

YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ FİLM TARAYICILAR – FOTOGRAMETRİ VE UZAKTAN ALGILAMA UYGULAMALARI AÇISINDAN İRDELENMELERİ

(HIGH RESOLUTION FILM SCANNERS – THEIR EVALUATION IN A VIEW OF PHOTOGRAMMETRIC AND REMOTE SENSING APPLICATIONS)

**Gürcan BÜYÜKSALİH
Erdoğan AKDENİZ**

ÖZET

Tarayıcılar, sayısal fotogrametrik sistemlerin en önemli elemanlarından biridir. Geçen 10 yıl içerisinde doğrudan sayısal veri elde etmede meydana gelen gelişmeler çok yoğun olmasına rağmen, film-tabanlı sistemlerin fotogrametrinin bütün alanlarında kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca, haritacılık uygulamalarında, özellikle bilgi sistemi-tabanlı çalışmalarda ana veri kaynaklarından biri olan hava fotoğraflarının doğrudan sayısal formda alınması, henüz yeni gelişen bir teknolojidir. Bunun yanı sıra, Rus uyduları temel olarak film-tabanlı görüntüler üretirken, daha önceleri askeri uygulamalarla uğraşan Amerikan firmaları da film-tabanlı ve yüksek çözünürlüklü sistemleri yörüngeye yerleştirmek istemektedirler. Bu nedenle, mevcut bulunan ve büyük bir arşivi teşkil eden hava ve uydu fotoğraflarının sayısallaştırılması, günümüz itibarıyla, tarayıcıların ana kullanım alanını oluşturmaktadır. Fotoğraf verilerine ihtiyaç duyan bazı önemli uygulamalar; (i) sayısal ortofoto üretimi, (ii) otomatik Sayısal Arazi Modeli (SAM) oluşturma, (iii) sayısal veri tabanını güncelleştirme ve (iv) SAM, ortofoto ve diğer sayısal ürünlerin Coğrafi Bilgi Sistemlerine (CBS) entegrasyonu sayılabilir.

Bu çalışmada, sayısal fotogrametrik çalışma istasyonlarının önemli parçalarından birini oluşturan fotogrametrik tarayıcıların çalışma prensipleri ve bunlarla elde edilen verinin kalitesini etkileyen geometrik ve radyometrik performans karakteristikleri incelenmiştir. İki örnek Zeiss SCAI tarayıcısının farklı çözünürlük ve duyarlılıkta Wild A7 grid levhası ile yapılan geometrik testlerinin ayrıntılı sonuçları ortaya koyulmuş ve doğruluğu etkileyen parametrelerin kaynakları tartışılmıştır.

ABSTRACT

Scanners are an essential part of the digital photogrammetric systems. Although the development in direct digital acquisition have been enormous in the last decade, it can be seen that film-based systems are used in all fields of photogrammetry. However, direct digital acquisition of aerial photographs which are one of the main data source in mapping applications, especially in the information-based studies is a new developing technology yet. Besides this, while Russian satellites mainly provide film-based images, USA companies which previously active in military applications want to launch film-based high-resolution commercial systems. Therefore, the digitisation of aerial and satellite photographs which are available and form an extensive archive is the main use of scanners at present. Some of the important applications that need for digital data are (i) the dijital ortho-image generation, (ii) the automatic Digital Terrain Models (DTMs) generation, (iii) update of digital feature databases and (iv) the integration of

digital data, particularly DTMs, ortho-images and derived products, in Geographic Information Systems (GIS).

In this study, basic working principles and geometric and radiometric characteristics of photogrammetric scanners which provide input data to the digital photogrammetric workstations were described. The results from the geometric tests of two examples of Zeiss SCAI scanners in different resolutions have been presented and the sources of the parameters that affect the accuracy have been discussed in detail.

1. GİRİŞ

Hava ve uydu fotoğraflarından oluşan fotogrametrik materyallerin sayısal forma dönüştürülmesi aşamasında dikkate alınması gereken özellikler şöyle sıralanabilir:

1. Format : Fotogrametrik sayısallaştırıcının tarama alanı en az 23x23cm boyutlarındaki bir hava fotoğrafını kapsayabilecek büyüklükte olmalıdır. Böylece, analog formdaki Rus uydu fotoğraflarının (KFA serilerinde 30x30cm, TK-350 uydusunda 30x45cm boyutlarında) yüksek çözünürlüklü ve distorsiyonu az merkezi bölümleri bunlarla taranabilir.
2. Geometri : Analitik değerlendirme aletlerinde hava fotoğraflarıyla fotogrametrik nirengi işleminde $\pm 2\mu\text{m}$ düzeyinde prezisyona ulaşılabilir. Sonuç olarak, bu tür bir prezisyon düzeyi fotoğrafik tarayıcılarla da sağlanmalıdır.
3. Görüntü Çözünürlüğü (Image Resolution) : Bu parametre, kullanılan filmin kalitesi ve hava kamerası tarafından belirlenmektedir. Daha ileriki bölümlerde ispatlanacağı üzere, siyah-beyaz görüntüler için $10 \times 10\mu\text{m}$ piksel boyutu yeterli iken, bu değer renkli fotoğraflarda 15-20 μm 'ye çıkmaktadır.
4. Görüntü Gürültüsü (Image Noise): Fotoğrafik filmin gürültüsü, onun grenliliği ile tanımlanır. Eğer üretici firmalar tarafından verilen değerler göz önüne alınırsa, sensör gürültüsü $10 \times 10\mu\text{m}$ piksel boyutu için $\pm 0.03-0.05D^1$ 'yi aşmamalıdır ve $\pm 0.02-0.03D$ görüntü gürültüsüne Kodak Panatomic-X filmi ile ulaşılabilir. Bu durum, tarayıcıların modülasyon taşıma fonksiyonlarının, piksel boyutuna karşılık gelen bir çözünürlüğe izin vermesi gerektiğini ortaya koymaktadır.
5. Optik Yoğunluk (Kararma) Sahası: Bu değer, hava fotoğraflarının kontrastına karşılık gelmelidir. Kontrast düzeyi, siyah-beyaz fotoğraflarda 0.1'den 2.0D'ye renkli fotoğraflar içinde 0.1'den 3.5D'ye uzanabilir.
6. Renk Tarama Yeteneği : Üzerlerinden yüksek bilgi ve detay çıkarma kapasitelerinin verdiği yoğun kullanım nedeniyle, renkli fotoğrafları sayısallaştırma yeteneğinin gerekliliği belirgin hale gelmiştir.
7. Veri Sıkıştırma (Image Compression): Hava ve uydu fotoğraflarının taranması sonucu oluşacak sayısal verinin bilgisayar üzerinde görüntü işleme yazılımları ile manipülasyonu için gereken bellek kapasitesinin boyutu, günümüz veri sıkıştırma yöntemleri ile etkin şekilde azaltılabilir.

¹ D : Density (Optik Yoğunluk) için kullanılan uluslararası kısaltmadır.

Bilgi sistemlerine doğru artan eğilim ve dönüştürülmesi gereken çok sayıda analog döküman olduğu gözönüne alınırsa, tarayıcıların önemi daha iyi anlaşılacaktır. DTP² tarayıcıları, ofis dökümanlarını sayısallaştırma için uygun olmakla birlikte, yukarıda verilen özellikler ve bunların yeteneklerini aşmaktadır. Bu nedenle, harita yapım sektörünün niteliğine ve ihtiyacına göre özel tarayıcılar geliştirilip düzenlenmiştir. Yüksek çözünürlüklü fotogrametrik tarayıcılar olarak adlandırılan bu sistemler, DTP tarayıcılara göre çok daha pahalıdır.

Yüksek kaliteli elektronik kameraların geliştirilmesindeki hızlı ilerleme ve onların fotogrametride artan kullanımları göz önüne alındığında, ne zaman bütün görüntülerin elektronik olarak elde edileceği ve böylece analog formdaki filmlerin sayısallaştırılması işleminin ortadan kalkacağı, en fazla merak edilen konular arasındadır. Bir mühendislik başarısı olan modern hava görüntüleme sistemleri; görüntü yürütmesi düzeltilmeli ve distorsiyonsuz kameralar, yüksek geometrik ve radyometrik çözünürlüklü filmler içermekte ve bu özelliklere, sayısal veri elde etme sistemleri ile yakın gelecekte ulaşılması mümkün görünmemektedir. Bunun sebebi, sayısal kameraların düşük çözünürlüğe, dar optik yoğunluk sahasına ve küçük format boyutlarına sahip olmalarıdır. Bu bağlamda, bir CCD³ kamerasının bir hava fotoğrafının verdiği bilgiyi içermesi için yaklaşık olarak 20000x20000 piksel, aynı şekilde yersel kameranın 6000x6000 piksel çözünürlük üretmesi gerekir. Günümüzde, spektrumun görünür bölgesinde işletilen CCD kameralar, 5120x5120 piksel boyutlarına ulaşan dedektör matrisi kullanmakta ve piksel genişliği 10µm'nin altında olacak şekilde tasarlanabilmektedir. İki boyutlu sensör matrislerinin üretimindeki teknoloji ve fabrikasyon geliştikçe fotogrametrik uygulamalarda hava kameralarına rakip olabilecek büyük dizilerin yapımı gerçekleştirilecek, dolaysız ancak yüksek çözünürlüklü ve geometrik doğruluklu sayısal veri elde etme olanağı doğacaktır.

Bu çalışmada öncelikle değişik firmalar tarafından üretilen tarayıcılar arasında genel bir sınıflandırma yapılacak ve onların fotogrametrik kapasiteleri, sağladıkları geometrik ve radyometrik yeterlilikleri açısından tartışılacaktır. Daha sonra, yüksek çözünürlüklü masa-tipli (flatbed) fotogrametrik tarayıcıların ana elemanları, çalışma prensipleri ve potansiyel hata kaynaklarına değinilecektir. Bu detaylı tanıtım bölümünün ardından tarayıcıların performanslarının testi ve kalibrasyon işlemleri üzerinde durulacaktır. Bu aşamada, kullanılan test materyalleri ve yöntemleri ayrı ayrı açıklanacaktır. Çalışma, iki örnek Zeiss SCAI tarayıcısı üzerinde yapılan deneysel uygulamalardan elde edilen sonuçların ayrıntılı analizi ile tamamlanacaktır.

2. TARAYICILARA GENEL BİR BAKIŞ

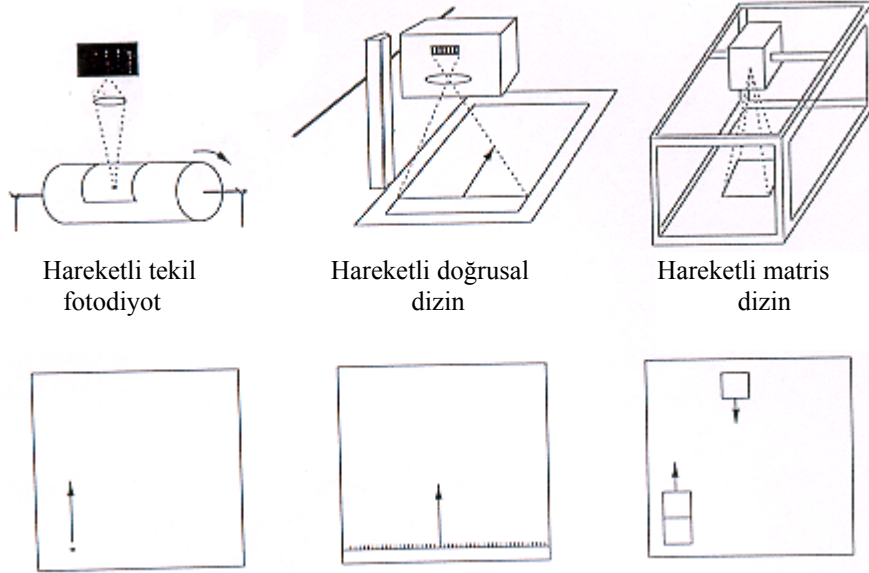
Tarayıcılar film materyallerini sayısallaştırmak amacıyla, aşağıda verilen dört ana teknolojinin birinden yararlanırlar (Şekil-1):

- (1) Tarayıcı kafa ile donanımlı dönele silindirik tarayıcılar,
- (2) Fotoğrafları raster yapıda tarayan ve bu şekilde onu birbirine paralel tarama genişliklerine bölen, CCD doğrusal dizileri (CCD linear array) ile donatılmış iki-boyutlu masa-tipli (flatbed) tarayıcılar,

² DTP : DeskTop Publishing Scanners (Masa-üstü Basım Tarayıcıları)

³ CCD : Charge Coupled Devices (Yük Bağlamalı Düzen)

- (3) Fotoğrafın bütünü tek tarama sonucu sayısallaştıran ve tek-boyutlu doğrusal CCD dizisi kullanan tarayıcılar,
- (4) CCD matris diziler kullanarak fotoğrafik materyali parça parça tarayan ve daha sonra bu parçaları birleştirmek suretiyle tek ve bütün bir sayısal görüntü üreten tarayıcılar.



