

## UYDU ÜRETİM VE TEST MERKEZLERİNDE TEMİZ ODA UYGULAMALARI

Murat BULUT<sup>1</sup>  
Türksat A.Ş., Ankara

Nedim SÖZBİR<sup>2</sup>  
Düzce Üniversitesi., Düzce

M. Mehmet NEFES<sup>3</sup>  
Türksat A.Ş., Ankara

### ÖZET

*Uydu projelerinde çalışan mühendisler ve bilim insanları için kontaminasyon çok önemlidir. Uydularda kontaminasyon kaynaklı başarısızlık istenmeyen durumdur. Bu sebeple, uyduların montaj, entegrasyon ve testlerinin yapıldığı merkezlerde bulunduğu sürece temizliğinin en üst düzeyde tutulması gerekmektedir. Bu çalışmada, uydu montaj, entegrasyon ve test merkezinde yer alan temiz oda, kontaminasyon ve kontaminasyon kontrol hakkında daha önce uydu projeleri sırasında kazanılan tecrübeler ışığında bilgiler aktarılacaktır.*

### SİMGELER

MLI	= Çok Katmanlı Yalıtım Battaniyeleri (Multi Layer Insulation)
OSR	= Optik Güneş Yansıtıcıları (Optical Solar Reflector)
SSB	= Savunma Sanayi Başkanlığı
SSM	= İkinci Yüzey Aynası (Second Surface Mirror)
UMET	= Uydu Montaj Entegrasyon ve Test Merkezi
USET	= Uzay Sistemleri Entegrasyon ve Test Merkezi

### GİRİŞ

1957 yılında ilk yapay uydu olan Sputnik 1 uydusunun Rusya tarafından fırlatılması ile birlikte uzayda ülkeler arasında büyük uzay yarışı başlamıştır. Bu yarış günümüzde evreni ve farklı gezegenleri keşfetmek ve gelişmiş ülkeler arasında uzay ve uydu teknolojileri konusunda daha üstün olma arzusu uzay çalışmalar ile devam etmektedir. Gelişen uzay ve uydu teknolojileri ile birlikte uydu ve uzay araçlarının montaj entegrasyon ve testlerin yapılacağı merkezlere ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. Uzay ve uydu teknolojileri konusunda çalışan ülkeler kendi uydu üretim ve test merkezlerini kurmaktadır.

Yatırım danışmanların tahminlerine göre, uzay teknolojileri için küresel ölçekte yatırımlar önümüzdeki 20 yılda on kat artarak 2,700 milyar Euro'ya (2040) ulaşacaktır [NASA, 2021]. Pek çok

<sup>1</sup> Yapısal Alt Sistem Uzmanı, Uydu Programları Direktörlüğü., E-posta: muratbulut@turksat.com.tr

<sup>2</sup> Rektör, Düzce Üniversitesi., E-posta: nedimsozbir@duzce.edu.tr

<sup>3</sup> Direktör, Uydu Programları Direktörlüğü., E-posta: mmnefes@turksat.com.tr

bilim insanı, mühendis, tedarikçi, hizmet sağlayıcı bu büyümeden faydalanacaktır. Uzay yolculuğuna katılacak olan uzay araçlarının ve kullanılan tüm alt sistemlerin ve ekipmanların ortak noktası temiz odada üretilmeleridir. Uzay araçları veya bu araçlarda kullanılan tüm ekipmanlar ve alt sistemler temiz oda da ayrıca entegre ve testleri yapılmaktadır. Uzay teknolojileri için temiz oda oldukça önemlidir.

Uzay yolculuğunda büyük projeleri başarısız kılan küçük şeyler her zaman olmuştur. Örnek olarak 1990'da Ariane 4 piyasaya ilk sürüldüğünde, bir boruya yanlışlıkla sıkışan kumaş parçası kazaya neden olmuştur [NewScientist, 1990]. 1994'te turbo pompadaki kirlilikten dolayı iki kez yanlış başlatma olmuştur. NASA ve ESA'da kirlilikten dolayı birçok sorunlar yaşanmıştır. Bu nedenle uyduların üretiminin ve testlerinin yapıldığı temiz oda ortamları için son yıllarda ciddi yatırımlar yapılmaktadır.

Bu çalışmada uydu üretim ve test merkezinde yer alan temiz oda uygulamaları hakkında bilgiler verilecektir.

