

168500

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YIĞMA YAPILARIN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİNE DAYALI ANALİZ MODELİNİN
OLUŞTURULMASINDA FOTOGRAMETRİK VERİLERİN
KULLANILMASI**

Mimar Meltem VATAN

**FBE Mimarlık Anabilim Dalı Yapı Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

17.01.2005

[Signature]

[Signature]

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Görün ARUN

İSTANBUL, 2005

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÖNSÖZ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Problem	1
1.2 Amaç	1
1.3 Önem	2
1.4 Varsayım	2
1.5 Kapsam	2
2. FOTOGRAMETRİNİN TANIMI	4
2.1 Giriş	4
2.2 Fotogrametrinin Temelleri	4
2.3 Fotoğrafın Optik, Geometrik ve Fiziksel Temelleri	8
2.3.1 Metrik Kameralar (Ölçü Kameraları)	9
2.4 Mimaride Fotogrametri	12
2.4.1 Resme Dayalı (Fotogrametrik) Yöntem	12
2.4.2 Laserle Tarama (Laser Scan) Yöntemi	16
2.4.3 Resme Dayalı (Fotogrametrik) Yöntem İle Laser Tarama Yönteminin Karşılaştırılması	17
3. YIĞMA KAGIR YAPI	20
3.1 Yığma Kagir Yapı Elemanları	21
3.2 Yığma Kagir Yapılarda Analiz Yöntemleri	24
4. YAPI ELEMANLARININ SONLU ELEMANLARLA TANIMLANMASI	26
4.1 Sonlu Eleman Tipleri	26
4.2 Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan Elemanlar	30
4.3 Sonlu Elemanlar Analizinde İşlem Adımları	33
4.4 Yığma Kagir Yapılarda Modelleme Yaklaşımları	34
4.4.1 Makro Modelleme Yaklaşımı	36
4.4.2 Mikro Modelleme Yaklaşımı	38
4.4.2.1 Ara Yüzey Elemanları İle Modelleme (Süreksiz elemanlarla sonlu elemanlar yöntemi – FEMDE)	39
4.4.2.2 Ayrik Elemanlar İle Modelleme (DEM)	40

4.5	Sonlu Elemanlar Yöntemine Dayalı Analiz Model Örnekleri.....	40
4.5.1	Edirnekapi Mihrimah Sultan Camisi modeli (Ünay, 2002).....	40
4.5.2	Sao Vicente de Fora modeli (Giordano vd, 2002).....	43
4.5.3	İtalya’da Bir Kilisenin Analiz Modeli (Sorace ve Terenzi, 2002).....	45
5.	EĞRİKEMER (KOVUKKEMER) UYGULAMASI.....	47
5.1	Eğrikemer’in (Kovukkemer) Kısa Tarihçesi	47
5.2	Eğrikemer’e (Kovukkemer) İlişkin Elde Edilen Fotogrametrik Veriler.....	49
5.3	Eğrikemer’in Fotogrametrik Verileriyle Sonlu Elemanlar Yöntemine Dayalı Analiz Modelinin Oluşturulması	52
5.3.1	Fotogrametri Bölümü’nden Gelen Verilerin Düzenlenmesi.....	53
5.3.2	Sonlu Elemanlar Yöntemine Dayalı Analiz Modelinin Kurulması.....	53
6.	SONUÇLAR.....	60
KAYNAKLAR.....		62
ÖZGEÇMİŞ.....		65



SİMGE LİSTESİ

f_k	Yığma yapı elemanının karakteristik basınç dayanımı
f_m	Harcın ortalama basınç dayanımı
f'_b	Birim elemanın (taş veya tuğla) basınç dayanımı
K, α, β	Sabitler
τ	Kayma dayanımı
τ_0	Kohezyon değeri
μ	İç sürtünme açısı
f_n	Basınç dayanımı
f_b	Birim elemanın basınç dayanımı
δ_m	Birim elemanın nem oranını gösteren faktörü
δ_s	Birim elemanın biçim veya boyuta bağlı olan şekil faktörü



KISALTMA LİSTESİ

CAD	Grafik tabanlı çizim programı
CBS	Coğrafi bilgi sistemi
DTM	(Digital terrain model) Sayısal yükseklik modeli



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Fotogrametrik ürünler	5
Şekil 2.2 Dik koordinat sistemi (Aydın, 1984).....	6
Şekil 2.3 İzdüşüm yöntemleri (Yaşayan, 1996)	7
Şekil 2.4 İzdüşüm ışını ve izdüşüm merkezi (Yaşayan, 1996).....	10
Şekil 2.5 Fotoğraf düzlemi ve izdüşüm merkezi (Yaşayan, 1996).....	10
Şekil 2.6 Asal noktanın konumu (Yaşayan, 1996)	11
Şekil 2.7 Görüntü doğrultma sırası (Chen ve Richard, 2003)	13
Şekil 2.8 Stereo çiftinin bir fotoğrafı (Emem vd., 2002).....	14
Şekil 2.9 Dolmabahçe Sarayı'nın stereo modeli (Emem vd., 2002)	14
Şekil 2.10 Yüzey modeli (DTM data) (Emem vd., 2002)	15
Şekil 2.11 Cephenin 1/100 ölçekli ortofotosu (Emem vd., 2002)	15
Şekil 2.12 Cephe dokusunun (gridlerinin) oluşturulması (Emem vd., 2002).....	16
Şekil 2.13 Fotoğrafik gerçeklik (photorealistic view) (Emem vd., 2002).....	16
Şekil 2.14 Fotogrametrik nokta bulutu (Caprioli ve Scognamiglio, 2003)	18
Şekil 2.15 Laser tarayıcı nokta bulutu (Caprioli ve Scognamiglio, 2003)	18
Şekil 2.16 Fotogrametrik sayısal yükseklik modeli (Caprioli ve Scognamiglio, 2003).....	18
Şekil 2.17 Laser tarayıcı sayısal yükseklik modeli (Caprioli ve Scognamiglio, 2003).....	19
Şekil 3.1 Kemerde yük akışı (Moore, F., 1999)	22
Şekil 3.2 Kemer taşında çekirdek bölgesi	22
Şekil 3.3 Kemerde meydana gelen itkiler (Moore, F. 1999)	23
Şekil 3.4 Yığma kagir yapıda ahşap ve tonoz döşeme düzenlemeleri (Huerta, 2001).....	24
Şekil 3.5 Yığma kagir yapıda volta döşeme düzenlemesi (Maheri ve Rahmani, 2003).....	24
Şekil 4.1 Mühendislik probleminin sonlu elemanlarla tanımlanması	26
Şekil 4.2 Bir boyutlu çubuk eleman (Göncü, 1997)	27
Şekil 4.3 İki boyutlu sonlu elemanlar (Göncü, 1997).....	27
Şekil 4.4 Üç boyutlu sonlu elemanlar (Göncü, 1997)	28
Şekil 4.5 Düğüm noktaları sürekli, kenar ayrıtları süreksiz elemanlar	29
Şekil 4.6 Gelişmiş, bir boyutlu çubuk, iki boyutlu dikdörtgen ve üçgen elemanlar	29
Şekil 4.7 Üçgenlere bölünmüş düzensiz eleman (Huerta, 2001).....	30
Şekil 4.8 Çerçeve ve kemer modelinin çubuk elemanlarla oluşturulması.....	31
Şekil 4.9 Kabuk elemanlar (Wilson, 2002)	31
Şekil 4.10 Katı (solid) eleman (Wilson, 2002).....	32
Şekil 4.11 Modelleme yaklaşımları (Lourenço, 1994)	35
Şekil 4.12 Yığma yüzeyde hasar mekanizmaları (Lourenço, 1994).....	36
Şekil 4.13 Sürekli elemanın düğüm elemanı olarak tanımlanması (Giordano vd, 2002).....	39
Şekil 4.14 Mihrimah Camisi sonlu elemanlar modeli (Ünay, 2002).....	41
Şekil 4.15 Düşey yük güvenlik faktörü SF(g) (Ünay, 2002).....	42
Şekil 4.16 Deprem için güvenlik faktörü SF(eq) (Ünay, 2002)	42
Şekil 4.17 ABAQUS sonlu elemanlar modeli (Giordano vd, 2002)	43
Şekil 4.18 CASTEM 2000 sonlu elemanlar modeli (Giordano vd, 2002)	43
Şekil 4.19 UDEC iç sonlu elemanlar modeli (Giordano vd, 2002).....	44
Şekil 4.20 Arkad cephesi ve test modeli (Giordano vd, 2002).....	44
Şekil 4.21 Analiz sonuçları ve test modelinin karşılaştırılması (Giordano vd, 2002).....	45
Şekil 4.22 Kilisenin cephe görünüşü ve üç boyutlu analiz modeli (Sorace ve Terenzi, 2002)	46
Şekil 4.23 Gerilme ve çatlak oluşumları (Sorace ve Terenzi, 2002).....	46
Şekil 5.1 Eğrikemer (Kovukkemer) genel görünüşü (Çeçen, 1994)	47
Şekil 5.2 Eğrikemer'de plan düzlemindeki kırıklık (Çeçen, 1994).....	48
Şekil 5.3 Eğrikemer genel görünüş (Çeçen, 1994).....	48
Şekil 5.4 Eğrikemer ana kısım (Çeçen, 1994)	49

Şekil 5.5 Eğrikemer fotogrametrik nokta bulutu	49
Şekil 5.6 Fotogrametrik yöntemle elde edilen Eğrikemer doğu cephesinin bir bölümü	50
Şekil 5.7 Fotogrametrik yöntemle elde edilen Eğrikemer batı cephesinin bir bölümü	50
Şekil 5.8 Eğrikemer doğu cephesi, 1 – 10 aksı, rölöve çizimi	51
Şekil 5.9 Eğrikemer doğu cephesi, 11 – 21 aksı, rölöve çizimi	51
Şekil 5.10 Eğrikemer batı cephesi, 1 – 10 aksı, rölöve çizimi	51
Şekil 5.11 Eğrikemer batı cephesi, 11 – 21 aksı, rölöve çizimi	52
Şekil 5.12 Eğrikemer kesitleri rölöve çizimi	52
Şekil 5.13 Fotogrametrik nokta buluntun sonlu elemanlar modeli	54
Şekil 5.14 Sonlu eleman modelinde düğüm noktası bilgileri	55
Şekil 5.15 Modelde kullanılmayacak öğelerin temizlenmesi	56
Şekil 5.16 Fotogrametrik çizimlere aks verilmesi	56
Şekil 5.17 Rölöve çizimindeki kesit bilgilerine göre fotogrametrik çizimlerin düzenlenmesi	57
Şekil 5.18 Kemerler, hatıllar ve taş örgülerin ayrıştırılması	58
Şekil 5.19 Karşılıklı cephelerin birleştirilmesi	58
Şekil 5.20 Eğrikemer modeli	58
Şekil 5.21 Eğrikemer modeli	59



ÖNSÖZ

Öncelikle, tez çalışmamın tüm aşamalarında bilgi, katkı ve kaynaklarını benimle paylaşan ve desteğini esirgemeyen, yapıcı eleştirileriyle çalışmamda yol almamı sağlayan, değerli hocam Prof. Dr. Görün Arun'a sonsuz teşekkürler.

Fotogrametri Bilimi konusunda bilgi edinmemi sağlayan YTÜ Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Ana Bilim Dalı'ndaki hocalarıma ve arkadaşlarıma,

Ayrıca akademik çalışma yapmam konusunda beni teşvik eden, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme ve Ahmet Kaptan'a teşekkürlerimi sunarım.



ÖZET

Tarihi ve kültürel mirasın belgelenmesinde çeşitli yöntemler vardır. Fotoğraflar, eskizler, perspektifler, video kayıtları vb belgelerin yanı sıra fotogrametri yöntemiyle veri toplama da bir belgeleme yöntemidir. Gelişen bilgisayar teknolojisi ile fotogrametrinin mimarlıkta kullanılması yaygınlaşmaktadır. Fotogrametrik veri toplama diğer yöntemlere göre daha hızlı ve daha hassas bir yöntemdir.

Fotogrametri yönteminde metrik kameralarla fotogrametrik ölçme teknikleri ve laser tarama ile ölçme teknikleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin her ikisinden de elde edilen veriler mimarlıkta kullanılabilir. Böylelikle yapının rölövesinin çıkarılması ve çizimlerinin yapılması için harcanan emek ve süre azalmış olur.

Yapının mevcut durumunun tespit edilmesi için yapının üç boyutlu modelinin oluşturulması gerekmektedir. Bu modelin sayısal analizi yapılarak yapının durumu tespit edilir. Bu işlemler için çeşitli sayısal analiz programları kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın olanı sonlu elemanlar yöntemine dayalı analiz programlarıdır.

Yapının sonlu elemanlar yöntemine dayalı analiz modeli çeşitli şekillerde oluşturulabilir. Tez çalışmasında fotogrametrik verilerden yararlanarak analiz modelinin oluşturulması araştırılmıştır. Çeşitli analiz modelleri incelenmiş ve tarihi Eğrikemer üzerinde bir uygulama yapılmıştır. Belli bir programa bağlı kalmadan, fotogrametrik veriler kullanılarak sonlu elemanlar yöntemine dayalı analiz modelleri incelenmiştir. Üç boyutlu düğüm noktaları modeli ve üç boyutlu katı model kurulmuştur.

Fotogrametri ve mimarlık disiplinleri ortak çalışmalar yaparak tarihi ve kültürel mirasın belgelenmesi daha hızlı ve daha hassas olarak yapılabilir. Gelişen bilgisayar teknolojisi ile fotogrametrik verilerden yararlanarak yığma yapıların sonlu elemanlar modeli kurulabilir.

Anahtar kelimeler: Yığma yapı, fotogrametrik ölçme, sonlu elemanlar yöntemi, üç boyutlu model.

ABSTRACT

There are various methods of documentation the historical and cultural heritage. Besides photographs, sketch, perspectives, video records etc photogrammetry is also a method for collecting the data. Photogrammetry became a widespread method in architecture, with developing computer industry. In comparison with the other documentation methods, photogrammetry is faster and more precise.

Metric cameras and laser scanning are used as measurement techniques in photogrammetric method. Data collected from both of the techniques can be used in architecture. In this way, time and effort is reduced while making as built drawings. Structure's 3D model should be formed for determining the existing situation of the building. With the structural analysis of the model existing situation of building is determined. Various analyses methods are used for these processes. The most widespread one is finite element method.

The finite element model of the structure can be evaluated by different ways. In this thesis, the photogrammetric data analysis model is studied. Several methods are studied and the application is done on the historical Eğrikemer. Without depending a specific program, the finite element models are studied by using photogrammetric datas. 3D node points model and 3D solid model are evaluated.

Participated projects of architecture and photogrammetry disciplines can make the historical and cultural heritage documentation faster and more precise. With developing computer technology, by taking advantage of photogrammetric data acquisition, finite element model of masonry buildings can be evaluated.

Keywords: Masonry, photogrammetric data acquisition, finite element method, 3D model.

1. GİRİŞ

1.1 Problem

Geçmişten bugüne gelen ve insanlık tarihi için önemli olan yapıların bugünkü durumunun tespit edilmesi, korunması ve gelecek kuşaklara aktarılması bir insanlık görevidir. Bu mirasın korunması için çeşitli belgeleme yöntemleri kullanılmaktadır. Tarihi ve kültürel mirasın belgelenmesinde başta mimarlar olmak üzere çeşitli bilim dalları ortak çalışmalar yapmaktadır. Bugüne kadar gelebilen tarihi yapıların büyük bir kısmı yığma kagir yapılardır.

Tarihi ve kültürel mirasın korunması ve belgelenmesi konusunda çalışan uzmanlar, yapıyı ifade etmek için resim, fotoğraf, çizim gibi çeşitli belgelere ihtiyaç duyarlar. Bu veriler çeşitli şekillerde elde edilebilir. Geleneksel olarak yapının rölövesi çıkarılır ve buna göre plan, kesit ve görünüşler çizilir. Bu bilgiler kullanılarak da yapının üç boyutlu modeli kurulabilir. Ancak bu yöntem oldukça uzun zaman almakta ve yapılan ölçmeler milimetrik hassasiyette olamamaktadır. Yapı modelinin kurulmasında üç boyutlu verilerle çalışan fotogrametri bilimi kullanılır hale getirilebilirse belgeleme süreci çok daha hızlı ve ölçmeler daha hassas olarak gerçekleştirilebilir. Bunu sağlamak için iki bilim dalı arasında ortak bir dil kurulması ve birbirinin ihtiyacını ve çalışma biçimini anlar hale getirilmesi gerekmektedir. Fotogrametri yöntemi, yüzey üzerinde çok sayıda nokta işaretler ve üçgen veya dörtgen ağlardan oluşan yüzey modelleri kurar. DTM (digital terrain model) olarak anılan bu yöntemin; inşaat mühendisliği, tarım bilimi, çevre bilimleri gibi geniş uygulama alanları vardır. Sayısal yükseklik modeli olarak ifade edilen DTM, yüzeyi tanımlayan topolojik bir idealleştirmedir.

Fotogrametrik yöntemle elde edilen verilerin mimarlık alanında da kullanılır hale getirilmesi ve sonlu elemanlar yöntemine dayalı analiz modelinin oluşturulmasında kullanılması problemi gelişen bilgisayar teknolojisi sayesinde araştırılabilir.

1.2 Amaç

Tarihi ve kültürel mirasın belgelenmesinde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar; yazılar, çizimler, fotoğraflar, eskizler vb olarak çeşitlenmektedir. Yapının mevcut durumunun tespit edilmesi ve gerekirse koruma yönteminin belirlenmesi için üç boyutlu gerçekçi modelin kurulması gerekmektedir. Üç boyutlu model kurulduktan sonra da yapının durumu, genellikle sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir analiz ile araştırılır. Yığma yapı hakkında henüz kesin hesap yöntemleri geliştirilmemiştir. Yapısal analiz programlarında belli parametrelere dayalı idealleştirmeler yapılarak hesap yapılmaktadır.

Yığma yapıların üç boyutlu modeli kurulurken, yapılan kabuller sonucunda oluşturulan modelin gerçek yapıyı temsil edebilecek hassasiyette olmasına dikkat edilmelidir. Yapı bileşenlerinin her biri, birbirine yakın olsa da, farklı boyutlardadır. Bu ayrıntıların tespit edilmesinde ve modele işlenmesinde bilgisayar teknolojisinden faydalanmak çalışmaya hız ve hassasiyet kazandırır.

Fotogrametri bilimi sayısal verilerle çalıştığından üç boyutlu model kurulmasında bu bilimden faydalanılması mümkün gözükmemektedir ve bu da tez çalışmasının konusunu oluşturmaktadır. Yığma yapıların sonlu elemanlar yöntemine dayalı analiz modelinin oluşturulmasında fotogrametrik verilerin kullanılması öngörülmektedir. Bu konuda bir uygulama çalışması yapılarak yöntemin geçerliliğinin araştırılması amaçlanmıştır.

1.3 Önem

Fotogrametrik verilerden faydalanarak sonlu elemanlar yöntemine dayalı analiz modeli oluşturulması konusunda bir çalışma henüz yazılı kaynaklara geçmemiştir. Bu konudaki avantaj ve dezavantajlar ortaya konularak bu konunun geliştirilmesine katkı sağlanmaya çalışılmıştır.

Bu çalışma, fotogrametrik verilerden faydalanarak, üç boyutlu gerçekçi bir yapı modeli oluşturulmasını ve bu modelin belli bir analiz programına bağlı kalmadan tüm analiz programlarında kullanılmasını önermektedir. Böylece tarihi ve kültürel mirasın belgelenmesinde süre ve işgücü tasarrufu ile hassas ve doğru bir model oluşturması sağlanır.

1.4 Varsayım

Fotogrametrik veriler kullanılarak yığma yapıların sonlu elemanlar yöntemine dayalı analiz modelinin oluşturulmasının geleneksel yöntemlere göre daha hızlı ve hassas yapılabileceği varsayılmıştır.

1.5 Kapsam

Tarihi ve kültürel mirasın belgelenmesinde çeşitli yöntemler incelenmiştir. Çalışma kapsamında, bunlardan biri olan üç boyutlu modelin kurulması araştırılmıştır. Üç boyutlu model kullanılarak sonlu elemanlar yöntemine dayalı nümerik analiz çalışmaları irdelenerek, yapılacak modelin bunlara uygun olması sağlanmaya çalışılmıştır. Analiz programlarının birbirine benzerliklerinden faydalanarak tüm programlarda kullanılabilecek bir model örneği oluşturulmaya çalışılmıştır.

