

ATOMİK SAATLİ CUBESAT GÖREVLERİ İÇİN UZAY ORTAMI ANALİZLERİ

Kadir Adil Bayar¹

Akın Kalın²

İbrahim Selçuk Öztürk³

Eren Yenilmez⁴

Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Ankara

Nevsan Şengil⁵

Tahsin Çağrı Şişman⁶

Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Bu çalışmada Türkiye özelinde ülkemizde kurulabilecek olan bölgesel konumlama zamanlama sistemi için geliştirilecek olan çip ölçekli ya da daha büyük atomik saate sahip bir misyon için manyetik alan ve ısı alan gibi uzay ortamı analizleri yapılacaktır. Bu uzay ortamı etkilerini maksimize ve minimize edecek şekilde farklı yörüngelerde analizlerin de yapılması planlanmaktadır. Yapılacak olan bu çalışma, misyon detaylandığında devam ettirilecektir. Manyetik alan için yörünge bilgileri netleştirildiğinde manyetik alan analizi nihai sonuca vardırılacaktır. Ayrıca ısı alan analizi de küp uydunun içerisindeki ekipmanlar ve onların konfigürasyonu belirlendiğinde kesin sonuçlara varılacaktır. Sonuç olarak da elde edilen tüm verilerin yapılacak olan atom saati üzerindeki etkileri tartışılacaktır.

¹Öğrenci, Uzay Müh. Böl., E-posta: kadiradil.bayar@stu.thk.edu.tr

²Öğrenci, Uzay Müh. Böl., E-posta: akin.kalin@stu.thk.edu.tr

³Öğrenci, Uzay Müh. Böl., E-posta: ibrahim.selcuk.ozturk@stu.thk.edu.tr

⁴Öğrenci, Uzay Müh. Böl., E-posta: eren.yenilmez@stu.thk.edu.tr

⁵Prof. Dr., Uzay Müh. Böl., E-posta: nsengil@thk.edu.tr

⁶Doç. Dr., Uzay Müh. Böl., E-posta: tcsisman@thk.edu.tr

GİRİŞ

Atomik saatler, uydu navigasyon sistemleri ve konumlandırma servisleri için vazgeçilmez unsurlardır. Buna ek olarak, gravitasyonel fizik ve üst atmosfer fiziği gibi bilimsel uzay misyonları için çok önemli yüklerdir. Ayrıca, gelecekteki derin uzay görevleri için, yüksek hassasiyetli atomik saatler, uzay araçlarının yönlendirilmesinde ve navigasyon sistemlerinde istenen doğrulukları sağlayacaktır. Atomik saat doğrulukları, dış manyetik alanların ve termal değişimlerin varyasyonlarından oldukça etkilendiği için, uzayda kullanımları, zorlu uzay ortamında gerekli doğrulukları elde etmek için özel uyarlanabilir tasarım gerektirir. Bu tasarım gerekliliklerini sağlamak amacıyla atomik saatler küçük uydular için uygun olmayan ağır ve yüksek güç tüketen ekipmanlar olmaktadır. Günümüzde teknolojinin ilerlemesi ile çip ölçekli atomik saatlerin (CSAC) üretilmeye başlanmasıyla küçük uydularda atomik saat kullanımı uygun bir hale gelmiştir.

Yapılan bu çalışmada asıl gaye, bir çip ölçekli atomik saatin içinde bulunduğu 6 birimlik bir Küp Uydunun yörüngesini belirlemektir ve buna bağlı olarak uydunun maruz kalacağı maksimum manyetik alan değişimlerinin ve maksimum sıcaklık değişimlerinin hesaplanmasıdır.

Manyetik alan ve sıcaklık değişimlerinin etkisi uygun bir yörünge ve yönelim seçimi ile minimize edildiği zaman, atom saatinin hassaslığı uzay görevlerinin kazanımları bakımından iyileştirilebilir. Öte yandan atom saatinin kalifikasyonu için gerekli uzayda ekstrem durum testleri için de tam tersi bir şekilde maksimum değişimleri veren yörünge ve yönelim tercihleri yapılabilir. Her atomik saate olduğu gibi ülkemizde kurulacak olan bölgesel konumlama zamanlama sistemi için geliştirilecek olan atomik saatinin de üzerine etki eden temel iki etken vardır. Bunlar sıcaklık ve manyetik alan değişimleridir. Bu etkenlerin hesaplamaları ilerleyen bölümlerde yapılacaktır.

Bu çalışma için içinde atom saati bulunduran küp uydular araştırılmıştır. Literatür araştırması sonucunda bulunan uydular Spatium 1 ve CHOMPTT uydularıdır.

Spatium 1 uydusu Nanyang Technological University of Singapore ve Kyushu Institute of Technology of Japan tarafından geliştirilmiştir. İçinde atom saati bulunduran bu uydunun bilimsel amacı zamansal ve uzaysal çözünürlükte dağılan üç boyutlu küresel iyonosfer plazmayı göstermektir. Diğer amacı ise iyonosferik plazma ile etkileşime girerek gecikme yaşayan sinyalleri tespit etmektir. Çip ölçekli atomik saat barındıran Spatium 1, 2U'luk bir küp uydudur. ISS'ten bırakılan Spatium 1 küp uydusu 400 km yüksekliktedir ve yörüngesel eğikliği 51,6 derecedir. [eoPortal Directory, 2020]

CHOMPTT küp uydusu ise Spatium 1 küp uydusu gibi çip ölçekli bir atom saatine sahiptir. University of Florida ve NASA'nın ortak geliştirdiği bir küp uydu olan CHOMPTT, 3U büyüklüğündedir. Bu projedeki asıl amaç ise derin uzayda kullanılabilecek küp uyduların daha kesin ve hassas sinyale sahip olmalarıdır. Bu bağlamda lazer teknolojisi kullanılmaktadır. 500 km yükseklikte bulunan CHOMPTT küp uydusu, 85 derece yörünge eğikliğine sahiptir ve 9 aylık görev ömrüne sahiptir. [eoPortal Directory, 2020]

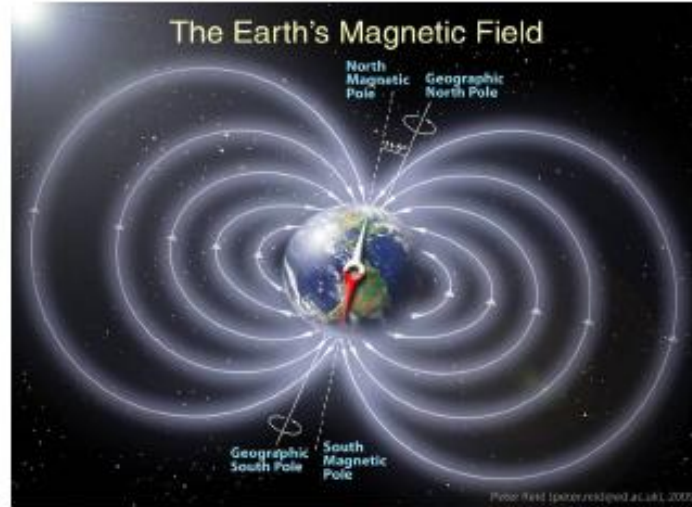
Bu çalışmada, Alçak Dünya yörüngesinde 6 birimlik bir küp uydu için yörünge belirlemesi, manyetik alan değişimi ve sıcaklık değişiminin analizi yapılacaktır. Burada amaç atom saatinin kalifikasyonunu sağlamaktır, yani maksimum değişimleri gözlemlemek amacıyla zorlu bir yörünge seçilimi yapılacaktır.

MANYETİK ALAN ANALİZLERİ

YÖNTEM

Bu amaçlar doğrultusunda önce benzer amaçlı misyonlar araştırılmış ve onların yörünge bilgileri seçilmiştir. Bu seçim sonucunda yukarıda literatür araştırmalarından elde edilen farklı yükseklikte ve farklı karakteristikteki yörüngedeki manyetik alan değişiminin analizi yapılmıştır. Bu analizler hem Uluslararası Jeomanyetik Referans Alanı'na (UJRA'ya) [International Geomagnetic Reference Field (IGRF)] göre hem de Dünya Manyetik Modeli'ne (DMM'ye) [(World Magnetic Model (WMM)] göre yapılmıştır. Böylelikle hem manyetik alan analizleri yapılmıştır hem de iki farklı tabandaki analizler birbiriyle karşılaştırılmıştır. Uluslararası Jeomanyetik Referans Alanı tabanlı analizler The Space Environment Information System-SPENVIS, [ESA, BIRA-IASB, UNILIB, 2020], kullanılarak yapılmıştır. Dünya Manyetik Modeli tabanlı analizler MATLAB programı kullanılarak yapılmıştır ve MATLAB'ın kütüphanesinde bulunan *wrldmgm* ile sağlanmıştır. MATLAB kodu referansta eklidir. [Vnucec, 2020]

Dünyanın manyetik alanı elemanlarının (D, F, H, I, X, Y, Z) modellemesi için başvuru olan hassas bir yöntem olarak, ana manyetik alanın ($\mathbf{B}_m$) yer merkezli küresel koordinatlar biçiminde yazılabilmesi için (boylam (λ), enlem (ϕ) ve yarıçap (r)), mekânsal değişimi negatif skaler potansiyel olarak yazılır. Buradaki çözüm Dünya Manyetik Modeli (DMM) için geçerlidir. [Alken, Beggan, Chulliat, Hamilton, Macmillan, Maus, Nair, Ridley, Thomson, Woods, 2015]



Şekil 1: Manyetik İkili Kutup Gösterimi [Reid, 2009]

$$\mathbf{B}_m(\lambda, \phi', r, t) = -\nabla V(\lambda, \phi', r, t) \quad (1)$$

Bu noktada, çok kutup açılımı (multipole expansion) ile küresel harmonikler kullanılarak bu potansiyel aşağıdaki formüle göre genişletilmiş olur.

$$V(\lambda, \phi', r, t) = a \sum_{n=1}^N \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m(t) \cos(m\lambda) + h_n^m(t) \sin(m\lambda)) \tilde{P}_n^m(\sin\phi') \quad (2)$$

Yukarıdaki formülden yola çıkılarak manyetik alan hesaplanırsa; $\check{P}_n^m(\mu)$, herhangi bir μ sayısı için Legendre fonksiyonudur. [Heiskanen, Moritz, 1967]

$$\check{P}_n^m(\mu) = \sqrt{2 \frac{(n-m)!}{(n+m)!}} P_{n,m}(\mu) \text{ if } m > 0 \quad (3)$$

$$\check{P}_n^m(\mu) = P_{n,m}(\mu) \text{ if } m = 0 \quad (4)$$

$g_n^m(t_0)$ ve $h_n^m(t_0)$ zaman bağımlı Gauss kat sayılarıdır. Buradaki n derecesi ve m sırası Dünya'nın ana manyetik alanını açıklamaktadır.

$$g_n^m(t) = g_n^m(t_0) + (t - t_0) \dot{g}_n^m(t_0) \quad (5)$$

$$h_n^m(t) = h_n^m(t_0) + (t - t_0) \dot{h}_n^m(t_0) \quad (6)$$

Buradaki N sayısı 12 olduğu taktirde, hassas bir seviyede istediğimiz lokasyon ve zamanda manyetik alanı DMM için bulabilmemiz mümkün olmaktadır. Ancak aşağıda gösterim amaçlı $N=1$ olarak alınmıştır. Ayrıca a jeomanyetik referans yarı çapıdır. (λ, φ', r) ise jeomerkezik referansa göre sırasıyla boylamı, enlemi ve yarı çapı ifade etmektedir.

$N=1$ iken $n=1$ ve $m=0 \& 1$ olur. Böylece potansiyel aşağıdaki halini alır.

$$V(\lambda, \varphi', r, t) = a \sum_{n=1}^1 \left(\frac{a}{r}\right)^{1+1} \sum_{m=0}^1 (g_1^0(t) \cos(0\lambda) + h_1^0(t) \sin(0\lambda)) \check{P}_1^0(\sin\varphi') \quad (7)$$

$$V(\lambda, \varphi', r, t) = a \sum_{n=1}^1 \left(\frac{a}{r}\right)^2 (g_1^0(t) \cos(0) + h_1^0(t) \sin(0)) \check{P}_1^0(\sin\varphi') + (g_1^1(t) \cos(\lambda) + h_1^1(t) \sin(\lambda)) \check{P}_1^1(\sin\varphi') \quad (8)$$

Yukarıda yazılan Legendre fonksiyonu ve Gauss kat sayıları yerine yazılmak istendiğinde aşağıdaki şekillerde yazılır.

$$\check{P}_1^0(\sin\varphi') = \sin\varphi' \quad \text{if } m = 0 \quad (9)$$

$$\check{P}_1^1(\sin\varphi') = \frac{d}{d\varphi}(\sin\varphi') \quad \text{if } m = 1 \quad (10)$$

$$g_1^0(t) = g_1^0(t_0) + (t - t_0) \dot{g}_1^0(t_0) \quad \text{if } m = 0 \quad (11)$$

$$g_1^1(t) = g_1^1(t_0) + (t - t_0) \dot{g}_1^1(t_0) \quad \text{if } m = 1 \quad (12)$$

$$h_1^0(t) = h_1^0(t_0) + (t - t_0) \dot{h}_1^0(t_0) \quad \text{if } m = 0 \quad (13)$$

$$h_1^1(t) = h_1^1(t_0) + (t - t_0) \dot{h}_1^1(t_0) \quad \text{if } m = 1 \quad (14)$$

$\check{P}_1^0, \check{P}_1^1, g_1^0(t), g_1^1(t), h_1^0(t), h_1^1(t)$ değerleri yerine yazılır.

$$V(\lambda, \varphi', r, t) = a \sum_{n=1}^1 \left(\frac{a}{r}\right)^2 [(g_1^0(t_0) + (t - t_0) \dot{g}_1^0(t_0)) \sin\varphi' + ((g_1^1(t_0) + (t - t_0) \dot{g}_1^1(t_0)) \cos\lambda) + (h_1^1(t_0) + (t - t_0) \dot{h}_1^1(t_0)) \sin\lambda) \cos\varphi'] \quad (15)$$

$$V(\lambda, \varphi', r, t) = \frac{a^3}{r^2} [(g_1^0(t_0) + (t - t_0) * \dot{g}_1^0(t_0)) \sin \varphi'] + (((g_1^1(t_0) + (t - t_0) * \dot{g}_1^1(t_0) \cos \lambda) + (h_1^1(t_0) + (t - t_0) * \dot{h}_1^1(t_0) \sin \lambda)) \cos \varphi'] \quad (16)$$

Model kat sayıları yani Gauss kat sayıları aşağıdaki tabloda listelenmiştir. Bu kat sayılar 2015 (t₀) ile 2020 (t) arasındaki herhangi bir tarihte ve Dünya yüzeyine yakın herhangi bir yerde alan öğelerinin değerlerinin ve yıllık değişim oranlarını hesaplamak için kullanılabilir.

Tablo 1: DMM2015 İçin Final Kat Sayıları. Birimler Alan İçin nT, Değişimleri İçin nT/yıl'dır.