### TEMİZ ODA

Temizlik faktörü, moleküler ve partikül kontaminasyona duyarlı ekipmanların ve bu ekipmanları barındıran uyduların performansını olumsuz etkileyecek dolayısıyla tasarım aşamasından üretim, nakliye ve entegrasyon aşamalarına kadar dikkatle ele alınması gereken bir faktördür. Tasarım, üretim ve işletme proseslerin son derece karmaşık ve hataların saptanarak düzeltilmesinin takvim, maliyet gibi önemli etkilere sahip olduğu uydu endüstrisinde temizlik kontrolünün sağlanmasında en önemli altyapı bileşeni olup, uzay şartlarına dayanıklı ekipman, alt-sistem ve sistem üretimleri temiz oda sınıfındaki tesislerde gerçekleştirilmektedir.

Temiz odalar hava kaynaklı partiküllerin ortama girişini, ortam içinde oluşmasını ve tutulmasını en az seviyede indirmek için partikül sayısının kontrol edildiği ve ayrıca toksin maddelerin havada tutunmasına izin verilmeyen ideal iklimlendirilmiş steril alanlardır [Korkmaz, 2019]. Temiz odalara hastane ortamlarında ve belirli üretim teknolojilerinde ihtiyaç vardır. Uydu üretim ve test merkezlerinde bir üretim teknoloji yeri olup, temiz oda uygulama alanlarından biridir.

Uydu üretim ve testlerinin yapıldığı yerler, teknik anlamda birer temiz odadır. Temiz oda ise, uluslararası kabul edilen temizlik standartlarına göre moleküler, parçacık ve diğer kontaminasyonlardan korunmak üzere sıcaklık, nem, basınç, gürültü seviyesi ve hava hareketi belli ölçüler içinde olan hijyen ortamıdır [Türk Standardı, 2001]. Temiz ortamda farklı türden kontaminasyonlar yer almaktadır. Moleküler (molecular), parçacık (particulate) ve diğer kontaminasyon olarak üç sınıfta değerlendirilmektedir. Çizelge 1'de temiz odalar için genel gereksinimler yer almaktadır. Uydu üretim ve testlerinin yapıldığı temiz odalar genellikle ISO 8 (100 000) sınıfıdır. Keşif uyduları (reconnaissance satellites) gibi son derece hassas optik sistemlere sahip uydular, ISO 5'de entegrasyonu yapılmaktadır.

Çizelge 1: Temiz odalar için genel gereksinimler

Kontrollü parametreler	TEMİZ ODA SINIFLANDIRMASI				
	ISO 9	ISO 8	ISO 7	ISO 6	ISO 5
	Class 1 000 000	Class 100 000	Class 10 000	Class 1000	Class 100
Sıcaklık (°C)	22° +/-3				
Bağıl Nem (%)	55+/-10				
Minimum Aşırı Basınç (in water mmH20)	Basınç>0				
Temiz oda ve çevresi arasında	12 PA				
Temiz oda ve giriş kilidi arasında	5 PA				
<b>Havadan Max. Nb of particles</b>					
Boyut: >0.5µm per foot cube	1 000 000	100 000	10 000	1 000	100
>5 µm per foot cube	NA	700	70	7	0
<b>Partikül Düşüşü (PFO): max. (in ppm/day)</b>	NA	275	52	10	2
<b>Moleküler Düşüşü: max. Moleküler seviye</b>	NA	<0,5 x 10 <sup>-7</sup> g/cm <sup>2</sup>			
<b>Laminer Akışlar (m/s)</b>	NA	NA	NA	27 m/min +/-20%	

Yakın zamanda ülkemizde yatırım maliyetleri Savunma Sanayii Bakanlığı (SSB) ve Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı TÜRKSAT A.Ş. tarafından karşılanan Türkiye’de üretilmesi hedeflenen milli ve yerli uyduların montaj entegrasyon ve testlerin yapılacağı ”Uydu Montaj, Entegrasyon ve Test Merkezi (UMET)” (yeni adı ile Uzay Sistemleri Entegrasyon ve Test Merkezi (USET)) TUSAŞ-TAI bünyesinde 2017 yılında hizmete girmiştir. Yaklaşık 3.800 m<sup>2</sup>’lik 100.000 sınıfı temiz oda ve yer destek ekipmanlarına sahip merkezde, kütlesi 5 tona kadar birden fazla uydunun aynı çatı altında ve eş zamanlı montaj, entegrasyon ve test faaliyetleri gerçekleştirilebilmektedir [Uygur vb., 2015]. Şekil 1’de USET temiz odası görülmektedir.