Tez çalışmasında, fotogrametrik ölçümleri ve rölöve çizimleri önceden yapılmış, tarihi bir su getirme yapısı olan Eğrikemer, bir uygulama örneği olarak ele alınmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen fotogrametrik ölçme verileri değerlendirilmiş ve fotogrametrik veriler kullanılarak sonlu elemanlar yöntemine dayalı analiz modeli örneklenmiştir. Bu uygulamada karşılaşılan sorunlar ve faydalar sonuç bölümünde açıklanmıştır.



2. FOTOGRAMETRİNİN TANIMI

2.1 Giriş

Eski Yunanca'dan Batı dillerine geçen fotogrametri sözcüğü, üç kök sözcükten oluşmaktadır. Bunlar; photos (ışık), grama (çizim) ve metrondur (ölçme) (Yaşayan, 1996).

Fotogrametri ve uzaktan algılama çoğu zaman birlikte anılan iki terimdir. Bu terimler birbirileriyle ilişkili olup, her biri diğerinin kapsamından bir şeyler içermektedir. Fotogrametri terimi; özel olarak çekilen fotoğraf ve resimler üzerinden yapılan ölçme ve değerlendirmeye, fotoğrafik görüntülerin boyut, şekil ve özel nitelikleri hakkında güvenilir bilgiler elde etmek amacıyla yapılan çalışmaları kapsamaktadır. Uzaktan algılama terimi ise; görüntü hakkında güvenilir bilgiler elde etmek amacıyla, fotoğraf ve resimlerin analiz edilmesidir. Klasik olarak, fotogrametri ve uzaktan algılama fotoğraflara dayanır. Genellikle fotogrametri ile geometrik sonuçlar, uzaktan algılama ile de radiometrik sonuçlar anlaşılır. Son yıllarda fotogrametri ve uzaktan algılamada, dijital resimlerin ve diğer bilgisayar resimlerinin önemi oldukça artmıştır.

Fotogrametrinin en yaygın kullanım alanı haritacılıktır. Bunun yanı sıra mimarlık, kent planlaması, etüd – proje, arkeoloji, jeoloji, ormancılık, tarım, makine endüstrisi gibi alanlarda da fotogrametriden yararlanılmaktadır.

2.2 Fotogrametrinin Temelleri

Fotogrametri, dolaylı bir ölçme ve veri toplama yöntemidir. Bilgilerin elde edilmesi fotoğraflar yardımıyla sağlanmaktadır. Nesnelerden yansıyan elektromanyetik ışınların (enerjilerin) analog veya sayısal olarak kaydedilmesiyle elde edilen görüntüler, değerlendirilmektedir.

Kullanılan kameranın durumuna, ölçülecek nesnenin yakın veya uzak oluşuna, edinilecek bilgi türüne, değerlendirme türüne ve uygulama alanlarına göre fotogrametrik yöntemler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

1) Görüntü alım noktasına göre:

- Yersel fotogrametri: Alım merkezinin yer üzerinde bir noktada olması durumunda uygulanan fotogrametrik yöntemdir.
- Hava fotogrametrisi: Bir hava aracında bulunan kamera ile çekilen fotoğrafların

değerlendirilmesinde kullanılan fotogrametrik yöntemdir.

2) Değerlendirme yöntemine göre:

- Tek resim fotogrametrisi: Tek tek fotoğrafları kullanarak metrik bilgiler üretmeyi amaçlayan; foto – plan, foto – mozaik üreten fotogrametrik yöntemdir.
- Çift resim fotogrametrisi: Ortak alanları olan fotoğraf çiftleri üzerinde ölçmeler yaparak bilgi üreten fotogrametrik yöntemdir. Genellikle stereoskopik görüşten faydalandığı için bu yöntem stereofotogrametri olarak da adlandırılmaktadır.

3) Değerlendirme sistemine göre:

- Analog fotogrametri: Değerlendirmelerin, özellikle harita çizimlerinin analog aletlerle yapıldığı fotogrametrik yöntemdir.
- Analitik fotogrametri: Çözümlerin matematiksel yöntemlerle yapıldığı, bilgisayar destekli fotogrametrik yöntemdir.
- Sayısal (Digital) fotogrametri: Sayısal (digital) fotoğraflarla ve iş istasyonlarında çalışılan fotogrametrik yöntemdir.

Yukarıda sıralanan yöntemlerle elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucu vektör harita, raster harita (hava fotoğrafı) gibi sayısal ürünler ve bunların kağıt çıktıları alınarak çeşitli fotogrametrik ürünler kullanılmaktadır (Şekil 2.1 a, b, c).



a) Vektör harita



b) Raster harita (hava fotoğrafı)



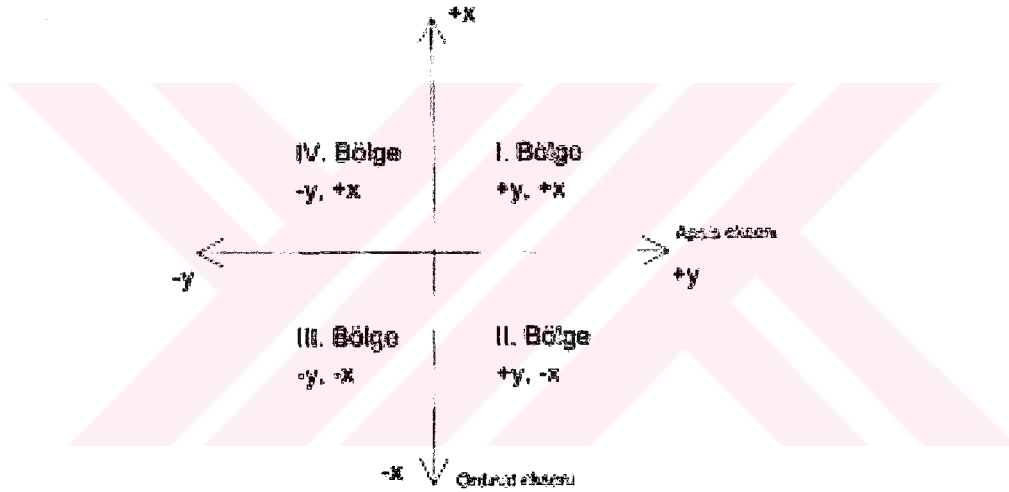
c) Kağıt çıktı (print out)

Şekil 2.1 Fotogrametrik ürünler

Fotogrametri bilimi, bir nesnenin verilerini elde etmek için yapılan ölçümler sırasında çeşitli

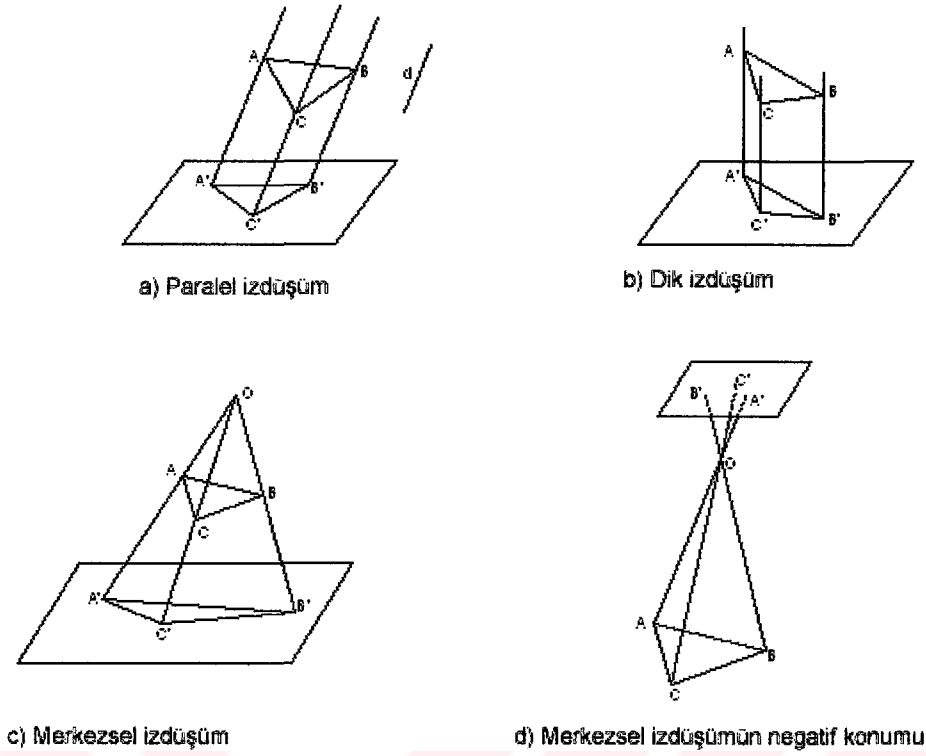
işlemler gerçekleştirmektedir. Bu işlemler, fotogrametrinin temellerine dayanmaktadır. Fotogrametri genel olarak; geometrik temeller, matematik temeller, optik temeller ve fotoğrafik temellere dayanmaktadır.

Üç boyutlu uzaydaki noktalar düzleme yani iki boyutlu uzaya geometrik yöntemlerle aktarılabilir. Yeryüzündeki bir noktanın konumunu belirleyebilmek için değişik koordinat sistemleri kullanılmaktadır. Pratikte noktaların durumlarını tespit etmek için yatay bir düzlem içinde birbirine dik iki doğru kullanılır. Bu doğruların oluşturduğu sisteme “dik koordinat sistemi” denir. Dik koordinat sistemi “kartezyen sistemi” olarak da adlandırılmaktadır. Fotogrametride kullanılan koordinat sistemi matematikten farklıdır. Şekil 2.2’de de görüldüğü gibi, burada “x” ve “y” eksenleri yer değiştirmiştir.



Şekil 2.2 Dik koordinat sistemi (Aydın, 1984)

Üç boyutlu uzaydaki noktaların düzleme aktarılmasında üç farklı izdüşüm yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemler paralel izdüşüm, dik (ortogonal) izdüşüm ve merkezsel izdüşümdür. Fotogrametride merkezsel izdüşüm kullanılmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 İz düşüm yöntemleri (Yaşayan, 1996)

Fotogrametrinin matematik temelleri; koordinat dönüşümleri, dönüklük matrisleri, izdüşüm denklemleri vb bağıntıları kısaca çekilen fotoğraflardaki verileri, kullanılabilir hale getirmek için gerekli hesapların tarif edildiği bilgilerdir.

Optik temeller ve fotoğrafik temeller de ölçümler sırasında kullanılan kameralara ilişkin bilgileri ve çekilen fotoğrafların niteliklerini kapsamaktadır.

Genel olarak fotogrametrik ölçümlerle veri elde edilmesi sırasında aşağıdaki işlemler gerçekleştirilmektedir:

- Kontrol noktalarının koordinatlarının ölçü ve hesabı
- Fotoğraflar çekme ve bu fotoğrafları düzenleme, geliştirme
- Fotoğrafların taranması
- İç ve dış yöneltme
- Cephe çiziminin yapılması
- Yüzey (DTM) modelinin üretilmesi
- Ortofotonun yapılması

Bunların yanı sıra cephenin yüzey modelinin üretilmesi ve modelin sanal ortamda

canlandırılması da gerçekleştirilmektedir.

2.3 Fotoğrafın Optik, Geometrik ve Fiziksel Temelleri

Fotoğraf sözcüğü, Yunanca'da photo ve graphie sözcüklerinin birleştirilmesiyle ortaya çıkmıştır. Işıkla çizmek veya ışıkla kayıt anlamına gelmektedir. Ancak bu sözcük, fotoğraftaki gelişmelere göre daha geç kullanılmaya başlanmıştır. Fotoğraf, yukarıda anlatılan izdüşümlerden biri olan merkezsel izdüşümdür. "O" izdüşüm merkezi, kamera optik sisteminin merkezidir ve tüm izdüşüm ışınları bu noktadan geçer.

Fotoğrafın tarihçesi 16.yy başlarında Leonardo da Vinci'nin "Camera Obscura" 'yı icadı ile başlar. Bu alet, bir yüzünde delik bulunan kapalı, karanlık bir kutudur. Bu karanlık kutuda delikten geçen ışınlar ters bir görüntü vermektedir. Alman kimyager Schulze 18. yy'da gümüş nitratin güneşe duyarlılığını keşfetmiş, 19. yy'dan itibaren de Fransa, Almanya ve İngiltere'de görüntü kaydı ile ilgili yoğun çalışmalar başlamıştır. Fotoğrafçılığın kullanışlı ve pratik hale gelişi 1871'den sonra, Maddox'un kuru emülsiyonu bulması ile olmuştur. Kuru emülsiyonda gümüş tuzları jelatin içinde eritilmiş ve cama sürüldükten sonra kurutulmuştur.

Fotoğraf, genel anlamda ışığa duyarlı bir katman üzerine bir kamera ile kaydedilmiş görüntüdür. Esas kayıttan elde edilmiş kopya da olabilir. Buna göre pozitif veya negatif fotoğraf olabilmektedir. Fotoğraf kaydı; grinin tonları, doğala yakın renklerde veya tamamen yapay renklerde olabilir. Buna göre de siyah – beyaz, doğal renkli, yapay renkli fotoğraf türlerinden söz edilebilir.

Gelişen teknoloji ile birlikte sayısal fotoğraf kavramı da gelişmiştir. Bu tür fotoğraflar özel kamera ile kayıt edilebilmekte ya da tarayıcı aletlerle sayısal hale getirilebilmektedir. Siyahtan beyaza gri düzeyleri 256 düzeye ayrılarak, tüm fotoğraf bir gri düzey matrisi ile ifade edilmektedir. Bu matrisin her elemanı bir fotoğraf elemanına – bir piksele – karşılık gelmektedir ve bir gri değere sahip olmaktadır.

Fotoğrafik malzemenin, üzerine düşen ışının (radyasyonun) enerjisine tepki gösterebilme yeteneği duyarlık olarak ifade edilmektedir. Farklı dalga boyları için duyarlık da farklıdır. Bu özellik spektral duyarlık olarak tanımlanmaktadır. Örneğin; gümüş tanecikleri mavi ve morötesi yakınındaki dalgalara daha çok duyarlıdır. Bu duyarlık bazı organik boya katkıları ile artırılabilir. Optik duyarlayıcı adı verilen bu boyalar uzun dalga boylu ışınları yutar ve bu enerjiyi gümüş taneciklerine aktarır.

Bütün cisimler, üzerine düşen elektromagnetik enerjinin bir bölümünü geriye yansıtır. İnsan

gözü bu yansıyan enerjiyi algılamaktadır. İnsan gözünün en duyarlı olduğu renk fısık yeşilidir. Fotoğraf emülsiyonları da insan gözüne benzer şekilde, görünür ışığa duyarlıdır.

- Morötesi bölge:

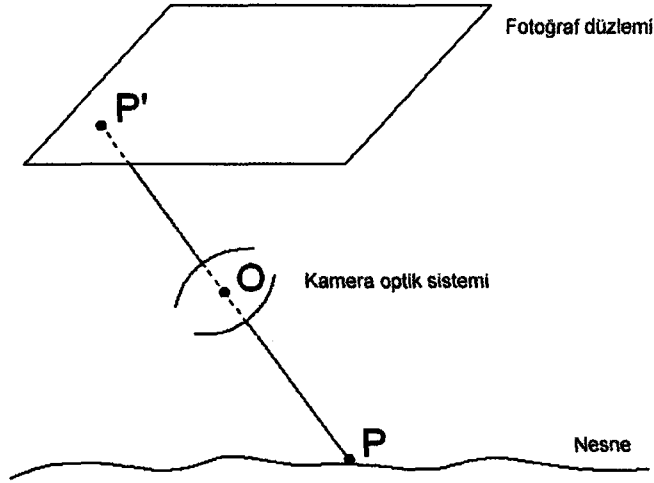
Dalga boyları 0,01 – 0,04 mikron arasında olan ışınlardır. Yakın morötesi bölgesi atmosferden geçebilen bir kısım güneş enerjisidir. Cam, 0,35 mikron dalga boyuna kadar olan morötesi ışınları geçirmektedir. Morötesi bölgede fotoğrafik kayıt yapabilmek için kuartzlı ve lityum florürlü mercekli özel kameralar kullanılmalıdır (Yaşayan, 1996).

- Kızılötesi bölge:

Dalga boyları 0,8 – 343 mikron arasında olan ışınlardır. Güneş ışınlarında 5,3 mikron dalga boyuna kadar olan kızılötesi ışınlar saptanmıştır. Daha uzun boylu olan kızılötesi ışınlar atmosferdeki su buharı tarafından yutulmaktadır. Adi cam 2 mikrona kadar, kurtz 4 mikron, kalsiyum florür 8,5 mikron, kaya tuzu 14 mikron, potasyum klorür 20 – 23 mikrona kadar dalga boyları olan kızılötesi ışınları geçirmektedir (Yaşayan, 1996).

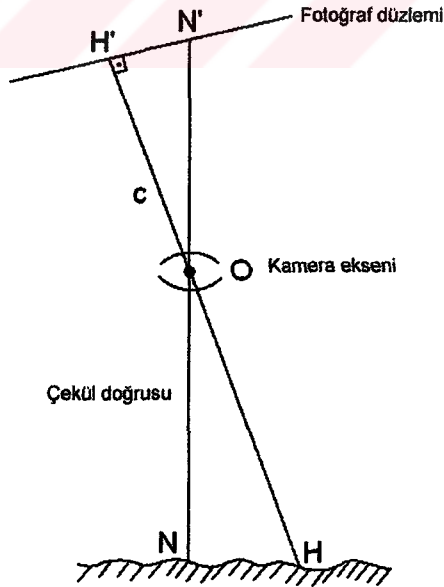
2.3.1 Metrik Kameralar (Ölçü Kameraları)

Metrik kamera veya ölçü kamerası adı verilen fotogrametrik kameralar, genel anlamda bilinen fotoğraf makineleri gibidir. Farklı olarak, geometrik bakımdan merkezzel izdüşüm özellikleri vardır. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi, “P” nesne noktasından çıkan bir ışın doğru yolu izleyerek “O” izdüşüm merkezinden geçer ve izdüşüm düzleminde “P” “ noktasını oluşturur. “O” izdüşüm merkezi mercek sisteminin bir noktasına, izdüşüm düzlemi de fotoğraf düzlemine karşılık gelmektedir. Fotogrametrik fotoğraf bir varsayıma uygun olarak çekilmelidir. Merkezi izdüşüm parametreleri (izdüşüm düzlemine göre izdüşüm merkezinin konumu) bilinmelidir. Bu nedenle fotogrametrik kameralar; iç yöneltme elemanları, fotoğraf düzlemi ve kamera objektifleri özellikleri ile farklılık göstermektedirler.

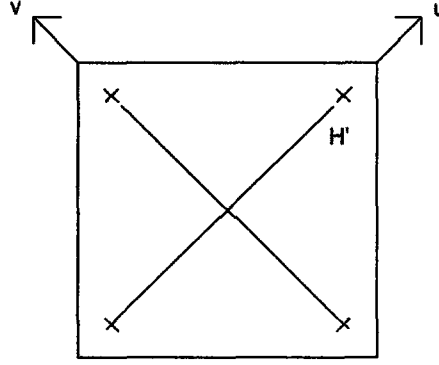


Şekil 2.4 İzdüşüm ışını ve izdüşüm merkezi (Yaşayan, 1996)

Fotogrametrik kameraların iç yöneltme elemanları asal uzaklık ve asal noktanın konumudur. Asal uzaklık; net görüntünün oluştuğu, fotoğraf düzleminin izdüşüm merkezine olan uzaklığıdır. Bu uzaklık μm mertebesinde hassasiyettedir. Şekil 2.5'te asal uzaklık ($c=OH'$) gösterilmiştir. H' , asal noktanın konumu ise; fotoğraf çerçeve işaretlerinin belirlediği eksen sistemine göre tanımlanmaktadır. Şekil 2.6' da H' asal noktası, çerçeve işaretlerinin bilindiği "u, v" eksen sistemine göre koordinatlarla gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Fotoğraf düzlemi ve izdüşüm merkezi (Yaşayan, 1996)



Şekil 2.6 Asal noktanın konumu (Yaşayan, 1996)

Çerçeve işaretleri fotoğraf orta noktasının tanımlanmasını ve asal noktanın konumunun belirlenmesini sağlamaktadır. Kamera üretimi sırasında bu iki noktanın çakıştırılmasına çalışılır. Analitik ve sayısal geometride bu fark göz önünde bulundurulur. Analog fotogrametride de bu iki nokta eşdeğer sayılır. Işın destesinin analog veya analitik olarak yeniden oluşturulabilmesi yani merkezsiz izdüşüm ile ölçü yapılabilmesi için bu izdüşümün parametrelerinin, diğer bir deyişle iç yönelme elemanlarının, bilinmesi gereklidir.

