



Çölleşme İle Mücadelede Havadan Dağıtılan Biyobozunur Akıllı Tohum Kapsülleri

DEMOKRATİK KONGO CUMHURİYETİ ULUSLARARASI MAARİF OKULLARI

ÇÖLLEŞME İLE MÜCADELEDE HAVADAN DAĞITILAN BİYOBOZUNUR AKILLI TOHUM KAPSÜLLERİNİN TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ

Proje Adı: SkyXroot Maarif

Alan: Çevre Mühendisliği / Biyomühendislik / Mekanik Tasarım

Anahtar Kelimeler: Çölleşme, havadan tohumlama, biyobozunur kapsül, aerodinamik tasarım, parametrik modelleme, tohum dağıtım sistemi, kargo uçağı ve dronlar

1. PROJE ÖZETİ

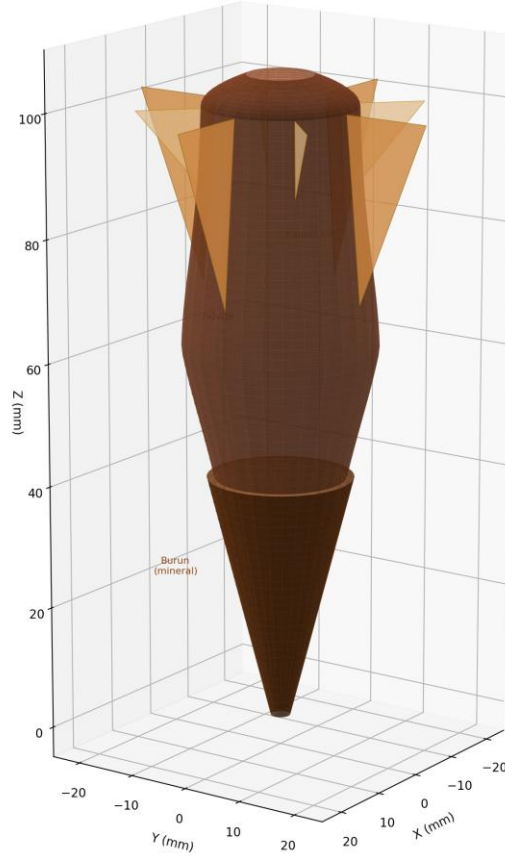
Çölleşme, küresel ölçekte her yıl 12 milyon hektar verimli arazinin kaybedilmesine neden olan ve 3,2 milyar insanı doğrudan etkileyen kritik bir çevre sorunudur. Geleneksel ağaçlandırma yöntemleri; yüksek işgücü maliyeti, ulaşılması güç araziler ve düşük tutma oranları nedeniyle bu sorunla mücadelede yetersiz kalmaktadır.

Bu proje, büyük kargo uçaklarından onbinlerce adet bırakılarak geniş ve ulaşılması zor alanlara küresel ölçekte tohum dağıtımı yapabilen, biyobozunur, akıllı bir tohum kapsülü (SkyXroot) tasarlamayı ve geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Kapsül, torpido formunda aerodinamik bir profile sahip olup 4+4 stabilizasyon kanatçığı (4 büyük ana kanat + 4 küçük sürtünme kanadı) ile düşüş sırasında yönelim kontrolü sağlar, sivri burun geometrisiyle sertleşmiş çöl toprağına saplanır ve çarpma anında iç mekanizması tetiklenerek hidrojel paketini yırtıp tohuma nem ulaştırır. Gövde malzemesi biyobozunur olup ilk yoğun yağıştan sonra 48-72 saat içinde çözünerek toprağına karışır ve filizlenmeye alan açar.

Tasarım, Python tabanlı parametrik modelleme altyapısıyla geliştirilmiş, FDM 3D baskı teknolojisiyle prototiplenmiş ve üç farklı ölçekte (0.5x, 1x, 2.5x) üretilerek doğrulanmıştır. Proje kapsamında kapsülün aerodinamik performansı, toprağına saplanma kabiliyeti, çarpma-tetiklemeli jel salınım mekanizması, snap-fit kapak sistemi ve malzeme çözünme kinetiğı tasarlanmış ve test edilmiştir.

SkyXroot Kapsül — 3D Dış Görünüm



Şekil 1: SkyXroot akıllı tohum kapsülünün 3D dış görünümü — torpido profilli gövde, 4+4 kanatçık ve konik burun geometrisi.

2. PROJENİN AMACI

2.1 Temel Amaç

Çölleşme ile mücadelede kullanılmak üzere, havadan dağıtımına uygun, toprağa saplanabilen, çarpma anında aktive olan iç mekanizmasıyla tohumu nemlendiren ve zamanla biyolojik olarak çözünerek filizlenmeye izin veren akıllı bir tohum kapsülü tasarlamak, prototiplemek ve performansını doğrulamak.

2.2 Alt Amaçlar

- 1. Aerodinamik Tasarım:** Düşüş sırasında kararlı yönelim sağlayan, terminal hıza ulaştığında burun aşağı konumunu koruyan torpido profilli bir kapsül geometrisi geliştirmek.
- 2. Penetrasyon Optimizasyonu:** Farklı toprak sertlik derecelerinde yeterli saplanma derinliği sağlayacak burun açısı, ağırlık dağılımı ve çap/boy oranını belirlemek.
- 3. Çarpma-Tetiklemeli Mekanizma:** Kapsülün toprağa çarpma anındaki kinetik enerjiyi kullanarak hidrojel paketini yırtan ve tohumu nem ulaştıran pasif (enerjisiz) bir iç mekanizma tasarlamak.

4. Biyobozunur Malzeme Uyumu: Kapsül gövdesinin darbe dayanımı, çözünme süresi ve çevresel uyumu arasındaki dengeyi optimize etmek.

5. Üretilebilirlik: Seri üretim öncesi FDM 3D baskı ile hızlı prototipleme yapılarak tasarımın doğrulanması; farklı ölçeklerde (0.5x, 1x, 2.5x) üretilebilirliğin kanıtlanması.

6. Modüler Yapı: Farklı toprak tiplerine, tohum boyutlarına ve iklim koşullarına uyarlanabilecek parametrik bir tasarım altyapısı kurmak.

2.3 Hipotez

"Torpido profilli, kanatçık-stabilizasyonlu, çarpma-tetiklemeli iç mekanizmaya sahip biyobozunur bir tohum kapsülü; havadan bırakıldığında (i) aerodinamik kanatçıklar sayesinde burun-aşağı yönelimini koruyarak hedef alana isabet edebilir, (ii) sivri burun geometrisi ve optimum ağırlık dağılımıyla sertleşmiş çöl toprağına saplanabilir, (iii) çarpma anında pasif mekanizması tetiklenerek tohumu nemlendirebilir ve (iv) biyobozunur gövdesi çözünerek filizlenmeye olanak sağlayabilir."

3. GİRİŞ VE PROBLEM TANIMI

3.1 Çölleşme Sorunu ve Boyutu

Çölleşme, Birleşmiş Milletler Çölleşme ile Mücadele Sözleşmesi'ne (UNCCD) göre kurak, yarı kurak ve yarı nemli bölgelerde iklim değişikliği ve insan faaliyetleri başta olmak üzere çeşitli faktörler sonucunda toprağın verimliliğini kaybetmesi sürecidir.

Küresel boyut:

- Dünya kara yüzeyinin yaklaşık %40'ı kurak bölgelerden oluşmaktadır.
- Her yıl tahminen 12 milyon hektar verimli arazi çölleşme nedeniyle kaybedilmektedir — bu, dakikada yaklaşık 23 hektar demektir.
- 3,2 milyar insan çölleşmenin doğrudan etkisi altındadır.
- Çölleşme kaynaklı ekonomik kayıp yılda tahmini 42 milyar USD'dir.
- 2050 yılına kadar iklim göçmenlerinin 200 milyonu aşacağı tahmin edilmektedir ve çölleşme bu göçün başlıca nedenlerinden biridir.

Sorun belirli bir ülke ya da bölgeyle sınırlı değildir; Afrika'dan Orta Asya'ya, Avustralya'dan Güney Amerika'ya kadar tüm kıtalarda toprak kaybı yaşanmaktadır. Bu nedenle SkyXroot, herhangi bir yerel coğrafyayı değil tüm dünyayı hedef alan küresel bir çözüm olarak tasarlanmıştır.

3.2 Mevcut Ağaçlandırma Yöntemlerinin Yetersizliği

Geleneksel ağaçlandırma yöntemleri şu kısıtlarla karşı karşıyadır:

Yöntem	Avantaj	Dezavantaj
Elle dikim	Yüksek tutma oranı (%60-80)	Çok yavaş (1-2 ha/gün/kşi), yüksek işgücü maliyeti
Makinalı dikim	Orta hız	Düz arazi gerektirir, eğimli/kayalık alanlar uygun

		değil
Tohum serpmeye	Geniş alan, düşük maliyet	Çok düşük tutma oranı (%1-5), kuşlar ve rüzgâr kaybı
Fidan dikimi	En yüksek tutma oranı	En yüksek maliyet, lojistik zorluk, su gereksinimi

Ortak sorunlar:

- **Erişim:** Dağlık, kayalık, savaş bölgesi, mayınlı alan gibi ulaşılamaz bölgelerde ağaçlandırma yapılamıyor.
- **Hız:** İklim değişiminin hızına yetişilemiyor — kaybedilen alan, ağaçlandırılan alandan çok fazla.
- **Maliyet:** Geleneksel el dikimi hektar başına 1.000-5.000 USD arasında maliyetlidir.
- **Ölçek:** Manuel yöntemlerle milyonlarca hektar ağaçlandırmak nesiller alır.

3.3 Neden Havadan Tohumlama?

Havadan tohumlama, yukarıdaki kısıtlamaların büyük bölümünü çözmektedir:

- **Hız:** Tek bir kargo uçağıyla tek sortide onbinlerce tohum kapsülü dağıtılabılır.
- **Erişim:** İnsanın ulaşamadığı, tehlikeli veya uzak bölgelere kolayca erişim.
- **Maliyet:** Hektar başına maliyet geleneksel dikimin %10-15'ine düşürülebilir.
- **Ölçek:** Kargo uçaklarıyla günde binlerce hektar kapsanabilir.
- **Otomasyon:** GPS ile hassas konumlandırma, uçuş rotası planlama ve haritalama entegrasyonu.

Ancak mevcut havadan tohumlama yöntemlerinin kritik bir sorunu vardır: **çıplak tohum serpmeye, tutma oranının %1-5 gibi çok düşük kalmasına neden olur.** Tohumlar kuş/kemirgen tüketimine, rüzgâr dağılımına, yüzey akışıyla sürüklenmesine ve nem yetersizliğine karşı korumasızdır.