Şekil-1 : Tarayıcılarda Kullanılan Değişik Sayısallaştırma Konfigürasyonları

Silindirik tarayıcılara örnek olarak, grafik sanat dünyasında yoğun şekilde kullanılan Optronics, Hell ve Crossfield film sayısallaştırıcıları verilebilir. Fotoğrafik materyali, iki-boyutlu paralel tarama genişlikleri halinde sayısallaştıran masa-tipli tarayıcılara ise, fotogrametrik uygulamalarda oldukça yaygın kullanım bulan Zeiss/Intergraph serisi tarayıcıları ve Wehrli firmasının RasterMaster isimli donanımı örnek gösterilebilir. Görüntüyü tekil tarayan ve doğrusal CCD dizileri kullanarak sayısal forma dönüştüren üçüncü tür sayısallaştırma şekli sadece ISM XL-10 tarayıcısında kullanılırken, matris diziler veya CCD kameradan yararlanan dördüncü tasarım türü ise Leica/Helava DSW serisi ile birlikte Vexcel, Rollei ve Topcon firmalarının tarayıcılarında mevcuttur.

Eğer fotoğrafik görüntünün geometrisinin bozulmasından kaçınılacaksa, tarayıcıların yüksek doğruluk üretmeleri gerekmektedir. Bu nedenle tarayıcılar, her iki eksen (x ve y) üzerinde $\pm 1-2\mu\text{m}$ düzeyinde prezisyon ve $\pm 3-5\mu\text{m}$ 'lik geometrik doğruluk vermelidirler /3/, /6/, /7/ ve /11/. Ayrıca $7-10\mu\text{m}$ (2500dpi) düzeyinde minimum piksel boyutu, gereken diğer bir niteliktir. Benzer seviyedeki doğruluk ihtiyacı, monokomparatör ve analitik değerlendirme aletleri için de geçerlidir. Bu çeşit yüksek düzeyli spesifikasyon sayesinde çoğu tarayıcılarda çalıştırılan tarama genişlikleri (tek-boyutlu doğrusal dizilerde) ve alt-görüntü parçaları (iki-boyutlu matris dizilerde) arasındaki uyumsuzluklar (boşluklar veya bindirmeler) önlenmektedir. Genellikle yüksek çözünürlüklü fotogrametrik tarayıcılarda siyah-beyaz (monokromatik) bir hava fotoğrafı, $10-15\mu\text{m}$ piksel boyutunda, 5-20 dakika arasında bir zaman süresinde taranmaktadır. Bunun yanında,

spesifik yazılıma ve donanımına sahip güçlü PC veya grafik iş istasyonu gerekli kontrol ve bellek fonksiyonlarını sağlamada kullanılmaktadır.

Radyometrik açıdan, sayısal görüntü verisi normal olarak 256 gri düzeyi oluşturan 8-bit formunda üretilir. Bazı son üretim tarayıcılar, 10-bit (1024 gri değeri) düzeyinde iç sayısallaştırma sağlamalarına rağmen çıktı verisini kullanıcıya 8-bit formunda bırakırlar. Renkli fotoğraflar, 24-bit (3x8-bit) formunda üretilirler ve bunun için ya kırmızı-yeşil-mavi renk çarkı (Wehrli RasterMaster ve Vexcel VX 4000HT tarayıcılarında olduğu gibi) ya da her renk için üç ayrı CCD doğrusal dizisi (Zeiss SCAI tarayıcısında olduğu gibi) işleten düzenlemelerden yararlanılır.

Analog fotoğrafik çıktıları, sayısal forma dönüştürecek yetenekte sayısız düşük-fiyatlı tarayıcılar mevcuttur. Bunlar, çoğunlukla masa-üstü basım endüstrisi için geliştirilmiştir ve tarama çözünürlükleri 300-600dpi (80-40 μ m) arasında değişmektedir. Bu durum, hava fotoğraflarının çözünürlükleri ile uyumlu minimum piksel genişliğinden daha büyük piksel boyutuna sahip verinin üretimine sebep olmaktadır. Fotogrametrik açıdan bu tür DTP tarayıcılar, düşük çözünürlük ve çok büyük piksel boyutunun yanı sıra diğer birtakım ek sınırlamalara da sahiptirler. Bunlar arasında, sayısallaştırıcının çoğu kez 4 veya 6-bit düzeyinde radyometrik çözünürlükte tarama yapması ve bunların sadece kağıt materyalleri kabul edecek şekilde dizayn edilmelerinden dolayı film materyalleri sayısallaştıramaması gelmektedir. Bundan başka DTP tarayıcılar, sıkça A4 formatını (21x29.7cm) kapsayabilecek şekilde üretilirler ve bu yüzden 23x23cm standart hava fotoğrafını ancak iki ayrı operasyonda tarayabilirler. Diğer bir eksiklik, bütün düşük-fiyatlı tarayıcılarda mevcut olan kaba geometrik doğruluktur. Ehlers'in belirttiğine göre, piksel boyutunun 80 μ m (300dpi) olduğu kaba bir taramada bile DTP tarayıcıların ürettiği hata değeri ± 2.4 piksel yani $\pm 200\mu$ m düzeyindedir.

DTP tarayıcıların kalibrasyonu ile ilgili çalışmalar, Agfa Horizon ve Sharp JX600/610 serisi tarayıcılar üzerinde Baltsavias ve arkadaşları (/1/, /2/, /4/ ve /5/) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu tarayıcılar, A3 formatında (36x56cm) veriyi kapsayabilmekte ve 1200dpi düzeyinde geometrik çözünürlük vermektedirler. Bu nedenle, standart 23x23cm boyutlu hava fotoğraflarını tarayabilmektedirler. Test levhaları kullanılarak yapılan geometrik kalibrasyon, $\pm 100\mu$ m düzeyinde bir karesel ortalama hata üretmiştir. Bu hatanın büyük bir kısmının mekanik konumlandırma hataları ve geri kalan bölümünün de mercek distorsiyonlarından kaynaklandığı belirlenmiştir. Bu sistematik hataların giderilmesi sonucu ortalama hata değerlerinin x-yönünde $\pm 7\mu$ m, y-yönünde ise $\pm 24\mu$ m düzeyine düştüğü görülmüştür. Bu önemli miktarda iyileşmeye rağmen DTP tarayıcılar, yüksek-preciziyonlu fotogrametrik çalışmalarda henüz yararlanılacak düzeyde değildirler.

Tablo-1 ve Tablo-2'de günümüzde yaygın kullanımda olan yüksek çözünürlüklü fotogrametrik tarayıcılar ve düşük geometrik doğruluklu DTP türü ofis sayısallaştırıcılarının temsili örneklerinin bu çalışmada ayrı ayrı üzerlerinde durulacak olan özellikleri verilmiştir. Okuyucunun ilgili bölümler geldiğinde örnek olarak verilen sistemlerin özelliklerine, bu tablolara dönerek bakması, verilen konuların kavranması açısından önemli görülmektedir.

Tablo-1 : Yüksek Çözünürlüklü Fotogrametrik Tarayıcılar ve Tasarım Özellikleri

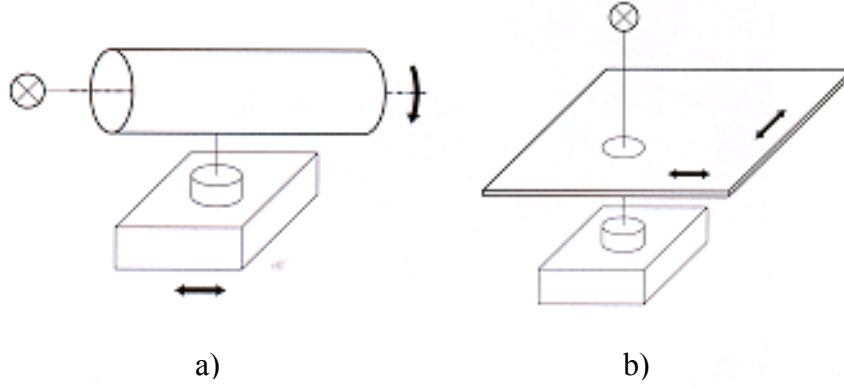
Firma / Model	LH Systems / DSW 300	Zeiss / SCAI	ISM / XL - 10	Vexcel / VX 4000 HT	Wehrli / RM - 2 RasterMaster	Zeiss / Integrator Photo Scan 1	Systemap Corp. DISC	Lenzar Lenzpro 2000 Multimedia	Vexcel UltraScan 5000	GeoSystem Delta - Scan
Mekanik Hareket	Masa-ıplı Hareketli Foto taşıyıcı	Masa-ıplı Sabit Foto taşıyıcı	Masa - ıplı Hareketli Foto taşıyıcı	Hareketli Sensör / Optik Düşey Foto taşıyıcı	Masa - ıplı Hareketli Foto taşıyıcı	Masa - ıplı Hareketli Foto taşıyıcı	Masa - ıplı Sabit Foto taşıyıcı	Masa - ıplı Hareketli Foto taşıyıcı	Masa - ıplı Sabit Foto taşıyıcı	Masa - ıplı Hareketli Foto taşıyıcı
Sensör Türü	Digital Kodak Megapluş 4.11 2029 x 2044 CCD (960 x 1984 aktif)	Kodak üç doğrusal dizili renkli CCD 10200 piksel (5632 Aktif)	Kodak üç doğrusal renkli CCD 3 x 8000 piksel	Matris dizili CCD 1024 x 1024	Dalsa TDI doğrusal CCD 96 x 2048 piksel (1024 Aktif)	Fairchild doğrusal CCD, 2048 piksel	Kodak üç doğrusal renkli CCD 8000 piksel	Matris dizili CCD 1000 x 1000	Üç doğrusal dizili CCD 6000 piksel	Toshiba doğrusal CCD 2028 piksel
Tarama Formatı x / y (mm)	265 / 265	275 / 250	254 / 254	508 / 254	250 / 250	260 / 260	320 / 320	559 / 889	280 / 440	300 / 300
Film rulosu en / boy (mm/m) Motorlu Sürtücü	35 - 241 / 152 Manuel, otomatik	245 / 150 Manuel, otomatik	241 Manuel, otomatik	70 - 241 / 305 Manuel, otomatik	Rulo film tarama opsiyonu yok	Rulo film tarama opsiyonu yok	Rulo film tarama opsiyonu var	16 - 305 manuel, otomatik	Rulo film tarama opsiyonu var	Rulo film tarama yok
Tarama piksel boyutu (µm)	4 - 20 taban çözünürlük	7 - 224	10 - 320	7.5 - 210 sürekli değişken	10 - 80 veya 12 - 96	7.5 - 120	10, 20, 40	3 - 254 sürekli değişebilir	5 - 29 taban çözünürlük	7 - 112
Radyometrik çözünürlük (bit (ç / dş))	10 / 8	10 / 8	10 / 8	8 / 8	12 / 8	10 / 8	10 / 8	10 / 10 veya 10 / 8	12 / 16 veya 12 / 8	8 / 8
Aydınlanma	Ksenon Ark lamba	Halojen	Floresan	Soğuk katod	Floresan	Halojen, 100W fiberoptik	Halojen fiberoptik	Halojen fiberoptik	Stabil aydınlanma	6 halojen lamba
Renkli tarama geçişi / Ana renkler eş zamanlı mı taramıyor?	1 Hayır	1 Evet	1 Evet	1 Hayır	3 Hayır	3 Hayır	1 Evet	1 Hayır	1 Evet	-
Optik yoğunluk sahası	3D	0 - 3D	0.1 - 2.4D	0.2 - 2D	0.2D - 2D	0 - 2.7D	-	0.2 - 2.2D	3.6D, 4D (max)	0.2 - 2D
Geometrik Doğruluk (µm)	2	2	<3	4 - 5	<4	<2	5	<3	2	3
Radyometrik Doğruluk (DN)	1 - 2	± 1.5	-	± 2	-	± 2	-	± 2.5	<1	-
Tarama verimi ve hızı	1.3 Mb/sn (S/B) 1.7 Mb/sn (renkli) max. 100 mm / sn	0.45 Mb/sn (S/B) 4 Mb/sn (renkli) max. 38 mm / sn	0.37 Mb/sn (S/B) 0.73 Mb/sn(renkli) max. 35 mm / sn	0.35 Mb/sn	1.2 Mb/sn (S/B) 0.5 Mb/sn (Renkli)	2 Mb/sn (7.5 µm) 1 Mb/sn (15 µm)	0.25 - 2.5 Mpiksel/sn	1.05 veya 1.3 Mb/sn (10 veya 8 bit)	0.45 Mb/sn (S/B) 0.83Mb/sn (renkli)	0.13 Mb/sn
Tarayıcıya bağlı bilgisayar / Arayüz	Sun Ultra 10,30,60 / 32 - bit SCSI-2	UNIX SGI / hızlı SCSI-2	Pentium, Windows NT	Windows NT / RS - 232 ve 422	Pentium PC, Windows NT, PCI Veriyolu / SCSI	Integrator UNIX iş istasyonu	PC - DOS / SCSI-2	SUN, SGI / SCSI-2	Windows NT / SCSI-2	PC486 DX4-100
Yaklaşık Fiyat (Dolar)	145000 Rulo film tarama opsiyonu ile	138000 Rulo film tarama opsiyonu ile	95000 Rulo film tarama opsiyonu ile	60000 Rulo film taramasız	55000	147000	75000	165000	39500	25000