Fotogrametrik kameralarda kullanılan mercek sistemleri çok sayıda merceğin bir araya getirilmesi ile oluşturulmaktadır. Geometrik olarak bir nokta şeklinde düşünülen izdüşüm merkezi yerine; biri nesne diğeri fotoğraf uzayında olmak üzere iki izdüşüm merkezi vardır. Kameranın uygun özelliklerde seçimi, alım ve değerlendirme için önemlidir. Az sayıda resimle, nesne bütününe istenen doğrulukta görüntüsünün elde edilmesi amaçlanmaktadır. Kısaca, yapılan çalışmaların ekonomikliği de önemlidir. Hava fotoğrafı çekimlerinde kullanılan metrik kameralar objektiflerine göre; çok geniş açılı kamera ($\Omega = 119^\circ$ $C = 85$ mm), geniş açılı kamera ($\Omega = 82^\circ$ $C = 153$ mm), normal açılı kamera ($\Omega = 64^\circ$ $C = 210$ mm ve $\Omega = 46^\circ$ $C = 305$ mm), dar açılı kamera ($\Omega = 24^\circ$ $C = 610$ mm) olarak sıralanabilir. Yersel fotogrametride kullanılan metrik kameralar da metrik stereo kamera, metrik tek kamera ve amatör kamera olarak sıralanabilir.

Fotogrametrik kameraların teknik özelliklerini ve gerekli parametreleri içeren raporlara kalibrasyon raporları denilmektedir. Bu raporlar, kamera üreten firma tarafından ilk üretim aşamasında hazırlanarak kullanıcıya verilmektedir. Kullanıcılar iki – üç yılda bir kamera ayarlarını denetleyerek bu raporların yenilenmesini talep edebilmektedir.

2.4 Mimaride Fotogrametri

Tarihi ve kültürel mirasın belgelenmesinde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Eskizler, daha sanatsal bir yaklaşımla görüntüye ilişkin bilgileri insan beyni ve nesne arasındaki ilişkiyle yansıtmaktadır. Perspektifler, nesnenin insan gözüyle nasıl görüldüğünü ifade etmektedir. Fotoğraf kayıtları; malzemelerin görüntülerini ışık kalitesine ve donanımına bağlı olarak genel özellikleri ile göstermektedir. Video kayıtları da nesnenin canlı görüntüsünü ve sesini kaydetmektedir.

Belgeleme yöntemlerinden bir diğeri de fotogrametri yöntemiyle veri toplamadır. Fotogrametri biliminde gelişen bilgisayar teknolojisi, arazi hakkındaki tüm bilgileri bilgisayar ortamında bir arada bulundurmakta ve güncelleştirme olanağı sağlamaktadır. CBS (Coğrafi Bilgi Sistemi) adı verilen sistem araziye ilişkin çalışmalarda sorgulama, güncelleme ve kolayca bilgiye ulaşma olanağı vermektedir. Sayısal görüntüleme olan sayısal fotogrametri ve CBS gibi fotogrametrik tekniklerin diğer belgeleme yöntemlerine göre birçok üstün yanıları vardır. Bilgisayar alanındaki kullanılabilirliği ve veri toplama ile görüntüleme tekniklerindeki gelişmeler sayesinde sayısal fotogrametri yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır.

Fotogrametri bilimi geliştikçe mimarlık alanına katkıları da artmaktadır. Tarihi ve kültürel mirasın belgelenmesinde fotogrametri yöntemiyle veri toplama daha hızlıdır ve elde edilen bilgilerin hassasiyeti daha yüksektir. Fotogrametri yönteminde metrik kameralarla fotogrametrik ölçme ve laser tarama ile ölçme teknikleri kullanılmaktadır.

2.4.1 Resme Dayalı (Fotogrametrik) Yöntem

Fotogrametrik yöntemin esası, fotoğraflardan yararlanarak cismin geometrisini oluşturmaktır. Bu yöntemde, bilgilerin büyük bir kısmı geçici olarak fotoğrafik filmde toplanır. Fotoğraf düzleminde üç boyutlu nesne iki boyuta indirgendiğinden, üç boyutlu bir nesnenin koordinatları tek bir resimden elde edilemez. Üç boyutlu nesneyi elde etmek için, uygun iki resimden gelen bilgiler birleştirilerek veri elde edilir. Bunun için ölçümü yapılacak cephe yüzeyine koordinatları bilinen kontrol noktaları konulur. Ölçümden önce belirlenmiş bu koordinat sistemi ile cismin her noktasının koordinatları belirlenerek cisim tanımlanır. Çekilen resimlerden gerekli dönüşümler yapılarak, yapının boyutu ve detayları doğru bir şekilde kaydedilir. En az iki değişik açıdan görüntüsü alınmış herhangi bir yapı detayı, fotogrametrik restitüsyon haline getirilebilir. Görüntü alınacak yapının büyüklüğüne bağlı olarak bu işlemin zamanı değişebilmektedir.

Bilgisayar destekli, homojen ve yüksek kalitede metrik veri sağlayan sayısal yakın yer

fotogrametrisi, nesnelerin belgelenmesinde başarıyla kullanılmaktadır. Bu yöntemle; üç boyutlu vektör veriler, düzeltilmiş sayısal resimler ve ortofotolar elde edilmektedir. Elde edilen bu ürünler, üç boyutlu modellerin üretiminde ve nesnelerin sanal ortamda canlandırılmasında kullanılır.

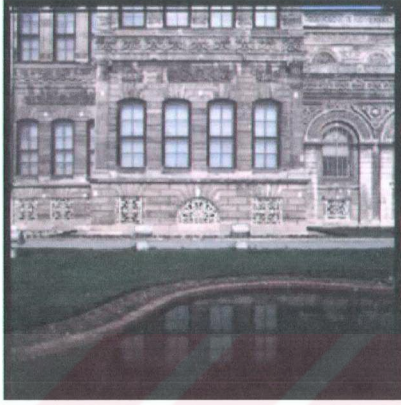
Kontrol noktaları fotogrametrik modelin değerlendirilmesinde temel oluşturmaktadır. Yersel fotogrametri ile ölçüm yapılırken, fotogrametrik modelin konum ve biçimini tespit etmek için çok iyi ayırt edilebilen kontrol noktalarına gereksinim vardır. Tarihi ve kültürel mirasın üç boyutlu modelleri, yapının bugünkü durumuyla restorasyon sonrası gelecekteki durumunun karşılaştırılmasında kullanılabilir.

Fotogrametrik yöntemin yani metrik kameralarla çekilen resimlerin mimaride kullanılabilmesi için perspektif hatalarını, resmin eğiklik ve dönüklüklerinin düzeltilmesi gerekir. Resmin doğrultulması ve ortofotonun elde edilmesinde izlenen işlem sırası Şekil 2.7a, b, c’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Görüntü doğrultma sırası (Chen ve Richard, 2003)

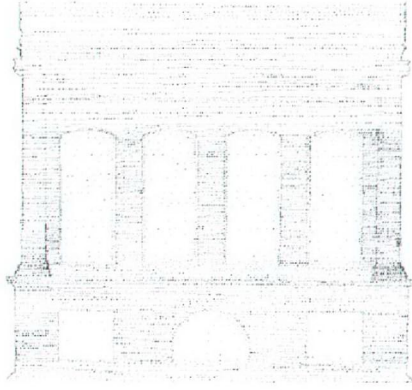
Dolmabahçe Sarayı cephesinin fotogrametrik verilerle elde edilmesi sırasında yapılan çalışmalar Şekil 2.8 – 2.13’ da gösterilmiştir. Burada; stereoların değerlendirilmesiyle stereo model oluşturulmuş (Şekil 2.9), operatör tarafından sık sayıda DTM toplanmış ve koordinat noktaları atanmıştır (Şekil 2.10). Çekilen fotoğraflar üzerinden gerekli ölçümler yapılarak, ortofotolara gerçek yükseklikler uygulanmış ve cephe yüzeyi çıkarılmıştır (Şekil 2.11 – 2.13).



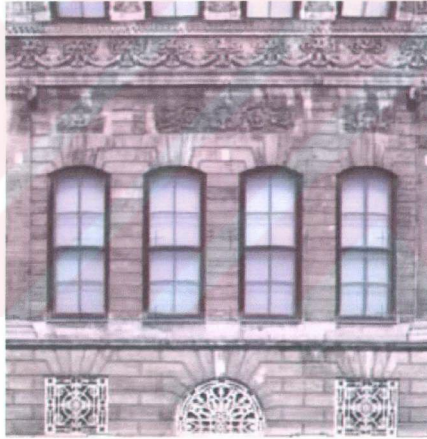
Şekil 2.8 Stereo çiftinin bir fotoğrafı (Emem vd., 2002)



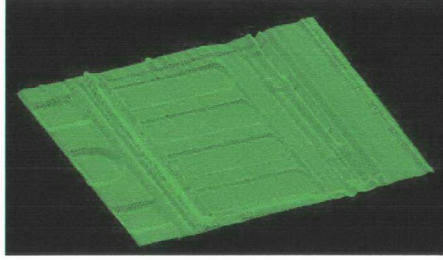
Şekil 2.9 Dolmabahçe Sarayı'nın stereo modeli (Emem vd., 2002)



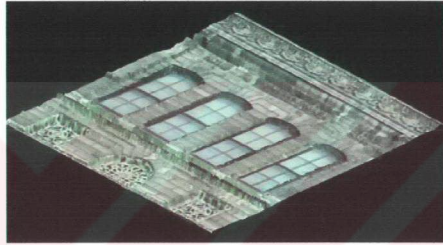
Şekil 2.10 Yüzey modeli (DTM data) (Emem vd., 2002)



Şekil 2.11 Cephenin 1/100 ölçekli ortofotosu (Emem vd., 2002)



Şekil 2.12 Cephe dokusunun (gridlerinin) oluşturulması (Emem vd., 2002)



Şekil 2.13 Fotoğrafik gerçeklik (photorealistic view) (Emem vd., 2002)

2.4.2 Laserle Tarama (Laser Scan) Yöntemi

Laserle tarama, laser ışığının iletimine dayanan optik bir ölçme sistemidir. Laser tarayıcı dokunsal olmayan, yüksek kaliteli ve hassas ölçümler için tasarlanmıştır. Geniş bakış açısından dolayı (yatayda 360° ve düşeyde 270°) ölçme kolayca yapılabilir. Yüksek performanslı ölçme araçları, ölçümün çok kısa sürede tamamlanmasına olanak vermektedir. Nesnelere ait en küçük ayrıntılar dahi ölçülebilmektedir. Laser tarayıcı hem karanlıkta hem aydınlıkta çalışabildiği için özel bir ışık düzeyi gerektirmemektedir. Farklı ışık düzeyleri olan camiler, hamamlar gibi mimari yapıların ölçümünde bu önemli bir özelliktir. Laser tarayıcının diğer önemli bir özelliği de alınan verilerin doğrudan doğruya bilgisayar ortamında saklanabilmesidir.

Laser tarama ile ölçme yaparken daha iyi görüntü almak için çok sayıda hedef nokta seçilmektedir. Ölçümden kısa bir süre sonra laser tarayıcı, geometrik verileri sık nokta bulutu şeklinde işaretler ve henüz çalışma alanındayken alınan verilerin sonuçları görülebilir. Elde edilen nokta bulutu birçok yöntemle dizüstü bilgisayar ekranında görüntülenebilir ve CAD

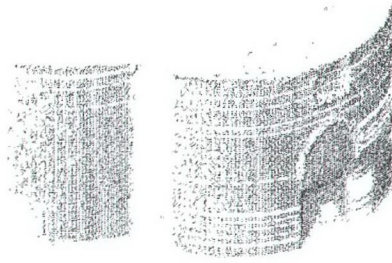
modeline dönüştürülebilir (Mettenleiter vd., 2003). Bu da yapının üç boyutlu biçiminin algılanmasını sağlar. Her laser tarayıcı, niteliğine göre farklı bir yazılıma sahiptir. Bu yazılımlar, gerçek objelerin nokta bulutu şeklindeki geometrik verilerinden modeli oluşturur. Kullanıcıya modellemenin tüm adımlarını denetleme, iç işlemleri ve sonuçların doğruluğunu kontrol etme olanağı verir. Bu bilgisayar yazılımları, ölçüm sırasında elde edilen x, y, z koordinatlarını DXF ve ASCII gibi farklı dosya uzantıları ile kaydetme olanağı verir. Böylece bu veriler başka bilgisayar yazılımlarına alınarak (export edilerek) kullanılabilir (Caprioli ve Scognamiglio, 2003).

2.4.3 Resme Dayalı (Fotogrametrik) Yöntem İle Laser Tarama Yönteminin Karşılaştırılması

Tarihi ve kültürel mirasın belgelenmesinde en uygun verilerin elde edilmesi için farklı ölçme teknikleri araştırılmaktadır. Elde edilen modellerin geometrik doğrulukları incelenerek birbirleriyle karşılaştırılmaktadır. Laser tarama yöntemi resme dayalı fotogrametrik ölçmeye göre daha yeni bir yöntemdir. Yüzeye ait üç boyutlu ağ türetilirken (mesh generation); laser tarama teknolojisi doğru, hassas bilgi ve sık nokta bulutu ile fotogrametrik yöntemle göre daha hızlı ve kolaydır (Caprioli ve Scognamiglio, 2003).

Sorace ve Terenzi'ye (2002) göre laserle tarama ve fotogrametrik yöntem birbirini tamamlayıcı niteliktedir. Kısa sürede objenin basitleştirilmiş üç boyutlu modelini isteniyorsa fotogrametrik yöntem daha uygundur. Bu işlem daha hızlı ve düşük maliyetli üç boyutlu modelleme sağlar. Eğer sadece obje bütünü değil de detaylı üç boyutlu modeli istenirse laser tarayıcı kullanılabilir. Laser tarayıcı diğer klasik ölçme teknikleri ile karşılaştırılınca çok sayıdaki noktayı daha kısa sürede ölçer.

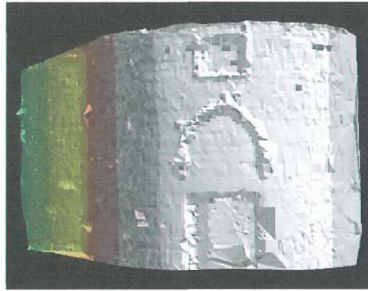
Şekil 2.14 – 2.17'de yukarıda anlatılan yöntemlerle elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Buradan laser tarayıcının sağladığı sık ağ (grid) olanağı ile yapının sayısal modelinin çok daha ayrıntılı oluşturulabildiği görülmektedir.



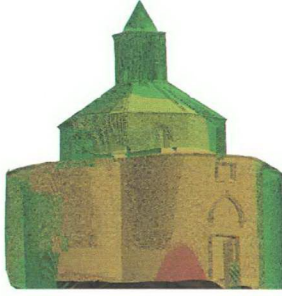
Şekil 2.14 Fotogrametrik nokta bulutu (Caprioli ve Scognamiglio, 2003)



Şekil 2.15 Laser tarayıcı nokta bulutu (Caprioli ve Scognamiglio, 2003)



Şekil 2.16 Fotogrametrik sayısal yükseklik modeli (Caprioli ve Scognamiglio, 2003)



Şekil 2.17 Laser tarayıcı sayısal yükseklik modeli (Caprioli ve Scognamiglio, 2003)

3. YIĞMA KAGİR YAPI

Yığma yapı tarihi neredeyse insanlık tarihi ile paralellik göstermektedir. Yapılan arkeolojik çalışmalar sonucunda, Mezopotamya'da 7000 yıl öncesine ait güneşte kurutulmuş kerpiç bloklarla inşa edilen tapınakların kalıntılarına rastlanmıştır. Yığma yapının çok eski örneklerinden biri, kil bloklarla inşa edilen Babil Kulesi'dir.

Yığma yapı; kerpiçten doğal taş kadar uzanan inorganik ve metal olmayan çeşitli malzemelerden yapılmış bileşenlerin, harçlı veya kuru olarak birleştirilmesiyle oluşturulur. Yığma yapı malzemesi çok eski olmasına rağmen, çoğu özelliği henüz tam olarak anlaşılamamıştır ve yığma yapı hakkında bugün hala birçok bilgi eksikliği vardır. Yığma; sürekli, homojen, izotrop ve lineer elastik özellik göstermez. Dayanıklılık, su emme katsayısı, basınç dayanımı, kayma dayanımı, çekme dayanımı ve ısıl genleşme gibi malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri, yığma yapıların yük taşıma performansını oldukça etkilemektedir. Özellikle yük taşıma kapasitesi, deformasyon kabiliyeti gibi davranışları, malzemenin yapısı ve işçilik kalitesi ile ilgili olduğundan her yapı için farklı olabilir ve tahmin edilmesi güçtür. Farklı fiziksel ve mekanik özellikler gösteren taş, tuğla ve harç ile yapılan yapıda, aynı tür malzeme ile oluşturulmuş bir taşıyıcı elemanda bile malzeme özellikleri çok ciddi farklılıklar gösterebilir. Bu nedenle çok çeşitli olan yığma yapı bileşenleri ve harçlarla ilgili genel bir teori geliştirmek oldukça güçtür. Ancak yığma yapıda en çok kullanılan bileşenler taş ve tuğladır.

Taş en eski yapı malzemesidir. Tarihi yapılarda taşın çok kullanılmasının nedeni, yaygın olarak bulunabilen, çeşitli arazi koşullarında elde edilebilen ve yapının çok çeşitli yerlerinde kullanılabilen bir malzeme olmasıdır. Strüktürel dayanımı jeolojik ve kimyasal özelliklerine bağlı olan taş, basınca karşı çok dayanıklı çekmeye karşı ise zayıf bir malzemedir. Yapısal taşlar mineral yapısına göre kalkerli, killi, silisli gibi çeşitlenir; kullanım şekline göre de kesme taş, moloz taş, kuru taş olarak adlandırılmaktadır.

Tuğla, Roma Dönemi'nden önce dahi, kullanıldığı bilinen yığma yapı bileşenidir. Tuğlalar saf kaolin ve kil veya saf kil ve kum karışımının yüksek sıcaklıkta pişirilmesiyle elde edilir. Fırın teknolojisinin henüz gelişmediği dönemlerde de doğrudan güneşte kurutularak elde edilen kerpiç bloklar kullanılmıştır. Tuğlalarla inşa edilmiş bir yığma yapının dayanımı tuğlanın kalitesiyle yakından ilişkilidir. İyi fırınlanmış tuğlanın dayanımı fırınlanmamış tuğladan çok daha fazladır.

Harçla birleştirilmiş yığma yapıda harcın basınç, kayma ve çekme dayanımı çok önemlidir.

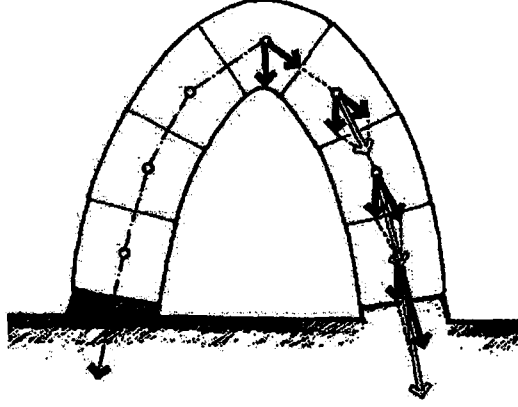
Harçtaki bağlayıcı malzemenin miktarı ve karışımındaki su oranı, yığma yapı bileşeninin yüzey dokusu; harç ile yığma elemanı arasındaki birleşim, yapı dayanımını etkiler. Harç aynı zamanda yüklerin yayılmasını sağlayan homojen bir tabaka oluşturur, boşlukları doldurur, elemanların doğru yerleşmesini sağlar ve elemanlar arasında bazı hareketlere izin vererek yapıya elastikiyet kazandırır.