Şekil 1: USET merkezi temiz oda [TUSAŞ, 2022].

Uydu üretim ve test merkezleri bütün uydu veya uzay aracının yerde ve uzay ortamında maruz kalacağı çevresel şartları simüle etmek için kurulan tesislerdir. Uydu üretim ve test merkezlerinde başlıca akustik test sistemi, titreşim test sistemi, ısıl vakum test sistemi, kompakt anten test sistemi, elektromanyetik uyumluluk test sistemi, fiziksel özellikleri ölçüm test sistemi, mekanik yer destek ekipmanları yer almaktadır [Kahriman, Bulut, Şanlı, Nefes ve Demirel, 2012]. Haberleşme uydularında entegrasyon ve test süreçleri yine temiz oda da yapılmaktadır [Ş. Gülgönül, S. Demirel, M. Bulut ve N. Sözbir, 2010]. Uyduların ısıl vakum testleri yine temiz oda da bulun ısıl vakum odasında yapılmaktadır [M.Bulut, A.Kahriman, N. Sözbir ve Ş. Gülgönül, 2011]. Bu test sistemlerinin hepsi temiz teknolojisine sahip ortamlarda yer almaktadır.

Uydu üretim ve test merkezi temiz odaya ait standartlar mevcut olup Çizelge 2’ ye yer almaktadır.

Çizelge 2: Temiz odalar için standartlar

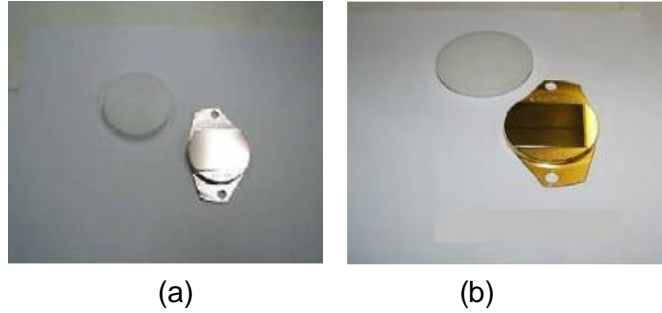
Standart Numarası	Doküman ismi
ISO 14644-1:2015	Temiz odalar ve ilgili kontrollü odalar
ECSS-Q-ST-70-01	Temizlik ve kontaminasyon kontrolü
ECSS-Q-ST-70-02	Uzay malzemesinin taranması için termal vakum gaz çıkışı testi
ESA-PSS-01-705	Kızılötesi spektroskopi ile yüzeylerin organik kontaminasyonunun tespiti
ESA-PSS-01-204	Partikül serpinti ölçümleriyle temiz odalarda partikül kontaminasyonu kontrolü
Federal Standard 209	Temiz odalar
MIL-STD-1246	Askeri standart: Ürün temizlik seviyeleri ve kontaminasyon kontrol programı

Temiz oda ile ilgili hazırlanan ilk standart 1961 yılında Amerikan Hava Kuvvetleri tarafından hazırlanmış olan Teknik El Kitabı (T.O) 00-25-203’dür [Korkmaz, 2019]. Bu el kitabında temiz oda tasarımı ve havada yer alan partiküllerin standartları, çalışma prosedürleri, kıyafet prosedürleri, giriş prosedürleri, malzemelerin temizlikleri, giriş prosedürler gibi prosedürler yer almaktadır [Korkmaz, 2019]. Temiz odaların tasarımları ve işletimleri üzerinde ISO 14644-1’de dahil olmak üzere temiz oda standartlarının çoğunluğunun temeli Federal Standard 209’dan gelmektedir [Korkmaz, 2019]. ECSS-Q-ST-70 uydu ve uzay aracının ısıl vakum testleri özelinde standarttır. Bu standart gerek

uzaya aracının üretiminde gerekse uzay aracında yer alan ekipmanların üretiminde kullanılan malzemelerin gaz çıkışının belirlenmesi için bir ısı vakum testini tanımlamaktadır.

