

Diane L. EVANS

Çeviren = M. Şener TEOMAN

MTA Genel Müdürlüğü, Uzaktan Algılama Merkezi, 06520 Ankara

Jeolojik olayların yapay açıklıklı Radar (SAR) verileri kullanılarak çalışılması^(*)

İklim olaylarının sayısal modelleri küresel değişimlerin tahminine yardımcı olur. Ancak, iklim değişimlerinin gerçek etkilerini değerlendirmeden önce bu değişimlerin bölgesel göstergelerinin anlaşılması çok önemlidir. Küresel iklim değişimlerinin artan bir oranda ilgi çekmesi aynı şekilde uzaktan algılamayada, yüzeydeki değişimlerin incelenmesi ve haritalama vasıtası olduğu için ilgiyi artırmıştır. Toprak erozyonu, taşınma, depolanma, bozuşma gibi jeolojik olaylar yalnızca işlenebilir toprakların azalmasına yol açmaz, aynı zamanda delta, haliç ve diğer kıyı bölgelerindeki depolanmayı da etkiler. Tektonizma ve volkanizma gibi diğer jeolojik olayların ise insan yaşamı üzerinde çok derin etkileri vardır. Bu ilave jeolojik olaylar yalnızca sismik olaylar gibi yıkıcı olmayıp, volkanların okyanus ve atmosfer kimyasına etkileri ile gaz ve partikül çıkışlarının statosfere etkileri şeklinde küresel iklim değişimlerine yol açarlar. Yapay Açıklıklı Radar (SAR), yeryüzü haritalamasında ve yapısal yorumlamalarında önemli rol oynar, aynı düşük güneş-açılı hava fotoğraflarında kullanıldığı gibi değişik arazi tipleri için bakış geometrisi oluşturulabilir. Bunlara ilave olarak SAR verileri jeolojik çalışmalarda da önemlidir; yeryüzü engebesi, büki örtüsünün varlığı, toprak nemliliği, topoğrafya ve topoğrafik değişimler gibi çok önemli miktarda veri, işlenmiş veri gruplarından elde edilebilir.

Giriş

SAR görüntülerinin parlak olması, piksel seviyesinde radar yansımaları ile ilgili olup, eğim, yeryüzü topografyası, dielektrik sabiti ve yeraltı uyumsuzluğunun bir fonksiyonudur. Bu yüzden elektro magnetik spektrumun bir parçası olan görünür, kırsadalga infrared ve termal infraredde çalışan algılayıcılar tarafından ölçülebilen yeryüzüne ait kesin fiziksel ve hacimsel bilgiler sağlarlar.

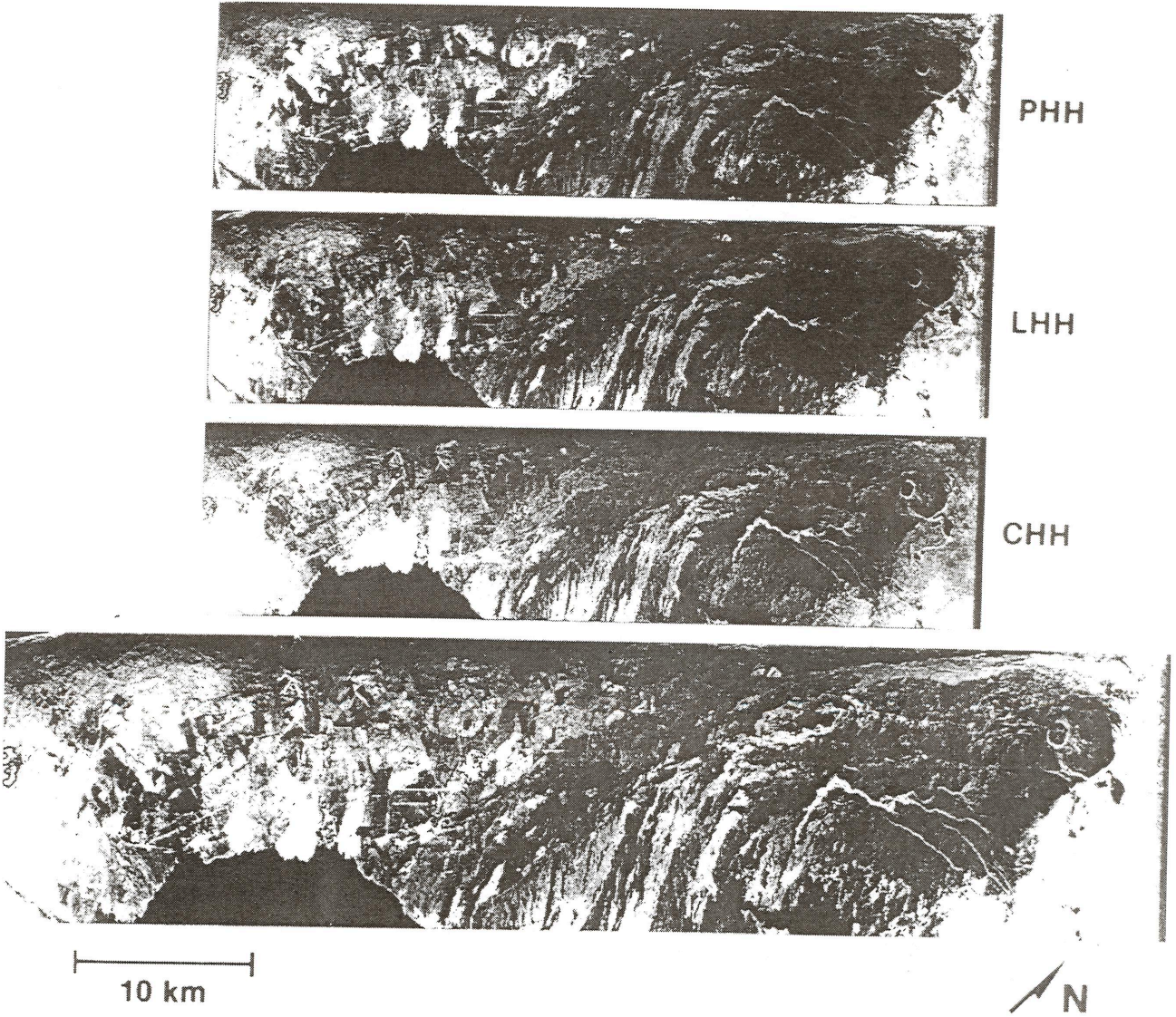
Radar algılayıcılar kendi ışık kaynaklarını kendileri sağlarlar. Bu yüzden her yükseklikte ve tüm mevsimler boyunca hava ve güneş şartlarına bağlı kalmadan güvenilir, çok amaçlı veri sağlayabilirler. Radar dalgaları bulutlardan ve bazı şartlarda da bitki gölgelerinden ve ince alüvyon örtülerden geçebilirler. Bu özelliği sayesinde diğer uzaktan algılama teknikleri ile ulaşılamayan yeryüzeyinin açığa çıkmasını olanaklı kılarlar.

Jeolojik olaylar, kısmen SAR verileri ile çalışılabilecek olaylardır. Bunlar volkanizma, toprak erozyonu, bozulma ve tekrar dağılma, kıyı hareketleri ve su basması, buzul hareketleri, donmuş toprak ve kıtasal hareketlerdir. Bu olayların üzerinde çalışılması, güncel tektonik aktivite ve iklim değişimlerini açıklamayı kolaylaştırdığı gibi, yenilenemez doğal kaynakların araştırılması ve doğal afetlerin zararlarının azaltılması için önemlidir.

1990'larda planlandığı gibi algılayıcılar şimdi uçaklarda. Bu sayede büyük ölçekli haritalama, jeofiziksel çalışmalar ile ilgili yüksek-çözümleyici digital modeller ve test metodları geliştirilmektedir. Bu çalışmalar SAR verileri kullanılarak yer kürenin araştırılması çalışmalarını rutin hale getirecektir. Jet Propulsion Laboratuvarlarında geliştirilen AIRSAR gibi algılayıcılardan elde edilen veriler küçük test alanlarının araştırılmasında kullanılmaktadır (Şekil 1-3). Uydu radar görüntüleri elde edilecek olan SIR-C ve X-SAR'ın uçuşları 1993, 1994 ve 1996'da planlanmaktadır. Bu sayede çalışmalar daha bölgesel olacaktır. Dünya gözlem sistemi (EOS) SAR ise daha ileriki yıllarda planlanmıştır. Bununla global çalışmalar ve izleme kapasitesine sahip olunabilecektir.