3.1 Yığma Kagir Yapı Elemanları

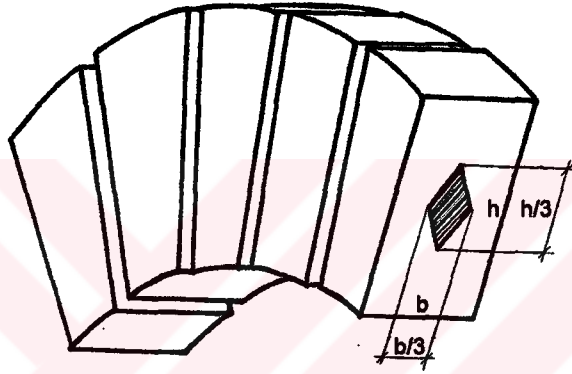
Yığma yapı elemanları düşeyde sütun, ayak, duvar; yatayda kemer, tonoz, kubbe ve döşeme olarak sıralanabilir.

Düşey yığma yapı elemanları üzerlerine gelen yapı yüklerini temellere, dolayısıyla zemine iletir. Ayaklar, taş ve tuğla gibi malzemelerden örülerek yapılır. Sütunlar da şekillendirilmiş taşların üst üste dizilmesiyle oluşturulur ya da tek parçadır. Yığma kagir yapılarda duvarlar taşıyıcı ya da bölücü olarak düzenlenir. Bölücü duvarların teorik olarak yük taşımadığı kabul edilmektedir. Ancak taşıyıcı duvarlarla bölücü duvarların kesişim noktalarında her iki duvar da taşıyıcı olarak değerlendirilmektedir.

Taş veya tuğla gibi kagir malzemeden inşa edilen yığma yapıda kemerler; duvarda boşluk oluşturmak veya duvar yüklerini hafifletmek, açıklık geçerek tonoz ya da kubbeye mesnet oluşturmak amacıyla yapılan eğri eksenli kirişlerdir. Biçimlerine göre düz, basık, tam, sivri, sepet kulpu, kaş vb isimlerle anılmaktadırlar. Eğrisel bir yörüngede dizilen her kemer taşı üzerine gelen yükü, yanındaki taşa ağırlık merkezinden geçen eksene teğet olarak, basınç kuvveti ile aktarır (Şekil 3.1). Her kemer taşına gelen yük, yanındaki taşın tam ağırlık merkezine etkimeyebilir; ağırlık merkezinden, taşın bir boyutunun $1/6$ ' sı kadar eksantrisine kabul edilebilir. Yük bileşenleri kemer taşının çekirdek bölgesi denilen bu kısımda kalmalıdır (Şekil 3.2).

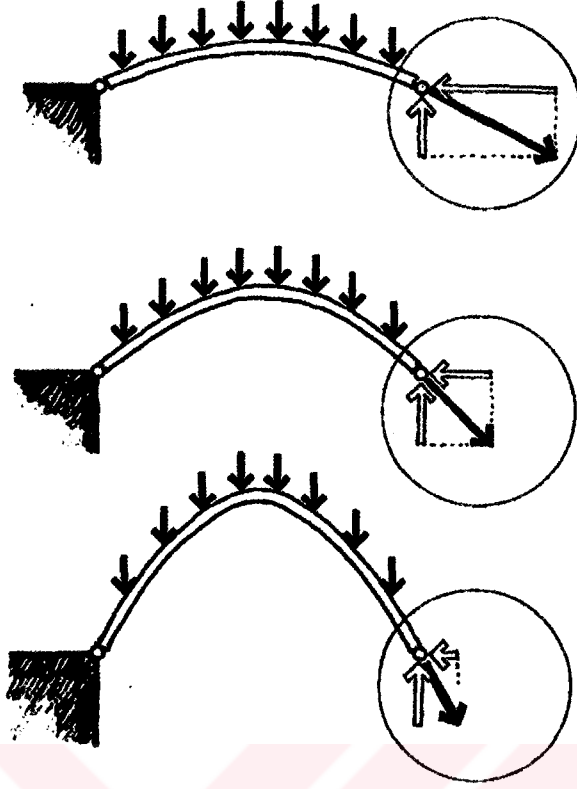


Şekil 3.1 Kemerde yük akışı (Moore, F., 1999)



Şekil 3.2 Kemer taşında çekirdek bölgesi

Kemerin biçimine göre, itki kuvvetleri farklılık gösterir (Şekil 3.3). Kemerin eğriliği artıkça, itki kuvvetleri düşeye yaklaştığından düşey bileşen artar, yatay bileşen azalır. Kemer eğriliği azaldıkça kemer basıklaşır ve itki kuvvetleri yataya yaklaşır. Bu durumda kemer mesnetindeki itkinin yatay bileşeni büyür. Bunun sonucunda kemer itkisinin bileşkesini karşılayacak taşıyıcı ayakların kesiti artar ya da yatay bileşeni karşılayacak gergi elemanları gerekir. Kemer formunda bozulma, ancak mesnetlerden birinin oynaması halinde olur.

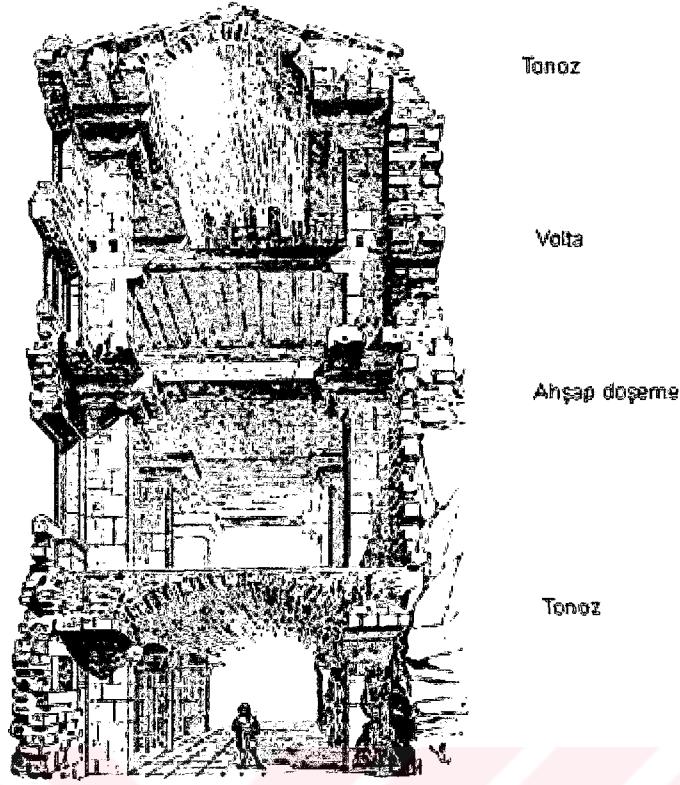


Şekil 3.3 Kemerde meydana gelen itkiler (Moore, F. 1999)

Bir açıklığı örtmek için kullanılan tonozlar, art arda sıralanmış kemerler şeklinde davranırlar. Tek eğrilikli elemanlardır ve eğrilik eksenleri silindirik, eliptik, parabolik, dairesel, sikloid gibi çeşitli eğrilerden oluşur. Formuna göre tonoz davranışı da farklılık göstermektedir.

Kubbeler; yarım daire, elips, parabol gibi bir eğrinin bir eksen etrafında döndürülmesi ya da tonozların kesiştirilmesi ile oluşturulan eğrisel örtü elemanlarıdır. Dönel yüzeyle oluşturulan kubbe tabanları daire biçimindedir. Kare ya da dikdörtgen mekan üzerine düzenlenen daire tabanlı kubbelerde tonoz, pendentif, yarım kubbe, tromp, Türk üçgeni, konsollar gibi geçiş elemanları kullanılmıştır.

Yığma yapılarda ara kat döşemeleri tonoz aralarının doldurulup üst kısmının düzeltilmesiyle, ahşap ya da volta döşeme ile oluşturulmuştur (Şekil 3.4, Şekil 3.5).



Şekil 3.4 Yığma kagir yapıda ahşap ve tonoz döşeme düzenlemeleri (Huerta, 2001)



Şekil 3.5 Yığma kagir yapıda volta döşeme düzenlemesi (Maheri ve Rahmani, 2003)

3.2 Yığma Kagir Yapılarda Analiz Yöntemleri

Taş ve tuğla gibi kagir malzemeden inşa edilmiş yığma yapılar, malzemesi ve geometrisiyle karmaşık yapılardır. Tuğla veya taş gibi elemanlarla bunları bağlayan harcın dayanımı farklıdır.

Birleşimi sağlayan harcın zayıf yüzey oluşturması nedeniyle yığma yapıda hasarlar oluşur. Ayrıca yığma yapılar büyük boyutları ile rijit ve ağır yapılar olduğundan deprem etkisi de bu yapılar için çok önemlidir. Bunun yanı sıra tarihi yapıların uzun ömürleri içinde; malzeme

eskimesi ve bozulması, yapı fonksiyonunun değişimi, eklenen yapı bölümleri ve malzemeler, yaşanan doğal afetler ve zemin problemleri gibi sebeplerle yapıda oluşan farklı zorlanmalar da hasarlara neden olabilir.

Yığma yapılar, değişik karakterli yapı malzemelerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulduğu için hesabına ilişkin kesin kurallar saptamak zordur. Ayrıca çeşitli nedenlerle oluşan çatlaklar yapı davranışını değiştirdiği için yapısal analiz karmaşılaşır. Önceleri yapıya ilişkin hesaplar elle yapılırken bugün bilgisayar ortamında üç boyutlu modeller ve simülasyonlarla tespit edilmektedir. Yığma yapıların hesap yöntemleri hala araştırma safhasındadır ve güvenilirliği kesin değildir. Yapının mevcut durumunu ifade eden, tüm özelliklerini içeren ve yığma yapının koşullarına uygun modelleme ile değerlendirilmesi oldukça güçtür.

Yığma yapı davranışını temsil edecek uygun bir model kullanılamadığında yığma kagir yapı malzemeleri; elastik, sürekli ve izotrop olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle zayıf yüzey olarak davranan harç birleşimlerinin etkisi tanımlanamamıştır (Asteris veTzamtzis, 2003) . Yığma yapı davranışının daha iyi tanımlanabilmesi için, yapılan ölçümlere dayalı gerilme analizi yöntemleri geliştirilmiştir. Bugün en yaygın yöntemlerden biri olan Sonlu Elemanlar Yöntemi çok çeşitli problemlerde ve alanlarda uygulanmaktadır. Karmaşık strüktürel özelliklere sahip olan yığma yapıların analizi için de Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmaktadır. Ancak modelleme yapılırken, doğru sonuçlar elde etmek için, yığma yapı malzemelerinin çağdaş yapı malzemelerinden farklı olduğunu dikkate almak ve analiz yöntemlerini ve kriterlerini buna uygun seçmek çok önemlidir.

Yığma yapılarda sonlu elemanlarla ilgili çok çeşitli modelleme çalışmaları yapılmıştır. Uygulanan farklı analiz teknikleri birbirleriyle karşılaştırıldığında, yapının bütünü için sonuçlarda çok büyük farklar olmadığı gözlenmiştir. Ancak tekil eleman düzeyinde bakıldığında, yapılan kabullere bağlı olarak analiz sonuçlarında önemli farklar olduğu görülmüştür (Ünay, 2002).

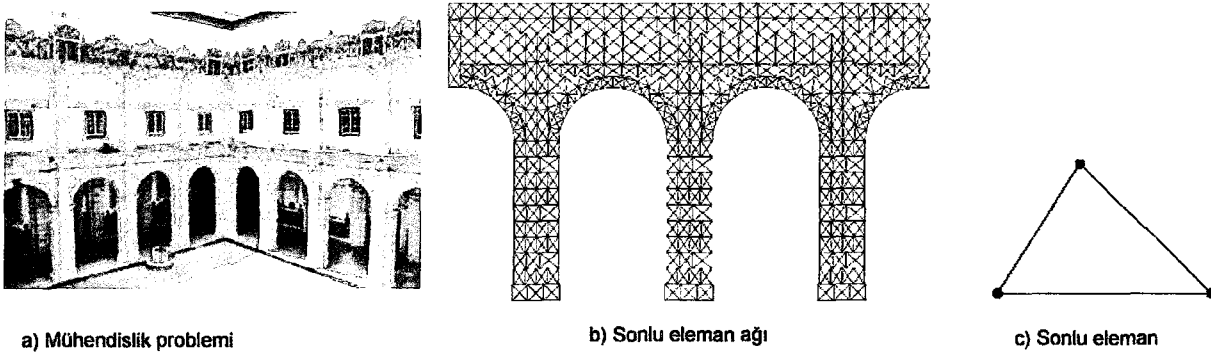
Mevcut yapının durumunu yansıtan gerçekçi sonuçlar elde etmek için, yapı analizine başlamadan önce analizin hangi amaçla yapılacağı kararlaştırılmalıdır. Uygun modeli oluşturmak için yapının geçmişi iyi araştırılmalıdır. Yani yapım tarihi, malzeme türü ve özellikleri, ne tür yüklerden etkilendiği, onarım geçirip geçirmediği vb bilgiler elde edilmelidir. Analiz modeli bu özellikleri yansıtan nitelikte ya da buna uygun kabullerle oluşturulmalıdır. Analiz sırasında yapılan kabullerin gerçeğe yakın olması doğru sonuca ulaşmak için çok önemlidir.

4. YAPI ELEMANLARININ SONLU ELEMANLARLA TANIMLANMASI

Çağdaş bir nümerik yöntem olan Sonlu Elemanlar Yöntemi, son yıllarda bilgisayar teknolojisinin ilerlemesine paralel olarak gelişen önemli bir sayısal hesap yöntemidir. Sonlu Elemanlar Yönteminin teorisi 1900'lerin başında Ritz ve Galerkin'e dayanmaktadır. Bu yöntem, 1943'te Courant'ın kısmi diferansiyel denklemlerin çözümüne ilişkin yaptığı çalışmalar ve 1950'lerde kullanılan bilgisayarlar yardımıyla bugünkü şeklini almış ve geliştirilmiştir. Mühendislik, fizik ve matematik araştırma alanlarında kullanılan Sonlu Elemanlar Yönteminde Turner, Argyris ve Kelsey'nin çalışmaları önemli katkılar sağlamıştır (Wait ve Mitchell, 1985).

Yapısal veya başka bir karmaşık problemin çözümünde, sistemi tanımlayan çeşitli denklem takımlarının kurulması ve çözülmesi, yöntemin esasını oluşturmaktadır. Sonlu Elemanlar Yönteminin bilgisayarda kullanılması, çok karmaşık problemlerin ve denklem takımlarının uygun yöntemlerle çözülmesini sağlamıştır. Örneğin; düzgün geometriye sahip olmayan cisimler, doğrusal olmayan malzeme davranışı gibi karmaşık durumlar Sonlu Elemanlar Yöntemiyle kolayca incelenebilmekte ve gerçek duruma çok yakın sonuçlar elde edilebilmektedir.

Sonlu Elemanlar Yönteminde karmaşık şekilli bir yapı bütünü, bölgesi ya da elemanı matematik modeli belli, sonlu büyüklükteki elemanlarla ifade edilir (Şekil 4.1 a,b,c). Sonlu elemanlar olarak adlandırılan bu elemanlar, köşelerini oluşturan düğüm noktalarıyla birbirine bağlanır.



Şekil 4.1 Mühendislik probleminin sonlu elemanlarla tanımlanması

4.1 Sonlu Eleman Tipleri

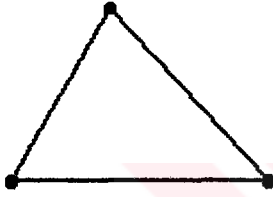
Farklı tür ve boyutlardaki problemler için çeşitli sonlu eleman tipleri geliştirilmiştir. Bunlar bir boyutlu, iki boyutlu veya üç boyutlu elemanlar olabilmektedir.

Bir boyutlu elemanlar, iki boyutu bir boyutunun yanında ihmal edilebilecek kadar küçük olan çubuk elemanlardır; kolonlar, kirişler, kafes örgü çubukları, kemer gibi. Bunlar analiz programlarında “Frame” olarak adlandırılır (Şekil 4.2)



Şekil 4.2 Bir boyutlu çubuk eleman (Göncü, 1997)

İki boyutlu elemanlar, bir boyutu diğer iki boyutunun yanında ihmal edilebilecek kadar küçük olan elemanlardır; perde, döşeme, kabuk gibi. Bunlar üçgen veya dörtgen elemanlarla tanımlanır ve “Shell” olarak ifade edilir (Şekil 4.3 a, b, c).



a) Üçgen eleman



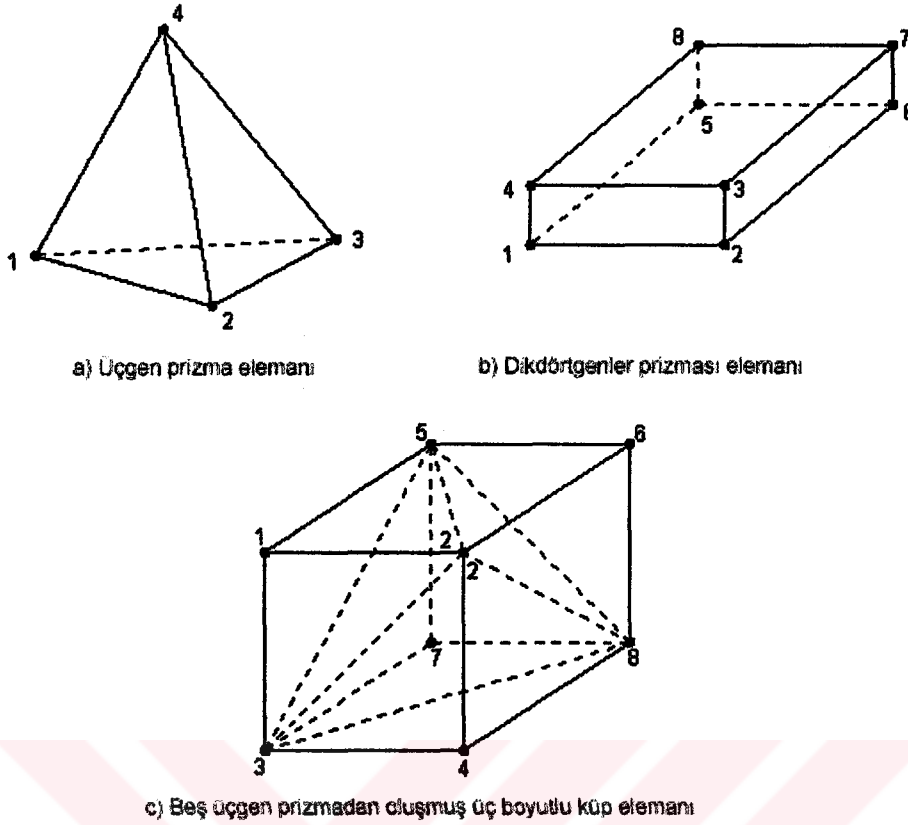
b) Dikdörtgen eleman



c) Dörtgen eleman

Şekil 4.3 İki boyutlu sonlu elemanlar (Göncü, 1997)

Üç boyutlu elemanlar da hiçbir boyutu diğer boyutuna göre ihmal edilemeyen, tüm boyutları aynı önem mertebesinde olan elemanlardır. Bunlar en az dört yüzlü olarak ifade edilir ve “Solid” elemanlar olarak ele alınır (Şekil 4.4 a, b, c).



Şekil 4.4 Üç boyutlu sonlu elemanlar (Göncü, 1997)

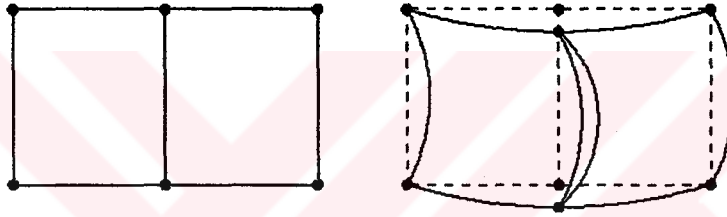
Bir yapıya ilişkin model kurulurken, yani problem modellenirken, yapı birçok bir, iki ya da üç boyutlu sonlu elemanlara bölünerek tanımlanır. Yan yana gelen sonlu elemanlar, birbirlerine düğüm ya da düğüm noktası olarak anılan noktalarla bağlanır ve problemi temsil eden bir ağ oluşturur.

Sonlu elemanların sayısı arttıkça elemanın gerçek geometrisine daha çok yaklaşılır.

