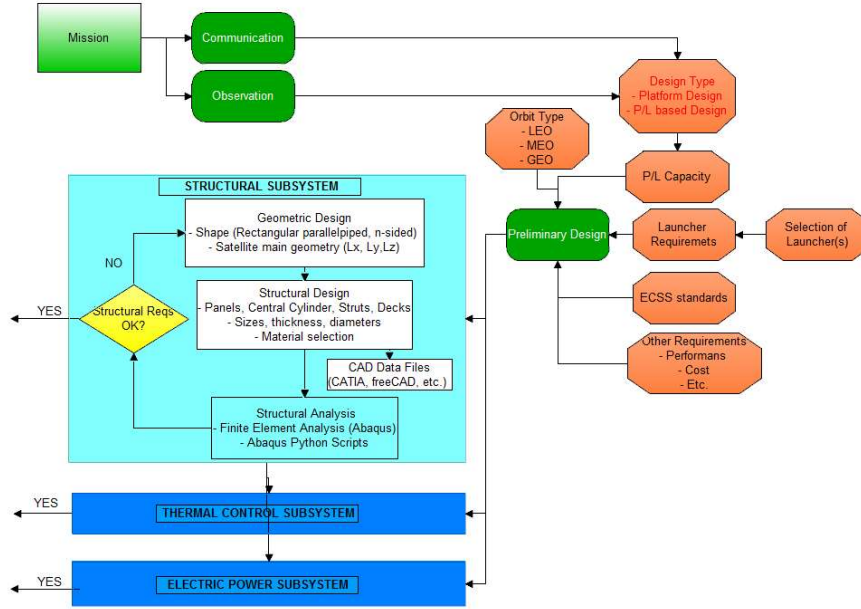
Tasarım Sistematiği

Bu çalışmada geliştirilmiş olan ara yüzde ilerlenecek aşamalar şema olarak Şekil 1' de gösterilmiştir. Kullanıcı, öncelikle tasarlanacak uydunun kullanım amacını seçecektir. Bir sonraki aşamada, uydunun görev yapacağı yörünge tipi seçilecektir. Bu seçimlerle birlikte, uydunun fırlatılacağı muhtemel fırlatıcıların seçimi yapılacaktır. Seçilen fırlatıcılardan elde edilen gereksinimler ile birlikte uzay sistemleri çalışmalarında kullanılan ECSS standartlarından gelen tasarım kriterleri sisteme girilecektir. Tüm bu elde edilen gereksinimler, kullanıcıdan alınacak temel uydu geometri girdileri ile uydunun boyutlandırma çalışması yapılacaktır. Yapılan hesaplamalarla elde edilen uydu boyutları ile 3 boyutlu katı modellemesi otomatik olarak oluşturulacaktır. Daha sonra, elde edilen bu tasarım sonlu elemanlar modellemesi yapılacaktır. Bu model ile fırlatıcı gereksinimleri ile oluşturulan NASTRAN girdi dosyası (.bdf) sonlu elemanlar modeli ile birleştirilerek NASTRAN üzerinden sonlu elemanlar çözümü yapılacaktır. Analizden elde edilen sonuçlar, başta yapılan analitik hesaplamalar ile karşılaştırılacaktır. Elde edilen nihai sonuç, tasarlanması amaçlanan uydunun ön yapısal tasarımını kullanıcıya sunacaktır.

PROBLEM TANIMI

Uydular yörüngelerinde görevlerine başladıktan sonra herhangi bir yapısal geliştirme söz konusu olmaması sebebiyle uydu yapısal tasarımının yüksek güvenilirliğinin yanında minimal kütleye sahip olması gerektirdiğinden kritik bir durum önem arz etmektedir. Yapısal ön tasarım her ne kadar tüm uydu tasarım takvimine kıyasla kısa bir aşama olarak kabul edilebilir olsa da tüm yapısal tasarıma yön verecek ve temellerini atacak olan aşama olması sebebiyle büyük önem teşkil etmektedir.

Ön tasarım aşamasında farklı tasarımların irdelenmesi uydu projesi süreci açısından daha sağlıklı olacaktır. Farklı tasarımların gerçekleştirilmesi ve irdelenmesi; zaman ve kalifiye iş gücü kaynaklarını hızlı bir şekilde tüketecektir. Bu süreci daha hızlı ve daha az mühendise ihtiyaç duyulan bir yöntemle gerçekleştirmek projenin temel motivasyonu olmuştur. Bu noktada ise tarafımızdan gerçekleştirilen çalışmaların amacı bu süreci gerçekleştiren bir program üreterek süreci çok daha hızlı bir hale getirmek ve bu programı kullanıcı kolaylığı sağlayan bir ara yüz vasıtasıyla sunmaktır.



