

SERVİKAL SPİNAL BİOMEKANİK ÇALIŞMALARDA SONLU ELEMAN YÖNTEMİNİN KULLANIMI

Hakan BOZKUŞ*

Sonlu eleman yöntemi, mühendislerin karşılaştığı karmaşık ve zor problemleri kabul edilebilir bir yaklaşımla çözebilen bir çözüm yöntemidir.

Fiziksel bir olay veya sistem tanımlanması "fiziksel büyüklükler" ile olmaktadır. Bu büyüklükler, sabit veya değişken olabilir. Fiziksel bir olayı tanımlamak için gerekli ve yeterli sayıdaki değişkenlere, "bağımsız veya serbest değişken" denirken bunlara bağlı olan diğer değişkenlere ise "bağımlı değişken" denir. Çoğu sistemlerde bilinen "sınırlar" veya "sınır şartları" serbest değişkenlerin sayısını azaltmaktadır. Zaman dışındaki bu değişkenlere "sistemin genel koordinatları" denilmektedir. Böylelikle fiziksel bir olayda bağımsız genel koordinatların sayısının "sistemin serbestlik derecesi" ni gösterdiği söylenebilir. Fiziksel olaylar ise kendi içinde "sürekli ortam veya alan problemleri" ile "parçalı ortam problemleri" olarak ayrılırlar. Sürekli ortam problemlerinde, her noktada fiziksel büyüklüklerin bilinmesi gerekir ki burada serbestlik derecesi sonsuzdur. Parçalı ortam problemlerinde ise serbestlik derecesi sonlu sayıdadır.

Sonlu eleman yöntemi, sürekli ortam problemlerine uygun sayısal bir yöntemdir. Fiziksel bir problemin çözümü için belli bir ortamda veya bölgede sistemin bağımsız ve bağımlı değişkenleri arasında bir bağıntı kurulabilir. Buna "sistemin temel denklemi" denir. Sistemin temel denklemlerinin kurulması ve sınır şartları altında çözülmesi için kullanılan genel çözüm yöntemleri genellikle iki grupta toplanabilir.

a. Analitik çözüm yöntemleri: Differansiyel denklemler ve varyasyonel hesap yöntemleri gibi.

b. Sayısal (nümerik) çözüm yöntemleri: Sonlu farklar yöntemi, ağırlıklı artıklar yöntemleri gibi.

Analitik çözüm yöntemleri: Analitik yöntemler, matematik bir fonksiyondur ve ortamın her noktasında

değişkenin değerini verir. Bu yöntem, ancak basitleştirilmiş hallerde tercih edilir.

Sayısal analiz yöntemleri: Mühendislikte asıl tercih edilen çözüm yöntemi sayısal yöntemlerdir. Sayısal yöntemler, geometrisi, malzeme özellikleri ve sınır şartları bilinen problemlerin kabul edilebilir yaklaşımla çözülebilen yöntemlerdir. Sonlu farklar yöntemi $1/n$ sonlu eleman yöntemi en çok kullanılanlarıdır. Her iki yöntemde de çözüm bölgesi, düğüm noktaları topluluğu ile temsil edilir (3,6).

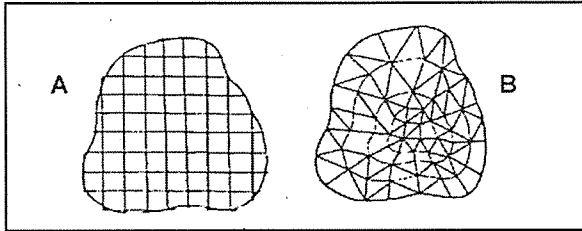
Sürekli ortam mekaniği problemlerinin analizinde kullanılan bu yöntemlerin esas aldıkları prensip yapının (problemin) küçük bir bölgesinin fiziksel davranışını doğru olarak ifade eden denklem ve bağların tanımlanabilmesidir. Problemi çok sayıda küçük bölgelere bölmek ve bu bölgeleri birbirine birleştiren bağları kullanmakla, yapıdaki büyüklükleri (gerilme analizi ve şekil değiştirmeleri) kabul edilebilir derecede hesaplayabilmek mümkündür.

Problemin sonlu farklar modeli ile karakteristik denklemlere noktasal yaklaşım sağlamaktadır. Düğüm noktaları dizisi için fark denklemleri yazılmakla oluşan model daha fazla nokta kullanıldığında daha iyi sonuç vermektedir. Karmaşık geometri ve normal olmayan sınır şartlarında bu yöntemin kullanılması zordur. Sonlu eleman yönteminde ise problem sonlu sayıda eleman ve bunları birbirine bağlayan düğüm noktaları ile çözümlenmektedir. Problemin sonlu eleman modeli karakteristik denklemlere parçalı yaklaşım sağlamaktadır. Çözüm bölgesindeki elemanların muhtelif geometrik şekillerde olması ile karmaşık geometriye haiz problemler kolaylıkla modellenilebilir (1).