Bu sistemlerden elde edilecek veriler diğer verilerle örneğin ESA (Avrupa Uzay Ajansı), ERS 1, ERS 2, JERS 1 ve Kanada Radarsat verileri ile birleştirildiğinde dünya üzerinde çeşitli bölgeler için zaman aralıklı mevsimsel değişimlere ait bilgiler elde edilebilecektir. SAR sistemleri kullanma parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 2'de ise jeolojik çalışmaların da desteği ile elde edilen anahtar jeofizik ürünler verilmiştir.

* "Geologic process studies using Synthetic Aperture Radar (SAR) data" by Diane L. Evans. Episodes (International Geoscience News magazine) March 1992, Vol. 15, No. 1, Pag. 21-31.'den türkçeleştirilmiştir.

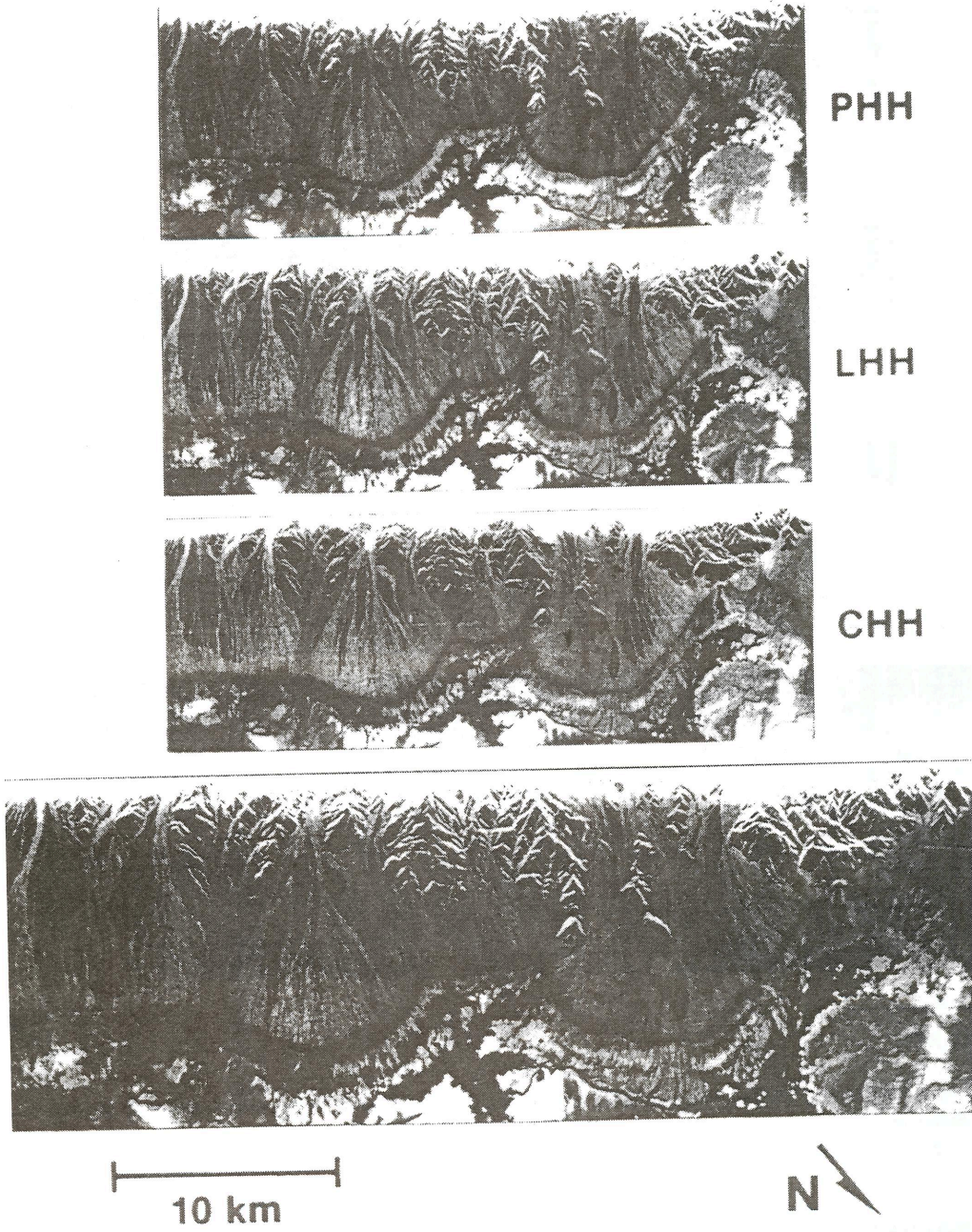


Şekil 1. Kilauea kraterinin (Hawaii, USA) multifrekans AISAR görüntüleri. Çeşitli yaşlarda ve yüzey pürüzlülüklerinde lav akışları görülmektedir. Bu tip görüntüler Dünya gözlem sisteminin (EOS) volkanoloji araştırmalarına büyük destek olacaktır. (Örneğin Bkz. Mougins ve diğerleri 1991) Kısaltmalar için Tablo 1'e bakınız.

Yeryüzü haritalaması

Jeolojik çalışmalarda radar verileri kullanılarak yeryüzeyi haritalaması işleminde büyük gelişmeler sağlanmıştır. Çeşitli sahalarda yapılan değişik çalışmalar SAR görüntülerinin yapıları haritalama işlemindeki önemini ortaya koymuştur. Ayrıca volkanik ve sedimanter sahalarda (Greeley ve Martel, 1988; Campbell ve diğerleri, 1989; Gaddis ve diğerleri, 1989; Sabins, 1983; Wadge ve Dixon, 1984; Lynne ve Taylor, 1986) erozyon, günlenme ve depolama konularında çeşitli araştırmacılar tarafından çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Blom ve Daily, 1982; Evans, 1988; Arvidson ve diğerleri baskıda).