Şekil 1: Uydu ön tasarım sistematığı akış şeması

GERÇEKLEŞTİRİLEN ARAŞTIRMA FAALİYETLERİ

Proje kapsamında öncelikle literatür araştırması yapılmıştır. Bu literatür araştırması, öncelikle uyduları, uyduların tarihsel sürecini, uydularının çalışma prensiplerini kapsamaktadır. Daha sonra uyduların görevini yerine getirmesi için kullanılacak olan fırlatıcı roketleri üzerine detaylı bir inceleme yapılmıştır. Fırlatıcıların incelenmesi aşamasında, fırlatıcı üreticilerinin sunduğu kullanım kılavuzları temel kaynak olarak kullanılmıştır. Bu araştırmalar neticesinde fırlatıcıların gerekli bilgileri kullanılarak hazırlanmış bir veri deposu elde edilmiştir. Bu veriler uydu tasarımında analitik hesaplar ve analiz aşamalarında kullanılmıştır.

Daha sonra proje kapsamında bir ön çalışma olarak 5 farklı haberleşme uydusunun yapısal kütle oranları kullanıcıya bilgi vermesi amacıyla istatistiki olarak düzenlenmiştir. Aşağıdaki tabloda kimyasal itki sistemine sahip haberleşme uydularının kuru kütle (yakıt hariç) dağılım oranları yüzde oranları $\frac{\text{alt sistem kütlesi}}{\text{Uydu toplam kuru kütlesi}} \times 100$ yüzde olarak gösterilmiştir.

Tablo 1: Haberleşme uyduları alt sistemlerinin kuru kütle dağılım oranları

Uydu	Alt sistemler						
	Fay. Yük (%)	Elek. Güç (%) (*1)	Yapısal (%)	İtki (%)	Enteg. (%)	Diğer (%)	Toplam (%)
Uydu-1	25	24	16 (*2)	10	10	15	100
Uydu-2	27	23	16 (*2)	9	9	16	100
Uydu-3	21	24	19 (*3)	11	1	24	100
Hispasat	27	26	16	9	?	22	100
TVSAT-1	25	25	17	12	?	23	100
Ortalama	25	25	17	10	-	23	100

(*1) Tüm uydularda piller ve güneş panelleri elektrik alt sistemine dâhil edilmiştir
(*2) Entegrasyon hariç
(*3) Kablaj ve entegrasyon dahildir

Kimyasal itki sistemine sahip haberleşme uydularının görev süresi öncelikli olarak yakıt miktarına bağlıdır. Teknolojik imkânlardan dolayı 1960'ların sonu ve 1990'lara kadar üretilen haberleşme uydularının görev ömürleri 10 yıldan daha kısaydı. 1990'lı ve 2000'li yıllardan sonra fırlatılan büyük haberleşme uydularının hemen hemen hepsi 15 ve daha fazla servis ömrüne sahiptirler. Bu tabloda 1990 yıllardan sonra fırlatılan haberleşme uyduları dikkate alınmıştır. Tabloda gösterildiği gibi haberleşme uydularında faydalı yük, elektrik güç, yapısal ve kimyasal itki sistemleri hemen hemen aynı benzer oranlarda olup toplam kuru kütleinin %75'ten fazlasını oluşturmaktadırlar. Faydalı yük

ve elektrik güç alt sistemleri uydu toplam kuru ağırlığının yaklaşık %50'sini oluşturmaktadır. Yapısal alt sistem kütlesi en büyük üçüncü kuru kütleline sahip üçüncü en büyük kütleli alt sistemdir. Yukarıda belirtilen kütle dağılımları tam kimyasal itki sistemine sahip uyduları kapsamaktadır.

Son 15 yıldan beri tam elektrik veya hem kimyasal hem de elektrik hibrit itki sistemlerine sahip haberleşme uyduları geliştirilmekte ve fırlatılmaktadır. Bu gelişmeler bu tür uydularda daha küçük yakıt tanklarının kullanılmasını veya hiç kullanılmamasını sağlamaktadır. Bu sağlanan kütle avantajı daha fazla faydalı yük ve bu yüke uygun daha fazla elektrik gücü için kullanılmaktadır. Bu değişim uydu yapısal alt sistem kütlesinin düşmesine sebep olarak daha verimli haberleşme uydularının geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu değerlendirmeye göre bu tür uydularda itki sistemindeki kütle azalması faydalı yük ve elektrik alt sistemlerinin kuru kütle oranlarının önemli bir miktarda (%5-10) artmasına ve yapısal alt sistem kütle oranında kısmen azalmasına sebep olacaktır. Buradan yapısal alt sisteminin kuru kütle oranının kabaca %3-5 aralığında düşmesi beklenebilir.

Tam elektrik veya hem kimyasal hem de elektrik hibrit itki sistemlerine sahip haberleşme uyduların nispeten yeni bir teknoloji olduğu için bu tür uyduların kütle dağılımları hakkında kısıtlı bilgi mevcut olduğundan bu çalışmada bu tür uydular için istatistik bir çalışma yapılamamıştır. Fakat daha sonraki çalışmalarda ele alınacaktır. Literatür aşamasının bir sonraki aşamasında ise uydu tasarımına geçilmiş ve uydu şekillerinden ve merkezi taşıyıcı şekillerinden bahsedilmiştir. Bu uydu şekilleri proje kapsamında önem arz etmektedir çünkü oluşturulan algoritmalar, her bir konfigürasyon için ayrı ayrı oluşturulmaktadır.

