

JEODEZİDEKİ TEKNOLOJİK GELİŞMELER İÇİNDE SLR UYDU TEKNİĞİNİN YERİ VE İŞLEVİ

Dr.Gaye KIZILSU

Doç.Dr.Muhammed ŞAHİN

ÖZET

Bu bildiride, gelişen uydu jeodezisi teknolojisinin bir kolu olan **SLR (Satellite Laser Ranging)** ölçme tekniğinin kullanımı, özellikleri, uygulama alanları, ölçme ve analiz yöntemleri ile Avrupa ülkelerinden bilim adamlarının da içinde bulunduğu NASA tarafından desteklenen dünya çapındaki projeler içindeki yeri anlatılmaktadır. SLR tekniği 1960 yılından bu yana çok büyük ilerleme kaydetmiş, özellikle jeodezik ve jeofiziksel çalışmalarda faydalar sağlamıştır. Dünyanın her yerine yayılmış sabit ve hareketli SLR istasyon noktaları bulunmaktadır. Bu noktalardan yapılan ölçmeler, **NASA-CDDIS** veri bilgi sisteminde ortak bir standartta toplanarak genel kullanıma açılmaktadır. Oldukça presizyonlu olan bu teknikten Türk bilim adamlarının da faydalanması gerekmektedir.

GİRİŞ

Konum belirlemede 20. yüzyıla kadar pek kayda değer bir değişiklik olmamış ve ancak bu yüzyılda radyo ilkeleriyle çalışan sistemler ve yapay uydular kullanılmaya başlanmıştır. İlk yapay uydu **SPUTNIK**'in 1957 yılında eski Sovyetler Birliği tarafından uzaya fırlatılmasıyla birlikte uzay teknolojisinde yeni bir devir başlamış ve bunu değişik amaçlı diğer uydular izlemiştir. Şimdiye kadar iletişim, meteoroloji ve jeodezik konum belirlenmesinden uzaktan algılamaya kadar pek çok bilim dalına hizmet eden yüzlerce yapay uydu uzaya yerleştirilmiş ve insanlığın hizmetine sunulmuştur. Uydu ölçmeleri istatistik, astronomi, jeodezi, jeofizik ve elektronik gibi bazı disiplinlerin bütünleşmesini gerektirmektedir, (UZEL v.d. 1995). Yapay uydulardan en etkin yararlanan disiplinlerin başında jeodezi gelmektedir. Bilindiği gibi jeodezi, klasik anlamda yer yuvarının şeklinin ve boyutlarının belirlenmesi için yapılan çalışmaların bütünüdür. Bu çalışmalar aynı zamanda dünyanın gravite alanının belirlenmesi, presizyonlu bir şekilde yeryüzünün bütününde ve bölgesel olarak konum belirleme, kutup hareketi, yeryuvarının dönüşü, kabuk deformasyonu ve hareketi gibi yer dinamiğini de içermektedir. Uydu jeodezisinin en önemli avantajı çok büyük çalışma alanı sağlaması ve dünyanın her yerinde üç boyutlu konum ve konum değişikliklerinin belirlenebilmesidir, (ŞAHİN 1993).

Ekstra terrestrial konum belirleme sistemi, dünyanın etrafındaki bir yörüngede veya daha uzakta bulunan bir cisimden yayınlanan veya yansıyan bir elektromagnetik dalgayı kullanarak yeryüzündeki veya yeryüzüne yakın noktaların konumlarını saptayan bir sistemdir. Sadece konum değil bunun yanı sıra dünyanın gravite alanını tanımlayan katsayılar ve dönme eksenine ilişkin bazı jeodezik ve jeofiziksel bilgiler de sağlanabilir, (UZEL v.d. 1995).

Konum belirlemek amacıyla kullanılan en yaygın teknikler Lazerle Uydu Uzaklık Ölçmeleri (SLR-Satellite Laser Ranging), Global Konum Belirleme Sistemi (GPS- Global Positioning System) ve Global Navigasyon (GLONASS- Global Navigation Satellite System) uydu sistemidir.

1960 orijinli SLR sistemi, küp köşeli yansıtıcılara sahip yapay uydulara çok presizyonlu uzaklık ölçmek için kısa lazer pulsaları kullanır. Oysa GPS (1974) ve GLONASS (1976), radyo navigasyon sistemine dayalı radyo sinyalleri yayan, yaklaşık 20.000 km. yükseklikte dönen 24 yapay uyduyu kullanmaktadır. Uzay çalışmalarına büyük katkıları olan çok uzun bazlı interferometri sistemi (VLBI-Very Long Baseline Interferometry) ise bir uydu tekniği olarak sınıflandırılmaz. VLBI, binlerce kilometre uzaklıkta yerleştirilmiş radyo teleskoplarıyla aynı anda quasar olarak bilinen ekstra-galaktik radyo kaynaklarını kullanır. Dünya üzerindeki her istasyon, bu radyo kaynaklarından gelen mikrodalga sinyallerini özel bantlara kaydeder. Teleskoplar arasındaki baz uzunluğu birkaç mm. doğrulukla belirlenebilmektedir. VLBI, tabaka hareketlerini izlemek açısından çok önemli bir sistem olmakla beraber bölgesel çalışmalar için çok pahalıdır.

Diğer bir uydu sistemi ise SLR'la aynı ilkeyle çalışan Ay'a lazerle uzaklık ölçmesi (LLR-Lunar Laser Ranging) dir. LLR sisteminde, 1969 yılında eski Sovyetler Birliği ve Amerika Birleşik Devletleri'nin Apollo astronotları tarafından Ay üzerine yerleştirilmiş küp köşeli yansıtıcılar kullanılmaktadır, (SEEBER 1993, TORGE 1991).

1.SLR 'DAKİ GELİŞMELER VE PROJELER

U.S.A'nın yapay uydular için lazer-sistem pulsalarını geliştirmesi 1961/62 yıllarında başlamıştır. İlk SLR (Satellite Laser Ranging) sistemi 1964 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nin NASA (National Aeronautics and Space Administration) Goddard Uzay Uçuş Merkezi'nde (GSFC- Goddard Space Flight Center) geliştirilmiş ve lazer yansıtıcıları taşıyan ilk SLR uydusu BEACON EXPLORER-B (BE-B) yaklaşık 1000 km. yükseklikte bir

yörüngeye 80° eğimle 9 Ekim 1964'te oturtulmuştur. İlk başarılı sinyal dönüşü 1965'te bir kaç metre doğrulukla gerçekleştirilmiştir. Ondan sonraki gelişmeler çok hızlı olmuş ve bir kaç metre doğruluktan bir kaç santimetre doğruluğa inilmiştir. Sistem şimdilerde güncelleştirilmiş birçok lazerli ölçme uydusuna sahiptir.

WEGENER/MEDLAS projesi gibi en çok kabuk dinamiği çalışmalarının yapıldığı projeler, 1976 yılında U.S.A tarafından fırlatılan LAGEOS I uydusuna yapılan uzaklık ölçmeleri verilerini kullanırlar. **WEGENER** (Working Group of European Geoscientists for the Establishment of Networks for Earthquake Research) kabuk dinamiği çalışmaları yapan ilk Avrupa grubudur. Bu grup, 1981 yılında NASA'nın Geodinamik programının kapsamındaki kabuk dinamiği programına (Crustal Dynamics Program-CDP) katılım çağrısına uymuştur. Grubun ilk projesi, 1985 yılında başlatılan **WEGENER / MEDLAS** (MEDiterranean LASer Ranging) projesidir. Bu proje, saha çalışması, veri analizi ve sonuçların yorumlanması adımlarından oluşmuştur. Çalışmalara İtalyan, Yunanlı ve Türk gruplar da katılmışlar ve ilk **MEDLAS** kampanyası 1986 yılında İtalya, Türkiye ve Yunanistan'da organize edilmiş; ekipmanlar Fransa, Almanya, Hollanda ve U.S.A tarafından sağlanmıştır. Türkiye'de, **Diyarbakır** (Nokta No:7575), **Yozgat** (Nokta No: 7585), **Melengiclik** (Nokta No:7580) ve **Yığılca** (Nokta No:7587) olmak üzere dört hareketli SLR istasyon bölgesi bulunmaktadır, (AMBROSIUS v.d. 1989, CENCI v.d. 1989, COHEN v.d. 1985, NASA 1990, NOOMEN v.d. 1993). Geliştirilen uydu teknolojileriyle NASA'nın 1979 yılında başlayan Geodinamik Programı, tektonik plaka hareketleri ve kabuk deformasyonlarını ortaya çıkarabilecek ve jeopotansiyel alanların haritalarını yapabilecek potansiyele sahiptir (NASA 1990). Bu programın kapsamında bulunan **CDP** ise uzay teknolojisini SLR ve VLBI olmak üzere her iki formda, tektonik tabaka hareketleri, bölgesel kabuk deformasyonları, kutup hareketi ve dünyanın dönüşü ile ilgili ölçmelere ve kabuk hareketleri ile ilgili diğer olaylara uygulanmak üzere 1979 yılında başlatılmıştır. Dünyanın her yerinde, çok sayıda enstitü, veri toplama, analiz etme ve sonuçları yorumlamada işbirliği yapmaktadır, (COHEN v.d. 1985, HOFMANN-WELLENHOF v.d. 1989, SMITH v.d. 1990, TAPLEY v.d. 1985). 1988 ve 1989 yıllarında **CDP**, düzenli programını sabit ve hareketli SLR ve VLBI ölçmeleriyle devam ettirmiş, bu iki yıl süresince **NASA** ve **NGS** (National Geodetic Survey) birleşerek 38 sabit 8 hareketli sistem kullanarak 23 ülke ve 84 bölgedeki çalışmalarını tamamlamıştır. Sabit sistemlerde mutlak nokta konum doğruluğunun santimetrenin altında olduğu gösterilmiştir. Diğer uyduların da kullanılmasına rağmen bu ölçmelerde de esasen LAGEOS I' in verilerine güvenilmiş, 1992'nin sonlarında fırlatılan LAGEOS II uydusunun da SLR'in etkisini ve doğruluğunu arttıracığı ümit edilmiştir, (NASA 1990, HOFMANN-WELLENHOF 1989). **CDP**, ilk programını 1991 yılının sonunda şu amaçları başarı ile tamamlayarak sona erdirmiştir:

- Kabuk dinamiğinin iyice incelenebilmesi için uzay teknolojisi sistemlerinin oluşturulup geliştirilmesi,
- Ölçme stratejilerinin belirlenip oturtulması,

- Verilerin toplanması ve düzenlenmesi,
- Analiz yapılması ve sonuçların yorumlanması.

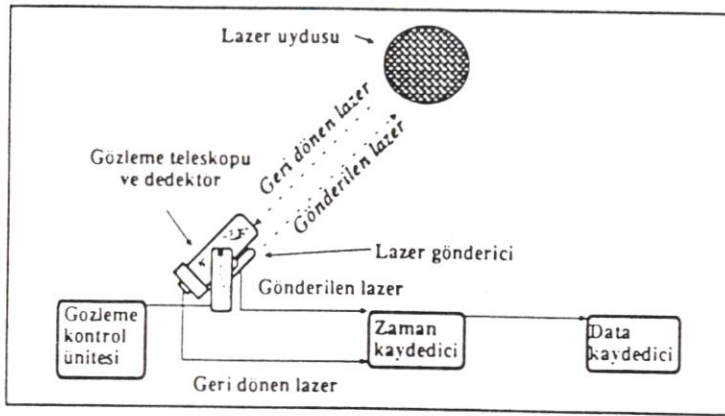
1990 yılında NASA, ikinci büyük projesi olan katı yeryüvarı dinamiği projesini (Dynamics of the Solid Earth) duyurmuştur. Bu proje SLR, VLBI, LLR ve GPS uzay tekniklerinin tümünü içermektedir, (DEGNAN 1994, ŞAHİN 1993).

2.UYDU UZAKLIĞININ LAZERLE ÖLÇÜLMESİ

(SATELLITE LASER RANGING)

2.1. SLR Kavramı

Lazerle Uyduya Uzaklık Ölçmesi (SLR), yer istasyonundan bir uyduya gönderilen kısa lazer pulslarıyla uzaklık ölçme yöntemidir. SLR'ın çalışma ilkesi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. SLR Tekniğinin Ölçme Düzenneği

Ölçme mekanizmasında iki ana bölümden oluşan bir izleme teleskopu vardır. Bu bölümler bir lazer pulsu göndericisi ve alıcısıdır. Lazer pulslarını bulabilmek ve analiz edebilmek için bir optik-elektronik sistem, bir jeneratör, bir mekanik destek, elektronik zaman sayacı, bilgisayar ve bir elektronik kontrol sistemi mevcuttur. Önceden hesaplanan yörüngeye göre ayarlanan alıcı ve verici teleskop, uyduyu otomatik olarak takip eder. Lazer pulsunun gönderiliş ve

yansıyarak geri dönüş zamanı (atomik zaman) elektronik zaman sayacı tarafından kaydedilir. Ölçme, yer istasyonundan uyduya giden ve geri dönen lazer pulsunun uçuş zamanıdır. Uydu ile yer istasyonu arasındaki uzaklık,

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

ile hesaplanır. Burada Δt lazer pulsunun gidiş-dönüş zamanı arasındaki fark, c ise ışığın boşluktaki hızıdır, (SEEBER 1993, ŞAHİN v.d. 1993, TORGE 1991)

2.2. Lazer

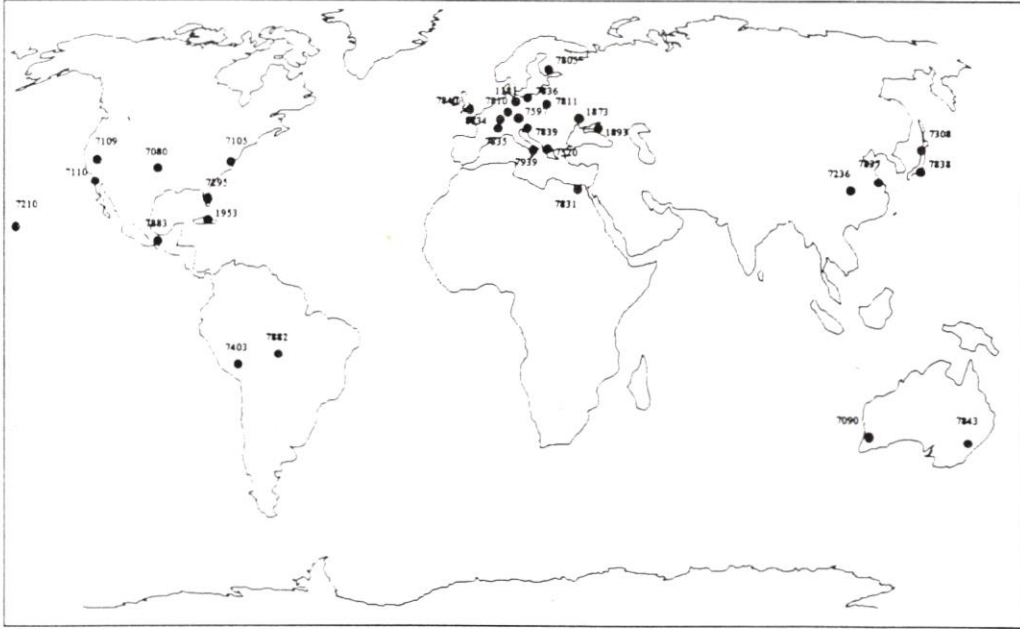
Lazerden şu iki önemli özelliğinden dolayı yararlanılmaktadır. Birincisi ışın konisinin darlığı nedeniyle yüksek doğrulukla yönlendirilebilir olması diğeri ise yüksek enerji yoğunluğudur. Bu özelliklerinden dolayı da çok yüksek enerjiye sahip olan bu pulsların çok uzaklara bile ulaşabilmesi mümkün olmaktadır. Uydu jeodezisinde iki tip lazer pulsu kullanılmaktadır: yakutlu lazer ve neodimium-YAG lazer.

Yakut, lazer sisteminde klasik bir materyaldir. Kırmızı renkli bu kristal, yeşil ve mavi-mor ışığı yutan, 694.3 nm de keskin kırmızı spektral ışığı yansıtan bir kristaldir. Tek lazer pulsu, genişliği yaklaşık 10-50 nanosaniye (saniyenin milyarda biri)(1ns $\equiv$ 15 cm) olan bir puls ve 1 gigawatt'lık bir enerjiyle üretilebilirler. İşlem Q-düğmesi tarafından kontrol edilir. Rezonatör içindeki Q'nun özel olarak düzenlenmesiyle puls genişliğini 2-5ns'a indirmek mümkün olmaktadır. Bu, yakutlu bir lazer için performansının en üst seviyesidir.

Nd-YAG (Neodymium-Yttrium-Aluminium-Garnet) lazer, birleştirme yöntemi için uygundur. Bu teknik, puls genişliğini 100-200 pikosaniye'ye (saniyenin trilyonda biri) indirir. Bu da daha az enerji gerektirir ve sisteme daha iyi performans ve daha yüksek puls tekrarlama oranı sağlar. Sonuç olarak frekans, 1060 nm (kızılötesi) yerine 530 nm (yeşil) dalga boyu ile iki katına çıkar ve geri dönen pulsların karşılanması için daha iyi koşullar oluşturulmuş olur. Uzaklık belirlemede ulaşılan doğruluk, lazer pulslarının boyları ve yoğunlukları ile sıkı bir korelasyon içindedir. Mevcut sistemlerin çoğu Nd-YAG lazer kullanmaktadır.