Tablo-2 : DTP Ofis Tarayıcıları ve Önemli Karakteristikleri

Firma/Model	Agfa Horizon Plus	Agfa Arcus II	UMAX Mirage D-16L	UMAX Power Look II	Sharp JX - 610	Scitex Smart 340L
Mekanik Hareket	Sabit Foto taşıyıcı	Sabit Foto taşıyıcı	Sabit Foto taşıyıcı	Sabit Foto taşıyıcı	Sabit Foto taşıyıcı	Sabit Foto taşıyıcı
Sensör Türü	Üçlü bitişik CCD 3x500 piksel	Üç doğrusal Dizili CCD 5000 piksel	Renkli CCD 5000 piksel	Üç doğrusal dizili CCD 5000 piksel	Doğrusal CCD 7500 piksel	Doğrusal CCD
Tarama Formatı (mm)	A3 (kağıt) 240x340 (transparan)	210x355 (kağıt) 203x254 (transparan)	305x452	212x297 (kağıt) 212x254 (transparan)	305x452	A3 (kağıt) 262x240 (transparan)
Geometrik Çözünürlük (µm) düşey x yatay	212x212	212x243	3175x635	212x423	212x423	212 x 212
Optik yoğunluk sahası / max Radyometrik Çözünürlük (bit) iç / dış	3,2 / 3,4 12 / 12 veya 12 / 8	3,1 / 3,2 12 / 12 veya 12 / 8	3,0 / 3,2 10 / 10 veya 10 / 8	3,3 / 12 / 12 veya 12 / 8	3,3 / - 12 / 8	- - / 8
Aydınlanma	Halojen 400 W	Floresan 8 W	Halojen	Soğuk katod 3 W	Floresan	-
Renk Geçiş Sayısı	3	1	1	1	1	-
Geometrik doğruluk (µm) x / y	92 / 47	61 / 37	18 / 19	52 / 43	56 / 28	-

3. SİLİNDİRİK VE MASA-TİPLİ TARAYICILAR

Şekil-1'den de görülebileceği gibi, genel anlamda tarayıcıların üretiminde birbirinden çok farklı iki ayrı tasarım prensibi kullanılır. Silindirik tarayıcılarda film (veya harita) dönel bir silindire tutuşturulmuştur (Şekil-2(a)). Fotoduyarlı eleman olarak tekli kullanılabilen fotoçoğaltıcılardan yararlanır ve bunların yüksek duyarlılığı nedeniyle silindirik tarayıcılar, geniş optik yoğunluk sahası ve renksel gösterim sağlamaktadırlar. Fotoçoğaltıcı, silindire paralel bir eksen boyunca piksel piksel hareket eder ve bu şekilde sayısal görüntünün bir satırı taranmış olur. Silindirin dönüşü ise sütunları oluşturur. Bu tür tarayıcılar, yüksek radyometrik çözünürlük sağlamalarına rağmen bunların kullanımına geometrik problemler engel olmuştur. Düzgün olmayan silindirik yüzey, filmi silindire monte etmedeki zorluklar ve dönme hızındaki farklılıklar geometrik problemlerden sadece bazılarıdır. Bundan başka, silindirik tarayıcıların geometrik testi sırasında bunlara yüksek prezisyonlu cam kalibrasyon levhalarının monte edilememesi diğer önemli bir eksikliklerdir.



Şekil-2 : Silindirik ve Masa-Tipli Tarayıcıların Sayısallaştırma Düzenleri

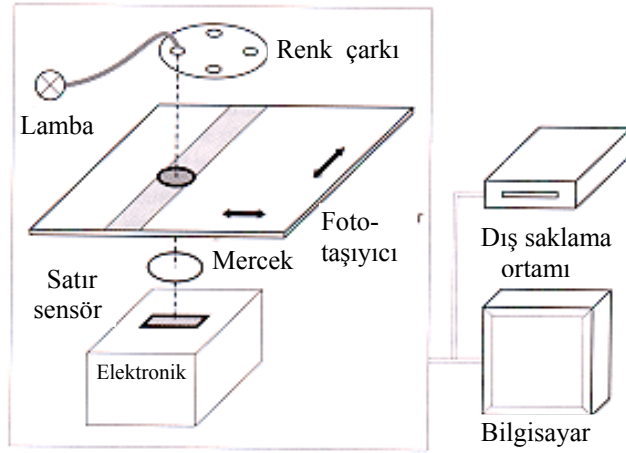
Şekil 2(b), masa-tipli tarayıcıların çalışma prensibini göstermektedir. Film, bir foto taşıyıcı üzerine yerleştirilmiş ve yukarıdan aydınlatılmıştır. Algılayıcı mekanizma olarak, filmde geçen enerji miktarını ölçebilen katı-hal CCD sensörler kullanılmaktadır. Bunlar satır ya da matris diziler şeklinde düzenlenmişlerdir. Filmin üzerinde bulunduğu foto taşıyıcı; sensörün, optik sistemin ve ışık kaynağının sabit konumuna göre hareket ettirilmektedir.

Günümüz tarayıcıları çoğunlukla masa-tipli yapıdadır. Katı-hal sensörlerde meydana gelen gelişmeler (dizi başına artan algılama elemanı sayısı ve azalan piksel boyutu) masa-tipli tarayıcıların yaygın kullanımına sebep olmaktadır. İlk üretilen tarayıcıların çoğu, sadece diyapozitifleri sayısallaştıracak şekilde dizayn edilmişlerdi. Bunun sonucu, tarama işleminden önce önemli bir zaman dilimi ve emeği, orjinal negatif film rulosundan diyapozitiflerin elde edilmesine harcanmaktaydı. Bu durum, öncelikle çok sayıda fotoğrafın kullanıldığı harita yapım projelerinde önem kazanmaktadır. Bu nedenle, birçok kullanıcı için orjinal film rulosunu tarama opsiyonu kaçınılmaz bir istek haline almıştır. Son teknoloji ürünü olan fotogrametrik tarayıcılar, film rulolarını tarama opsiyonunu da sağlamaktadırlar. Çözüm hava kameralarındaki uygulamalara benzerdir, ancak tarayıcılarda filmi cam yüzey üzerine düzgünce bastırmak için

vakum uygulanmamaktadır. Bu opsiyonla filmin elle yüklenmesi önlenir ve böylece birkaç yüz resim çerçevesini içeren bütün film rulusunun operatör yardımsız hızlı bir biçimde taranması sağlanmış olur. Ancak bu çeşit uygulama, diyapozitifin kontrast ve yorumlanabilirliğini artırmak için kontakt baskı işlemine benzer uygun bir zenginleştirme algoritmasını kullanan filtrelemeyi gerçekleştirecek yazılımı da beraberinde sağlamalıdır.

4. MASA-TİPLİ TARAYICILARIN ANA ELEMANLARI

Şekil-3’de masa-tipli tarayıcıları oluşturan ana elemanlar gösterilmiştir. Aşağıdaki bölümde bunların her birinin sağladığı fonksiyonlar üzerinde durulacaktır.



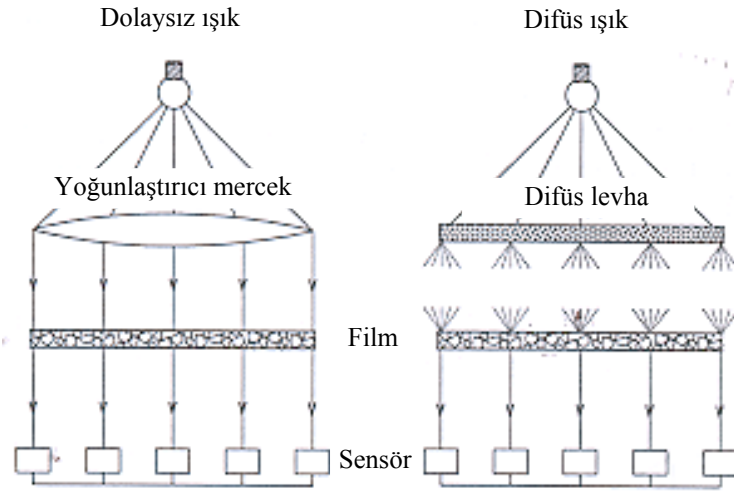
Şekil-3 : Masa-Tipli Tarayıcıların Ana Elemanları

a. Işık ve Optik Sistem

Bir tarayıcının aydınlanma sisteminin sağlaması gereken önemli özellikler vardır. Bunlardan ilki, ışık kaynağının homojen aydınlatma sağlamasıdır. Yani satır sensör tarafından kaydedilen enerji, sadece film optik yoğunluğunun bir fonksiyonu olmalıdır. Işık kaynağından doğabilecek aydınlanma değişimlerini düzeltmek için onun enerjisi doğrudan ölçülür. Böylece, sensörlere ulaşan enerjiye getirilecek düzeltmeler hemen anında uygulanabilir.

Diğer bir vurgulanması gereken özellik, sayısallaştırıcının dinamik tarama işleminin ortaya çıkardığı sonuçtur. Sensörün doyum enerjisi, integrasyon zamanı ve üzerinde mevcut olan enerjinin ürünüdür. Integrasyon zamanını olabildiğince kısa tutabilmek için ışık kaynağı yeterli miktarda enerji yaymalıdır. Tipik ışık kaynakları; 100 ila 300 Wattlık halojen ve floresan lambalardır. Bu tür aydınlatma kaynakları, sonuçta sensör duyarlılığını ve filmi etkileyen önemli derecede ısı yayımına sebep olabilirler. Bu istenmeyen etkileri önlemek için ısı yalıtımlı lambalar, sensör ve filmden olabildiğince uzağa konumlandırılırlar. Bu durumda ışığı aydınlanma pozisyonuna getirmede bir fiber optik kablo kullanılır.

Diğer bir tasarım problemi, difüs ya da dolaysız ışık kullanıp kullanmama konusudur (Şekil-4). Difüs aydınlanmada, ışık-saçıcı cam bir levha film üzerine yerleştirilir. Bu durum, emülsiyon tabakası üzerindeki toz parçacıkları veya çizik gibi küçük kusurların görüntülenmemesi avantajını sağlar. Bunun yanı sıra difüs ışık, dolaysız ışık kaynaklarından daha az görüntü gürültüsü üretir. Dolaysız aydınlanma ise yoğunlaştırıcı mercekle gerektirir. Bu merceğin fonksiyonu, nokta bir ışık kaynağından koherent (eş-evreli) ışık doğurmaktır. Dolaysız aydınlanmanın avantajı, büyük netlik derinliğinden (ışık kaynağından yayılan oldukça dar ışık ışınları demetinden dolayı) ileri gelmekte, böylece odaklama problemini ortadan kaldırmaktadır /12/.



Şekil-4 : Dolaysız ve Difüs Aydınlanma

Aydınlanma sisteminin bir parçası da renk çarkıdır. Bu eleman, renkli filmi taramak için gerekli filtreleri içerir. Bu tür filtreler kullanıldığında film üç defa ayrı ayrı taranmalıdır. Diğer çözüm, her biri ana renklere duyarlı üç ayrı satır sensör kullanmak suretiyle renkli görüntüleri üretmektir. Bu durum, üç rengin tümünün bir geçişte taranması avantajını getirmektedir.

Tarayıcının mercekle sisteminin distorsiyon ve aberasyonları daha ileriki bölümlerde açıklanacak olan geometrik ve radyometrik kalibrasyon işlemleri ile belirlenir ve bunların sonuç görüntü üzerindeki etkileri ortaya çıkarılır. Burada önemli olan nokta, sayısallaştırılan film materyalinin sensör elemanlarını içeren düzlem üzerine hassas şekilde görüntülendiğinden emin olmaktır. Bundan başka; objektif merceği, film ve satır sensörün birbirine göre konumları, tarama işlemi boyunca sabit kalmalıdır.