N	m	$g_n^m(t_0)$	$h_n^m(t_0)$	$\dot{g}_n^m(t_0)$	$\dot{h}_n^m(t_0)$
1	0	-29438.5	-	10.7	-
1	1	-1501.1	4796.2	17.9	-26.8

n, m, $g_n^m(t_0)$, $h_n^m(t_0)$, $\dot{g}_n^m(t_0)$, and $\dot{h}_n^m(t_0)$ değerleri yerine konulduğunda:

$$V(\lambda, \varphi', r) = \frac{a^3}{r^2} [((-29438,5 + 5 * 10,7) \sin \varphi') + (((-1501,1 + 5 * 17,9) \cos(\lambda)) + ((4796,2 + 5 * -26,8 \sin \lambda)) \cos \varphi')] \quad (17)$$

$$V(\lambda, \varphi', r) = \frac{a^3}{r^2} [((-29385) \sin \varphi') + (((-1411,6) \cos(\lambda)) + ((4662,2) \sin(\lambda))) \cos \varphi'] \quad (18)$$

$\cos \varphi'$ parantez içine dağıtıldıktan sonra:

$$V(\lambda, \varphi', r) = \frac{a^3}{r^2} [(-29385 \sin \varphi') + (-1411,6 \cos(\lambda) \cos \varphi' + 4662,2 \sin(\lambda) \cos \varphi')] \quad (19)$$

B_m 'i bulmak için potansiyel V, gradyan operatörü $-\nabla$ ile çarpılır. ∇ gradyan operatörü aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\nabla = \hat{i} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (20)$$

Küresel koordinat çevirimi yapıldığında,

$$\nabla = \hat{u}_r \frac{\partial}{\partial r} + \hat{u}_{\varphi'} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi'} + \hat{u}_{\lambda} \frac{1}{r \sin \varphi'} \frac{\partial}{\partial \lambda} \quad (21)$$

halini alır. Potansiyel ile çarpıldığında ise

$$\begin{aligned} -B_m(\lambda, \varphi', r) = & \hat{u}_r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{a^3}{r^2} [(-29385 \sin \varphi') + (-1411,6 \cos(\lambda) \cos \varphi' + 4662,2 \sin(\lambda) \cos \varphi')] \right) + \\ & \hat{u}_{\varphi'} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi'} \left(\frac{a^3}{r^2} [(-29385 \sin \varphi') + (-1411,6 \cos(\lambda) \cos \varphi' + 4662,2 \sin(\lambda) \cos \varphi')] \right) + \\ & \hat{u}_{\lambda} \frac{1}{r \sin \varphi'} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{a^3}{r^2} [(-29385 \sin \varphi') + (-1411,6 \cos(\lambda) \cos \varphi' + 4662,2 \sin(\lambda) \cos \varphi')] \right) \end{aligned} \quad (22)$$

şeklinde yazılır. Tekrar düzenlendiğinde ise

$$\begin{aligned}
&= \\
&\hat{u}_r \frac{-2a^3(-29385\sin\varphi' - 1411,6 \cos(\lambda)\cos\varphi' + 4662,2 \sin(\lambda)\cos\varphi')}{r^3} + \\
&\hat{u}_{\varphi'} \frac{1}{r} \frac{a^3(-29385\cos\varphi' + 1411,6 \cos(\lambda)\sin\varphi' - 4662,2 \sin(\lambda)\sin\varphi')}{r^2} + \\
&\hat{u}_{\lambda} \frac{1}{r\sin\varphi'} \frac{a^3(1411,6 \sin(\lambda)\cos\varphi' + 4662,2 \cos(\lambda)\cos\varphi')}{r^2}
\end{aligned} \quad (23)$$

halini alır. Son düzenlemeyle birlikte $-\mathbf{B}_m(\lambda, \varphi', r)$,

$$\begin{aligned}
-\mathbf{B}_m(\lambda, \varphi', r) &= \hat{u}_r \frac{-2a^3}{r^3} * (-29385\sin\varphi' - 1411,6 \cos(\lambda)\cos\varphi' + 4662,2 \sin(\lambda)\cos\varphi') + \\
&\hat{u}_{\varphi'} \frac{a^3}{r^3} * (-29385\cos\varphi' + 1411,6 \cos(\lambda)\sin\varphi' - 4662,2 \sin(\lambda)\sin\varphi') + \hat{u}_{\lambda} \frac{a^3}{r^3} (\cot\varphi') * \\
&(1411,6 \sin(\lambda) + 4662,2 \cos(\lambda))
\end{aligned} \quad (24)$$

Denklemleri $\mathbf{B}_r$, $\mathbf{B}_{\varphi'}$, $\mathbf{B}_{\lambda}$ için yazdığımızda çıkan formüller şöyledir.

$$\mathbf{B}_r = \frac{2a^3}{r^3} * (-29385\sin\varphi' - 1411,6 \cos(\lambda)\cos\varphi' + 4662,2 \sin(\lambda)\cos\varphi') \quad (25)$$

$$\mathbf{B}_{\varphi'} = -\frac{a^3}{r^3} * (-29385\cos\varphi' + 1411,6 \cos(\lambda)\sin\varphi' - 4662,2 \sin(\lambda)\sin\varphi') \quad (26)$$

$$\mathbf{B}_{\lambda} = -\frac{a^3}{r^3} (\cot\varphi') * (1411,6 \sin(\lambda) + 4662,2 \cos(\lambda)) \quad (27)$$

Jeodezik koordinatlar (λ, φ, h) küresel jeomerkezik koordinatlara çevrilir. λ iki koordinat sisteminde de aynıdır fakat (φ', r) diğer koordinat sisteminden çevrilir; yani (φ, h) 'tan aşağıdaki formüllere göre hesaplanır.

Tablo 2: Koordinat Çevirimi İçin Gerekli Formüller ve Sabit Değerler

$p = (R_c + h) \cos \varphi$	(28)
$z = (R_c(1 - e^2) + h) \sin \varphi$	(29)
$r = \sqrt{p^2 + z^2}$	(30)
$\varphi' = \arcsin \frac{z}{r}$	(31)
$A = 6378137 \text{ meters}$	(32)
$\frac{1}{f} = 298,257223563$	(33)
$e^2 = f(2 - f)$	(34)
$R_c = \frac{A}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$	(35)

Kontrol amaçlı Ankara için manyetik alan değeri hesaplandı. Yukarıdaki formüllerin de yardımıyla $\varphi' = 39,92083$ derece olarak bulundu. $\lambda = 32,85389$ derece olarak sabit kaldı. Ankara'nın yüksekliği (h) ise ortalama 850 metre olarak alındı. r ise formüllere göre 6370200 metre olarak hesaplandı. DMM'e göre $a = 6371200$ metredir.

Model Used:	WMM-2020						
Latitude:	39.94133° N						
Longitude:	32.81664° E						
Elevation:	0.847 km Mean Sea Level						
Date	Declination (+ E - W)	Inclination (+ D - U)	Horizontal Intensity	North Comp (+ N - S)	East Comp (+ E - W)	Vertical Comp (+ D - U)	Total Field
2020-07-01	5.9054°	58.0064°	25,337.7 nT	25,203.2 nT	2,606.9 nT	40,558.8 nT	47,822.7 nT
Change/year	0.0856°/yr	0.0491°/yr	3.3 nT/yr	-0.6 nT/yr	38.0 nT/yr	82.6 nT/yr	71.8 nT/yr
Uncertainty	0.34°	0.21°	128 nT	131 nT	94 nT	157 nT	145 nT

Şekil 2: UOAİ'nin Sitesinden Elde Edilen Ankara'nın Manyetik Alan Değeri [NOAA, 2020]

Yukarıdaki tüm formül ve değerlerden sonra Ankara'nın manyetik alan değeri hem analitik olarak hem de MATLAB'ta çözdürülerek elde edildi.

1	a=6371200 ;
2	psi=39.94133 ;
3	lambda=32.81664 ;
4	h=850 ;
5	A=6378173 ;
6	f=1/298.25223563 ;
7	e2=f*(2-f) ;
8	Rc=A/(sqrt(1-e2*(sind(psi)^2))) ;
9	p=(Rc+h)*cosd(psi) ;
10	z=(Rc*(1-e2)+h)*sind(psi) ;
11	r=sqrt(p^2+z^2)
12	psid=(asind(z/r))
r = 6.3702e+06	
psid = 39.731	

Şekil 3: "r" ve "psid" Değerleri

Üstteki kodda φ' (psid) ve r değerleri alınarak alttaki kodda yerine yazılmıştır. B_r b1'e; $B_{\varphi'}$ b2'ye; B_λ ise b3'e karşılık gelmektedir. b ise Ankara'nın manyetik alanını göstermektedir.

```

1  clear ; clc ;
2  a= 6371200 ;
3  r= 6370200 ;
4  paid= 39.7316 ;
5  lamda= 32.85389 ;
6  b1a= ((2*a^3)/(r^3))
7  b1b= ((-29385)*(sind(paid)))
8  b1c= ((-1411.6)*(cosd(lamda))*(cosd(paid)))
9  b1d= ((4662.3)*(sind(lamda))*(cosd(paid)))
10 b1= b1a*(b1b+b1c+b1d)
11 b2= ((-a^3)/r^3)*(-29385*(cos(paid))+1411.6*(cos(lamda))*(sin(paid))-4662.2*(sin(lamda))*(sin(paid)))
12 b3= (-a^3)/r^3*(cot(paid)*(1411.6*(sin(lamda))*4662.2*(cos(lamda))))
13 b= sqrt((b1^2)+(b2^2)*(b3^2))

```

Şekil 4: Ankara'nın Manyetik Alan Analiz Kodu

Kod çalıştırıldıktan sonra elde edilen değerler şöyledir:

Tablo 3: Ankara İçin Manyetik Alan Değeri

$$B_r = -35516nT$$

$$B_{\varphi'} = 23468nT$$

$$B_{\lambda} = -5636,24nT$$

$$\mathbf{B} = 42941nT$$

Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi'nin (UOAİ'nin) [National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)] sitesinden kontrol edildiğine Ankara'nın manyetik alan değeri yaklaşık $47000nT$ 'dir. Bulunan değer her ne kadar $42000nT$ mertebesinde olsa da asıl sonuca yakın değildir. Bunun nedeni yukarıda bahsedilen N'nin derecesidir. $N = 12$ olduğunda $47000nT$ mertebesine ulaşılmaktadır. Fakat yukarıda manyetik alan değeri $N = 1$ ($n = 1, m = 0 \& 1$) içindir.

Kontrol amaçlı yapılan bu analizde analitik çözümün yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu sebeple daha kesin sonuçlara ulaşmak için UJRA tabanlı SPENVIS sitesi ve MATLAB kütüphanesinde bulunan DMM tabanlı *wrldmgn* kodu kullanılmıştır.

Uzay ortamında manyetik alan için ilgili ECSS dökümanında (ECSS-E-ST-10-04C), iç alan için güncel olan UJRA'nın kullanılması gerektiğinden bahsetmektedir. Günümüzde küresel harmonik derecesi 100'lere kadar ulaşsa da yüzeyden uzaklaştıkça bu derecenin değeri hızla düşmektedir. Dolayısıyla Dünya yüzeyinden birkaç yüz kilometre üstünde bulunan manyetik alan değişimleri düşük dereceli bir model olarak ele alınabilir. UJRA 13 dereceli yüksek kaliteli bir modeldir. Ancak her beş yılda bir güncellenir. Bu yüksek kaliteli modeli kullanan SPENVIS sitesinde analiz yapmak için literatür araştırmaları sonucu elde edilen yörünge bilgileri girildi ve fırlatılış tarihinden belirli bir süre sonrası için analizler yapıldı. Bu

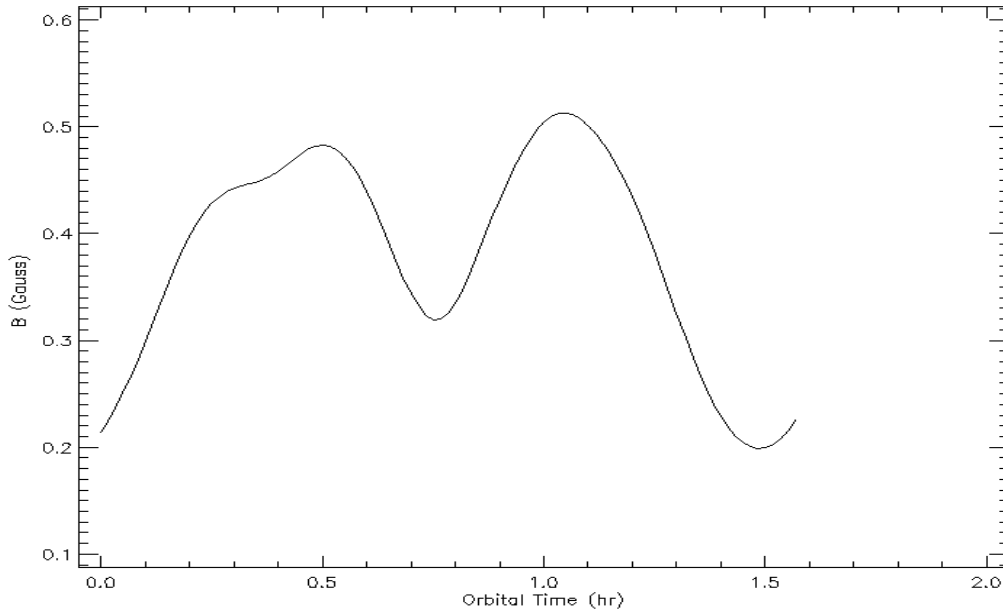
analizler 1 yörüngelik, 1 günlük ve 1 haftalık şeklindedir. Ayrıca yıl içerisindeki değişimleri de gözlemleyebilmek için 1 günlük analiz 3 aylık periyotlarla tekrar yapıldı.

Basit bir yolla MATLAB programı kütüphanesinde hazır kullanılmak üzere bulunan *wrldmgm* fonksiyonu bize girdiğimiz yükseklik, boylam, enlem ve zaman bilgileriyle istediğimiz nokta ve zamanda manyetik alanın hesabını yapabilmektedir. Yörünge bazlı bir manyetik alan analizi ihtiyacından dolayı ise yörünge parametreleri ile koşturduğumuz zaman sonuçların SPENVIS gibi bir analiz sitesinin sonuçlarıyla örtüştüğünü gözlemlemekteyiz.

UYGULAMALAR

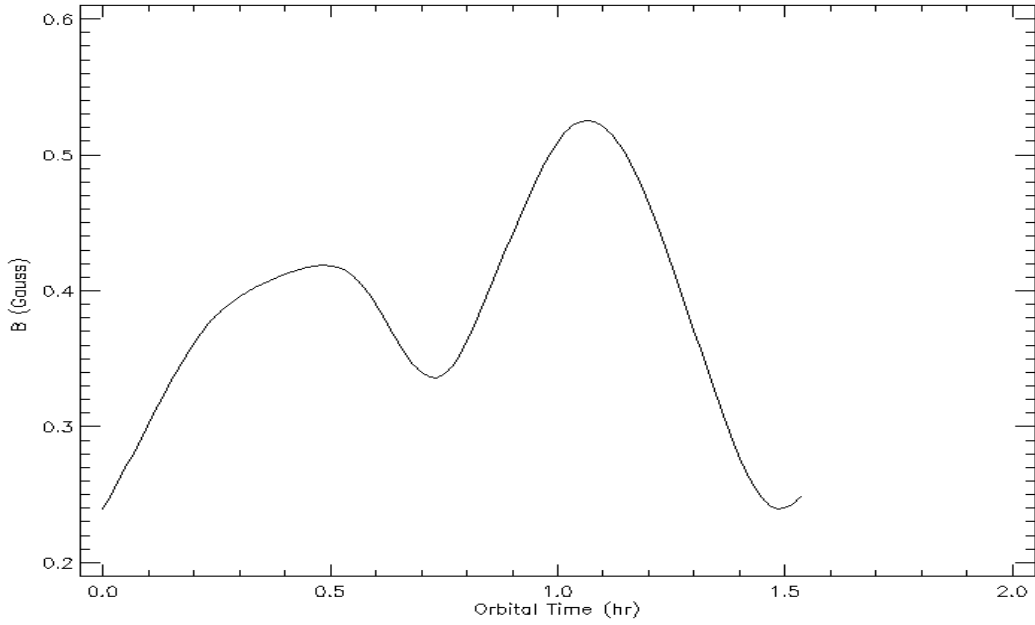
1 Yörünge için Yapılan Manyetik Alan Analizleri (17.3.2019)

1 yörüngede yapılan analizlerde beklenen değerler birbirinden farklı olmalıdır çünkü yörünge yüksekliği ve eğikliği değerlerin birbirinden farklılaşmasını sağlamaktadır. Aşağıdaki grafiklerden de de görüleceği gibi manyetik alanın 1 yörüngedeki genel karakteristiği artış-azalış-artış-azalış şeklindedir. Bu artış ve azalışın nedeni uydunun Dünya'nın farklı noktalarından geçmesidir.



Şekil 5: CHOMPTT- 17.03.2019 Tarihli 1 Yörüngelik Manyetik Alan Analizi-UJRA

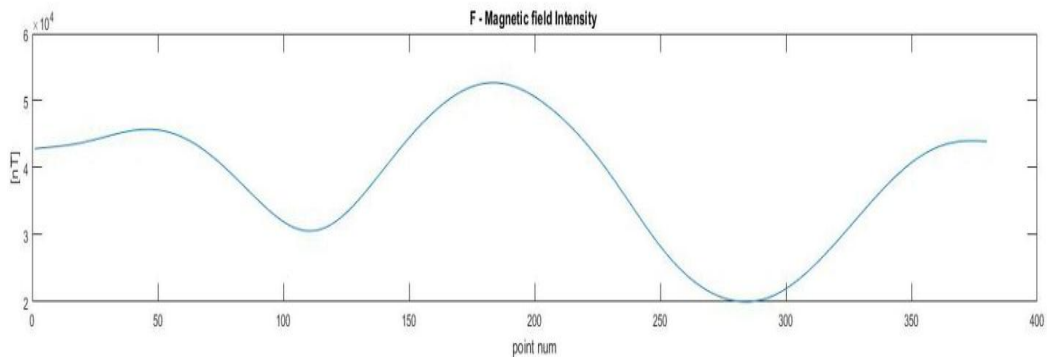
Grafik incelendiğinde maksimum ve minimum noktalar görülmektedir. Bu maksimum ve minimum değerler lokal olarak da oluşmaktadır. CHOMPTT uydusunun yörüngesindeki maksimum B değeri 0.51 Gauss olup, minimum B değeri ise 0.20 Gauss olmaktadır. Sonuç olarak, 1 yörüngedeki maksimum B değişimi CHOMPTT yörüngesinde 0.31 Gauss olmaktadır.



Şekil 6: Spatium- 17.03.2019 Tarihli 1 Yörüngelik Manyetik Alan Analizi-UJRA

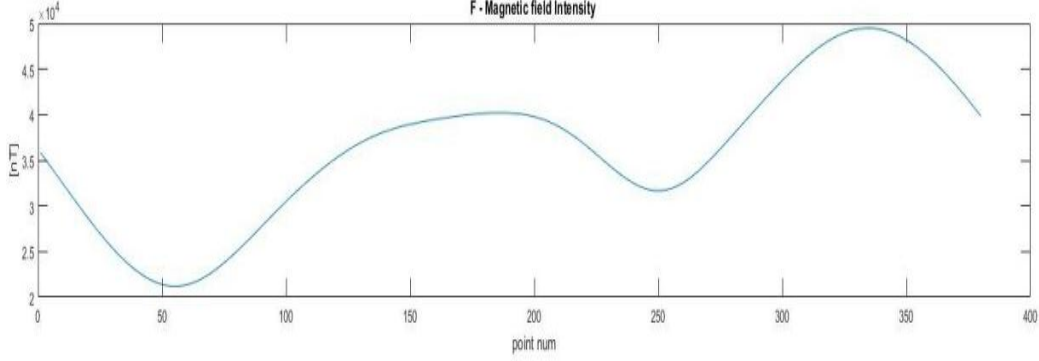
Spatium uydusunun yörüngesi incelendiğinde ilk artış CHOMPTT kadar olmasa da yine de bir miktar artış vardır. Sonrası ise benzer şekilde ilerlemektedir. Spatium uydusunun yörüngesindeki maksimum B değeri 0.52 Gauss olup, minimum B değeri ise 0.23 Gauss olmaktadır. Sonuç olarak, 1 yörüngedeki maksimum B değişimi Spatium yörüngesinde 0.29 Gauss olmaktadır.