Sonlu farklar yönteminde problem geometrisi, koordinat eksenlerine paralel eşit aralıklarla yerleştirilmiş düğüm noktaları ile temsil edilir. Sonlu eleman yönteminde ise elemanların eşit büyüklükte olması veya koordinat

* VKV Amerikan Hastanesi, Beyin ve Sinir Cerrahisi Bölümü, İstanbul

eksenlerine paralel konumda olması gerekmemektedir. Bu özelliği ile sonlu eleman yöntemi karmaşık geometrilerin çözümünde kullanılabilir (Şekil 1) Çözüm bölgesinde farklı geometrik şekilli elemanlar olabilir (Şekil 2) (1).



Şekil 1. Sayısal analiz yöntemleri, A: Sonlu farklar yöntemi, B: Sonlu elemanlar yöntemi.

Bu elemanlara istenilen malzeme özellikleri tanımlanabilmektedir. Yöntem ile yapılan işlem diferansiyel denklemlerle ifade edilen sistemin (fiziksel problemin) cebirsel denklem takımlarına dönüştürülüp çözülmesidir.

Sonlu Eleman Yöntemi Tarihiçesi

Sonlu elemanlar yöntemi, bugün bilindiği şekli ile ilk kez 1956 yılında Turner, Clough Martin ve Topp tarafından ortaya konmuştur. Uçak sanayi konusunda oldukça basit sonlu elemanlar kullanılarak yapılan bu ilk çalışma sonlu elemanlar yönteminin gelişiminde çok önemli bir rol oynamıştır. Dijital bilgisayarların gelişmesi ile yapılan hesapların doğruluğunun artması ve çalışmalar için harcanan zamanın kısalması, yöntemin pratik bir şekilde

uygulanabilme olanaklarının artmasını sağlamıştır. Przemieniecki'nin sonlu elemanlar yöntemi ile gerilme analizi hesaplaması, Zienkiewicz ve Cheung'in klasik tekniklerden uyarladıkları "weighted residual method" yöntemi ve daha sonra Galerkin'in "en küçük kareler metodunu" lineer ve non-lineer diferansiyel denklemlerin çözümüne adapte etmesi ile yöntem geliştirilmiştir (1,9).

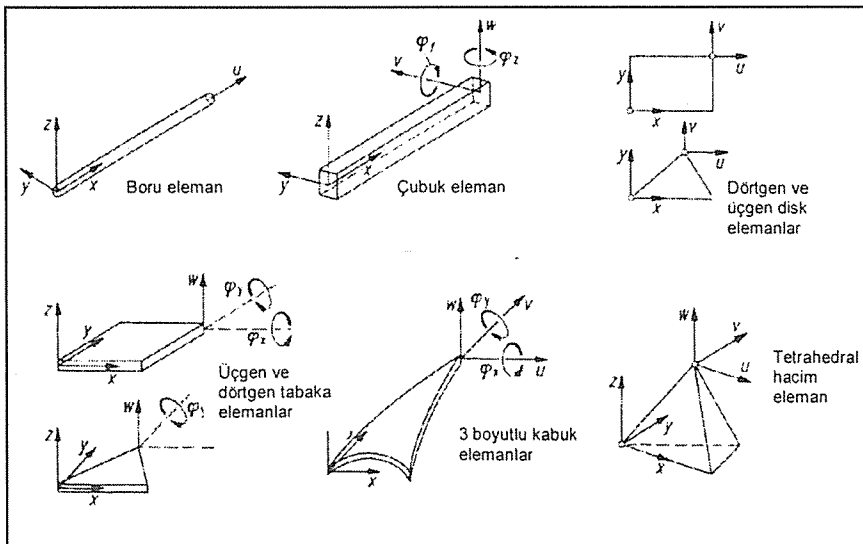
Sonlu Eleman Yöntemi Uygulanma Şekli

Sonlu elemanlar yönteminde sıvı, katı ya da gaz halinde bulunan modelin elemanlarının ilişkilendirilmesi kendilerine özel hesaplamalara sahip "düğüm" ya da "düğüm noktası" olarak adlandırılan özel eklemlerle sağlanır. Düğümlerin buldukları konumlarda sahip oldukları ileti hesapları modelin madde özelliklerine bağlı olarak değişmektedirler. Düğüm noktaları, genelde sonlu eleman sınırları üzerinde ve elemanların birleştikleri çoğu uygulamalarda köşe noktalarında yer alırlar (1,3,9).

Genelde süreklilik içerisindeki herhangi bir alanın kendine has değişkeni (yer değiştirme, gerilme, sıcaklık, basınç ya da hız gibi) bilinmediğinden, herhangi bir elemanın iç bölgesindeki değerlerde basit ve yaklaşık çözüm fonksiyonları ile elde edilirler. Bu yaklaşık değer fonksiyonları (enterpolasyon modelleri), alan değişkenlerinin düğüm noktalarındaki değerleri olarak tanımlanmışlardır. Tüm süreklilik için alan değişkenleri yazıldığında yeni bilinmeyenler alan değişkenlerinin

düğüm noktalarındaki değerleri olacaktır. Alan fonksiyonları çözülerek alan değişkenlerinin düğüm noktasındaki değerleri elde edilmektedir. Bunlar bilindiği taktirde, yaklaşık fonksiyonlar kullanılarak tüm süreklilikteki elemanlar için alan değerlerini hesaplamak mümkün olabilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi sonuca adım adım ulaşan bir yöntemdir. Herhangi bir yapısal analiz göz önüne alınarak yapılacak işlemler sırasıyla şu şekilde ifade edilebilir:



Şekil 2. Sonlu eleman yöntemindeki eleman geometrisi örnekler (1).

a. Sonlu elemanlar yönteminde ilk olarak model ya da çözüm alanı alt bölümlere yada elemanlara bölünür. Analizi yapılacak yapı uygun sonlu elemanlarla modellenmelidir. Elemanların yapısı, sayısı, büyüklüğü konusunda yapılacak seçimler analiz sonuçlarının yakınsamasını etkileyen önemli faktörlerdir.

b. Karmaşık bir yapının yer değiştirmesi ile ilgili çözümü, belirli yükleme koşulları altında tam olarak verilemez. Bu yüzden kesin sonuca yakınsayabilmek amacı ile uygun çözüm şekilleri uygulanması gereklidir. Seçilecek yöntem hesaplama açısından basit ve yakınsama açısından da tatmin edici nitelikte olmalıdır.

c. Çözümde kullanılacak katılık matrisi ($K_{(e)}$) ve yük vektörlerinin $\beta_{(e)}$ elemanı için türetilmesi gerekir. Türetim ise denge koşullarına ya da uygun değişim prensiplerine göre yapılır.

d. Yapı birden çok sonlu elemandan oluştuğundan katılık matrisi ve yük vektörleri uygun bir şekilde düzenlenmelidir. Tüm denge koşulları aşağıdaki gibi fomüle edilmelidir. (P düğüm noktası kuvvet vektörüdür)

$$K \delta = P$$

e. Tüm denge denklemleri sınır koşullarına göre modifiye edilmelidir. Linear problemler için δ kolaylıkla çözülebilir. Ancak linear olmayan uygulamalarda çözüm, katılık matrisi K ya da yük vektörü P'nin modifikasyonlarını içerecek şekilde adım adım yapılmak durumundadır.

f. Yer değiştirme vektörü δ 'den (nodal yer değiştirmeleri içerir) alınan sonuçlara göre, gerekli denklemler kullanılarak eleman gerilme ve uzamaları hesaplanır.

Sonlu Eleman Yöntemi Özellikleri

Sonlu eleman yöntemi, sonlu sayıda eleman ile bu elemanları birbirlerine bağlayan düğüm noktaları ile sürekli ortamların sayısal analizini sağlayan bir yöntemdir. Sonlu eleman, sürekli ortamın geometrisi, malzeme özellikleri, yükleri ve yer değiştirmelerine göre "bir boyutlu sonlu eleman", "iki boyutlu sonlu eleman" ve "üç boyutlu sonlu eleman" olabilir. Sonlu eleman yöntemi ile çözümlerin sağladıkları (9);

a. Geometrisi karmaşık olan şekillerin incelenmesi için değişik sonlu elemanlar kullanılarak diğer sayısal

çözüm yöntemlerine göre daha hassas çözüm sağlar.

b. Değişik malzeme özelliklerindeki sistemlerde uygulanabilir.

c. Çözümü yapılacak sisteme uygulanacak yükler sürekli, süresiz ve değişken olarak ele alınabilir.

d. Sınır şartları, sistemin temel denklemlerine içerisine değişken fonksiyonlar değiştirilmeden katılabilir.

e. Sonlu eleman yöntemi için geliştirilmiş özel programlar ancak büyük bilgisayar belleği ile çalıştırılabilir.

Sonlu Eleman Yönteminin Spinal Biomekanik Alanında Kullanımı

Sonlu eleman yönteminin mühendislik alanında kullanıma başlanması 1956 yılında olmuştur. Yöntemin ilk kullanım alanı uçak sanayidir. Tıbbi biomekanik alanında kullanım ise ilk olarak 1969'da kardiyovasküler, 1960'da ortopedi alanında (4) olmuştur. Spinal biomekanik alanında ilk olarak sonlu eleman yönteminin kullanılması 1973'de Liu ve Ray tarafından başlanmıştır (15,17) (Tablo 1).

Tablo 1. Literatürdeki spinal alanda uygulanan sonlu eleman yöntemi örnekleri (15).