Taranmış görüntünün satır sensör doğrultusundaki piksel boyutu, sensör eleman boyutuna ve optik sistemin büyütmesine bağlıdır. Tarama yönündeki piksel boyutu ise, tarama hızı ve integrasyon zamanı tarafından belirlenir. Bazı tarayıcılar, sabit piksel boyutu ile çalışırlar. Bu nedenle, çözünürlüğün optiksel değiştirilmesi (zoom optikleri tarafından) yerine, bu işlem yazılımla gerçekleştirilir. Burada film, minimum piksel boyutunda taranır ve elde edilen sayısal görüntü istenen piksel boyutuna yeniden örneklenir. Örneğin, film önce 7µm piksel boyutunda

taranır. Eğer 21µm piksel büyüklüklü sayısal görüntü isteniyorsa 3x3'lük yeniden örnekleme ile istenen çözünürlükte sonuç veri elde edilmiş olur.

b. Foto Taşıyıcı

Fotogrametrik tarayıcıların foto taşıyıcısı, genellikle analitik değerlendirme aletinin taşıyıcı kısmının değişik bir versiyonudur. Bu nedenle, yüksek güvenilirlik ve yaklaşık 2µm düzeyinde geometrik doğruluk beklenebilir. Foto taşıyıcı, iki eksenli kızak üzerine oturmuştur. Hareketi, servo sistem ve 1µm veya daha az doğruluklu kodlayıcılar sayesinde kontrol edilir. Hızı 10 ila 20mm/sn arasında değişmektedir.

Foto taşıyıcı, filmi satır sensör karşısında hareket ettirdikçe tarama genişliği olarak adlandırılan küçük bir şerit sayısallaştırılmış olur. Bunun genişliği, sensörün fiziksel boyutunun ve optik sistemin büyütmesi ile çarpımına eşittir. Bir tarama satırının sonunda, taşıyıcı ilk olarak tarama doğrultusuna dik doğrultuda tarama genişliği kadar hareket eder ve sonra zıt yönde tekrar tarama operasyonuna başlar. Bu tür zig-zag tarama sonucu komşu tarama genişlikleri arasındaki bindirme ve boşlukları önlemek için verilen ötelemeler çok doğru olmalıdır. Bundan başka, tarama doğrultusunda sabit hızda hareket önemlidir, çünkü bu hareket tarama yönündeki piksel boyutunu belirlemektedir.

c. Sensör

Sensörün fonksiyonu, filmin optik yoğunluğunu ölçmektir. Gelen enerji Φ_i , filmle etkileşir ve burada ya soğurulur ya yansıtılır ya da geçirilir. Geçirilen enerjinin gelen toplam enerji Φ_t 'ye oranı geçirgenlik olarak tanımlanır ve

$$\tau = \Phi_i / \Phi_t \quad (1)$$

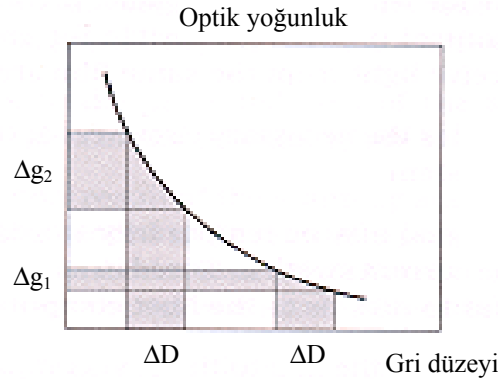
olarak ifade edilir. Optik yoğunluk veya kararma (D), geçirgenliğin tersinin logaritmasına eşittir ve

$$D = \log (1/\tau) \quad (2)$$

bağıntısı ile verilir. İnsanın görme sistemi yaklaşık olarak logaritmik bir yapıya sahiptir ve filmin optik yoğunluğunun karakteristik eğrisi ile benzeşim gösterir. Ancak, tarayıcının katı-hal CCD sensörleri ise, eşit aralıklı optik yoğunluklar ölçeğini doğrusal olarak algılar. Bu durum, CCD sensörlerin tanınmış problemlerinden biridir. Şekil 5, CCD sensörlerin duyarlık davranışını sergilemektedir. Görüldüğü gibi duyarlıklar, artan optik yoğunlukla azalmaktadır. Sonuç olarak, koyu bölgedeki ΔD optik yoğunluk farklılığı, aydınlık bölgedeki aynı yoğunluk farklılığından daha az gri değeri ile ifade edilebilmektedir /13/.

Masa-tipli tarayıcıların çoğu CCD satır sensörünü kullanırlar. İki-boyutlu diziler yerine tek-boyutlu CCD satır sensörleri kullanmadaki en önemli neden, satır sensörlerin duyarlığının

oldukça yüksek olmasıdır. Satır sensörlerin optik yoğunluk sahası, iki boyutlu matris dizilerden yaklaşık 5 kat daha yüksektir /12/.



Şekil-5 : Masa-Tipli Tarayıcılarda Optik Yoğunluk-Gri Düzeyi İlişkisi

d. Tarayıcının Elektronik Kısmı

Tarayıcının elektronik kısmı aşağıdaki bahsedilen ve gerekli işlevleri sağlayan alt-elemanlardan oluşmaktadır:

(1) A/D Dönüştürücü : Tarayıcının CCD sensör elemanlarında biriktirilen elektronik yükün çıkışı veri-çıkış mekanizması sayesinde yapılır ve daha sonra analog video sinyale dönüştürülür. Tarayıcının çıktısı ise piksellerin gri değerlerinden oluşan bir sayısal sinyaldir. A/D dönüşüm modülü, analog sinyali 2^n sayıdaki eşit aralığa (gri değerine) sayısallaştırır. Burada n değeri, gri tonların sunumu için gerekli bit sayısıdır. Çoğu tarayıcıların çıktısı 8-bit olmakla birlikte, iç sayısallaştırma bazen daha yüksek düzeyde gerçekleştirilir (10 veya 12-bit gibi). Bu yolla, koyu alanlarda oluşabilecek düşük duyarlılık problemleri bir dereceye kadar azaltılabilir.

(2) Sensör Kontrolü : Sensör düzleminin görüntü düzlemi ile uyumunu kontrol eden mekanizmadır. Örneğin, renkli tarama yapılıyorsa kontrol birimi, üç ayrı satır sensörün aynı film alanından ışık aldığından emin olmakla sorumludur.

(3) Taşıyıcı Kontrolü : Kızak sisteminin çalışmasını sağlayan motorlar için gerekli kontrol sinyallerini üreten elektronik devreleri içermektedir.

(4) Bellek : Sayısal sinyalin geçici olarak iç bellekte saklanması gerekebilir. Örneğin, o anki tarama bellekte saklanırken bir öncekinin diskete veya tarayıcının bağlı olduğu bilgisayara çıkışı yapılabilir.

(5) Çıktı Arayüzü : Tarayıcının bağlı olduğu bilgisayara veya başka bir dış saklama ortamına bağlantıyı sağlar. Üretilen sayısal verinin transferi, tarama hızı ile uyumlu olmalıdır. Günümüz bilgisayar donanımlarında PCI⁴ türü veri yolları yüksek veri yoğunluğunu taşıyabilirken, diğer veri yolu sistemleri veya dış saklama ortamına dolaysız bağlantılar, işlemi yavaşlatabilecektir.

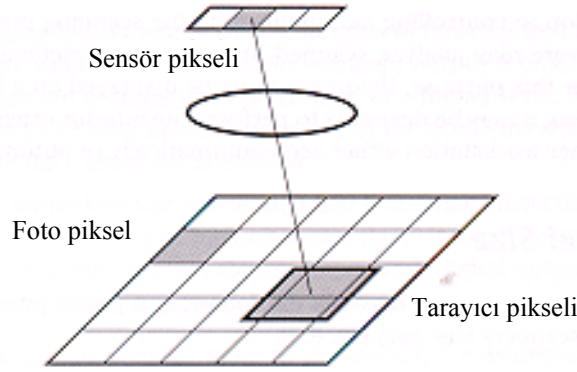
⁴ PCI : Peripheral Component Interconnect (Çevresel Birim Bağlantısı)

e. Bilgisayar

Fotogrametrik tarayıcının bağlı olduğu bilgisayar, sayısallaştırma işleminde çok önemli rol oynamaktadır. İlk aşamada, operatöre tarayıcı ile iletişim kurması için GUI⁵ sağlamaktadır. Örneğin; sayısallaştırma parametrelerinin tanımlanması (piksel boyutu vb.), dosya adının girilmesi, kalibrasyon işleminin başlatılması ve taranması istenen alt alanların tanımlanması gibi önemli işlemleri yerine getirme imkanını sunmaktadır. Tarama işleminin kontrolü ve izlenmesinin yanı sıra, tarayıcıya ekli uygulama yazılımı sayesinde tarama işleminin uygunluğu ve sürekliliği analiz edilebilir. Bu amaçla, sayısallaştırılmakta olan görüntü kaliteli bir monitörde gösterilir ve gerektiğinde çevrim-içi (anında) müdahale yapılabilir.

5. MASA-TİPLİ TARAYICILARDA PİKSEL TÜRLERİ

Aşağıda verilen ve masa-tipli tarayıcılar için geçerli olan piksel türleri arasında ayırım yapmak gereklidir (Şekil-6).



Şekil-6 : Masa-Tipli Tarayıcılarda Mevcut Piksel Türleri

a. Sensör Pikseli : Bir sensör elemanını ifade etmektedir. Boyutu, satır tarayıcının türü tarafından belirlenir ve genelde 10-15µm arasında değişmektedir.

b. Tarayıcı Pikseli : Sensör pikselinin taranan film materyali üzerine izdüşürülmüş kısmını tanımlamaktadır ve tarayıcının arayüze gönderdiği çıktıdır.

c. Düzeltilmiş Piksel : Tarama ve daha sonra gerçekleştirilecek olan ileri işleme adımları sonucu oluşan pikseldir. Eğer tarayıcının bağlı olduğu bilgisayar üzerinde sonradan herhangi bir işlem yapılmamışsa bu durumda düzeltilmiş piksel, tarayıcı pikseline eşit olacaktır.

d. Foto Piksel : Sayısal forma dönüştürülecek olan filmin çözünürlüğünü ifade etmektedir. Bu fiziksel bir piksel değildir, daha çok kavramsal anlam taşımaktadır.

⁵ GUI : **G**raphical **U**ser **I**nterface (**G**rafik **K**ullanıcı **A**rayüzü)

a. Sensör Pikseli ile Tarayıcı Pikseli Arasındaki İlişki

Bir an için, tarayıcının foto taşıyıcısının hareket etmediğini düşünelim. Sensör elemanları, mercek yoluyla film üzerine izdüşürülürler. Bu durumda tarayıcı pikselinin boyutu, sensör piksel boyutunun optik sistemin büyütmesi ile çarpımına eşit olacaktır. Daha sonra foto taşıyıcının hareket ettiği farzedilirse sensör pikseli, pozlama zamanı boyunca hareketli film üzerine izdüşürülecektir. Bu durumda tarama yönündeki piksel boyutu, tarama hızı ve pozlama zamanının fonksiyonu olacaktır. İntegrasyon zamanı Δt ve tarama hızı V olarak tanımlanırsa tarama yönündeki piksel boyutu,

$$S_y = V \cdot \Delta t \quad (3)$$

olarak elde edilir. Satır sensör boyunca piksel boyutu ise

$$S_x = S_s \cdot m \quad (4)$$

Şeklinde bulunur. Burada S_s , sensör piksel boyutu, m 'de optik sistemin büyütmesidir. Bu şekilde tarayıcı piksel boyutunun bir doğrultuda optik büyütmeyle diğer doğrultuda foto taşıyıcının hızı ve sensör elemanlarının integrasyon zamanı ile kontrol edildiği ortaya çıkacaktır.

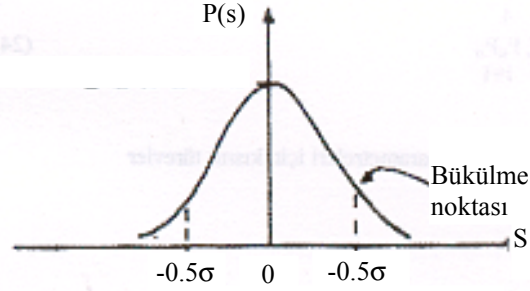
b. Tarayıcı Pikseli ile Foto Pikseli Arasındaki İlişki

Tarama işleminde en önemli soru, tarayıcı pikseli ne kadar büyük olmalıdır ki orjinal dökümanın (filmin) olabildiğince iyi sunumu yapılabilsin. Bu, minimum foto piksel boyutu veya çözünürlüğü sormakla eş anlamlıdır. Filmin çözünürlüğü, mm'de ayırdelebilen çizgi çifti sayısı olarak tanımlanır. Bu bilinen ölçü, film kontrastına ve insanın değerlendirmesine bağlı olduğundan oldukça subjektif bir kriterdir. Bu nedenle, fotogrametrik uygulamalarda çözünürlüğü belirlemede daha objektif değerler sağlayan modülasyon taşıma fonksiyonları kullanılmaktadır /8/.