Projenin daha sonraki aşamasında ise ECSS(European Cooperation for Space Standardization) standartları üzerinde durulmuştur. Bu standartlar, yine analitik hesaplamalar ve analiz çalışmalarının yapılması sırasında kullanılacak olan bilgileri içermektedir. Yine çalışmanın içeriğinde bu standartlara değinilmiştir. Literatür araştırması sonrasında, uydunun her bir parçasının analitik hesapları yapılmıştır [Agrawal, 1986]. Uydu parçalarının her biri için uydu tasarım için kullanılan kaynaklardan ve TUSAŞ mühendislerinin çalışmalarından elde edilen hesaplamalarla mukavemet ve boyutlandırma çalışması analitik olarak gerçekleştirilmiştir. Bu analitik hesaplamalar, projenin bütün aşamalarında kullanılacak olan Python yazılım dili ile yapılmıştır.

Elde edilen boyutlar projenin tasarım aşamasında tasarımcıya bir başlangıç değeri vermesi amacıyla bulunmuştur çalışmanın dinamik olması amacıyla kullanıcı tarafından değiştirilebilir olarak verilmiştir. Analitik hesapların yapılması ve boyutlandırmanın yapılmasıyla birlikte üç-boyutlu modelin oluşturulma aşamasına geçilmiştir. Üç boyutlu uydu modeli kabuk olarak tasarlanmış olup her bir parça kendi özelinde iki boyutludur. Üç-boyutlu model Python yazılım dili ile, "pymadac" adlı Python modülü kullanılarak oluşturulmuştur. Elde edilen üç-boyutlu uydu modeli yine bir Python modülü olan "gms" modülü kullanılarak sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve assemble (montajı) gerçekleştirilmiştir.

Projenin son aşamasında analiz çalışmaları ve analiz sonuçlarının gösterilmesi, Python yazılım diline entegre olan "pyNastran" modülü ve NASTRAN analiz programı kullanılarak yapılmış ve pyNastranGUI ile kullanıcıya sunulmuştur. PyNastran temel olarak fırlatıcı gereksinimlerinden gelen yük ve frekans kısıtları ile birlikte ECSS standartlarının gereği olan yük katsayıları ile sanki-statik ve modal analizi gerçekleştirmek için gerekli Nastran dosyalarını oluşturulmak amacıyla kullanılmıştır. PyNastranGUI ile kullanıcıya görsel olarak istediği analiz sonuçları verilmektedir. Ayrıca elde edilen ".h5" uzantılı dosya formatından elde edilen sonuç verileri de kullanıcının isteği üzerine excel dosya formatında verilebilmektedir.

Yapılan bütün bu çalışmalar Python QT modülü kullanılarak tasarlanan ara yüz ile kullanıcıya sunulmaktadır. Tasarlanan ara yüzde kullanıcı mümkün olduğunca dinamik bir çalışma yapmakta ve boyutlandırma, konfigürasyon seçimi, yük ve frekans girdileri, ECSS standartları kapsamında kullanılması gereken katsayılar dahil birçok şeye müdahil olabilme kapasitesine sahiptir. Aynı zamanda kullanıcı analiz öncesinde oluşturulan modeli görebilmekte ve gerekli durumlarda istediği şekilde tasarımda geri giderek parametre değişimini gerçekleştirebilmektedir.

ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE ÇIKTILAR

Şekil Seçimi ve Boyutlandırma

Uydu tasarımında konsept tasarım aşamasında tasarımcı tarafından seçilmesi gerekenler, uydunun genel şekli, merkezi taşıyıcının şekli ve boyut ve yarıçap gibi temel boyutlardır [Fortescue, Swinerd, Stark, 2011]. Bu projede geliştirilen ara yüzde, kullanıcıya birden fazla merkezi taşıyıcı seçenekleri (yarım silindir, tam silindir, koni vb.) ve uydunun dış geometri seçenekleri (dörtgen, altıgen) verilmektedir. Bu seçimler kapsamında, seçilen şekle göre yarıçap, boy, genişlik gibi temel değerler ve uydunun taşıyacağı ekipmana bağlı olarak tahmini bir kütle değeri girilmesi istenmektedir.

Yapısal Tasarım Gereksinimleri ve Hesaplamalar

Uydu tasarımında öncelikli olarak uyulması gereken standartlar bulunmaktadır. ECSS(European Cooperation for Space Standardization) standartları, Avrupa ülkeleri arasında uzay sistemlerinde kalite ve güvenlik açısından birlik ve güvenilirlik olması için oluşturulmuş standartlardır. Tasarımcının çalışmasını bu standartlara uygun olacak şekilde yapması tasarımın kabulü için önem arz etmektedir. Uydu ön yapısal tasarım aşamasında ise "Spacecraft Mechanical Loads Analysis Handbook" [ECSS Secretariat, 2013] adlı dokümandaki ECSS standartları yeterli olacaktır. Bu standartlar genel olarak uyduya gelen yer yüklerinde, fırlatıcı ve yörünge yüklemelerinde hesaba alınacak standartlardır.

