

ATMOSFERİN SLR ÖLÇMELERİNE ETKİSİ

Dr. Gaye KIZILSU

Doç. Dr. Muhammed ŞAHİN

ÖZET

Bu bildiride, uyduya lazerle yapılan uzaklık ölçmelerinin üzerindeki atmosferik etkinin ölçmelerden istenen hassasiyete uygun olarak modellenmesi, genelde kabul gören atmosferik düzeltme ve uydunun konumunun bu düzeltmeye etkisi anlatılmaktadır.

GİRİŞ

Uydu jeodezisinde en presizyonlu ölçme tekniklerinden biri olan SLR'de uyduya lazerle ölçme mekanizması, önceden hesaplanan yörüngeye göre uyduyu otomatik olarak takip eder. Ölçme, yer istasyonundan uyduya giden ve geri dönen lazer pulsunun uçuş zamanıdır. Uydu ile yer istasyonu arasındaki uzaklık basit olarak,

$$d = \frac{\Delta t}{2} \cdot c \quad (1)$$

ile hesaplanır. Burada Δt lazer pulsunun gidiş-dönüş zamanı arasındaki fark, c ise ışığın boşluktaki hızı ($c=299792458$ m/sn) dır (SEEBER 1993, ŞAHİN v.d. 1993). Işın konisinin darlığından dolayı yüksek doğrulukla yöneltilbilir olması ve yüksek enerji yoğunluğu lazer kullanımını popüler hale getirmiştir. Bu özelliklerinden dolayı da çok yüksek enerjiye sahip olan bu pulsların çok uzaklara ulaşabilmesi mümkün olmaktadır. Puls, yer istasyonu ile uydu arasındaki yolu katederken farklı doğaya ve değişken durumlara sahip atmosferik bölgelerden geçerek farklı etkiler alır. Ölçmeler üzerindeki atmosferik etkiler direk ölçmeler ve/veya uygun modelleme ile belirlenmeli, işlemlerde göz önünde bulundurulmalıdır.

SLR ölçmelerinde en çok kullanılan uydulardan biri olan LAGEOS I, atmosferik sürüklenme etkisini ve yörüngedeki belirsizlikleri azaltmak için uygun yükseklikte (yaklaşık 6000 km) dairesel bir yörüngeye fırlatılmıştır. Yörüngedeki belirsizliklerin nedeni ise, sisteme geri dönen iyi sinyallerin temin edilmesi için, yeterince düşük yükseklikte modellenmemiş kısa dalga boyuna sahip gravite sinyalleridir. Uydunun küresel şekli ve sahip olduğu yüksek yoğunluk (60 cm. çapında 407 kg. ağırlığında), yörüngenin güneşten gelen radyasyon basıncına karşı olan hassasiyetini azaltmaktadır. Buna rağmen

men radyasyon basıncı LAGEOS I gibi iyi düşünölmüş bir uydunun yörüngesini etkilemekte ve bundan dolayı yörünge belirlemede kullanılan programlar, yörünge entegrasyonu sırasında bu etkiyi gözönünde bulundurmaktadırlar. (COHEN 1985, CHRİSTODOULİDİS v.d. 1985, RUBİNCAM v.d. 1985, RUBİNCAM v.d. 1997, SEEBER 1993).

Teknolojik gelişmelere paralel olarak yapılan çalışmalarda istenen presizyon, özellikle uydü jeodezisinde atmosferin ölçüler üzerindeki etkisinin daha dikkatli incelenmesi gereğini ortaya koymuştur. Yani atmosfer, ölçülerin doğruluğunu sınırlayıcı bir faktördür. Bu etken incelenmeden önce atmosferik yapı iyi anlaşılmalıdır.

ATMOSFER

Atmosferin içinde çeşitli özelliklere sahip tabakalar bulunmaktadır. Bu tabakalar, şekil 1'de verilen ana karakteristik özelliklerine göre sınıflandırılabilir.

Yükseklik (km.)	Sıcaklık	İyonlaşma	Manyetik Alan	Yayıma	Teknik
100 000	Termosfer	Protonosfer	Magnetosfer	İyonosfer	Üst Atmosfer
10 000		İyonosfer			
1 000	Mezosfer	Nötrosfer	Dinamosfer		
100	Stratosfer				
10	Troposfer			Troposfer	Alt Atmosfer

Şekil 1. Dünya atmosferinin yükseklik ve özelliklere göre sınıflandırılmış tabakaları.