Görüntü formasyonu işlemi doğrusal bir sistem olarak tanımlanabilir. Bu işlemde görüntülenecek obje girdi sinyalidir, mercek doğrusal sistemi teşkil etmekte ve görüntü de çıktıyı oluşturmaktadır. Görüntüleme sisteminin karşılığı (cevabı) impulsla karakterize edilir. Bunun sonucu obje, ölçeklendirilmiş ve ötelenmiş impulsların doğrusal kombinasyonu olarak tanımlanabilir. Peki, mercek bir impulsu nasıl dönüştürür? Bir nokta kaynağının mercek açıklığı yoluyla görüntüsü, nokta yayılım fonksiyonudur (Şekil-7). Bunun sonucu bir görüntü, obje ışık yoğunluk fonksiyonunun nokta yayılım fonksiyonu ile konvolüsyonu (katlanması) sonucu elde edilir. Aynı operasyon, frekans cinsinden de yapılabilir. Bu şekilde, nokta yayılım fonksiyonunun Fourier transformasyonu, modülasyon taşıma fonksiyonu olacaktır /9/, /10/.

Şekil-7'den görülebileceği gibi, nokta yayılım fonksiyonu, çözünürlük ölçütü olan ve Gauss genişliği olarak adlandırılan " σ " ile karakterize edilir. Siyah/beyaz fimler için σ 'nın değeri $20\mu\text{m}$ ile $30\mu\text{m}$ arasında değişirken, renkli emülsiyonlar için biraz daha fazla yayılım vardır. Bu değerlerden foto piksellerin boyutunun siyah/beyaz resimler için $10-15\mu\text{m}$ ve renkli emülsiyonlar

içinse 15–25µm olduğu sonucuna varılır (örnekleme teoremine göre piksel boyutu, en yüksek frekansın yarısına ve yukarıdaki durumda da yayılım fonksiyonunun yarısına eşit olmalıdır) /15/.



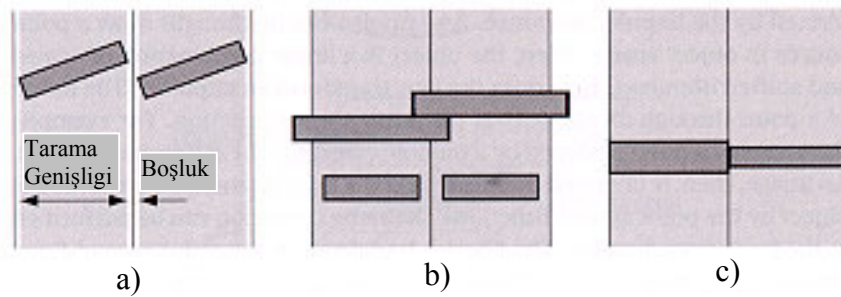
Şekil-7 : Gauss Nokta Yayılım Fonksiyonu

6. TARAYICILARDAKİ MUHTEMEL HATA KAYNAKLARI

Çalışmanın bu bölümünde, tarayıcıların performans kontrolünün en önemli aşamaları ve ana hata kaynakları üzerinde durulacaktır.

a. Geometri

Şekil-8'den de görülebileceği gibi, temel problemler tarayıcının satır sensörlerinin aynı doğrultuda olmamasından ortaya çıkmaktadır. Bunun sonucunda eğri bir görüntü koordinat sistemi oluşmakta ve komşu tarama genişlikleri küçük boşluklarla ayrılabilir (Şekil-8(a)). Benzer tür problemler, yanlış ölçekten de kaynaklanabilmektedir. Tarama doğrultusuna dik yöndeki bir ölçek hatası, yanlış bir optik büyütme sonucu oluşur ve tarama genişlikleri arasında bindirmeye ya da boşluğa yol açar (Şekil-8(b)). Tarama doğrultusu boyunca bir ölçek hatası ise düzensiz hız veya sensör ile foto taşıyıcı arasındaki uygun senkronizasyon eksikliğinden doğabilir. Bunun sonucunda, dikdörtgen şeklinde pikseller oluşacak ve komşu tarama genişliklerinde aynı satırın pikselleri tam olarak birbiriyle eşleşemeyecektir (Şekil-8(c)).



Şekil-8 : Tarayıcılarda Tarama Genişlikleri Arasında Oluşabilen Geometrik Problemler

b. Radyometri

En önemli radyometrik problem, CCD sensörlerin daha önce belirtildiği gibi (Bölüm 4) eşit aralıklı optik yoğunluklara değişken düzeyde gri değerlerle karşılık vermesidir. Buna kromatik aberasyonlar ve renkli satır sensörlere izdüşürülen görüntü parçasının konumsal ötelemelerinden dolayı oluşan renk kayıt hataları da eklenebilir. Bundan başka, uygun renk ayarının başarılması, CCD sensör duyarlılığının spektrumun görünür bölgesinde birbirinden farklılığı nedeniyle zor olabilmektedir. Çünkü spektrumun mavi bölgesi, kırmızı ve yeşilden daha az duyarlık üretmektedir.

Radyometrik çözünürlük, termal gürültü ve elektronik taşma gibi problemler sebebiyle daha da azaltılabilir. Sayısal sistemlerde elektronik gürültüyü önlemenin yolu, algılayıcı mekanizma olan sensörü soğutmak ve çoklu ölçümlerin ortalamasını almaktır. Tarayıcı açısından bakıldığında çoklu ölçüm, aynı materyalin birden fazla sayıda taranması ve sonuç ürünün bu çoklu taramaların ortalamasının alınması suretiyle oluşturulmasıdır. Bu yöntem, elektronik görüntüleme sistemlerinde oluşan gürültüyü azaltmada kullanılan en yaygın çözümdür.

7. TARAYICILARIN PERFORMANSININ TESTİ

Tarayıcılarda yoğun olarak ortaya çıkan ve yukarıda belirtilen geometrik ve radyometrik hata kaynaklarının düzeyini belirlemek için, sayısallaştırıcının her iki açıdan kalibre edilmesi ve bunların etkilerini ortadan kaldıracak matematiksel düzeltme modellerinin geliştirilmesi gerekir. Bunun sonucu, tarayıcı tarafından üretilecek sayısal veriye gerekli düzeltmeler getirilerek onun üzerinde yapılacak ileri işleme adımlarından doğru sonuçlar alınabilecektir. Bu işlem, harita yapım uygulamalarında çok büyük bir öneme sahiptir. Bunun sebebi, gerek bilgi sistemlerinde gerekse fotogrametrik harita üretim zincirinde tarayıcılarla elde edilen sayısal görüntünün temel materyal olarak alınmasıdır.

a. Geometrik Kalibrasyon

Tarayıcıların geometrik kalibrasyonu için iki ayrı test levhası kullanılır. Bunlardan biri, üzerinde 2.5mm aralıklı 121x121 (toplam 14641) adet (+) şekilli işaret bulunan film levhadır. Bunun sayesinde tarayıcının lokal doğruluğu kontrol edilir. Diğer bir levha, üzerinde 12.5mm aralıklı 11x11 (toplam 121) adet aynı tür kalibrasyon işareti olan cam levhadır. Bu çeşit üzerinde daha az sayıda ve yoğun olmayan işaret taşıyan levhada tarayıcının global doğruluğunun belirlenmesinde kullanılır. Tarayıcıların bu tür levhalarla geometrik kalibrasyonu için yapılacak işlemler adımlar halinde aşağıda özetlenmiştir:

(1) İlk aşamada, tarayıcı grafik kullanıcı arayüzü ile en küçük piksel boyutuna set edilir (örneğin Zeiss SCAI tarayıcısı kullanıldığı durumda, bu değer 7.5µm'ye eşittir) ve kalibrasyon levhası bu piksel büyüklüğünde taranır. Kalibrasyon levhasının elde edilen sayısal görüntüsü sonraki işlem adımlarına uygun görüntü formatında kaydedilir. Bu durum bazen problem yaratmaktadır. Çünkü çoğu firma, kendine ait özel görüntü formatında taradığı görüntüleri saklamakta ve ileri veri işleme adımları için bu görüntü formatının kullanıldığı görüntü işleme yazılımını çalıştırmaktadır. Bunun sonucu, seyrek de olsa bu tür özel görüntü formatının yaygın sayısal görüntü işleme paket

programları kullanılarak bilinen veya kullanıcının ileride kendisinin spesifik amaçları için kullanılacağı formata çevrilmesi gerekmektedir. Yüksek çözünürlüklü fotogrametrik tarayıcıların çoğu görüntü formatı olarak normal TIFF formatından farklı olan Tiled-TIFF adı verilen özel bir TIFF versiyonu kullanmaktadır. Bu sebeple, bu tür testlerde hemen hemen her sistem tarafından tanınan ve çoğu program için gösterimi gayet kolay olan RAW görüntü formatında görüntüleri saklamak yararlı olacaktır. Diğer bir problem, en küçük piksel boyutunda elde edilen sayısal görüntünün bellekte tutacağı yerdir. Yukarıda belirtilen yaygın kullanımdaki kalibrasyon levhalarının boyutu genelde bir hava fotoğrafının boyutuna eşittir. Bu durumda 23x23cm boyutlarındaki bir levha, 7.5µm ile tarandığında elde edilecek sayısal görüntünün boyutu yaklaşık 31Kx31K piksel olacaktır. Bu boyuttaki bir görüntünün bilgisayar belleğinde tutacağı yer, 1GB'a yakın düzeydedir. Bu büyüklükteki bir görüntüyü değerlendirmenin (bilgisayar ekranında gösterimi, üzerinde işlem yapılması) zor olacaktır, ancak imkansız değildir. Doğal olarak bunda bu işe vakfedilen bilgisayarın kapasitesi de çok önemlidir. Ancak şurası kesindir ki, operatör 1GB'lık verinin bilgisayar RAM'inde herhangi ortama taşınması süresinde belirli bir zaman dilimi boyunca beklemek zorunda kalacaktır. Diğer bir konu, eğer tarama kullanıcının laboratuvarında değil de başka ortamda yapılıyor ise, o zaman taranmış görüntünün herhangi bir ortama kaydı yapılarak kullanıcının bilgisayarına taşınmasıdır. Bu da günümüzde ancak DAT teyplerle sağlanabilir, çünkü optik CD-ROM veya CD-R'lar ancak 700MB'a kadar veri saklayabilmektedir. CD-ROM'a aktarım durumunda bazı tarayıcı programları görüntüyü parçalara bölerek ayrı ayrı CD'lerde saklama ve sonra birleştirme opsiyonunu sağlamaktadır. Ancak, tekrar birleştirilen görüntü parçalarının orjinal görüntüye ne kadar yakın olacağı konusu şüphelidir ve bu konu ayrı bir araştırmayı gerektirmektedir. DAT teypler çok daha fazla yer tutan görüntüleri saklayabilmekle birlikte, kullanıcının laboratuvarında bunları okuyabilen düzeneğe ihtiyaç olacaktır. Bu noktada, günümüz görüntü sıkıştırma/gevşetme (image compression/decompression) yöntemlerinin konu üzerindeki etkisini belirtmek yararlı olacaktır. JPEG 2000, Lurawave, MrSID ve ECW gibi görüntü sıkıştırma/gevşetme yöntemleri değişik firmalarca geliştirilmiştir. Güncel görüntü işleme yazılımları için bunların çeşitli versiyonları piyasada ucuz fiyatlarla mevcuttur. Bunlardan JPEG'in 5-10 kat sıkıştırma derecesine kadar, görüntünün geometrik doğruluğu üzerinde bozulmaya sebep olmadığı ortaya konulmuştur /14/. Ancak yeni sistemlerin sağladığı sıkıştırma oranı, JPEG'e göre daha yüksek değerlere ulaşabilirken, bunların görüntü kalitesi üzerindeki etkisi henüz araştırma safhasındadır. Bu sebeplerden dolayı, aksi ispatlanana kadar, orjinal görüntü dosyasının tarayıcının geometrik düzeyini belirlemede referans veri olarak kullanılması en doğru yol olacaktır.