Bir yapının tüm elemanlarının sonlu elemanlarla tanımlanarak modellenmesi, problem çözümünün önemli bir zaman dilimini alır. Bunu kolaylaştırmak için gerekli giriş verilerini (input dataları) hazırlayan, ağ türetme (Mesh Generation) programları kullanılmaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminde, düğüm noktalarında bilinmeyen olarak işleme giren deplasmanlar temel değişkenleri oluşturmaktadır. Hesap yapılırken elemanı tanımlayan, yani davranışını yansıtan ve problemin fiziği ile uyumlu, polinomlar gibi, sürekli fonksiyonlar kullanılmaktadır. Bu fonksiyonlar elemanın herhangi bir noktasındaki yer değiştirmeleri, düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerle ifade etmekte kullanılır. Elemanın davranışını yani yer değiştirme şeklini tanımlayan bu fonksiyonlar, genel olarak şekil fonksiyonları ya da yer

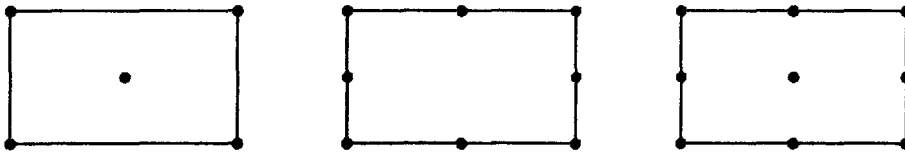
değiştirme fonksiyonları olarak anılır. Boyutlarına göre fonksiyonlar da birinci dereceden, ikinci dereceden, üçüncü dereceden vb olarak sınıflandırılır. Seçilen şekil fonksiyonları elemana ne kadar uygunsa, tüm yapıya ilişkin yaklaşım da o kadar doğru sonuç verir. Seçilen şekil fonksiyonuna göre, düğüm noktaları sonlu eleman ağında bilinmeyen olarak alındığından, düğüm noktaları sürekliyken, kenar ayrıtları süreksiz olabilir (Şekil 4.5). Bu nedenle seçilen eleman ağı kaba ise, yani sonlu elemanlar yeterince küçük seçilmemişse, analiz sonuçları çok hassas olmayabilir. Seçilen sonlu elemanlar ağı çok sayıda eleman ve düğüm noktasından oluşturulmuşsa daha hassas sonuçlar elde edilebilir. Ancak bu da analiz süresini uzatır ve işlemleri karmaşıktırır. Buna çözüm olarak, sonlu eleman köşeleri dışında, eleman kenarları veya eleman içinde de düğüm noktası içeren ve gelişmiş sonlu elemanlar olarak ifade edilen elemanlar türetilmiştir (Şekil 4.6 a, b, c). Böylece kaba bir eleman ağı ile hassas sonuçlar elde edilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 4.5 Düğüm noktaları sürekli, kenar ayrıtları süreksiz elemanlar



a) Çubuk elemanlar



b) Dikdörtgen elemanlar

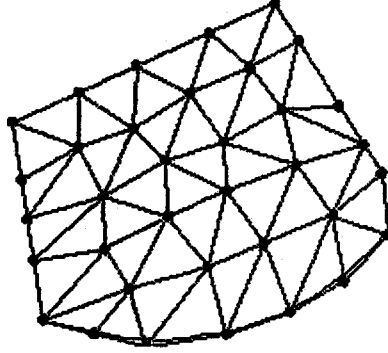


c) Üçgen elemanlar

Şekil 4.6 Gelişmiş, bir boyutlu çubuk, iki boyutlu dikdörtgen ve üçgen elemanlar

Ancak bugünkü koşullarda işlemler gelişmiş bilgisayarlar tarafından yapıldığı için, çok sayıda

sonlu elemandan oluşan ve çok sayıda bilinmeyen düğüm noktası içeren basit sonlu elemanlarla ağ türetmek daha yaygındır. Düzensiz formu olan iki boyutlu elemanlar da düzensizliğine uygun üçgen veya dörtgenlere bölünerek işlem yapılabilir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 Üçgenlere bölünmüş düzensiz eleman (Huerta, 2001)

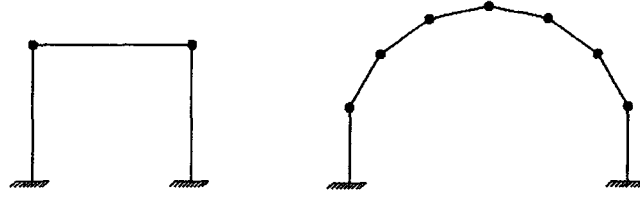
4.2 Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan Elemanlar

Sonlu elemanlar yöntemine ilişkin çok sayıda bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu programlarda değişik mühendislik problemlerinin çözümüne yönelik çok sayıda sonlu eleman tipi kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan sonlu eleman tipleri çubuk (frame), kabuk (shell), katı (solid) ve bağlantı (link) elemanlarıdır. Her bir eleman, kesit özelliklerini ve yüklerini tanımlamak ve verileri yorumlamak için kendi yerel (local) koordinat sistemine sahiptir.

a) Çubuk Eleman (Frame):

Çubuk elemanlar genellikle; iki eksenli eğilme, basınç, aksenal deformasyon ve iki eksenli kesme deformasyonu etkisinde olan kiriş, kolon, üç boyutlu çerçeveler, düzlem çerçeveler ve kabloların modellenmesinde kullanılır (Şekil 4.8).

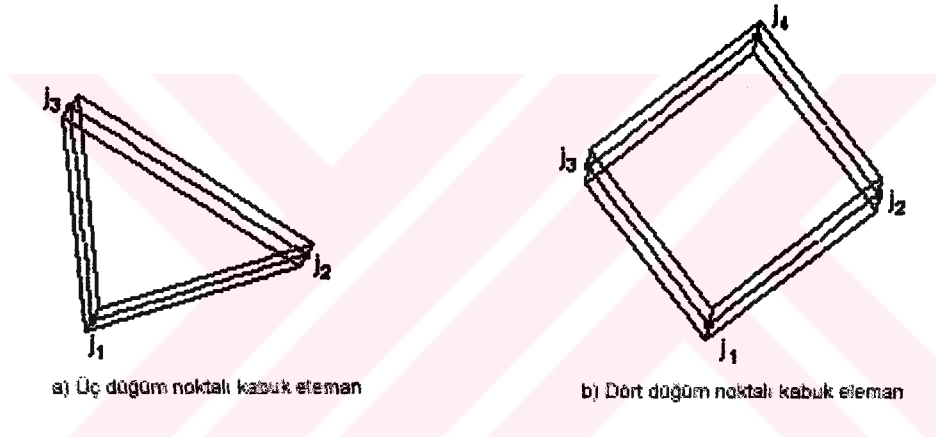
Basit çubuk eleman, düğüm olarak ifade edilen iki noktayı (i ve j gibi) birleştiren düz çizgi olarak modellenir. Grafik ara yüzde eğriler, istenilen özelliklere bağlı olarak, birçok çubuk elemana yani doğru parçacığa bölünebilir.



Şekil 4.8 Çerçeve ve kemer modelinin çubuk elemanlarla oluşturulması

b) Kabuk, Plak Eleman (Shell):

Kabuk sonlu elemanlar; bir boyutu diğer iki boyutunun yanında ihmal edilebilecek kadar küçük olan yapı elemanlarının modellemesinde kullanılır. Kabuk elemanının orta yüzeyini oluşturan sonlu elemanlar üç düğümle tanımlanan üç kenarlı j_1, j_2, j_3 veya dört düğümle tanımlanan dört kenarlı j_1, j_2, j_3, j_4 olabilir (Şekil 4.9 a, b).



Şekil 4.9 Kabuk elemanlar (Wilson, 2002)

Sonlu elemanların oluşturulmasında düğüm noktalarında her bir köşenin iç açısı 180° den küçük olmalı ve en / boy oranı çok büyük olmamalıdır. İç açılarının 45° ile 135° değerleri arasında olması daha uygun sonuçlar verir. Sonlu eleman biçiminin en / boy oranı, üçgen eleman için uzun kenarın kısa kenara oranıdır. Dörtgen eleman için, karşılıklı kenarların orta noktaları arasındaki mesafenin oranıdır. Sonlu elemanların düğüm noktaları aynı düzlemde, orta yüzeyde bulunur.

Eğri kabuk yüzeyi tanımlamak için çok sayıda sonlu düzlem eleman kullanılmalıdır. Bu elemanlar arasındaki açının 30° den küçük olması daha iyi sonuçlar verir. Bu açı 45° yi aşmamalıdır (Wilson, 2002).

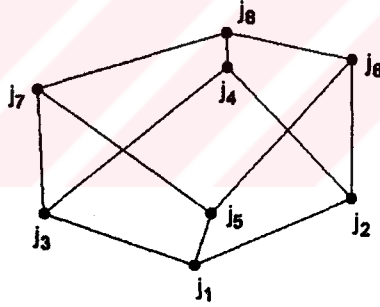
c) Düzlem (Plane) Eleman

Levha eleman, düzlemi içinde yüklü iki boyutlu elemanların hesabı için uygundur. Düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme davranışını modellemek için kullanılmaktadır. Geliştirilen sonlu elemanlar modelinde her düğüm noktasında iki bilinmeyen vardır. “Shell” elemandan farklı olarak, düğüm noktası etrafında dönme ihmal edildiğinden, düzlemine dik yükler için uygun değildir.

d) Katı (Solid) Eleman

Katı eleman üç boyutlu bir elemandır. Dört düğüm noktalı; dört yüzlü (Şekil 4.4a), piramidal ya da altı yüzlü ve sekiz düğüm noktalı prizmatik elemanların tanımlanmasında kullanılır (Şekil 4.10). Gerilmeler elemanın yerel koordinat sisteminin birleşme noktalarında değerlendirilir ve düğüm noktalarında ifade edilir.

Eleman yüzeyinin her bir köşesinin iç açısı 180° den küçük olmalıdır. En iyi sonuçlar bu açılar 90° ye yakın değerlerinde ya da $45^\circ - 135^\circ$ aralığında olduğu durumlarda elde edilmektedir. Bir elemanın uzun kenarının kısa kenarına oranı çok büyük olmamalıdır. En iyi sonuçlar kenarların eşit olduğu ya da en azından en boy oranının 4 ten az olduğu durumlarda elde edilir. En boy oranı 10 u geçmemelidir (Wilson, 2002).



Şekil 4.10 Katı (solid) eleman (Wilson, 2002)

e) Bağlantı (Link) Elemanı

Bağlantı elemanı; damperler, izolatörler, tuğlalar arasındaki harcı ifade eden elemanlar gibi bölgesel süreksizlikleri modellemek için kullanılır. Bu tür elemanlar genellikle doğrusal olmayan zaman tanım aralığı (nonlinear time history) analizinde doğrusal olmayan davranış temsil eder. Diğer analizlerde bağlantı elemanı doğrusal davranış gösterir.

4.3 Sonlu Elemanlar Analizinde İşlem Adımları

Sonlu elemanlar yönteminde, birinci adım, problemin süreklilik ortamına veya çözüm ortamına uygun eleman tipinin çubuk (frame), kabuk (shell) yada katı (solid) olarak seçilmesi ve problemi ifade eden sonlu eleman ağının oluşturulmasıdır. Bazen aynı problemde farklı elemanlar kullanmak gerekli olabilir. Problem çözümünde yapı elemanını tanımlayan sonlu elemanların türü, sayısı ve boyutu, probleme ait verilere ve analizi yapan kişinin tecrübelerine bağlıdır. Örneğin; yığma yapı elemanları basınca çalışan ve çekme almayan malzemelerle yapıldığından büyük kesitli elemanlardır. Yığma yapı örtü elemanı olarak kullanılan kubbe ve tonozların analizinde kalınlıklarının da dikkate alınması gereklidir. Bugün yaygın olarak kullanılan ve kesit özelliklerinin elemanın orta ekseninde toplandığı var sayılan, iki boyutlu “Shell” elemanlar kullanarak Kabuk Teorisi esaslarına göre modelleme çok doğru sonuçlar vermez. Bu nedenle yapılan analizlerde üç boyutun davranış özellikleri de dikkate alınmalıdır.

İkinci adım, her bir elemana düğüm noktalarının atanması, gerekli düğüm parametrelerine karar verilmesi ve eleman değişkenlerinin değişimini ifade edecek şekil fonksiyonunun seçilmesidir. Değişkenler skaler, vektörel ya da tansör olabilir. Genellikle değişken ortamı için matematiksel işlemlerin, yani türev ve integrallerin kolayca hesaplanabildiği polinomlar şekil fonksiyonu olarak seçilmektedir. Seçilecek polinomun derecesi, düğüm noktalarının sayısı ile hesaplarda dikkate alınması istenen ve sonlu eleman kenarları boyunca sürekli olması gereken değer sayısına bağlıdır. Bunun yanı sıra düğüm noktalarındaki türevler, problemin bilinmeyen, yani değişkeni olarak alınabilir. Bu şekilde sonlu elemanın matematik modelinin hesabı daha zor hale gelir, ancak analiz sonucunda elde edilecek değerler, problemin çözümünü daha doğru ifade eder.

Sonlu elemana ait matematik model bir kez kurulduktan sonra üçüncü adım olarak, tek bir sonlu elemanın özelliklerini gösteren denklemlere karar verilir. Bu denklemler; genel olarak rijitlik matrisi, kütle matrisi, sönüm matrisi vb isimlerle bilinen eleman özelliklerini ifade eder.

Dördüncü adım, yerel (local) eksenlerle ifade edilen eleman davranış denklemlerinin global eksenlere dönüştürülmesidir. Sonlu elemana ait denklemler bu eleman için geçerli olan yerel eksenlerde tanımlanır, oysa problemde çok sayıda sonlu eleman vardır ve farklı yerel eksenleri olan sonlu elemanlar birleştirilerek problem bütünüünün sonlu elemanlar ağı ile ifade edilmesi gereklidir. Bunun için tek bir ortak eksen, yani global eksen takımı seçilip, yerel eksenlerdeki denklemler global eksene dönüştürülerek bu adım tamamlanır.

Beşinci adımda, sonlu eleman köşelerinden ayrı bazı serbest düğümler varsa, bunlar çakıştırılır ve sınır şartları yani mesnet koşulları belirlenir.

Son olarak, elde edilen denklemlerin bilinmeyen düğüm parametreleri için çözümü yapılır. Eğer sistem denklemleri doğrusalsa (lineer), standart çözüm yöntemleri kolaylıkla kullanılabilir. Ancak doğrusal olmayan (nonlinear) denklemlerin çözümünü elde etmek daha zordur. Elde edilen düğüm noktası deplasmanlarından eleman iç kuvvetlerine geçerek analiz tamamlanır.

Sonlu elemanlar yönteminde eleman içinde seçilen yer değiştirme fonksiyonları ne kadar uygun olursa sonuçlar da gerçek değerlere o kadar yakın olur. Bu fonksiyonların seçiminde aşağıdaki kabuller yapılmalıdır:

Rijit cisim hareketinde elemanda şekil değiştirme olmamalıdır.

Eleman içinde şekil değiştirme ve iç kuvvetler sabit olabilmelidir.

Ayrıtlar boyunca komşu iki elemanın yer değiştirme bileşenleri birbirine eşit olmalıdır.

4.4 Yığma Kagir Yapılarda Modelleme Yaklaşımları

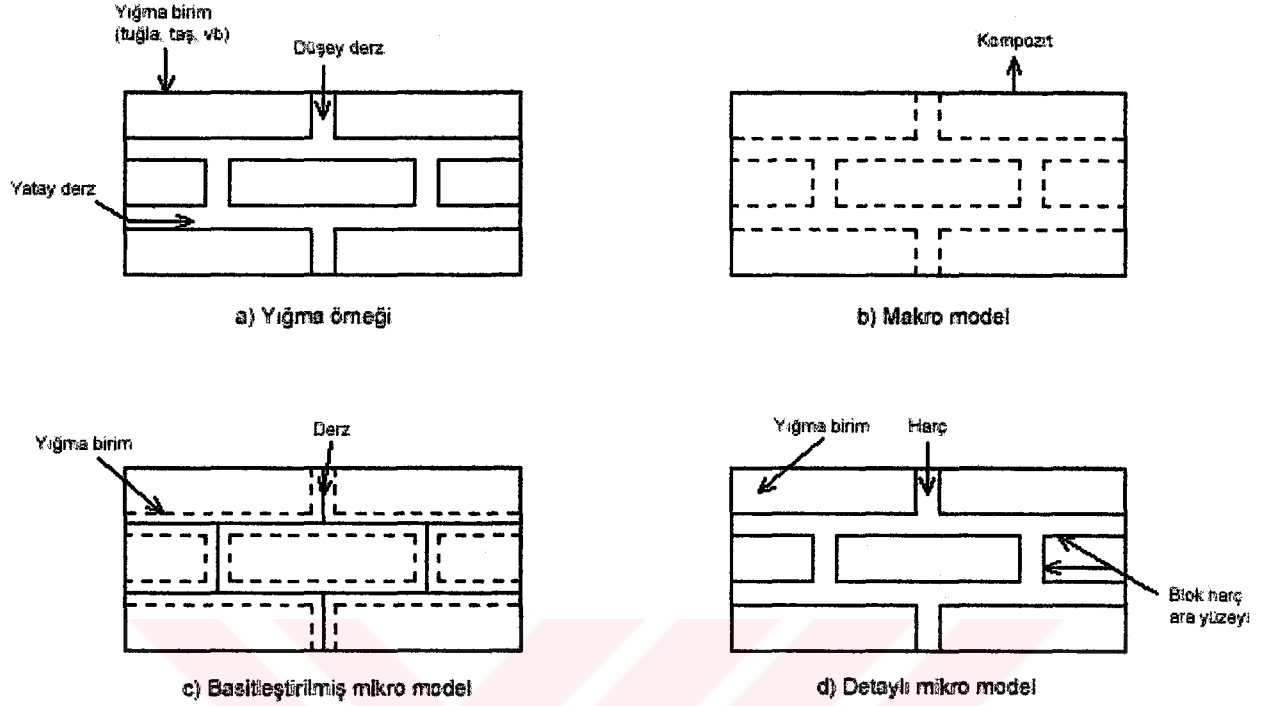
Tarihi ve kültürel mirasın büyük bir kısmını oluşturan yığma yapıların korunabilmesi için yapının çeşitli yükler altındaki davranışının araştırılması gerekmektedir. Yığma yapı taş, tuğla, kerpiç vb blokların kuru ya da harçlı birleştirilmesi ile oluşturulur. Bu küçük boyutlu elemanların süreksizliği, yapıda zayıf bir yüzey meydana getirir. Etkiyen kuvvet doğrultusuna göre harcın derz düzenine bağlı olarak, sadece harçta ya da hem harç hem de blokta hasarlar oluşur. Blokların boyutları ve izotrop özellik göstermemesi, harç kalınlığı ve yatay ile düşey derz düzeni, blok ve harcın malzeme özellikleri ve işçilik kalitesi basit bir yığma yapının bile simülasyonunu güçleştirir.

Çok karmaşık özellikler gösteren sistemin yük akışını doğru bir şekilde anlayabilmek için modern mühendislik yaklaşımlarında yapının nümerik modeli oluşturularak çeşitli analizler yapılmaktadır. Analiz yapmak için strüktürün nümerik modeli kurulurken yapı idealleştirilerek, hassasiyet düzeyine ve istenen basitliğe bağlı olarak farklı modeller oluşturulur (Şekil 4.11).

a) Makro model (Şekil 4.11b).

b) Mikro model

- Basitleştirilmiş mikro model (Şekil 4.11c).
- Detaylı mikro model (Şekil 4.11d).