Yukarıda görüldüğü gibi yapılan 1 yörüngelik analizlerde iki farklı yörüngede bulunan uyduların karşılaştıkları manyetik alan karakteristiği birbirine benziyor olsa da belirli bir ölçüde farklılık göstermektedirler. Maksimum değerler iki yörünge için çok yakın olsa da maksimum değer Dünya'ya daha yakın olan Spatium uydusunun yörüngesinde ortaya çıkmıştır. Minimum değer ise CHOMPTT uydusunun yörüngesinde ortaya çıkmıştır. Spatium uydusunun yörüngesi maksimum ve minimum değerlerinin yüksek olmasının nedeni Dünya'ya daha yakın olmasından kaynaklıdır. Ayrıca B değişimi Spatium uydusunun yörüngesinde daha azdır.



Şekil 7: CHOMPTT Uydusunun 17.03.2019 Tarihli 1 Yörüngelik Manyetik Alan Analizi-DMM

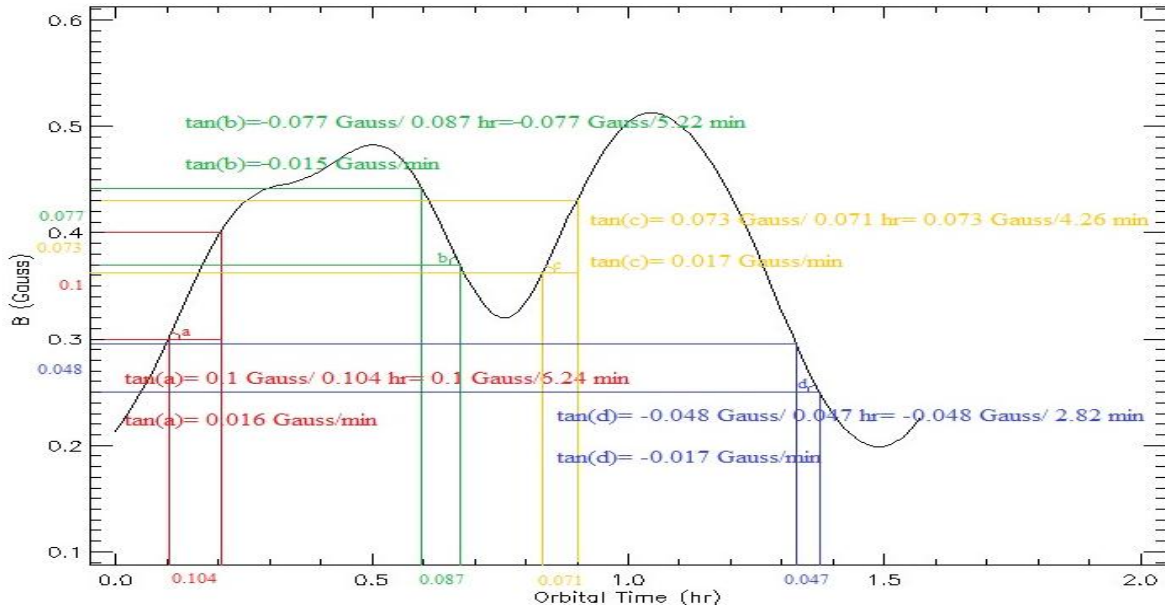
DMM tabanlı analiz sonucunda çıkan grafikte hem genel hatlarıyla manyetik alan karakteristiği hem de çıkan sonuçlar UJRA tabanlı yapılan analizle uymaktadır. CHOMPTT uydusu için yapılan bu analizde çıkan maksimum değer $5.2694 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir (0.52 Gauss). Minimum değer ise $1.999 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir (0.19 Gauss). 1 yörüngede oluşan maksimum fark ise $3.2704 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir (0.32 Gauss).



Şekil 8: Spatium Uydusunun 17.03.2019 Tarihli 1 Yörüngelik Manyetik Alan Analizi-DMM

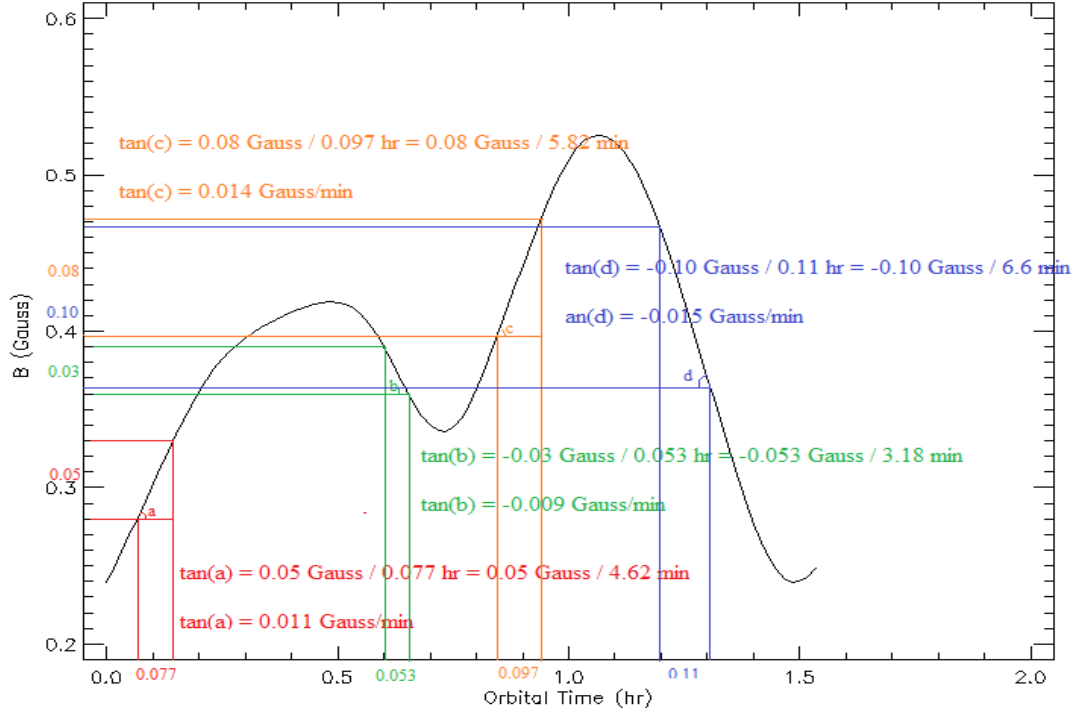
DMM tabanlı analiz sonucunda çıkan grafikte hem genel hatlarıyla manyetik alan karakteristiği hem de çıkan sonuçlar UJRA tabanlı yapılan analizle uymaktadır. Spatium uydusu için yapılan bu analizde çıkan maksimum değer $4.9487 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir (0.49 Gauss). Minimum değer ise $2.1208 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir (0.21 Gauss). 1 yörüngede oluşan maksimum fark ise $2.8279 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir (0.28 Gauss).

Manyetik alanın artış ve azalışlarındaki anlık değişimlerine baktığımızda iki farklı yörünge için elde edilen değerler aşağıdaki grafiklerdeki gibidir. Manyetik alanın çizgisinin eğiminden elde edilen değişim değerleri dakika cinsinden hesaplanmıştır.



Şekil 9: CHOMPTT Uydusunun 1 Yörüngedeki Dakikada Ortaya Çıkan Anlık Manyetik Alan Değişimi-UJRA

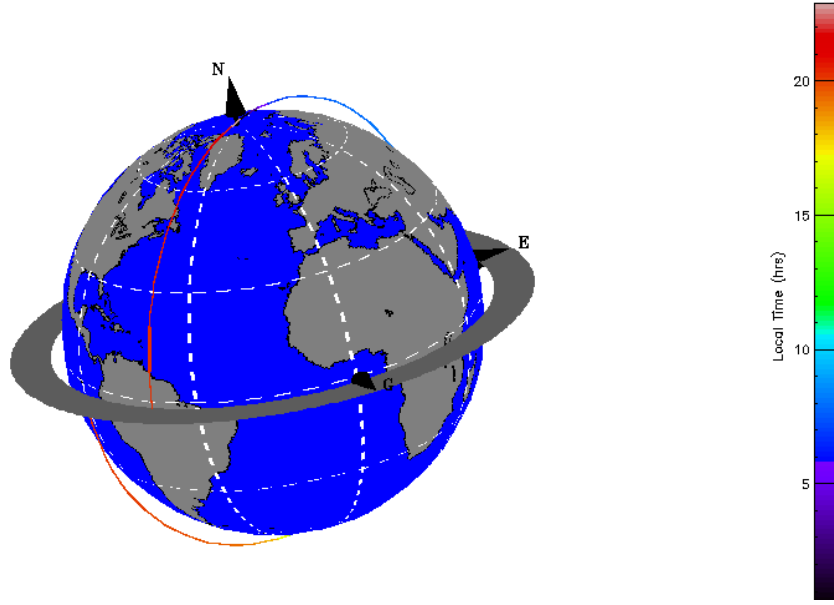
CHOMPTT uydusunun yörüngesinde bu anlık değişime baktığımızda ortalama olarak 0.016 ± 0.001 Gauss/dakika değeri elde edilmiştir. Artış ve azalışlardaki tüm değerler yukarıdaki grafiğin içerisinde yer almaktadır.



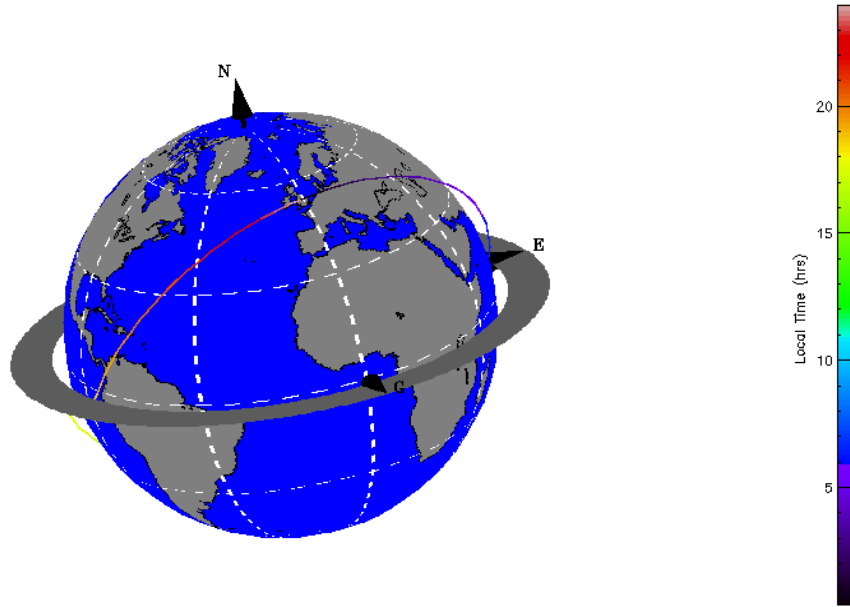
Şekil 10: Spatium Uydusunun 1 Yörüngedeki Dakikada Ortaya Çıkan Anlık Manyetik Alan Değişimi-UJRA

Spatium uydusunun ise anlık ortalama değişim değeri 0.012 ± 0.004 Gauss/dakika şeklindedir. Artış ve azalışlardaki tüm değerler yukarıdaki grafiğin içerisinde yer almaktadır.

İki grafikteki değerlerin birbirine yakın gelmesi grafikten de anlaşılacağı üzere manyetik alan karakteristiğinin eğimlerinin birbirine yakın olmasından kaynaklanmaktadır.

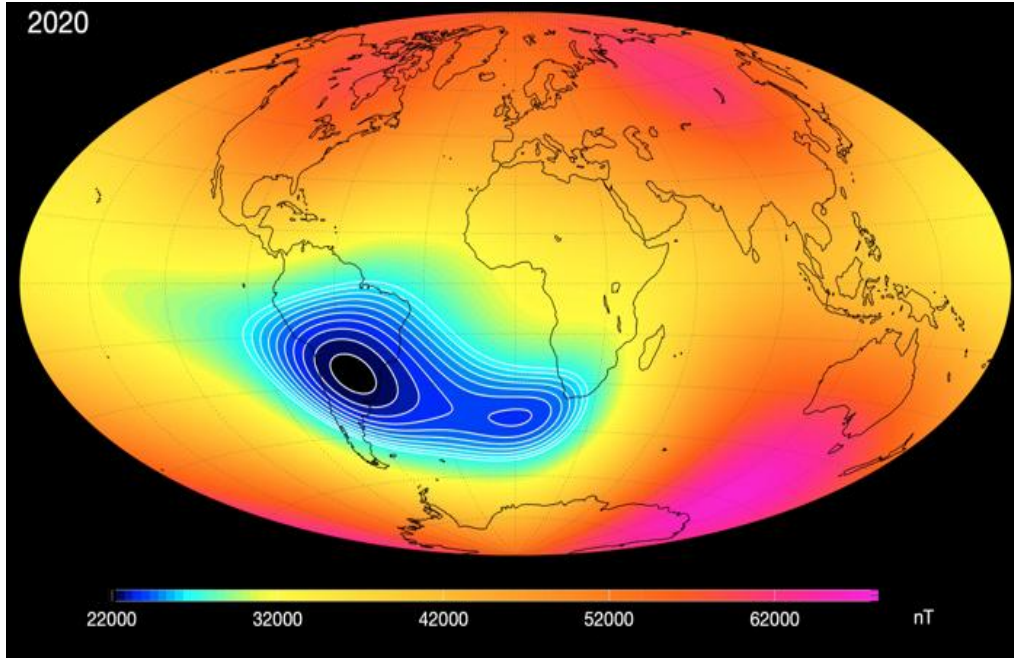


Şekil 11: CHOMPTT Uydusunun 17.03.2019 Tarihli 1 Yörüngesi

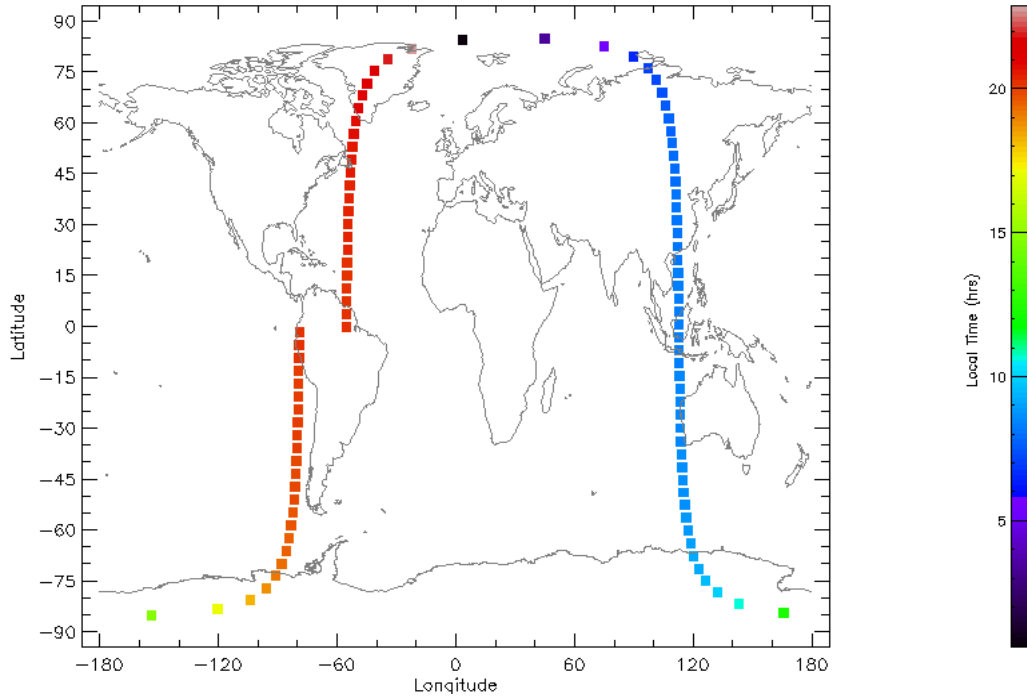


Şekil 12: Spatium Uydusunun 17.03.2019 Tarihli 1 Yörüngesi

CHOMPTT ve Spatium uydularının 1 yörünge boyunca oluşturmuş olduğu yörünge yukarıdaki şekillerdeki gibidir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere CHOMPTT uydusu Kuzey Kutup Noktasına daha yakın geçmektedir. Spatium uydusu ise CHOMPTT uydusuna göre daha yatay geçmektedir. Bunun nedeni CHOMPTT uydusunun yörünge eğikliği (inclination) (85 derece) Spatium uydusunun yörünge eğikliğinden (51 derece) daha fazla olmasıdır.