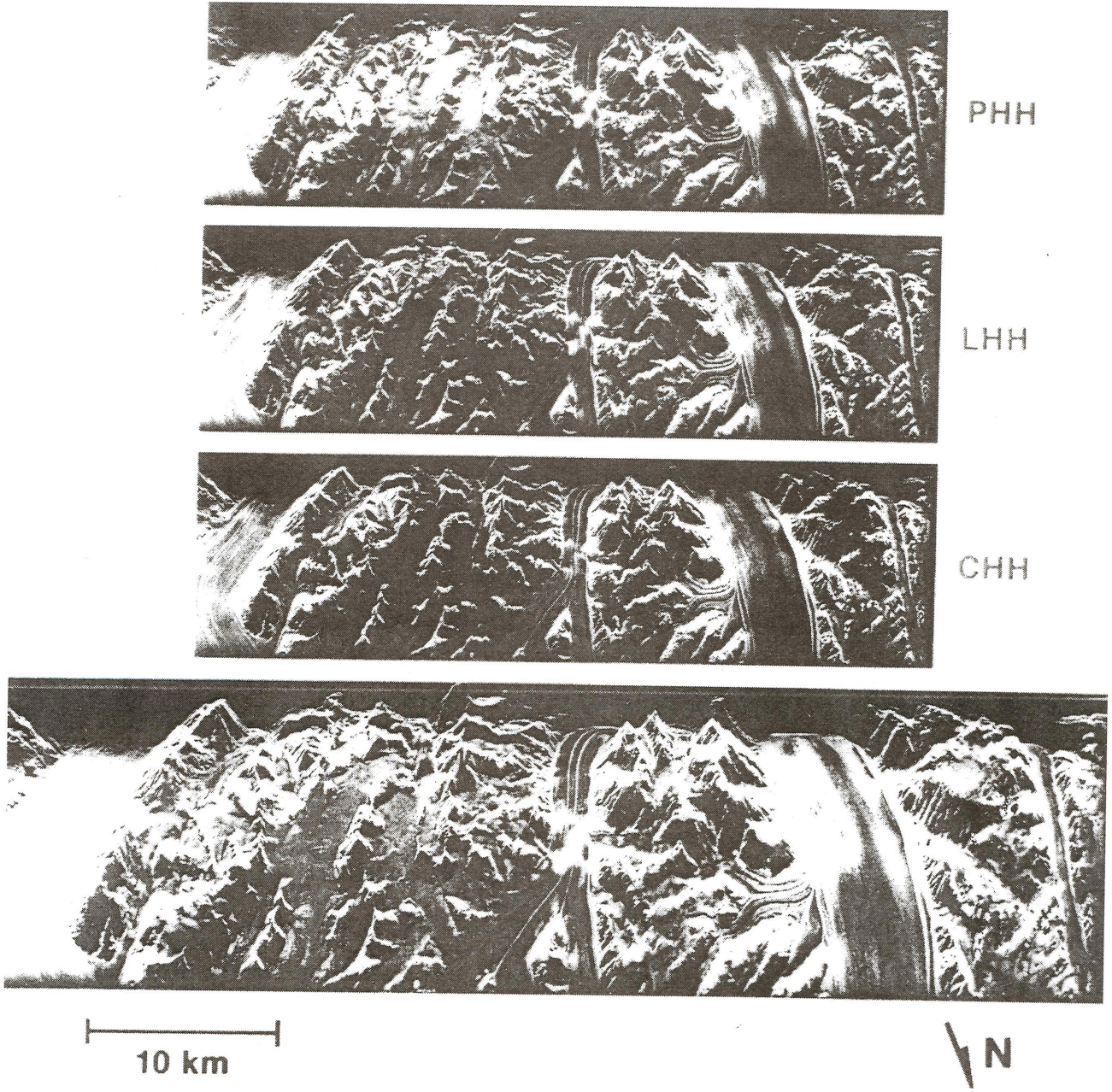
SIR-A ve SIR-B uyduları tarafından Kuzey Afrika'da Büyük Sahra'nın doğusundan alınan görüntüler Spaceborne radarların kapasitesini ortaya koymuştur. Burada ince kum tabakaları altında gömülü jeolojik kayıtlar spektrumun görünür kısmında çalışan algılayıcılar tarafından maskeleymiştir. (McCauley ve diğerleri 1982; McCauley ve diğerleri, 1986; Schaber ve diğerleri, 1986) 1978 yılında SEASAT uydusundan ve 1988 yılında AIRSAR uydusundan elde edilen verilerin tekrar incelenmesi ile Kaliforniya Mojave Çölü'nde de aynı olayların oluştuğu görülmüştür. Bu da yarıkurak bölgelerde radar görüntülerinden yeraltındaki potansiyel tektonik özelliklerin görülebileceğini ortaya koymuştur. (Blom ve diğerleri 1984) (Şekil 4).



Şekil 2. Kaliforniya, USA- Death Valley'deki multifrekans AIRSAR görüntüleri. Çeşitli yaş ve yüzey pürüzlülüklerinde alüvyon yelpazelerini göstermektedir. Bu tip görüntüler jeomorfik yüzeylerin relatif yaş tayinleri, aktüel erozyon hızlarının çalışılması için gerekli olan bilgiler için, geçmişteki iklim değişimleri ve genç fayların yaşlandırılması için kullanılacaktır.

Otomatik yeryüzü haritalama işlemi oluşturacak birçok teknik geliştirilmiştir. Örneğin Blom ve Daily (1982) tarafından tarif edilen ve Stromberg ve Farr (1986) tarafından kullanılan bir teknik ile yapısal değişimlerin haritalanması mümkün olmaktadır. Bu teknik yalnız belirli ölçekteki yapıları temsil eden görüntü ürünlerini içerir. Bu iş önce arazinin çeşitli alan-

sal frekans bantlarına Fourier transform filitrenmesi ile yapılır, sonra bu bantların her birinden görüntü elde edilir. Bu görüntüler daha sonra harita üretmek üzere standart, eğitimsiz (unsupervised) sınıflama için sayısallaştırılır. Burada herbir ünite kendine has yapısal özelliği temsil eder. Bu görüntüler bazende pixellerin yerel değişimler veya diğer istatistiksel küme-



Şekil 3. Greenland güney batısı yakınlarındaki buzulların multifrekans AIRSAR görüntüleri. Yüzey ve yüzeyaltı yapı varyasyonlarını göstermektedir. Bu tip görüntüler buzul kütle dengesindeki değişikliklerin çalışılması amacı ile kullanılacaktır. (Root 1990, Jezek ve diğerleri, 1991).

leri temsil ettiği, sayısal sınıflama içinde değişik ölçülerdeki kutularda da kullanılabilir. Bu teknikler yalnızca yapısal kökenli ünitelerin ayrılabilirdiği işlemler olmayıp, ayrıca herbir ünite için alansal frekans belirtilerinde ortaya koyarlar. Bu belirtiler sayesinde haritadaki üniteler karşılaştırılabilirler veya eğer o bölge için iklim, tektonik tarihçesi ve değişik kaya tiplerinin bu faktörlere göstereceği tepkiler hakkında yeterli bilgiler varsa oradaki kaya tiplerinin tanımı da yapılabilir.

Yüzey pürüzlülüğü

Günlenme ve sedimentasyon olayları zaman içinde yeryüzünün düzleşmesine yol açarlar. Bunun yanı sıra erozyon olayları ise yeryüzünün pürüzlenmesini sağlarlar. Bu olayların ölçekleri çok değişiktir ve jeolojik yapı, kaya tipi, iklimin etkisi ile oluşum hızlarında değişik olur. İklim değişimleri ve tektonik tarihçe çalışmaları ile de çalışma alanına yaş verilebilir. Hatta sayısal yaş verileride mevcut ise zaman içinde ortalama işlem hızıda bulunabilir.

Tablo 1. Şimdiki ve gelecekteki SAR sistemleri örneklerine ait işletme parametreleri.

	AIRSAR	ERS-I	SIR-CX	JERS-I	RADARSAT	EOSSAR
	SAR					
	P,L,C	C	L,C,X	L	C	L,C,X
Spektral örtü ¹	P,L,C	C	L,C,X	L	C	L,C,X
Polarizasyon ²	Quad	VV	Quad (C,L) (VV (X))	HH	HH	Quad (L) Dual (C,X)
Bakış açısı (Derece)	15-60	23	15-60	35	20-50	15-40
Resolüzyon (m)	10	30	25	30	10-100	20-250
Gölge örtüsü (km)	12	100	10-150	80	50,500	30-500
Uydu yükseklik (km)	10	800	215	568	792	620
Uydu eğikliği (derece)/N/A	N/A	98	57	98	98.6	98
Konusu zamanı	N/A	1991	1993	1992	1994	1999
N/A: Uygulanamaz			1994			
1 X. Bantı dalga uzunluğu	~ 3 cm		VV, düşey taşınan, düşey alınan dalga			
C. Bantı dalga uzunluğu	~ 5.6 cm		Quad= Dönen dalganın kaydedilmiş amplitüd ve			
L. Bantı dalga uzunluğu	~ 24 cm		fazı. Bu sayede taşınan ve alınan polarizasyonun			
P. Bantı dalga uzunluğu	~ 68 cm		çeşitli kombinasyonları yer prosesi ile birleştiril-			
2 HH, yatay taşınan,yatay alınan dalga			bilinir.			

Mikrotopografya veya yüzey pürüzlülüğü, günlenme ve depolanma işlemleri ile radar uzaktan algılama verileri arasında bir bağlantıdır. van Zyl ve diğerleri (1991) yaptığı bir çalışma ile radar backscatter modelinin inversiyonu ile multifrekans SAR verileri kullanılarak yüzey mikrotopografyasının çıkarılabileceği gösterilmiştir. Bu çalışmada arazide 10 x 10 m ebatında üç ayrı yerde ölçülen fiziksel özellikler ortalama yükseklik kare kökü 1 ila 0.1 cm'den daha az olan yüzeyleri temsil eder. Yeryüzü ölçümleri, toprak nemliliği, dielektrik sabiti ve mikrotopografik profilleri içermektedir. Profiller çift metrik çerçeve kameraları kullanılarak helikopterden çekilen fotoğraflardan çıkarılır. Daha sonra yüzey uzunluk korelasyonu, ortalama yükseklik kare kökü ve güç spektrumu tahmini yapılmak üzere 10-30 m, 1 cm aralığı kapsayacak şekilde küçültülür. (Wall ve diğerleri 1991). AIRSAR verileri üçyüzlü köşe yansıtıcıları kullanılarak kalibre edilen test alanı üzerinde, üç değişik etki açısından ve üç dalga boyundan elde edilir. Bu daha sonra ekranda her bir çözümleme elemanı için radar geri yayılım (backscatter) değerleri (0°) elde etmek üzere tüm alana yayılır (van Zyl, 1990). Radar backscatter model daha sonra her üç yüzey için yüzey mikrotopografyasının güç spektrasını sonuçlandırmak için kullanılmıştır ve güç tayfı arazi ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. van Zyl ve diğerleri (1991)'nin bulduğu sonuçlara göre tahmin edilen ve ölçülen mikrotopografya birbirine çok yakın çıkmıştır.