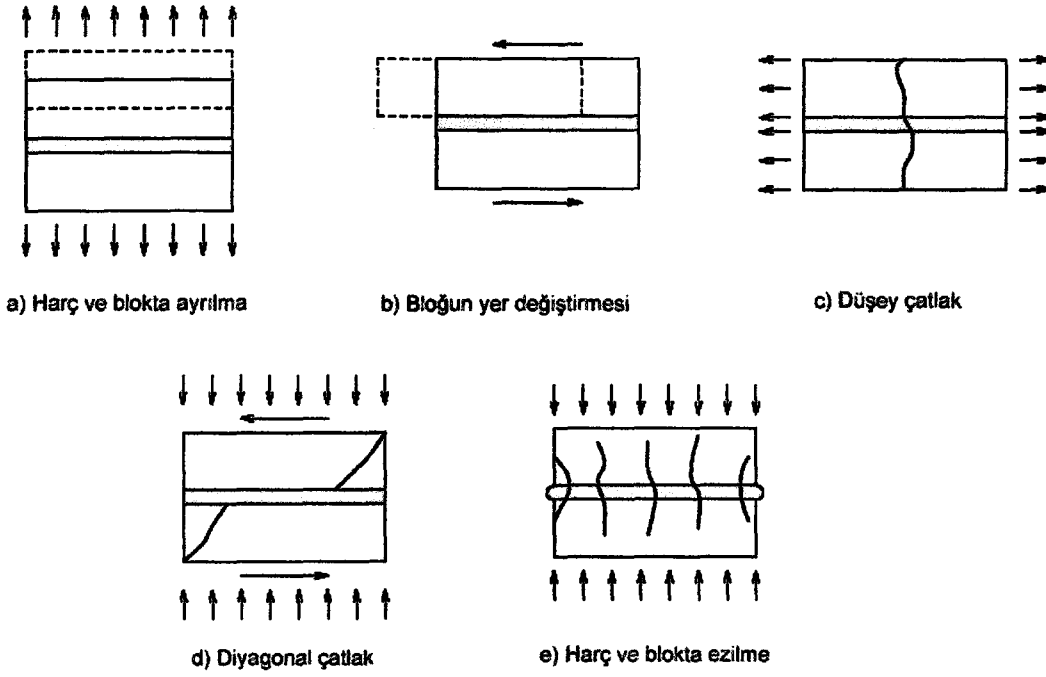


Şekil 4.11 Modelleme yaklaşımları (Lourenço, 1994)

Yapı elemanlarını oluşturan bileşenler; makro modellemede ayrıştırılmadan bütün olarak, mikro modellemede ise ayrıştırılarak tek tek ele alınır. Makro modelleme; hesaplar için gerekli zaman, gerekli işlemler ve kullanılacak eleman ağı (mesh) bakımından çok daha pratiktir. Makro veya mikro modelleme yapılırken, çekme gerilmesinin aşılması ile oluşan

- Harç ve bloğun ayrılması,
- Bloğun harç üzerinde yer değiştirmesi,
- Bloкта düşey ve diyagonal çatlakların oluşması,
- Harç ve bloğun ezilmesi,

gibi hasar mekanizmaları dikkate alınmalıdır (Şekil 4.12), (Lourenço, 1994)



Şekil 4.12 Yığma yüzeyde hasar mekanizmaları (Lourenço, 1994)

4.4.1 Makro Modelleme Yaklaşımı

Makro model; taş, tuğla gibi bloklar ve harç arasında ayırım yapmaksızın, yapı elemanını kompozit olarak kabul eden ve bu bileşenlerin ortak özelliğini yansıtan eşdeğer malzeme modelidir (Şekil 4.11b). Bu modelleme yaklaşımı, yapı yeterli büyüklükte katı (solid) elemanlardan oluşmuşsa uygulanabilir, yapının küçük bir kısmı veya herhangi bir detayının analizi için uygun değildir. Yığma yapıyı ve hasarlarını aynen temsil edemeyen bu yöntemde, tekrar edebilecek temel model bileşenleri homojen, izotrop veya anizotrop sürekli olarak kabul edilir ve yığma yapı elemanı boyunca oluşan gerilmeler üniform olarak ele alınır. Makro model, yapı elemanının davranışını aynen yansıtmasa da yöntemin kendi kriterlerine uymaktadır. Yığma yapı davranışının modellenmesi genelde homojenleştirme yöntemiyle yapılır. Süreksiz olan yığma yapı malzemesi de ortalama değeri alınarak, sürekli elemanlarla temsil edilir.

Yapı mühendisliğinde yapılan araştırmalar ve çalışmalar doğrultusunda düzenlenen şartnameler yığma yapının mekanik özelliklerine ilişkin bazı kabuller ortaya koymuştur. “Eurocode EC6” yığma yapı bileşenlerini kompozit olarak ele alır ve her birini doğrusal elastik kırılğan olarak kabul eder. Bu yönetmeliğe göre, yığma yapı elemanlarının karakteristik basınç dayanımı:

$$f_k = K(f'_b)^\alpha (f_m)^\beta \text{ (Ünay, 2002)} \quad (4.1)$$

Elastisite modülü:

$$E_m = 1000 f_k \text{ (Ünay, 2002)} \quad (4.2)$$

Burada,

f_k : yığma yapı elemanının karakteristik basınç dayanımı (MPa)

f_m : harcın ortalama basınç dayanımı (MPa)

f'_b : birim elemanın (taş veya tuğla) basınç dayanımı (MPa)

K, α , β : Sabitler.

Tuğla veya taşın normalize edilmiş basınç dayanımı:

$$f'_b = f_b \delta_m \delta_s \text{ (Ünay, 2002)} \quad (4.3)$$

Burada;

f_b : birim elemanın basınç dayanımı (MPa)

δ_m : birim elemanın nem oranını gösteren faktörü

δ_s : birim elemanın biçim veya boyuta bağlı olan şekil faktörü

Kayma dayanımı:

$$\tau = \tau_0 + \mu f_n \text{ (Ünay, 2002)} \quad (4.4)$$

olarak hesaplanır.

Burada,

τ : kayma dayanımı (MPa)

τ_0 : kohezyon değeri

μ : iç sürtünme açısı

f_n : basınç dayanımı (MPa)

Yapılan çeşitli deney sonuçlarına göre τ_0 - kohezyon değeri 0,2 – 0,5 ve τ_0 - sürtünme açısı 0,2 – 1,0 olarak belirlenmiştir (Ünay, 2002).

Yığma yapı analizinde makro modelleri uygulamanın ve anlamının zorlukları genellikle kapsamlı deney sonuçlarının eksikliğinden ve de izotrop ve elastik olmayan davranışın formüle edilmesinin güçlüğünden kaynaklanmaktadır.

4.4.2 Mikro Modelleme Yaklaşımı

Mikro modellemede, blok ve harç bileşenleri için iki farklı eleman tanımlanır ve bir ara birimle bu bileşenlerin birlikte çalışması sağlanır (Şekil 4.11c,d). Blok ve harcın gerçek geometrisinin kullanıldığı süreksiz bir modelleme yöntemidir. Mikro modelin oluşturulması için çok fazla sayısal emek gerekmektedir. Bu nedenle bu modelleme yaklaşımı hala araştırılmaktadır.

Mikro modellemede yığma yapının kısmi davranışı hakkında detaylı bilgi elde edilir. Özellikle küçük yapılar ya da yapının bir bölümü için uygundur. Mikro modelleme uygulamaları üzerinde çalışmak yığma yapının davranışını çok iyi anlamayı gerektirmektedir.

Mikro modelleme yapılırken, birimler ve birleşimler arasındaki gerçek ilişki araştırılmalıdır. Bu modelleme yaklaşımında malzeme heterojen olarak tanımlanır. Detaylı mikro modelde elastisite modülü, poisson oranı ve seçime bağlı olarak bileşen ve harcın elastik olmayan özellikleri de dikkate alınır. Tam bir mikro model, yığma yapı elemanının tüm göçme mekanizmalarını, birleşimlerdeki çatlakları, yatay veya düşey harçtaki kaymayı, yığma bileşenlerindeki çatlakları içermelidir. Bloklar ve harç birleşimleri arasındaki gerçek gerilme dağılımının dikkate alınması imkansız olduğundan, araştırmalar kabuller üzerine yapılmaktadır.

Yığma malzemeyi, kompozit malzemeyle yeterli bir biçimde temsil etmek ve hasar mekanizmalarının (Şekil 4.12) tümünü ifade etmek zordur. Uygulamalar ayırık elemanlar kullanılarak yapılmaktadır. Ayırık elemanlarda;

- Blok rijit veya şekil değiştirebilir olmalı,
- Tepe noktası ile kenar / yüzey arası bağlanmalı,
- Blok ve harcın birbirine geçişi mümkün olmalı,
- Statik çözümde yapay, yüksek sönümlenme; dinamik çözümde gerçek sönümlenme katsayısı alınmalıdır (Lourenço, 2004).

Modern nümerik araçlar, yığma bileşenleri arasındaki etkileşimi başarılı bir şekilde

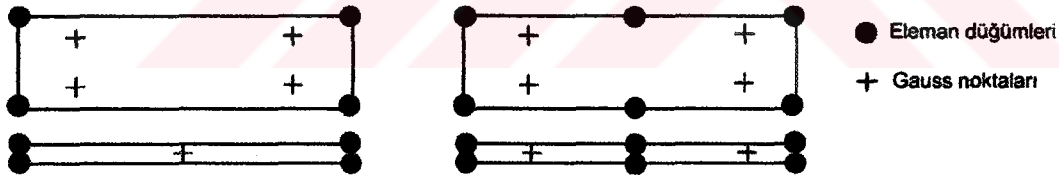
göstermektedir.

Mikro modellemenin olumlu yönü, her blok için bağımsız eleman ağının türetilmesi ve uygun denklemlerle büyük deplasmanların hesaplanabilmesidir. Olumsuz yönü ise; bu yaklaşımın çok doğru gözükmesine rağmen, eleman sayısının fazla olması ve yapının büyüklüğü nedeniyle karmaşıklığının artmasıdır. Bu yöntem gerçek davranışın temsil edilmesi için uygun olmasına rağmen, modelin oluşturulabilmesi için çok fazla bilgi, emek ve süre gerektirir. Ara yüzde çekmenin temsil edilmesi için çok sayıda temas noktasına ihtiyaç vardır ve üç boyutlu problemin eleman ağının (mesh) türetilmesi ve sonuçların değerlendirilmesi çok uzun zaman alır. Bu nedenle mikro modelleme, tüm yapının analizi için kullanışsız bir yöntemdir.

Mikro modellemede iki yaklaşım etkili olmaktadır, ararım elemanı ile modelleme ve ayrık elemanlar ile modelleme (Giordano vd, 2002).

4.4.2.1 Ara Yüzey Elemanları İle Modelleme (Süreksiz elemanlarla sonlu elemanlar yöntemi – FEMDE)

Bu yaklaşımda; harç bağlantıları sürtünmesi az, düğüm noktaları üst üste düzenlenmiş ara yüzey elemanları ile tanımlanırken, bloklar doğrusal ya da doğrusal olmayan geleneksel sürekli elemanlarla modellenmektedir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13 Sürekli elemanın düğüm elemanı olarak tanımlanması (Giordano vd, 2002)

Bilgisayar yazılımında düğümün tanımlanması kolay bir işlemdir, çünkü düğüm bilinmeyenleri, sürekli elemanlar ve düğüm elemanları için aynıdır.

Yığılma yapı bloğunun eleman ağı (mesh) ve düğüm ağının (mesh) uyumlu olması için birbirine bağlanmış olmalıdır, bu da yalnızca ara yüzey birleşim düğümlerinin aynı konumlanmasıyla mümkündür. Üç boyutlu problemlerde olduğu gibi bloklar karmaşık düzenlendiğinde bu uyumun sağlanması zordur. Düğüm elemanı, sadece küçük deplasman alanındaki birleşimi modelleyebilmektedir. Daha büyük deplasmanların olduğu durumlarda, mevcut düğümleri düzenlemek veya yeni bir düğüm tanımlamak için yeni bir ağın (remesh)

oluşturulması güçtür.

4.4.2.2 Ayrık Elemanlar İle Modelleme (DEM)

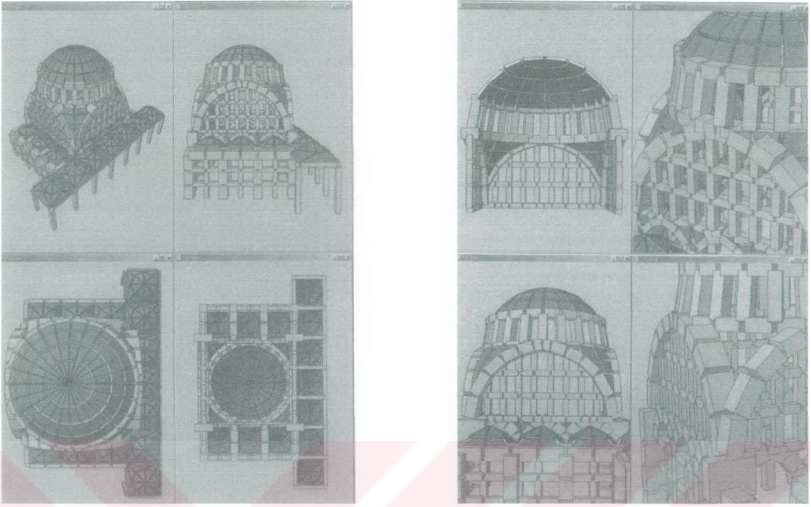
Bu yaklaşımda yapı, bağ kuvvetlerini temsil eden, elasto – plastik bağlantı elemanlarına etki eden, rijit veya deforme olabilen ayrık bloklar topluluğu olarak düşünülmektedir. Yöntem, düğümlerde büyük deplasmanlar ve bloklarda küçük deformasyonların formüle edilmesine dayanmaktadır ve kayma, dönme, darbe gibi etkilerle göçme mekanizmasını doğru bir şekilde temsil etmektedir. Bu yöntemde arabirim elemanı ile olduğu gibi birleşimler tutulmamıştır. Bunun için analiz sırasında bloklar mevcut bağlarını kaybedip yenilerini oluşturabilir. Her bir blok geometrik ve mekanik olarak bir kez modellendikten sonra ve hacim ve yüzey kuvvetleri biliniyorsa; blok deplasmanlarının zaman – tanım alanında hesabı yapılabilir. Bu yaklaşımın temel avantajı, sanal olarak birçok blok üreterek deplasmanları takip edebilmek ve strüktürün göçme mekanizmasına karar verebilmektir. Buna karşın blokların iç ağını (mesh) yapmak için kullanılan sonlu elemanlar, deforme olabiliyorsa düşük performans göstermektedir. Bu yüzden blokların içindeki zorlamaları hesaplamak için bu yöntem doğru değildir. Bu amaçlar için diğer modeller daha uygundur.

4.5 Sonlu Elemanlar Yöntemine Dayalı Analiz Model Örnekleri

Tarihi yapıları oluşturan elemanların geometrisi genellikle karmaşıktır. Süs niteliği taşıyan bazı elemanlar aynı zamanda taşıyıcı da olabilmektedir. Sonlu eleman modeli oluşturulurken karmaşık geometriye sahip yapı, düzgün geometrisi olan üçgen, dikdörtgen veya kare kesitli elemanlarla ifade edilir. Yığma yapı elemanının malzeme özellikleri için analiz tipine uygun olarak matematik modeller ve bazı kabuller yapılmaktadır. Tarihi yapı analiz örneklerinden birkaçı aşağıda açıklanmıştır.

4.5.1 Edirnekapı Mihrimah Sultan Camisi modeli (Ünay, 2002)

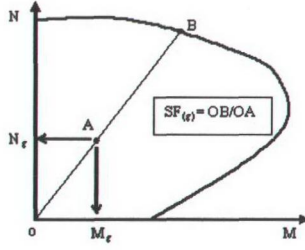
Edirnekapı Mihrimah Camisi, sonlu elemanlar yöntemiyle SAP2000 bilgisayar programı kullanılarak modellenmiştir. Oluşturulan modelde bir boyutlu çubuk ve iki boyutlu kabuk elemanlar kullanılmıştır (Şekil 4.14). Analiz sırasında yığma malzeme özellikleri doğrusal elastik varsayılmıştır. Ana taşıyıcı sütunlar ve diğer büyük elemanların malzeme özellikleri araştırılmadığından, daha önce yapılan bazı çalışma sonuçlarından yararlanılmış ve bu özelliklerin kesitin her yerinde aynı olduğu varsayılmıştır. Temele ilişkin bilgiler tam olmadığından mesnetler tam ankastre kabul edilmiştir.



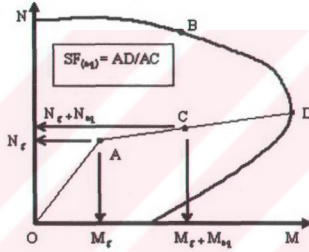
Şekil 4.14 Mihrimah Camisi sonlu elemanlar modeli (Ünay, 2002)

Mihrimah Camisi'nin düşey yükler ve deprem yönetmeliğinde tanımlı deprem yükleri için doğrusal elastik analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda elemanlarda hesaplanan iç kuvvetlerden yararlanılarak, yapı güvenliğinin ölçüsü olarak “güvenlik faktörü” tanımlanmıştır. Güvenlik faktörü, “yapı elemanının dayanım kapasitesinin, yapı elemanına etki eden kuvvetlere oranı” olarak ifade edilmiştir.

Analiz öncelikle düşey yükler için yapılarak; oluşturulan modelin doğruluğu, yapının strüktürel davranışının tanınması ve $N - M$ diyagramları hesaplanarak kritik yapı elemanları saptanmıştır. Kritik yapı elemanlarının taşıma gücü eksenel kuvvet - moment ($N-M$) etkileşim diyagramları ile saptanıp grafik olarak ifade edilmiştir. $N-M$ diyagramları ve analiz sonucunda bulunan iç kuvvetlerden yararlanarak, kritik kesitlerdeki düşey güvenlik faktörü ve deprem güvenlik faktörleri hesaplanmıştır. Güvenlik faktörünün grafik yöntemle bulunması Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’ da gösterilmiştir.



Şekil 4.15 Düşey yük güvenlik faktörü $SF(g)$ (Ünay, 2002)



Şekil 4.16 Deprem için güvenlik faktörü $SF(eq)$ (Ünay, 2002)

N-M karşılıklı etki diyagramında hesaplanan eğri, elemanın yük taşıma sınırını göstermektedir. Eğer hesaplanan iç kuvvetler eğri içerisinde ise güvenle taşınabilmekte, eğri dışında ise taşınamamaktadır. Güvenlik faktörü yönteminde hesaplanan yükün (A) uzantısının eğriyi kestiği noktaya (B) oranı (OB/OA), o elemanın söz konusu yük için güvenlik faktörünü ifade etmektedir.

Mihrimah Camisi için yapılan çalışma sonucunda;

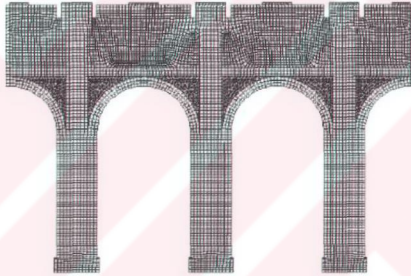
- Düşey yükler için güvenlik faktörünün çok yüksek olduğu,
- Hesap yapılan 0.4g lik deprem için deprem güvenlik faktörünün yetersiz olduğu,
- Yapıya ait tek bir güvenlik faktörünün olamadığı, elemanların taşıma güçlerinin ancak 0.17g ile 0.36g arasındaki depremlere yeterli olduğu,
- Analiz tipi ve önerilen yöntemin ancak yapının genel davranışı hakkında bilgi verebildiği,

- Mihrimah Camisinin korunması için çok daha detaylı, doğrusal olmayan yığma malzeme özelliklerine uygun, çeşitli deprem risklerine karşı analizlerin yapılması gerektiği tespit edilmiştir.

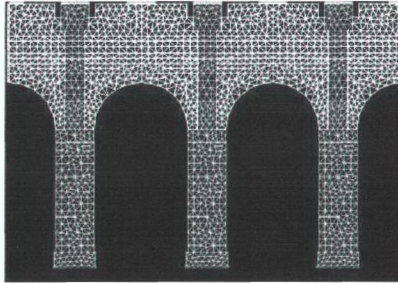
Ayrıca yapılan bu çalışmada iç kuvvetler kadar önemli olan yapı deplasmanlarından hiç söz edilmemiştir.

4.5.2 Sao Vicente de Fora modeli (Giordano vd, 2002)

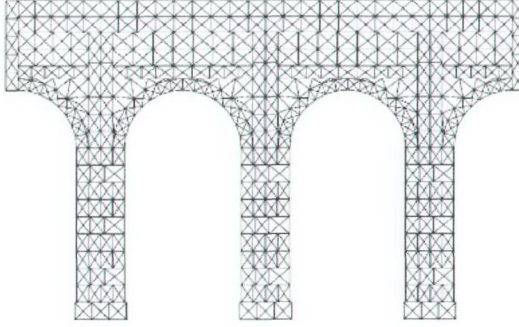
Sao Vicente de Fora Katedralinin arkadının bir bölümü, hem laboratuarda modeli kurularak hem de bilgisayar programları kullanılarak karşılaştırılmıştır. Burada amaç laboratuvar modeli ile birkaç bilgisayar model sonuçları karşılaştırmaktır. Bilgisayar modeli kurulurken üç farklı sonlu eleman analizi yapılmıştır (Şekil 4.17 – 19). Kemer dörtgenlere veya üçgenlere ya da hem dörtgen hem üçgenlere bölünerek sonlu elemanlar ağı türetilmiştir.