2.3. SLR Noktaları ve Kullanılan Sistemler

Ölçme yapılan SLR istasyonlarının bazıları sabit, bazıları da hareketli olup, tüm noktalar kendilerini tanımlayan kalıcı, uluslararası numaralar ve bulundukları bölgeler ile anılmaktadırlar. Şekil 2, sürekli kullanılan SLR istasyonlarının dünya üzerindeki yerlerini göstermektedir.



Şekil 2. Global SLR Noktaları

1990 yılında dünya üzerinde bulunan yaklaşık 50 SLR sisteminin (IERS 1991) yaklaşık 20 tanesi 20000 km.'ye kadar olan uzaklığı ölçebilecek, sadece 3-4 tanesi ise Ay'a ulaşabilecek kapasitededir, (SEEBER 1993). Sabit sistemlerin yanısıra taşınabilir sistemlere de önem verilmiş ve NASA (GSFC-Goddard Space Flight Center) tarafından 4 hareketli sistem serisi geliştirilmiştir. TLRS (Transportable Laser Ranging Station) diye adlandırılan bu sistemler çok daha kolay taşınabilir olup normal uçakların konteynerinde taşınabilecek modüler yapıya sahiptirler. Bunlar oldukça düşük enerjiyle ve tek foton bularak çalışırlar. Her biri 750 kg. ağırlığındadır. Genellikle hareketli sistemler ölçme yapılacak mahalde 2-3 aylık periyodlarla çalışırlar ve bölge değiştirmeleri için bir kaç güne gereksinim vardır. Hollandalı ve Alman gruplarının ortak çalışması sonucu geliştirilen MTLRS-1 ve MTLRS-2 sistemleri ise NdYAP (Yttrium Ortho Aluminate, Petrovskit türündeki mineralin bir kristali) isimli farklı bir lazer kullanırlar ve 500 kg. ağırlığındadırlar. Sabit istasyonlar kadar iyi, dünya çapında çeşitli kampanyalarda kullanılan 10 hareketli SLR sistemi şunlardır:

TLRS-1, TLRS-2, TLRS-3, TLRS-4 (USA) (1993)

MTLRS-1 (Almanya, IfAG) (1993)

MTLRS-2 (Hollanda, Delft Üniversitesi-Danimarka) (1993)

HTLRS (Japon Hidrografi Bölümü) (1995)

FTLRS (Fransa) (1995)

ITLRS (İtalya)

SALRO (Suudi Arabistan)

(NASA 1990, PEARLMAN 1994, SEEGER 1993, UZEL v.d. 1995).

Tablo 1. SLR Ölçmelerinde Kullanılan İstasyonlar

İSTASYON NUMARASI	İSTASYON BÖLGESİ
1873	Simeiz, Crimea, USSR
1893	Kazvili, Crimea, USSR
1963	Santiago De Cuba, Küba
7080	Fort Davis, Texas, U.S.A
7090	Yaragadee, Avustralya
7106	Greenbelt, Maryland, U.S.A
7109	Quincy, California, U.S.A
7110	Monument Peak, California, U.S.A
7210	Haleakala, Maui, Hawaii
7236	Wuhan, Çin
7296	Richmond, Florida, U.S.A
7308	Tokyo, Japonya
7403	Arequipa, Peru
7520	Karitsa, Yunanistan
7597	Wettzell, Almanya
7806	Metsahovi, Finlandiya
7810	Zimmerwald, İsviçre
7811	Borowiec, Polonya
7831	Helwan, Mısır
7836	Grasse, Fransa
7836	Potsdam, Almanya
7837	Shanghai, Çin
7838	Simosato, Japonya
7839	Graz, Avusturya
7840	Herstmonceux, UK
7843	Orroral Valley, Avustralya
7882	Cabo San Lucas, Bolivya
7883	Ensenada, Mexico
7918	Washington, U.S.A
7939	Matera, İtalya
8834	Wettzell, Almanya

2.4. Lazer Uyduları

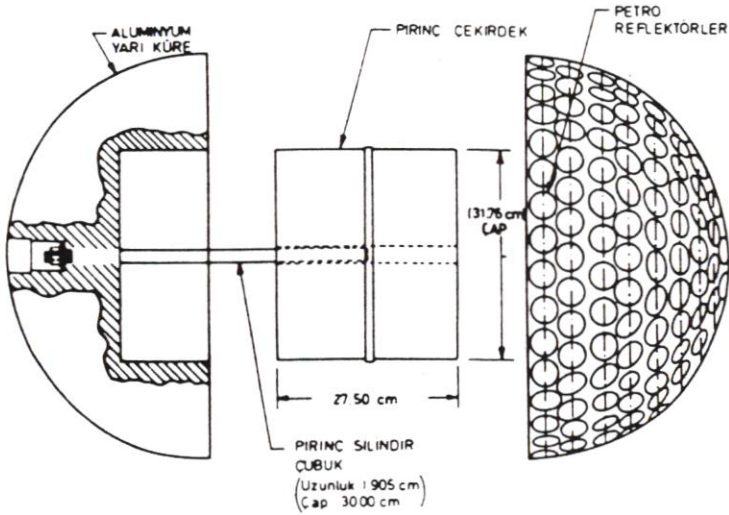
Uydulara yapılan uzaklık ölçümleri sadece uygun yansıtıcı düzeneğe olanaklıdır. Gelen lazer ışığı (pulsu) kesinlikle geldiği aynı yöne geri gönderilmelidir. Böyle tipteki yansıtıcılara geri-yansıtıcılar (retro-reflector) denir ve çoğunlukla küp köşesi cam prizmalardan yapılırlar. Bir geri-yansıtıcı bir kübün köşegeninden piramit şeklinde kesilmesiyle oluşturulur. Arzu edilen doğruluğa ulaşmak için yansıtıcılar, uydu geometrisi ve yörünge yüksekliği gözönünde bulundurularak dikkatlice tasarlanmak zorundadırlar. Burada özellikle enerji dengesinin ayarlanması gerekmektedir. Yansıtıcının boyutları yeterli enerjiyi yansıtacak büyüklükte olmalıdır. Çoğu zaman gereken enerji seviyesini elde etmek için çapı 2-4 cm. olan birkaç tekli yansıtıcı belli bir sırayla dizilirler. Küp köşesi içindeki sinyal yolu bilinmelidir. Eğer yansıtıcılar uydunun kütle merkezine göre simetrik olarak dizilmemişlerse (örneğin çok amaçlı uydular) uydunun kütle merkezi ve yansıtıcıların aralarındaki geometrik ilişkiler gerekmektedir.

Yansıtıcılar pasif elemanlardır ve bir uydu üzerine ek bileşenler olarak kolaylıkla yerleştirilebilirler. Çoğu durumda SLR tekniği, yörüngeye ilişkin bilgilerin presizyonunu sağlamak için uygulanır. Bazı uydular, yalnız hedeflenen yörünge duyarlılığının artırılmasına hizmet etmek için fırlatılmışlardır. Böyle uzay araçlarının tasarımı ve yörüngesel parametreleri optimize edilmektedir. Günümüzde en çok kullanılan bu tipteki lazer uyduları LAGEOS, STARLETTE, AJISAI ve ETALON'dur, (SEEBER 1993). Bu uydulara ait teknik özellikler Tablo 2 'de sırasıyla verilmektedir.

Tablo 2. SLR Uyduları ve Özellikleri

ÖZELLİK UYDU	ÜLKESİ	ATILIŞ YILI	YÜKSEK. (km.)	KÜTLESİ (kg.)	ÇAPI (cm.)	LAZER YANSITICI	EĞİKLİK (°)
LAGEOS I-II	A.B.D	1976-1992	6000	407	60	422-426	109.8°-52°
STARLETTE	FRANSA	1975	960	47	24	60	50°
AJISAI	JAPONYA	1986	1490	685	214	1416	50°
ÉTALON I-II	RUSYA	1989	20000	1415	129.4	2000	64.8°

SLR ölçmelerinde en çok kullanılan uydular LAGEOS I ve LAGEOS II uydularıdır. Bunlar diğerleri gibi pasif uydular olup, atmosferik sürüklenme etkisini ve yörüngedeki belirsizlikleri azaltmak için uygun yükseklikte (yaklaşık 6000 km) dairesel bir yörüngeye fırlatılmışlardır. Uyduların küresel şekli ve sahip oldukları yüksek yoğunluk, yörüngeye güneşten gelen radyasyon basıncına karşı olan hassasiyetini azaltmaktadır. Buna rağmen radyasyon basıncı LAGEOS'un yörüngesini etkilemekte ve bundan dolayı yörünge belirlemede kullanılan programlar, yörünge entegrasyonu sırasında bu etkiyi gözönünde bulundurmaktadırlar. (COHEN 1985, RUBINCAM v.d. 1985, RUBINCAM v.d. 1997, SEEGER 1993, SMITH v.d. 1985).