Evans ve diğerleri (baskıda) bu çalışmayı Kaliforniya'daki Cima volkanik sahasında ve Nevada'daki Lunar volkanik sahasında uygulayarak geliştirdiler. Bunlar ölçülen ve tahmin edilen değerlerin birbirine yakınlığının yanı sıra yaptıkları bir çalışma ile yüzey pürüzlülüğü değişiminin yaş ile ilgili olduğunu bularak Farr (baskıda) ın çalışmasını kanıtlamışlardır.

Radar geri yayılım modeli mevcut bir alan görüntüsünün incelenmesi için van Zyl (1989) bir eğitimsiz sınıflama tekniği tarif etmiştir. Bu teknikle değişik tip yayılmalar gösteren sı-

Tablo 2. Aşağıdaki EOS SAR verileri gerekli yeryüzü ürünleri örnekleri:

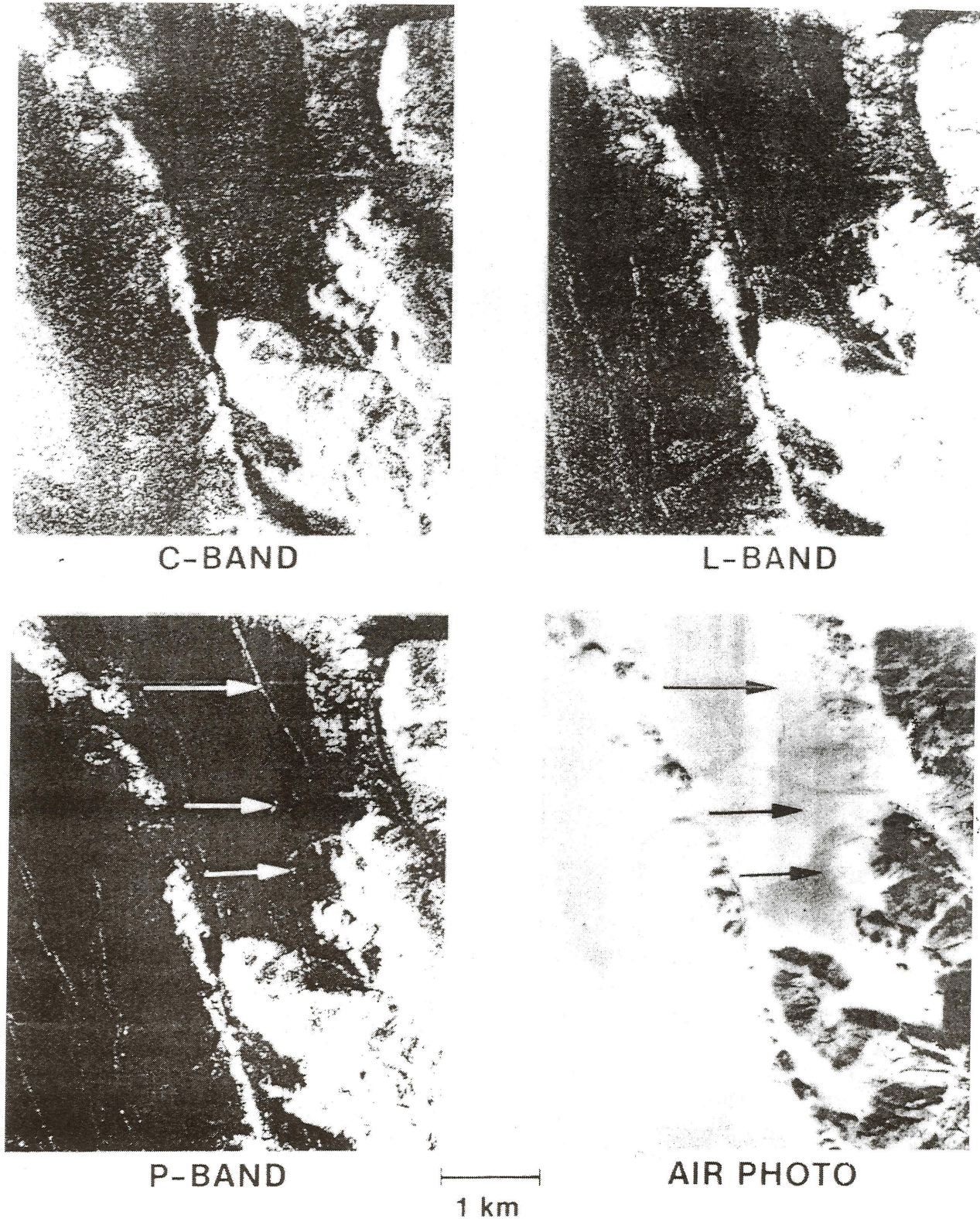
Ürünler	Birimler	Duyarlılık	Yatay Resolüzyon	Temporal Resolüzyon
Jeolojik yapı dağılımı	m	30	30 m	3 ayda bir
Yüzey pürüzlülüğü				
Yüksek resolüzyon	cm	%5-10	30 m	Yılda bir
Yüzey pürüzlülüğü				
Düşük resolüzyon	cm	10	25 km	1-2 haftada bir
Bitki miktarı				
Yüksek resolüzyon	-	%10	30 m	1 mevsim, 1 yıl
Yüzey topografyası				
Yüksek resolüzyon	m	5-10, düşey	30 m	Bir defa
Topografik değişim	cm	10, düşey	30 m	olaydan sonra
Toprak nemliliği	-	10-25	60-100 m	1 Hafta

- : Uygulanamaz.