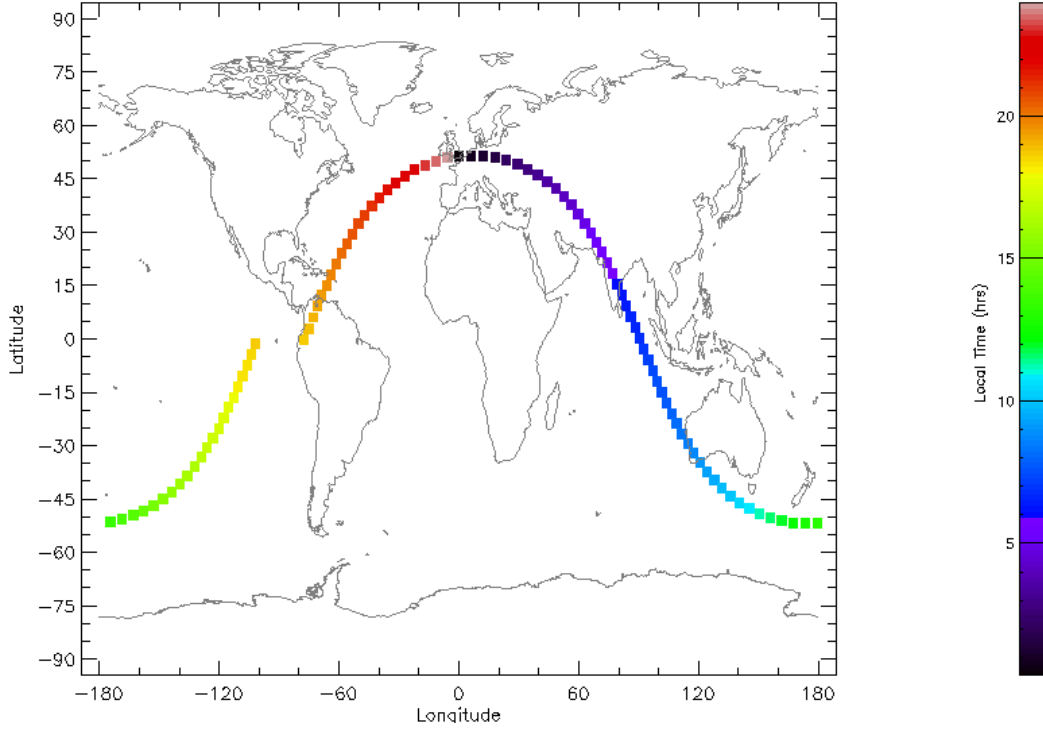
Şekil 13: Dünya'nın Manyetik Alanı [ESA, 2020]



Şekil 14: CHOMPTT Uydusunun 17.03.2019 Tarihli Yer İzdüşümü

1 yörüngede değişen manyetik alan analizinden yola çıkarak (Şekil 1) CHOMPTT uydusunun yer izdüşümü bilgisiyle (Şekil 14) artış ve azalışların Dünya'nın neresinde olduğu belirlenebilir. Uydu harekete ekvator'dan başlar ve önce Kuzey Kutbuna gider. Ekvator'dan Kuzey Kutbuna gidiş, manyetik alandaki ilk artışı oluşturur. Lokal maksimumdaki dalgalanmanın sebebi Dünya'nın coğrafi ve manyetik kutuplarının birbiriyle yaptığı açı ve Dünya'nın manyetik alanının simetrik olmayışıdır. Bu asimetrik durum Şekil 13'te

görülmektedir. Uydu Kuzey Kutbundan Ekvatora geldiğinde ise manyetik alan düşer. Bunun sebebi ekvatorde manyetik alan çizgilerinin daha geniş olmasıdır. Uydu Ekvatordan Güney Kutbuna geldiğinde o bölgede manyetik alan arttığından maksimum değere ulaşır. Güney Kutbundan tekrar Ekvatora doğru çıktığında ise başlangıç noktasındaki değerin altına düşer. Bunun sebebi ise Ekvatora gelirken Güney Anomali Noktası'ndan geçmesidir. Şekil 13'te Güney Anomali Noktası'ndaki manyetik alan azalması görülebilir.



Şekil 15: Spatium Uydusunun 17.03.2019 Tarihli Yer İzdüşümü

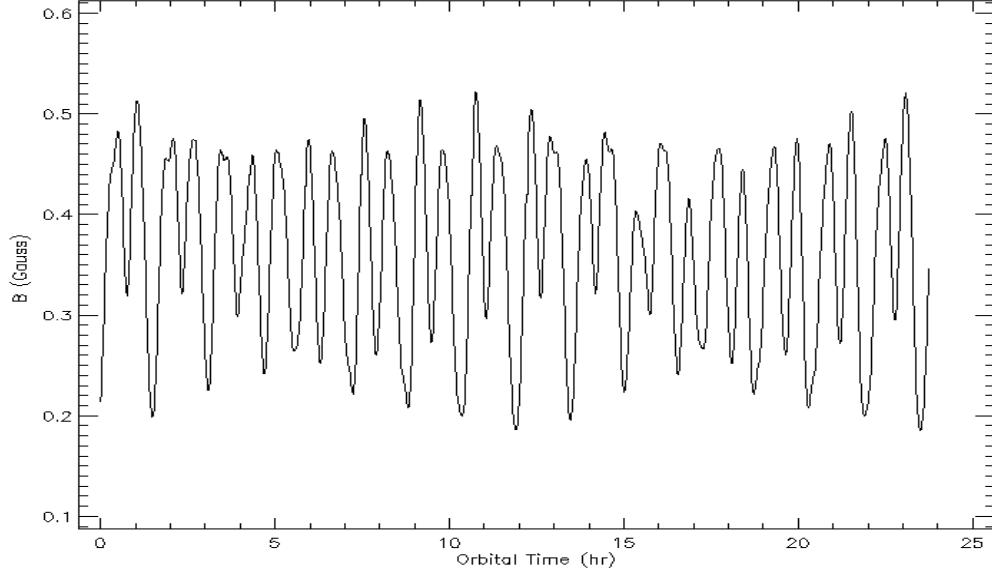
1 yörüngede değişen manyetik alan analizinden yola çıkarak (Şekil 6) Spatium uydusunun yer izdüşümü bilgisiyle (Şekil 15) artış ve azalışların Dünya'nın neresinde olduğu belirlenebilir. Uydu harekete ekvatordan başlar ve önce Kuzey Kutbuna gider. Ekvatordan Kuzey Kutbuna gidiş, manyetik alandaki ilk artışı oluşturur. Lokal maksimumda CHOMPTT uydusundaki gibi dalgalanmanın olmamasının nedeni uydunun yörünge eğikliğinden kaynaklanmaktadır. Uydu Kuzey Kutbundan Ekvatora geldiğinde ise manyetik alan düşer. Bunun sebebi ekvatorde manyetik alan çizgilerinin daha geniş olmasıdır. Uydu Ekvatordan Güney Kutbuna geldiğinde o bölgede manyetik alan arttığından maksimum değere ulaşır. Güney Kutbundan tekrar Ekvatora doğru çıktığında ise başlangıç noktasındaki değerin altına düşer. Bunun sebebi ise Ekvatora gelirken Güney Anomali Noktası'ndan geçmesidir. Şekil 13'de Güney Anomali Noktası'ndaki manyetik alan azalması görülebilir.

1 Gün için Yapılan Manyetik Alan Analizleri (17.3.2019/17.6.2019/17.9.2019/17.12.2019)

1 günlük analizlerde CHOMPTT ve Spatium uydularının yörüngelerindeki gün içerisindeki manyetik alandan değişimi çıkarılmıştır. Manyetik alanın karakteristiğini anlamak için yılın farklı dönemlerinde de analizler yapılmıştır. Yani 3 aylık periyotlar şeklinde 4 mevsimde oluşan sonuçlar alınmıştır. Ek olarak, önce CHOMPTT uydusunun yörüngesi 4 tarihte analiz edilmiştir. Sonrasında ise Spatium uydusunun yörüngesi 4 tarihte analiz edilmiştir. 1

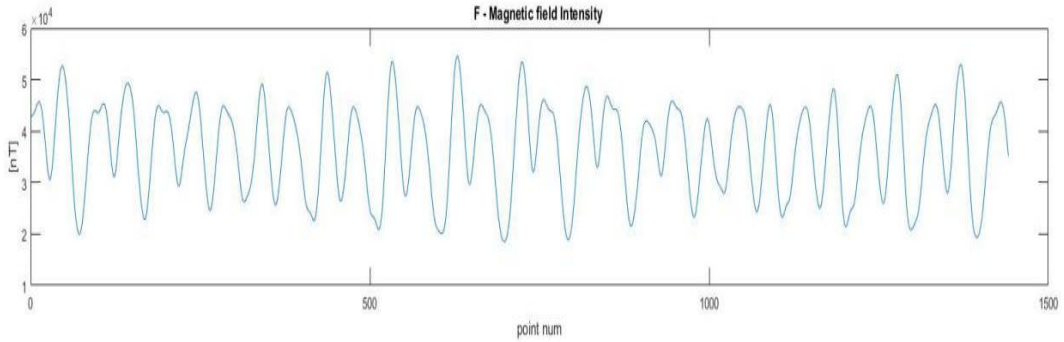
yörüngelik analizlerde olduğu gibi 1 günlük analizlerde de önce UJRA tabanlı sonra DMM tabanlı analiz yapılmıştır.

1 günlük analizlerde her yörüngenin kendine ait bir karakteristiği vardır.



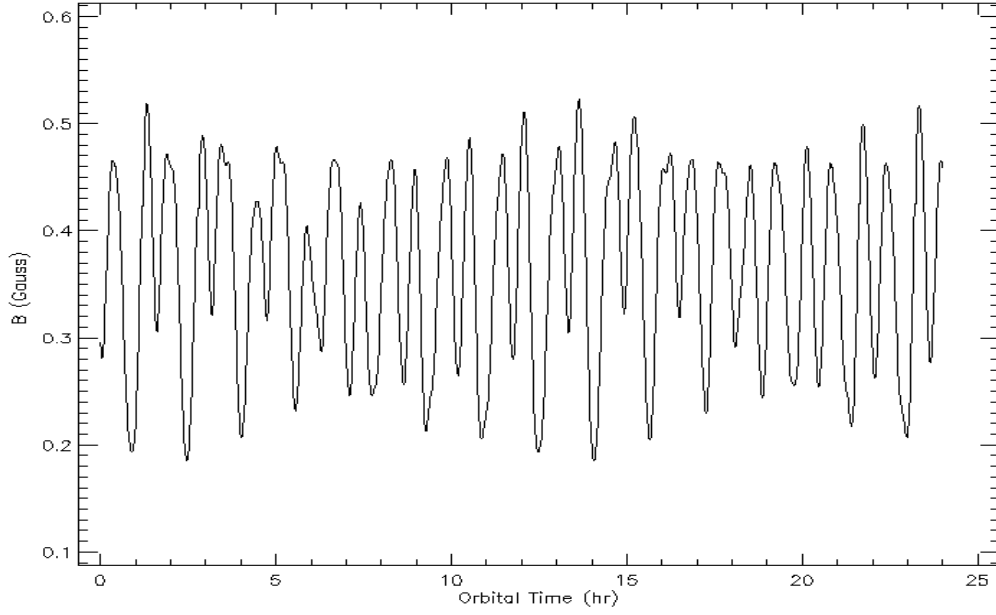
Şekil 16: CHOMPTT Uydusunun 17.03.2019 Tarihli 1 Günlük Manyetik Alan Analizi-UJRA

Yukarıdaki grafikten de görüleceği üzere 1 günde manyetik alanda genel anlamda bir artış ve azalış söz konusudur ve bu artış ve azalış birbirini kabaca tekrar etmektedir. 14 ile 17. Saatler arasında sıklıkta bir azalma söz konusudur. Maksimum ve minimum değerler ortaya çıkmaktadır. Maksimum manyetik alan değeri 0.52 Gauss 'dur. Minimum manyetik alan değeri ise 0.18 Gauss 'dur. 1 gündeki değişim miktarı ise 0.34 Gauss 'dur.



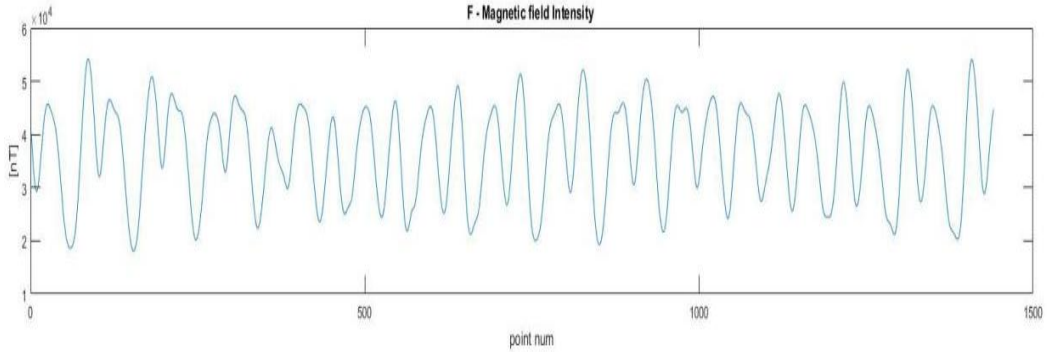
Şekil 17: CHOMPTT Uydusunun 17.03.2019 Tarihli 1 Günlük Manyetik Alan Analizi-DMM

DMM tabanlı analizde de UJRA tabanlı analize benzer bir yapıda karakteristik vardır. Artış ve azalışlar kendini tekrar eden bir yapıdadır ve UJRA tabanlıdaki gibi aynı aralıkta sıklık azalmaktadır. Maksimum manyetik alan değeri $5.4669 \times 10^4 \text{ nT}$ 'dir. (0.54 Gauss). Minimum manyetik alan değeri ise $1.8523 \times 10^4 \text{ nT}$ 'dir. (0.18 Gauss). 1 gündeki değişim miktarı ise $3.6146 \times 10^4 \text{ nT}$ 'dir (0.36 Gauss).



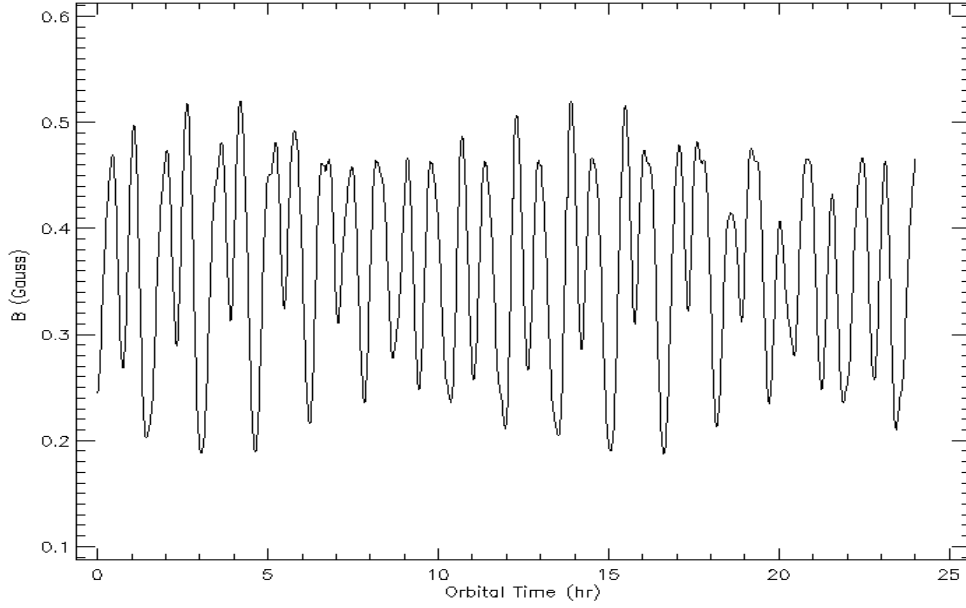
Şekil 18: CHOMPTT Uydusunun 17.06.2019 Tarihli 1 Günlük Manyetik Alan Analizi-UJRA

Haziran ayındaki analizde ise artış ve azalış karakterinin korunduğu gözlemlenir. Sıklığın yeri kaymıştır ve sıklık bir miktar azalmıştır. Saat bazlı incelendiğinde lokal maksimum ve lokal minimum değerler değişim azalmıştır. Maksimum manyetik alan değeri haziran ayında 0.53 Gauss 'dur. Minimum manyetik alan değeri ise 0.18 Gauss 'dur. 1 gündeki değişim miktarı ise 0.35 Gauss 'dur.



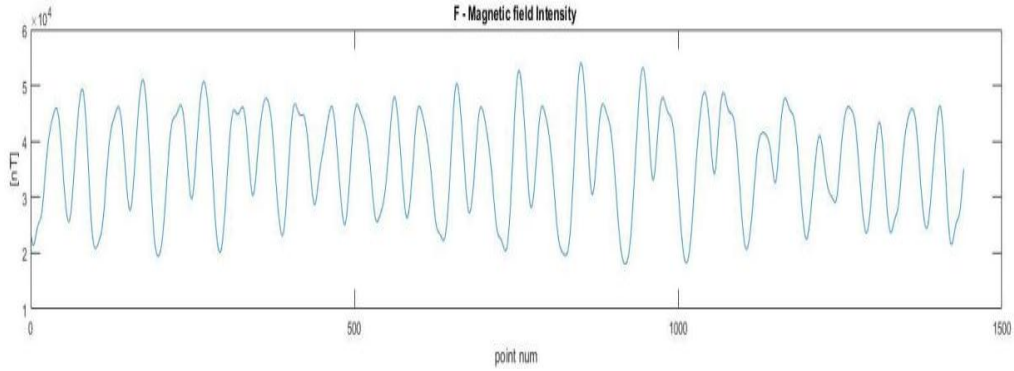
Şekil 19: CHOMPTT Uydusunun 17.06.2019 Tarihli 1 Günlük Manyetik Alan Analizi-DMM

DMM tabanlı analizde ise beklendiği gibi UJRA tabanlı analizle genel karakteristik aynıdır. Maksimum manyetik alan değeri $5.4216 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir. (0.54 Gauss). Minimum manyetik alan değeri ise $1.8057 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir. (0.18 Gauss). 1 gündeki değişim miktarı ise $3.6159 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir (0.36 Gauss).