Araştırmacı	Çalışılan Bölge	Model	Geometri	Eleman	Yükleme	Hesaplanan	DeneySEL Geçerliliği
Liu ve Ray (1973)	Tüm spinal	2 boyutlu lineer elastik	Eğimli omurga yumuşak doku yok	Uç yönlü serbestlik tek boyutlu	Dinamik	Disk-vertebra alanında gerilme analizi	Yok
Belyschko (1974)	Lomber disk	2 boyutlu, aksisimetrik lineer elastik	Rotasyonel ve horizontal simetrik 1/4 model	Uç noktali tügen	Aksiyal kompresyon (statik)	Ortotropik elastik gerilme analizi	Yük-deformasyon karşılaştırması
Liu ve Ray (1975)	Tüm spinal	2 boyutlu lineer elastik	Eğimli omurga, yumuşak doku dahil	Dört noktali, iki boyutlu	Dinamik	Disk-vertebra alanında gerilme analizi	Kazanan ve ark.in deneySEL çalışması ile uyumlu
Liu ve ark. (1975)	Lomber disk	3 boyutlu lineer elastik	1/2 model	Sekiz noktali tuğla	Statik	Ortotropik gerilme kayma modülü	Kendi deneySEL çalışması ile kullanımı ksitli
Kulak ve ark. (1976)	Lomber ve torasik disk	2 boyutlu, aksisimetrik lineer elastik	Rotasyonel ve horizontal simetrik 1/4 model	Uç noktali tügen	Aksiyal yükleme (statik)	Ortotropik gerilme, fasetlerdeki nonlineer cevaplar	Markolf'un yük-deformasyon çalışması ile uyumlu
Liu ve Ray (1978)	Torasik disk	2 boyutlu, aksisimetrik lineer viscoelastik	Rotasyonel ve horizontal simetrik 1/4 model	Uç noktali tügen	Aksiyal yükleme	Gevşeme modülü	Kazanan ve ark.in deneySEL çalışması ile uyumlu
Koogile ve ark. (1979)	Lomber spinal	3 boyutlu	Vertebra, elastik ligamanlar	---	Dinamik	Dinamik cevaplar	Kendi deneySEL çalışması ile
Radons ve ark. (1979)	Tüm spinal	Linear sagittal simetrik	Vertebra, disk, kaburga, kas ve ligamanlar	---	Dinamik	Spinal lüzon ve Harrington çubuklarının dayanımı	Kendi deneySEL çalışması ile
Hakim ve King (1979)	Lomber vertebra	3 boyutlu lineer elastik	Bilateral simetrik	Sekiz noktali tuğla ve kabuk	Statik ve Dinamik	Koraksde gerilme analizi	Kendi deneySEL çalışması ile
Balasubramanian (1980)	Lomber vertebra	3 boyutlu lineer elastik	Komple vertebra	Sekiz noktali tuğla, dört noktali kuadrilateral aksiyal	Statik	Laminektomi sonrası gerilme analizi	Hakim ve King'in çalışması ile
Spiker (1980-1984)	Lomber disk	2 boyutlu lineer elastik hibrid-gerilme modeli	Basitleştirilmiş 1/4 model	Dört noktali aksisimetrik halka	Aksiyal yükleme burulma ve torsiyon	Intradiskal basınç analizi	Berkson ve Lin'in deneyleri ile uyumlu
Ranu (1982)	Lomber vertebra	3 boyutlu lineer elastik	Komple vertebra	Sekiz noktali tuğla dört noktali kabuk	Statik	Laminektomi ve Harrington çubuklarının dayanımı	Hakim ve King'in çalışması ile
Yang ve King (1983)	Lomber disk	3 boyutlu lineer	Bilateral simetrik fasetler dahil	Sekiz noktali tuğla ve kabuk	Aksiyal yükleme	Intradiskal basınç analizi	Kendi deneySEL çalışması ile
Ueno ve ark. (1983)	Lomber disk	3 boyutlu lineer	Sagittal ve horizontal simetrik end plate, faset ve disk dahil	Sekiz noktali tuğla	Aksiyal yükleme	Intradiskal basınç analizi	Kendi deneySEL çalışması ile
Rencis (1982)	Lomber vertebra	2 boyutlu aksisimetrik lineer	Bilateral simetrik	Dört noktali kuadrilateral ve kabuk	Aksiyal yükleme	Burkulma	Yok
Hosey ve Liu (1983)	Kafa ve servikal spinal	3 boyutlu lineer	Orta sagittal plandan simetrik	Sekiz noktali tuğla, dört noktali kabuk	Dinamik	Boyunda ve boyunda gerilme analizi	Kendi deneySEL çalışması ile
Prinzler ve Hosey (1983)	L1 vertebra	3 boyutlu lineer	Elips şeklinde vertebra, disk dahil	Sekiz noktali tuğla	Statik	Koraksde gerilme analizi	Yok
Belyschko ve ark. (1976-1983)	Tüm spinal	3 boyutlu lineer ve nonlinear	Kafa ile L5 arası yumuşak doku dahil	Yay, hidrokinamik, tuğla ve kabuk	Dinamik	Tüm spinal bölgede göğüs kafesi ve iç organların etkisi ile gerilme analizi	Kendi deneySEL çalışması ile
Shirazi-Adl ve ark. (1983)	Lomber disk	3 boyutlu nonlinear	Annulus, posterior elemanlar hariç	Bilateral simetrik tuğla elemanlar	Statik	Intradiskal basınç analizi	Kendi deneySEL çalışması ile
Ueno (1984)	Lomber disk	3 boyutlu nonlinear	Annulus	Sekiz noktali tuğla	Statik	Intradiskal basınç analizi, faset ve ligamanların etkisi	Kendi deneySEL çalışması ile
Yoganandan (1985)	Lomber disk	2 boyutlu aksisimetrik nonlinear	Rotasyonel ve horizontal simetrik	Uç noktali tügen, dört noktali kuadrilateral sıvı	Statik	Annulus ve endplatedeki birim şekil değiştirme enerjisi analizi	Kendi deneySEL çalışması ile