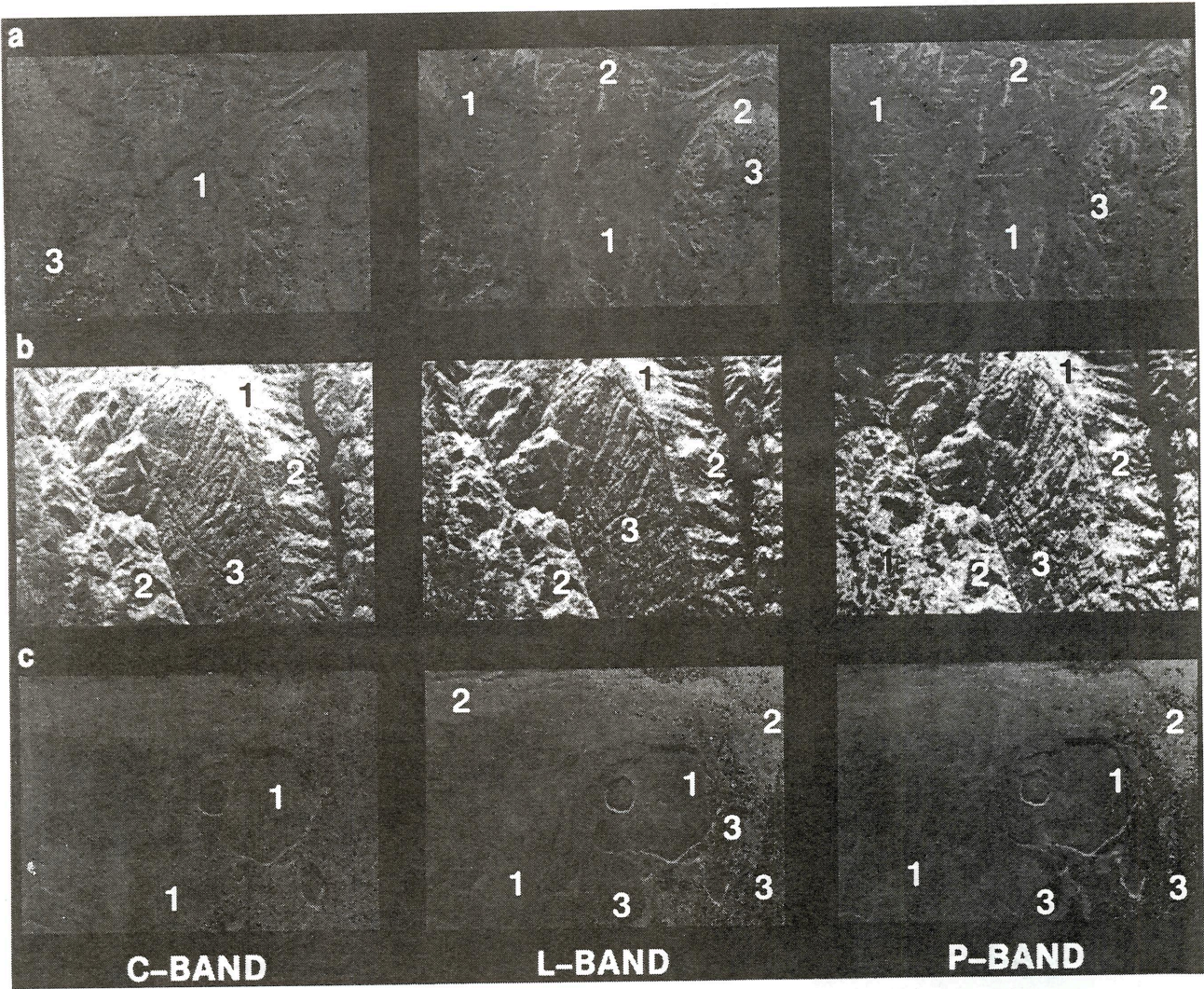
nıflara ayrılabilen görüntüler sağlanır. Algoritma sınıflaması, yayılmaları, taşınan ve kayıt edilen dalgaların polarizasyon karakterleri esas olmak üzere üç tipten biri olarak sınıflar. Bu üç yayılma sınıfları tek yansıma, çift sıçratma ve rastgele dağılmadır. Az çok pürüzlü dielektrik yüzeyden meydana gelen tek yansımadaki ani dalga küçük multiple yayılmalara yol açacaktır. Çift yüzlü yansıma çift sıçrama geometrisi oluşturur. Bunun sonucunda yatay iletilen-yatay alınan (HH) dalgaları ile düşey iletilen-düşey alınan (VV) dalgaları arasında 180° aralığında bir dönüşüm oluşur. Taşınan dalgada, gözlenen tek yansıma olayında ortalama yayılım dalga izlerinin oryantasyon açısı bakımından benzerlik vardır. Hernekadar yayılan dalga rotasyonunun anlamı taşınan dalga polarizasyonu ile aynı olmasına rağmen çift sıçrama düzeneğinde bu olay çok daha uyumludur. van Zyl (1989) ve Evans ve diğerleri (1988) makalelerinde bu özelliği üç tabaka bitki örtüsü model sınıfı olarak genelleştirmişlerdir. Yine Zyl (1985) Richards ve diğerleri (1987) ve Durden ve diğerleri (1989)'de makalelerinde bu konuyu tartışmışlardır. Bu sınıflama Evans ve diğerleri tarafından (1988) Maine, USA eyaletinin düzgün kısımlarının haritalanmasında kullanılmıştır. Burada ormanlar L bantı HH ve VV görüntülerinde görülememektedir. Evans ve van Zyl (1990) yine bu tekniği, yine yanmış bir bölge olan Mt. Shasta, Kaliforniya'da ayırtlamak için kullanmışlardır. Yine Evans ve diğerleri (1988) ve Evans ve Smith (1991) tarafından Wyoming, USA'daki yarı arid bölgelerdeki % 10'dan daha az bitki örtüsüne sahip alanların ayırtlanması için yine bu teknik kullanılmıştır. Şekil 5'te Kilauea-Hawaii krater alanında bu iki örnek ve sınıflama haritası görülmektedir. Bu iki örneğin her birinde radar backscatter modeli pürüzlülük ölçeğinde mevcuttur. Bu ölçek üç frekansta tek yansımali sınıflanmış arazilerde radar dalga boyunun yansıdır.

Toprak nemliliği

Toprak nemliliği hidrolojik depolanma çeşitliliğidir. Aynı zamanda nem akışının bir göstergesidir. Bu yüzden birçok yer bilimlileri araştırmalarında önemli bir parametredir. SAR gö-



Şekil 4. Kaliforniya, USA, Mojave çölündeki Means vadisinin multifrekans AIRSAR görüntülerinin karşılaştırılması. Kısmen L-Bandında görülen ve P-Bandı görüntüsündeki okla işaretli yapılar sığ yeraltı formasyonları ve bir dayaktır.