Şekil 4.17 ABAQUS sonlu elemanlar modeli (Giordano vd, 2002)



Şekil 4.18 CASTEM 2000 sonlu elemanlar modeli (Giordano vd, 2002)



Şekil 4.19 UDEC iç sonlu elemanlar modeli (Giordano vd, 2002)

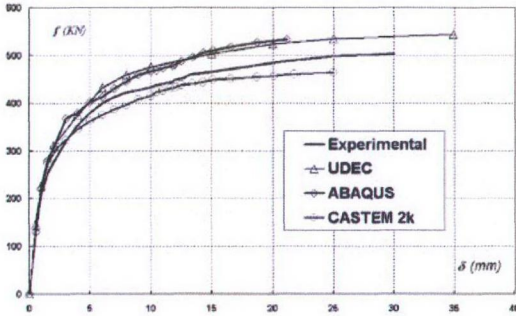
Test amacıyla yapının formuna uygun iki açıklıklı kemer laboratuvar ortamında dinamik ve çevrimsel yüklemelerle test edilmiştir. Katedral arkadının gerçek görüntüsü ve laboratuvardaki test modeli Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



Şekil 4.20 Arkad cephesi ve test modeli (Giordano vd, 2002)

Analiz programları ile doğrusal olmayan özellikler, çatlak oluşumu ile ardışık çözümler, büyük deplasmanlar gibi ileri analiz teknikleri kullanılarak yatay yük – tepe deplasmanı eğrileri hesaplanmıştır (Şekil 4.21). Test örneği için deneysel eğri ile analizlerden elde edilen kapasite eğrisi çok yakındır. Çalışma sonucunda; tüm analizler için tuğla ve harç derzlerinin dağılımı önemlidir. Ancak yığma yapılar genelde sıvalı olduğundan uygulamada gerçek derz dağılımını kesin olarak tespit etmek güçtür. Bunu ortadan kaldırmak için geliştirilen yayılmış çatlak (smear crack) analizinde de giriş bilgilerini belirlemek sorun oluşturmaktadır. Olayın karmaşık doğasını anlamak için, geliştirilen analizler ile gerçek durum test edilerek bilgilerin

karşılaştırılması ve geliştirilmesi amaçlanmıştır.



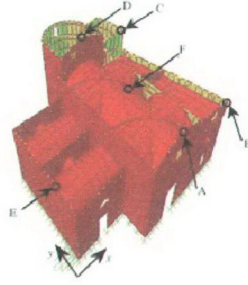
Şekil 4.21 Analiz sonuçları ve test modelinin karşılaştırılması (Giordano vd, 2002)

4.5.3 İtalya’da Bir Kilisenin Analiz Modeli (Sorace ve Terenzi, 2002)

Mevcut yapıların deprem sırasındaki davranışının belirlenmesinde, son yıllardaki yaklaşım performansa dayalı yapısal değerlendirme ve tasarımıdır. Performans kavramı deprem sırasında yapıda oluşacak deplasmanlar ve hasarları ifade eder. Özellikle Amerika Birleşik Devletlerinde ATC (Applied Technology Council) ve FEMA (Federal Emergency Management Agency) kuruluşları bu çalışmalarını standart haline getirmişlerdir.

Tarihi binaların performansı için üç farklı performans seviyesi önerilmiştir. Bunlar, hasarsızlık, tarihsel değerin korunması ve göçmenin önlenmesi performans seviyeleridir. Hasarsızlık performans seviyesi için deplasman limiti 0.0005 ve tarihsel değerin korunması için 0.001 olarak belirtilmiştir. Göçmenin önlenmesi için deplasman kriteri değil, kuvvet bazlı yöntemle elemanın taşıma gücü belirlenip stabilite kontrolü önerilmiştir.

Bu örnekte ele alınan araştırma, İtalya Assisi’de tarihi kilise yapısıdır (Şekil 4.22).



Şekil 4.22 Kilisenin cephe görünüşü ve üç boyutlu analiz modeli (Sorace ve Terenzi, 2002)

Yapı çubuk, shell ve doğrusal olmayan bağlantı elemanları ile modellenmiştir. Malzeme özellikleri testlerle belirlenmiş, çatlak oluşumunu dikkate alan ve performans esaslı sonlu eleman analizi yapılmıştır. Yönetmeliklerce 50 yılda aşılma olasılığı %50, %10 ve %2 olan depremler için deplasmanlar ve kuvvet yöntemi hesapları yapılmıştır. Analiz sonucunda gerilme dağılımları ve çatlak oluşumları belirlenmiştir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23 Gerilme ve çatlak oluşumları (Sorace ve Terenzi, 2002)

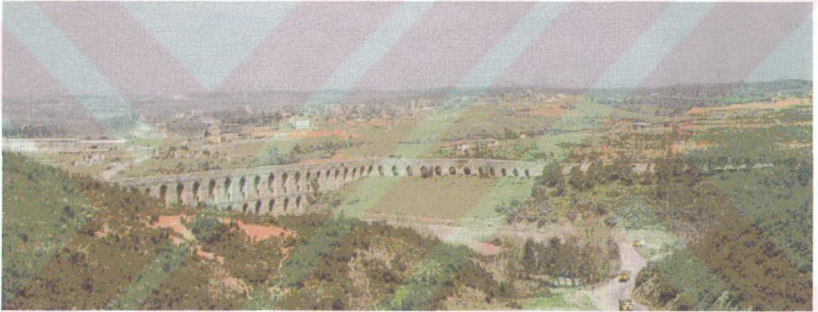
Önerilen yöntemle göre yapının performans seviyesinin yetersiz olduğu ve güçlendirilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

5. EĞRİKEMER (KOVUKKEMER) UYGULAMASI

Tarihi mirasın belgelenmesinde, yapıya ilişkin koruma ve restorasyon için gerekli hassas bilgilerin elde edilmesinde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, tarihi yığma yapıların durumunun tespit edilmesi ve korunması için sonlu elemanlar yöntemine dayalı yapısal analiz modelinin oluşturulmasında fotogrametrik verilerden faydalanmaktır. Bu amaç doğrultusunda Eğrikemer (Kovukkemer) örneğinde bir uygulama yapılmıştır.

5.1 Eğrikemer'in (Kovukkemer) Kısa Tarihçesi

Bir su getirme yapısı olan Eğrikemer, Mimar Sinan'ın Kırkçeşme isale hattı yapıları listesinde yer almaktadır. Kırkçeşme isale hattının krokisinde, en önemli dört kemerden biri olan Kovukkemer adıyla geçmektedir. Eğrikemer'in genel görünüşü Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Eğrikemer (Kovukkemer) genel görünüşü (Çeçen, 1994)

Planda kırık hat şeklinde olduğundan sonradan Kırkkemer de denmiştir (Şekil 5.2). Kırkçeşme tesislerinde yer alan yapılar arasından sadece Kovukkemer hakkındaki bilgilerde soru işaretleri vardır (Çeçen, 1994). Osmanlı yapısı olarak bilinse de kemerin bazı kısımları Bizans Dönemi'nden kalmıştır. Üç katlı olan kemerin bazı kısımlarının Bizans Dönemi'nden kaldığı tespit edilmiştir. Sinan öncesinde Helen ve Roma Dönemlerinde su kemerlerinin düşey yüzüyle yapıldığı bilinmektedir. İlk kez Mimar Sinan deprem ve rüzgar kuvvetlerine karşı kemer ayaklarını trapez kesitli yapmıştır. Eğrikemer'de de alt katlar düşey yüzüyle olup sonradan bazı yerler temelden genişletilerek trapez kesitli hale getirilmiştir. Bunun yanında üst katlarda yukarı doğru çıkıldıkça duvar kalınlığının incelendiği görülmektedir.

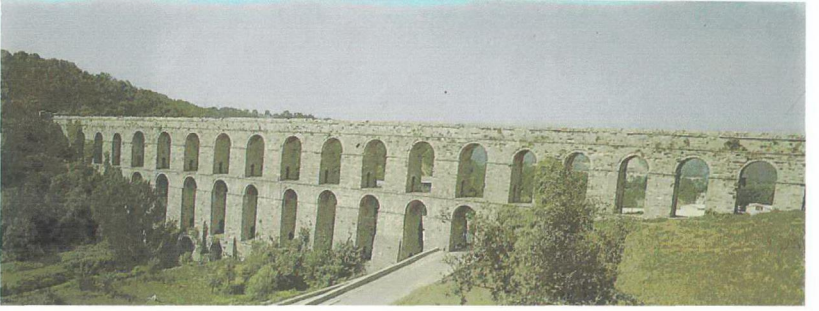


Şekil 5.2 Eğrikemer’de plan düzlemindeki kırıklık (Çeçen, 1994)

Eğrikemer’in orta ve üst katlarında yaya geçitleri yapılmıştır. Üst kattaki ayaklar içinde yapılan geçitlerin tümü aynı boyuttadır. Orta katta ise yüksekliklerin 170 cm ile 240 cm arasında değiştiği, bazı geçitlerde eski kemerin altına bir kemer daha yapılarak takviye edildiği ve yüksekliğin 240 cm’den 180 cm’e indirildiği görülmektedir. Ayrıca orta kattaki ayakların cephe taraflarının da Sinan tarafından takviye edilerek yeniden örüldüğü ve kemer ayaklarına trapez kesit verildiği tespit edilmiştir. Kemer’in cephe uzunluğu 207 m, toplam uzunluğu ise 408 m ve yüksekliği 35 m’dir. Kemer yapısında 130 cm – 150 cm eninde kesme taşlar ve moloz taşlar kullanılmıştır (Çeçen, 1994). Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’te Eğrikemer’in genel görünüşü gösterilmiştir.



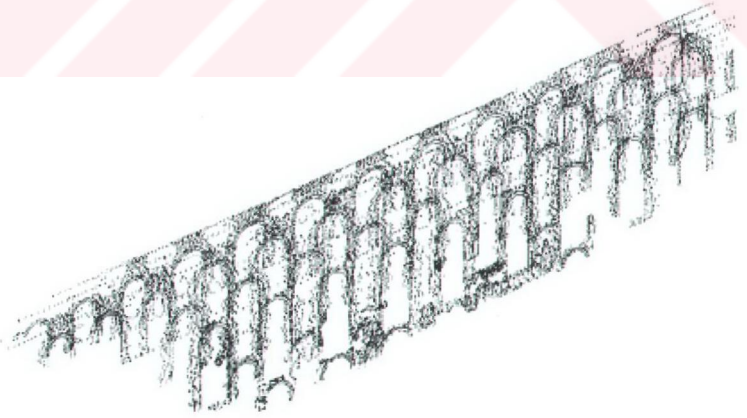
Şekil 5.3 Eğrikemer genel görünüş (Çeçen, 1994)



Şekil 5.4 Eğrikemer ana kısım (Çeçen, 1994)

5.2 Eğrikemer'e (Kovukkemer) İlişkin Elde Edilen Fotogrametrik Veriler

YTÜ Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Anabilim Dalı tarafından, Eğrikemer'de tek fotoğraf değerlendirmesine dayalı fotogrametrik röölve, ölçüm ve çizimleri yapılmıştır. Kemerin ana kolunun doğu ve batı cephelerinin bir bölümünün, 92905 noktadan oluşan üç boyutlu nokta bulutu ve iki boyutlu cephe çizimleri elde edilmiştir (Şekil 5.5 – 7). Elde edilen üç boyutlu nokta bulutunun ham verileri Micro Station programı ile DWG uzantılı çizim dosyaları haline getirilmiştir.



Şekil 5.5 Eğrikemer fotogrametrik nokta bulutu

Yapılan bu çalışmada iki boyutlu rölöve çizimleri istendiğinden üçüncü boyuta ilişkin ölçme yapılmamıştır. Kemer kesiti ve kemer planına ilişkin bilgiler araştırılmamıştır. Bundan dolayı Eğrikemer'e ilişkin bilgilerin yetersiz olduğu görülmüştür. Sadece kemerin ana kısmında ölçme yapılmış, ölçme yapılan kısımlarda da eksikler olduğu görülmüştür. Ayrıca, verilerin elde edilmesi sırasında disiplinler arası çalışmanın çok güç olduğu görülmüştür.

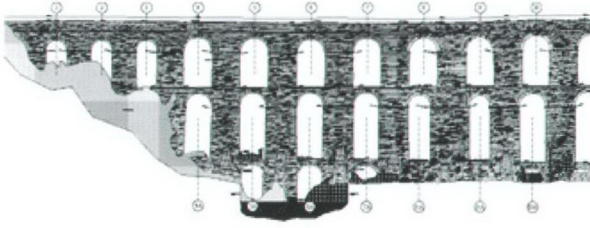


Şekil 5.6 Fotogrametrik yöntemle elde edilen Eğrikemer doğu cephesinin bir bölümü

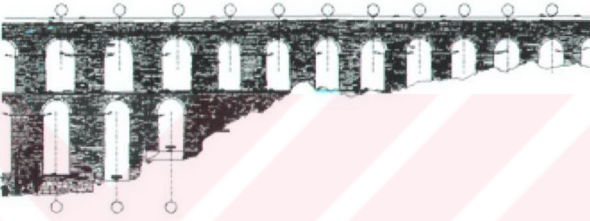


Şekil 5.7 Fotogrametrik yöntemle elde edilen Eğrikemer batı cephesinin bir bölümü

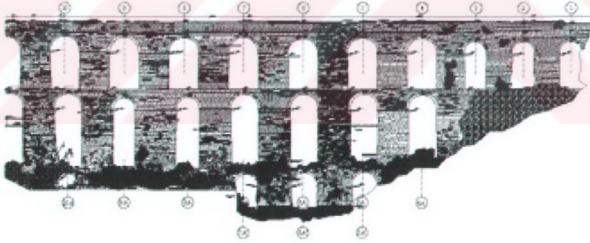
Fotogrametri bilimi yüzeyle çalıştığından yapının kesitine ilişkin bilgiler ölçülmemektedir. Bu yüzden tez kapsamında araştırılan sonlu elemanlar yöntemine dayalı analiz modelinin oluşturulmasında, eksik olan kesit bilgileri Yıldız Teknik Üniversitesi Restorasyon Anabilim Dalı – Döner Sermaye İşletmesi tarafından yapılan “Kemberburgaz, Eğrikemer (Kovukkemer) Rölöve, Restorasyon Projeleri”, (Temmuz 2002), çizimlerinden tamamlanmıştır (Şekil 5.8 – 12).



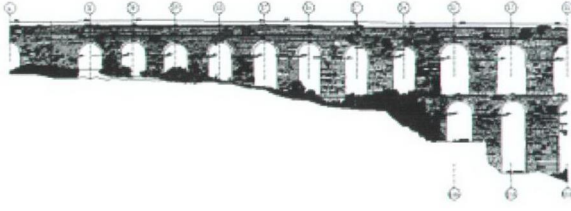
Şekil 5.8 Eğrikemer doğu cephesi, 1 – 10 aksı, rölöve çizimi



Şekil 5.9 Eğrikemer doğu cephesi, 11 – 21 aksı, rölöve çizimi



Şekil 5.10 Eğrikemer batı cephesi, 1 – 10 aksı, rölöve çizimi



Şekil 5.11 Eğrikemer batı cephesi, 11 – 21 aksı, rölöve çizimi



Şekil 5.12 Eğrikemer kesitleri rölöve çizimi

5.3 Eğrikemer'in Fotogrametrik Verileriyle Sonlu Elemanlar Yöntemine Dayalı Analiz Modelinin Oluşturulması

Sonlu elemanlar yöntemine dayalı çeşitli analiz programları mevcuttur. Bu programlar sadece yapı analizi için yazılmamıştır. Genelde inşaat, makine, uçak, otomotiv ve endüstriyel tasarımda kullanılmaktadır. Problemin yapısına uygun parametreler girilerek yapı analizi ve yığma yapı analizinde kullanılabilir. Bu programlarda veri tanımlama ve işleme biçimi genelde birbirine benzese de her program kendine has farklılıklar göstermektedir. Bu tez çalışmasında yapılan uygulamanın belli bir yapısal analiz programından bağımsız olması istenmiş ve tüm programlar için geçerli özelliklerin anlatım yolu izlenmeye çalışılmıştır.

Fotogrametri Bölümü'nden elde edilen veriler CAD ortamında olduğundan DWG ve DXF uzantılı dosya biçimleri kullanılmıştır.

5.3.1 Fotogrametri Bölümü'nden Gelen Verilerin Düzenlenmesi

Fotogrametri Bölümü'nden gelen çizimler incelenerek, Eğrikemer'e ilişkin fotoğraflar ve rölöve çizimleriyle karşılaştırılmıştır. Böylece hangi cephelerin fotogrametrik verilerinin elde edildiği saptanmıştır.

Fotogrametrik ölçme sırasında yapraklar, otlar vb öğeler, ölçmenin yapılmasına engel teşkil eder. Yaprak vb öğeler kemer strüktürünü kapattığı için burada yer alan taş veya tuğla bilgilerinde ayrıntılı ölçme yapılamadığı için eksikler vardır.

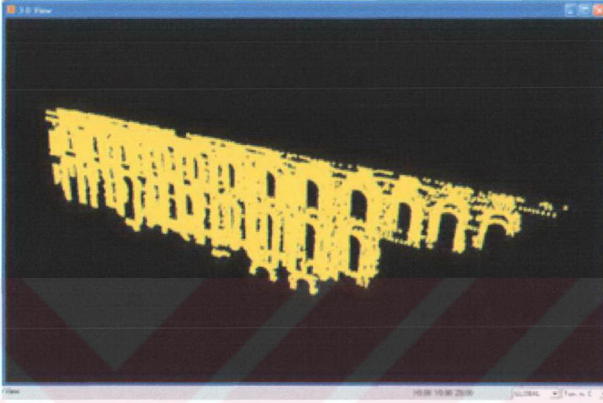
Fotogrametrik çizimlerin yanı sıra elde edilen diğer bir tür fotogrametrik veri de üç boyutlu nokta bulutudur. Eğrikemer'de yapılan ölçme sonucunda her iki cepheye ait toplam 92905 adet noktadan oluşan, DWG uzantılı çizim dosyası temin edilmiştir (Şekil 5.4). Nokta bulutuna ait çizim dosyası incelendiğinde birçok noktanın üst üste iki ya da daha çok kez işaretlendiği görülmüştür. Bu sorunun DWG dosyası oluşturulması sırasında ortaya çıktığı düşünülmektedir. Gereksiz olan bu noktaların temizlenmesi oldukça uzun zaman almaktadır. Ancak gereksiz noktalar temizlendikten sonra nokta bulutunun toplam nokta adedi 92905'ten 40613'e indirilmiştir.

5.3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemine Dayalı Analiz Modelinin Kurulması

Sonlu elemanlar yöntemine dayalı analiz programlarında düğüm noktaları; nokta numarası ve bu noktanın uzaydaki yerini belirten x, y, z koordinatlarıyla tanımlanmaktadır. Fotogrametrik yöntemle elde edilen veriler tamamen sayısal olduğundan ve nokta sayısı çok fazla olduğundan, fotogrametride noktaların tek tek numaralandırılması anlamlı değildir. Sonlu elemanlar yöntemine dayalı analiz programlarında her noktaya numara verilerek çalışılır. Bu sorunun aşılması için tek tek nokta bilgileri tespit edilip, numaralama elle yapılabilir. Ancak bu işlemin elle yapılması çok uzun zaman gerektirir ve hata olasılığı yüksektir. Yapılacak herhangi bir hatanın denetimi zordur, dolayısıyla pratik bir yol değildir.

Bunun yerine çeşitli programlar arasında veri alış verişi sağlayan dosya biçimlerinden faydalanılabilir. Tüm analiz programlarında import (al) komutu yer alır. Bu komut sayesinde farklı bir programda elde edilen veriler başka bir programa çağırılarak kullanılmaktadır. Bunun için verilerin oluşturulduğu programda export (gönder) veya save as (farklı kaydet) seçeneği kullanılarak DXF uzantılı dosya biçimi oluşturulur. DXF uzantılı dosya biçimi çeşitli bilgisayar programlarında kullanılabilen ortak bir dosya biçimidir, belli bir programa has değildir. Tüm sonlu elemanlar yöntemine dayalı analiz programlarında DXF uzantılı dosya biçimi import edilebilir. Noktalar kullanım amacına ve yapılacak modele göre katmanlara

ayrılır. Analiz programları import edilen noktalara otomatik olarak numara verir ve koordinat sistemini oluşturur. Eğrikemer'e ait fotogrametrik verilerden elde edilen üç boyutlu nokta bulutunun analiz programına çağırılması yukarıda anlatılan yöntemle sağlanmıştır (Şekil 5.12).