### KONTAMİNASYON

Temiz ortamda farklı türden kontaminasyonlar yer almaktadır. Moleküler (molecular), parçacık (particulate) ve diğer kontaminasyon olarak üç sınıfta değerlendirilmektedir. Parçacık kontaminasyonları hava ve yüzeyden uydu üzerinde yer alan bileşenlere bulaşmaktadır. Parçacık kontaminasyonlar saç, kıyafet ve ayakkabıdan, ölü insan deri hücrelerinden, kozmetik meydana gelmektedir. Malzemelerde gerçekleşen yaşlanma (degradation), korozyon, boyama vb durumlarda parçacık kontaminasyonları oluşmaktadır. Ayrıca herhangi bir malzemenin işlenmesi (machining), delme işleme (drilling) gibi aktiviteler sonucunda da parçacık kontaminasyonları gerçekleşmektedir. Havanın içinde bulunan parçacıkların %99,9 kısmını  $1\mu\text{m}$  küçük boyutta parçacıklar oluşturmaktadır. İnsanın gözünü ancak  $70\mu\text{m}$  büyüklükte parçacıkları görmekte olup insan saçının kalınlığı  $100\mu\text{m}$  civarındadır. Moleküler kontaminasyonlar gözlenebilir boyutları olmayan hava veya yüzey kirliliği olarak ifade edilmektedir. Moleküler kontaminasyonlar genellikle gaz, buhar, sıvı veya madde yolu ile bulaşmaktadır. Moleküler kontaminasyonlar  $10^{-6}\text{ g/cm}^2$  üstünde görülmektedir. Uydu üretim ve test merkezinde temiz oda da kullanılan kontaminasyon sensörleri Şekil 3'de görülmektedir.

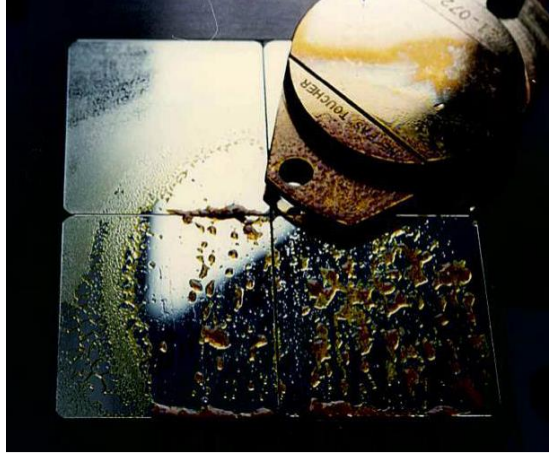


Şekil 3: Kontaminasyon sensörleri (a) partiküller (b) moleküler.

Diğer kontaminasyonlar olarak ESD (Electrical Static Discharges), gürültü, UV, IR veya biyolojik yol ile de oluşmaktadır. Bakteri, virüs, uçan böcek biyolojik kontaminasyonlardır.

### KONTAMİNASYON KONTROLÜ

Bir uydu veya uzay aracında yer alan ekipman üzerindeki herhangi bir parçacık veya kalıntı, sistemin performansını düşürme potansiyeline her zaman sahiptir. Özellikle optik ekipmanların yer aldığı uydularda kontaminasyon çok daha önem arz etmektedir. Uydularda optik sistemlerde kullanılan lenslerin üzerinde oluşacak toz veya kalıntılar performansı önemli ölçüde düşürme potansiyeline sahiptir. Benzer şekilde, tek katmanlı yalıtım battaniyesi (Single Layer Insulation-SLI), çok katmanlı yalıtım battaniyeleri (Multi Layer Insulation- MLI), optik güneş yansıtıcıları (Optical Solar Reflector-OSR) ve ikinci yüzey ayna (Second Surface Mirror-SSM) yüzeylerindeki parçacıklar veya kalıntılar, performansı etkileyebilecek şekilde uzaydaki ısıyı emme veya yansıtma potansiyeline sahiptir. Şekil 2'de OSR üzerinde moleküler kontaminasyon görülmektedir. Toz ve kalıntılar ayrıca uydu üzerinde yer alan hareketli parçaları veya diğer operasyonel cihazları potansiyel olarak devre dışı bırakabilir. Ayrıca karmaşık elektronik aksamılarına sahip ekipmanları aşındırabilir ve etkileyebilir.



Şekil 2: Optik güneş reflektör üzerinde moleküler kontaminasyon.