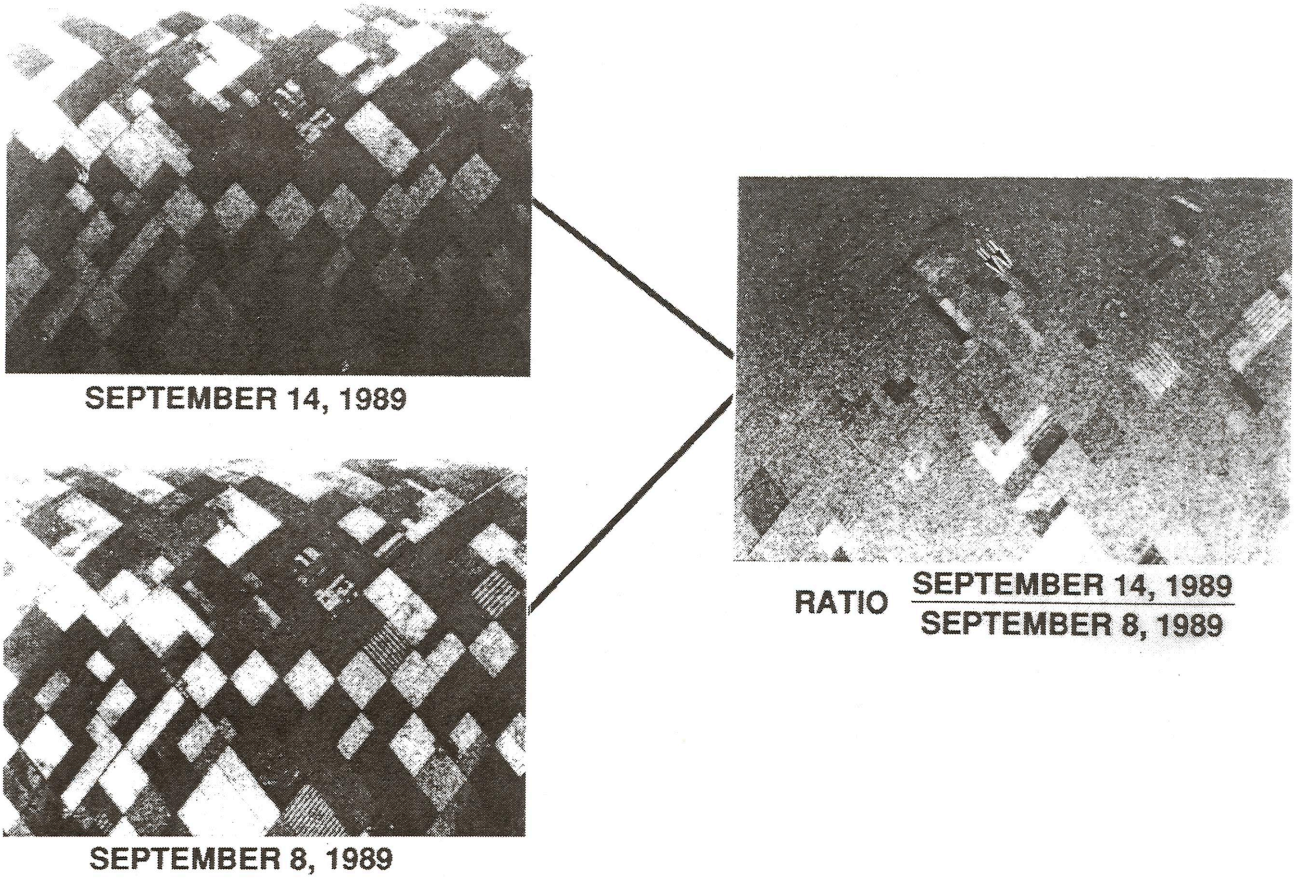


Şekil 5. C, L ve P bandı polarimetrik AIRSAR verilerine göre sınıflama sonuçları: a) Wyoming'deki Wind nehir havzası, b) Kaliforniya, Mt. Shasta c) Hawaii, USA, Kilauea krateri. 1 rakamı ile sınıflanmış pixeller çift sıçrama (Double bounce), 2 rakamı ile sınıflanmış pixeller tek yansıma (Single reflection) ve 3 sınıflanmış pixeller rakamı ile dağınık yayılmadan (Diffuse scattering) oluşmuşlardır. Evans ve diğerleri (1988) ve Evans ve Smith (1991)'e göre Wind nehri örneğinde % 10'dan daha az bitki örtüsüne sahip alanlar tek yansıma olarak sınıflandırılmıştır. Mt. Shasta örneğinde Evans ve van Zyl (1990) çalışmalarına göre yeni yamış alanlardaki gölgelikler ek penetrasyona yol açar. Bu da P-Bandı görüntüsünün alt sol köşesinde çift sıçramanın yükselmesini sağlar. Kilauea örneğinde görüntüsünün sağ kenarında orman gölgeliği o kadar yoğundur ki, bitki örtüsü altındaki tabandan çok az geri dönüş olur.

rüntüleri ılıman bölgelerde suyla dolgun toprakların haritalanması işinde başarı ile uygulanmıştır. (Waite ve diğerleri, 1981). Bu uygulamanın başarılı olması daha ziyade radarın bulutlardan geçebilme özelliğinin ve bitki örtüsü altındaki su tablasının zenginleşmiş geri yayılma yapmasının bir sonucudur. Bu geri yayılma zenginleşmesi Engheta ve Elachi (1982) tarafından modellenmiş olup suyla doymuş yüzeyden çif sıçrama ve dalgaların dallardan veya gövdeden ön yayılması ile oluşur. Tropik bölgelerde L Bandı geri yayılım genişlemesi suyla doy-

gun yüzeylerde bazı yazarlar tarafından çalışılmıştır. Bunlar Imhoff ve diğerleri tarafından Bengaldeş'te 12.5 m yükseklikte mangrovlar, K.O Pope (yazılı görüşme 1987) tarafından Guatemala'da 10-12 m yükseklikte bataklıklar, Ford ve Casey (1988) tarafından Borneo'da 7-10 m yükseklikteki bataklık ormanlarında yapılan çalışmalardır.

Değişim araştırma teknikleri daha çok görüntü alanları kullanılarak az nemli ortamdaki toprak nemliliği değişimlerinin araştırılabilme uygulamalarını ortaya koymak için geliştiri-



Şekil 6. Kaliforniya, USA- Fresno yakınlarındaki çalışma alanında toprak nemliliği için multitemporal görüntülerin oranına ait bir örnek. Gri alanda (Sol ok) CVV görüntüsünde 2 gün arasında nemlilik bakımından bir farklılık görülmektedir. Koyu alanda (Sağ ok) İkinci günde kurudur. (Evans tarafından E. Engman ve J.J. van Zyl'in çalışmasından faydalanmıştır, baskıda).

ılmaktadır. Çok değişken bir örtüye sahip bir alanda toprak nemliliğinin değişmesine bir örnek Evans (Şekil 6, baskıda) tarafından açıklanmıştır.

Multitemporal SAR verileri bir çok çalışmada toprak nemliliği çalışmalarına destek olacak şekilde elde edilmiştir. Bu çalışmalar Engman ve diğerleri (1991) tarafından Pennsylvania Mahantango Creek'de Dubois ve diğerleri (1991) tarafından Arizona, Walnut Gulch'ta 1990 yaz aylarında yapılmıştır. Bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar 1991 yılında Avrupada yapılan SAR toprak nemliliği çalışmaları ile karşılaştırılmıştır. Multitemporal uçak verileri ve karşılaştırmalı arazi ölçümleri Slapton Wood, İngiltere, Orgeval, Fransa, Montespertoli, İtalya ve Castilla La Mancha, İspanya'daki çalışmalar ile pekiştirilmiştir.

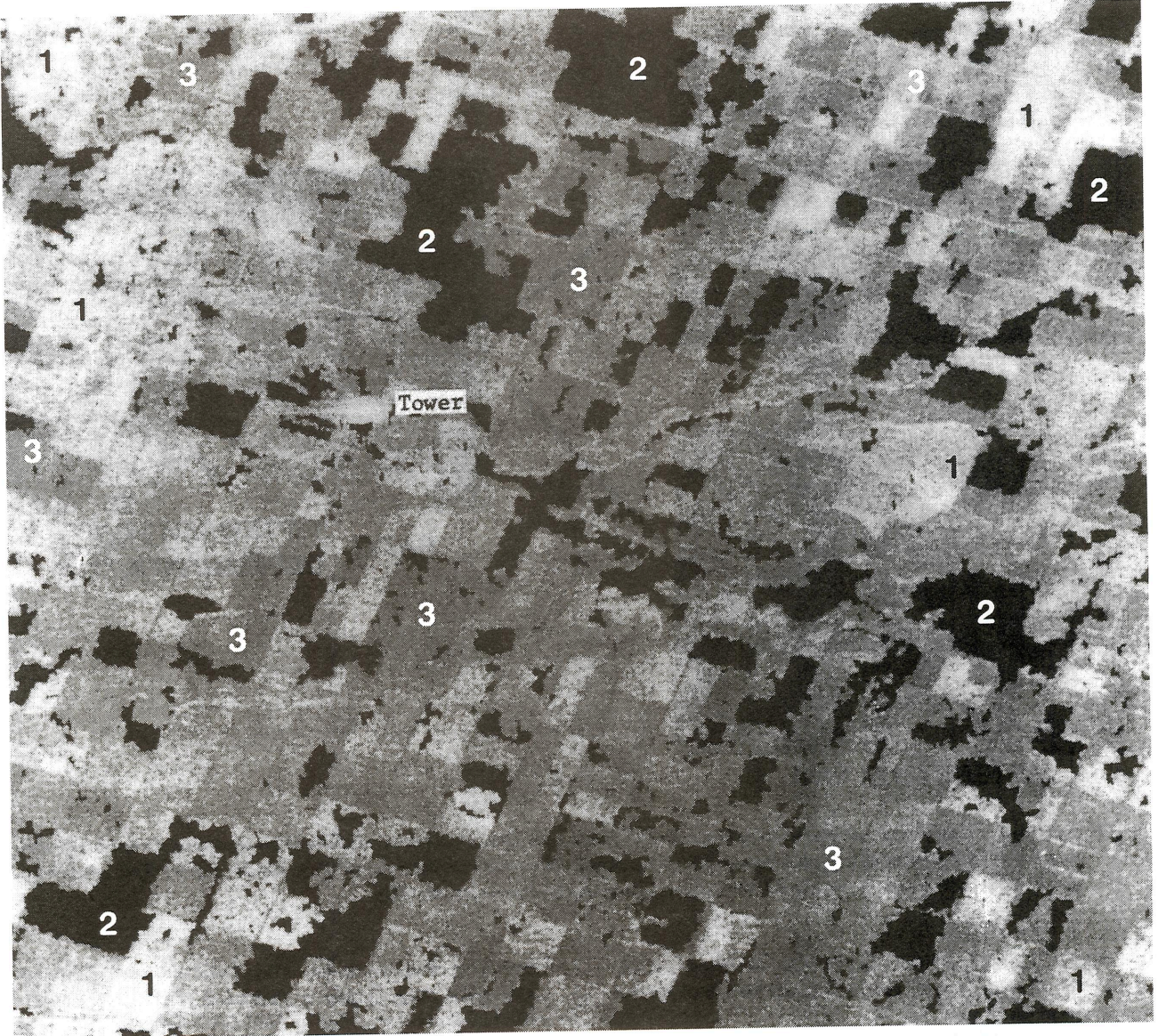
Topoğrafya ve topoğrafik değişim

Yüzey değerlerinin üç boyutlu görüntüsü için ve SAR görüntülerinin bir vasfı olan bozulmanın düzeltilmesi için topoğrafyanın bilinmesi gereklidir. Interferometride kullanılan aktif

mikrodalga teknikleri ile bu verilerin elde edildiği verimli metotlar sağlanabilir. Zebker ve Goldstein (1986) çalışmasında radar interferometri verileri kullanılarak topoğrafik veri tabanları oluşturma verimliliği gösterilmiştir. Öncü çalışmalarda ve uçak modellerinin geliştirilmesinde uzaydan global topoğrafik veri tabanları elde etmek için çeşitli metodların araştırılması amaçlanmaktadır (Cumming ve diğerleri (1990; Goldstein ve diğerleri, 1988).