Jeodezik ölçmeler için atmosfer, yeryüzünden yaklaşık 100 km. yüksekliğe kadar olan "troposfer" tabakası ve 100 km'den 1000 km. yüksekliğe kadar olan "iyonosfer" tabakası olmak üzere iki kısımda incelenebilir. Çünkü parçacık yayılımı oldukça farklılık göstermektedir. Troposfer, içinde günlük havanın da yer aldığı bir gaz tabakası olup, elektrik yüklü parçacıkların bulunmadığı, kuru hava ve su buharından oluşan nötr atmosferdir. Sıcaklık, yükseklik arttıkça azalır ki bu da $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ dir. Yatay sıcaklık gradyeni ise 100 km. de sadece birkaç derecedir. Troposferde oluşan kırılma göndürülen pulsün frekansına değil, havanın basıncına, sıcaklığına, su buharı basıncına ve uydunun yüksekliğine bağlı olarak değişmektedir. Troposferin dinamik hareketi kırılma

indeksinin modellenmesini zorlaştırmaktadır. Yapılacak modellemede, etken tüm parametreler gözönünde bulundurulmalıdır (Seeber 1993).

İyonosfer, troposferin aksine elektron ve iyonlarla yüklü olup üst atmosfer olarak isimlendirilir. İyonosferin durumu, $1m^3$ ' teki elektron sayısı yani elektron yoğunluğu ile tanımlanır. Geomanyetik etkiler iyonosfer üzerinde önemli bir rol oynar. Bu nedenle iyonosferdeki sinyal yayılımı, yüksek enlemde ve geomanyetik ekvator yakınında güneşin faaliyetlerinden etkilenir. Işığın kırılma indisinin ise iyonosferde herhangi bir anomalisi yoktur yani bir gecikme söz konusu olmaz (Uzel 1984).

SLR ÖLÇMELERİNE GETİRİLEN DÜZELTMELER

Yapılan SLR ölçmeleri ve getirilen düzeltmeler için şu eşitlik kullanılabilir.

$$d = \frac{1}{2} c\Delta t + \Delta d_o + \Delta d_s + \Delta d_b + \Delta d_r + \eta \quad (2)$$

Burada;

$c\Delta t$ Sinyalin başlangıcı ile bitişi arasında lazer pulsunun gidiş-dönüş zamanı

Δd_o = Yerdeki dışmerkezlik düzeltmesi

Δd_s = Uydudaki dışmerkezlik düzeltmesi

Δd_b = Yer sistemindeki sinyal gecikmesi

Δd_r = Atmosfer düzeltmesi

η = Geriye kalan düzenli ve rastgele gözlem hatalarıdır

(KIZILSU 1998).

Atmosferik (Troposferik Kırılma) Düzeltme : Δd_r

Lazer impulsları atmosferde kırılmadan dolayı bir gecikmeye uğrarlar. Pulsun toplam uçuşu boyunca atmosferin durum parametrelerini ölçmek mümkün değildir. Bu nedenle lazer istasyonunda ölçülen gerçek atmosferik verilerle desteklenen atmosferik modeller kullanılır. Atmosferik kırılma, 10° üzerindeki yükseklikler için genellikle modellenebilir. Kırılma gecikmesi zenith yönünde yaklaşık 2.5 m., 20° yükseklikte yaklaşık 7.0 m., 10° yükseklikte ise yaklaşık 14.0 m. dir. Düzeltme, su buharına karşı ol-

dukça duyarsızdır. Gözlem sonuçlarının anlamlı kullanımı, veri üretimi, indirgenmesi ve analizi üzerinde uluslararası standartların fikir birliği içinde olması ile mümkündür. Günümüzde bu standartlar IERS (International Earth Rotation Service) tarafından sağlanmakta ve zaman zaman güncelleştirilmektedir (NASA 1990, NOOMEN v.d. 1996, SMITH v.d. 1990, TAPLEY v.d. 1985). SLR ölçmelerinde genellikle IERS standartlarıncı kabul gören Marini-Murray eşitlikleri kullanılır. Tek yön uzaklık için düzeltme:

$$\Delta d_r = \frac{f(\lambda)}{f(\varphi, H) \sin E + \frac{B/(A+B)}{\sin E + 0.01}} \quad (3)$$

Burada lazer frekansı parametre fonksiyonu :

$$f(\lambda) = 0.9650 + \frac{0.0164}{\lambda^2} + \frac{0.000228}{\lambda^4} \quad (4)$$

lazer ölçme istasyonu fonksiyonu :

$$f(\varphi, H) = 1 - 0.0026 \cos 2\varphi - 0.31H \quad (5)$$

$$A = 0.002357.P + 0.000141.e \quad (6)$$

$$B = (1.084 \times 10^{-8}) \cdot P.T.K + (9.468 \times 10^{-8}) \frac{P^2}{T(3-1/K)} \quad (7)$$

$$K = 1.163 - 0.00968 \cdot \cos 2\varphi - 0.00104.T + 0.00001435.P \quad (8)$$

$$e = RH0.0611 \times 10^{EX} \quad (9)$$

$$EX = 7.5 (T - 273.15) / (T - 35.85) \quad (10)$$

ve

Δd_r = Uzaklığa gelen atmosferik düzeltme

φ = İstasyon noktasının enlemi

H = İstasyon noktasının yüksekliği (km.)