Şekil 5.13 Fotogrametrik nokta bulutunun sonlu elemanlar modeli

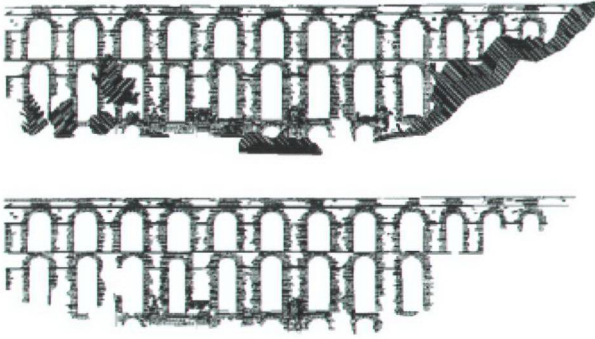
Düğüm olarak anılan bu noktaların numarası ve koordinat bilgileri analiz programı içinde değiştirilebilir, kopyalanabilir veya silinebilir (Şekil 5.13). Tüm analiz programlarının ilk adımı olan düğüm noktalarının numaralandırılması ile yapı geometrisi hızlı ve kolay bir şekilde elde edilir.



Şekil 5.14 Sonlu eleman modelinde düğüm noktası bilgileri

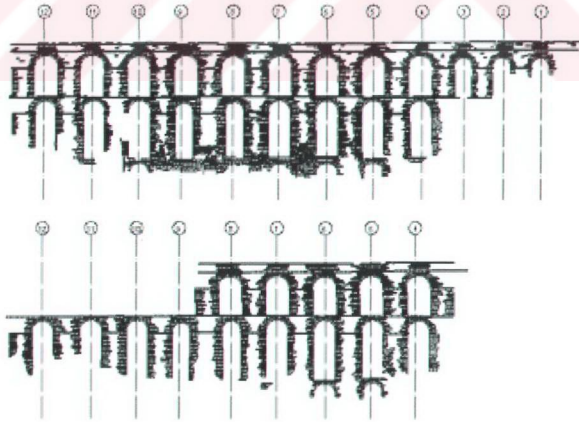
Düğüm noktaları tespit edildikten sonra programın işleyişine uygun, üçgen veya dörtgen sonlu elemanlardan oluşan bir ağ türetilir. Ağ türetilirken noktalar tek tek elle birleştirilip istenen ağ oluşturulabilir, program içinde otomatik ağ türetme seçeneği kullanılabilir veya CAD çiziminden faydalanılabilir.

Tez kapsamında daha hızlı ve doğru bir analiz modeli oluşturmak için fotogrametrik verilerden yararlanarak, Autocad 2002 ortamında üç boyutlu model oluşturulması amaçlanmıştır. Fotogrametrik çizimlerden üç boyutlu analiz modelinin oluşturulması bir dizi işlem gerektirmektedir. Eğrikemer uygulamasında, ilk önce strüktür dışındaki ağaç öğeleri gibi analiz modelinde kullanılmayacak kısımlar temizlenmiştir (Şekil 5.15). Bu aşamada, temizlenen kısımlardaki eksik verilerin nasıl tamamlanacağı sorusu ortaya çıkmaktadır. Doğrudan ölçme yapılamayan bu kısımlarda ayrıca ölçme yaparak eksikler giderilebilir. Bu, fotogrametrisinin bir ihtiyacı olmadığından yapılmamıştır.

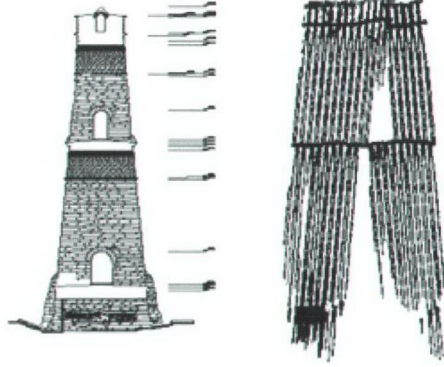


Şekil 5.15 Modelde kullanılmayacak ögelerin temizlenmesi

Temizleme işleminin ardından kemere uygun akslar verilerek fotogrametrik çizimi yapılan cepheler arasında ilişki kurulması sağlanmıştır (Şekil 5.16). Fotogrametrik çizimler mimari rölövelere uygun bir şekilde düzenlenmiştir. Fotogrametrik cephe çizimleri kullanılarak üç boyutlu model oluştururken, ölçümler sadece yüzeye ilişkin bilgileri içerdiğinden, kemerin doğu ve batı cephe çizimleri sırt sırta getirilerek rölövedeki kesit bilgileri doğrultusunda cepheler arası ilişki kurulmuştur (Şekil 5.17). Böylelikle analiz modelinin gerçek ölçülere uygun bir biçimde yapılması sağlanmıştır.



Şekil 5.16 Fotogrametrik çizimlere aks verilmesi

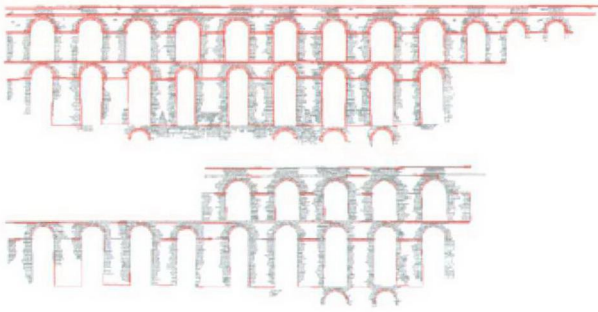


Şekil 5.17 Rölöve çizimindeki kesit bilgilerine göre fotogrametrik çizimlerin düzenlenmesi

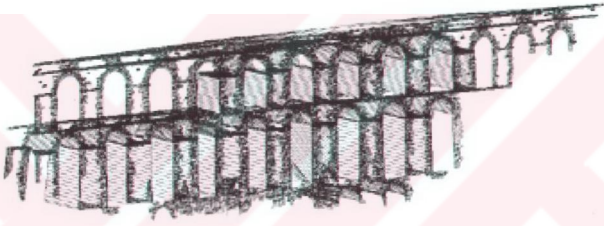
Kemer kesiti incelendiğinde duvar kalınlığının aşağıdan yukarı doğru daraldığı görülmüştür (Şekil 5.12, Şekil 5.17). Fotogrametrik çizimlerde kesit bilgilerine ihtiyaç olmadığından strüktürdeki daralma dikkate alınmamıştır. Oysa üç boyutlu modelin kurulması için bu bilgi mutlak surette gereklidir.

Kemer kesiti geniş olduğundan kesite bakıldığında duvar örgüsünün çok sayıda bileşenden oluştuğu görülmektedir. Bu nedenle doğu cephesinde görülen bir bileşen batı cephesinde tam olarak karşılık bulamamaktadır. Duvar kalınlığına göre duvar içindeki örgü biçimi hakkında tahmin yürütülebilir. Mikro model yapılacaksa duvar örgüsü ve duvar kesiti hakkındaki bu varsayım son derece önemlidir.

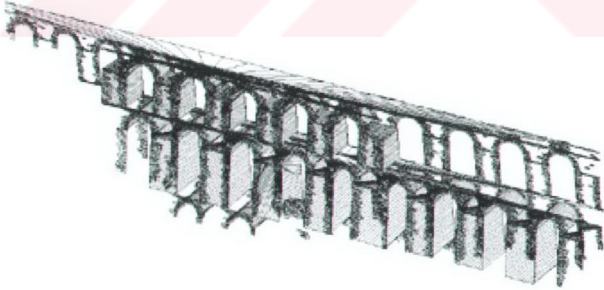
Eğrikemer modelinin üç boyutlu çizimi yapılırken kemerler, hatıllar ve taş örgüler ayrı katmanlar olarak ele alınmıştır. Bunun için elemanlar yeniden çizilerek üç boyutlu modelde karşılıklı birleştirilmek üzere hazırlanmıştır (Şekil 5.18). Bu elemanların çizimi düzenlendikten sonra karşılıklı iki cephenin elemanları birleştirilmiştir (Şekil 5.19). Böylelikle oluşturulan bu model herhangi bir ilave işleme gerek olmadan yapının makro modelinin kurulmasında kullanılabilir (Şekil 5.20, Şekil 5.21). Ayrıca bu işlem sırası takip edilerek kemerin tüm ölçüleri alınabilen bir kısmı için mikro model kurulması mümkündür. Mikro model kurulurken yapım ve örgü biçimi hakkında çok detaylı bilgiye ihtiyaç vardır.



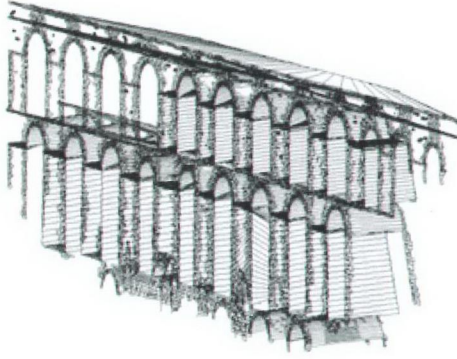
Şekil 5.18 Kemerler, hatıllar ve taş örgülerin ayrıştırılması



Şekil 5.19 Karşılıklı cephelerin birleştirilmesi



Şekil 5.20 Eğrikemer modeli



Şekil 5.21 Eğrikemer modeli

6. SONUÇLAR

Tarihi ve kültürel mirasın korunması ve gelecek kuşaklara aktarılması için belgelenmesi gerekmektedir. Fotogrametrik yöntem tarihi yapıların belgelenmesinde yıllardır başarı ile kullanılmaktadır. Gelişen bilgisayar teknolojisi ile sayısal fotogrametri, tarihi ve kültürel mirasın hızlı ve hassas bir şekilde belgelenmesine olanak vermiştir. Sayısal görüntüleme ile çalışan fotogrametri bu tür çalışmalarda, resme dayalı fotogrametrik yöntem ve laser tarama yöntemini kullanmaktadır. Bu yöntemlerden her ikisi de mimarlık alanında kullanılmaktadır.

Fotogrametrik verilerden yararlanarak yapının üç boyutlu modeli kurulabilir. Son yıllarda gelişen laser tarayıcılarla yapının üç boyutlu modelinin kurulmasında önemli gelişmeler olmuştur. Bu tez çalışmasında; YTÜ Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Anabilim Dalı tarafından fotogrametrik ölçmesi yapılmış olan Eğrikemer'in üç boyutlu analiz modeli oluşturulması amaçlanmıştır. Uygulama örneğinde sayısal veriler kullanarak üç boyutlu düğüm noktası modeli ve üç boyutlu katı model, herhangi bir analiz programına bağlı kalınmadan oluşturulmuştur. Oluşturulan model analiz programına aktarılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Fotogrametri yöntemi ile tarihi yapıların çizimleri milimetrik hassasiyette ve oldukça hızlı (özel durumlarda büyük ölçekli fotoğraf ve özel donanımlarla) bir biçimde yapılabilir.
- Sayısal fotogrametri yöntemi ile elde edilen veriler kullanarak yapının üç boyutlu yüzey modeli hassas bir biçimde oluşturulabilir.
- Mimarlık ve sayısal fotogrametri arasında ilişki kurularak tarihi ve kültürel mirasın belgelenmesinde iki disiplin arasında iş birliği yapılabilir.
- Fotogrametrik yöntemle elde edilen bilgiler kullanarak hassas ve gerçeğe uygun üç boyutlu analiz modeli hızlı bir şekilde türetilir. Model kurma işi hızlandığında emek ve zamandan tasarruf edilir. Çok hassas ölçümlere dayalı modelde hata ihtimali azalır ve modelin kontrolü kolaylaşır.
- Mikro model yapılacaksa, fotogrametrik verilerin yanı sıra yapı bileşenlerinin boyutları, özellikleri, duvar örgüsü, varsa düşey ve yatay bağlantı elemanları vs hakkında detaylı bilgilere ihtiyaç vardır.

Bu çalışma sonucunda ortaya çıkan sonuçlar doğrultusunda araştırma devam ettirilerek, sonlu elemanlar yöntemine dayalı analiz modelinin oluşturulmasında fotogrametrik verilerin

kullanılması yöntemi geliştirilmeye açıktır. Fotogrametri ve mimarlık disiplinleri arasında koordinasyon ve ortak çalışmalar ile tarihi yapıların sonlu elemanlar yöntemine dayalı üç boyutlu analiz modeli oluşturulabilir.



KAYNAKLAR

- Alby, E., Grussenmeyer, P., Perrin, J.-P., (2003), "Integration Of Close Range Photogrammetric Surveys In The Design Process Of Architectural Projects", CIPA 2003 19. International Symposium, 30 Sep. – 4 Oct 2003, Antalya, 46 – 51.
- Amrhein, J. E., (2000), "Masonry Design", The Engineering Handbook, CRC Press LLC, Sec. 32.
- Asteris, P.G. ve Tzamtzis, A.D., (2003), "On the Use of a Regular Yield Surface for the Analysis of Unreinforced Masonry Walls", Electronic Journal of Structural Engineering 3, 2003, 23 – 42.
- Aydın, Ö., (1984), Ölçme Bilgisi 1, Yıldız Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 1984, İstanbul.
- Aydoğan, M., (tarih), Taşıyıcı Elemanlarda Sonlu Elemanlar Yöntemi, İTÜ İnşaat Fakültesi, Seminer Notları, tarih, İstanbul.
- Caprioli, M. ve Scognamiglio, A., (2003), "Photogrammetry and Laser Scanning in Surveying and 3D Modelling of Architectural Heritage", FIG Working Week 2003 Paris, France, April 13-17, 2003.
- Çeçen, K., (1988), Mimar Sinan Ve Kırkçeşme Tesisleri, Yayına Hazırlayan: İTÜ ve İSKİ Genel Müdürlüğü, İstanbul, 1988.
- Çeçen, K., (1994), "Kovuk Kemer", Düünden Bugüne İstanbul Ansiklopedisi, Cilt 5, Kültür Bakanlığı ve Tarih Vakfı Ortak Yayını, İstanbul, 1994, sf 79 – 80.
- Chen, W.F. ve Richard, L. J.Y., (2003), The Civil Engineering Handbook Second Edition, New York, 2003.
- Christian, P., D., (1999), "Basic Behaviour Of Masonry: Case Studies, Alternative Approaches And Modeling Hints", Technology, Law and Insurance, 1999 – 4, 131–136.
- Croci, G., (2000), The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage, Computational Mechanics Publications / WIT Press, 2000, Southampton.
- Çelebi, R., (1994), Yapı Elemanları 1 – 2, YTÜ Mimarlık Fakültesi, 1994, İstanbul.
- D'Ayala, D. F., (1998), "Numerical Modeling Of Masonry Structures Reinforced Or Repaired", Computer Methods In Structural Masonry -4, 161-168.
- Emem, O., Yastikli, N., Balık, F., Alkis, Z., (2002), "Creating 3d Photo Realistic Models For Visualisation Of Historical Buildings", Third International Symposium Remote Sensing Of Urban Areas, 11 – 13 June 2002, İstanbul.
- Fernandez, M. J.J., Martinez, R. J., San, J. A. J., (2003), "Digital Surface Models For Architectural Heritage Analysis. The Survey Of The Aqueduct Of "Los Milagros" In Merida, Spain", CIPA 2003 19. International Symposium, 30 Sep. – 4 Oct 2003, Antalya, 469 – 473.
- Giordano, A., Mele, E., De Luca, A., (2002), "Modeling Of Historical Masonry Structures: Comparison Of Different Approaches Through A Case Study", Engineering Structures 24, 1057-1069.
- Göncü, S., (1997), Sonlu Eleman Yöntemiyle Kiriş ve Düzlem Gerilme Elemanları Arasında Geçiş Elemanı Oluşturulması ve Perdelerde Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Fakültesi (yayımlanmamış).

Huerta, S., (2001), "Mechanics of masonry vaults: The equilibrium approach", Historical Constructions, 2001, Guimares, 47 – 69.

Karslı, F., Ayhan, E., Tunç, E., (2003), "Building 3d Photo-Texture Model Integrated With Gis For Architectural Heritage Conservation", CIPA 2003 19. International Symposium, 30 Sep. – 4 Oct 2003, Antalya, 144 – 147.

Lourenço, P. B., (1994), "Analysis Of Masonry Structures With Interface Elements – Theory And Applications", TNO Building and Construction Research Computational Mechanics, Delft University of Technology, June 1994, 1 – 4.

Lourenço, P. B., (2004), "Current Experimental And Numerical Issues In Masonry Research", SISMICA 2004 - 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, 14 – 16 April 2004, 120 – 136.

LUSAS Powerful FE Technology For Specialist Applications, MYSTRO User Guide, FEA Ltd, Surrey, KT1 1HN, UK.

Maheri, M. R. ve Rahmani, H., (2003), "Static and seismic design of one-way and two-way jack arch masonry slabs", Engineering Structures 25, 2003, 1639–1654.

Mayer, H., Mosch, M., Peipe, J., (2003), "Comparison Of Photogrammetric And Computer Vision Techniques 3d Reconstruction And Visualization Of Wartburg Castle", CIPA 2003 19. International Symposium, 30 Sep. – 4 Oct 2003, Antalya, 103 – 108.

Mettenleiter, M., Hartl, F., Heinz, I., Neumann, B., Hildebrandt, A., Abmayr, T., Fröhlich, C., (2003), "3D Laserscanning for Engineering and Architectural Heritage Conservation", CIPA 2003 19. International Symposium, 30 Sep. – 4 Oct 2003, Antalya, 484 – 489.

Moore, F., (1999), Understanding Structures, 1999, McGraw – Hill Companies, USA.

Nasce, V., Pistone, G., Roccati, R., (1993), "Investigation of the Roman Aqueduct Structure of Acqui Terme", IABSE Symposium, Sep. 1993, Rome, 229 – 237.

Sorace, S. ve Terenzi, G., "Seismic Evaluation and Retrofit Of Historical Churches", Structural Engineering International – 4/2002, Science and Technology, 283 – 288.

Thomas, E. B. ve Anderson, A. K. Jr., (1995), "The Masonry Arch Reconsidered", Journal Of Architectural Engineering, Vol. 1. No. 1, Mart 1995, 25 – 36.

Türkçü, Ç., (1997), Yapım, Mimarlar Odası İzmir Şubesi Yayınları, 1997, İzmir.

Ünay, A. İ., (1997), A Method For The Evaluation Of The Ultimate Safety Of Historical Masonry Structures, Doktora Tezi, ODTÜ Mimarlık Bölümü (yayınlanmamış).

Ünay, A., İ., (2002), Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı, ODTÜ, Mimarlık Fakültesi, 2002, Ankara.

Wait, R., Mitchell, A., R., (1985), Finite Element Analysis and Applications, 1985, Liverpool.

Wilson, E., L., (2002), SAP 2000 Version 8.0, Integrated Software for Structural Analysis and Design Analysis Reference Manual, Computers and Structures, July 2002, California.

Yastıklı, N., Emem, O., Alkis, Z., (2003), "3d Model Generation And Visualization Of Cultural Heritage", CIPA 2003 19. International Symposium, 30 Sep. – 4 Oct 2003, Antalya, 280 – 282.

Yaşayan, A., (1996), Fotogrametri – I Ders Notları , Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

YTÜ Restorasyon Anabilim Dalı – Döner Sermaye İşletmesi, (2002), “Kemberburgaz, Eğrikemer (Kovukkemer) Rölöve, Restitüsyon ve Restorasyon Projeleri”, İstanbul, Temmuz 2002.



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	29.08.1978	
Doğum yeri	Varna, Bulgaristan	
Lise	1993-1996	Sakarya Ali Dilmen Lisesi
Lisans	1998-2002	Yıldız Teknik Üniversitesi Mimarlık Fak. Mimarlık Bölümü
Yüksek Lisans	2002-2005	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı, Yapı Programı

Çalıştığı kurum

2003- Devam ediyor YTÜ, Mimarlık Fakültesi Araştırma Görevlisi