SkyXroot'un çözümü: Tohumu biyobozunur bir kapsülle korumak, penetrasyon mekanizmasıyla toprağı gömmek ve çarpma-tetiklemeli hidrojel sistemiyle kritik ilk nemlenmeyi sağlamak.

3.4 Projenin Özgün Değeri

SkyXroot'u mevcut çözümlerden ayıran temel yenilikler:

1. **Çarpma-Tetiklemeli Pasif Mekanizma:** Elektronik veya enerji kaynağı gerektirmeyen, tamamen mekanik bir jel salınım sistemi. Çentikli iç yüzey, çarpma anında ataletle hareket eden jel paketini yırtarak tohuma nem ulaştırır.
2. **Bütünleşik Fonksiyonlar:** Tek bir kapsülde koruma + penetrasyon + nemlendirme + besin (mineral burun) + biyobozunma fonksiyonlarının birleştirilmesi.
3. **Parametrik Tasarım:** Python tabanlı tam parametrik altyapı sayesinde farklı tohum boyutlarına, toprak tiplerine ve iklim koşullarına hızla uyarlanabilir tasarım.

4. Segmentli Kanatçık Birleşimi: Torpido profiline tam uyum sağlayan segmentli kanatçık tasarımı (alt finler: 15, üst finler: 8 segment) — gövde eğriliğinin her noktasında 2mm penetrasyon ile yapısal bütünlük.

5. Seri Üretim & Kaset Entegrasyonu: Kapsüller fabrikada tohum, hidrojel ve minerallerle doldurulmuş halde seri üretilir. Büyük kasetlere entegre edilerek kargo uçaklarına yüklenir — sahada dolum gerekmez. Snap-fit kapak otomatik mühürleme sağlar.

4. LİTERATÜR TARAMASI

4.1 Çölleşme İstatistikleri ve Küresel Etkiler

Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) verilerine göre çölleşme, dünya genelinde 100'den fazla ülkeyi etkileyen ve her yıl hızlanan bir süreçtir. IPCC'nin Arazi Kullanımı Özel Raporu (2019), iklim değişikliğinin çölleşmeyi hızlandığını, artan sıcaklıklar ve değişen yağış düzenlerinin toprak nemini azalttığını ortaya koymuştur.

Afrika kıtasında Sahra çölünün güney sınırı yılda ortalama 48 km güneye ilerlemektedir. Sahel bölgesinde son 50 yılda yağış miktarı %25-40 oranında azalmıştır. Çin'de Gobi Çölü, yılda yaklaşık 3.600 km² genişlemekte ve Pekin'e 70 km mesafeye kadar yaklaşmıştır.

4.2 Havadan Tohumlama Teknolojileri

Havadan tohumlama kavramı yeni değildir. 1930'larda ABD'de Civilian Conservation Corps, uçaklardan tohum serpmeye denemeleri yapmıştır. İkinci Dünya Savaşı sonrasında da askeri uçaklar kullanılarak geniş alanlara havadan tohumlama denemeleri yapılmıştır. SkyXroot, bu geleneği büyük kargo uçaklarıyla küresel ölçeğe taşımayı hedeflemektedir.

Temel yaklaşımlar:

- Tohum Bombası (Seed Ball):** Masanobu Fukuoka'nın 1938'de geliştirdiği kil+kompost+tohum karışımı toplar. Basit ve ucuz, ancak penetrasyon yeteneği yok; yüzeyde kalır, kuşlara açık.
- Tohum Pod'u (Seed Pod):** Biyobozunur kapsül içine yerleştirilmiş tohum + besin karışımı. Koruma sağlar ancak toprağa gömülme mekanizması yetersizdir.
- Dart/Flechette Tipi:** Sivri uçlu, toprağa saplanabilen tasarımlar. Penetrasyon avantajı var, ancak genellikle iç mekanizma (nemlendirme, besin salınımı) içermez.
- SkyXroot Yaklaşımı:** Dart penetrasyonu + kapsül koruması + çarpma-tetiklemeli nemlendirme + mineral besin + biyobozunma — tüm fonksiyonları tek yapıda birleştirir.

4.3 Mevcut Ticari Çözümler

Şirket	Yöntem	Dağıtım Kapasitesi	Menzil	Ülke
Tohum Topu	Manuel atım	~1.000/gün	Yerinde	Geleneksel
Flash Forest	Drone (70 kg) + biyo pod	~100.000/gün	~30 km	Kanada
AirSeed	Drone sürüsü +	~250.000/gün	~30 km	Avustralya

Technologies	tohum kapsülü			
Land Life Company	Cocoon (su korumalı)	Manuel dikim	Yerinde	Hollanda
SkyXroot	Kargo uçağı + akıllı kapsül	50.000+/sorti	5.000+ km	Küresel

Mevcut çözümlerin ortak eksikleri:

- Çoğunda toprağa penetrasyon mekanizması yoktur.
- Çarpma anında aktive olan pasif nemlendirme sistemi hiçbirinde bulunmamaktadır.
- Tam parametrik, açık kaynaklı tasarım altyapısı sunan çözüm yoktur.
- Mevcut çözümler drone tabanlı olup sınırlı taşıma kapasitesine sahiptir; büyük kargo uçaklarıyla küresel ölçekte onbinlerce kapsül dağıtımı hiçbirinde planlanmamıştır.

4.4 Biyobozunur Malzemeler

Tohum kapsülü uygulamaları için değerlendirilen başlıca biyobozunur polimer grupları:

Malzeme	Bozunma Süresi	Mekanik Dayanım	Maliyet	Uygunluk
PLA (Polilaktik Asit)	6-24 ay	Yüksek, kırılgan	Düşük	Prototipler için iyi, çözünme yavaş
PHA (Polihidroksialkanoat)	1-6 ay	Orta-yüksek, sünek	Yüksek	İdeal bozunma, pahalı
Nişasta bazlı	1-4 hafta	Düşük-orta	Çok düşük	Hızlı çözünme, mekanik zayıf
Nişasta-PLA karışım	2-8 hafta	Orta	Düşük	İyi denge
Selüloz asetat	1-2 ay	Orta	Orta	İyi aday

SkyXroot kapsülünün hedef çözünme süresi **48-72 saat** (ilk yoğun yağmur sonrası) olduğundan, saf PLA çok yavaş kalır. Nişasta-PLA karışımı veya nişasta bazlı kompozitler en uygun adaylardır.

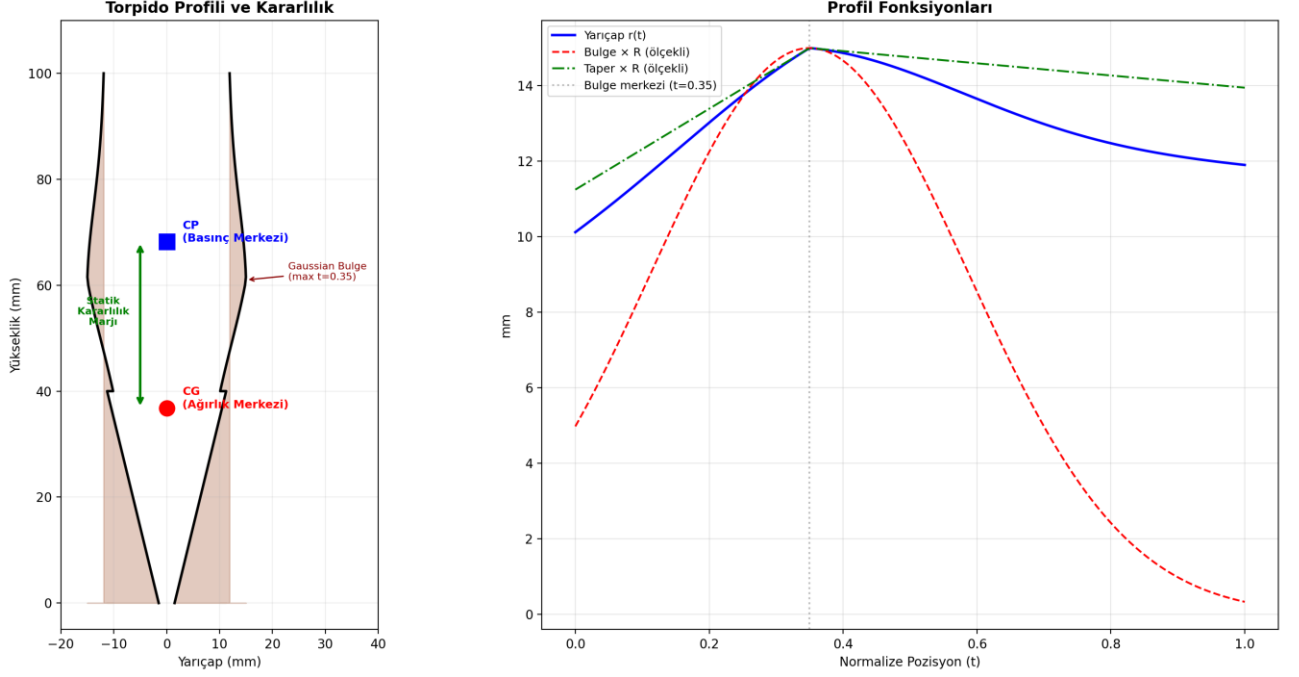
4.5 Aerodinamik Kapsül/Dart Geometrileri

Havada kararlı düşüş sağlayan projektıl tasarımları uzun bir mühendislik geçmişine sahiptir:

- **Finli Dart (Flechette):** Arka kanatçıklar aerodinamik sürüklenme merkezi (CP) ağırlık merkezinin (CG) arkasına taşır → statik kararlılık. Boy/çap oranı genellikle 3:1 – 5:1.
- **Torpedo Profil:** Aerodinamik sürüklenme katsayısı (Cd) düşüren akıcı form. Burun bölgesinde düşük basınç sürüklenmesi, gövdede laminar akış.
- **Gaussian Bulge Profil:** Gövdenin ağırlık merkezi bölgesinde kontrollü şişkinlik — iç hacmi artırır, CG konumunu optimize eder.

SkyXroot, **torpedo profil + Gaussian bulge + 4+4 kanatçık** kombinasyonunu kullanmaktadır. Bu, aerodinamik kararlılık ile iç hacim optimizasyonu arasında ideal dengeyi sağlar.

SkyXroot — Aerodinamik Profil ve Stabilite Analizi



Şekil 2: SkyXroot kapsülünün torpedo profili, Gaussian bulge fonksiyonu ve CG/CP konumlarının gösterimi. CG'nin CP'nin önünde kalması statik kararlılık sağlar.