λ = Lazerin dalga boyu (mikrometre)

E = Uydunun yüksekliği (derece)

P = İstasyon noktasındaki atmosferik basınç (milibar)

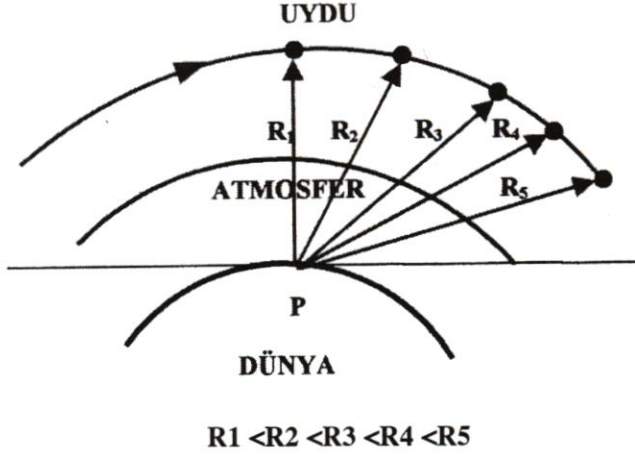
T = İstasyon noktasındaki sıcaklık (° Kelvin)

RH = Nemlilik (%)

e = İstasyon noktasındaki su buharı basıncı (milibar) (SEEBER 1993).

Tablo 1. Troposferik kırılmanın uzunluk ölçmeleri üzerine etkisi

Yükseklik Açısı	90°	20°	15°	10°	5°
Δd_{kuru}	2.31	6.71	8.81	12.90	23.61
Δd_{Islak}	0.20	0.58	0.77	1.14	2.21
$\Delta d_{\text{T (Toplam)}}$	2.51	7.29	9.58	14.04	25.82



Şekil 2. Uydu yüksekliğinin istasyon-uydu arasındaki uzaklığa etkisi.

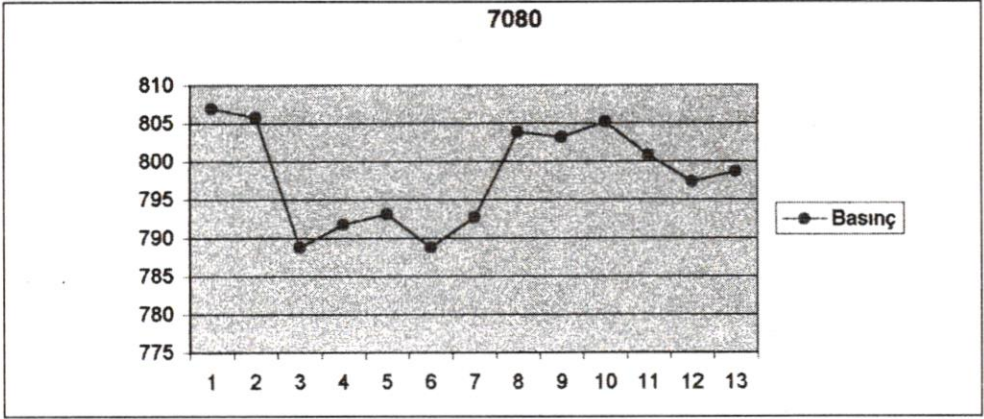
SLR ölçmeleri ;

- Uydu gözlemleri: Ham verinin gözlemlenen veriye dönüşümü
- Ön işlem: İyonosfer, troposfer, zaman düzeltmeleri, sıkıştırılmış ölçülerin oluşturulması, faz belirsizliklerinin çözümü
- Gözlemlerden hesaplanan değerler: Sayısal analiz, yörünge mekaniği, jeodezik hesaplamalar, koordinat dönüşümü
- Parametre tahmini: İstasyon koordinatları, gravite alan katsayısı, uydunun konumu, kutup hareketi, dünyanın dönme hareketi, geodinamik parametrelerin ve gözlem hatalarının belirlenmesi
- Doğruluk tahmini ve güvenilirlik: İstatistikler, güvenilirlik, doğruluk ölçütleri sırasıyla incelenir ve işlenir. Ön işlem ve hesaplamalar sırasında öngörülen gerekli modellemeler analize dahil edilir (SEEBER 1993).