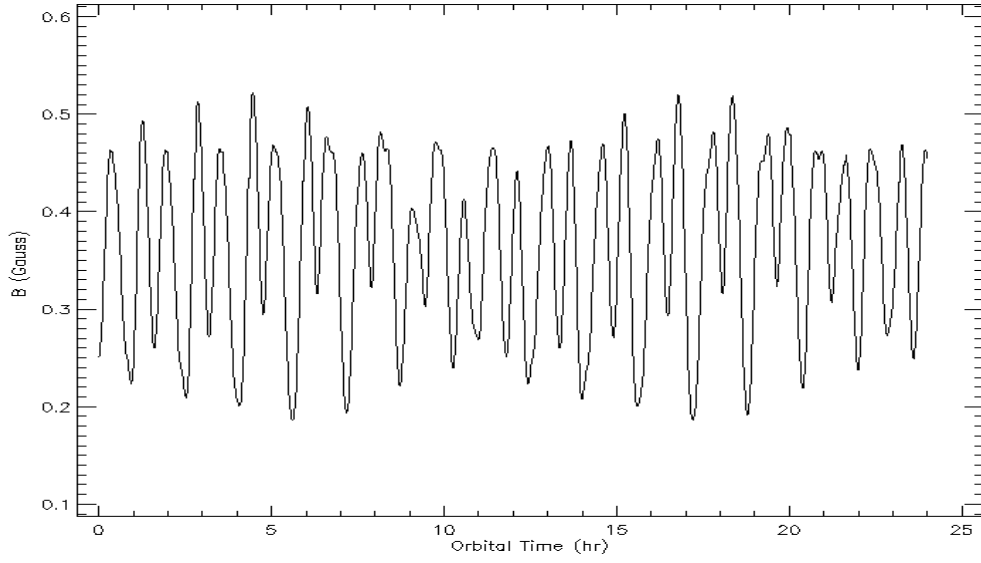
Şekil 20: CHOMPTT Uydusunun 17.09.2019 Tarihli 1 Günlük Manyetik Alan Analizi-UJRA

Eylül ayındaki analizde ise önceki analizlerde olduğu gibi genel karakteristik aynı şekildedir. Yine sıklık kaymıştır. Lokal azalışlar oluşmuştur. Maksimum manyetik alan değeri 17.09.2019'da 0.53 Gauss 'dur. Minimum manyetik alan değeri ise 0.18 Gauss 'dur. 1 gündeki değişim miktarı ise 0.35 Gauss 'dur.



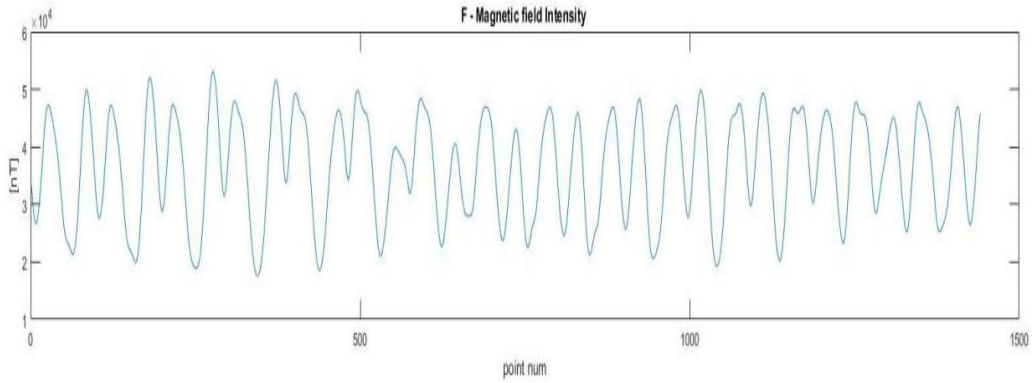
Şekil 21: CHOMPTT Uydusunun 17.09.2019 Tarihli 1 Günlük Manyetik Alan Analizi-DMM

Bu analizde ise beklendiği üzere genel karakteristik UJRA tabanlı analizle örtüşmektedir. Maksimum manyetik alan değeri $5.4068 \times 10^4 \text{ nT}$ 'dir. (0.54 Gauss). Minimum manyetik alan değeri ise $1.8011 \times 10^4 \text{ nT}$ 'dir. (0.18 Gauss). 1 gündeki değişim miktarı ise $3.6057 \times 10^4 \text{ nT}$ 'dir (0.36 Gauss).



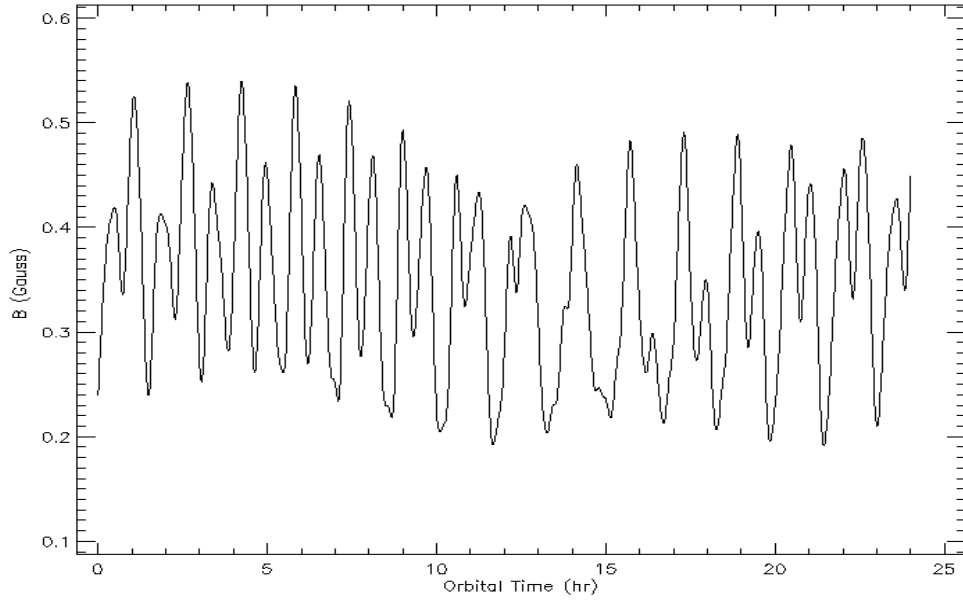
Şekil 22: CHOMPTT Uydusunun 17.12.2019 Tarihli 1 Günlük Manyetik Alan Analizi-UJRA

17 Aralık 2019'da yapılan analizde genel karakteristik korunmuştur. Daha önceki 3 aylık değişimlerde olduğu gibi sıklık kaymıştır. Lokal minimum değişimleri azalmıştır. Maksimum manyetik alan değeri aralık ayında 0.53 Gauss 'dur. Minimum manyetik alan değeri ise 0.18 Gauss 'dur. 1 gündeki değişim miktarı ise 0.35 Gauss 'dur.



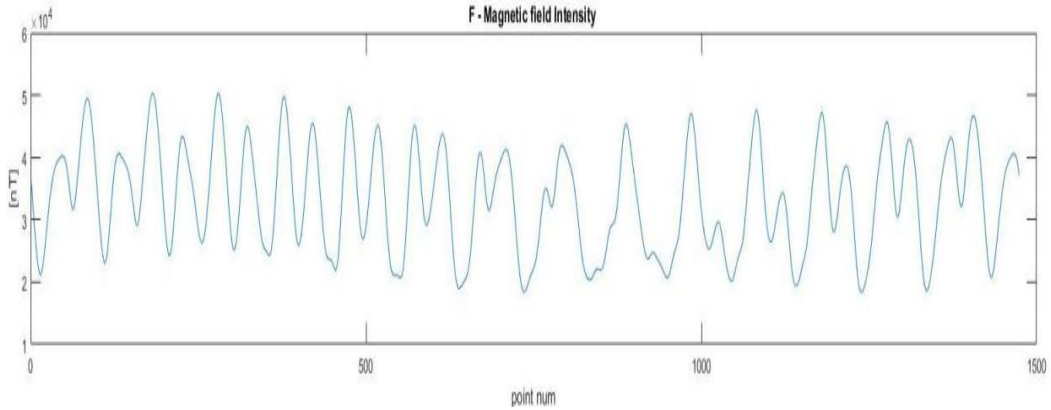
Şekil 23: CHOMPTT Uydusunun 17.12.2019 Tarihli 1 Günlük Manyetik Alan Analizi-DMM

Aralık ayında DMM tabanlı analizde ise UJRA tabanlı analizle benzerlik söz konusudur. Manyetik alan değişim sıklığının yeri daha net bir şekilde belirlemiştir. Maksimum manyetik alan değeri $5.3107 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir. (0.53 Gauss). Minimum manyetik alan değeri ise $1.7604 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir. (0.17 Gauss). 1 gündeki değişim miktarı ise $3.5503 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir (0.35 Gauss).



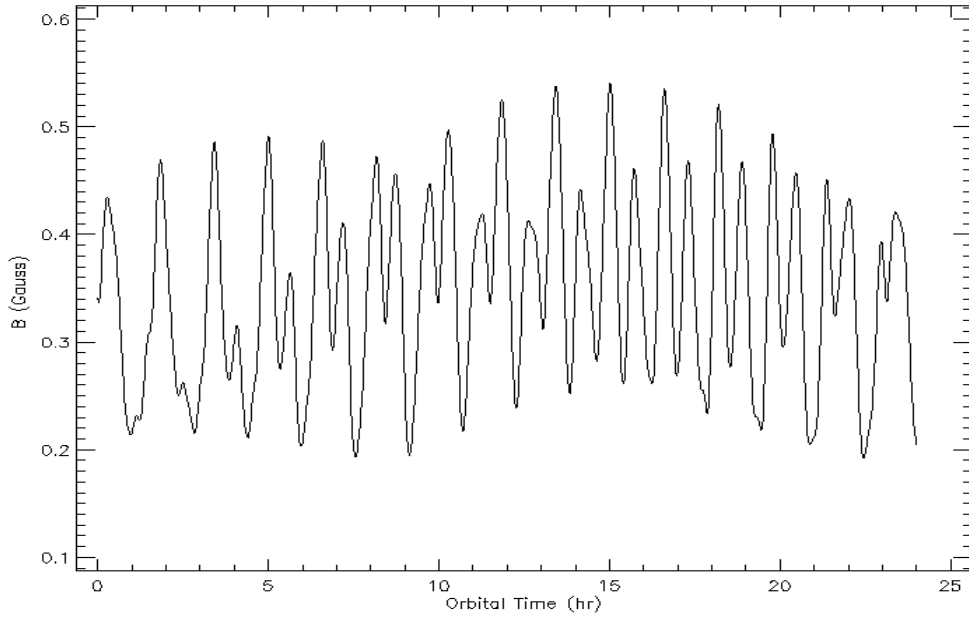
Şekil 24: Spatium Uydusunun 17.03.2019 Tarihli 1 Günlük Manyetik Alan Analizi-UJRA

Spatium uydusunun yörüngesindeki mart ayında yapılan 1 günlük analizde ise daha farklı bir yapı ortaya çıkmıştır. CHOMPTT uydusunun yörüngesinde olduğu gibi artış azalış karakteristiği vardır. Her saat değişimindeki lokal minimum ve lokal maksimumlar 13. Saate kadar azalmaktadır. Sonrasında ise artış göstermektedir. Bu yörüngedeki analizde de sıklık değişmiştir. Maksimum manyetik alan değeri 0.54 Gauss 'dur. Minimum manyetik alan değeri ise 0.19 Gauss 'dur. 1 gündeki değişim miktarı ise 0.35 Gauss 'dur.



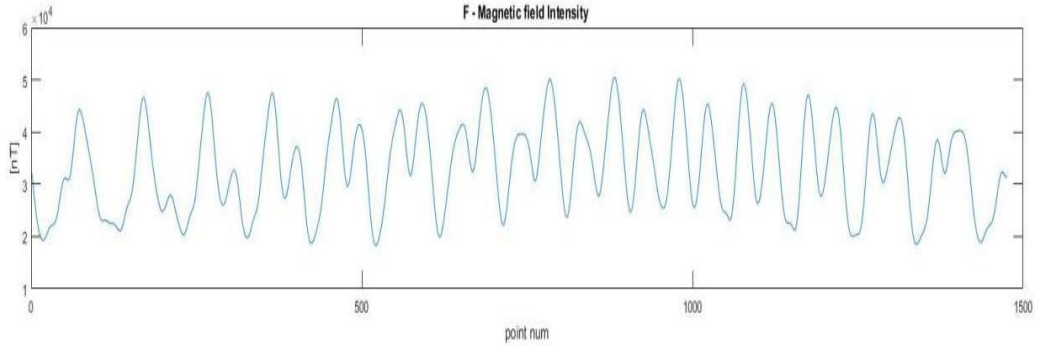
Şekil 25: Spatium Uydusunun 17.03.2019 Tarihli 1 Günlük Manyetik Alan Analizi-DMM

CHOMPTT uydusunun yörüngesinde olduğu gibi Spatium uydusunun yörüngesinde de DMM-UJRA benzerliği söz konusudur. Genel karakteristik aynıdır. Artış ve azalışlar mevcuttur. Maksimum manyetik alan değeri $5.0349 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir. (0.50 Gauss). Minimum manyetik alan değeri ise $1.8368 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir. (0.18 Gauss). 1 gündeki değişim miktarı ise $3.1981 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir (0.31 Gauss).



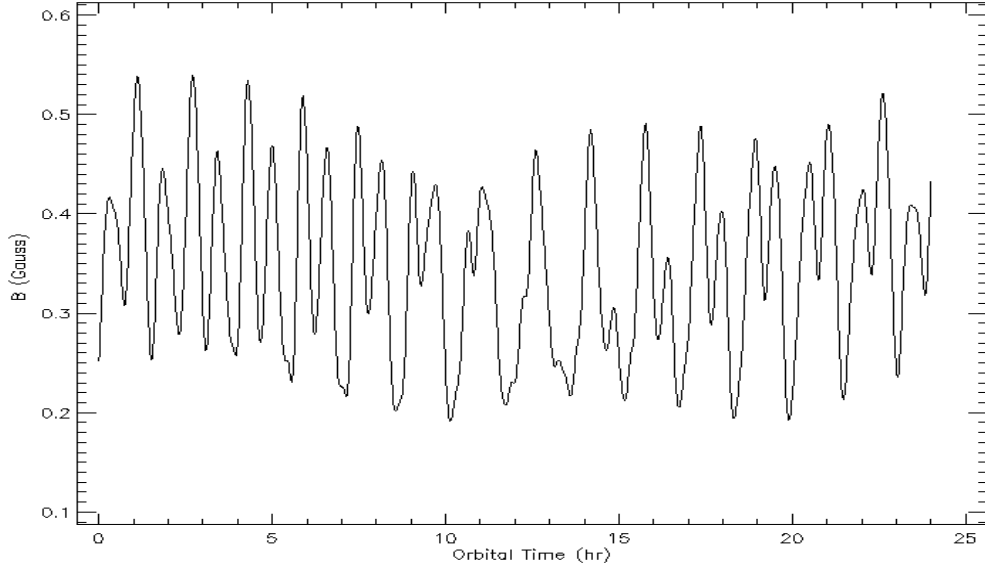
Şekil 26: Spatium Uydusunun 17.06.2019 Tarihli 1 Günlük Manyetik Alan Analizi-UJRA

UJRA tabanlı analizde Spatium uydusunun yörüngesindeki manyetik alan eylül ayındakine göre farklılık göstermektedir. Azalışlarda lokal artış ortaya çıkmaktadır. 3 aylık değişimde sıklık kaymıştır. Maksimum manyetik alan değeri 0.54 Gauss 'dur. Minimum manyetik alan değeri ise 0.19 Gauss 'dur. 1 gündeki değişim miktarı ise 0.35 Gauss 'dur.



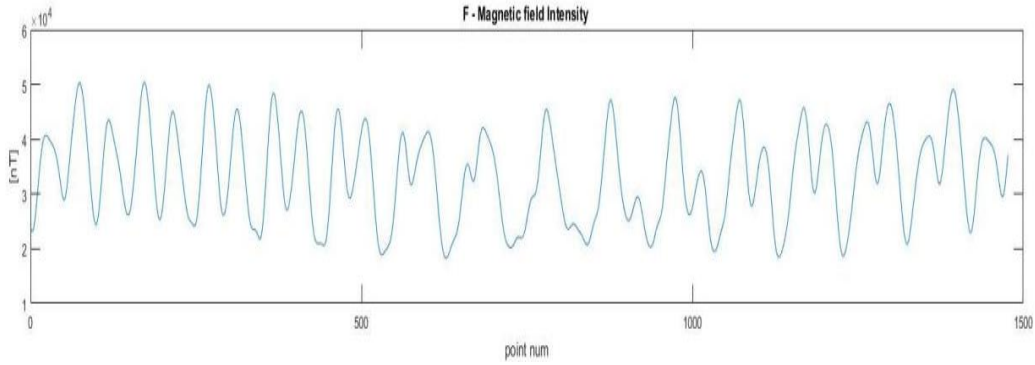
Şekil 27: Spatium Uydusunun 17.06.2019 Tarihli 1 Günlük Manyetik Alan Analizi-DMM

DMM tabanlı analizde haziran ayında karakteristik yine aynıdır. Artış ve azalış yapısı korunmaktadır. Maksimum manyetik alan değeri $5.0459 \times 10^4 \text{ nT}$ 'dir. (0.50 Gauss). Minimum manyetik alan değeri ise $1.8287 \times 10^4 \text{ nT}$ 'dir. (0.18 Gauss). 1 gündeki değişim miktarı ise $3.2172 \times 10^4 \text{ nT}$ 'dir (0.32 Gauss).