Şekil 3. LAGEOS I Uydusunun İç Yapısı

2.5. SLR'ın Uygulama Alanları

Lazer sistemleri uyduların izlenmesi anlamında en ilerlemiş sistemlerdir. Lazerle gerçekleştirilen uydu uzaklık ölçmelerinden elde edilen çok yüksek duyarlık jeodezi ve geodinamikte geniş uygulama alanlarının açılmasına neden olmuştur (Tablo 3.). Her bir istasyon noktasında yapılan ölçmelerin doğruluğu $\pm 1-10\text{mm}$. değerleri arasında kalmaktadır. Aşağıda listelenen farklı hedeflere ulaşabilmek sadece uluslararası işbirliği ile mümkündür. Çünkü yerin tümüne ait yayılmış istasyon verilerinin kullanımı söz konusudur. Yaklaşık 20 yerleşik ve birçok hareketli istasyon sürekli olarak veri toplama için katkıda bulunmaktadır.

Tablo 3. SLR'nin Uygulama Alanları ve Konuları

Konumlar ve konum değişiklikleri:	Yersel mutlak konum belirleme, yermerkezli referans sistemi; göreceli olarak kabuk deformasyonu ve tabaka tektoniğinin analizi
Gravite alanı ve uydu yörüngeleri:	Katsayıların presizyonlu belirlenmesi; uydu yörüngelerinin doğru tanımlanabilmesi için dünya gravite modellerinin yeniden biçimlendirilmesi
Referans sistemi Dünyanın dönme parametreleri:	Kutup Hareketi bileşenlerinin ve dünyanın dönüşündeki değişikliklerin belirlenmesi
Okyanus gel-gitleri Yeryuvarının çekimi Yörüngelerin presizyonunun belirlenmesi:	Yersel gel-git modelleri; Dünya'nın iç yapısı özel uyduların (örneğin yükseklik ölçen uydular) yörüngelerinin presizyonlu belirlenmesi.

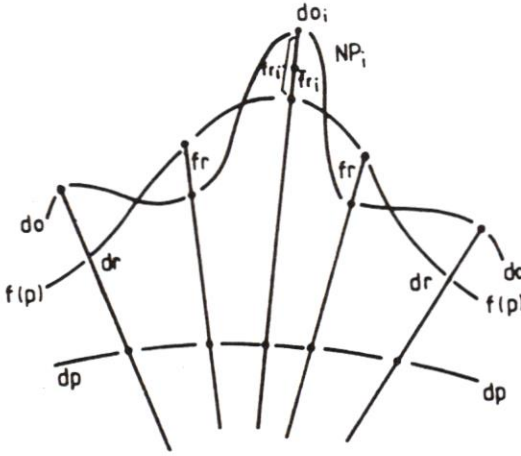
Gözlem sonuçlarının anlamlı kullanımı, sadece veri üretimi, indirgenmesi ve analizi üzerinde uluslararası standartların fikir birliği içinde olması ile mümkündür. Bu tip standartlar 1983 yılında MERIT (Monitor Earth Rotation and Intercompare the Techniques) standartları ile formüle edilmiştir. Günümüzde bu standartlar sürdürülmekte ve gerektiğinde IERS (International Earth Rotation Service) standartları ile güncelleştirilmektedir, (NASA 1990, NOOMEN v.d. 1996, SEEGER 1993, SMITH v.d. 1990, TAPLEY v.d. 1985).

2.6. SLR Ölçmeleri ve Değerlendirilmesi

2.6.1. Sıkıştırılmış Ölçülerin (Normal Point) Oluşturulması

Verinin kontrolü ve sıkıştırılması çok adımlı bir değerlendirmenin içinde çalışılarak yapılabilir. İlk adımda, gözlenen uzaklık d_o , hesaplanan referans uzaklığı ile karşılaştırılır ve bir seri düzeltme d_r oluşturulur. Referans uzaklığı mümkün olan bütün gözlemlerden elde edilir. Bu işlem, oldukça fazla hesap yükü gerektirmekte ve sayısal zorlukları beraberinde getirmektedir. Bir alternatif yaklaşım ise presizyonlu yörünge tahminlerini veya yörünge

daha kısa bölümleri için polinom yaklaşımlarını kullanmaktır. Kaba farklara sahip veriler elimine edilir, (Şekil 4.).



Şekil 4. Sıkıştırılmış Ölçülerin (Normal Point) Oluşturulması

İkinci adımda d , düzeltmelerine uyabilecek bir fonksiyon, bir polinom veya bir takım yörüngesel parametreler kullanılır. Uygunluk sağlandıktan sonra sapmaların analizi yapılır.

$$f_r = d_r - f(p) \quad (2)$$

Üçüncü adımda, gözlemlenen yörünge BINS diye adlandırılan aralıklara bölünür. Her aralıkta bütün sapmaların (f_r) ortalama değeri oluşturulur ve aralığın merkezindeki fonksiyona eklenir. Bu nokta (NP_i - normal nokta) "sıkıştırılmış ölçü" diye adlandırılır ve belirli bir aralık için tek gözlemi gösterir. Bu aralığın ölçüsü LAGEOS için 2 dakika, STARLETTE için 30 saniyedir. Yani LAGEOS'ta 2 dakikalık zaman aralığı içine düşen bütün uzaklıklar tek bir uzaklığa dönüştürülür. Bundan dolayı Lageos için kullanılan ölçülere iki dakikalık sıkıştırılmış ölçü (two minute normal point) denilmektedir.

$$d_{NPi} = d_{oi} - (f_{r_i} - \bar{f}_{r_i}) \quad (3)$$

Tablo 4, 1994 yılı için LAGEOS I uydusuna yapılan ölçmelerin sayısının çokluğu karşısında sıkıştırılmış ölçü kullanımının avantajını açıkça ortaya koymaktadır, (APPLEBY v.d. 1994, PAPAZISSİ v.d. 1987, SEEGER 1993, SMITH v.d. 1990).

Tablo 4. 1994 Yılı için LAGEOS I Uydusunun Veri Sayısı

AYLAR	İSTASYON SAYISI	HAM VERİ SAYISI	NORMAL POINT SAYISI
OCAK	17	799550	5345
ŞUBAT	18	449289	3148
MART	17	512863	3962
NİSAN	12	413999	3169
MAYIS	12	252571	2533
HAZİRAN	14	579483	4621
TEMMUZ	15	660457	4045
AĞUSTOS	19	520518	4197
EYLÜL	18	414658	3591
EKİM	18	831805	5530
KASIM	18	473136	4303
ARALIK	19	675957	4691

2.6.2. SLR Ölçmelerine Getirilen Düzeltmeler

Yapılan SLR ölçmeleri ve getirilen düzeltmeler için şu eşitlik kullanılabilir, (SEEGER 1993) (Şekil 5.).

$$d = \frac{1}{2}c\Delta t + \Delta d_o + \Delta d_s + \Delta d_b + \Delta d_r + \eta \quad (4)$$

Burada;

Δt = Sinyalin başlangıcı ile bitişi arasında lazer pulsunun gidiş-dönüş zamanı

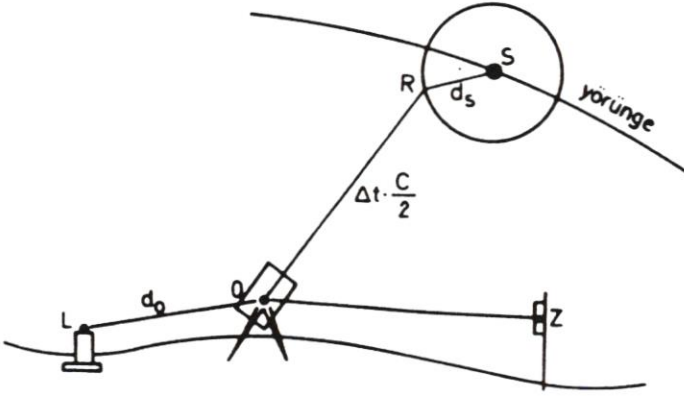
Δd_o = Yerdeki dışmerkezlik düzeltmesi

Δd_s = Uydudaki dışmerkezlik düzeltmesi

Δd_b = Yer sistemindeki sinyal gecikmesi

Δd_r = Kırılma düzeltmesi

η = Geriye kalan düzenli ve rastgele gözlem hataları'dır.



Şekil 5. SLR Ölçmelerindeki Geometrik İlişkiler

Zaman Ölçmeleri : Δt

Uydunun hareketi dünya ile göreceli olduğundan uzaklık ölçmelerinde universal zaman (UT) kullanılır. Pulsun uyduya gidiş-dönüş (uçuş) süresi (Δt) ölçülür. Başlangıç ve bitiş zamanları sinyalin tanımlanmasındaki belirsizlikten etkilenebilir. Arzu edilen doğruluk birkaç pikosaniyedir.

Dışmerkezlik Düzeltmeleri: $\Delta d_0, \Delta d_s$

Ölçme sistemindeki referans noktası olarak genellikle düşey eksen ile yatay eksenin "0" noktasındaki kesişimi kullanılır. Sabit SLR istasyonları için ölçme referans noktası, sistemin optik merkezi ile tanımlanır. Oysa bazı istasyonlarda, (özellikle hareketli sistemle çalışan) sistemin optik merkezi, referans noktasını temsil edemez. Bu duruma istasyon noktasının dışmerkezliği (site eccentricities) denir ve değerlendirmelere dahil edilmesi gerekir.