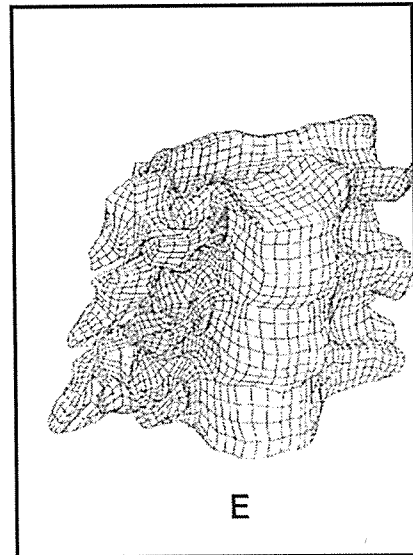
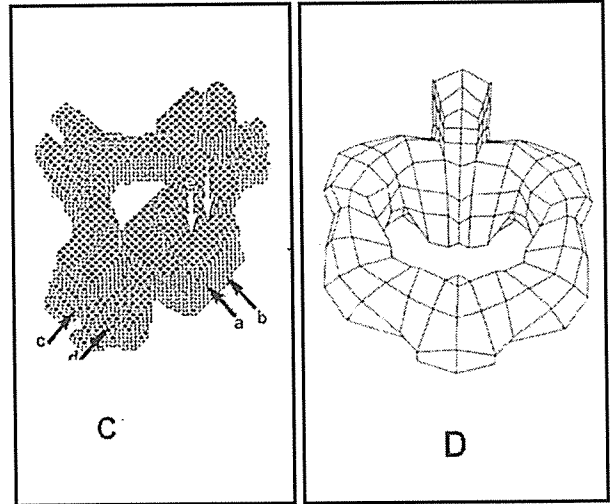
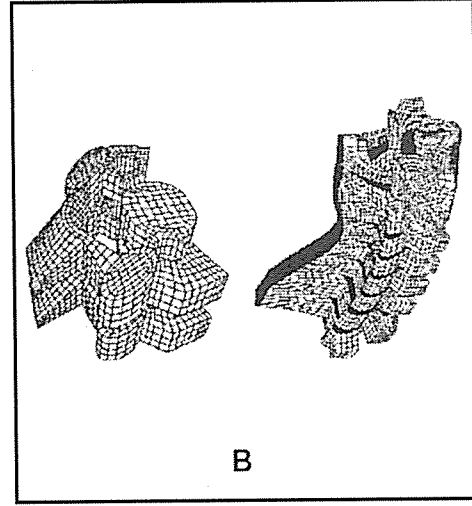
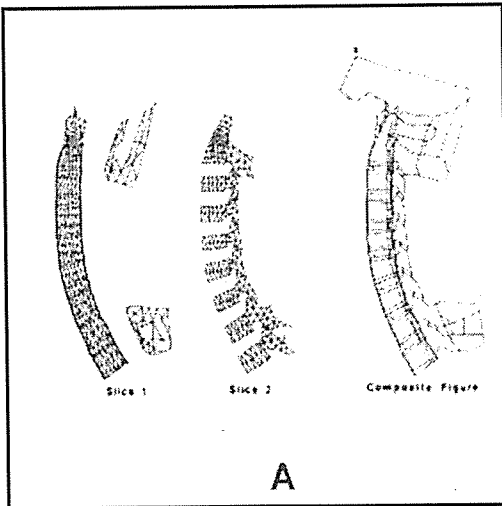
Tablo 2. Servikal spinal bölgede sonlu eleman yöntemi ile yapılmış literatür örnekleri. (BT; Bilgisayarlı tomografi, AP; Anteroposterior, SI; Superiorinferior, E; Elastisite Modülü, ν ; Poisson Oranı, ϵ ; Birim şekil değişikliği, ρ ; dansite (g/cm^3))