NASA'nın Jet propulsion laboratuvarlarında (JPL) geliştirilen bir uçak interferometrisi Zebker ve Goldstein (1986)'da tanımlanana benzemektedir. JPL sisteminde iki kompleks veri setinin birleştirilmesi ile oluşan faz farkı görüntüleri kullanılarak topoğrafik veriler oluşturulur. Burada 10 x 10 m pixelde rms hatası genellikle 2-5 m arasında değişir. (Zebker ve diğerleri, baskıda). Bu veriler C bandında tek polarizasyon durumunda ve standart L ve P band polarizasyon verileri ile birlikte sırası ile elde edilir. Dolayısı ile veriler otomatik olarak kayıt edilir.

Problemlerin global ölçekte çözümlenebilmesi için tartışmalar daha çok yerkürenin yüksek çözümümlü digital eleva-



Şekil 7. Görüntü Kaliforniya-USA, Imperial vadiden alınan Seasat SAR verilerinden faydalanılarak topografik değişimleri göstermektedir. 1 rakamı ile sınıflanmış pixeller değişimin olmadığını, 2 rakamı ile sınıflanmış pixeller veri setleri arasında safha uygunluğunun olmadığını, 3 rakamı ile sınıflanmış pixeller ise topografyada sırası ile 2-3 cm değişmeyi gösterir. Bu değişimler sulamaya bağlı olarak toprağın şişmesi şeklinde açıklanmıştır (Gabriel ve diğerleri, 1989).

tion modelinin geliştirilmesi üzerine yoğunlaştırılmaktadır. Bu tüm uzaktan algılayıcılar için topografik veri tabanı olarak hizmet görebilecektir. Spaceborne interferometre için mevcut çözümler şunlardır: EOSSAR'ın devamlı geçişlerini kullanmak, tek yapı (structure) üzerinde ayrı iki anten kullanmak veya özel bir uzay aracı üzerindeki bir halat vasıtası ile. Bir kere yüzey topografyası tanımlandıktan sonra üçüncü interferometrik geçiş kullanılarak eğer varsa SAR geçiş zaman aralığındaki oluşmuş topografik değişiklikler tanımlanır. (Gabriel ve diğerleri, 1989). Burada az bir sistematik yanlışlık mümkündür. To-

pografik değişim duyarlılığı onda bir cm. civarındadır. (Fig. 7). Bu tekniğin yükseklik değişimindeki yüksek duyarlılığı tekniğin yüksek alansal çözünürlüğe (genellikle 10-30 m) ve geniş tarama alanına sahip olması dolayısı ile erozyonun, kum ilerlemesi ve toprak şişmesi, büzülmesi gibi olayların izlenebilmesidir. (Gabriel ve diğerleri, 1989). Bu teknik ayrıca büyük jeofizik olayların kesin ölçümlerinde de kullanılabilir. Bunların arasında plaka hareketleri, fay zonlarındaki çarpıklama ve kabarmalar, sismik olaylarla kalıntı yerdeğiştirmeleri sayılabilir.

SAR interferometrisi ERS-1 de jeolojik çalışmaların bir parçası olarak yoğun bir şekilde test edilecektir. Şu andaki planlar: Püskürme veya lav akışları sonucu yüzey topografyanın değişimini izlemek, magmanın sıg derinliklerde intrüzyonu ile volkan yamaçlarının kabarması, devamlı veya devamsız permafrost bölgelerdeki donma kabarması yer değiştirmeleri ve buzulların topografya, hareket ve dağılımlarıdır.

Geleceğ bir bakış

Gelecekteki rekabet stratejilerin geliştirilmesi ile bölgesel çalışmalar global ölçeğe dönüştürülecektir. (Örneğin jeofizik ürünlerin onaylanması, radar geri yayılım modelleri ölçeği ile atmosferik genel dolaşım modellerinin ölçeğinin uzlaştırılması) ve ilave algılayıcı kapasiteleri oluşturacak yeni teknolojilerin geliştirilmesi (Örneğin 35 ve 90 GHz sistemler ve daha hafif elektronik malzemeler). Bu avantajlarının yanında aktif mikrowave uzaktan algılamanın yeni uygulamaları ortaya çıkacaktır (örneğin yağış haritaları ve yeraltı haritaları), bu durum veri analiz ve işlemlerinde yeni tekniklerin gelişmesine yol açacaktır.

Bunlara ek olarak SAR verilerinden elde edilen jeofiziksel bilgiler ve diğer veri setlerinin sentezi için yeni stratejiler oluşturulacaktır. Örneğin çoklu algılayıcı sınıflamalar ki bunlar uygun band geçişli optik veya infrared algılayıcı sistemler ile radar görüntüleri ihtiva edeceklerdir. (Blom ve Daily, 1982; Rebillard ve Evans, 1983; Evans, 1988). Bunların yalnız görünür ve infrared veriler üzerine geliştirilmiş sınıflamaların duyarlılığı rapor edilmiştir. Ancak şimdilik SAR algılayıcılarında mevcut tüm çeşitliliklerden çalışmalarda faydanılmamaktadır (Örneğin Evans ve diğerleri 1990). Araştırılan diğer bir yaklaşımda algılayıcı sistemlerden jeofizik verileri bağımsız olarak elde etmek ve daha sonra bunları elde edilen jeofizik ürünler ile birleştirerek tanımlamaktır (Srinivasan ve Richards 1990, Evans, baskıda).

Sonuç olarak önümüzdeki yıllarda çok fazla artan SAR verilerini kullanabilmek için yeni veri elde etmek ve analiz aletlerinin geliştirilmesi gerekecektir. Magellan ekibi ile Venüs yolculuğu ile SAR kullanılarak ilk defa gezegen ölçeğinde veri tabanı sağlanmıştır. Gelecekte Dünya-uydu misyonu ile aynı miktarda doğru veri rutin olarak elde edilebilecektir ve bu sayede değişimler gözlenebilecek ve tahminler yapılabilecektir.

Katkı Belirtme

Bu çalışma, Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü, Jet Propulsion Laboratuvarında gerçekleştirildi ve NASA tarafından desteklendi.

Değinilen Belgeler

Arvidson, R.E., Evans, D.L., Farr, T.G., and others, in press, Characterization of lava flow degradation in the Pisgah and Cima volcanic fields, California, using remote sensing data: Geological Society of America Bulletin.