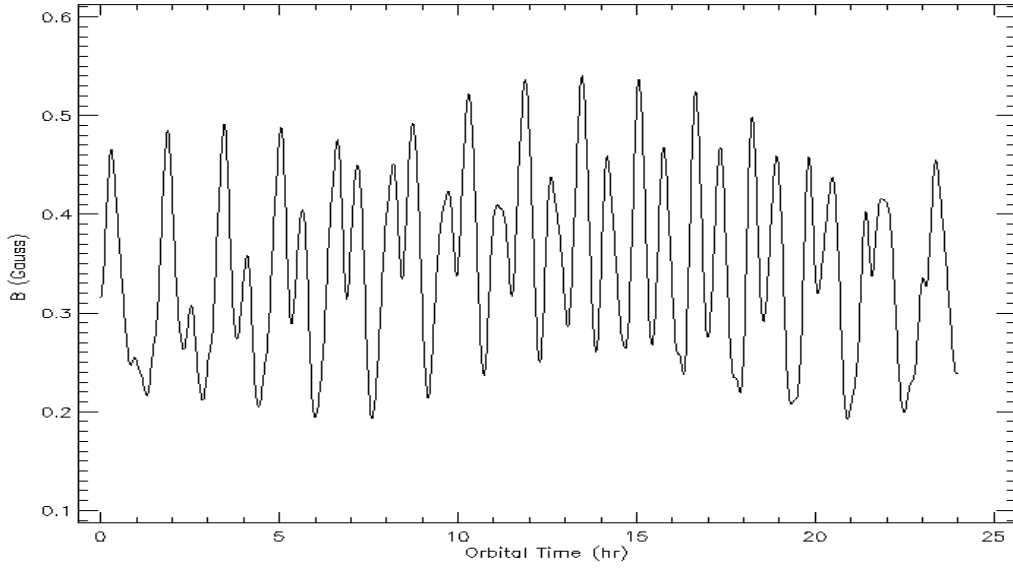
Şekil 28: Spatium Uydusunun 17.09.2019 Tarihli 1 Günlük Manyetik Alan Analizi-UJRA

Eylül ayında ise genel karakteristik yine bozulmamıştır. Sıklık kaymıştır. Lokal artışlar günün yarısından önce fazlayken, günün ikinci yarısında ilk yarısına göre azdır. Maksimum manyetik alan değeri 0.53 Gauss 'dur. Minimum manyetik alan değeri ise 0.19 Gauss 'dur. 1 gündeki değişim miktarı ise 0.34 Gauss 'dur.



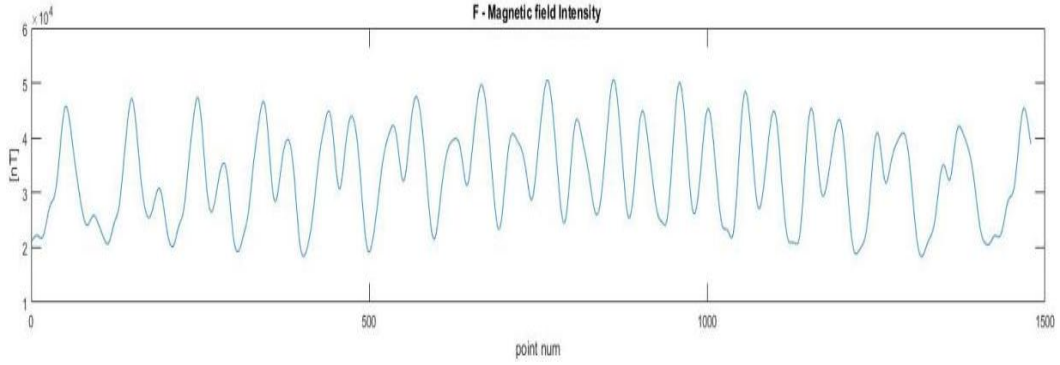
Şekil 29: Spatium Uydusunun 17.09.2019 Tarihli 1 Günlük Manyetik Alan Analizi-DMM

DMM tabanlı analiz UJRA tabanlı analizle karşılaştırıldığında yapı aynıdır. Günün ortasında maksimum değer düşmektedir. Maksimum manyetik alan değeri $5.0416 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir. (0.50 Gauss). Minimum manyetik alan değeri ise $1.8274 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir. (0.18 Gauss). 1 gündeki değişim miktarı ise $3.2142 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir (0.32 Gauss).



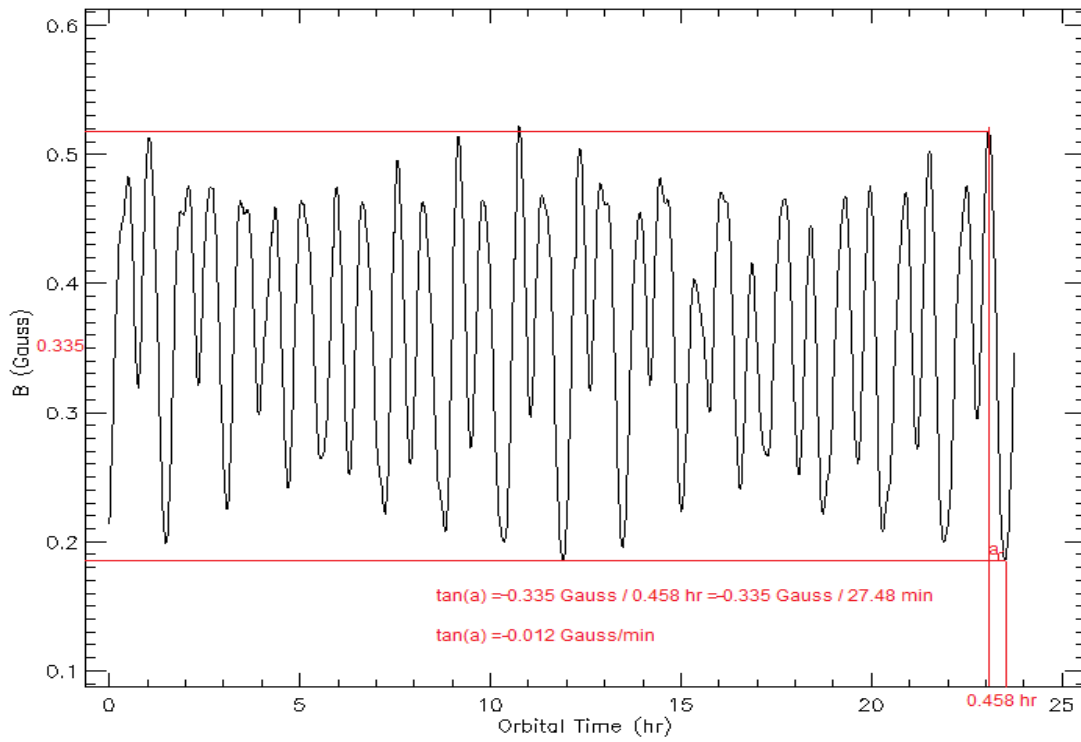
Şekil 30: Spatium Uydusunun 17.12.2019 Tarihli 1 Günlük Manyetik Alan Analizi-UJRA

Yıl içerisindeki son analizde ise önceki analizlerde olduğu gibi genel yapı bozulmamıştır. Yine daha önceki analizlerdeki gibi sıklık kaymıştır. Lokal artış günün yarısından sonra lokal azalışa dönmektedir. Maksimum manyetik alan değeri 0.53 Gauss 'dur. Minimum manyetik alan değeri ise 0.20 Gauss 'dur. 1 gündeki değişim miktarı ise 0.33 Gauss 'dur.



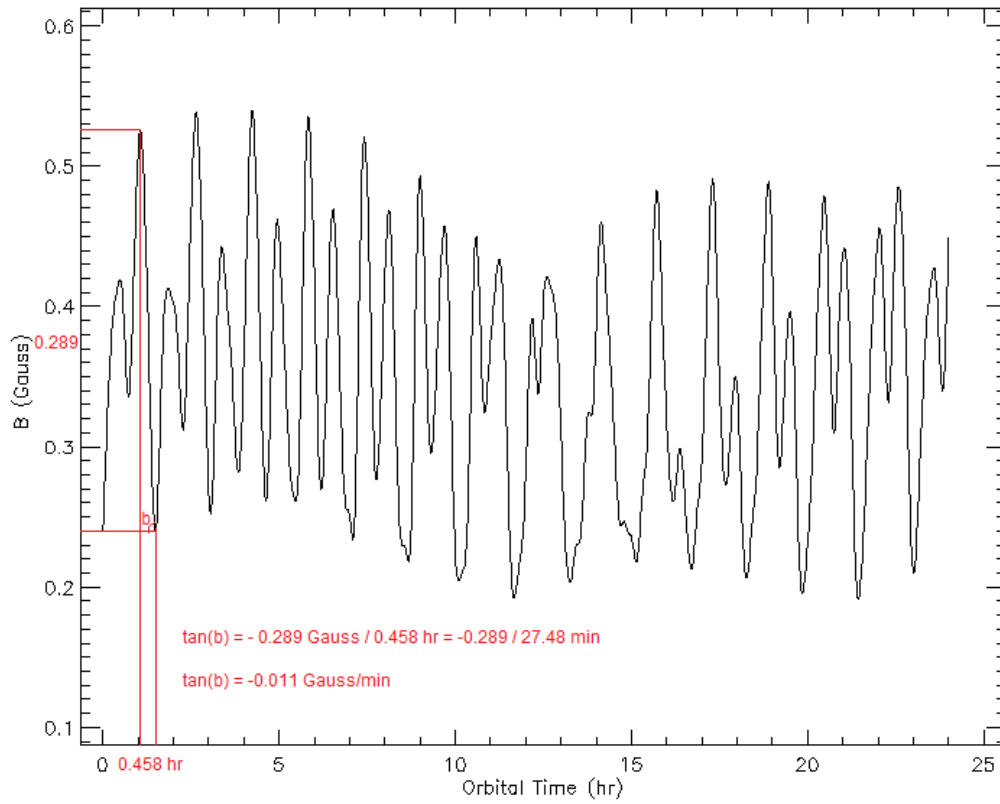
Şekil 31: Spatium Uydusunun 17.12.2019 Tarihli 1 Günlük Manyetik Alan Analizi-DMM

DMM tabanlı modelde aralık ayında karakteristik aynıdır. Artış ve azalış korunmaktadır. Maksimum manyetik alan değeri $5.0612 \times 10^4 \text{ nT}$ 'dir. (0.50 Gauss). Minimum manyetik alan değeri ise $1.8345 \times 10^4 \text{ nT}$ 'dir. (0.18 Gauss). 1 gündeki değişim miktarı ise $3.2267 \times 10^4 \text{ nT}$ 'dir (0.32 Gauss).



Şekil 32: CHOMPTT Uydusunun Yörüngesinin Anlık Manyetik Alan Değişimi-UJRA

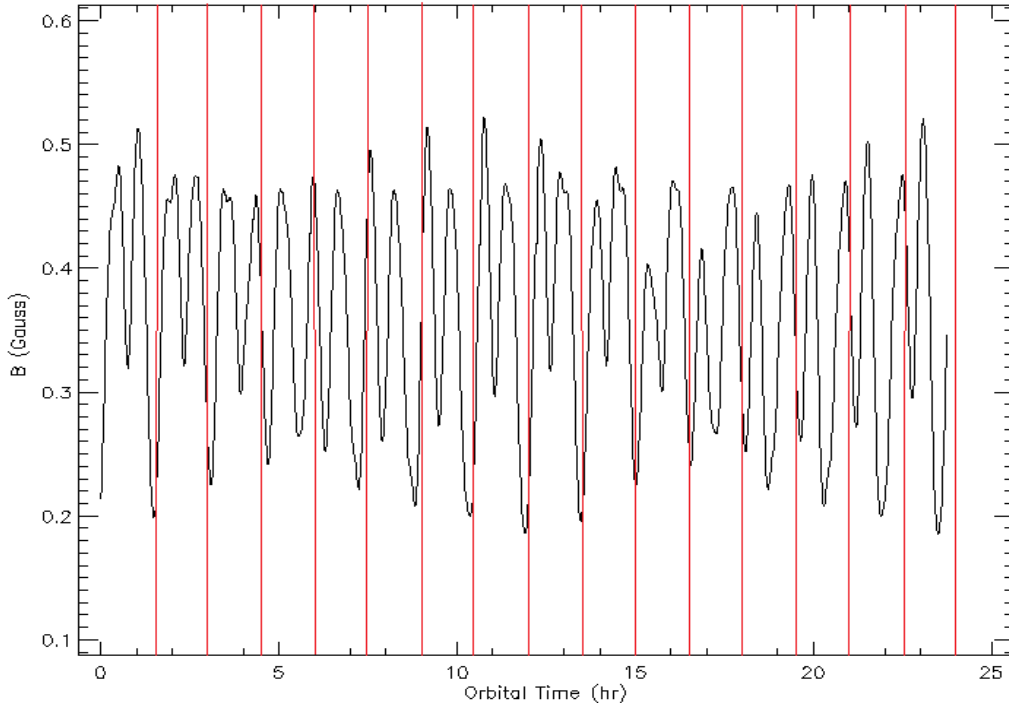
CHOMPTT uydusunun yörüngesindeki anlık en büyük değişime baktığımızda, bu değişim 23. Saatten sonra meydana gelmektedir. Bu en büyük anlık değişim 0.012Gauss/dakika azalış şeklindedir. Bu analiz 17.03.2019 tarihine göre yapılmıştır.



Şekil 33: Spatium Uydusunun Yörüngesinin Anlık Manyetik Alan Değişimi-UJRA

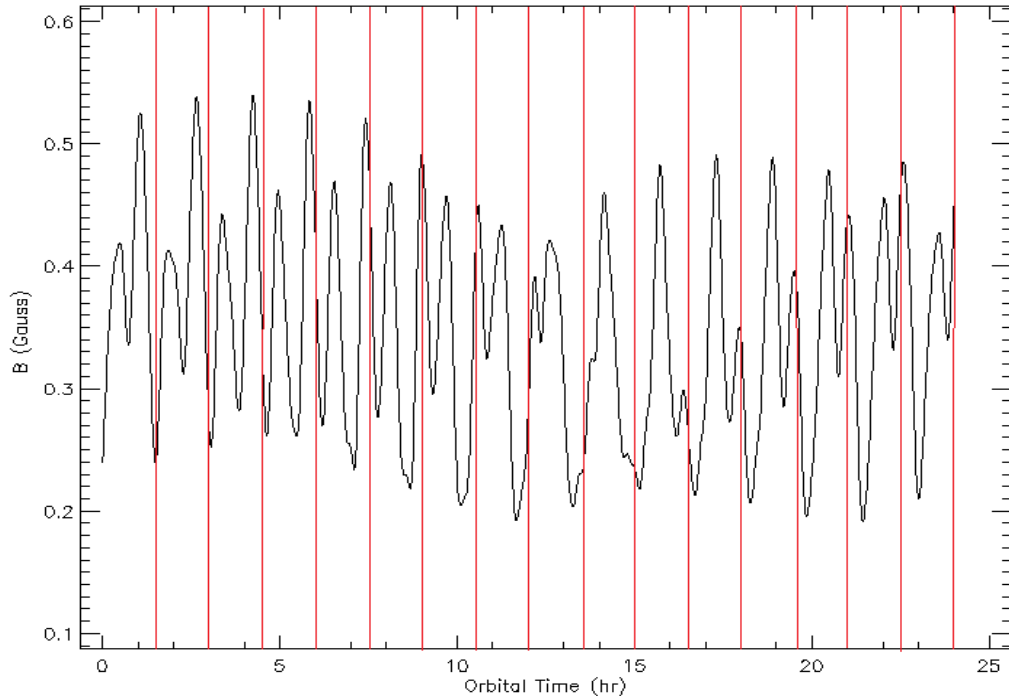
Spatium uydusunun yörüngesindeki anlık en büyük değişime baktığımızda, bu değişim 1. Saatten sonra meydana gelmektedir. Bu en büyük anlık değişim 0.011 Gauss/dakika azalış şeklindedir. Bu analiz 17.03.2019 tarihine göre yapılmıştır.

1 güne baktığımızda uyduların yörüngelerinde çeşitli sayıda yörünge sayısı karşılaştıkları görülmektedir. Alçak dünya yörüngesinde bu sayı genellikle 15 civarlarındadır.



Şekil 34: CHOMPTT Yörünge /Manyetik Alan Grafiği-UJRA

CHOMPTT uydusunun yörüngesinde yaklaşık 16 adet yörünge bulunmaktadır. Şekil 34'te görüleceği üzere zirveler ve minimum değerler görünmektedir ama genel hatlarıyla bir artış ve azalış söz konusudur. Her yörünge kendi içinde incelendiğinde kendine özgü bir yapıya sahip olduğu ortaya çıkmaktadır. Çeşitli lokal artış ve azalışlar oluşmaktadır. Gün içerisindeki her yörüngede maksimum ve minimum manyetik alan değeri değişmektedir.