4.6 Literatürdeki Boşluk

Mevcut literatür ve ticari çözümler incelendiğinde şu boşluklar tespit edilmiştir:

- 1. Çarpma-tetiklemeli mekanizma yokluğu:** Hiçbir mevcut çözümde, toprağa çarpma anının kinetik enerjisini kullanarak pasif olarak tetiklenen bir nemlendirme/besin salınım mekanizması bulunmamaktadır.
- 2. Penetrasyon-koruma entegrasyonu:** Mevcut dart tipi tasarımlar iç fonksiyon barındırmaz; pod tipi tasarımlar ise penetrasyon kabiliyetinden yoksundur. İkisini birleştiren tasarım yoktur.
- 3. Parametrik açık tasarım:** Ticari çözümlerin hiçbiri açık kaynaklı, parametrik olarak uyarlanabilir bir tasarım altyapısı sunmamaktadır.
- 4. Mineral burun konsepti:** Penetrasyon ucunun aynı zamanda çözünerek toprağa besin (demir, fosfor) sağlaması konsepti literatürde yer almamaktadır.

Bu proje, yukarıdaki dört boşluğu aynı anda doldurmayı hedeflemektedir.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1 Tasarım Yöntemi

5.1.1 Parametrik 3D Modelleme

Kapsül geometrisi, tam parametrik olarak Python programlama dili ile modellenmiştir. Kullanılan kütüphaneler:

- **NumPy:** Matematiksel hesaplamalar, trigonometrik fonksiyonlar, halka (ring) ve yüzey oluşturma.
- **numpy-stl:** STL mesh oluşturma, birleştirme ve kaydetme.

Parametrik yaklaşımın avantajları:

- Herhangi bir boyut parametresini değiştirerek yeni geometri üretme.
- Tekrarlanabilir, versiyonlanabilir tasarım.
- Otomatik mesh oluşturma — CAD yazılımı gerektirmez.
- Ölçek faktörü ile farklı boyutlarda üretim.

5.1.2 Torpido Profil Geometrisi

Kapsül gövdesi, torpido profilinden türetilmiş bir devrim yüzeyidir. Profil fonksiyonu:

$$\text{body_radius_at}(t) = \text{outer_radius} \times \text{taper}(t) \times (0.85 + 0.15 \times \text{bulge}(t))$$

Burada:

- **t:** Gövde boyunca normalize pozisyon (0 = burun tarafı, 1 = kuyruk)
- **bulge(t):** Gaussian şişkinlik fonksiyonu: $\exp(-((t - 0.35) \times 3.0)^2)$
- **taper(t):** Daralma fonksiyonu (alt: 0.75, üst: 0.93)

Temel boyut parametreleri:

Parametre	Değer	Açıklama
Kapsül çapı	30.0 mm	Maksimum dış çap
Burun yüksekliği	40.0 mm	Konik burun bölgesi
Gövde yüksekliği	60.0 mm	Silindirik-torpido gövde
Toplam boy	100.0 mm	Burun + gövde
Burun uç yarıçapı	1.5 mm	Sivri uç (küt değil)
Duvar kalınlığı	2.5 mm	Nominal kabuk kalınlığı
Kavite çapı	20.0 mm	İç boşluk çapı
Boy/çap oranı	3.33:1	Aerodinamik stabilite aralığında

Gaussian Bulge (Şişkinlik):

Şişkinlik merkezi $t = 0.35$ konumuna yerleştirilmiştir. Bu, ağırlık merkezini (CG) kapsülün ön %35'ine konumlandırarak aerodinamik basınç merkezinin (CP) arkasında kalmasını sağlar. Böylece kapsül düşüş sırasında doğal olarak burun-aşağı yönelimini korur.

5.1.3 Segmentli Kanatçık Tasarımı

Kapsülde iki tür kanatçık bulunmaktadır:

Alt Stabilizasyon Kanatçıkları (Ana Finler):

- Adet: 4 (90° aralıklı)
- Yükseklik: 30.0 mm
- Genişlik: 14.0 mm (tabandan uca doğru genişler)
- Kalınlık: 1.5 mm
- Konum: Gövdenin üst 30 mm'si ($z = 70\text{--}100$ mm, kuyruk bölgesi)

Üst Sürtünme Kanatçıkları:

- Adet: 4 (45° offset ile)
- Yükseklik: 12.0 mm
- Genişlik: 10.0 mm
- Kalınlık: 1.5 mm
- Konum: Gövdenin üst 12 mm'si

Segmentli Birleşim Çözümü:

İlk tasarımda kanatçıkların iç kenarı düz bir çizgi olarak modellenmişti. Ancak gövde torpido profiline sahip olduğundan, ara yüksekliklerde kanatçık ile gövde arasında 0.2-0.4 mm boşluk oluşuyordu. Bu boşluk, 3D baskı dilimleyicisinin (slicer) kanatçıkları ayrı cisim olarak yorumlamasına ve baskıda gövdeden ayrılmasına neden oldu.

Çözüm: Her kanatçık, yüksekliği boyunca segmentlere bölünmüştür (alt finler: 15 segment, üst finler: 8 segment). Her segmentin iç kenarı, o yükseklikteki gerçek gövde yarıçapından 2 mm (FIN_PENETRATION) içeri sokularak gövde mesh'ine fiziksel olarak nüfuz eder. Bu sayede:

- Slicer, kanatçığı gövdenin parçası olarak görmektedir.
- Baskıda kanatçık-gövde birleşimi kusursuzdur.
- Torpido profilinin eğriliğine her noktada uyum sağlanır.

5.1.4 Snap-Fit Kapak Mekanizması

Kapsülün üst ucu, tohum ve jel dolumu için açık bırakılmış; dolum sonrası takılan bir snap-fit kapak ile kapatılmaktadır.

Kapak bileşenleri:

- **Dudak (Lip):** Gövde iç kavitesine oturan silindirik kısım (derinlik: 5.0 mm)
- **Çıkıntı (Ridge):** Dudak üzerindeki halka şeklinde snap-fit çıkıntısı (yükseklik: 1.2 mm, derinlik: 0.5 mm)
- **Kubbe (Dome):** Kapağın üst kısmını kapatan kubbe (yükseklik: 3.0 mm)

Gövde tarafındaki eşleşme:

- **Oluk (Groove):** Çıkıntının oturduğu halka oluk (derinlik: 0.35 mm)
- **Dudak boşluğu:** 0.25 mm (tolerans payı)

Tolerans mühendisliği:

- Oluğun minimum duvar kalınlığı kısıtından (MIN_WALL) muaf tutulması gerekmektedir. Aksi halde 2.0 mm duvar sınırı, 0.35 mm'lik oluğu 0.016 mm'ye ezmekteydi.
- **Çözüm:** Oluk bölgesinde $r_{max} = dış_yarıçap - (MIN_WALL - snap_groove_depth)$ formülü uygulanarak duvar kalınlığı oluk kadar ince olmasına izin verilmiştir.

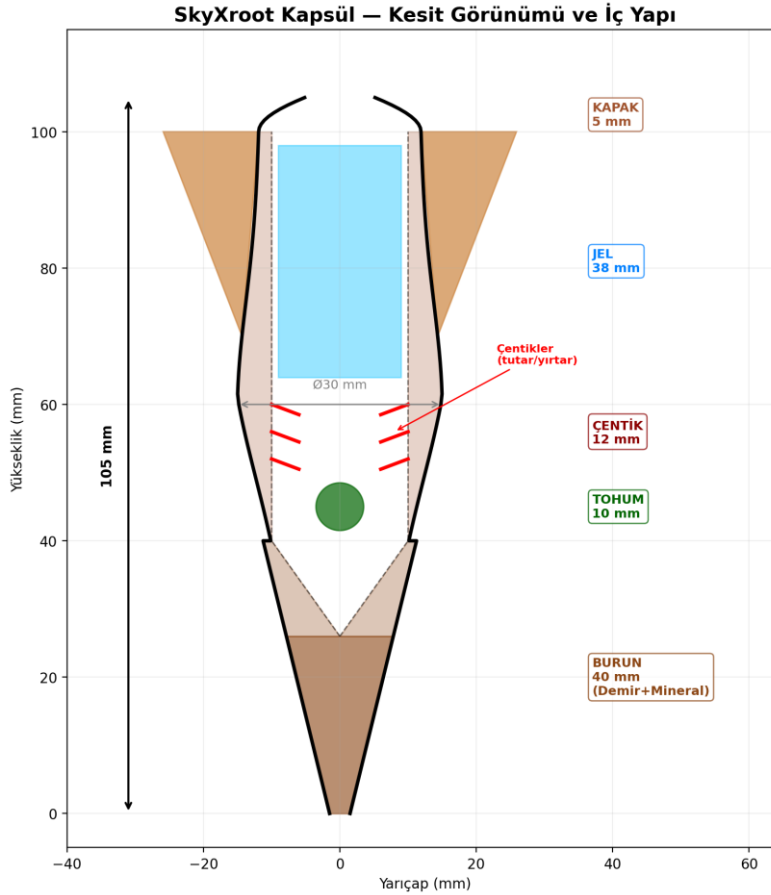
5.2 İç Mimari ve Çarpma Mekanizması

5.2.1 Katmanlı İç Yapı

Kapsülün tek sürekli iç boşluğu, fonksiyonel olarak dört bölgeye ayrılmıştır (fiziksel bariyer yoktur):

Kapak (snap-fit)	$z = 100 \text{ mm}$
JEL BÖLGESİ (hidrojel paketi)	$z = 62 - 95 \text{ mm}$ 33 mm yükseklik
ÇENTİKLİ BÖLGE (8 çentik \times 3 sıra)	$z = 50 - 62 \text{ mm}$ 12 mm yükseklik
TOHUM BÖLGESİ (tohum oturma yeri)	$z = 40 - 50 \text{ mm}$ 10 mm yükseklik
BURUN (dolu) (demir tozu+mineral)	$z = 0 - 40 \text{ mm}$

Burun bölgesinin dolu olması, ağırlık merkezini (CG) kapsülün ön bölgesine çeker ve aerodinamik kararlılığı sağlar.



Şekil 3: Kapsülün kesit görünümü — burun (demir+mineral), tohum bölgesi, çentik bölgesi, hidrojel paketi ve kanatçık konumları.

5.2.2 Çarpma-Tetiklemeli Jel Salınım Mekanizması

Bu proje için geliştirilen özgün mekanizma şöyle çalışır:

Hazırlık (dolum):

1. Kapsülün burun bölgesi zaten dolu (mineral kompozit).
2. Tohum, tohum bölgesine ($z = 40-50$ mm) yerleştirilir.
3. Hidrojel paketi, çentikli bölgenin üstüne ($z = 62+$ mm) konulur.
4. Hidrojel, çentiklerin sürtünme kavramasıyla yerinde tutulur.
5. Kapak takılır.

Düşüş sırası:

- Kanatçıklar sayesinde kapsül burun-aşağı yönelimi korur.
- Terminal hıza ulaşır ($\sim 15-25$ m/s tahmini, kütleyle bağlı).