	Saito (1991) (10)	Kleinberger (1993) (16)	Bozic (1994) (2)	Teo (1994) (12)	Yoganandan (1995) (17, 18)
Uygulanan	Laminektomi	Kompresyon, fleksiyon	Burst fraktür	C_2 gerilime analizi	C_{4-5-6} gerilime analizi laminektomi, fasettomi
Kullanılan program	FEMP	DYNA-3D	ABAQUS	PAFEC	I-DEAS, NASTRAN
Geometri	2 boyutlu, Oksiput - T_2	3 boyutlu, kafa- T_1	3 boyutlu C_4 1.5 mm BT kesitleri	3 boyutlu, C_2 Koordinat ölçme aleti ile	3 boyutlu C_{4-5-6} 1 mm BT kesitleri ve kiryomikrotom kesitleri
Materyal özellikleri	E - ν ; 10000 - 0.29 korteks 600 - 0.30 enplate 200 - 0.49 nukleus 185 - 0.36 ligaman	E - ν ; 208 - 0.2 spongiöz 3.4 - 0.49 disk 20 - 0.49 ligaman	E; 3790 ϵ 0.06 ρ^3	E - ν ; 10340 - 0.20	E - ν ; 10000 - 0.39 korteks 100 - 0.39 spongiöz 30 - 0.49 ligaman 3.4 - 0.40 disk 500 - 0.40 end plate
Yükleme Şartları	150 N aksiyal, linear statik	250 N aksiyal linear statik ve 200ms dinamik	3400 N aksiyal linear statik	1000 N, 0° -45° +45° linear statik	1000 N aksiyal, linear statik
Sınır şartları	Kafa ve T_2 ' den sabit AP kısıtlı, SI serbest	T_1 ' de sabit, üst kısım serbest	Alt yüzünden kısıtlı	her yönde yay elemanlarla serbest	C_4 ve C_6 ' da kısıtlı
Model	1743 eleman, 863 düğüm noktası	1600 sekiz noktalı isoparametrik solid eleman	8590 sekiz noktalı kübik isoparametrik eleman, 11926 düğüm noktası	328 solid eleman, 972 düğüm noktası	9178 solid, 1193 kabuk, 592 iki noktalı eleman, 12858 düğüm noktası
Deneysel geçerliliği	Yok	Ewing ve ark.ın çalışması ile uyumlu	Yok	Yok	Shea ve Moroney'in çalışması ile uyumlu

Bu modelde iki boyutlu, yumuşak dokuları olmayan omurga modelinde dinamik yükleme analizi yapılmıştır. İki boyutlu modelin gelişmesi ve bu modelde vibrasyon analizinin yapılması ise Radons tarafından 1979'da geliştirilmiştir. Bu modelde yumuşak dokular yay elemanlar ile kaburga ise açılı çubuk elemanlar ile tanımlanmıştır. Aynı yılda üç boyutlu lomber spinal (L1-L5) modelde dinamik analiz Koogle tarafından çalışılmıştır. Bu çalışmada vertebranın elastisitesi de hesaba katılmıştır. Hakim ve King, 1979'da üç boyutlu lomber vertebra modelini 8 noktalı biriket eleman şeklinde tanımlayıp statik ve dinamik yüklemeleri kadavra modeli ile karşılaştırmıştır (5). Belytschko ise üç boyutlu modelinde kafa, pelvis ve vertebra (T1-L5) çubuk, yay ve hidrodinamik elemanlar tanımlanarak 1983'de çalışmıştır (14). Sonlu elemanlar ile spinal biomekanik çalışmalar önceleri lomber bölge için kullanılmış, servikal bölgede kullanımı ise, 1990'dan sonra başlamıştır.

Sonlu Eleman Yönteminin Servikal Spinal Biomekanik Alanında Kullanımı

Servikal spinal alanda sonlu eleman yönteminin kullanımı, torakolomber alanda kullanımı kadar ilerlemiş bir konumda değildir. Bu alandaki ilk çalışmalarda, boynun kafa ile birlikte veya yalnız çubuk ve yay elemanlar ile tanımlanması gibi daha basit matematik modeller ile olmuştur (4,14). Servikal vertebralara yönelik modern anlamda sonlu eleman yönteminin uygulanması, 1990'lı yıllarda başlamıştır (Tablo 2).



Şekil 3. Literatürdeki servikal vertebra modelleri

Bu alanda ilk çalışma Saito ve ark. (10)'nın iki boyutlu kafa ve boyun modelidir. Bu modelde geometri dört ayrı bölümde tanımlanmıştır. İlk bölüm; vertebra end plate'i, spongiöz kısmı, disk, lamina, spinos proses, anterior ve posterior longitudinal ligamanlar ile ligamentum flavum, ikinci bölüm; vertebra korpusunun korteksi ve fasetleri, üçüncü bölümde; transvers proses ve intertransvers ligamanları, dördüncü bölümde ise kafa tabanını temsil etmektedir (Şekil 3A).

Bu iki boyutlu model T2'den fikse edilerek, laminektomi defekti oluşturulmuş ve hipofizer fossaya 150 N'luk aksiyal statik kuvvet uygulanarak oluşabilecek servikal deformite analiz edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarının doğruluğu deneysel olarak kanıtlanmamıştır.

Kleinberger ve ark.'nın (16) üç boyutlu kafa-T₁ sonlu eleman modelinde ise, vertebraların üst ve alt yüzleri düz, fasetler 45° açı ile ve interspinöz ligamanlar tanımlanarak yapılmıştır (Şekil 3B). Bu model T1'den fikse edilerek 250 N'luk kuvvet statik ve dinamik olarak uygulanarak kompresyon ve fleksiyon travması incelenmiştir. Bu çalışmanın deneysel karşılaştırması bildirilmiştir.