Uydunun merkezi silindirini tasarlamak için kullanıcıdan alınacak boy ve yarıçap değerleri ile önce fırlatıcının gelen frekans verileri ile rijitlik hesaplamaları yapılmaktadır. Yanal ve dik yöndeki frekans değerleri ile 2 farklı kalınlık hesaplaması yapıldıktan sonra, fırlatıcının sanki-statik yükleri ile dik yöndeki yük hesaplaması yapılmakta ve merkezi taşıyıcının kalınlığı dik yöndeki yüklere göre tekrar hesaplanmaktadır. Daha sonra elde edilen en büyük kalınlık değeri kullanıcıdan alınan emniyet payı değerine göre tekrar hesaplanmakta ve gerekli boyutlandırma tamamlanmaktadır Larson, 1999; Wertz, 1999].

Uydunun panel, kesme duvarı ve güverte gibi diğer parçalarının analitik hesaplarının yapılması için de yanal frekans gereksinimleri ve emniyet payı değeri gereklidir ve bu değerlere göre boyutlandırma yapılmaktadır [Agrawal, 1986].

CAD Çizimleri

Projede daha önce belirtildiği gibi farklı konfigürasyonlarda uydu tasarımları elde edilebilmektedir. Bu konfigürasyonlar, düz silindir merkezi taşıyıcı – dörtgen uydu, düz silindir merkezi taşıyıcı – altıgen uydu, koni merkezi taşıyıcı – dörtgen uydu ve koni merkezi taşıyıcı – altıgen uydu olmak üzere 4 çeşittir. Her bir konfigürasyon için ayrı ayrı her bir parçasının çizimi Python pymadcad modülü [4] ile elde edilmektedir. Bu modül kullanılırken, kullanıcıdan alınan boyut girdileri koordinat düzleminde nokta olarak atanmakta daha sonra şeklin tipine göre çizgi komutlarıyla ve döndürme komutlarıyla yüzey verme işlemi gerçekleştirilmektedir. Projenin devamında tasarlanan yapıların analizi yapılacağı ve analiz modeli oluşturulacağı için, fazla iş yükünden kurtulmak ve programın daha verimli çalışmasını sağlamak için, 3-boyutlu model analizde kullanılabilir şekilde en başta kabuk olarak oluşturulmaktadır.

Yapılan çizimler, her bir yapısal parça için ayrı fonksiyonlarda yazılmış ve kendilerine has koordinat noktaları belirtilmiştir. Bu sayede çizimler yapılırken algoritmada karışıklık olması önlenmesi ve boyut sınırlaması olmadan her türlü çizimin yapılması amaçlanmaktadır.

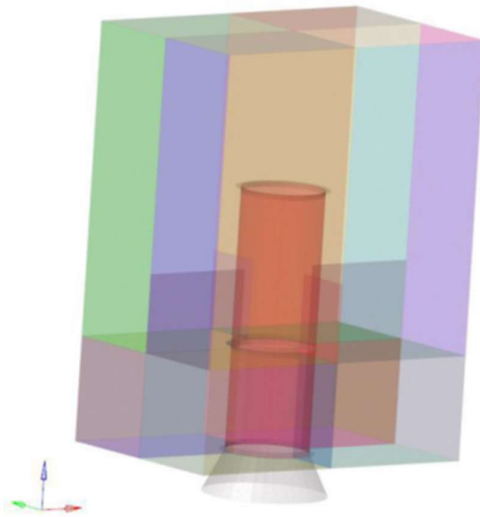
Sonlu Elemanlar Modeli Oluşturulması

Projenin bu aşamasında oluşturulan CAD modeli analize gönderilmek üzere mesh işlemine tabi tutulmaktadır. Elde edilen tasarımlar, gmsh modülü ile merkezi taşıyıcının boyuyla orantılı olarak mesh boyutu verilerek mesh işlemine tabi tutulmaktadır. Bu kapsamda mesh yapılan ve montajı yapılacak olan tüm parçaların düğüm-düğüm bağlantılarının olması analiz için önem arz etmektedir. Mesh işlemi önce her bir parça özelinde ayrı ayrı yapılmakta ve stl dosya formatında kaydedilen parçalar tekrar aynı isimle kaydedilmektedir. Daha sonra montajı yapılan parçalar bütün olarak tekrar bir mesh işlemine tabi tutulmakta ve düğüm-düğüm bağlantısını güçlendirmek için mesh optimizasyonu işlemi gerçekleştirilmektedir.

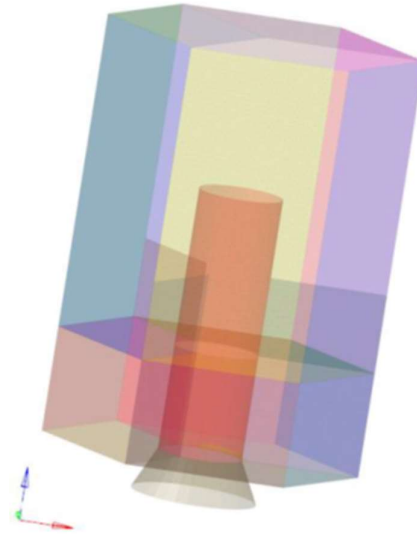
CAD Montaj

Yapılan parça modellerinin Python üzerinden gmsh modülü [5] kullanılarak montajı yapılmaktadır. Merkezi taşıyıcıdan başlanarak, yük ve servis panelleri, kesme panelleri, güverte parçaları ve taşıyıcı üst destek halkası ayrı ayrı ve sırasıyla numaralandırılmaktadır. Daha sonra gmsh modülü başlatılarak oluşturulan mesh sonucunda oluşturulan stl dosya formatındaki her bir parça sırasıyla modüle çağırılmaktadır. Çağırılan parçalar kenar-kenar bağlantısı yapılarak montajı oluşturulmaktadır.