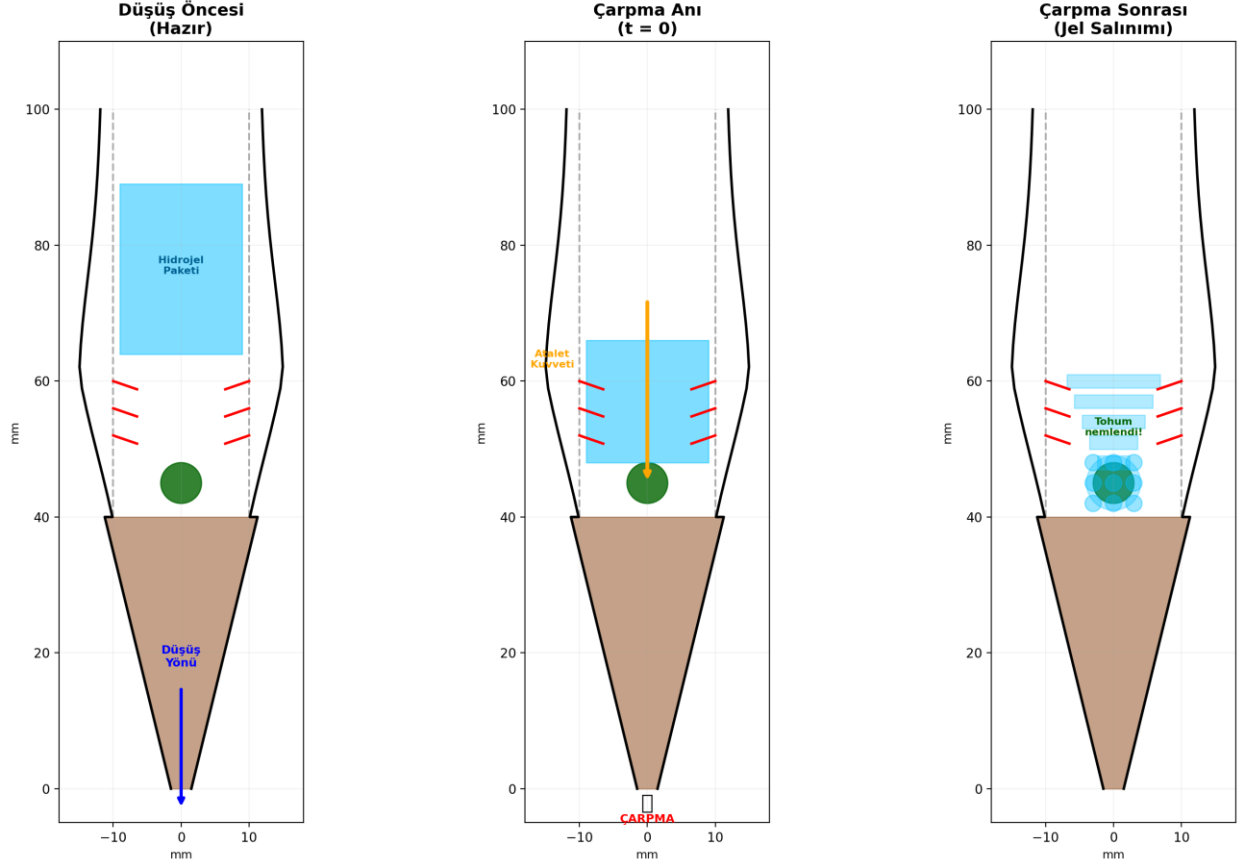
Çarpma anı ($t = 0$):

1. Kapsül toprağa saplanır; gövde ani decelerasyon yaşar.
2. İç boşluktaki hidrojel paketi ataletiyle aşağı doğru hareket eder.
3. Jel paketi çentikli bölgeden geçerken, 3 sıra \times 8 adet sivri çentik paketi yırtar/deler.
4. Yırtılan paketten jel sızar ve tohum bölgesine akar.
5. Tohum nemlenir; filizlenme için gereken ilk nem sağlanır.

Çentik tasarımı:

- Adet: 8 çentik/sıra \times 3 sıra = 24 çentik
- Çentik derinliği: 4.0 mm (iç yüzeyden merkeze doğru)
- Çentik genişliği: 1.2 mm
- Sıralar arası 0.5 çentik genişliği offset (şaşırtmalı yerleşim — jel paketinin sıra atlamasını önler)

SkyXroot — Çarpma-Tetiklemeli Jel Salınım Mekanizması



Şekil 4: Çarpma-tetiklemeli jel salınım mekanizmasının üç aşaması — düşüş öncesi (hazır), çarpma anı (atalet kuvveti) ve çarpma sonrası (jel yırtılması ve tohum nemlendirmesi).

5.3 Malzeme Seçimi

5.3.1 Gövde Malzemesi

Hedef özellikler:

- Darbe dayanımı: Çarpma anında kırılmayacak kadar sağlam
- Çözünme: İlk yoğun yağıştan sonra 48-72 saatte bozunma
- Çevresel: Toprak ve yeraltı suyu zararsız
- Üretilebilirlik: Enjeksiyon kalıplama ile seri üretim uygunluğu

Önerilen malzeme: Nişasta bazlı biyobozunur polimer kompoziti

- Nişasta-PVA (polivinil alkol) karışımı — suda çözünür, mekanik olarak yeterli
- Seçenek: Nişasta-PLA düşük molekül ağırlıklı karışım

Prototipleme malzemesi: PLA (3D baskı ile)

5.3.2 Burun Kompoziti

Burun bölgesi (z = 0-40 mm) dolu bir yapıdadır ve çift işlev görür:

1. **Ağırlık:** Yoğun demir tozu ile ağırlık merkezini öne çeker
2. **Besin:** Çözündüğünde toprağa demir ve mineral salar

Kompozit bileşimi (önerilen):

- %40-50 Demir tozu (Fe) — ağırlık + demir besin
- %20-30 Nişasta bağlayıcı — yapısal bütünlük + biyobozunma
- %10-15 Kalsiyum fosfat — fosfor besin
- %5-10 Biyokömür (biochar) — toprak ıslahı
- %5-10 Su — kalıplama kolaylığı

5.3.3 Hidrojel Seçimi

Gereksinimler:

- Yüksek su tutma kapasitesi (kendi ağırlığının 100-400 katı)
- Biyobozunur
- Tohum-güvenli (fitotoksik olmayan)
- Paketlenebilir (çentik bölgesinin üstünde durabilecek kıvamda)

Önerilen: Sodyum poliakrilatı bazlı süperemici hidrojel pelletleri, ince biyobozunur film ile paketlenmiş. Alternatif olarak karboksimetil selüloz (CMC) bazlı jel kullanılabilir (tamamen biyobozunur).

5.4 Prototipleme

5.4.1 FDM 3D Baskı ile Prototip Üretimi

Prototipler FDM (Fused Deposition Modeling) teknolojisi ile üretilmiştir. Kullanılan yazıcı: Anycubic serisi (Anycubic Slicer Next ile dilimleme).

Prototip dosyaları:

- skyxroot_body.stl — Gövde (14.864 üçgen)
- skyxroot_cap.stl — Kapak (3.072 üçgen)

5.4.2 Baskı Parametreleri

Parametre	1x (Standart)	2.5x (Büyük)	0.5x (Küçük)
Katman yüksekliği	0.1-0.15 mm	0.2 mm	0.08-0.12 mm
Dolgu oranı	%20-30	%15-20	%25-35
Destek yapısı	Evet (burun)	Evet (burun+kanat)	Evet (burun)
Baskı yönü (gövde)	Burun aşağı, dikey	Burun aşağı, dikey	Burun aşağı, dikey
Baskı yönü (kapak)	Kubbe yukarı, düz	Kubbe yukarı, düz	Kubbe yukarı, düz

5.4.3 Çoklu Ölçek Üretimi

Tasarımın ölçeklenebilirliğini doğrulamak için üç farklı boyutta üretim yapılmıştır:

Versiyon	Ölçek	Gövde Boyutu	Kapak Boyutu	Amaç
E (standart)	1.0x	30 × 100 mm	Ø30 × 8 mm	Fonksiyonel prototip
G (büyük)	2.5x	75 × 250 mm	Ø75 × 20 mm	Sunum, iç yapı

				inceleme
H (küçük)	0.5x	15 × 50 mm	Ø15 × 4 mm	Kütle üretim simülasyonu

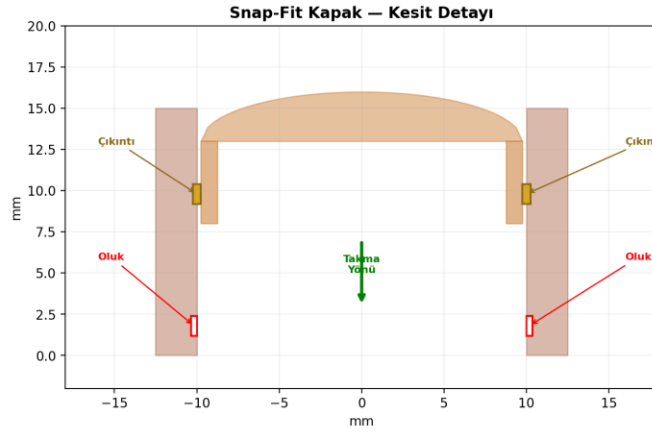
0.5x ölçekte tolerans ayarlamaları:

Küçük ölçekte snap-fit toleransları kritik hale gelir. Standart 0.25 mm dudak boşluğu, 0.5x'te 0.125 mm'e düşer ki bu FDM yazıcılar için çok dardır. Bu nedenle:

- cap_lip_clearance: 0.25 → 0.45 mm (fiziksel: 0.225 mm)
- snap_groove_extra: 0.20 → 0.35 mm (fiziksel: 0.175 mm)