Servikal alanda tek bir vertebraya ait sonlu eleman modeli ise, Bozic ve ark.nca (2) C4'e yönelik yapılmıştır. Bu modelde vertebra, 1.5 mm'lik BT görüntülerinden elde edilmiştir (Şekil 3C). Üst yüzüne yay elemanlar yerleştirilip, alt yüzden fikse edilerek 3400 N'luk aksiyal statik kuvvet uygulanarak burst kırığı incelenmiştir. Bu çalışmanın deneysel geçerliliği ispat edilmemiştir.

Teo ve ark. (12) ise, koordinat hesabı yapan bir makina ile yarı otomatik bir teknik ile C₂ kemiğinin üç boyutlu olarak yansını modelleyerek simetriğini almışlardır (Şekil 3D). Bu çalışmada, kemik kortikal kemik olarak, kemik yüzeyi ise yay elemanlar ile tanımlanıp 1000 N'luk statik yük dens anterior yüzüne 0,-45,+45 derecelerle uygulanmıştır. Sonuçların deneysel karşılaştırılması yoktur.

Fonksiyonel servikal üniteye sonlu eleman yöntemi ile analiz ise, Yoganandan ve ark.nca (17,18) çalışılmıştır. Sagittal, koronal ve aksiyal 1 mm'lik BT ve kiryomikrotom kesitleri ile C4-5-6 spinal ünite oluşturulmuştur (Şekil 3E). Bu modelde faset, disk, ligamanlar, korteks ve

spongiöz kemik, linear ve nonlinear olarak tanımlanıp C6'dan fikse edilerek 1000 N'luk statik ve dinamik kuvvetler uygulanmıştır. Sonuçlar, Shea ve ark.'ın (11) deneysel çalışması ile doğrulanmıştır.

TARTIŞMA

Sonlu eleman modelleri ile yapılacak analizlerden doğru cevaplar alınabilmesi için göz önünde bulundurulması gereken koşullar şunlardır;

Anatomi: Vertebra geometrisinin iki veya üç boyutlu olarak normal anatomisine yakın bir şekilde modellenmesi için yarı otomatik ve otomatik teknikler geliştirilmiştir. Dijitalizasyon, ortogonal radyografi ve bilgisayarlı tomografi kullanılan yöntemlerdir. Vertebranın dijitalerlar veya çekilen ortogonal röntgenler ile geometrisinin çıkarılması, kemik sınırlarının tam tespit edilememesinden dolayı artık tercih edilmemektedir (5,8). BT ile üç planda (aksiyal, sagittal, koronal) yüksek rezolusyonda kemik sınırlarının 1:1 skala ile tespit edilmesi ve bunların üst üste getirilmesi ise, en basit ve en etkili yöntem olarak kullanılmaktadır (2,7,13). Oluşturulan katı modele sonlu eleman yönteminin uygulanabilmesi için öncelikle geometrinin mesh model haline dönüştürülmesi gerekir.

Mesh tekniği için kullanılacak üç boyutlu eleman üçgen veya dörtgen yüzlü olabilir. Vertebra gibi düzgün olmayan geometrik şekiller için üçgen prizma gibi dört yüzlü elemanlar (tetrahedron) tercih edilmektedir. Mesh tekniğinde kullanılacak eleman sayısı geometriye ve analizin hassaslığına göre değişmektedir. Fazla sayıda eleman tanımlanması ile gerçek geometriye daha çok yaklaşılmakta, ancak analiz için daha fazla zamana gereksinim olmaktadır. Elemanlar, geometrinin bölümlere ayrılmasıyla veya serbest şekilde tanımlanabilir (9).

Materyal özellikleri: Sonlu eleman modelleri öncelikle lomber vertebralar için kullanıldığından servikal vertebra için kullanılan elastisite modülü (Young Modülü) ve Poisson oranı lomber vertebra için kabul edilen değerlerdir. Vertebranın nonhomojen, nonlinear ve anisotropik yapısına rağmen literatürde vertebranın materyel özellikleri için linear kurallar kabul edilmektedir. Değişik materyal özelliklerinin kullanılarak sonlu eleman yönteminin uygulanması ise, deneysel laboratuvar çalışmaları ile mümkün olacaktır.

Sınır ve yükleme şartları: Sınır şartları genellikle vertebranın üst ve alt yüzlerine tanımlanmaktadır. Normal kinematiğe göre vertebranın yapabileceği hareket aralığına göre dört ayrı sınır şartı tanımlanabilir. Menteşe, sabit, yarı sabit ve serbest. Yükleme koşulları ise gerek statik gerekse dinamik olarak; aksiyal, fleksiyon, ekstensiyon, lateral bending ve torsiyon şeklinde uygulanabilir.

Deneysel geçerlilik: Sonlu eleman yöntemi uygulanarak yapılan servikal biomekanik çalışmalardan elde edilen sonuçların doğruluğu deneysel olarak kanıtlanmadıkça doğruluğu değer kazanmamaktadır. Literatürde kadavralarda yapılan biomekanik deneylerde ölçülebilen yüke bağlı yer veya şekil değişikliği gibi kolayca hesaplanabilen parametreler ile sonlu eleman modelindeki değerlerin karşılaştırılması, oluşturulan simülasyon modelinin doğruluğu için gereklidir. Sonlu eleman modelinin doğruluğu kanıtlandıktan sonra bu model üzerinde farklı biomekanik çalışmalar zaman kaybı olmadan tekrarlanarak denenebilir. Deneysel doğruluğu kanıtlanmış sonlu eleman modellerinde, kadavra deneylerinden ölçülemeyen intrinsik biomekanik cevaplar da kolayca öğrenilebilmektedir.