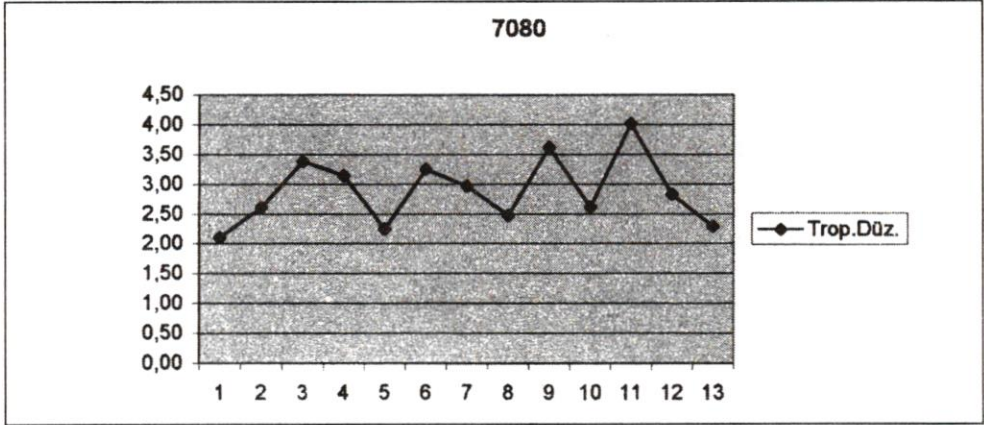
7080 (ABD) ve 7840 (İngiltere) SLR istasyon noktalarından Lageos I uydusuna 1996 yılında yapılan ölçmelere gelen troposferik kırılma düzeltmeleri çeşitli ay, gün ve saatler için tablo 2 ve tablo 3 de verilmiştir. Örnek olarak bu noktaların seçilme sebebi en fazla ve sürekli ölçme yapılan noktalar olmalarıdır. 7080 noktası için örnek verilen 13 ayrı ölçmeye ait istasyon-uydu uzaklığı, troposferik düzeltme, nem, sıcaklık, basınç değerlerinin değişim grafikleri ile 7840 noktasının 19 ayrı istasyon-uydu uzaklığı, troposferik düzeltme, nem, sıcaklık, basınç verilerinin değişim grafikleri karşılaştırmak amacıyla sırasıyla şekil 3, 4, 5, 6, 7 ve şekil 8, 9, 10, 11, 12 de verilmiştir.

Tablo 2. 7080 (Texas) Noktasından LAGEOS I Uydusuna 1996 Yılında Yapılan Ölçmeler Anındaki Atmosferik Değerler ve Düzeltmeler

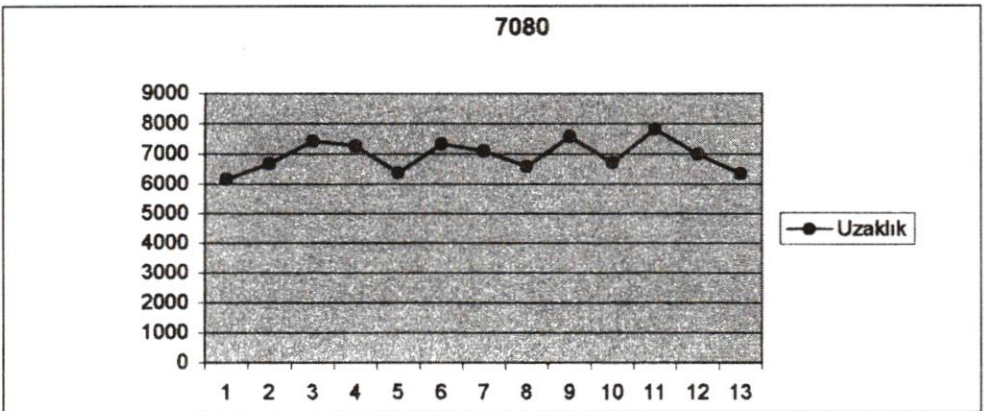
Ay	Gün	Saat	Basınç (mb)	Sıcaklık (°c)	Nem (%)	Trop.Düz. (m.)	Uzaklık (km.)
OCAK	8	20:03	807.0	15.6	37	2.11	6152.201
	14	08:57	805.8	8.4	25	2.61	6687.776
	28	07:22	788.8	10.0	14	3.38	7425.269
NİSAN	1	09:29	791.8	7.9	42	3.15	7255.551
	1	16:17	793.2	14.7	29	2.25	6378.299
	18	04:00	788.8	18.0	7	3.25	7328.111
	30	05:04	792.8	8.7	29	2.97	7095.477
TEMM.	1	12:04	803.9	16.5	83	552.48	6600.032
	18	10:07	803.2	19.0	72	3.62	7575.415
	28	03:53	805.2	21.3	56	2.62	6710.187
EKİM	1	06:20	800.9	15.6	54	4.02	7827.329
	16	10:28	797.4	14.1	63	2.83	7000.657
	30	21:31	798.7	22.2	34	2.29	6350.136