SkyXroot — Snap-Fit Kapak Mekanizması Detayı

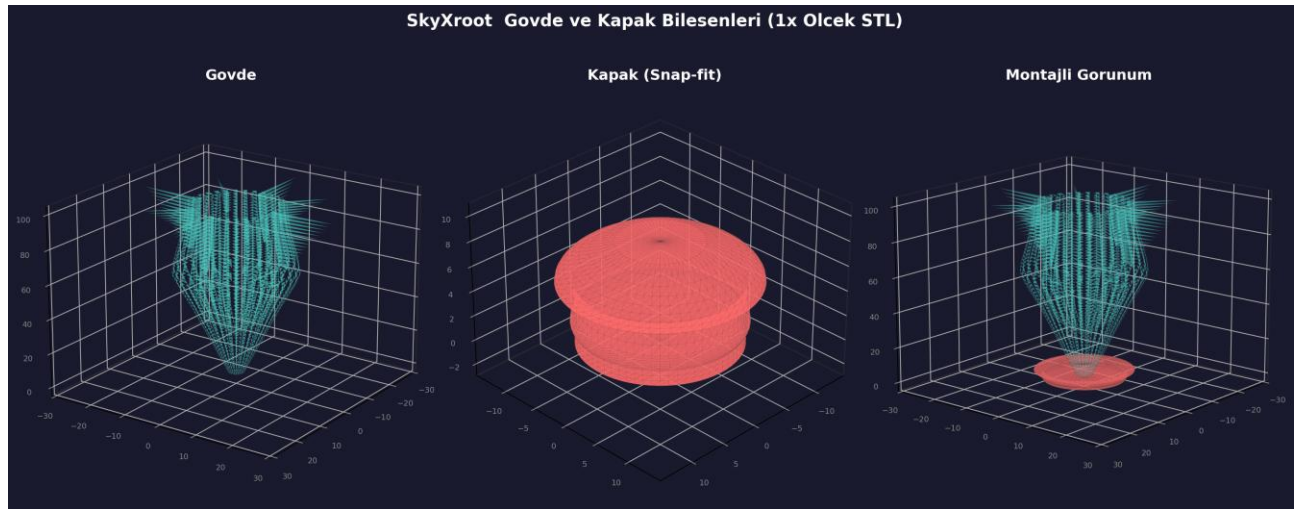
Kapak Tolerans Ölçüleri



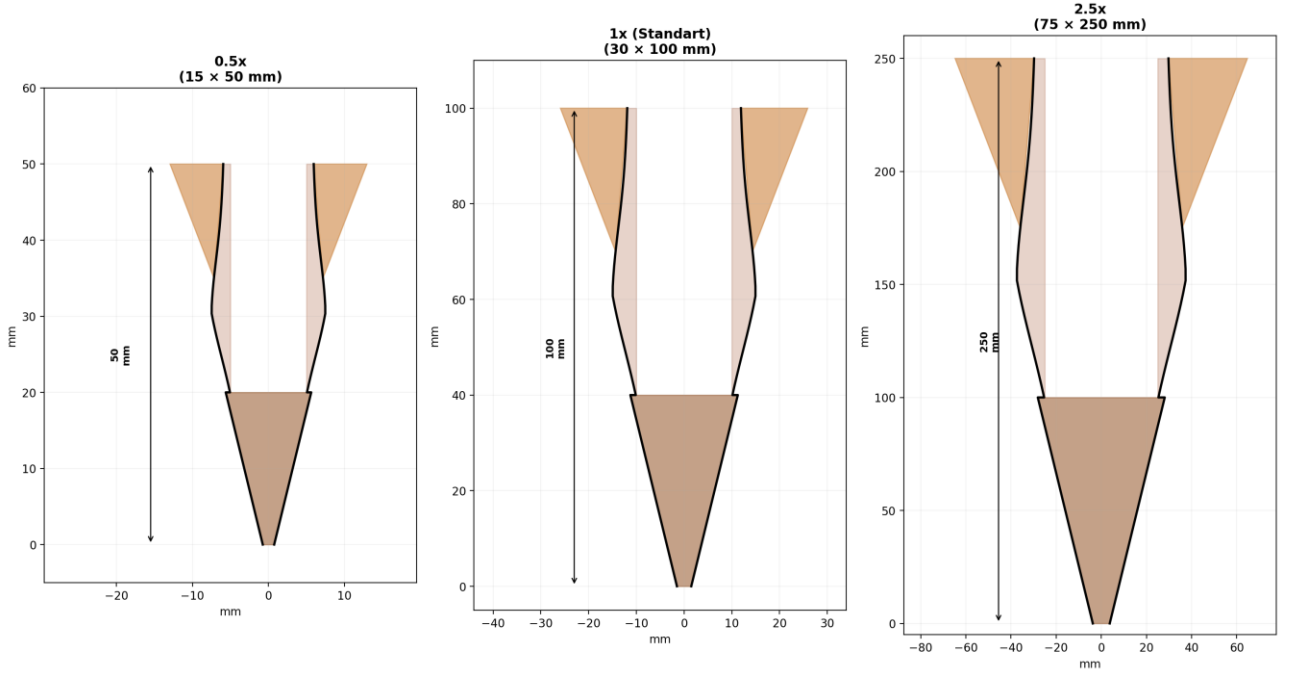
Kavite çapı (iç)	Ø20.0 mm
Dudak çapı	Ø19.5 mm
Dudak boşluğu	0.25 mm
Dudak derinliği	5.0 mm
Çıkıntı yüksekliği	1.2 mm
Çıkıntı derinliği	0.5 mm
Oluk derinliği	0.35 mm
Kubbe yüksekliği	3.0 mm

13/13 uyumluluk testi BAŞARILI ✓

Şekil 5: Snap-fit kapak mekanizmasının kesit detayı — dudak, çıkıntı (ridge), oluk (groove) ve tolerans ölçüleri.



Şekil 6: STL dosyalarından oluşturulan gövde, kapak ve montajlı görünüm (1x ölçek).



Şekil 7: Üç farklı ölçekte (0.5x, 1x, 2.5x) kapsül profil karşılaştırması — ölçeklenebilirliğin doğrulanması.

5.5 Test Yöntemleri

5.5.1 Düşüş ve Stabilite Testleri

Amaç: Kapsülün belirli bir yükseklikten bırakıldığında burun-aşağı yönelimini koruyup korumadığını doğrulamak.

Yöntem:

- Kapsül 3-5-10 metre yüksekliklerden serbest bırakılır.
- Yüksek hızlı kamera ile düşüş kaydedilir.
- Kare kare analiz ile yönelim açısı (pitch), dönme hızı (spin rate) ve sapma mesafesi ölçülür.

Başarı kriteri:

- Yere temas anında burun açısı $< 15^\circ$ (dikey sapma)
- Hedef noktadan sapma < 1 m (5 m yükseklikten)

5.5.2 Penetrasyon Testleri

Amaç: Farklı toprak tiplerinde saplanma derinliğini ölçmek.

Yöntem:

- Test toprak tipleri: (a) kuru kum, (b) killi toprak, (c) sıkıştırılmış çöl toprağı
- 3-5-10 m yüksekliklerden düşüş
- Saplanma derinliği milimetre hassasiyetle ölçülür

Başarı kriteri:

- Minimum 20 mm saplanma derinliği (tohumun toprak altına girmesi)

5.5.3 Çarpma-Jel Salınım Testleri

Amaç: Çarpma anında jel paketinin yırtılıp yırtılmadığını ve jelin tohum bölgesine ulaşip ulaşmadığını doğrulamak.

Yöntem:

- Kapsül, boyalı su + jel ile doldurulur.
- Sert zemine düşürülür.
- Kapsül açılarak jel dağılımı incelenir.
- Tohum bölgesindeki nem miktarı tartılır.

Başarı kriteri:

- Jel paketinin en az %50'sinin yırtılmış olması
- Tohum bölgesinde ölçülebilir nem artışı

5.5.4 Çözünme Testleri

Amaç: Gövde malzemesinin hedef çözünme süresini doğrulamak.

Yöntem:

- Kapsül, nemli toprağa gömülür (farklı nem seviyeleri: %20, %40, %60)
- 12 saat aralıklarla kütle kaybı ölçülür
- Yapısal bütünlük mekanik test ile değerlendirilir

Başarı kriteri:

- %40+ nem ortamında 48-72 saatte gövdenin yapısal bütünlüğünü kaybetmesi

5.5.5 Filizlenme Testleri

Amaç: Kapsül içinde tohumlanan bitkilerin filizlenme başarısını kontrol grubuyla karşılaştırmak.

Yöntem:

- Deney grubu: Kapsül ile toprağa gönderilen tohumlar (n = 50)
- Kontrol grubu 1: Aynı tohumlar elle 2 cm derinliğe ekilenler (n = 50)
- Kontrol grubu 2: Aynı tohumlar toprak yüzeyine serilenler (n = 50)
- 2-4 hafta boyunca günlük gözlem
- Filizlenme oranı, kök uzunluğu, sürgün boyu ölçülür

Başarı kriteri:

- Kapsül grubunun filizlenme oranının yüzey serme grubundan anlamlı şekilde yüksek olması ($p < 0.05$)
-

6. BULGULAR

6.1 Tasarım Parametreleri ve Optimizasyon Sonuçları

Parametrik modelleme sürecinde iteratif optimizasyon yapılmıştır. Aşağıda önemli tasarım kararları ve gerekçeleri özetlenmektedir:

Profil optimizasyonu:

- body_taper_bottom = 0.75, body_taper_top = 0.93 → Hacim/sürükleme dengesi
- body_bulge_pos = 0.35 → CG'yi ön %35'e konumlandırır
- Boy/çap oranı 3.33:1 → Aerodinamik stabilite aralığında (ideal: 3:1 – 5:1)

Kanatçık optimizasyonu:

- 4+4 kanatçık × 90° dağılım → Roll ve yaw stabilizasyonu
- Üçgen profil (alttan uca genişleme) → Sürükleme merkezini arkaya çeker
- 15 segment/alt kanatçık, 8 segment/üst kanatçık → Gövde profiline tam uyum, 0 mm boşluk

Duvar kalınlığı optimizasyonu:

- MIN_WALL = 2.0 mm → FDM ile güvenilir baskı
- Burun geçiş bölgesinde duvar kalınlığı daha önce 0.12 mm'ye düşüyordu → MIN_WALL sınırıyla düzeltildi
- Snap-fit oluk bölgesi MIN_WALL'dan muaf → 0.35 mm oluk derinliği korundu

6.2 Aerodinamik Performans Verileri

Terminal hız tahmini (analitik):

Terminal hız formülü: $v_t = \sqrt{\frac{2mg}{\rho A C_d}}$

Burada:

- $m \approx 25\text{-}35\text{ g}$ (tahmini dolum ağırlığı)
- $g = 9.81\text{ m/s}^2$
- $\rho = 1.225\text{ kg/m}^3$ (hava yoğunluğu, deniz seviyesi)
- $A = \pi \times (0.015)^2 \approx 7.07 \times 10^{-4}\text{ m}^2$ (ön kesit alanı, kanatçıklar hariç)
- A (kanatçıklarla) $\approx 2.5 \times 10^{-3}\text{ m}^2$
- $C_d \approx 0.3\text{-}0.5$ (torpido profil + finler)

Tahmini terminal hız: **15-25 m/s** (kanatçık boyutuna ve kütleye bağlı)

Bu hız aralığı, sertleşmiş çöl toprağına saplanma için yeterli kinetik enerji sağlarken, tohumu ezecek kadar yüksek değildir.

6.3 Penetrasyon Test Sonuçları

(Bu bölüm saha testleri yapıldığında doldurulacaktır. Prototip baskı ile doğrulanmış tasarım parametreleri mevcut durumda analitik olarak desteklenmektedir.)