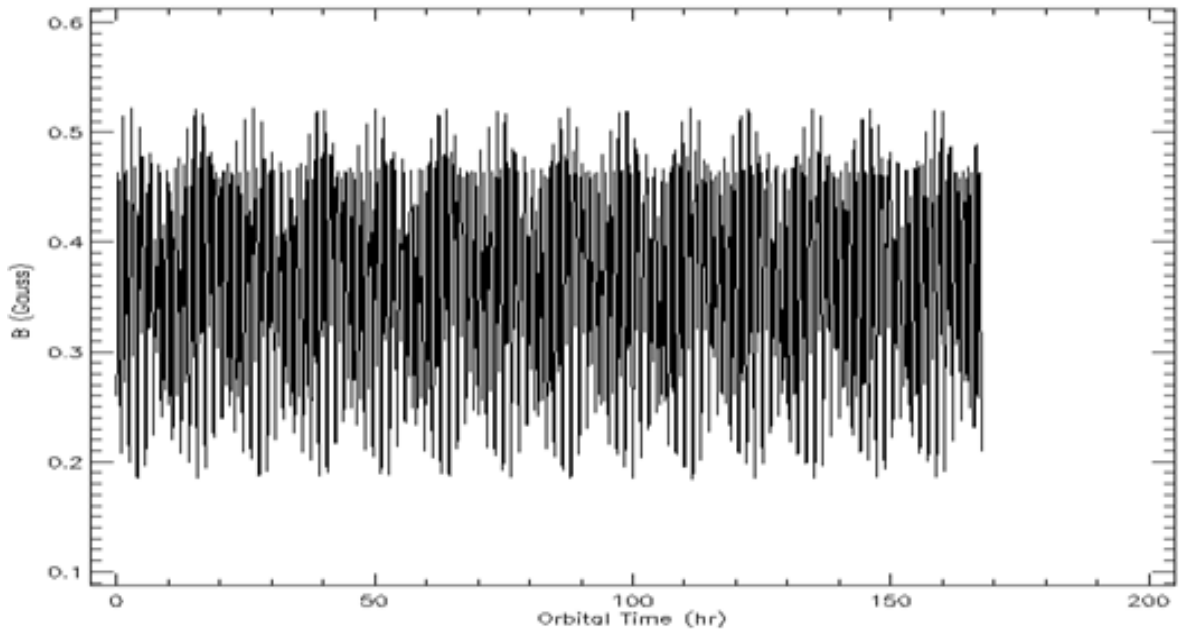
Şekil 35: Spatium Yörünge/Manyetik Alan Grafiği-UJRA

Spatium uydusunun yörüngesi CHOMPTT uydusunun yörüngesine yükseklik olarak benzediği için bu yörüngede de yaklaşık 16 adet yörünge bulunmaktadır. Şekil 35'te görüleceği üzere zirveler ve minimum değerler görünmektedir ama genel hatlarıyla bir artış ve azalış söz konusudur. Her yörünge kendi içinde incelendiğinde kendine özgü bir yapıya sahip olduğu ortaya çıkmaktadır. Çeşitli lokal artış ve azalışlar oluşmaktadır. Gün içerisindeki her yörüngede maksimum ve minimum manyetik alan değeri değişmektedir.

1 Hafta için Yapılan Manyetik Alan Analizleri (17.3.2019)

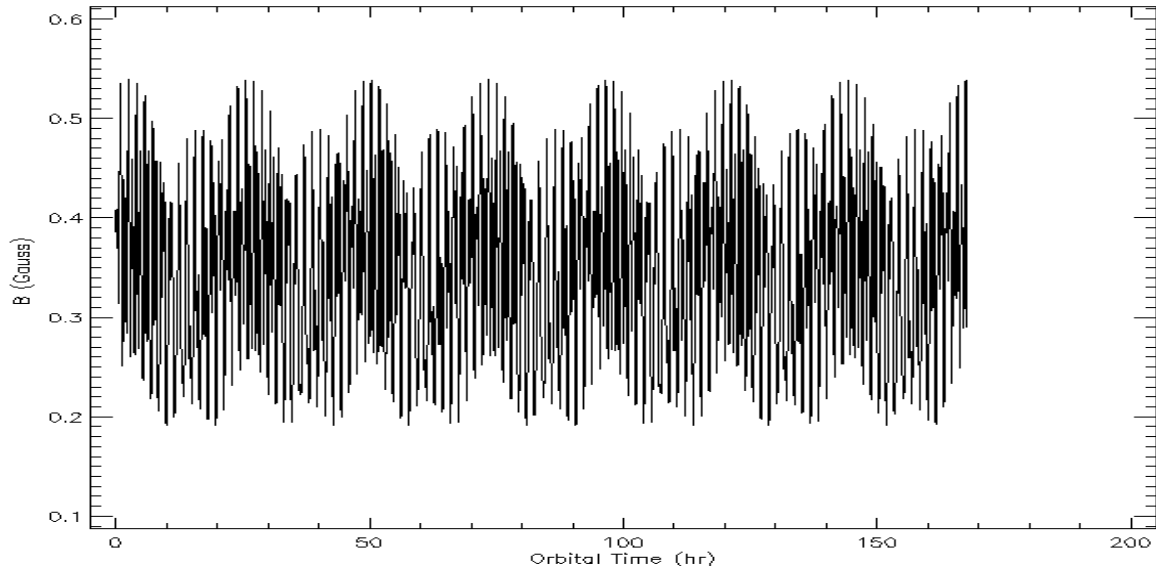
-Görev Başlangıcından itibaren 1 Haftalık Yapılan Manyetik Alan Analizleri

Aşağıdaki iki grafikte iki uydunun göreve başlangıç zamanındaki 1 haftalık analizleri verilmiştir. Bu analizin yapılmasındaki amaç görev sürelerinden belli bir süre sonra uyduların maruz kaldıkları manyetik alan değişimini göstermektir.



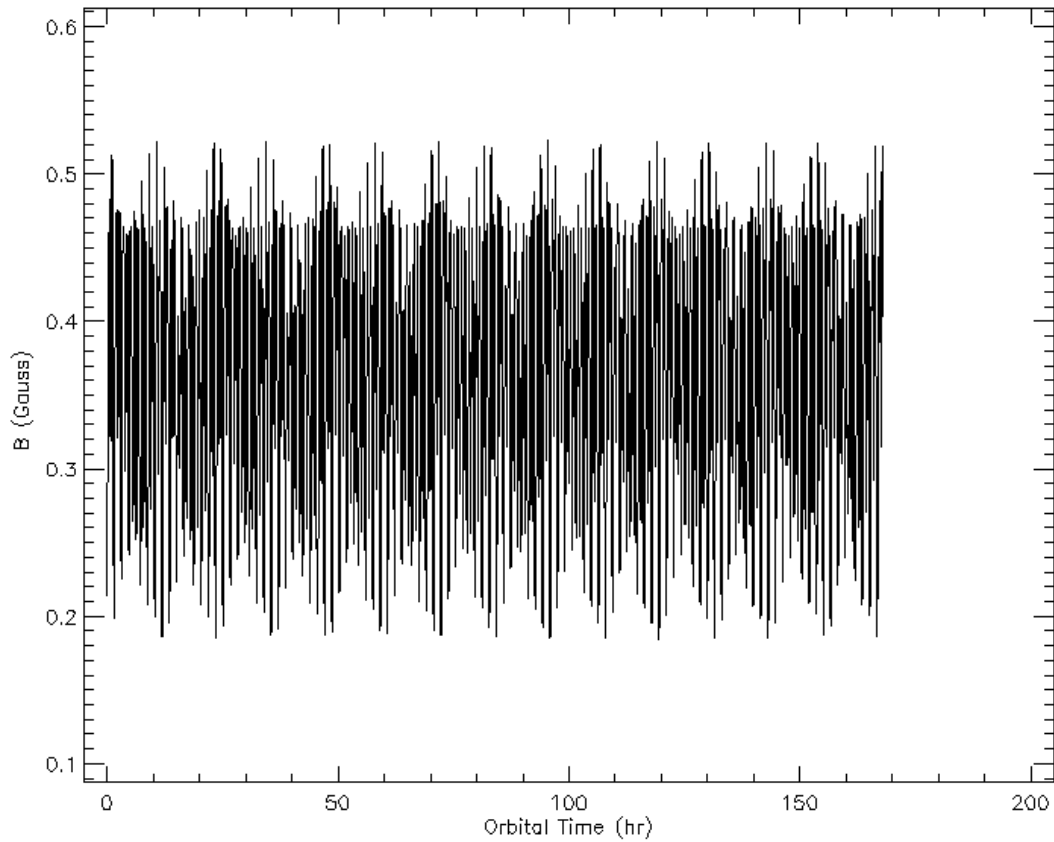
Şekil 36: CHOMPTT Uydusu İçin Görev Başlangıcından İtibaren (17.12.2018) 1 Haftalık Manyetik Alan Analizi-UJRA

CHOMPTT uydusu için görev başlangıcındaki ve 4 ay sonraki grafik karşılaştırıldığında (Şekil 36-Şekil 38) fazla bir değişim olmadığı görülmektedir.



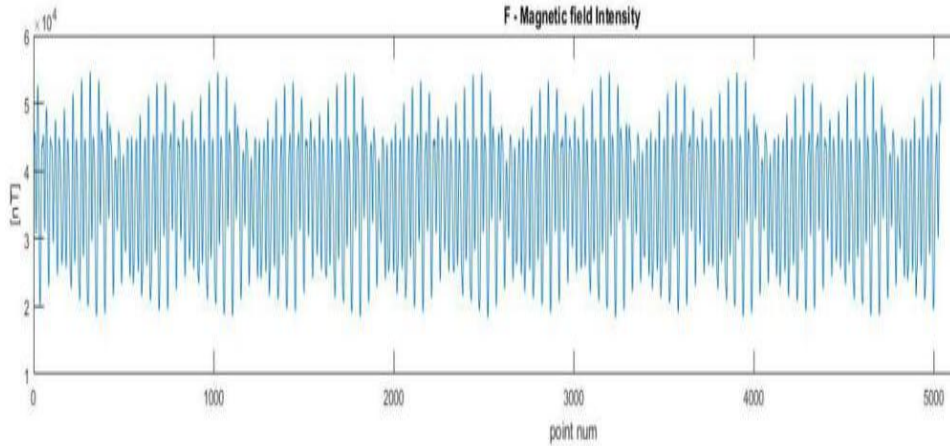
Şekil 37: Spatium Uydusu İçin Görev Başlangıcından İtibaren (11.10.2018) 1 Haftalık Manyetik Alan Analizi-UJRA

Spatium uydusu için görev başlangıcındaki ve 5 ay sonraki grafik karşılaştırıldığında (Şekil 37-Şekil 40) az bir değişim söz konusudur. Sıklığın azaldığı görülmektedir.



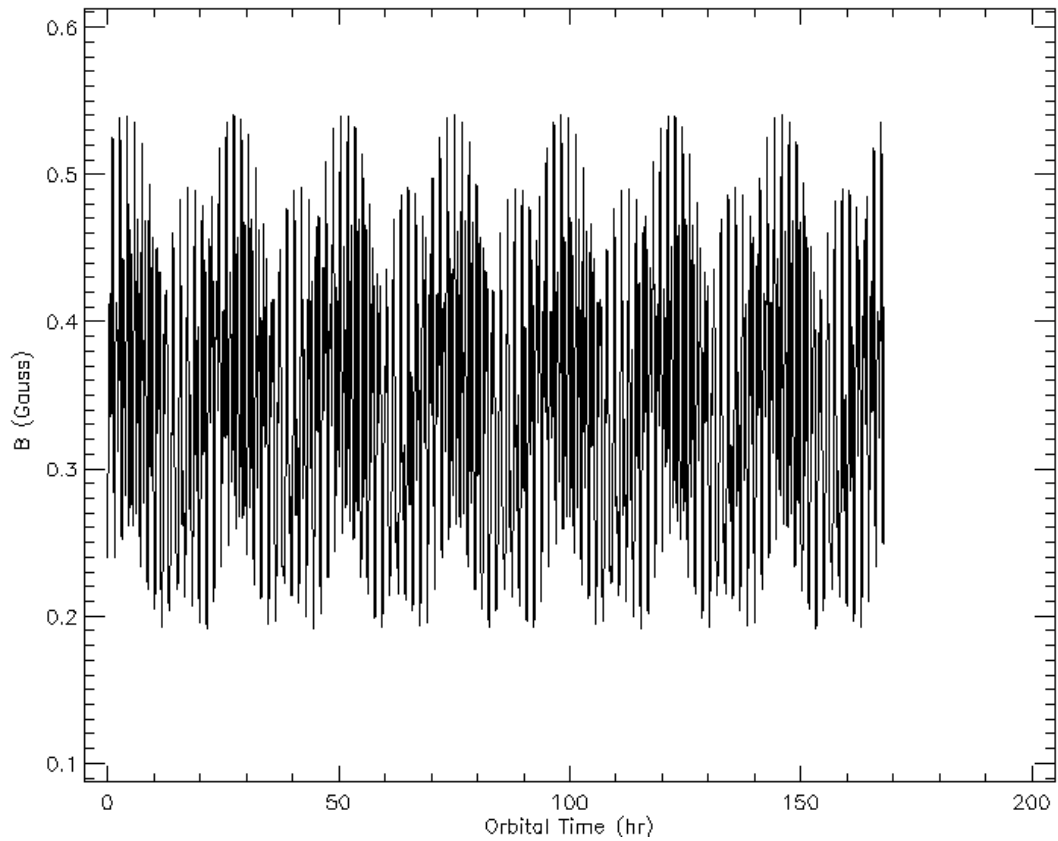
Şekil 38: CHOMPTT Uydusunun Yörüngesinin 1 Haftalık Manyetik Alan Analizi-UJRA

1 haftalık UJRA tabanlı analizde genel olarak karakter korunmuştur. Artış ve azalış devam etmektedir. 1 günlük analizin birleşmiş halidir. Maksimum manyetik alan değeri 0.53 Gauss 'dur. Minimum manyetik alan değeri ise 0.18 Gauss 'dur. 1 gündeki değişim miktarı ise 0.35 Gauss 'dur.



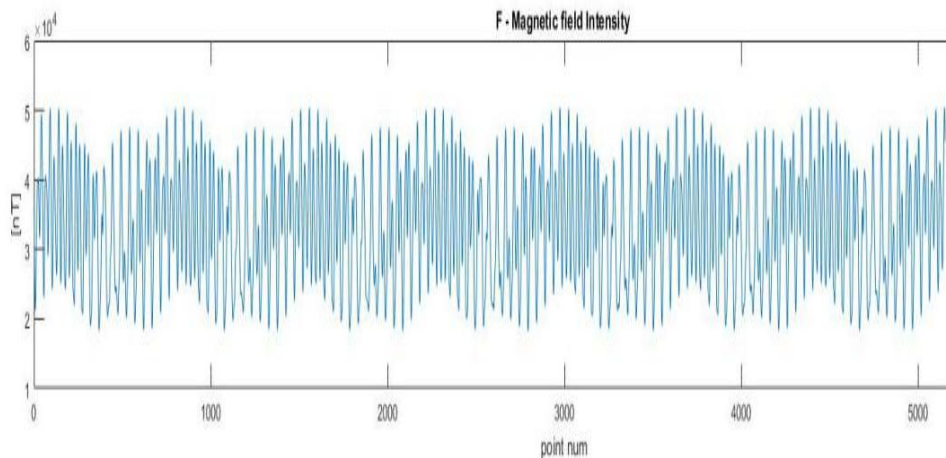
Şekil 39: CHOMPTT Uydusunun Yörüngesinin 1 Haftalık Manyetik Alan Analizi-DMM

DMM tabanlı modelde ise 1 yörüngelik ve 1 günlük analizlerde olduğu gibi karakteristik aynıdır. Maksimum manyetik alan değeri $5.4669 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir. (0.54 Gauss). Minimum manyetik alan değeri ise $1.8296 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir. (0.18 Gauss). 1 gündeki değişim miktarı ise $3.6373 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir (0.36 Gauss).



Şekil 40: Spatium Uydusunun Yörüngesinin 1 Haftalık Manyetik Alan Analizi-UJRA

Spatium uydusunun yörüngesinde, 1 haftalık UJRA tabanlı analizde genel olarak karakter korunmuştur. 1 günlük analizin birleşmiş halidir. Maksimum manyetik alan değeri 0.54 Gauss 'dur. Minimum manyetik alan değeri ise 0.19 Gauss 'dur. 1 gündeki değişim miktarı ise 0.35 Gauss 'dur.



Şekil 41: Spatium Uydusunun Yörüngesinin 1 Haftalık Manyetik Alan Analizi-DMM

DMM tabanlı model UJRA tabanlı modellerle karşılaştırıldığında grafikler örtüşmektedir. Maksimum manyetik alan değeri $5.0408 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir. (0.50 Gauss). Minimum manyetik alan değeri ise $1.8222 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir. (0.18 Gauss). 1 gündeki değişim miktarı ise $3.2186 \cdot 10^4 \text{ nT}$ 'dir (0.32 Gauss).