Montajı yapılan uydunun en alt orijin noktasında bir SPC noktası belirtilmektedir. Bu nokta uydudan gelen eksenel yüklerin uygulanacağı noktadır. Belirtilen bu nokta daha sonra analiz algoritmalarında kullanılmak üzere oluşturulmaktadır. Bu SPC noktası uydudan gelen yüklerin uygulandığı nokta olduğu için uydu adaptörünün en alt düzlemindeki tüm düğümlere RBE2 bağlantısı ile bağlanarak uydunun adaptörün alt noktasından fırlatıcı kapsülüne bağlı olduğu simüle edilmektedir. Şekil 2 ve Şekil 3'te dörtgen ve altıgen örnek uydu modelleri gösterilmiştir.



Şekil 1. Dörtgen uydu 3-B modeli



Şekil 2. Altıgen uydu 3-B modeli

Analiz

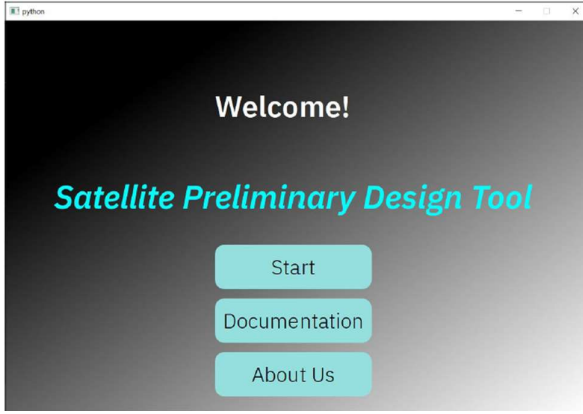
Geliştirilen programın çıktısı olarak alınan tasarımın geçerliliğinin irdelenmesi açısından bir analizin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda analiz programı olarak Python yazılım dili ile olan uyumluluğu sebebiyle Nastran seçilmiştir. Yük durumlarının en kritiklerinin gerçekleştirilmesine karar verilmiş ve bu doğrultuda durağan ivmeler ve modal analizlerinin koşutlanması TUSAŞ mühendisleri tarafınca tercih edilmiştir.

Durağan ivmeler analizi için fırlatıcılardan gelen zarfların hepsinin birleştirilmesiyle oluşturulan kapsayıcı zarfın dış bükey noktaları analize dâhil edilmiş bunun yanında kullanıcının bu yük durumlarını değiştirmesine de olanak sağlanmıştır. Modal analiz içinse kullanıcıdan bir üst limit değeri alınmakta ve 1 Hz'den bu değere kadar yapının davranışı analiz edilmektedir. Program kapsamında analiz sonuçları görsel olarak sunulmamakta çıktı olarak sonuç dosyaları verilmektedir. Bunun sebebi Python ile uyumlu olmayan bir yazılımın programa dahil edilmesinin istenmemesidir.

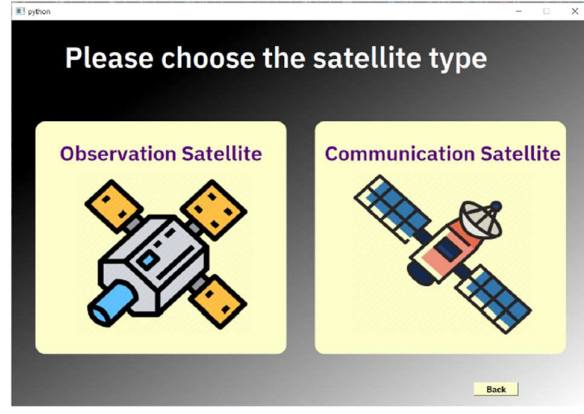
Ara Yüz

Kullanıcı ara yüzü, Python programlama dili kullanılarak oluşturulmuştur. Python PyQt5 modülü, diğer ara yüz modüllerine göre daha fazla dokümantasyon bulunması, kullanım kolaylığı ve kullanım yaygınlığından dolayı seçilmiştir. Uydu CAD ve sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasına olanak sağlayan "pymadcad" ve "pygmsh", matematiksel operasyonlar için kullanılan "numpy", grafiklerin çizdirilmesinde kullanılan "matplotlib" ve Nastran sonlu elemanlar modeli dosyalarının oluşturulmasını sağlayan "pyNastran" tasarlanan kullanıcı ara yüzü ile bütünleşik çalışmaktadır.