(2) Taranan sayısal görüntü üzerindeki kalibrasyon işaretlerinin resim koordinatları, en küçük kareler yöntemini kullanan bir sayısal görüntü eşleştirme tekniğinden yararlanılarak otomatik olarak piksel-altı (sub-pixel) düzeyinde ölçülmelidir. Bu tür ölçümün manuel yapılmasından hem işaret sayısının fazlalığı ve bunun getireceği emek kaybı hem de elle ölçümün doğuracağı ek hata etkileri nedeniyle kaçınılmalıdır /9/. Kullanılan eşleştirme tekniği, piksel boyutunun sonlu büyüklük ve sayısal fotogrametride birim olarak alınması nedeniyle, piksel-altı düzeyde ölçüm doğruluğu sağlamalıdır (en az 1/10 piksel). Bu nitelikte geometrik düzey ve otomatik ölçüm yeteneği sağlayan görüntü eşleştirme tekniği kullanıcının kendisi tarafından programlanabileceği gibi, bu işlemi yerine getiren bazı uluslararası yazılımlar da mevcuttur (Kanada DVP Geomatics firmasının Scanner Calibration Modülü; Rus Racurs firmasının ScanCorrect yazılımı ve İtalyan Siscam'ın MaterScan modülü gibi). Bunun yanısıra bu konu üzerinde uzun yıllardır çalışan bazı

Üniversite bölümleri de kendi programlarını yazmışlardır (Almanya'nın Hannover Üniversitesi, İsveçre'nin Zürich ETH Enstitüsü ve Polonya'nın Krakow Üniversitesi gibi).

(3) Kalibrasyon işaretlerinin referans koordinatları elde edildikten sonra, bunlarla hatasız oldukları kabul edilen referans koordinatları arasındaki ilişki, benzerlik ve polinom transformasyonları ile kurulur. Benzerlik dönüşümü formülleri

$$\begin{aligned} X &= ax + by + c \\ Y &= bx - ay + d \end{aligned} \quad (5)$$

şeklinde verilir ve iki koordinat sistemi arasındaki öteleme ve dönüklüğün ortaya konulmasında kullanılır. Burada yapılan işlem basitçe, sayısal görüntü koordinat sisteminin (x,y) referans koordinat sistemi (X,Y) üzerine oturtulmasıdır. Bu dönüşüm aşamasında koordinat değerlerine hiç bir düzeltme getirilmez, sadece bir koordinat sistemi diğerine dönüştürülür. Ortak nokta sayısı teorik olarak en az iki olmalıdır. (Dört tane bilinmeyen transformasyon katsayısını çözmek için). Dengelemeli çözüm için bu değerden daha fazla sayıda noktanın koordinatlarına gerek vardır. Ancak, uygulamada tüm kalibrasyon işaretlerinin referans ve görüntü koordinatları bilineceğinden bütün noktalar, ortak nokta olarak alınır ve çözüm bu şekilde gerçekleştirilir. Bu dönüşüm sonucunda elde edilecek olan dx ve dy koordinat farklarından oluşan ds hata vektörleri her bir nokta için çizilecek olursa, hata değerlerinin sistematikliği konusunda daha belirgin bir kanıt elde edilmiş olur.

Pollinom transformasyonu ise

$$\begin{aligned} X &= a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 + a_6x^2y + a_7xy^2 + a_8x^2y^2 + a_9x^3 \\ &+ a_{10}y^3 + a_{11}x^3y + a_{12}xy^3 + a_{13}x^3y^2 + a_{14}x^2y^3 + a_{15}x^3y^3 + a_{16}x^4 + a_{17}y^4 \\ &+ a_{18}x^4y + a_{19}xy^4 + a_{20}x^4y^2 + a_{21}x^2y^4 + a_{22}x^4y^3 + a_{23}x^3y^4 + a_{24}x^4y^4 \\ Y &= b_0 + b_1x + b_2y + \dots + b_{24}x^4y^4 \end{aligned} \quad (6)$$

eşitlikleri ile gerçekleştirilir. Görüleceği gibi, bu dönüşümün birinci dereceden terimleri affin dönüşüm bağıntılarını vermektedir. Bu terimler sayesinde iki koordinat sistemi arasındaki öteleme ve dönüklüğün yanı sıra koordinat eksenlerinin dik olmama hatası ve ölçek farklılıkları da giderilebilir. Bu transformasyonla sistematik hatalar ortadan kaldırılarak rasgele (tesadüfi) hataların etkisi her nokta için belirlenebilir. Polinom dönüşümünün diğer yüksek dereceli terimlerinin etkileri incelenerek ek distorsiyon modellemeleri yapılabilmektedir.

Bu geometrik kalibrasyon işlemi yukarıda verilen her iki hedef levhası kullanılarak yapılmalıdır. 11x11 hedefli cam levha daha geniş aralıklı dizayn edildiğinden, global hataların ortaya konulmasında kullanılır. 121x121 kalibrasyon işaretli hedefin bu işlemde kullanılması görsel karmaşıklığa yol açacağından doğru bir fikir vermeyecektir. Bunun yanı sıra, tarayıcıların satır-satır veya parça-parça tarama şekilleri göz önüne alındığında tarayıcının her tarama satırı veya görüntü parçasındaki davranışını ortaya koymak için lokal analiz yapılır. Bunun için de, 121x121 hedefli film levhanın sayısal görüntüsü üzerinde farklı bölgelerde görüntü parçaları

alınır ve bunlar ayrı ayrı değerlendirilerek tarayıcının lokal doğruluğu belirlenmeye çalışılır. Ayrıca, her bir tarama genişliğinin veya parça-parça sayısallaştırmada tarama matrisinin kapsadığı görüntü genişliği bilindiğinden, tarama genişliklerinin ayrı ayrı değerlendirmesi tarayıcının sayısallaştırma sürecindeki duyarlılığını ortaya koyacaktır.

Günümüzde tarayıcıların çoğunda foto taşıyıcı ile taranacak materyalin sabitliği için, üzerine örtülen cam kapak arası genişlik çok küçük olduğundan bu tür testlerde kullanılan film levhaya göre daha rijit olan cam hedef levhası oraya sığmamaktadır. Bu nedenle testte sadece film levha kullanılmak zorunda kalınmaktadır. Ancak, bu bir eksiklik değildir. Film levha üzerinde her 11.nci nokta değerlendirme için alınacak olursa, yine 11x11 hedefli levha durumu oluşacak, böylece global geometrik değerlendirme bu şekilde de yapılabilecektir.

Renkli tarama yapan tarayıcılarda ortaya çıkan renk kayıt hatasını gidermek için, kalibrasyon levhası; kırmızı, yeşil ve mavi ana renklerinde ayrı ayrı taranır ve yukarıda açıklanan kalibrasyon işlemi her bir renkte elde edilen sayısal görüntülere teker teker uygulanır. Bulunan koordinat değerleri ve vektör grafikleri üst üste çakıştırılıp sergilendiğinde sensörün her bir renk çarkında benzer alanı aynı homojenlikte tarayıp taramadığı belirlenmiş olur.

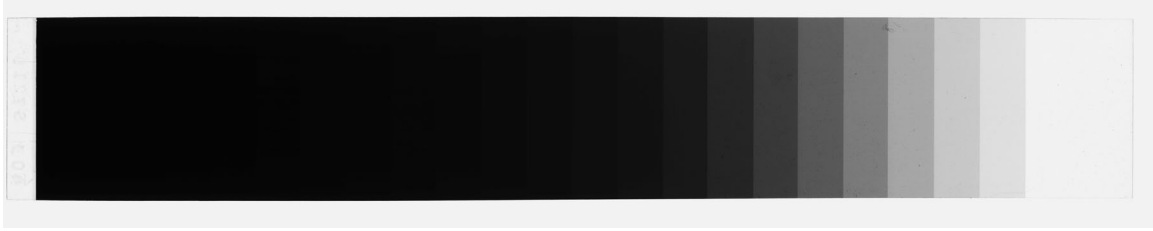
Kalibrasyon İşaretlerinin Referans Koordinatlarının Ölçümü:

Bir tarayıcıdan fotogrametrik amaçlar için beklenen doğruluk düzeyi $\pm 2\mu\text{m}$ olduğundan, bunların geometrik testi için kullanılacak olan kalibrasyon levhası üzerindeki hedeflerin referans koordinatlarının da en az bu doğruluk düzeyinde ölçülmesi gerekir. Cam levha üzerindeki işaretlerin referans koordinatlarının belirlenmesinde ölçüm doğruluğu $\pm 1-2\mu\text{m}$ düzeyinin üzerinde olan monokomparatörler kullanılır. Film levhanın ölçümü ise mikrodensitometrelerle gerçekleştirilebilir. Bu tür aletler, fotoğrafların yüksek çözünürlük düzeyinde sayısallaştırılması ve bunlar üzerindeki işaretlerin konumlarının hassas ölçümüne imkan vermektedir. Burada tarama, ışık kaynağından gelen radyasyonun fotoğrafik levhadan geçen kısmının algılayıcı mekanizma olan CCD detektörler tarafından ölçülüp sayısal bir rakama dönüştürülmesinden oluşmaktadır. Tarama işlemi şeritler halinde yapılır. CCD dizini x yönündeki taramayı sağlarken aletin masasının y yönündeki hareketi de, bu doğrultudaki sayısallaştırmayı mümkün kılmaktadır. Bu tür aletlerle film levha, $\pm 0.1\mu\text{m}$ düzeyinde hassasiyetle taranabilmektedir.

b. Radyometrik Kalibrasyon

Tarayıcıların radyometrik kalibrasyonu, farklı gri tonları içeren ve eşit aralıklı adımlardan oluşan gri ölçek tablosu (Şekil-9) kullanılarak gerçekleştirilir. Tablo-3'de Kodak firması tarafından üretilmiş olan 604ST161 nolu gri ölçeğin içerdiği gri adımları ve onlara karşılık gelen optik yoğunluk değerleri verilmiştir. Görüldüğü gibi, bu gri ölçeğin optik yoğunluk sahası 0.04D ile 3.06D arasında uzanmakta ve 21 eşit aralıklı adımdan oluşmaktadır. Optik yoğunluk değerlerinin adımlar karşısındaki değişimi doğrusaldır. Bunun tarayıcı tarafından korunup korunmayacağına testi için gri ölçek, en küçük piksel boyutunda taranır. Elde edilen veri, gri ölçeğin bir sayısal görüntüsü olacaktır. Öncelikle, bu sayısal görüntü üzerinde her bir adıma ait ortalama gri tonu hesaplanır. Bunun için kenar kısımlar ihmal edilerek her adımdan eşit boyutta

görüntü parçaları kesilip alınır. Daha sonra bu parça görüntülerin her biri için gri tonlarının ortalaması alınarak, gri ölçeğin adımlarına karşılık gelen ortalama gri tonları hesaplanır. Bu şekilde, optik yoğunluk ve gri değerleri arasındaki değişim görsel olarak incelenir.



Şekil-9 : Radyometrik Kalibrasyon İçin Gri Ölçek Tablosu

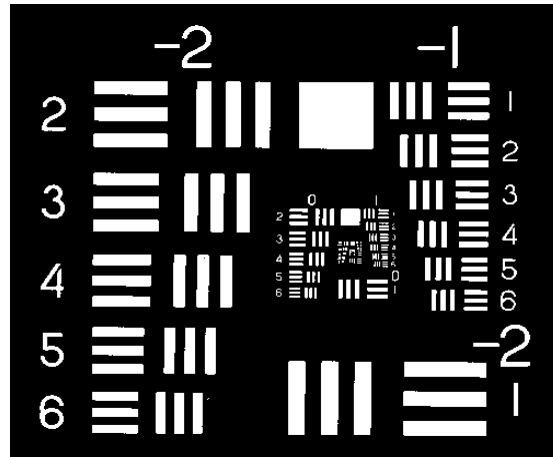
Tablo-3 : Kodak 604ST161 Nolu Gri Ölçeğin Adım ve Optik Yoğunluk Değerleri

Adım	Optik Yoğunluk	Adım	Optik Yoğunluk	Adım	Optik Yoğunluk
1	0.04	8	1.12	15	2.20
2	0.19	9	1.28	16	2.34
3	0.35	10	1.43	17	2.49
4	0.50	11	1.58	18	2.63
5	0.65	12	1.74	19	2.78
6	0.81	13	1.89	20	2.92
7	0.97	14	2.04	21	3.06

c. Tarayıcının Çözünürlüğünün Belirlenmesi

Fotogrametrik tarayıcıların çözünürlüğü,

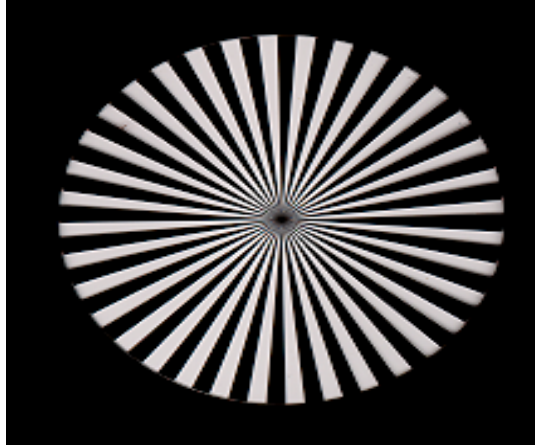
- USAF⁶ levhası (Şekil-10) veya
 - Siemens yıldız-şekilli levhası (Şekil-11)
- kullanılarak belirlenebilir.