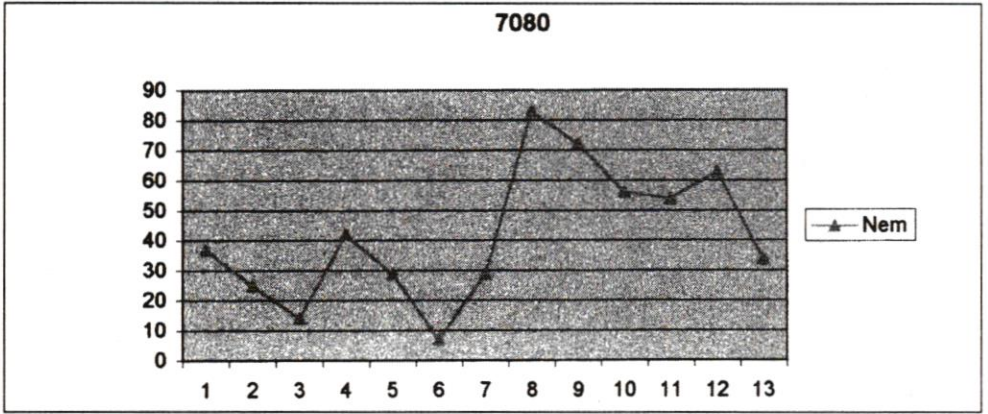
Şekil 3. Basınç Değişim Grafiği



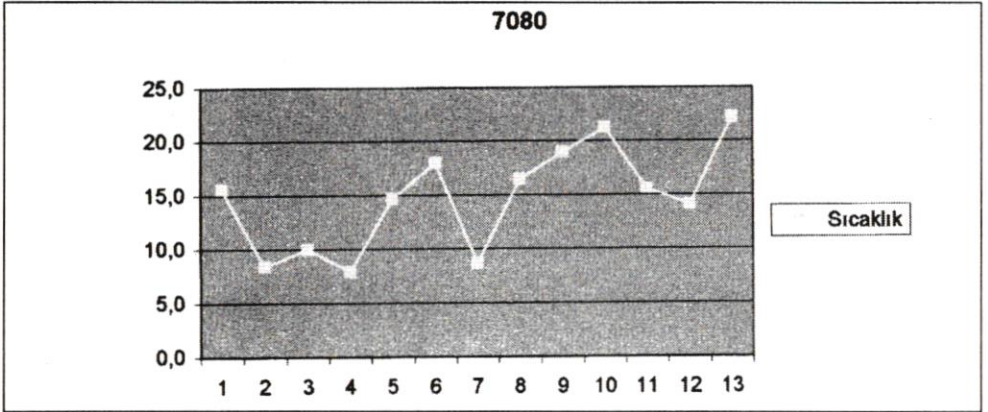
Şekil 4. Troposferik Düzeltme Değişim Grafiği.



Şekil 5. Uydu-İstasyon Arası Uzaklık Değişim Grafiği.



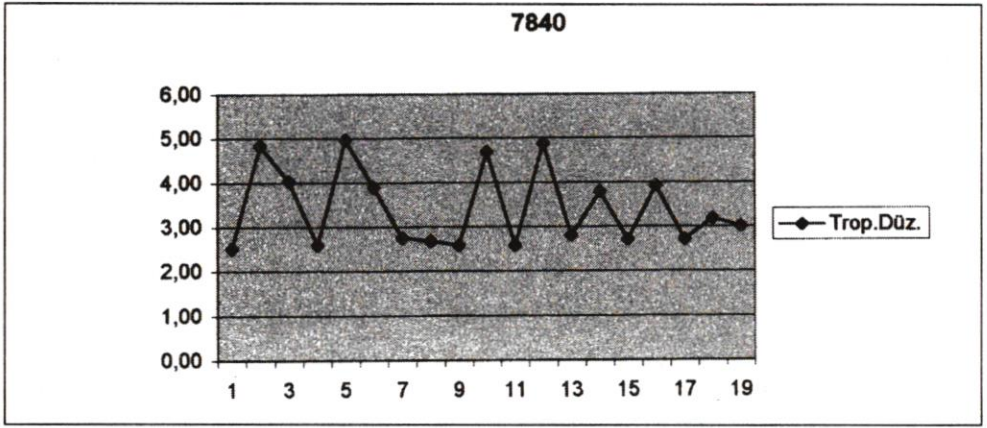
Şekil 6. Nem Değişim Grafiği.