Uydunun kütle merkezi “S” ile tek bir yansıtıcının optik merkezi “R” arasındaki geometrik ilişki, bütün uydular için kurulabilir. Buna kütlelerin merkez düzeltmesi (center of mass correction) denir. Bu düzeltme, küresel olan LAGEOS I ve II, STARLETTE ve AJISAI için çok yüksek doğrulukla yapılabilir. Düzensiz şekillere sahip uydular için ise çok zordur.

Kırılma Düzeltmesi : Δd_r

Lazer impulsları atmosferde 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 modellenenir. Kırılma gecikmesi zenith yönünde 2.4 m., 20° yükseklikte 7.0 m., 10° yükseklikte ise 13 m. dir. SLR ölçmelerinde genellikle IERS standartlarıncı kabul gören Marini-Murray eşitlikleri kullanılmaktadır, (KIZILSU 1998).

Gecikme Düzeltmesi : Δd_b

Lazer ölçme sistemindeki “0” geometrik referans noktası, ölçmelerin elektriksel sıfır noktasına uymaz. Bu, düzenli bir zaman gecikmesi olarak açıklanabilir. Lazer gecikmesi kalibrasyonla belirlenebilir. Tipik değerler, lazer gecikmesi için $20 \mu s$, lazer titremesi için 1 ns’dir. Modern aletlerde kalibrasyon lazer sisteminin içinde yapılır.

2.6.3. Kullanılan Veriler

Anlık (QUICK-LOOK) Veriler : Uyduların daha iyi izlenebilmesi amacıyla yörüngenin presizyonlu olarak belirlenmesi ve yörünge düzeltmelerinin günü gününe iletilmesi için veri grubu içinden, ölçmelerin yapılmasından sonraki ilk 24 saat içinde tek tek ölçme noktaları seçilir (Lageos: 50 dönüş, diğer tüm uydular : 25 dönüş). Anlık (Quick-Look) veriler olarak tanımlanan bu veriler formatlanarak 1987’den beri MARK III - veri ağı üzerinden NASA’ya gönderilmektedir. Noktaların seçimi, hesaplayıcı tarafından otomatik olarak gerçekleştirilir. Tek seçim ölçütü QL-noktalarının sayısıdır. Bu veriler NASA tarafından Texas Austin ve Hollanda Delft Üniversitelerine gönderilir. QL verileri kalitenin test edilmesinin yanı sıra, yerin dönme parametrelerinin doğru olarak belirlenmesine de hizmet eder, (HOFMANN-WELLENHOF v.d. 1989, NOLL 1997).

Kapsamlı (FULL - RATE) Veriler : Tek tek yapılmış tüm ölçüler uluslararası veri alışverişi için standardlaştırılmış bir formata getirilir. Bu formatlar (SEASAT-Format, MERIT-Format v.b.) ölçmeler için tüm bilgileri (istasyon adı, meteorolojik veriler, kalibrasyon değerleri, lazer dalga boyu v.b.) içerirler, (HOFMANN-WELLENHOF v.d. 1989).

Veriler NASA-CDDIS'ten bir çeşit elektronik veri transfer yöntemi olan ftp (file-transfer-protocol) yardımıyla SLR-DATA:[SLR UYDUNUN ADI.YIL] dosyalarından alınabilmektedir. Tek tek yapılmış olan ölçmeler uluslararası veri alışverişini sağlamak üzere standardlaştırılarak kapsamlı bir formatta düzenlenmiştir. MERIT formatları ortak parametreler için uluslararası kabul görmektedir. Bu verilerin içinde ölçme değerlerinin yanı sıra, ölçmelerin başında uyduyu tanımlayan yedi haneli uydu numarası (örneğin; LAGEOS I için "7603901", LAGEOS II için "9207002"), ölçme yılını gösteren iki haneli yıl değeri (94,95,96), ölçme gününü belirten üç haneli gün değeri (örneğin; 031, 177, 365 v.b.), ölçme yapılan istasyonu tanımlayan dört haneli istasyon numarası (örneğin; 7080, 7840 v.b.), iki haneli CDP sistem numarası (örneğin; 07), dört haneli lazer dalga boyu değeri ve kalibrasyonla ilgili bir takım değerler bulunmaktadır.

2.6.4. Ölçmelerin Değerlendirilmesi

SLR ölçmelerini değerlendirirken kullanılan iki teknik vardır: kısa-yay (short-arc) ve uzun-yay (long-arc) yöntemleri.

Yörüngenin kısa bir bölümü için bazı yörüngesel elemanların parametreler olarak gözlemlerden tahmin edilmesi kısa-yay (short-arc) yöntemi olarak adlandırılır. Bir çok değişime uğramış, daha uzun yörünge için daha çok sayıda yörünge bozucu parametre tahmin edilebilir. Bu tekniğe ise uzun-yay (long-arc) yöntemi denilmektedir. Bu yöntem, kutup hareketi, dünyanın dönüşü, dünyanın çekimi ve gravite alanlarının parametre tahminleri ve çoğunlukla bilimsel problemlerin analizi için kullanılır.

Kısa-yay yöntemi ise aynı anda gözlem yapılan istasyonlar arasındaki bazıları çok presizyonlu olarak veren ve yörünge hatalarının etkilerini azaltan bir tekniktir. Yörünge yayının uzun veya kısa olmasını belirleyen etken zaman dilimidir. Uzun-yay tekniği için birkaç gün ile bir veya birkaç yıl arasında değişen zaman dilimindeki veriler kullanılır. Kısa-yay tekniğinde ise peryot, birkaç dakika veya çok daha kısa zaman dilimidir, (APPLEBY v.d. 1994, NOOMEN v.d. 1996, PAVLIS 1985, SEEGER 1993, WAKKER v.d. 1985).

3. VERİ ANALİZİ

3.1. Veri Analiz Yöntemleri

Veri analiz merkezleri, dünyanın dört bir yanına yayılmış olup, özellikle bazı ülkelerde, gözlemleri kendi özel analiz teknikleri ile destekleyen SLR gözlemevleri ile bağlantılıdır. Her teknik farklıdır ve dinamik ve geometrik yöntemlerin bir kombinasyonu olarak yorumlanabilir (NASA 1992).

Geometrik ve dinamik yöntem olmak üzere iki farklı kavram söz konusudur. Geometrik yöntem sadece konumların ve bazların belirlenmesi için kullanılabilir. Temel olarak aynı anda en az 4 yer istasyonundan hedef uyduya yapılan uzaklık ölçmeleri kesinlikle belirli bir zaman aralığında gerçekleştirilmek zorundadır. Ölçmeye katılan yer istasyonları arasındaki uzaklık uzaysal trilaterasyon kavramından türetilir veya yeni istasyonlar, varolan kontrol noktaları ağı ile ilişkilendirilebilir. Görünürde pratik gibi olsa da uygulanabilmesi zordur. Çünkü hava koşulları, yoğunlukla 4 veya daha fazla istasyonda aynı anda ölçme yapmaya müsaade etmez, aynı anda uygun hava koşullarıyla karşılaşma ihtimali oldukça azdır. Lazerle uzaklık ölçmedeki geometrik yöntemin teori ile ilgisi daha fazladır ve pratikte uygulanamaz.

Dinamik yöntemde gözlenen bütün uzaklıklar kullanılabilir. Uydunun hareketi uygun bir yörüngesel model ile tanımlanabilir ve bütün gözlemler bir diğeri ile ilişkilendirilir. Gözlemlerin yüksek doğruluk düzeyinde olabilmesi için uydu üzerine etkiyen bütün kuvvetlerin dikkatli bir şekilde modellenmesi gerekir, (AMBROSIUS v.d. 1987).

Yörünge düzlemine göre dünyanın dönme hareketi de bilinmelidir. Uydu, dünyanın kütle merkezine ilişkin hareket ettiği için yermerkezli (geocentric) koordinatlar belirlenebilir. Uzay jeodezisinde de yersel koordinatları açıklamak için referans elipsoidi kullanılır. SLR' da genellikle kullanılan sistemler GRS-80 (Geodetic Referans Sistemi) ve WGS-84 (World Geodetic System) elipsoidleridir, (ŞAHİN 1993, MA v.d. 1994). Açıkça görülüyor ki istasyon koordinatlarının belirlenmesi dinamik yöntem için ayrı bir problem değildir. Burada istasyon nokta konumları $\pm 2-3$ cm. doğrulukla belirlenebilmektedir. Nokta koordinatları genel parametre tahmini işlemlerindeki değerlerle beraber bulunur, (NASA 1990, NASA 1992). Model parametreleri, istasyon koordinatları ve yörünge parametrelerinin hepsi, jeodezik ve jeofiziksel araştırmalar için çok önemlidir. Örneğin, istasyon koordinatlarındaki zamana bağlı

değişimler, aynı anda tektonik tabaka hareketlerini ve bölgesel kabuk deformasyonlarını kontrol etmek için kullanılmaktadır.