Şekil 4'te programın giriş sayfası görülmektedir. Bu sayfada programın nasıl kullanılacağına izah edildiği dokümantasyona veyahut programın geliştirilmesinde emeği geçenlerden bahsedildiği sayfaya ulaşılabilir. 'Start' butonuna basarsa programa devam edilir. Şekil 5'teki sayfada ise ön tasarımı gerçekleştirilecek olan uydunun görev tipi kullanıcı tarafından seçilmektedir.

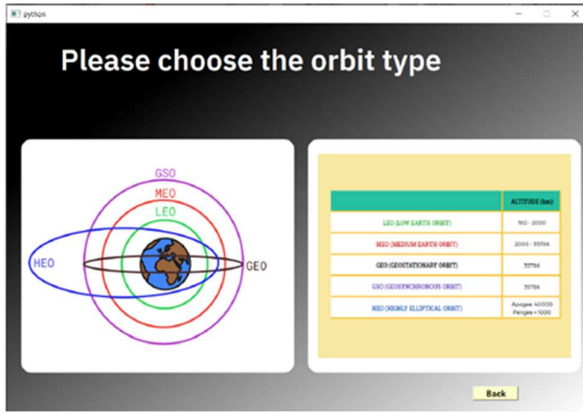


Şekil 4. Programa Giriş Sayfası

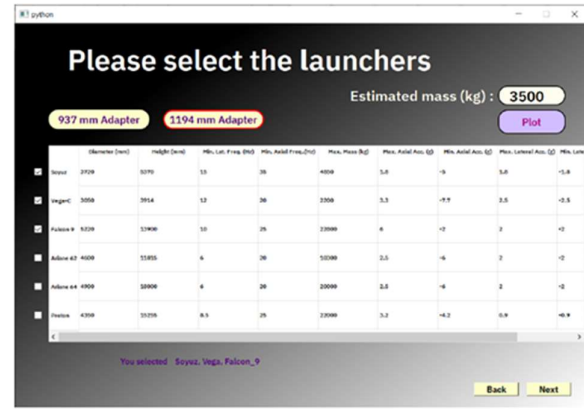


Şekil 5. Uydu Görevi Seçim Sayfası

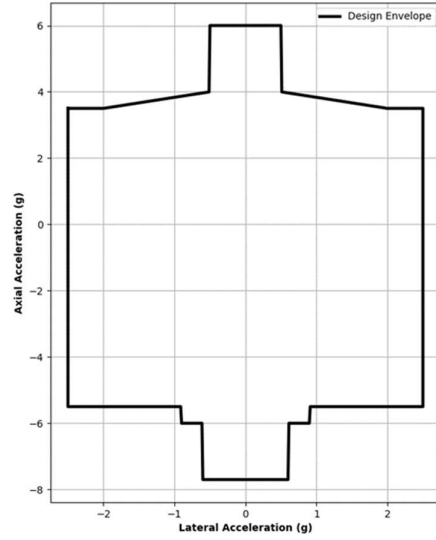
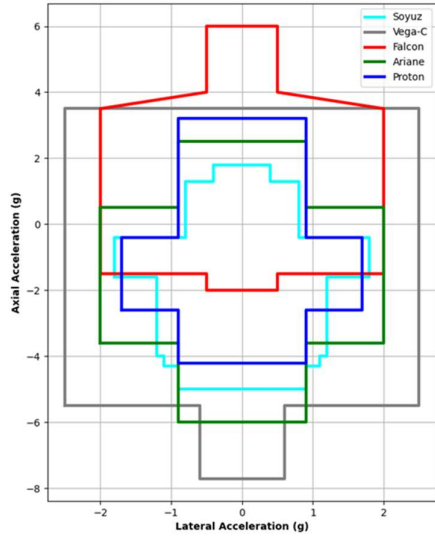
Şekil 6'da gözlemlenen sayfada ise uydunun görevini sürdüreceği yörünge seçilmektedir. Bu seçim Şekil 7'deki fırlatıcı seçim ekranındaki fırlatıcı gereksinimlerini veren tablonun şekillenmesini sağlayacaktır. Şekil 7'de görülen tablo Alçak İrtifa Dünya Yörüngesi seçimi için fırlatıcılar tarafından verilen gereksinimlerdir. Aynı ekranda sağ üst köşede tahmini uydu kütlesi girilerek gidilebilecek grafik ekranında ise fırlatıcılardan gelen durağan ivmeler, sinüzoidal dinamik titreşimler ve akustik grafiklerine ulaşılabilir. Bu grafikler seçilen farklı fırlatıcıların karşılaştırıldığı ve hepsini kapsayan bir zarfın oluşturulduğu farklı grafikler şeklinde sunulmaktadır. Şekil 8 ve Şekil 9'da durağan ivmeler grafikleri gösterilmiştir.