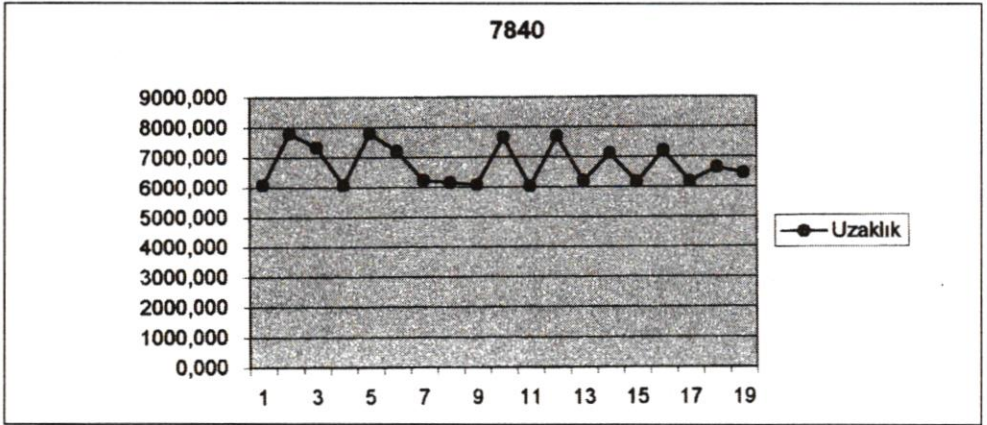
Şekil 7. Sıcaklık Değişim Grafiği.

Tablo 3. 7840 (İngiltere) Noktasından LAGEOS I Uydusuna 1996 Yılında Yapılan Ölçmeler Anındaki Atmosferik Değerler ve Düzeltmeler

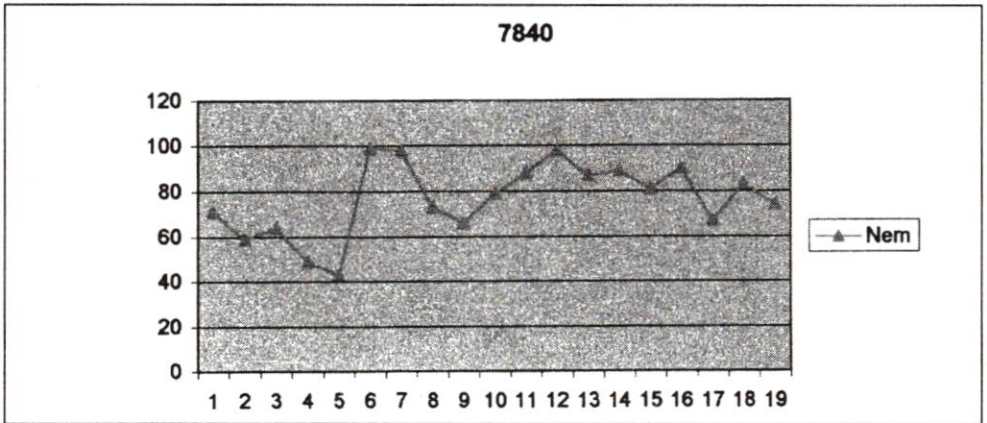
Ay	Gün	Saat	Basınç (mb)	Sıcaklık (°c)	Nem (%)	Trop.Düz. (m.)	Uzaklık (km.)
OCAK	6	11:57	987.6	9.6	71	2.52	6078.366
	6	15:50	992.1	10.2	59	4.84	7810.037
	15	13:33	1023.8	9.9	64	4.04	7331.566
	30	11:00	1020.1	2.7	49	2.60	6067.984
	30	14:50	1017.7	5.8	43	4.97	7810.376
NİSAN	1	01:43	1009.8	0.0	99	3.90	7207.390
	1	09:00	1009.5	4.4	98	2.75	6245.426
	20	23:16	1004.2	11.2	73	2.68	6154.279
	30	08:12	1000.9	9.9	66	2.58	6087.682
	30	20:13	997.0	7.6	79	4.69	7659.631
TEMM.	1	20:27	1002.1	12.7	88	2.58	6030.787
	15	00:02	1023.5	16.2	98	4.89	7697.105
	15	22:28	1028.5	12.8	87	2.81	6219.824
	31	21:32	1011.8	14.8	89	3.80	7119.786
EKİM	1	18:24	1005.8	11.0	81	2.71	6178.594
	1	21:57	1007.0	8.8	90	3.93	7208.627
	15	16:58	1004.6	11.5	67	2.71	6179.790
	15	20:14	1005.5	9.1	83	3.19	6652.858
	26	15:46	1017.9	12.5	74	3.01	6451.458