Bir tek istasyondan yapılan gözlemlerde parametre tahmini işlemi genellikle sadece istasyon koordinatlarının belirlenmesiyle sınırlanmıştır. Parametrelerin sayısı birçok istasyondan yapılan gözlemlerle artırılabilir. Uydü yörüngesine getirilen düzeltmeler ve gözlem hataları da tahmin edilebilir. Tablo 5, yapılan gözlemlerin değerlendirilmesini ve parametre tahminini içermektedir.

Tablo 5. SLR Gözlemlerinin Değerlendirilmesi

Uydü gözlemleri	Ham verinin gözlemlenen veriye dönüşümü
Ön işlem	İyonosfer, troposfer, zaman düzeltmeleri, sıkıştırılmış ölçüler, faz belirsizliklerinin çözümü
Gözlemlerden hesaplanan değerler	Sayısal analiz. Yörünge mekaniği. Jeodezi. Koordinat dönüşümü.
Parametre tahmini	İstasyon koordinatları. Gravite alan katsayısı. Uydunun konumları. Kutup hareketi, dünyanın dönme hareketi. Geodinamik parametreler. Gözlem hataları.
Doğruluk tahmini ve güvenilirlik	İstatistikler. Güvenilirlik. Doğruluk ölçütleri.

Mevcut parametreler:

- Yermerkezli istasyon koordinatları.
- Gravite alan katsayıları.
- Kutup hareketi ve bileşenleri
- Dünyanın dönme parametreleri ve universal zaman (UT)
- Çekim (gel-git) model parametreleri
- Uydu yörüngesinin tanımlanması için ek parametreler (Radyasyon basıncı, tanecik sürüklenmesi v.b.).

Aynı grup gözlemlerden, ilgili bütün parametreleri elde etmek genellikle mümkün değildir. Çünkü çözüm yapılan sistem değişken olabilir. Dünyanın çekim alanının katsayıları, bazların hesaplanmasında genellikle sabit tutulur veya dünyanın dönme parametrelerinin belirlenmesinde istasyon koordinatları bilinen değerler olarak ele alınır. Bütün parametre tahmini işlemlerinde, gözlemlenen veriye uyan presizyonlu bir yörüngenin oluşması gerekmektedir. Farklı uydular farklı yörüngesel yay uzunlukları gerektirir. Örneğin LAGEOS I'in 5-10 günlük yay uzunluğu bölgesel bazların belirlenmesi için yeterlidir. Bununla birlikte çok uzun yörünge yaylarının eğer mümkünse uydunun fırlatılmasından itibaren elverişli bütün verilerle denenmesi ve temel fiziksel modellerin doğruluğunun saptanması gerekmektedir. Kısa yörünge yayları için ana hata kaynağı dünyanın çekim alanıdır. Uzun yörünge yayları için (haftalar ve aylar) uzun periyodlu yörünge bozucu etkiler daha tehlikelidir (örneğin, güneşin radyasyon etkisi veya gel-git modellemesinin yetersizliği). Yörünge modellemedeki olasılıklar ve teknikler, ilk lazer uydularının fırlatılmasındanberi sürekli geliştirilmektedir, (SEEBER 1993).

3.2. Veri Analiz Merkezleri

Daha önceki bölümde dünyanın her yerine yayılmış veri analiz merkezlerinin varlığından ve bazılarının kendi analiz teknikleri ve gözlemevleri tarafından desteklendiğinden bahsedilmişti.

Örnek verilecek olursa, Norveç'te son 10 yıl süresince NDRE (Norwegian Defence Research Establishment)'de geliştirilmiş çok amaçlı uydu jeodezisi yazılımı olan GEOSAT

kullanılmaktadır. Bu yazılımda en presizyonlu referans sistemleri, dinamik modeller ve mevcut ölçme modelleri kullanılmakta ve devamlı olarak gelen en yeni bilgilerle güncelleştirilmektedir, (ANDERSEN 1995).

Yörünge dinamiği analizi ve en küçük kareler yöntemi parametre tahmini paket programı SLRP3 (Satellite Laser Ranging data Processor) 1987'den bu yana Sofya, Bulgaristan Bilim Akademisi, Jeodezi Merkez Laboratuvarı tarafından geliştirilmektedir. Bu program, Gauss-Newton parametre tahmini tekniğini kullanmaktadır. İstasyon koordinatları, dünyanın dönme parametreleri ve istasyon hızları, 1992'den beri düzenli olarak IERS tarafından sağlanmaktadır. Yapılan analizlerde 30 veya 31 günlük veriler kullanılmakta ve 7105 nolu noktanın enlemi, boylamı ve 7210 nolu noktanın enlemi sabit alınmaktadır, (GEORGIEW v.d. 1994).

Graz'da ise eski HP 1000 bilgisayarından yeni bir PC kontrol sistemine dönüş gerçekleştirilmiştir. 2 yıl önce yapılan bu değişiklikte, kullanılan PC, basit (486/66 mhz) bir bilgisayar olup yazılmış bir dizi programla DOS altında çalışmaktadır. Lazer pulsunun uçuş süresinin ölçülmesi için kullanılan eski HP5370A sayacına da paralel olarak üç adet SR620 sayacı bağlanarak ölçmeler yapılmakta fakat henüz veri analizi yapılamamaktadır, (KIRCHNER v.d. 1997a, 1997b).

Tokyo, CRL (Communications Research Laboratory)'de geliştirilen SLR analiz programı CONCERTO yerel çözümlerin araştırılması için kullanılmaktadır. Bu yazılım IERS'in desteklediği fiziksel modellere dayanmaktadır, (OTSUBO v.d. 1994).

Fransızlar (CNES/GRGS) ise 20 yıldan beri dinamik uydu jeodezisi uygulamalarında GINS isimli programlarını kullanmakta ve geliştirmektedirler. GRIM gravite alan modeli serisini de Almanların işbirliği ile oluşturmuşlardır. GINS'ın çekirdeğini, gözlemlerden seçilen parametrelerin iterasyonla en küçük kareler yöntemiyle dengelenmesi oluşturur. Programın bütün adımları dinamik yaklaşımdadır, (PEROSANZ v.d. 1997).

Kendi analiz programlarını kullanan merkezlerin yanısıra bir çok analiz merkezi de NASA'nın geliştirdiği GEODYN ve SOLVE programlarını kullanmaktadırlar.

Hollanda, Delft Teknoloji Üniversitesi'nin Convex 3840 süper bilgisayarında da NASA'nın GEODYN II ve SOLVE II programları çalışmaktadır. Gözlemlerin analizindeki bütün işlemler ve sonuçlar bu bilgisayarda gerçekleştirilmektedir, (NOOMEN v.d. 1994).

İtalya'da, bütün dünya'ya yayılmış olan izleme istasyonlarından sağlanan LAGEOS-I'den elde edilmiş SLR verilerinin analizi 1983'ten beri yapılmaktadır. CDDIS'ten alınan sabit ve hareketli istasyonların kapsamlı verileri kullanılmaktadır. Özellikle, Matera (7939)'nın da bulunduğu 6 sabit Avrupa SLR istasyonu için de yerel çözümler hesaplanmaktadır. Analiz için kullanılan yazılım ise GEODYN ve SOLVE programlarıdır, (MILANİ v.d. 1995).

İngiltere'de, Newcastle ve Herstmonceux'da kullanılan SLR veri analiz yazılımı ise 1986'da RGO'da (Royal Greenwich Observatory) A.T. Sinclair ve G.M. Appleby tarafından yazılmış SATAN (SATellite ANalysis) paket programıdır. SATAN, FORTRAN 77 bilgisayar dilinde yazılmış ve iki ana programdan (ORBIT ve RGODYN) oluşmuştur. ORBIT uydu yörüngesinin hesaplanmasında, RGODYN ise gözlemlerden elde edilen veri işlemlerinde kullanılmakta ve bu programlara vermek üzere giriş verileri hazırlayan programlar bulunmaktadır, (SELLERS v.d. 1990, ŞAHİN 1993).