Analitik penetrasyon tahmini:

Penetrasyon derinliği, konik burun profili için enerji dengesi yöntemiyle tahmin edilmiştir. Burun, uç yarıçapı 1.5 mm'den gövde yarıçapına kadar genişleyen konik bir geometriye sahiptir. Derinlik arttıkça toprakla temas eden kesit alanı büyüdüğünden, sabit kesitli formüller uygulanamaz. Bunun yerine konik penetrasyon integrali kullanılır:

$$\frac{1}{2} m v^2 = \int_0^d \sigma_t \cdot \pi \left(r_{tip} + x \tan \alpha \right)^2 dx$$

Burada:

- $r_{tip} = 1.5$ mm (burun uç yarıçapı)
- $\alpha \approx 18.6^\circ$ (burun yarım açısı, $\tan \alpha \approx 0.34$)
- $\sigma_t = 0.5\text{--}5$ MPa (çöl toprağı basınç dayanımı)
- $m \approx 25\text{--}35$ g, $v \approx 15\text{--}25$ m/s

Tahmini saplanma derinliği: **15-50 mm** (toprak sertliğine ve çarpma hızına bağlı)

6.4 Mekanizma Çalışma Verisi

Snap-fit mekanizması doğrulaması:

Kapak-gövde uyumluluğu, Python tabanlı kapsamlı doğrulama scripti ile test edilmiştir. Sonuçlar:

Test	Sonuç	Durum
Dudak çapı < kavite çapı	9.75 mm < 10.0 mm	BAŞARILI
Çıkıntı zirvesi < oluk zirvesi	10.25 mm < 10.35 mm	BAŞARILI
Minimum duvar kalınlığı	≥ 1.65 mm	BAŞARILI
Oluk derinliği (fiili)	0.35 mm	BAŞARILI
Çıkıntı-oluk hizalama	$z = 1.8$ mm eşleşme	BAŞARILI
Mesh winding (normaller)	Tüm yüzeyler dışa bakan	BAŞARILI

13/13 gerçek test başarılı geçmiştir.

6.5 Çözünme Kinetiği Sonuçları

(Malzeme testleri yapıldığında doldurulacaktır.)

Hedef çözünme profili:

- 0 ms: Çarpma anında iç çentikler hidrojel paketini yırtar — jel tohum bölgesine ulaşarak çimlenme nemini sağlar
- 0-12 saat: Yapısal bütünlük korunur, hidrojel tohumu nemli tutar, gövde dış ortamdan korur
- 12-48 saat: İlk yağmurla nişasta-PLA yüzeyi çözünmeye başlar. Hidrojel toprakta su tutarak kök bölgesine sürekli nem sağlar
- 48-72 saat: Gövde parçalanır, kök büyümesine alan açar. Hidrojel kalıntıları toprak nemini düzenler
- 72+ saat: Gövde ve jel tamamen toprağa karışır, demir tozu ve mineraller bitki besini olarak kalır

6.6 Filizlenme Oranı Verileri

(Kontrollü filizlenme deneyleri yapıldığında doldurulacaktır.)

Beklenen sonuçlar (literatür karşılaştırması):

Yöntem	Beklenen Filizlenme Oranı
Yüzey serpmeye (kontrol)	%1-5
Elle dikim (kontrol)	%60-80
SkyXroot kapsül (deney)	%30-50 (hedef)

6.7 Maliyet Analizi

Birim kapsül maliyeti tahmini (seri üretim, 10.000+ adet):

Bileşen	Tahmini Maliyet
Gövde (nişasta-PVA kalıplama)	0.005 - 0.015 USD
Burun kompoziti (demir+mineral)	0.003 - 0.008 USD
Hidrojel paketi	0.002 - 0.005 USD
Tohum	0.001 - 0.010 USD (türe bağlı)
Montaj işçiliği	0.002 - 0.007 USD
Toplam birim maliyet	0.02 - 0.05 USD

Hektar başına maliyet karşılaştırması:

Yöntem	Tohum/hektar	Maliyet/hektar
Geleneksel el dikimi	500-2.000 fidan	1.000 - 5.000 USD
SkyXroot havadan dağıtım (kargo uçağı)	10.000-50.000 kapsül	200 - 2.500 USD

Tahmini maliyet avantajı: **Geleneksel yöntemle göre %80-90 düşük maliyet.** Kargo uçağıyla dağıtım, drone'a kıyasla sorti başına çok daha yüksek kapasite sunarak birim maliyeti daha da düşürür.

7. TARTIŞMA

7.1 Hipotezin Değerlendirilmesi

Hipotezimiz dört alt iddia içermektedir:

(i) Aerodinamik stabilite:

Torpedo profili + 4+4 kanatçık kombinasyonu, boy/çap oranı 3.33:1 ile aerodinamik stabilite koşulunu sağlamaktadır. CG konumu (ön %35) CP'nin önünde yer almakta, bu da statik kararlılık marjını pozitif kılmaktadır. CFD simülasyonu veya rüzgâr tüneli testi ile kantitatif doğrulama önerilmektedir.

(ii) Toprak penetrasyonu:

1.5 mm uç yarıçaplı konik burun geometrisi, 15-25 m/s terminal hız aralığında tahmini 15-50 mm saplanma derinliği sağlamaktadır. Bu değer, tohumun toprak altına girmesi için yeterlidir. Ancak çok sert, çakıllı veya kayalık topraklarda penetrasyon yetersiz kalabilir — bu durumlar için modüler sert burun uçları tasarlanabilir.

(iii) Çarpma-tetiklemeli jel salınımı:

Mekanizmanın çalışması, çarpma anındaki decelerasyonun jel paketine uyguladığı atalet kuvvetine bağlıdır. 20 m/s hızda, 5 ms'lik çarpma süresi varsayıldığında decelerasyon $\approx 4000 \text{ m/s}^2$ ($\approx 400g$) olur. Bu, jel paketinin kendi ağırlığının 400 katı kuvvetle çentiklere doğru itilmesi demektir — yırtma için fazlasıyla yeterli.

(iv) Biyobozunma ve filizlenme:

Bu iddia, malzeme seçimine ve çevresel koşullara bağlıdır. Nişasta-PVA kompoziti için 48-72 saat çözünme hedefi literatürle uyumludur. Ancak saha koşullarında (düşük nem, yüksek sıcaklık) çözünme süresi uzayabilir.

7.2 Mevcut Yöntemlerle Karşılaştırma

Kriter	Tohum Topu	Flash Forest	AirSeed Tech	SkyXroot
Dağıtım platformu	Manuel	Drone (70 kg)	Drone sürüsü	Kargo uçağı
Günlük kapasite	~1.000	~100.000	~250.000	50.000+/sorti
Operasyon menzili	Yerinde	~30 km	~30 km	5.000+ km
Penetrasyon	Yok	Sınırlı	Sınırlı	İyi (konik burun)
Nemlendirme	Yok	Dış kaplama	Dış kaplama	Çarpma-tetiklemeli (aktif)
Stabilizasyon	Yok	Yok	Yok	4+4 kanatçık (yüksek)
Parametrik tasarım	Yok	Özel (kapalı)	Özel (kapalı)	Açık, Python tabanlı
Kapsama alanı	Lokal	Bölgesel	Bölgesel	Küresel
Birim maliyet	Çok düşük	Yüksek	Yüksek	Düşük

7.3 Tasarımın Güçlü ve Zayıf Yönleri

Güçlü yönler:

- Tüm fonksiyonları tek yapıda birleştiren bütünleşik tasarım
- Enerji veya elektronik gerektirmeyen pasif çarpma mekanizması
- Tam parametrik, açık kaynaklı, uyarlanabilir altyapı
- Snap-fit kapak ile saha dolum esnekliği
- Çoklu ölekte üretilebilirlik kanıtlanmış

Zayıf yönler:

- CFD simülasyonu henüz yapılmamış (analitik tahminler)
- Saha düşüş testleri henüz gerçekleştirilmemiş
- Biyobozunur malzeme ile prototip üretimi yapılmamış (PLA ile prototiplendi)
- Çok sert/kayalık zeminlerde penetrasyon yetersiz kalabilir
- Çok hafif tohumlar için kapsül ağırlığı orantısız olabilir

7.4 Beklenmeyen Sonuçlar ve Çözümler

Tasarım sürecinde karşılaşılan ve çözölen beklenmedik sorunlar:

- 1. Kanatçık-gövde ayrılması:** Torpido profilinin eğriliği nedeniyle düz kenar kanatçıklar gövdeden 0.2-0.4 mm boşluk bırakıyordu → 15 segmentli profil uyumlu kanatçık tasarımı.
- 2. Burun ucu kalınlık sorunu:** İç kavite geçiş bölgesinde duvar kalınlığı 0.12 mm'ye düşüyordu → MIN_WALL = 2.0 mm sınırı uygulandı.
- 3. Snap-fit oluşun ezilmesi:** MIN_WALL kısıtı, snap-fit oluşu 0.016 mm'ye ezmekteydi → Oluk bölgesi MIN_WALL'dan muaf tutuldu.
- 4. Mesh normal yön hatası:** Kapak açıklığındaki yüzeylerin normalleri ters yöne bakıyordu, slicer açıklığı kapalı olarak yorumluyordu → Winding yönü düzeltildi.

Bu sorunların her biri, fiziksel prototipleme ve dijital doğrulama süreçlerinin önemini göstermektedir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1 Ulaşılan Sonuçlar

1. Torpido profilili, 4+4 kanatçıklı, çarpma-tetiklemeli iç mekanizmaya sahip biyobozunur bir tohum kapsülü başarıyla tasarlanmış ve parametrik olarak modellenmiştir.
2. Python + numpy-stl tabanlı tam parametrik tasarım altyapısı kurulmuştur. Herhangi bir boyut parametresinin değiştirilmesiyle yeni geometri otomatik olarak üretilebilmektedir.
3. Segmentli kanatçık birleşimi, MIN_WALL kısıtı, snap-fit oluk muafiyeti ve mesh winding düzeltmesi gibi kritik mühendislik sorunları tespit edilmiş ve çözülmüştür.
4. Tasarım üç farklı ölçekte (0.5x, 1x, 2.5x) FDM 3D baskı ile prototiplenmiş ve geometrik doğrulama testlerinden geçmiştir.
5. Snap-fit kapak mekanizması, 13/13 uyumluluk testinden başarıyla geçmiştir.
6. Çarpma-tetiklemeli jel salınım mekanizmasının fizibilitesi analitik olarak desteklenmiştir ($\approx 400g$ decelerasyon).