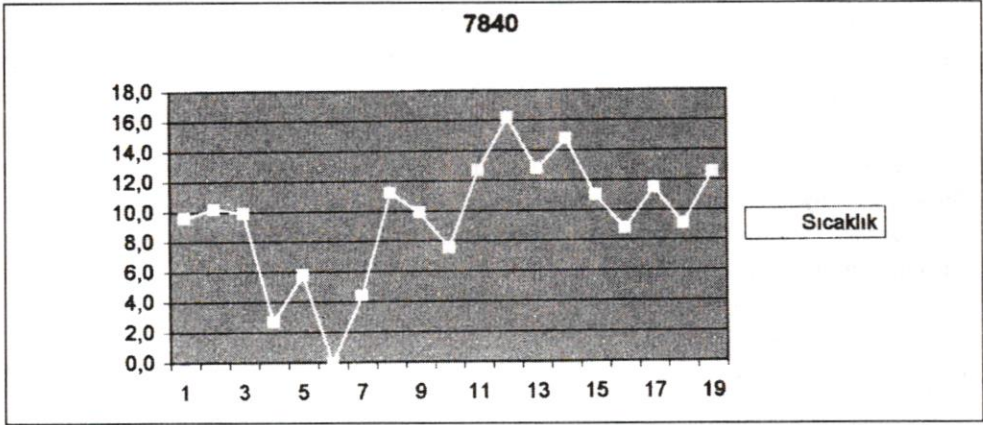
Şekil 8. Troposferik Düzeltme Değişim Grafiği.



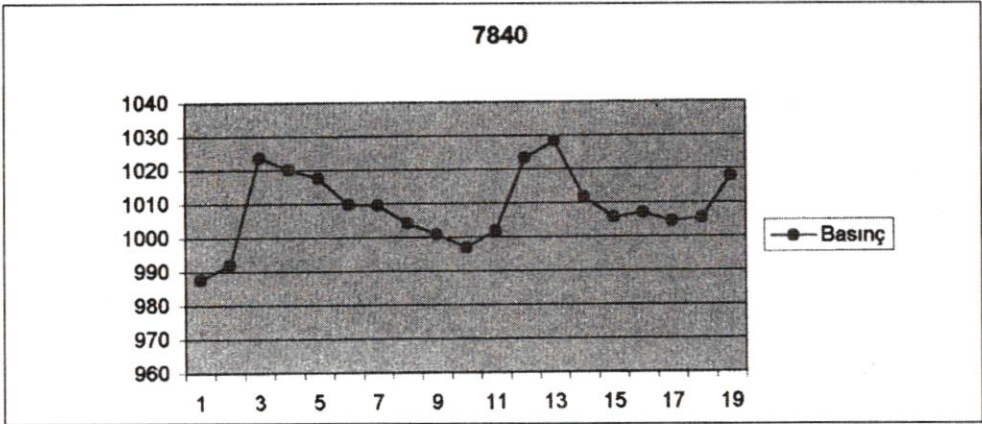
Şekil 9. Uydu-İstasyon Arası Uzaklık Değişim Grafiği.



Şekil 10. Nem Değişim Grafiği.



Şekil 11. Sıcaklık Değişim Grafiği.



Şekil 12. Basınç Değişim Grafiği.