SONUÇ

Biomekanik çalışmalar kadavra, matematiksel modeller, antropometrik modeller, fiziksel modeller ve parametrik modeller ile yapılmaktadır. Matematiksel modeller içerisinde yer alan sonlu eleman yöntemi deneysel olarak doğruluğu kanıtlandığında gerek laboratuvar, gerekse klinik çalışmalarda tercih edilecektir. Sonlu eleman modelleri ile canlı insanın vertebra modelinin yapılabilmesi, oluşturulan modele istenilen yükün istenilen doğrultuda uygulanabilmesi, deneyin istenilen sayıda tekrarlanabilmesi, model üzerinde yapılacak cerrahi manüplasyonlar (laminektomi, plak, vida veya tel konulması) ile kemikte veya orteizde oluşacak mekanik cevap değişikliklerinin hesaplanabilmesi bu yöntemin avantajları olarak sayılabilir.

KAYNAKLAR

1. Beitz W, Küttner KH, Dubbel: Handbook of Mechanical Engineering, Springer Verlag, Berlin, 1994, pp B50-55.
2. Bözic KJ, Keyak JH, Skinner HB, Bueff HU, Bradford DS: Three-dimensional finite element modeling of a cervical vertebra: An investigation of burst fracture mechanism. J Spinal Disord 7: 102-110, 1994
3. Fetvacı C: Sonlu eleman metodu ile modelleme. Mühendis ve Makina 38 (455): 45-48, 1997
4. Gilbertson LG, Goel VK, Kong WZ, Clausen JD: Finite element methods in spine biomechanics research. CRC Crit Rev Bio-eng 23 (5&6): 411-473, 1995
5. Hakim N, King A: A three dimensional finite element dynamic response analysis of a vertebra with experimental verification. J Biomech 12: 277-292, 1979
6. İnan M: Cisimlerin mukavemeti, (6.baskı), İstanbul Teknik Üniversitesi Vakfı, 1988, sayfa 35-59.
7. Juanes JA, Espinel JL, Velasco MJ, Zoreda JL, Riesco JM, Carmena JJ, Blanco E, Marcos J, Vazquez R: A three dimensional virtual model of the head generated from digitalized CT or MR images for anatomical radiological and neurosurgical evaluations. J Neuroradiol 23: 211-216, 1996
8. Lavaste F, Skalli W, Roy-Camille R, Mazel C, Robin S: 3D geometrical and mechanical modeling of the human lumbar spine. J Biomech 25 (10): 1153-1164, 1992
9. Nath B: Sonlu elemanlar metodunun temelleri. Sakarya Üniversitesi Matbaası, Adapazarı, 1993, sayfa 2-6.
10. Saito T, Yamamuro T, Shikata J, Oka M, Tsutsumi S: Analysis and prevention of spinal column deformity following cervical laminectomy I; pathogenetic analysis of postlaminectomy deformities. Spine 16 (5): 495-502, 1991
11. Shea M, Edwards WT, White AA, Hayes WC: Variations of stiffness and strength along the human cervical spine. J Biomech 24 (2): 95-107, 1991
12. Teo E, Paul JP, Evans JH: Finite element stress analysis of a cadaver second cervical vertebra. Med &

Biol Eng & Comput 32: 236-238, 1994

13.Voo L, Denman JA, Yoganandan N, Pintar FA, Cusick JF: A 3-D model of cervical spine with CT-based geometry. BED, Bioengineering Conference, ASME (29): 323-324, 1995

14.Williams JL, Belytschko TB: A three-dimensional model of human cervical spine for impact simulation. J Biomech Eng 105: 321-331, 1983

15.Yoganandan N, Myklebust JB, Ray G, Sances A: Mathematical and finite element analysis of spine injuries. CRC Crit Rev Bio-eng 15 (1): 29-91, 1987

16.Yoganandan N, Kumaresan SC, Voo L, Pintar FA: Finite element application in human cervical spine modeling. Spine 21 (15): 1824-1834, 1996

17.Yoganandan N, Kumaresan SC, Voo L, Pintar FA, Larson SJ: Finite element modeling of the C4-C6 cervical spine unit. Med Eng Phys 18 (7): 569-574, 1996

18.Yoganandan N, Kumaresan S, Voo L, Pintar FA: Finite element model of the human lower cervical spine; parametric analysis of the C4-C6 unit. J Biomech Eng 119: 87-92, 1997

Yazışma Adresi:

Hakan BOZKUŞ

VKV Amerikan Hastanesi

Beyin ve Sinir Cerrahisi Bölümü

Güzelbahçe Sok. 20 80200 Nişantaşı- İstanbul

Tel: 0 212 3112000 (2760-2761)

Fax: 0 212 3112190

e-mail: hbozkus@yahoo.com