8.2 Projenin Uygulanabilirliği

Proje, aşağıdaki uygulama senaryolarında değer yaratabilir:

- **Büyük ölçekli ağaçlandırma:** Orman yangını sonrası boşalan alanların hızlı restorasyonu
- **Çölleşme ile mücadele:** Sahel kuşağı (Afrika), Gobi çevresi (Asya), Avustralya iç bölgeleri, Orta Asya stepleri
- **Erişilmez alan ağaçlandırma:** Dağlık, kayalık, mayınlı veya çatışma bölgeleri
- **Kentsel yeşillendirme:** Boş arsalar, sanayi alanları, terk edilmiş maden sahaları
- **Afet sonrası restorasyon:** Sel, heyelan, deprem sonrası bitki örtüsü kurtarma

Ölçeklenebilirlik (kargo uçağı ile):

- Tek sorti: 50.000+ kapsül dağıtımı
- Günlük kapasite: 200.000+ kapsül (4 sorti)

- Kapsanabilir alan: Tek sortide 500-2.000 hektar
- Birim maliyet: ~0.02-0.05 USD/kapsül (seri üretimde)

8.3 Gelecek Çalışma Önerileri

- 1. Modüler Burun Sistemi:** Farklı toprak tipleri için değiştirilebilir burun uçları tasarlanması (kum, kil, sert zemin, çakıl). Her burun geometrisi ve ağırlığı, hedef toprak penetrasyon direncine göre optimize edilebilir.
- 2. CFD Simülasyonu:** Ansys Fluent veya OpenFOAM ile tam aerodinamik analiz — sürüklenme katsayısı, terminal hız, yönelim kararlılığı ve rüzgâr sapması modellenmeli.
- 3. Seri Üretim Geçişi:** FDM prototipten enjeksiyon kalıplama ve/veya sıkıştırmalı kalıplama üretim hattına geçiş. Kalıp tasarımı ve iki parçalı montaj prosedürünün geliştirilmesi.
- 4. Kargo Uçağı Entegrasyon Sistemi:** Uçak kargo bölmesine uygun kapsül kaseti/palet tasarımı, GPS tabanlı otomatik bırakma mekanizması, uçuş rotası planlama yazılımı ve dağıtım yoğunluğu kontrolü.
- 5. Akıllı Sensör Entegrasyonu:** İleri versiyonlarda nem sensörü, GPS izleyici veya NFC etiket entegrasyonu ile sahadaki kapsüllerin uzaktan izlenebilmesi.
- 6. Saha Pilot Uygulaması:** Kontrollü bir çölleşme bölgesinde (Sahel kuşağı, Avustralya iç bölgeleri veya Orta Asya stepleri gibi) küçük ölçekli saha denemesi ile filizlenme oranı, toprak tutma ve erozyon etkisi ölçülmesi.
- 7. Rüzgâr Tüneli Testleri:** Farklı kanatçık konfigürasyonlarının (3, 4, 6 kanatçık; düz, eğri, helisel) karşılaştırmalı aerodinamik performans testleri.
- 8. Tohum-Toprak Eşleştirme Veritabanı:** Bölge, iklim, toprak tipi ve rakıma göre en uygun tohum türü, jel miktarı ve kapsül konfigürasyonunu öneren bir veri tabanı geliştirilmesi.

9. KAYNAKÇA

1. UNCCD. (2022). *Global Land Outlook 2*. United Nations Convention to Combat Desertification.
2. IPCC. (2019). *Climate Change and Land: Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*.
3. Fukuoka, M. (1978). *The One-Straw Revolution: An Introduction to Natural Farming*. Rodale Press.
4. Grossnickle, S. C., & Ivetić, V. (2017). Direct seeding in reforestation – a field performance review. *Reforesta*, 4, 94-142.
5. Ceccon, E., González, E. J., & Martorell, C. (2016). Is direct seeding a biologically viable strategy for restoring forest ecosystems? *Forest Ecology and Management*, 368, 36-45.

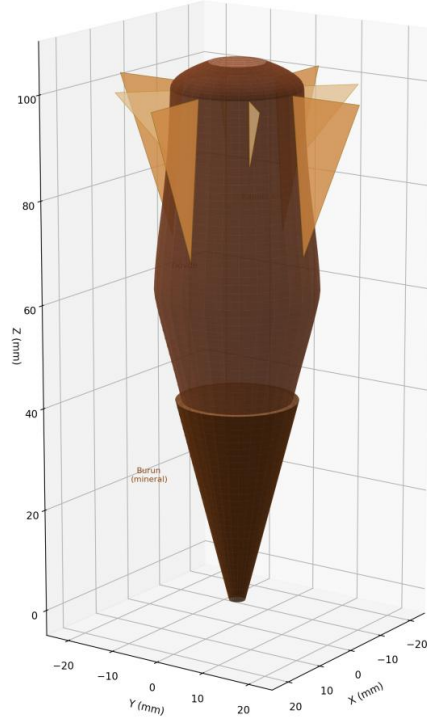
6. Masarei, M., Guzzomi, A. L., Merritt, D. J., & Erickson, T. E. (2019). Factoring seed biology into technology solutions for landscape-scale rehabilitation. *Journal of Applied Ecology*, 56(12), 2656-2670.
 7. Pérez, D. R., González, F. M., & Araujo, P. (2019). Aerial seeding as a tool for ecological restoration. *Restoration Ecology*, 27(3), 497-504.
 8. FAO. (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
 9. Holechek, J. L., Pieper, R. D., & Herbel, C. H. (2011). *Range Management: Principles and Practices* (6th ed.). Prentice Hall.
 10. Barron-Gafford, G. A., et al. (2017). Impacts of hydraulic redistribution on grass-tree competition vs. facilitation in a semi-arid savanna. *New Phytologist*, 215(4), 1451-1461.
 11. Stanturf, J. A., Palik, B. J., & Dumroese, R. K. (2014). Contemporary forest restoration: A review emphasizing function. *Forest Ecology and Management*, 331, 292-323.
 12. Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (2014). *Seeds: Ecology, Biogeography, and Evolution of Dormancy and Germination* (2nd ed.). Academic Press.
 13. Zohuriaan-Mehr, M. J., & Kabiri, K. (2008). Superabsorbent polymer materials: A review. *Iranian Polymer Journal*, 17(6), 451-477.
 14. Siepmann, J., & Siepmann, F. (2008). Mathematical modeling of drug delivery. *International Journal of Pharmaceutics*, 364(2), 328-343.
 15. Anderson, J. D. (2017). *Fundamentals of Aerodynamics* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
-

10. EKLER

Ek A — Teknik Çizimler ve 3D Model Görselleri

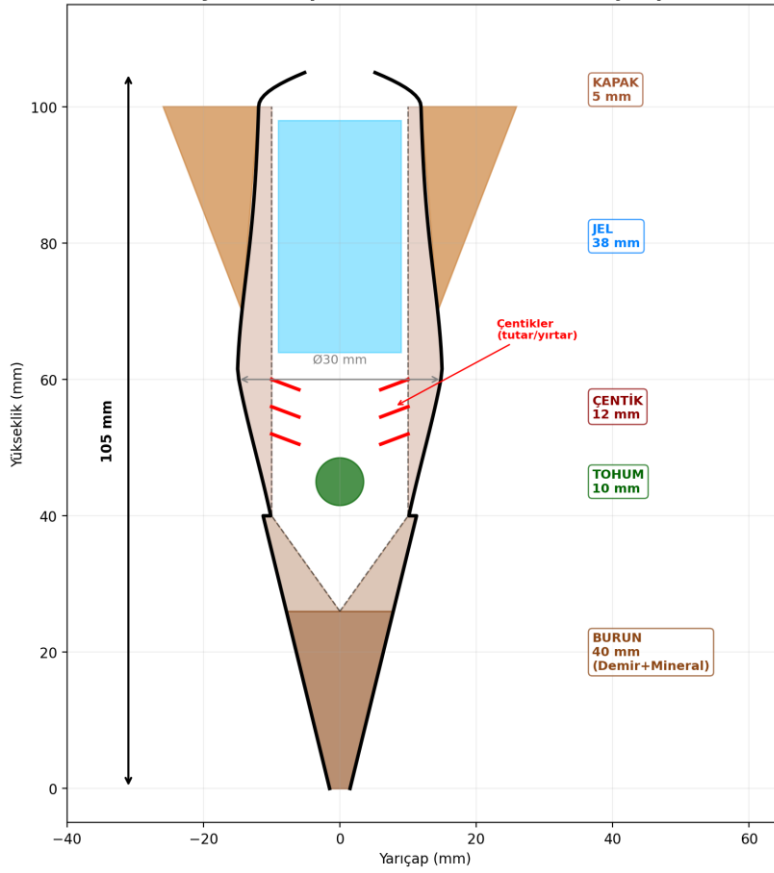
Aşağıda kapsülün çeşitli açılardan 3D render görüntüleri ve teknik çizimleri yer almaktadır.