SONUÇ

Yapılan araştırmalar sonucunda en güvenilir uydu izleme tekniklerinden biri olan SLR ölçmeleri için IERS tarafından önerilen Marini-Murray eşitliklerinin dünya çapındaki bütün proje ve araştırma çalışmalarında kullanıldığı tespit edilmiştir. İTÜ SLR analiz merkezinde yapılan çalışmalardan faydalanılarak 7080 ve 7840 SLR istasyon noktaları için kullanılan ve elde edilen verilerin irdelenmesi sonucunda görülmüştür ki; sıcaklık, basınç ve nem değerlerinin zamanla değişimi ve bu değerlerin kombinasyon değişiklikleri, troposferik düzeltmeyi kimi zaman doğru kimi zaman da ters orantılı olarak etkilemektedir. Buna karşın troposferik düzeltme grafiği ile uydu-istasyon arasındaki uzaklık grafiğinin tamamen uyumlu olması bu düzeltme değeri için uyduya yapılan ölçmedeki uzaklığın yani uydunun yüksekliğinin de önemli rol oynadığını göstermektedir. Şekil 2'de de görüldüğü gibi uydunun, istasyon noktasından geçen yatay doğrultuyla yaptığı açı laser hüzmesinin gittiği yolun uzunluğunu belirlemektedir. Uydunun

yatayla yaptığı 90° lik bir açı minimum yolu (R_1) verir ki bu da laserin atmosferde daha az süre kalması, atmosferin tabakalarını dik kesmesi demektir ve daha az troposferik düzeltme gerektirmektedir. Yatay ile yapılan açı küçüldükçe ölçülen uzaklık artmakta ($R_1 < R_2 < R_3 < R_4 < R_5$), dolayısıyla laser hüzmesinin atmosferde kalış süresi ve ışığın kırınımı artarken bu olay troposferik düzeltmeyi de doğru orantılı etkilemektedir. Bu sonuca dayanarak SLR ölçmelerinde sıcaklık, basınç ve nemliliğin yanısıra uydunun yüksekliğine de önem verilmeli ufka yakın (10° - 15° nin altındaki) yapılan ölçmeler değerlendirilmeye alınmamalıdır.

KAYNAKLAR

CHRİSTODOULİDİS, D.C., SMİTH, D.E., KOLENKIEWICZ, R., KLOSKO, S.M., TORRENCE, M.H., DUNN, P.J., Observing Tectonic Plate Motions and Deformations From Satellite Laser Ranging, Journal of Geophysical Research, Vol.90, No.B11, pp.9249-9263, (1985).

COHEN, S.C., SMİTH, D.E., LAGEOS Scientific Results: Introduction, Journal of Geophysical Research, September 30, Vol.90, No.B11, pp. 9217-9220, (1985).

KIZILSU, G., LAGEOS I ve LAGEOS II için Doğruluk Analizi, Doktora Tezi, İ.T.Ü., İstanbul (Haziran 1998).

NASA 1990, Technical Memorandum-Annual Report, 4220, NASA Scientific and Technical Information Division, USA, (August 1990).

NOOMEN, R., SPRINGER, T.A., AMBROSIUS, B.A.C., HERZBERGER, K., KUIJPER, D.C., METS, G.J., OVERGAAUW, B., WAKKER, K.F., Crustal Deformations in the Mediterranean Area Computed from SLR and GPS Observations, J. Geodynamics, Vol.21, No.1, pp.73-96, (1996).

RUBİNCAM, D.P., WEISS, N.R., The Orbit of LAGEOS and Solar Eclipses, Journal of Geophysical Research, Vol.90, No.B11, pp.9399-9402, (1985).

RUBİNCAM, D.P., CURRIE, D.G., ROBBİNS, J.W., LAGEOS I Once-Per-Revolution Force Due to Solar Heating, Journal of Geophysical Research, Vol.102, No.B1, pp.585-590, (1997).

SEEBER, G., Satellite Geodesy, Walter de Gruyter&Co. Berlin, (1993).

SMİTH, D.E., KOLENKIEWICZ, R., DUNN, P.J., ROBBİNS, J.W., TORRENCE, M.H., KLOSKO, S.M., WILLIAMSON, R.G., PAVLİS, E.C., DOUGLAS, N.B., FRİCKE, S.K., Tectonic Motion and Deformation from Satellite Laser Ranging to LAGEOS, Journal of Geophysical Research, Vol.95, No.B13, pp.22013-22041, (1990).

ŞAHİN, M., RANDS, P.N., CROSS, P.A., Crustal Dynamics in Turkey from WEGENER/MEDLAS Satellite Laser Ranging Data, Geological Journal, Vol.28, pp.347-355, (1993).

TAPLEY, B.D., SCHUTZ, B.E., EANES, R.J., Station Coordinates, Baselines and Earth Rotation from LAGEOS Laser Ranging:1976-1984, Journal of Geophysical Research, Vol.90, No.B11, pp.9235-9248, (1985).

UZEL, T., Jeodezik Amaçlı Elektromagnetik Ölçmeler, Cilt II, Yıldız Üniversitesi Yayınları, Sayı:169, İstanbul, (1984).