Bu nedenle temiz oda, havalandırma deliklerinden HEPA filtreli havayı besleyerek ve zemin seviyesindeki havalandırmalardan kirli havayı çekerek istenmeyen parçacıkları filtreler. Temiz odalar ayrıca dış havanın içeri girmesini önleyen hava kilitleri ile pozitif basınçta tutulur.

Temiz odaya giren herkes uygun şekilde giyinmiş olmalıdır. Tek kullanımlık saç fileleri, sakal burunları ve galoşlarla birlikte yeniden kullanılabilir aklanmış önlükler kullanılmaktadır. Bileşenleri insan yağlarından ve bazı yüzey malzemeleri için aşındırıcı olabilecek ölü deri parçacıklarından korumak için de eldivenler giyilmektedir. İnsanların giriş ve çıkışlarının yoğun olduğu yerlerde zeminlerde yer alacak olan parçacıkların ve döküntülerin yakalanması için zeminde yapışkan paspaslar kullanılmaktadır.

Temiz oda içerisinde elektrostatik kuvvetlerin ve deşarjların (Electrostatic Discharge-ESD) önlenmesi de önemlidir. ESD'ler uydularda yer alan ekipmanlara toz çekebilir. Ayrıca ESD olduğu durumlarda, metal erimesi, bağlantı bozulmasına veya oksit arızalarına neden olup özellikle elektronik devrelere zarar verebilir. Ambalaj malzemeleri, çalışma yüzeyleri veya makine yüzeyleri ile temas veya elle ile temas yoluyla ESD'ye duyarlı bir öge üzerinde statik yük de birikebilir. ESD Birliği endüstri standartları, statik yük azaltma ve kontrol teknikleri oluşturan üreticilere bir kılavuz sunmaktadır.

İnsan vücudu bir statik iletken olabilir. Antistatik önlükler, elektronları topraklayarak yüzeylerde statik birikmesini önleyen özel iç içe ipliklerle tasarlanmıştır. Elektronları topraklamak için yaygın olarak kullanılan iletkenler alüminyum ve karbondur. Temiz oda zemini, insanlar için birincil zemin veya toprak olarak kullanılabilir. Alternatif olarak, topraklama personelinin başka bir yolu olan bilek kayışlarının kullanımı ile birlikte statik enerji tüketen bir zemin kullanılabilir. Elektronik ekipmanlar üzerinde çalışırken çalışan personel yük üzerindeki bir kabloya topraklayan bilek kayışları kullanırlar.

Temiz odada metallerin kullanımı dikkate alınması gereken bir diğer faktördür. Metal bıyıklanması dediğimiz metalik bir yüzeyden küçük, ipliksi kılların kendiliğinden büyümesini içeren kristalli metalurjik bir fenomen kısa devrelere ve elektrikli ekipmanlarda ark oluşumuna neden olabilir. Bu nedenle bundan kaçınılmalıdır. Galaxy IV telekomünikasyon uydusunun 1998 yılında metal bıyıklanma nedeni ile kısa devreler nedeniyle devre dışı kaldığı ve kaybolduğu iddia edilmektedir.

Yükü destekleyen yapının çoğu oksidasyonu önlemek için alüminyum ile kaplıdır. Aletler ayrıca kaplanmıştır ve tümü CE işaretlidir. Ekipman, herhangi bir elektronik paraziti önlemek için uydu tarafından kullanılan frekansta radyasyon yaymadığından emin olmak için test edilir. Ağır kaldırma veya transfer için temiz oda içinde kullanılan elektrikli araçlar, özel olarak tasarlanmış temiz tekerleklerle ve ESD topraklamasına sahiptir.

Temiz odada, silikon dolgu macunları ayrı bir temiz oda alanı içindeki ayrı muhafaza kabinlerinde tutulmaktadır. Malzemelerden uçucu maddelerin salınması olan gaz çıkışı da potansiyel bir sorun

olabilir. Bu nedenle plastik gibi malzemelerin temiz odada kullanılmadan önce uygunluk açısından test edilmesi gerekir.

Temiz oda ısıtma, havalandırma ve soğutma sistemi (Heating, Ventilation and Air Conditioning-HVAC) 7/24 çalışır durumdadır. Temiz odada çalışanların temiz oda prosedürleri konusunda eğitim almakta ve temiz oda kurallarına uymak zorundadır. Temiz odada sorumlu yetkili personel, partikül sayımlarını izlemek için mobil ekipman kullanır. Bir uydu temiz odaya girdiğinde veya ayrıldığında sıcaklık, basınç ve hava temizliğini yeniden dengelemek için 24 saat bırakılır. Bileşenler üzerindeki yoğunlaşma, temiz odada istenmeyen bir diğer durumdur. Bu dengeyi değiştirmemek için herhangi bir zamanda temiz odada çalışan kişi sayısı sınırlıdır.

### UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Hem temiz oda kullanımı / işletilmesi hem de kontaminasyon kontrolü birbirleriyle uyumlu belirli planlar dahilinde yürütülür. Kontaminasyon ve temizlik kontrol planı; uydu, altsistem veya ekipman seviyesinde kontrol altında tutulması ve gözlenmesi gereken önleyici ağırlıklı normları barındırır. Bu planlar genelde uydu üreticileri bünyesinde spesifik kontaminasyon ve temizlik kontrol birimleri bünyesindeki mühendisler tarafından hazırlanır. Teknik otorite ve kalite-güvence birimlerinin onay ve yetkisiyle uygulanır. Uydu veya ekipmana özgü özel şartlar da plan kapsamına dahil edilir. Her bir uydu üretimi için muhakkak güncel bir kontaminasyon ve kontrol planı oluşturulur ve bu planda dahilinde ilgili kirlilik önleyici kısıt, kural ve tavsiyeler kapsanır. Tasarım, üretim, nakliye ve entegrasyon gibi aşamalarında daha önceki projelerde yaşanan tecrübeler ve öğrenilmiş derslerin de söz konusu planda yer alması özellikle benzer sorunların tekrar yaşanmaması adına faydalı olabilmektedir.

### SONUÇ

Ülkemizde özellikle uzay ve uydu teknolojileri konusunda çalışan akademisyen, mühendis ve tekniklerin sayısı uzay ve uydu sektörüne son yıllarda yapılan yatırımlar sayesinde artmaktadır. Uydu üretim ve test merkezlerinde çalışacak olan kişiler temiz ortam şartlarında bulunmaktadır. Bu sebeple uydu üretim ve test merkezlerinde uydu ve uzay projelerinde çalışacak olan personellerin temiz oda ortamı şartları hakkında bilgi sahibi olabilmesi ve temizlik faktörünün öneminin farkındalığını artırmak için bu bildiri hazırlanmıştır. Ayrıca daha önce uydu projeleri çalışmalarını kapsamında temiz oda uygulamaları hakkında kazanılmış olan tecrübeler paylaşılmıştır.

### Kaynaklar

Bulut, M., Kahrıman, A., Sözbir, N., ve Gülgönül, Ş., 2011. *Haberleşme Uydularında Isıl Vakum Testler*, ULIBTK'11 18. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Zonguldak, 07-10 Eylül.

Gülgönül, Ş., Demirel, S., Bulut, M ve Sözbir, N., 2010. *Haberleşme Uydularında Entegrasyon ve Test Süreçleri*, UHUK-2010-127, III. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Eskişehir, 16-18 Eylül.

Kahrıman, A., Bulut, M., Şanlı, E., Nefes, M. M., ve Demirel, S., 2012. *Uydu Test Merkezi ve Testler.*, IV. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Hava Harp Okulu, İstanbul, 12-14 Eylül.

Korkmaz, M.K., 2019. *Temiz Oda Teknolojilerinde Belirleyici Parametreler.*, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi. Mayıs 2019, Antalya.

NASA <https://www.nasa.gov/offices/setmo/articles/cleanroom-tech-key-to-success-in-space>

NewScientist <https://www.newscientist.com/article/mg12617131-200-the-forgotten-rag-that-brought-down-ariane/>

TUSAŞ 2022 <https://www.tusas.com/en/products/space/manufacturing-assembly-integration-test-centers/space-systems-assembly-integration-and-test-center>

Türk Standardı, TS 11605 EN ISO 14644-1, Temiz Odalar ve Bu Odalarda Birlikte Kontrol Edilen Ortamlar, Bölüm 1- Hava Temizliğinin Sınıflandırılması Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Mayıs 2001

Uyur, A. B., Haktanir, O.O., Yılmaz, F., Isik, H.G., ve Asansu, Z., 2015. *Turkey's New Assembly, Integration and Test (AIT) Center and Its Comparison with AIT Centers in Europe.*, Recent Advances in Space Technologies (RAST), 7th International Conference, pp. 71–74.