Şekil-10 : Tarayıcının Çözünürlüğünün Ölçümü İçin USAF Levha

⁶ USAF : United States Air Force (Amerika Birleşik Devletleri Hava Kuvvetleri)

Cam veya film-tabanlı çözünürlük levhaları, yüksek çözünürlük düzeyinde değişik firmalar tarafından üretilmektedirler. En yoğun kullanılanı, değişik grup hedef sayısına sahip USAF test levhasıdır. Bu test materyali, Itek ve Heidenhain (Dr. Johannes Heidenhain GmbH, Dr.-Johannes-Heidenhain-Str.5, D-8225, Traunreut, Germany) firmaları tarafından 1-1000lp/mm⁷ çözünürlükte ve değişik kalınlıkta çizgileri içerecek şekilde tasarlanmaktadır. 3.6-100lp/mm çözünürlüklü levhalar 80µm ile 5µm arasında piksel boyutlarına sahip tarayıcıları test etmede kullanılabilirken, en ilgi çeken saha 20-50lp/mm arasındadır. Bunun nedeni, hava fotoğraflarının çoğunun bu aralıkta çözünürlüğe sahip olmasıdır. Şekil-10'da farklı boyutta siyah-beyaz çizgi çiftlerinden oluşan



USAF levhası gösterilmektedir. Test aşamasında bu USAF levhası verilen piksel büyüklüklerinde taranır ve ayırt edilebilen en küçük çizgi çifti grubu belirlenir. Daha sonra, bu gruplara karşılık gelen piksel büyüklükleri bulunur.

Şekil-11 : Siemens'in 72 Sektörden Oluşan Yıldız-Şekilli Çözünürlük Levhası

Siemens levhanın kullanımında ise, ilk önce bu test materyali, tarayıcı ile sayısallaştırılır. Buradan oluşan sayısal görüntü üzerinde levha, 72 sektörün ayırt edilemediği keskin olmayan bir merkeze sahip olacaktır. Öncelikle, bu keskin olmayan dairenin yarıçapı ölçülür. Daha sonra bu yarıçap değeri π ile çarpılarak dairenin çevresi bulunur. Eğer bulunan değer, sektör sayısı 72'ye bölünecek olursa, sektör başına düşen genişlik yani çözünürlük değeri elde edilmiş olacaktır.

8. DENEYSEL UYGULAMA

Yüksek çözünürlüklü fotogrametrik tarayıcılar, harita yapım organizasyonlarında kullanılmaya, bu kurumlarda sayısal fotogrametrik iş istasyonlarının yaygınlaşması ve mevcut fotogrametrik verinin (hava fotoğrafları) bu sistemlerde değerlendirilmesi yolunun analog ve analitik değerlendirme sürecine gerçek bir alternatif halini almasından sonra başlamıştır. 1988 yılında Japonya'nın Kyoto şehrinde yapılan ISPRS kongresinde tanıtımı yapılan ve ilk DPW⁸ olma özelliği olan Kern DSP1'den bu yana değişik firmaların ürettiği farklı türde ve yetenekteki sistemler, pazarda yer bulmaktadır. DPW'lerin artan yoğun kullanımı haliyle analog formdaki hava fotoğraflarının sayısallaştırılmasını gerektirdiğinden oldukça pahalı fotogrametrik

⁷ lp/mm : line pairs per mm (mm'deki çizgi çifti)

⁸ DPW : Digital Photogrammetric Workstations (Sayısal Fotogrametrik İş İstasyonu)

tarayıcıların bu sistemlerin yanında ön-donanım olarak satın alınması gerektirmektedir. Bu çalışmada, sayısal fotogrametrik iş istasyonlarına sayısal görüntü verisi sağlayan iki örnek Zeiss SCAI tarayıcısının geometrik performansının testi daha önceki bölümlerde açıklanan kalibrasyon işlemi ile gerçekleştirilmiştir. Aşağıda, bu spesifik çalışmada kullanılan Zeiss SCAI tarayıcısının yapısı ve çalışma prensibi, kalibrasyon materyali, ölçüm yöntemleri ve elde edilen sonuçlar üzerinde ayrıntılı olarak durulacaktır.

a. Zeiss SCAI Tarayıcısı

Bu sayısallaştırıcı bir hava fotoğrafını kapsayabilen tarama formatı ile ara fotoğrafik işlemlere gerek olmaksızın, orjinal negatif filminden sayısal görüntüleri elde etme yeteneğine sahip bir fotogrametrik sistemdir. Bu tarayıcının, otomatik olarak film rulosunu işleme sistemi ve onun bağlı olduğu Silikon Grafik Çalışma İstasyonu üzerinde çalıştırılan SC yazılım paketi mevcuttur. SCAI tarama sisteminin önemli performans nitelikleri; standart sapması $2\mu\text{m}$ 'den daha yüksek olan geometrik konumlama doğruluğu, 1024 adet gri düzeyi sağlayan yüksek radyometrik çözünürlüğü, $7.5\mu\text{m}$ 'ye küçülebilen piksel boyutu, monokrom veya renkli tarama opsiyonu ve 4Mpiksel/sn düzeyinde yüksek veri transfer frekansıdır.

SCAI'nin tasarımı, film rulosunu tarama yeteneğini içermekte ve bu işlem otomatik sarıcı mekanizma ile gerçekleştirilmektedir. Bunun yanı sıra, tarayıcının ana yapısında aydınlanma sistemi, optik modülü ve foto taşıyıcı üzerindeki materyali yüksek presizyonlu tarayan ve ikincil taşıyıcı olarak adlandırılan CCD kamera modülü vardır. Bu modül, üç adet ve birbirine paralel (kırmızı-yeşil-mavi) CCD satırlarından oluşan tek-boyutlu dizini içermektedir. İkincil taşıyıcı, sürekli düzende CCD dizini tarama doğrultusunda hareket ettiren ana taşıyıcı, onu tarama genişliği tarafından tanımlanan aralıklarda ilerletmektedir. Zeiss SCAI aletinde tarama genişliği 39.424mm'dir. Böylece, 240mm boyutunda bir altlık, 7 adet tarama genişliği ile taranabilmektedir. Foto taşıyıcı üzerinde taranan materyal bölümü, CCD kamera üzerine ayna mercek sistemi sayesinde görüntülenir. Lamba modülü ve hareketli fiber optik sistem sayesinde tarama genişliğine karşılık gelen görüntü bölümü aydınlatılır. Işık kaynağı olarak 150 Wattlık halojen lamba kullanılmaktadır. Hareketli foto taşıyıcının sürücü ve kontrol sistemi; presizyonlu konumlandırma mekanizması, kodlayıcılar ve motorları içermektedir.

SCAI tarayıcısının gerçekleştirdiği işlevler, SC-yazılımı ile düzenlenmektedir. Tarama fonksiyonları; kaynak film formatının konumunun tanımlanması, otomatik sarıcı kullanılarak film rulosunun operatör yardımıyla işlenmesi, $7.5\mu\text{m}$ 'den $224\mu\text{m}$ 'ye uzanan çözünürlük seçimi ve diğer yetenekleri içermektedir.

b. Kalibrasyon Materyali – Wild A7 Grid Levhası

Bu deneysel çalışmada, kalibrasyon levhası olarak Wild A7 analog değerlendirme aletlerinin kalibrasyonu amaçlı olarak tasarlanmış grid levhası kullanılmıştır. Bu cam levha üzerinde yüksek presizyonlu grid çizgilerinin oluşturduğu 121 (11x11) adet (+) şekilli kalibrasyon işareti bulunmaktadır. 1968 yılındaki ISPRS kongresinde Profesör Hallert, bu levhanın bir benzeri ile

farklı Wild A7 analog değerlendirme aletleri üzerinde yaptığı kalibrasyon çalışmalarından elde ettiği sonuçları aşağıda şekilde vermiştir:

Alet No	Sol Mekanik Projektör	Sag Mekanik Projektör
362	$\pm 3.8\mu\text{m}$	$\pm 4.6\mu\text{m}$
515	$\pm 3.8\mu\text{m}$	$\pm 4.4\mu\text{m}$
2153	$\pm 2.8\mu\text{m}$	$\pm 2.7\mu\text{m}$

Bu tablodaki sonuçlar, Prof. Hallert tarafından kullanılan A7 grid levhasının $\pm 1-1.5\mu\text{m}$ düzeyinde doğruluğa sahip olması gerektiğini ortaya koymuştur.

İsveçre Zürih ETH Enstitüsü öğretim üyelerinden Profesör Kasper'de, Wild firmasının A7 değerlendirme aletlerinin doğruluğunu test etmiş, bu amaç için 40 ayrı alet üzerinde araştırma yapmıştır. Sonuç olarak, $\pm 5\mu\text{m}$ düzeyinde geometrik doğruluk elde etmiştir. Prof. Kasper, bu çalışmada cam kalibrasyon levhası üzerindeki grid çizgilerinin teorik konumlarından $3\mu\text{m}$ 'den fazla sapmaması gerektiğini vurgulamıştır. Eğer gerçekten Wild A7 grid levhasının çizgileri için izin verilen maksimum hata bu ise, kullanılan levhanın doğruluğu $\pm 1-1.5\mu\text{m}$ düzeyinde olmak zorundadır.

Wild A7 grid levhasının bu düzey doğruluğu onun bu çalışmada kalibrasyon materyali olarak seçilmesine sebep olmuştur. Ancak, çalışmada yararlanılan levhayı tekrar kalibre edip onun gerçekten bu doğruluğu sağlayıp sağlamadığını görmek gerekirdi. Fakat, bu amaç için kullanılabilecek monokomparatör bulunamadığından dolayı bu test gerçekleştirilememiştir.

c. Zeiss SCAI Tarayıcılarının Geometrik Kalibrasyon Sonuçları

Bu amaç için öncelikle kalibrasyon levhası, tarayıcının set edilebildiği en küçük piksel boyutu olan $7.5\mu\text{m}$ 'de taranmıştır. Ayrıca, diğer piksel boyutlarının etkisini görmek için levha her iki tarayıcı da kullanılmak suretiyle sırasıyla 14, 21, 28 ve $56\mu\text{m}$ piksel büyüklüklerinde sayısallaştırılmıştır. Bu piksel boyutlarında elde edilen sayısal görüntüler üzerindeki kalibrasyon işaretlerinin görüntü koordinatları, PCI EASI/PACE uzaktan algılama yazılımının GCPWorks alt modülü kullanılarak manuel olarak ölçülmüştür. Bunun için bilgisayar ekranında 10 kat büyütülmüş sayısal görüntüler kullanılmış ve koordinatlar biri gidiş diğeri de dönüş yönünde olmak üzere iki defa yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. 121 adet hedefin elde edilen görüntü koordinatları, benzerlik ve polinom transformasyonlarını gerçekleştiren LINCON ve POLY25 Fortran 77 programları kullanılarak referans koordinat sistemine dönüştürülmüş ve x ve y yönündeki karesel ortalama hata değerleri, Tablo-4 ve Tablo-5'de mikrometre cinsinden her iki tarayıcı için sunulmuştur. Daha sonra her bir kalibrasyon işareti için elde edilen dx ve dy koordinat farklarından yararlanarak ds hata vektörleri bulunmuş ve farklı piksel büyüklükleri için BASIC programlama dilinde kodlanmış VECTORPL yazılımı kullanılarak çizdirilmiştir. Şekil-12(a) ve (b), SCAI tarayıcılarından birine ait 7 ve $56\mu\text{m}$ piksel boyutlarında benzerlik transformasyonu sonucu elde edilen hata vektörlerini göstermektedir.

d. Bulunan Karesel Ortalama Hata Değerleri ve Hata Vektörlerinin Yorumlanması

Her iki tarayıcı ile en küçük piksel büyüklüğü $7.5\mu\text{m}$ 'de affın transformasyon sonucu elde edilen $\pm 2-4\mu\text{m}$ arasında değişen doğruluk düzeyi Dr. Baltsavias tarafından elde edilenlerle aynı paralelliktedir. Özellikle küçük piksel boyutlarında görünür hale gelen sistematik hata paternleri ilginçtir (Şekil-12(a)). Bu paternler büyük piksel boyutlarında daha az belirgindir. Bunun sebebi, piksel boyutunun büyümesi ve manuel/görsel metot ile kalibrasyon işaretinin merkezinin ölçülmesinin zorlaşmasındandır (Şekil-12(b)). Ayrıca, büyük piksel boyutlarında karesel ortalama hata değerlerinin büyümesi ve anlamsızlaşması sürpriz değildir. Çünkü tarayıcı bu piksel boyutlarında kendi doğruluğunu kaybetmekte, ölçümlerin güvenilirliği azalmaktadır. Bunun yanı sıra Wild A7 grid levhasının çok ince çizgilerinin boyutu ($20\mu\text{m}$) üzerindeki bir piksel büyüklüğünde tarama ve ölçüm anlamsız operasyona dönüşmektedir.