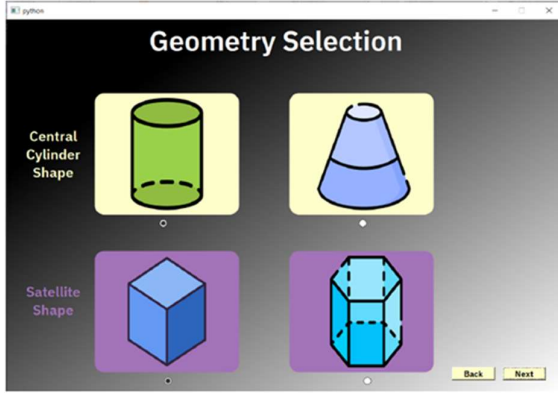
Şekil 6. Görev Yörüngesi Seçim Sayfası



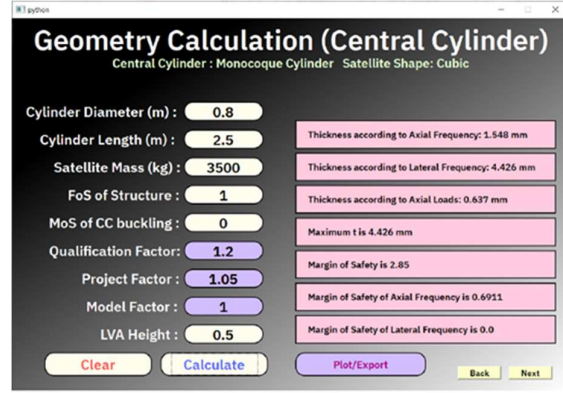
Şekil 7. Fırlatıcı Kısıtlamaları ve Seçim Sayfası



Şekil 8. Tüm fırlatıcıların karşılaştırmalı yük zarfları Şekil 9. Tüm fırlatıcıları kapsayan yük zarfı

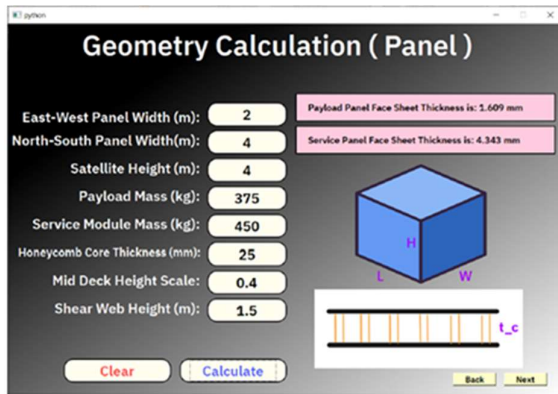


Şekil 10. Geometri Seçim Sayfası

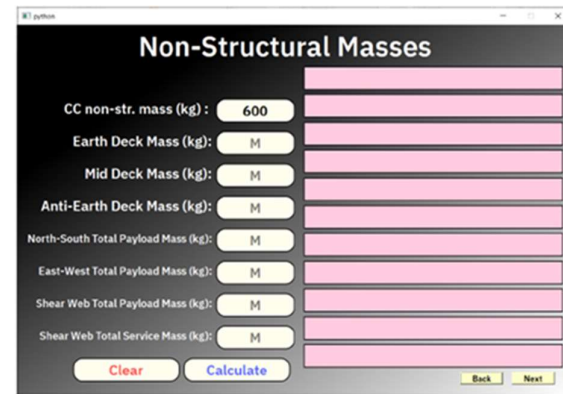


Şekil 11 Merkezi Silindir Hesaplamalar Sayfası

Şekil 10'da uydunun merkezi ve dış yapısının geometrilerinin seçildiği ekran sunulmaktadır. Devamında gelen geometri analitik hesaplamaları sayfaları merkezi yapı ve paneller için gerekli parametreleri alarak kalınlık hesabı yapmaktadır. Geometri seçimi sayfasında yapılan silindirik ve dörtgen seçimlerine göre şekillenen bu sayfalar Şekil 11 ve Şekil 12'de gözlemlenebilmektedir.