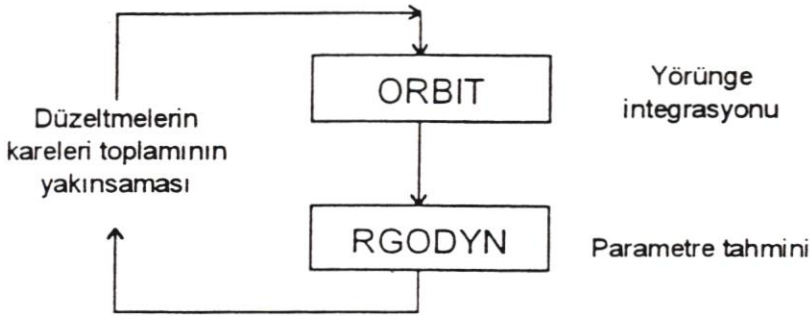
RGO'da bulunan sabit SLR sistemi, Kasım 1983'ten beri düzenli olarak çalışmakta olup dünyada kendi çeşitleri arasında en etkili, en iyi yerleşime sahip olanlardan biri olarak kabul edilmektedir. RGO Cambridge'e taşınmasına rağmen, lazerli uydu uzaklık ölçer Herstmonceux'da kalmıştır. Bunun nedeni İngiltere'de en doğru ölçme yapılan SLR istasyonlarından biri oluşu ve yerdeğiştirmenin çalışmaları çok ciddi bir şekilde güçleştirecek olmasıdır. RGO'da ve İngiltere'nin diğer bölgelerinde çalışan araştırmacılar hem kendi verilerini hem de NASA CDDIS'in diğer bölgelerden elde ettiği verileri toplarlar. RGO'nun ölçmelerinde Nd-YAG lazerden gelen kısa pulslar ve "kedi gözü" gibi çalışan, pulsu alıcı teleskoba geri yansıtabilen yansıtıcılar kullanılmaktadır. Buradaki ekipman, gökyüzü açık olduğu takdirde hem gece hem de gündüz çalışabilmektedir.

Şu anda, İ.T.Ü'de oluşturulmuş bulunan SLR analiz merkezinde ise, NASA-CDDIS'ten (Crustal Dynamics Data Information System) alınan, 1994 yılından bu yana elde edilmiş LAGEOS I ve LAGEOS II'ye ait kapsamlı veriler, HPA 4033A Workstation (Model 712/80) sisteminde her açıdan iyi ve güçlü bir işletim sistemi olan UNIX altında SATAN SLR analiz programı kullanılmak suretiyle işlenmektedir.

3.3. SATAN SLR VERİ ANALİZ PROGRAMI

SATAN, İngiltere-RGO'da (Herstmonceux) yazılan ve kullanılmakta olan bir SLR analiz programı olup esasen iki ana programdan oluşmaktadır: **ORBIT** ve **RGODYN**.

ORBIT, uydunun yörüngesini ve yörüngeyi etkileyen parametrelere (GM, sürüklenme, radyasyon basıncı v.b.) göre uydu koordinatlarının kısmi türevlerini hesaplar. Uyduya etkileyen kuvvetler, **MERIT** standartları projesinde tavsiye edilenlere uygun modellendirilmiştir, (**SELLERS** v.d. 1990). **RGODYN** ise her SLR gözlemi için ölçülen uzaklığın düzeltilmesini ve yörüngeyi etkileyen parametrelere göre uzaklığın kısmi türevlerini hesaplar. Program, ölçme (normal point) ve normal denklemleri oluşturur ve parametreler için en küçük kareler yöntemini kullanır. Bunların presizyonlarını belirlemek için parametrelerin kovaryans matrisini ve birim varyans faktörünü de hesaplar, (**SELLERS** v.d. 1990). Başlangıçta, geçici bir başlangıç konum vektörü ile bir aylık yörünge **ORBIT** tarafından hesaplanır. Parametrelerin düzeltmeleri (başlangıç konum vektörü, istasyon koordinatları, izleme ivmesi (sürüklenme), güneşin radyasyon basıncı katsayısı) aylık SLR gözlemlerinden oluşan global bir veri grubunu kullanarak **RGODYN** tarafından çözülmektedir. Düzeltilmiş başlangıç konum vektörü, izleme ivmesi ve güneşin radyasyon basıncı **ORBIT**'e geri gönderilir ve **ORBIT** / **RGODYN** döngüsü düzeltmelerin karelerinin toplamı önceden tanımlanan sınıra ulaşana dek tekrarlanır. Bu sınır değeri genellikle 1 cm. den daha az olan istasyon koordinatlarına ve başlangıç konum vektörüne getirilen düzeltmelere uymaktadır.



Şekil 6. SLR (SATAN) Programının Basit Olarak Çalışma Şeması

İstasyon koordinatlarının tahmini için referans sistemini, gravite alanı, bir istasyonun sabit alınan boylamı, GM ve ışık hızının standart değerleri tanımlar. Dünyanın dönme parametrelerinin (ERPs) çözümlenebilmesi için bir istasyonun sadece boylamının sabit alınması gerekmektedir, (SELLERS v.d. 1990, ŞAHİN v.d. 1993).

Gözlem Veri Dosyası

Gözlem verileri kapsamlı veya çoğunlukla 2 dakikalık sıkıştırılmış ölçüler olup MERİT I veya MERİT II formatında olurlar. LAGEOS uydusu için bir SLR gözlem (ölçme) dosyası genellikle şu şekilde isimlendirilir: LGMMMY.DAT.

Burada,

LG : LaGeos (Ölçülen uydu)

MMM : Ölçmenin yapıldığı ay (örn; OCAK için JAN)

YY : Takvim yılı (örn; 1994 için 94)

1987 yılına kadar MERIT I formatındaki SLR verileri kullanılmış ve daha sonra MERIT II geliştirilmiştir. MERIT (an acronym for Monitor Earth Rotation and Intercomparison of Techniques of Observation and Analysis) standartları ortak parametreler için uluslararası kabul görmektedir. MERIT II formatındaki veriler şu değerleri içermektedirler:

- Uydu ve istasyon özellikleri
- Gözlem zamanı
- Uydunun azimutu ve yüksekliği
- Lazerin dalga boyu
- Lazerin menzili ve birleşik standart sapma
- Meteorolojik veriler
- Düzeltme parametreleri (örneğin; troposferik kırılma, kütle merkezi düzeltmesi, sistem gecikmesi, v.b.)
- Troposferik kırılma için uzaklık verisinin düzeltilip düzeltilmediğine dair uyarı v.b. (NOOMEN v.d. 1996, SMITH v.d.1990, ŞAHİN 1993).

Stokastik Modelleme

Bilinmeyenlerin bulunması amacıyla ölçüler arasında göreceli olarak doğruluğu belirleyen ilişkiye "Stokastik Modelleme" denir. Öncelikle, gözlem eşitlikleri için basit olarak şu matematiksel model yazılabilir:

$$Ax - l = v \quad (5)$$

Burada, A: bilinmeyenlerin katsayılar matrisi,
x: bilinmeyen parametreler vektörü,
l: ölçüler vektörü,
v: düzeltmeler vektörüdür.

En küçük kareler ilkesi $v^T P v = \min.$ dur. Bu eşitlikte P, gözlemlerin ağırlık matrisidir, stokastik modeli oluşturur ve gözlemlerin kovaryans matrisinin inversi olarak tanımlanmaktadır ($P = K^{-1}$). En küçük kareler çözümü hesaplanmadan önce öncül kovaryans matrisi bulunabilir. Böylelikle bu matris, gözlemlerin stokastik modeli olarak tanımlanır.

$$K = \begin{bmatrix} \sigma_{11}^2 & \sigma_{12} & \cdot & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22}^2 & \cdot & \sigma_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \cdot & \sigma_{nn}^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Simetrik bir matris olup yapılan ölçmelerin kalitesini gösterir. Köşegen üzerinde olan elemanlar ölçülerin varyansı, geriye kalan diğer elemanlar ise kovaryansdır. Ölçmelerin korelasyonsuz olduğu farzedildiğinde kovaryanslar önemsenmez ve sadece varyansların bulunduğu bir kovaryans matrisi oluşturulabilir.

SLR veri analizinde, farklı analiz merkezleri, uzaklık ölçme sistemlerinin standart sapmaları hakkında farklı kabullere sahiptirler. Fakat NASA'nın bütün sıkıştırılmış ölçülere verdiği gözlem ağırlıkları (burada P diyagonal bir matris olarak kabul ediliyor), SLR analiz merkezlerinin çoğu tarafından kullanılmaktadır.

$$P = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

Burada n, sıkıştırılmış ölçülerin hesaplanması sırasında iki dakika içindeki kapsamlı veri sayısıdır, (SMITH v.d. 1994). Bu yaklaşımda, bütün SLR sistemlerinin her zaman aynı uzaklık ölçme performansına sahip olduğu farzedilmektedir. Burada değişik ağırlık modelleri kullanılabilir. Bu konuda kapsamlı bir çalışma Helmert varyans analizi ile yapılmıştır, (KIZILSU 1998).