Tablo-4 ve Tablo-5'den çıkarılabilecek diğer önemli bir nokta, affın transformasyonun uygulanması ile hata değerlerinde kaydedilen büyük bir iyileşme ve polinom dönüşümünün bundan sonraki parametrelerinin etkili artı bir düzeltme getirmemesidir. Bunun anlamı, tarayıcılarda mevcut foto taşıyıcının mekanik konumlandırma hataları, dönüklük ve ölçek problemleri (tarama genişlikleri arasında bindirme veya boşluk) tamamıyla affın transformasyonun uygulanmasından sonra ortadan kalkmaktadır. Ancak bu çalışmada, 121×121 hedefli film levha kullanılmadığından tarayıcıların zig-zag taramaları sonucu oluşan 7 adet tarama genişliği arasındaki boşluk ve bindirmelerin etkileri incelenememiş ve bu nedenle de tarayıcının lokal kalibrasyon analizi yapılamamıştır.

Bu proje kapsamında incelenen tarayıcıların radyometrik kalibrasyonunun da yapılması hedeflenmişti. Ancak bu test için gereken materyallerin araştırmacıların laboratuvarlarında mevcut olmaması, çalışmanın bu önemli kısmının gerçekleştirilmesini engellemiştir.

9. SONUÇLAR

Bu çalışmada, fotogrametri ve uzaktan algılama dünyasında giderek kullanımı yaygınlaşan sayısal fotogrametrik iş istasyonlarının değerlendirebildiği sayısal hava fotoğrafı ve uydu verilerini sağlayan ve yan-modül olarak işletilen yüksek çözünürlüklü fotogrametrik tarayıcıların çalışma prensipleri, tasarım mimarileri, ana elemanları ve potansiyel hata kaynakları ayrıntılı olarak verilmiştir. Sayısal harita üretim projelerine temel veriyi sağlamalarından dolayı, bu tür tarayıcıların her alt-elemanının işletim fonksiyonları ve ana problemleri ortaya konulmuştur. Bu sistemlerin oluşturdukları sayısal görüntü verisinin geometrisine ve radyometrisine kattıkları hataların kaynakları ve bunların giderilmesi için gereken kalibrasyon işlemlerinin uygulanması sonucu bulunan düzeltme modelleri tartışılmıştır. Daha sonra, deneysel uygulama olarak Zeiss SCAI model iki örnek yüksek çözünürlüklü fotogrametrik tarayıcının performans karakteristikleri çalışma içerisinde geliştirilen geometrik kalibrasyon işlemleri ile belirlenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- ✓ En küçük piksel boyutunda ($7.5\mu\text{m}$) elde edilen sayısal görüntüler her iki tarayıcı için sistematik hata paternleri oluşturmuştur. Bunlara uygulanan affın transformasyon sayesinde,

- $\pm 2-4\mu\text{m}$ düzeyinde geometrik doğruluğa ulaşılmıştır. Bu tür bir değerin diğer çalışmalarda sağlananlarla aynı seviyede olduğu görülmüştür.
- ✓ Tarayıcılarla test levhasının diğer piksel büyüklüklerinde de sayısal görüntüleri elde edilmiş ve değerlendirilmiştir. Basitçe, en küçük piksel boyutunda taranan görüntünün yeniden-örnekleme sonucu bu veriler elde edildiğinden, hata değerleri ona göre büyümekte ve ölçüm doğruluğu pikselin genişlemesinden dolayı kaybolmaktadır. Bunun sonucu hata vektörleri paterni tarayıcının kendisinde mevcut olan potansiyel hatalar yerine sayısal görüntü üzerindeki hedeflerin görüntü koordinatlarının ölçüm doğruluğunu yansıtmaya başlamaktadır.
 - ✓ Her ne kadar düzenli ve biri gidiş diğeri de dönüş yönünde yapılan koordinat ölçümlerinin ortalaması alınarak kalibrasyon işaretlerinin görüntü koordinatları belirlenmiş olsa da, manuel ölçümün yetersizliği değişik araştırmalarla ortaya koyulmuştur. Hedef görüntü koordinatlarının belirlenmesinde en az 0.1 piksel düzeyinde hassasiyet üreten otomatik sayısal görüntü eşleştirme tekniklerinin kullanımı daha doğru olacaktır. Ayrıca, artık yüksek çözünürlüklü tarayıcıların geometrik kalibrasyonunda yaygın test materyali halini almaya başlayan ve üzerinde binlerce kalibrasyon işareti taşıyan film levhaların kullanımı ile manuel ölçüm zorlaşmış ve sayısal görüntü eşleştirme teknikleri ile piksel-altı düzeyli ölçüm teknikleri alternatifsiz duruma gelmiştir.
 - ✓ Tarayıcıların satır-satır veya parça-parça sayısallaştırma şekilleri sonucu oluşan tarama genişlikleri arasındaki bindirme, boşluk ve ölçek problemleri ayrı bir değerlendirme konusudur. Ancak, bu tür analiz için her bir tarama genişliğinin lokal kalibrasyon modeli ve hata vektörleri tablosunun geliştirilmesi gerekir. Bu çeşit değerlendirme de ise, üzerinde işaret yığınlarını barındıran ve son teknoloji tarayıcılara yerleştirilmesi kolay olan film-tabanlı kalibrasyon levhalarına ihtiyaç vardır.
 - ✓ Kalibrasyon işaretlerinin sayısal görüntü işleme yazılımları ile görüntü koordinatlarının ölçümünde hedef paternini oluşturan piksellerin gri düzeyleri temel teşkil etmektedir. Bu nedenle, gri tonlarının tarayıcı tarafından yeteri doğrulukta sayısallaştırıldığına testi gerekir. Bu tür bir analiz gri-ölçek tablolarının kullanıldığı radyometrik kalibrasyon işlemleri ile yapılabilir. Böylece, tarayıcıların mimarisinde mevcut olan katı-hal CCD sensörlerin (solid-state CCD sensors) kendilerine ulaşan enerjiye doğru karşılık verip vermediği belirlenebilir.
 - ✓ Değişik mekanik, optik ve elektronik elemanlardan oluşan tarayıcıların fotogrametrik harita üretim uygulamaları için yeteri düzeyde fonksiyon gösterip göstermedikleri, düzenli aralıklarla (örneğin yılda en az bir kere) yapılacak geometrik ve radyometrik kalibrasyon testleri sonucu ortaya çıkarılabilmektedir.

KAYNAKLAR

- /1/ Baltsavias, E.P.,
Bill, R., : Scanners – A Survey of Current Technology and Future Needs,
: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing,
30(1), 1994.
- /2/ Baltsavias, E.P., : The Agfa Horizon Scanner – Characteristics, Testing and
: Evaluation, International Archives of Photogrammetry and Remote
Sensing, 30(1), 1994.
- /3/ Baltsavias, E.P., : Test and Calibration Procedures for Image Scanners, International
: Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 30(1), 1994.
- /4/ Baltsavias, E.P., : Quality Analysis and Calibration of DTP Scanners, International
: Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 31(B1), 1996.
Waegli, B.,
- /5/ Baltsavias, E.P., : Photogrammetric Scanners – Survey, Technological Developments
: and Requirements, International Archives of Photogrammetry and
Remote Sensing, 32(1), 1998.
- /6/ Bethel, J., : Calibration of a Photogrammetric Image Scanner, In Proceedings of
: ACSM/ASPRS Annual Convention, 1, 1994.
- /7/ Bolte, U., : Geometric and Radiometric Analysis of a Photogrammetric Image
: Scanners, International Archives of Photogrammetry and Remote
Sensing, 31(B1), 1996.
Jacobsen, K.,
Wegmann, H.,
- /8/ Büyüksalih, G., : Geometric and Radiometric Calibration of Video Infrared Imagers
: for Photogrammetric Applications, Ph. D Thesis, University of
Glasgow, November 1997.
- /9/ Büyüksalih, G., : Pıksel-Altı Doğruluklu Görüntü Eşleştirme Teknikleri ve
: Fotogrametrik Aplikasyonları, 7. Harita Kurultayı, Ankara, 1999.
- /10/ Gonzalez, R., : Digital Image Processing, Addison-Wesley, 1987.
Wintz, P.
- /11/ Kölbl, O., : Survey of High-Quality Photographic Scanners, Mapping and
: Remote Sensing Tools for the 21st Century, American Society for
Photogrammetry and Remote Sensing, 1994.
- /12/ Kölbl, O., : Tone Reproduction of Photographic Scanners, In Proceedings of the
: OOEPE Workshop on ‘Application of Digital Photogrammetric
Workstation’, 1996.
Bach, U.,

- /13/ Schenk, T., : Digital Photogrammetry, Vol.1, TerraScience, 1999.
- /14/ Toth, C.K., : Image Compression in Photogrammetric Practice : An Overview, Digital Photogrammetry – An Addendum to Manual of Photogrammetry, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996.
- /15/ Trinder, J.C., : Pointing Precision on Aerial Photography, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.50, 1984.

Tablo-4 : Zeiss SCAI-1 Tarayıcısının Kalibrasyon Sonuçları (mikrometre)

Transformasyon İşlemi / Piksel Boyutu	7 μ m		14 μ m		21 μ m		28 μ m		56 μ m	
	m _x	m _y	m _x	m _y	m _x	m _y	m _x	m _y	m _x	m _y
Benzerlik	5.60	5.67	5.18	5.46	6.09	6.51	9.24	9.52	17.36	16.24
3-Terms (Afin)	1.68	1.89	2.24	2.66	3.99	4.62	7.56	7.84	16.24	15.12
4-Terms (xy)	1.68	1.89	2.24	2.66	3.99	4.62	7.56	7.84	16.24	15.12
5-Terms (x ²)	1.54	1.89	2.24	2.52	3.99	4.62	7.56	7.84	16.24	15.12
6-Terms (y ²)	1.54	1.89	2.10	2.52	3.99	4.62	7.28	7.84	16.24	15.12
7-Terms (x ² y)	1.54	1.89	1.96	2.52	3.99	4.62	7.28	7.84	16.24	15.12
8-Terms (xy ²)	1.54	1.82	1.96	2.52	3.99	4.62	7.28	7.84	16.24	15.12
9-Terms (x ² y ²)	1.54	1.82	1.96	2.52	3.99	4.62	7.28	7.84	16.24	15.12
10-Terms (x ³)	1.54	1.68	1.96	2.52	3.99	4.62	7.28	7.56	16.24	15.12
11-Terms (y ³)	1.47	1.68	1.96	2.52	3.99	4.62	7.00	7.56	16.24	15.12
12-Terms (x ³ y)	1.47	1.68	1.96	2.52	3.99	4.62	7.00	7.56	16.24	15.12
13-Terms (xy ³)	1.40	1.68	1.96	2.52	3.99	4.62	7.00	7.28	16.24	15.12

Tablo-5 : Zeiss SCAI-2 Tarayıcısının Kalibrasyon Sonuçları (mikrometre)

Transformasyon Türü / Piksel Boyutu	7 μ m		14 μ m		21 μ m		28 μ m		56 μ m	
	m _x	m _y	m _x	m _y	m _x	m _y	m _x	m _y	m _x	m _y
Benzerlik	4.41	3.43	4.48	5.18	5.88	5.25	7.84	7.56	14.56	15.12
3-Terms (Afin)	3.71	2.52	3.64	4.48	5.04	4.20	7.28	7.00	14.00	14.56
4-Terms (xy)	3.29	2.52	3.50	4.06	4.83	4.20	7.28	7.00	14.00	14.56
5-Terms (x ²)	3.29	2.52	3.50	3.92	4.83	4.20	7.28	7.00	14.00	14.56
6-Terms (y ²)	3.29	2.45	3.36	3.92	4.83	4.20	7.28	7.00	14.00	14.56
7-Terms (x ² y)	3.22	2.45	3.36	3.92	4.83	4.20	7.28	7.00	14.00	14.56
8-Terms (xy ²)	3.22	2.45	3.36	3.92	4.83	4.20	7.28	7.00	14.00	14.56
9-Terms (x ² y ²)	3.22	2.45	3.36	3.78	4.83	4.20	7.28	7.00	14.00	14.56
10-Terms (x ³)	3.22	2.45	3.36	3.78	4.83	4.20	7.28	7.00	12.88	14.56
11-Terms (y ³)	3.22	2.38	3.36	3.64	4.83	4.20	7.28	7.00	12.88	14.00
12-Terms (x ³ y)	3.15	2.38	3.36	3.64	4.83	4.20	7.28	7.00	12.88	14.00
13-Terms (xy ³)	3.15	2.38	3.36	3.64	4.83	4.20	7.28	7.00	12.88	14.00