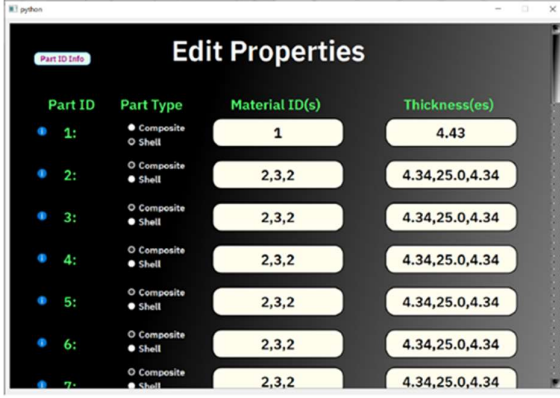


Şekil 12. Uydü Panel Hesaplamalar Sayfası

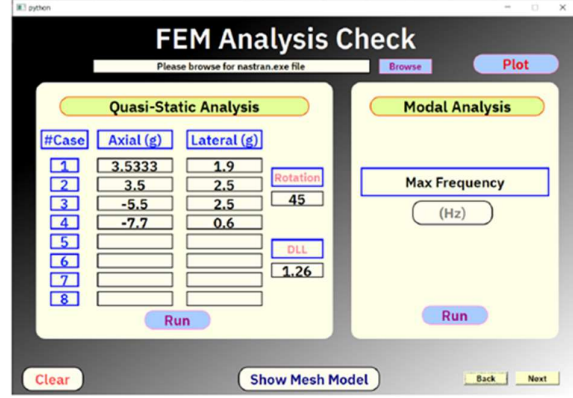


Şekil 13. Yapı Dışı Kütle Giriři Sayfası

Analiz kısmına yaklaşılacak programda analiz için gerekli olacak olan girdiler alınmaya başlanır. Bu noktada öncelikle Şekil 13'te görüleceği üzere uydunun yapısal elemanları üzerinde bulunan ancak yapısal olmayan yüklerin değerleri kullanıcıdan alınmaktadır. Devamında Şekil 14'te incelenen sayfada uydu yapısal parçalarının kalınlık ve malzeme bilgileri değiştirilebilmektedir. Malzeme kısmındaki numaralar programın (csv) formatındaki malzeme veri tabanındaki numaralandırmalarıdır ve dokümantasyonda sayılara tekabül eden malzemeler belirtilmiştir. Bu sayfada her parçanın başındaki bilgi dairesine geldikçe uydudaki konumu gözlemlenebilmektedir.



Şekil 14. Yapısal Özellikleri Düzenleme Sayfası



Şekil 15. FEM Analizi Sayfası

Programın mevcut gelişimindeki son sayfası olan sonlu elemanlar yöntemi analizi sayfası ise Şekil 15'te gözlemlenebilmektedir. Sayfanın orta alt kısmındaki buton ile tasarımın ağ modeli Python dilinin gmsh modülü aracılığıyla gözlemlenebilmektedir. Analizlerin koşulabilmesi için kullanıcının bilgisayarındaki Nastran yazılımının konumu 'Browse' butonuna basarak seçmesi gerekmektedir.

Durağan ivmeler analizi için Şekil 9'daki gibi seçilen fırlatıcılar için oluşturulan zarfın dış bükey noktaları analiz yüklemeleri olarak alınmaktadır. Kullanıcı bu değerleri değiştirebildiği gibi yeni değerler ekleme özelliğine de sahiptir. Ayrıca girilen açı değeriyle bu yüklerin uyduya kaç derecelik açılarla uygulanacağı kullanıcı tarafından kararlaştırılmaktadır. Dörtgen uydular için 45 altıgen uydular için 60 derece başlangıç değeri olarak gelmektedir. 'DLL' olarak geçen katsayı ise kullanıcının programın geçmiş sayfalarında girdiği tüm katsayıların çarpımı olarak bu aşamada sunulmaktadır. Yine kullanıcı bu değeri istediği gibi değiştirebilmektedir.

Programın gerçekleştirdiği bir diğer analiz olan modal analizde ise girdi olarak yalnızca analizin koşulacağı en yüksek frekans değeri kullanıcıdan beklenmektedir. Program en küçük değer olarak 1 Hz'i otomatik olarak atamaktadır. Her iki analiz çeşidinde 'Run' butonlarıyla analizler ayrı ayrı koşuturulabilmektedir. Programın mevcut durumunda analiz sonuçları gösterilememekte olup sonuç dosyaları çıktı olarak sunulmaktadır. Bu konuda çalışmalar devam edecektir.

SONUÇ

Bu çalışmada en yaygın olarak kullanılan uydu tipleri olan haberleşme ve gözlem uydularının alt sistem temel kütleli özellikleri kullanılarak ve istenilen görev, görev süresi, yörünge, elektriksel güç, faydalı yük kapasitesi gibi ana parametrelerin belirlenmesi durumunda seçilecek fırlatıcılara uygun yapıda uyduların ön tasarım sistematiği geliştirilmiştir. Çalışma için halen görev yapan ve 2000'li yıllardan sonra fırlatılmış bu tür uyduların ayrıntılı alt sistem özelliklerinden yararlanılarak istatistik bir veri sistemi oluşturulmuştur. Bu veri sistemi ile ön tasarım için alt sistem kütleli özellikleri hesaplanarak tüm uydunun geometrik ve yapısal ön tasarımında yardımcı olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada ayrıca parametrik sonlu elemanlar programı geliştirilerek döngüsel tasarım yapılması sağlanmış ve sonraki ileri tasarım/analiz değerlerine daha yakın değerlerin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Teşekkür

Yazarlar bu çalışmadaki desteklerden dolayı TUSAŞ şirketine teşekkürlerini bildirmektedirler.

Kaynaklar

- Agrawal, Brij N. *Design of geosynchronous spacecraft*. Prentice-Hall, 1986
- ECSS-E-HB-32-26A, *Spacecraft Mechanical Loads Analysis Handbook*. ECSS Secretariat, ESA ESTEC Requirements & Standards Division, Noordwijk, The Netherlands 2013.
- Fortescue, P., Swinerd, G., Stark, J. *Spacecraft Systems Engineering* 4th Ed. J. Wiley 2011
- Gmsh* 4.9.5. URL: <https://gmsh.info/doc/texinfo/gmsh.html> 15 Haziran 2022 tarihinde alınmıştır.
- Larson, W.L. ve Wertz, J.R., *Space Mission Analysis and Design*. 3rd Ed. Space Technology Library, Microcosm Press and KluwerAcademic Publisher, 1999
- Pymadcad, *pymadcad documentation*. Pymadcad.readthedocs.io. URL: <https://pymadcad.readthedocs.io/en/latest/>. 15 Haziran 2022 tarihinde alınmıştır