4. SONUÇ

Bu bildiride, uyduya lazer ölçmelerinin anlatılmasının nedeni her bir istasyon noktası için mm. mertebesinde ölçme doğruluğuna sahip bu tekniğe gereken önemin verilmesini sağlamaktır. Tüm dünyada, belirli amaçlar için yaygın olarak kullanılan SLR ölçme tekniği, bildiride de anlatılmaya çalışıldığı gibi, ölçme aşamasından değerlendirme aşamasına kadar yüksek teknoloji ve bu konuda bilgi birikimi gerektiren bir dizi işlemler içermektedir. Bunun yanında, SLR'nin

- Çok yüksek doğruluk potansiyeline sahip olması,
- SLR uydularına uydu kaynaklı enerji için bel bağlanmaması,
- Çok büyük alan çalışmalarına, yeryüzünü bütünüyle içeren çalışmalara uygun olması

avantajlarının yanısıra,

- Yer üzerine ölçme-değerlendirme sisteminin inşa edilmesi ve devamlılığının sağlanmasındaki yüksek maliyet,
- Yeryüzü üzerindeki ölçme ekipmanının sınırlı bir taşınabilirliğe sahip olması veya taşınamaması nedeniyle sınırlı çalışma kapasitesi,
- Ölçümlerin hava koşullarına bağlı olması

dezavantajları, Türkiye 'de bu tekniğin çok fazla kullanılamamasına neden olmaktadır. Global SLR noktalarından yapılan sürekli ölçmeler değerlendirilebilirse, bu dezavantajlardan etkilenmeden, presizyonlu konum belirlemede, global deformasyon analizinde, jeofizikle işbirliği içinde tabaka hareketlerinin belirlenmesinde, yer dinamiği ile ilgili bilgilerin sağlanmasında, bölgesel jeodezik ağların SLR noktalarına dayandırılması ve bildiride değinilen tüm amaçlara yönelik kullanılması mümkün ve uygun olacaktır.

KAYNAKLAR

- AMBROSIUS, B.A.C., NOOMEN, R., WAKKER, K.F., PAPAZISSI, E, Accuracy Aspects of Recent Laser Station Positioning Experiments, *Annales Geophysicae*, 5B, (6), pp. 523-532, (1987).
- AMBROSIUS, B.A.C., NOOMEN, R., WAKKER, K.F, First Results of WEGENER/ MEDLAS Data Analysis, International Association of Geodesy Symposia, August 3-5, No.101, pp. 105-114, Scotland, (1989).
- ANDERSEN, P.H., Measuring Rapid Variations in Earth Orientation, Geocenter and Crust with Satellite Laser Ranging, *Bulletin G  d  sique*, 69, pp. 233-243, (1995).
- APPLEBY, G. M., SINCLAIR, A.T., European and Mediterranean Baselines From 10 years of LAGEOS Observations, 1st Turkish International Symposium on Deformations, September 5-9, pp. 791-799, İstanbul, (1994).
- CENC  , A., FERMI, M., CAPORALI, A., European Baselines Determined with LAGEOS: The TPZ-88.1 Solution, International Association of Geodesy Symposia, August 3-5, No.101, pp. 114-124, Scotland, (1989).
- COHEN, S.C., SMITH, D.E., LAGEOS Scientific Results: Introduction, *Journal of Geophysical Research*, September 30, Vol. 90, No.B11, pp. 9217-9220, (1985).
- D  GNAN, J.J., A Strawman SLR Program Plan for the 1990s, NASA Conference Publication, 3283, pp. 107-115, Maryland, (1994).
- GEORGI  W, I., KOTZEV, V., Tectonic Plate Motion From Satellite Laser Ranging to LAGEOS I, 1st Turkish International Symposium on Deformations, September 5-9, pp. 454-472, İstanbul, (1994).

- HOFMANN-WELLENHOF, B.H., KIRCHNER, G., LICHTENEGGER, H., MORITZ, H., PESEC, P., RINNER, K., STANGL, G., SÜNKEL, H., Österreichische Beiträge zum WEGENER-MEDLAS-Projekt, Mitteilungen der Geodatischen Institute der Technischen Universität Graz, Folge 65, (1989).
- KIRCHNER, G., KOIDL, F., Automatic Ranging Software in Graz, Institute for Space Research/Austrian Academy of Sciences Observatory Lustbühl, Technical Note, (1997a).
- KIRCHNER, G., KOIDL, F., Multi Counter Operation at SLR Graz, Institute for Space Research/Austrian Academy of Sciences Observatory Lustbühl, Technical Note, (1997b).
- KIZILSU, G., LAGEOS I ve LAGEOS II için Doğruluk Analizi, Doktora Tezi, İ.T.Ü., (Haziran 1998).
- MA, C., WATKINS, M.M., HEFLIN, M., Global Reference Frame, Intercomparisons of Results (SLR, VLBI, GPS), NASA Conference Publication, 3283, pp.27-33, Maryland, (1994).
- MILANI, A., CARPINO, M., ROSSI, A., CATASTINI, G., USAI, S., Local Geodesy by Satellite Laser Ranging: an European Solution, Manuscripta Geodetica, 20, pp.123-138, (1995).
- NASA-1990, Technical Memorandum-Annual Report, 4220, NASA Scientific and Technical Information Division, USA, (August 1990).
- NASA-1992, Technical Memorandum, 104552, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, (March 1992).
- NOLL, C., NASA-GSFC-CDDIS Manager, E-mail Aracılığı ile Kişisel Görüşme, (1997).
- NOOMEN, R., AMBROSIUS, B.A.C., WAKKER, K.F., Crustal Motions in the Mediterranean Region Determined from Laser Ranging to LAGEOS, American Geophysical Union, Geodynamics, 23, (1993).
- NOOMEN, R., AMBROSIUS, B.A.C., HERZBERGER, K., KUIJPER, D.C., METS, G.J., OVERGAAUW, B., SPRINGER, T.A., WAKKER, K.F., Rigid Block Deformations in Southeast Europe, 1st Turkish International Symposium on Deformations, September 5-9, pp. 713-728, İstanbul, (1994).
- 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).

- OTSUBO, T., ENGELKEMIER, B., KUNIMORI, H., YOSHINO, T., TAKAHASHI, F.,
SLR Quick Analysis for Local Deformations, 1st Turkish International
Symposium on Deformations, September 5-9, pp.90-96, İstanbul, (1994).
- PAPAZISSI, E., NOOMEN, R., VAN GELDER, B.H.W., The Monte Generoso-Zimmerwald
Baseline from Satellite Laser Ranging Data Using Various Analysis
Techniques, Report LR-533, Delft University of Technology, Faculty of
Aerospace Engineering Section Orbital Mechanics, The Netherlands, (1987).
- PAVLIS, E.C., On the Geodetic Applications of Simultaneous Range Differences to
LAGEOS, *Journal of Geophysical Research*, Vol.90, No. B11, pp. 9431-
9438, (1985).
- PEARLMAN, M.R., Satellite Laser Ranging Operations, NASA Conference Publication,
3283, pp.89-101, Maryland, (1994).
- PEROSANZ, F., MARTY, J.C., BALMINO, G., Dynamic Orbit Determination and Gravity
Field Model Improvement on TOPEX/POSEIDON Satellite, *Journal of
Geodesy*, Vol 71, Number 3, pp.160-170, (1997).
- RUBINCAM, D.P., WEISS, N.R., The Orbit of LAGEOS and Solar Eclipses, *Journal of
Geophysical Research*, Vol. 90, No. B11, pp.9399-9402, (1985).
- RUBINCAM, D.P., CURRIE, D.G., ROBBINS, 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).
- SELLERS, P.C., CROSS, P.A., A Pseudo Short-arc Technique for Precise Regional Satellite
Laser Ranging Baselines, *Manuscripta Geodaetica*, 15, pp.207-227, (1990).
- SMITH, D.E., CHRISTODOULIDIS, D.C., KOLENKIEWICZ, R., DUNN, P.J., KLOSKO,
S.M., TORRENCE, M.H., FRICKE, S., BLACKWELL, S., A Global
Geodetic Reference Frame from LAGEOS Ranging (SL5.1AP), *Journal of
Geophysical Research*, Vol. 90, No. B11, pp. 9221-9233, (1985).
- SMITH, D.E., KOLENKIEWICZ, R., DUNN, P.J., ROBBINS, J.W., TORRENCE, M.H.,
KLOSKO S.M., WILLIAMSON, R.G., PAVLIS, E.C., DOUGLAS, N.B.,
FRICKE, S.K., Tectonic Motion and Deformation from Satellite Laser
Ranging to LAGEOS, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, No.B13,
pp.22 013-22 041, (1990).
- SMITH, D.E., Scientific Analysis of Satellite Ranging Data, NASA Conference Publication,
3283, pp.15-27, Maryland, (1994).

- ŞAHİN, M., Aspects of Stochastic & Functional Modelling for Precise Baseline Determination in Satellite Geodesy, PhD Thesis, Department of Surveying, University of Newcastle Upon Tyne, (1993).
- 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).
- TORGE, W., Geodesy, Second Edition, Walter de Gruyter, Berlin, (1991).
- UZEL,T., EREN, K., GPS Ölçmeleri, Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, Yayın No:301, İstanbul, (1995).
- WAKKER, K.F., AMBROSIUS, B.A.C., AARDOOM. L., Orbit Determination and European Station Positioning from Satellite Laser Ranging, Journal of Geophysical Research, Vol. 90, No.B11, pp.9275-9284, (1985).