Tablo 4: CHOMPTT ve Spatium Uydularının İVS Bilgileri

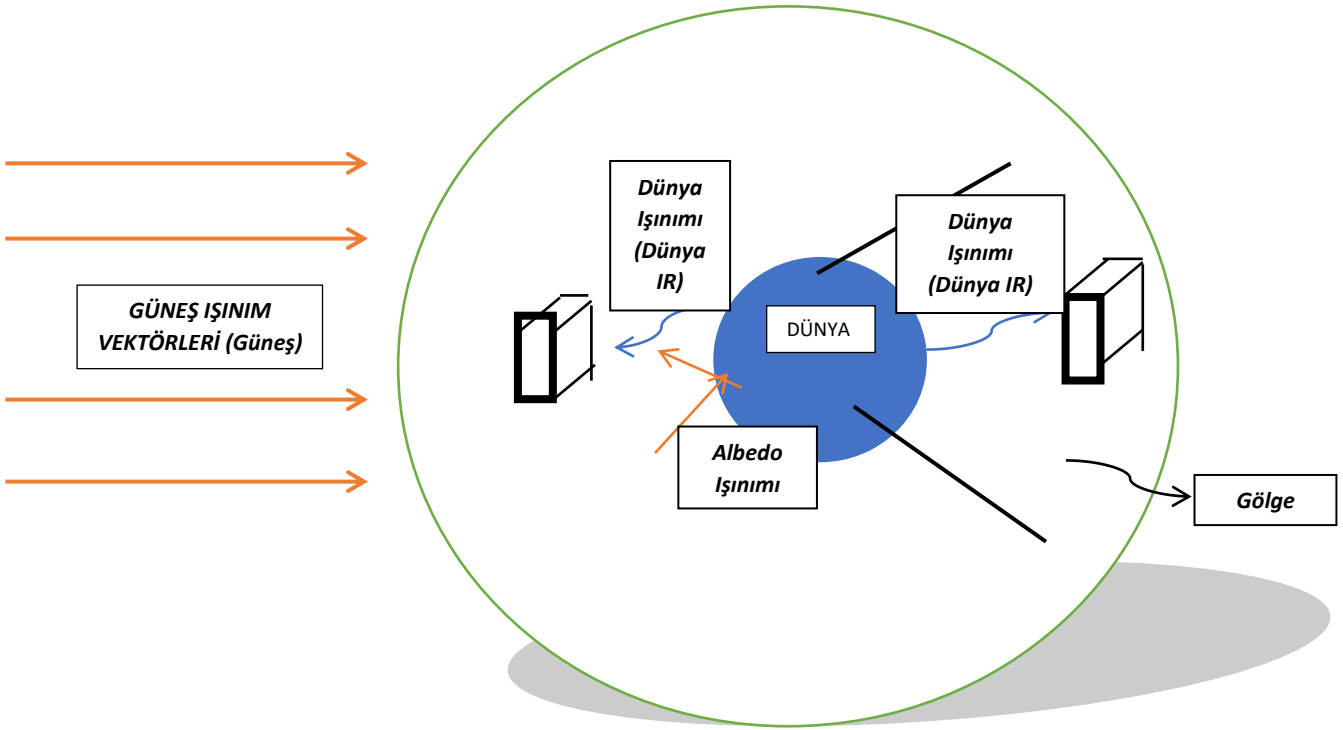
CHOMPTT								
17/03/2019								
1	43855U	18104G	19076.61715359	.00000041	00000-0	00000+0	0	9993
2	43855	85.0372	117.9747	0015433	301.8370	58.1478	15.22193990	13868
17/06/2019								
1	43855U	18104G	19168.84300096	.00000727	00000-0	29618-4	0	9990
2	43855	85.0388	57.0040	0016790	327.6879	32.3309	15.22374263	27891
17/09/2019								
1	43855U	18104G	19260.79736519	.00000682	00000-0	27562-4	0	9996
2	43855	85.0393	356.2031	0017722	347.5274	12.5533	15.22493535	41885
17/12/2019								
1	43855U	18104G	19351.88865292	+.00001089	+00000-0	+44819-4	0	9994
2	43855	085.0353	295.9524	0018954	011.9667	348.2019	15.22657628	055746
SPATIUM								
17/03/2019								
1	43639U	98067PP	19076.19176591	.00014473	00000-0	20077-3	0	9995
2	43639	51.6380	95.8623	0006010	101.6092	258.5575	15.57292060	25156
17/06/2019								
1	43639U	98067PP	19168.79456422	.00006992	00000-0	93687-4	0	9992
2	43639	51.6394	351.3242	0005775	100.1002	260.0643	15.59221866	39595
17/09/2019								
1	43639U	98067PP	19260.40631986	+.00011456	+00000-0	+14131-3	0	9990
2	43639	051.6375	250.6653	0005988	079.9239	280.2430	15.60680418	53893
17/12/2019								
1	43639U	98067PP	19351.45319177	.00010679	00000-0	12061-3	0	9997
2	43639	51.6366	151.4748	0004511	74.8536	285.2957	15.63081077	68121

Yukarıdaki bütün analizler Tablo 4'teki İki Satır Veri Seti (İVS) [Two Line Element Set (TLE)] bilgisi kullanılarak yapılmıştır.

ISIL ANALİZLER

YÖNTEM

Termal yükler çevresel ve ekipman kaynaklı olarak ikiye ayrılabilir. Alçak dünya yörüngesinde ısıyı uzay aracına yayan çevresel iki ayrı ısı kaynağı mevcuttur: Güneş ve Dünya. Temelde bu çevresel yükler bir maddenin, sıcaklığına bağlı olarak elektromanyetik dalga yaymasından kaynaklanır. Bu tip ısı transferi ışınım ile ısı transferi olarak adlandırılır. Güneş sistemimizde ışınımın temel kaynağı Güneştir. Güneşten direkt gelen ışıma yörüngedeki uyduya termal bir yük bindirir. Güneşin direkt olarak ısıttığı Dünya dolaylı olarak yörüngesinde bulunan uydulara bunu yansıtarak bir ışınım yapar ve ayrıca kendi sıcaklığına bağlı olarak yaptığı ışınım da bir diğer termal yüküdür.



Şekil 42: Alçak Dünya Yörüngesindeki Uydunun Termal Ortamı

Alçak dünya yörüngesinde bulunan bir uydunun/küp uydunun basit bir ısı denge analizi yapmak için Enerjinin Korunumu Yasası uygulanmalıdır. Enerjinin korunumu yani termodinamiğin birinci kanunundan yola çıkarak bir sisteme giren ve çıkan enerjilerin toplamı sistemin net enerji değişimini verir ve bir süre sonra bu değişim dengeye ulaşır. Bu da giren ve çıkan enerjilerin birbirine eşit olacağı anlamına gelir bu ifadenin genel hali aşağıdaki gibidir. [Larson, Wertz, 1992]

$$Q_{içeriye\ giren} = Q_{dışarıya\ çıkan} \quad (36)$$

$$Q_{iç} + Q_{dış} = Q_{ışıyan} \quad (37)$$

Alçak dünya yörüngesindeki bir küp uydu için,

$$Q_{Güneş} + Q_{Albedo} + Q_{Dünya\ IR} + Q_{iç} = Q_{ışıyan} \quad (38)$$

Bu projedeki küp uydu 6U'luk bir küp uydudur ve boyutları aşağıdaki gibidir.

Tablo 5: 6U'luk Küp Uydunun Boyut Bilgisi

	Yan yüzey	Üst Yüzey	Ön Yüzey
En	0,2 metre	0,1 metre	0,1 metre
Boy	0,3 metre	0,3 metre	0,2 metre

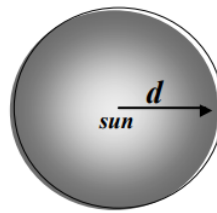
6U boyut skalasındaki bir Küp uydunun öncül termal analizini yapmak için benzer boyutlarda ince bir levha benzetmesi kullanılabilir. Burada uydunun güneş senkron yörüngede olduğu varsayımıyla ışıınım düşüşü benzer olarak analizler yapılmıştır ışıınım düşer. Yörüngede uydunun bir yüzü güneşe diğer bir yüzü dünyaya bakar ve bu yüzeyler ısıll yüklerle yüksek miktarda maruz kalır. Fakat uydunun tüm yüzeyleri ışııma yaparak enerji atımı sağlar. Bu durumlar dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Bu levha benzetimindeki yanal yüzeyler uydunun yörüngedeki konumuna bağlı olarak farklı sıcaklıklara ulaşacaktır. En yüksek sıcaklığına ulaşacağı zaman Güneş'ten direkt gelen ışıınım, Dünya'nın sıcaklığı dolayısıyla yapacağı ışııma ve dünya üzerinden yansıyacak ışıınımla birlikte faydalı yükünden gelecek ısı kaynağı ile oluşur. Bu gelen ısıll yükler aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmıştır.

Uydunun yörüngedeki konumuna göre ısıll analizde oluşacak değişiklik şu şekildedir:

$$\bullet \quad Q_{güneş} = q_{güneş} \times A_s \times \alpha \quad (39)$$

ışıınım salan bir gök cisminin bütün alanının saniyede saldığı ışıınım gücüdür. Astronomide sıkça kullanılan ve ışıınım gücü (L) yıldızın sıcaklığı ve yarıçapına bağlı olduğunu gösteren ifadesi ise aşağıdaki gibidir.

$$L_{güneş} = 4 \times \pi \times r_{güneş}^2 \times \sigma \times T_{güneş}^4 \text{ W} \quad (40)$$



Şekil 43: Sembolik Olarak Güneş'in Yarıçap Gösterimi

Güneş kaynaklı ışınlam enerjisinin Güneş yüzeyindeki değeri yukarıdaki formülasyona gerekli değerler girilerek yaklaşık olarak $3.90 \times 10^{26} W$ 'dır.

Işınlam yoğunluğu (S_d) ise bir alan içerisindeki ışınlam enerjisi miktarı olarak ifade edilir. Güneş merkezli bir küresel alanda birim alan başına düşen güneş enerjisi miktarıdır

Bu durum Dünya ve uzay aracı için ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Bunun sebebi ise bu iki farklı objenin güneşin merkezi ile olan mesafeleri ışınlam yoğunluğu hesabı için anlamlı bir fark ifade eder.

Işınlam yoğunluğunun ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$S_{mesafe,uzay\ aracı} = \frac{L_{güneş} \times 4 \times \pi \times r_{güneş}^2 \times \sigma \times T_{güneş}^4}{4 \times \pi \times r_{mesafe}^2} \frac{W}{m^2} \quad (41)$$

UYGULAMALAR

Alçak dünya yörüngesindeki uydular/küp uydular için maksimum q_{solar} değeri $1418 W/m^2$ 'dir. Minimum değer ise $1316 W/m^2$ 'dir. Buradaki A_s güneş ışığının etkilediği yüzeydir. α değeri ise yüzeyin soğurma katsayısıdır.

$$\bullet \quad Q_{albedo} = q_{albedo} \times A_s \times \alpha \quad (42)$$

Albedo etkisi ise Dünya yüzeyinden yansıyan Güneş ışınlarından kaynaklanmaktadır. Alçak dünya yörüngesindeki uydular/küp uydular için ortalama q_{albedo} değeri $(0,34 \pm 0,05) \times q_{solar}$ 'tür. Buradaki A_s Albedo'nun etkilediği yüzeydir. α değeri ise yüzeyin soğurma katsayısıdır.

$$\bullet \quad Q_{Dünya\ IR} = q_{Dünya\ IR} \times A_s \times \varepsilon \quad (43)$$

Dünya IR etkisi Dünya'nın sahip olduğu mutlak sıcaklıktan dolayı oluşmaktadır. Alçak dünya yörüngesindeki uydular/küp uydular için ortalama $q_{Earth\ IR}$ değeri $0,12 \times (q_{solar} + q_{albedo})$ 'tür. Buradaki A_s Infrared'in etkilediği yüzeydir. ε değeri ise yüzeyin soğurma katsayısıdır.

$$\bullet \quad Q_{iç} = 25 W^* \quad (44)$$

Uyduda/küp uyduda ekipmanların harcadığı ya da tükettiği enerji değerine eşittir. Bu projede değer 25'e eşittir. (Burada bu değer sembolik olarak verilmiştir. Projenin ileri aşamalarında ekipmanların değerleri netleşince bu değer değiştirilecektir.)

$$\bullet \quad Q_{ışılman} = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \times A_s \quad (45)$$

ε ve α değerleri yüzeyde kullanılan materyale ve boyaya göre değişkenlik gösterir. Ek olarak, σ Stefan-Boltzmann sabitidir ve değeri $5,67 \times 10^{-8}$ 'dir. Buradaki A_s soğumanın olduğu yüzeylerdir yani tüm yüzey alanlarıdır. Yüzey alanlarının değerleri aşağıdadır.

-Yanal yüzey alanı: $0,1 \text{ metre} \times 0,3 \text{ metre} = 0,03 \text{ metrekare} \times 2 = 0,06 \text{ metrekare}$

-Üst yüzey alanı: $0,2 \text{ metre} \times 0,3 \text{ metre} = 0,06 \text{ metrekare} \times 2 = 0,12 \text{ metrekare}$

-Ön yüzey alanı: $0,2 \text{ metre} \times 0,1 \text{ metre} = 0,02 \text{ metrekare} \times 2 = 0,04 \text{ metrekare}$

Alçak dünya yörüngesindeki maksimum ve minimum denge sıcaklıkları küp uydunun yörüngedeki konumuna bağlı olarak ve Güneş ile Dünya arasındaki mesafeye bağlıdır.

Maksimum denge sıcaklığı Güneş ile Dünya'nın birbirlerine en yakın noktada bulunduğu anda küp uydunun ikisinin arasında olduğu durumda gerçekleşir. Maksimum denge sıcaklığının hesaplanması uydunun 0,06 metre karelik yüzeyine güneş ışığının 90 derece ile çarptığını; diğer yüzeye ise Albedo ve Dünya IR ışınlarının 90 dereceyle çarptığını varsaydığımızda gerçekleşir. Bu durumda q_{solar} değeri 1418 W/m^2 , q_{albedo} değeri $553,08 \text{ W/m}^2$, $q_{Dünya IR}$ değeri ise $236,52 \text{ W/m}^2$ 'dir. Yukarıdaki formül ve değerlere göre işlem yapıldığında maksimum denge sıcaklığı **297,37 Kelvin (24,22 santigrat derece)** çıkmaktadır.

Minimum denge sıcaklığında ise küp uydu Dünya'nın arkasındadır. Yani gölgede kalmaktadır. Burada küp uyduyu etkileyen tek değer Dünya'nın sıcaklığından kaynaklanan Dünya IR'dir. Minimum denge sıcaklığını bulmamız için $q_{Dünya IR}$ değerinin de minimum olması gerekir. Bu durumda $q_{Dünya IR}$ değeri $203,71 \text{ W/m}^2$ 'dir. Bu değer formülde yerine konulduğunda çıkan minimum sıcaklık değeri **233,94 Kelvin' dir (-39,19 santigrat derece)**.

SONUÇ

Bu çalışmayı özetlemek gerekirse, zorlu uzay koşullarından olan manyetik ve ısı alan küp uydular üzerinde yüksek miktarda etki etmektedirler. Manyetik alan analizi için analitik analizin yetersiz kalmasından ötürü kesin sonuçlara ulaşmak adına SPENVIS ve MATLAB kodu kullanılmıştır. Farklı tarihlerde yapılan analizler birbiriyle karşılaştırıldığında genel olarak benzer karakteristik ortaya çıkmaktadır. Fakat farklı yörünge karakteristiğine sahip uydularda manyetik alan etkisi farklılaşmaktadır. Ayrıca Güney Anomali Noktası'nın küp uydular üzerinde karakteristiğinin değişmesine neden olmaktadır. Etki olarak maksimum manyetik alan değeri 0.6 Gauss'u geçmemektedir. İki uydu içinde 1 yörüngedeki anlık değişimler ise 0.014 ± 0.002 Gauss'tur. Isıl analizde denge sıcaklığını etkileyen en büyük faktör küp uydunun Güneş görmesi veya görmemesidir. Ek olarak, Güneş ve Dünya arasındaki mesafe de bu sonuç üzerinde büyük etkiye sahiptir. Maksimum denge sıcaklığı 297,37 Kelvin (24,22 santigrat derece)'dir. Minimum denge sıcaklığı ise 233,94 Kelvin (-39,19 santigrat derece)'dir. Bu sonuçlara göre 6U'luk küp uydu Güneş görmediği zamanlarda küp uydunun ve ekipmanların sağlığı için ısıtılmak zorundadır. Projenin sonraki aşamalarında sıcaklık ile ilgili bilgiler netleştğinde daha kesin denge sıcaklıklarına ulaşılabilecektir. Son olarak bu projedeki bütün analizler komple bittiğinde ülkemiz adına önemli bir proje olan yerli konumlama sistemi için gerekli altyapı hazırlanmış olacaktır.

Kaynaklar

Alken, P., Beggan, C., Chulliat, A., Hamilton, B., Macmillan, S., Maus, S., Nair, M., Ridley, V., Thomson, A., Woods, A., (2015). *The US/UK World Magnetic Model for 2015-2020: Technical Report*. National Geophysical Data Center, NOAA.

ESA, (2020, 20 Mayıs). *Swarm Probes Weakening of Earth's Magnetic Field*.

<https://www.sciencealert.com/images/2020-05/010-esa-south-atlantic-anomaly-1.jpg>

ESA, BIRA-IASB, UNILIB, (2020). *SPENVIS*.

<https://www.spennis.oma.be/>

eoPortal Directory, (2020). *Spatium*.

<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/spatium>

eoPortal Directory, (2020). *CHOMPTT*.

<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/chomptt>

Heiskanen, W. A., Moritz, H., (1967). *Physical Geodesy*. W. H. Freeman and Company

Larson, W. J., Wertz, J. R., (1992). *Space Mission Analysis and Design*, 3. Versiyon. Space Technology Library, San Francisco and London.

NOAA, (2020). *Magnetic Field Calculators*.

<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm>

Reid, P., (2009). *The Earth's Magnetic Field*.

<https://www.nasa.gov/topics/earth/features/2012-poleReversal.html>

Vnucec, I., (2020). *Magnetic Field Over Satellite Orbit*. GitHub

<https://github.com/IvanVnucec/magnetic-field-over-satellite-orbit>