- Blom, R.G., Crippen, R.J., and Elachi, Charles, 1984, Detection of subsurface features in Seasat radar images of Means Valley, Mojave Desert, California: *Geology*, v. 12, no. 6, p. 346-349.
- Blom, R.G., and Daily, Michael, 1982, Radar image processing for rock-type discrimination: *IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. GE-20, no. 3, p. 343-351.
- Campbell, B.A., Zisk, S.H., and Mougini-Mark, P.J., 1989, A quad-pole radar scattering model for use in remote sensing of lava flow morphology: *Remote Sensing of Environment*, v. 30, p. 227-237.
- Cumming, Ian, Hawkins, David, and Gray, Laurence, 1990, All-weather mapping with interferometric radar: *International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 23 rd, Bangkok, 1990.
- Dubois, P., Kustas, B., Sorooshian, S., Guerra, A., and van Zyl, J.J., 1991, Mosnoon '90 SAR results: *JPL Airborne Geoscience Workshop*, 2 nd, Pasadena, California, USA, 1991.
- Durden, S.L., van Zyl, J.J., and Zebker, H.A., 1989, Modelling and observation of the radar polarization signature of forested areas: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 27, no. 3, p. 290-301.
- Engheta, N., and Elachi, C., 1982, Radar scattering from a diffuse vegetation layer over a smooth surface: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. GE-20, p. 212-216.
- Engman, E., Saatchi, S., and van Zyl, J.J., 1991, MACHYDRO '90 results: *JPL Airborne Geoscience Workshop*, 2nd, Pasadena, California, USA, 1991.
- Evans, D.L., 1988, Multisensor classification of sedimentary rocks: *Remote Sensing of Environment*, v. 25, no. 2, p. 129-144. in press, Current status and future developments in radar remote sensing: *ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.
- Evans, D.L., Farr, T.G., Ford, J.P., Thompson, T.W., and Werner, C.L., 1986, Multipolarization radar images for geologic mapping and vegetation discrimination: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. GE-24, no. 2, p. 246-257.
- Evans, D.L., Farr, T.G., and van Zyl, J.J., in press, Estimates of surface roughness derived from Synthetic Aperture Radar data: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
- Evans, D.L., Farr, T.G., van Zyl, J.J., and Zebker, H.A., 1988, Radar polarimetry: Analysis tools and applications: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 26, no. 6, p. 774-789.
- Evans, D.L., and Smith, M.O., 1991, Separation of vegetation and rock signatures in Thematic Mapper and polarimetric SAR images: *Remote Sensing of Environment*, v. 37, p. 63-75.
- Evans, D.L., and van Zyl, J.J., 1990, Polarimetric imaging radar: Analysis tools and applications, in Kong, J.A., ed., *Radar polarimetry*, v. 3 of *Progress in electromagnetic research*: New York, Elsevier Science Publishers, p. 371-389.
- Evans, D.L., van Zyl, J.J., and Burnette, C.F., 1990, Incorporation of polarimetric radar images into multisensor data sets: *IEEE*

- Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 28, no. 5, p. 932-939.
- Farr, T.G., in press, Microtopographic evolution of lava flows at Cima volcanic field, Mojave Desert, California: *Journal of Geophysical Research*.
- Ford, J.P., and Casey, D.J., 1988, Shuttle radar mapping with diverse incidence angles in the rainforests of Berneo: *International Journal of Remote Sensing*, v. 9, p. 927-943.
- Gabriel, A.K., Goldstein, R.M., and Zebker, H.A., 1989, Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry: *Journal of Geophysical Research*, v. 94, no. B7, p. 9183-9191.
- Gaddis, L., Mouginiis-Mark, P.J., Singer, R.B., and Kaupp, V., 1989, Geologic analysis of Shuttle Imaging Radar (SIR-B) data of Kilauea Volcano, Hawaii: *Geological Society of America Bulletin*, v. 101, no. 3, p. 317-332.
- Goldstein, R.M., Zebker, H.A., and Werner, C.L., 1988, Stellite radar interferometry: Two dimensional phasa unwrapping: *Radio Science*, v. 23, no. 4, p. 7133-720.
- Greeley, R., and Martel, L., 1988, Radar observations of basaltic lava flows: *International Journal of Remote Sensing*, v. 9, no. 6, p. 1071-1085.
- Imhoff, M., Story, M., Vermillion, C., Khan, F., and Polcyn, F., 1986, Forest canopy characterization and vegetation penetration assessment with spaceborne radar: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. GE-24, p. 535-542.
- Imhoff, M.L., Vermillion, C., Story, M., Choudhury, A.M., Gafoor, A., and Polcyn, F., 1987, Monsoon flood boundary delineation and damage assessment with spaceborne radar: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. GE-25, p. 405-413.
- Jezeck, K., Crawford, J.P., Bindschadler, R., DRinkwater, M.R., and Kwok, R., 1991, Synthetic aperture radar observations of the Greenland ice sheets, in *Airborne Synthetic Aerture Radar (AURSAR) Workshop*, 2 nd, Pasadena, California, USA, Proceedings: JPL Publication 90-56, 57 p.
- Krohn, M.D., Milton, N.M., and Segal, D.B., 1983, SEASAT synthetic aperture radar (SAR) response to lowland vegetation types in eastern Maryland and Virginia: *Journal of Geophysical Research*, v. 88, no. C3, p. 1937-1952.
- Lynne, G.J., and Taylor, G.R., 1986, Geological assessment of SIR-B imagery of the Amadeus Basin, N.T., Australia: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. GE-24, no. 41, p. 575-581.
- McCauley, J.F., Breed, C.S., Schaber, G.G., McHugh, W.P., Issawi, B., Haynes, C.V., Grolier, M.J., and El Kilani, A., 1986, Paleodrainages of the eastern Sahara-The radar rivers revisited (SIR-A/B implications of a mid-Tertiary trans-African drainage system): *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. GE-24, no. 4, p. 624-648.
- McCauley, J.F., Schaber, G.G., Breed, C.S., Grolier, M.J., Haynes, C.V., Issawi, B., Elachi, C., and Blom, R., 1982, Subsurface valleys and geogrchaeology of the eastern Sahara revealed by Shuttle Radar: *Science*, v. 218, no. 4576, p. 1004-1020.
- Mouginiis-Mark, P.J., Rowland, S., Francis, P., and others, 1991, Analysis of active volcanoes from the Earth Observing System: *Remote Sensing of Environment*, v. 36, p. 1-12.
- Ormb, J.P., Blanchard, B.J., and Blanchard, A.J., 1985, Detection of lowland flooding using active microwave systems: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 51, no. 3 p. 317-328.
- Rebillard, P., and Evans, D.L., 1983, Analysis of coregistered Landsat, Seasat and SIR-A images of varied terrain types: *Geophysical Research Letters*, v. 10, no. 4, p. 277-280.
- Richards, J.A., Sun, G., and Simonett, D., 1987, L-band radar backscatter modeling of forest stands: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. GE-25, p. 487-498.
- Rott, H., 1990, Snow and land ice in the climate sysetm: Research problems and possibilities of remote sensing: *Remote Sensing and the Earth's Environment*, EAS (Euporean Space Agency) SP-301, p. 61-75.
- Sabins, F., 1983, Geologic interpretation of space shuttle radar images of Indonesie: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 67, p. 2076-2099.
- Schaber, G.G., McCauley, J.P., Breed, C.S., and Olhoeft, R.R., 1986, Physical controls on signal penetration and subsurface scattering in the Eastern Sahara: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. GE-24, no. 4, p. 603-623.
- Srinivasan, A., and Richards, J.A., 1990, Knowledge-based techniques for multi-source classification: *International Journal of Remote Sensing*, v. 11, no. 3, p. 505-525.
- Stromberg, W.D., and Farr, T.G., 1986, A Fourier-based textural future extraction procedure: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. GE-24, no. 5, p. 722-731.
- van Zyl, J.J., 1985, On the importance of polarization in radar scattering problems: Pasadena, California, USA, Ph.D. thesis, California Institute of Technology Antenna Lab Report no. 120, p. 32-33.
-1989, Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 27, no. 1, p. 36-45.
-1990, Calibration of polarimetric radar images using only image parameters and trihedral corner reflector responses: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 28, no. 3, p. 337-348.
- van Zyl, J.J., Burnette, C.F., and Farr, T.G., 1991, Inference of surface power spectra from inversion of multifrequency polarimetric radar data: *Geophysical Research Letters*, v. 18, no. 9, p. 1787-1790.
- Wadge, G., and Dixon, T.H., 1984, A geological interpretation of Seasat SAR imagery of Jamaica: *Journal of Geology*, v. 92, p. 561-581.
- Waite, W.P., MacDonald, H.C., Kaupp, V.H., and Demarke, J.S., 1981, Wetland mapping with imaging radar: *IGARSS (International Geoscience and Remote Sensing Symposium) Digest 2*, p. 794-799.
- Walls, S.D., Farr, T.G., Mulletr, J.P., Lewis, P., and Leberly, F.W., 1991, Measurement of surface microtopograh: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 57, no. 8, p. 1075-1078.
- Zebker, H.A., and Goldstein, R.M., 1986, Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations: *Journal of Geophysical Research*, v. 91, no. B5, p. 49993-49999.
- Zebker, H.A., Madsen, S.N., Martin, J., Wheeler, K.B., Miller, T., Lou, Y., Albersi, G., Vetrella, S., and Cucci, A., in press, The TOPSAR interferometric radar topographic mapping instrument: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.