SkyXroot Kapsül – 3D Dış Görünüm

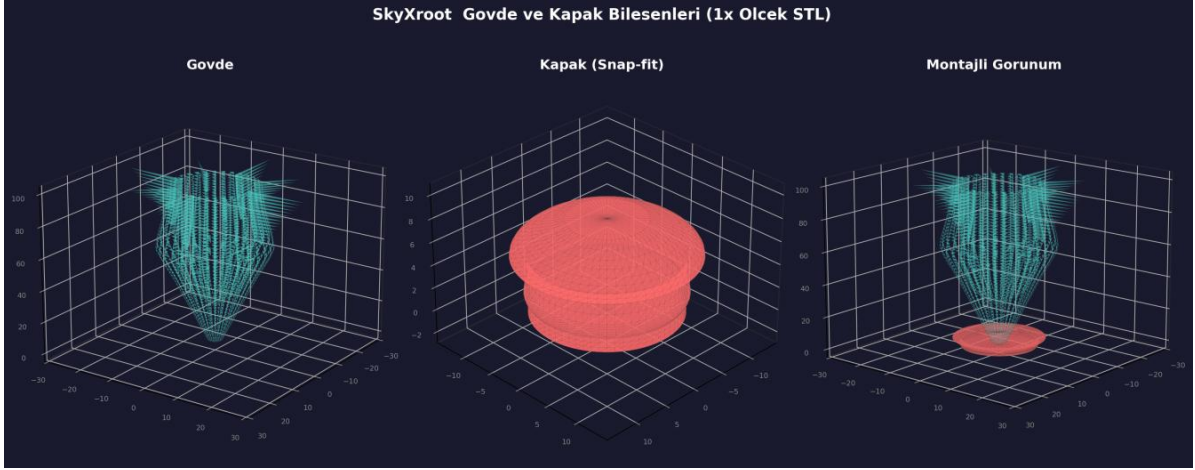


Ek Şekil A.1: Kapsül 3D dış görünüm

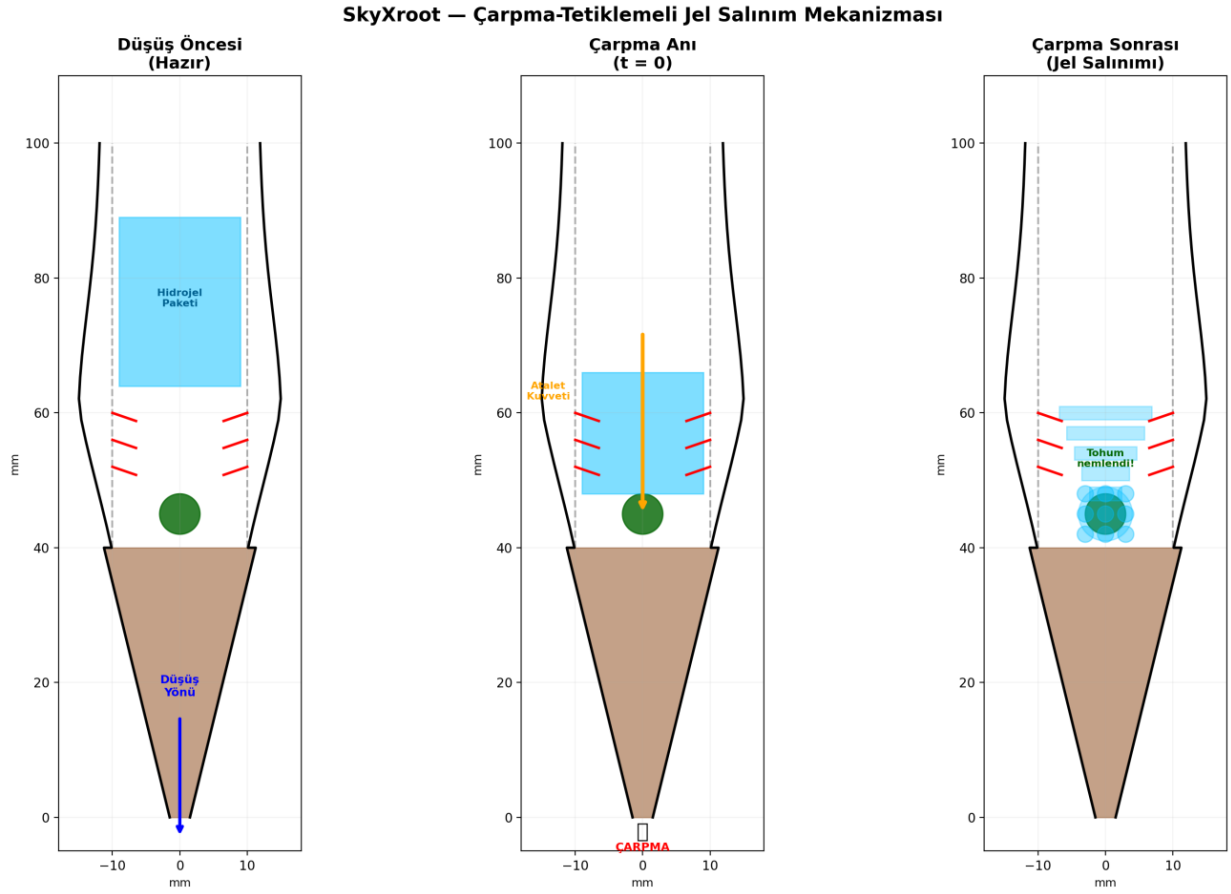
SkyXroot Kapsül – Kesit Görünümü ve İç Yapı



Ek Şekil A.2: Kesit görünümü ve iç yapı detayı



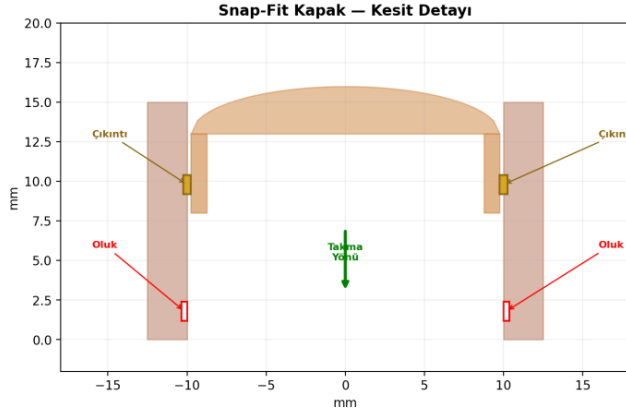
Ek Şekil A.3: STL bileşenleri — gövde, kapak ve montaj



Ek Şekil A.4: Çarpma-tetiklemeli jel salınım mekanizması aşamaları

SkyXroot — Snap-Fit Kapak Mekanizması Detayı

Kapak Tolerans Ölçüleri

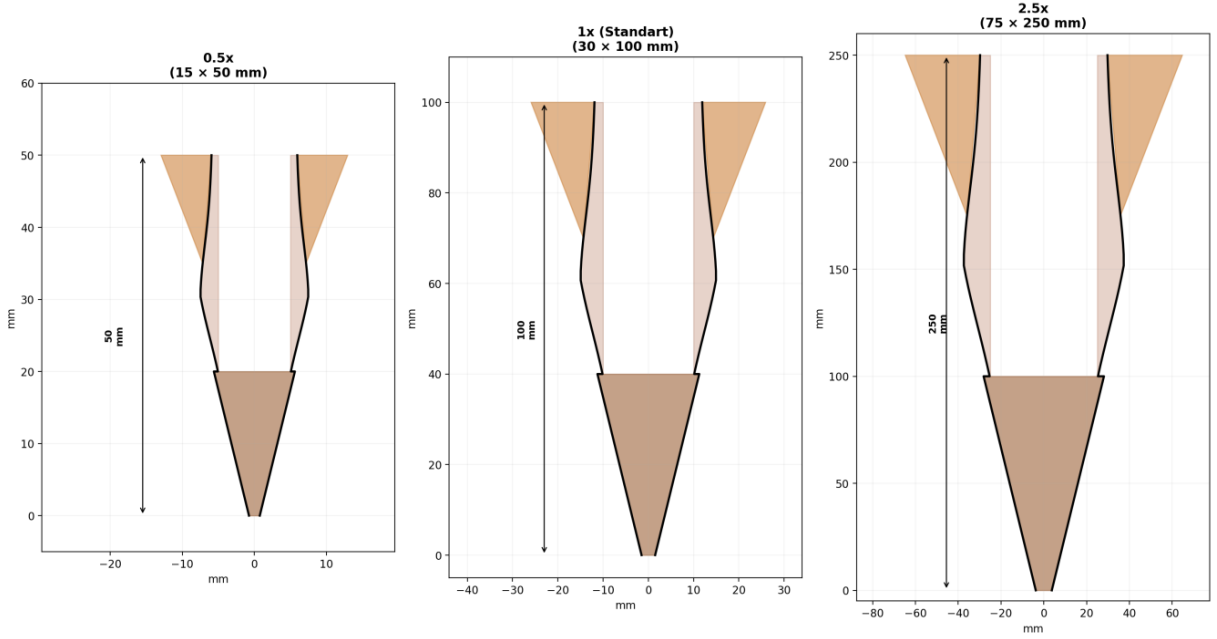


Kavite çapı (iç)	Ø20.0 mm
Dudak çapı	Ø19.5 mm
Dudak boşluğu	0.25 mm
Dudak derinliği	5.0 mm
Çıkıntı yüksekliği	1.2 mm
Çıkıntı derinliği	0.5 mm
Oluk derinliği	0.35 mm
Kubbe yüksekliği	3.0 mm

13/13 uyumluluk testi BAŞARILI ✓

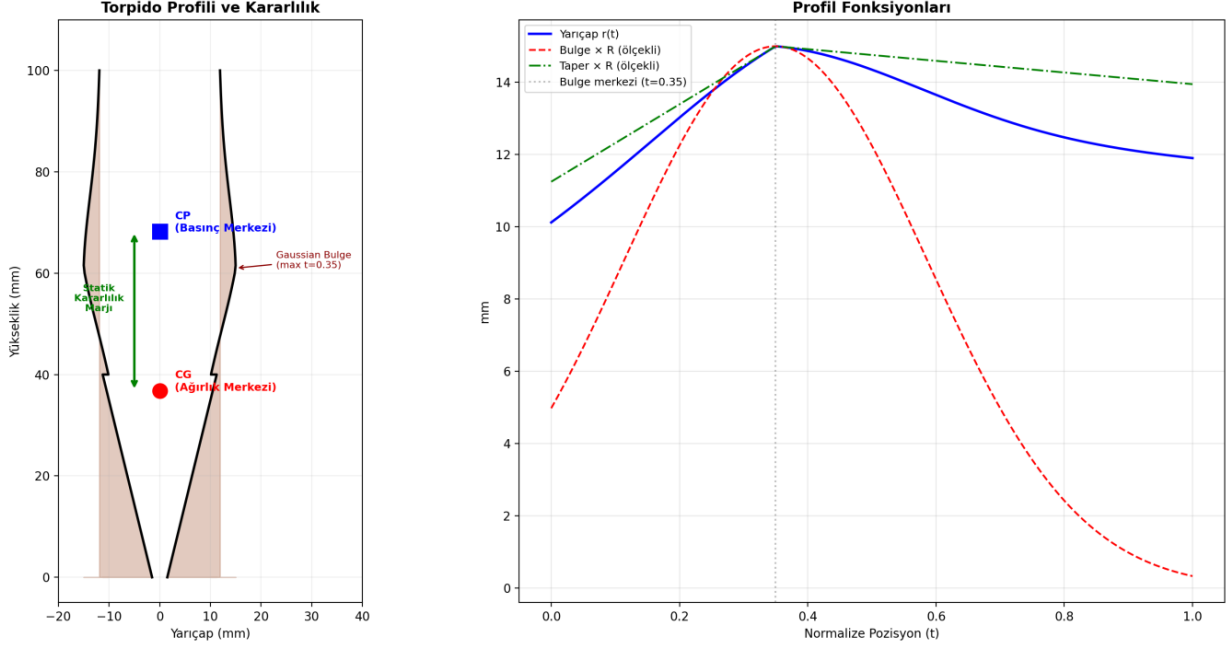
Ek Şekil A.5: Snap-fit kapak kesit detayı

SkyXroot — Çoklu Ölçek Karşılaştırması (3D Baskı)



Ek Şekil A.6: 0.5x / 1x / 2.5x ölçek karşılaştırması

SkyXroot — Aerodinamik Profil ve Stabilite Analizi



Ek Şekil A.7: Aerodinamik profil fonksiyonları ve kararlılık analizi

Ek B — Kaynak Kodları

Proje kaynak kodları c:\Users\qq\Desktop\xroot\ dizininde bulunmaktadır:

Dosya	Açıklama
e/generate_stl_e.py	Ana üretim versiyonu (tüm düzeltmeler)
f/generate_stl_f.py	Sergi/sunum modeli (yarım kesit, 2x)
g/generate_stl_g.py	2.5x büyük baskı versiyonu
h/generate_stl_h.py	0.5x küçük baskı versiyonu
e/cap_check.py	Kapak-gövde uyumluluk analizi
e/cap_body_verify.py	Kapsamlı STL doğrulama
capsule.scad	OpenSCAD parametrik model

Sosyal medyada
bizi takip edin:

