

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE DIŞ HEKİMLİĞİNDEKİ UYGULAMALAR

SİS DARENDELİLER YAMAN*

FINITE ELEMENT METHOD AND ITS APPLICATIONS IN DENTISTRY

SUMMARY

This study presents the Finite Element Method. Nowadays, it is a widely used tool in bio-mechanic applications. This article is particularly concerned about the research in dentistry and is aimed to give an extensive survey about it. This study, being descriptive in technical sense, first gives an overall view of the Finite Element Method and its use in engineering. Then it focusses on the dental applications. The superiority of the method over other experimental techniques is also given.

Key Words: Dentistry, Finite Element Method, Mechanical Stress Analysis.

ÖZET:

Bu makalede günümüzde biomekanik uygulamalarda geniş olarak kullanılan Sonlu Elemanlar Yöntemi tanıtılmakta ve özellikle diş hekimliği üzerine yapılan çalışmalar aktarılmaktadır. Çalışmada ilk olarak Sonlu Elemanlar Yönteminin teorisi ana hatları ile tanıtılmış ve uygulama alanları ile yöntemin özellikleri hakkında örnek verilmiştir. Ardından Diş Hekimliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanarak yapılan çalışmalar ve nitelikleri sunulmuştur. Sonlu Elemanlar Yönteminin günümüzde kullanılan deneysel yöntemlere göre üstünlüğü de belirtilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Diş Hekimliği, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Mekanik Gerilme Analizi.

GİRİŞ

Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method) temel olarak bir yapının çok sayıda sonlu elemana (finite elements) ayrılmasına ve bu elemanların karakteristikleri gözönünde tutularak yapının genel karakteristiklerinin belirlenmesine dayanan bir matematiksel modelleme tekniğidir. Sonlu Elemanlar Yöntemi'nin doğuş nedeni mühendislik uygulamalarında karşılaşılan zorluklar olmuştur. Mühendislik yapılarının tümü analitik formülasyona ya da her koşulda denemeye uygun değildir. Dolayısıyla, yapıların çeşitli çalışma koşulları altındaki davranışlarını belirlemek de kolay olmamaktadır. Sonlu Elemanlar Yöntemi bu durumda devreye girmekte ve modellenen yapı, sanki bir etki altındaymış gibi incelenebilmektedir. Ayrıca yapıların özellikle dinamik zorlamalar altında önem gösteren doğal frekans (natural frequency) ve biçim şekli (mode shape) gibi özellikleri de kolaylıkla bulunabilir.

mektedir. Sonlu Elemanlar Yöntemi ilk olarak havacılık endüstrisinde kullanılmış, zamanla tüm mühendislik uygulamalarında verdiği etkin sonuçlarla benimsenmiştir. Tıp ve mühendisliğin bir kesişimi olan biomekanik uygulamalarda da Sonlu Elemanlar Yöntemini içeren çalışmalar gün geçtikçe artan bir hızda yapılmaktadır. Bu yöntem sayesinde katı bir cisim olan diş incelenemediği gibi, bir sıvı olan kan ve damarlardaki akışı da araştırılabilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, önce Sonlu Elemanlar Yöntemini tanıtmak, ardında da diş hekimliğini ilgilendiren konularda yapılan incelemeleri kronolojik bir biçimde ortaya koymaktır. Şüphesiz ki, tüm çalışmalar burada bahsedilenlerden fazladır, ancak amaç okura kolaylıkla erişilebilecek eserleri sunmaktır. Bu nedenle Türkçe ve İngilizce dışındaki eserler mümkün olduğunca kaynaklarda belirtilmemiştir. Buna karşın, bu alda önemli çalışmalar yapan özellikle Japon ve Çinli araştırmacıların da bulunduğunu ve uluslararası dizinlerde kendi dil-

* G.U. Diş Hek. Fak., Diş Hast. ve Ted. Anabilim Dalı, Dr.

lerinde yaptıkları çok sayıda yayının da varol-
duğunu belirtmek gerekir.

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ:

Sonlu Elemanlar Yöntemi iki boyutlu ya da üç boyutlu olmak üzere iki ana gruba ayrılır. İki boyutlu yöntem kullanılarak yapılan modellemelerde, elemanlar sadece alana sahipmiş gibi değerlendirilir ve derinlik boyunca olacak değişimler gözönüne alınmaz. Üç boyutlu modellemelerde elemanlar bir hacime sahip olarak değerlendirilir ve her yöndeki değişimler incelenir. Uygulama açısından elemanlar belirli şekillerde tanımlanır. Örnek olarak bir dörtgen incelenirken, bu dörtgenin küçük kareler, dörtgenler ya da üçgenlerden oluştuğu varsayılabilir. Bir kutunun incelenmesinde ise elemanlar prizmalardan oluşur. Her bir eleman için önce bağlantı noktaları (node) tanımlanır ve bu noktaların koordinatları cinsinden elemanın direngenlik matrisi (element stiffness matrix) ve kütle matrisi (element mass matrix) elde edilir. Bu matrisleri yazılırken sırasıyla potansiyel ve kinetik enerjiler gözönünde tutulur. Daha sonra eleman matrisleri uyumluluk koşulları (compatibility conditions) gözönünde tutularak birleştirilir ve tüm yapının direngenlik ve kütle matrisleri (global stiffness and mass matrices) oluşur. Elde edilen matrisin üzerinde yapılan matematiksel işlemler özdeğer (eigenvalue), özvektör (eigenvector) ve istenen cevabı (response) verir (25,28,45,53).

Sonlu Elemanlar Yöntemi bunların yanında, esas konumuz olan gerilme analizlerinin de (stress analysis) incelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapılar yüklemeler altında şekil değiştirmekte ve yapıda birim uzamalar (normal strains), açısal değişiklikler (shear strains) ve gerilmeler (stresses) oluşmaktadır. Yükleme kaldırıldığında bazı yapılar eski durumuna dönüşmekte, bazılarında ise kalıcı uzamalar ve gerilmeler giderilememektedir. Birinci grup yapılar elastik deformasyona uğramış olarak kabul edilmektedirler. Bir yapının matematiksel modelini kurup, sonlu elemanlar yönetimi ile analizini yapabilmek için önce yapının malzeme özellikleri tanımlanır. Yapılar genelde, malzeme özellikleri her doğrultuda farklılık gösterenler (anisotropic), belli doğrultularda farklılık gösterenler (orthotropic) ve her doğrultuda aynı olanlar (isotropic) olmak üzere üç grupta tanımlanırlar. Gerilme analizlerinin incelenmesinde mühendislerce

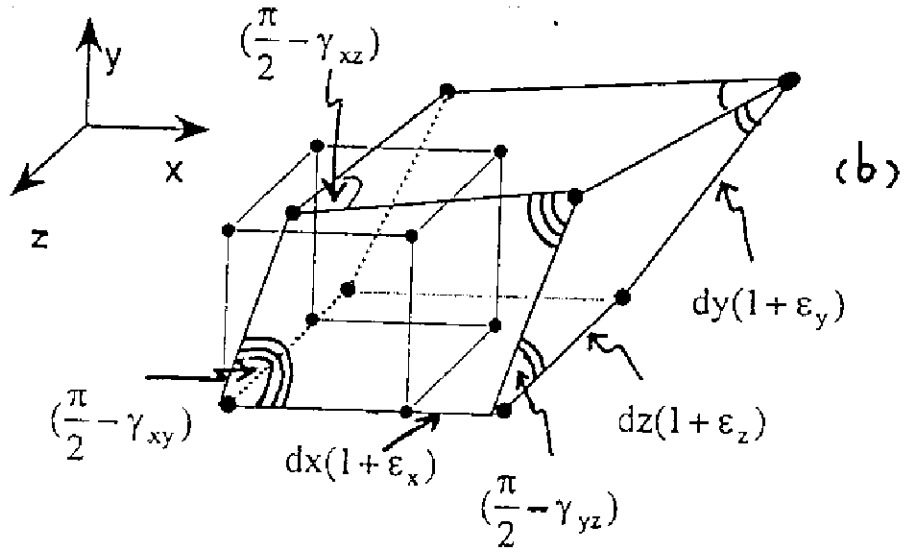
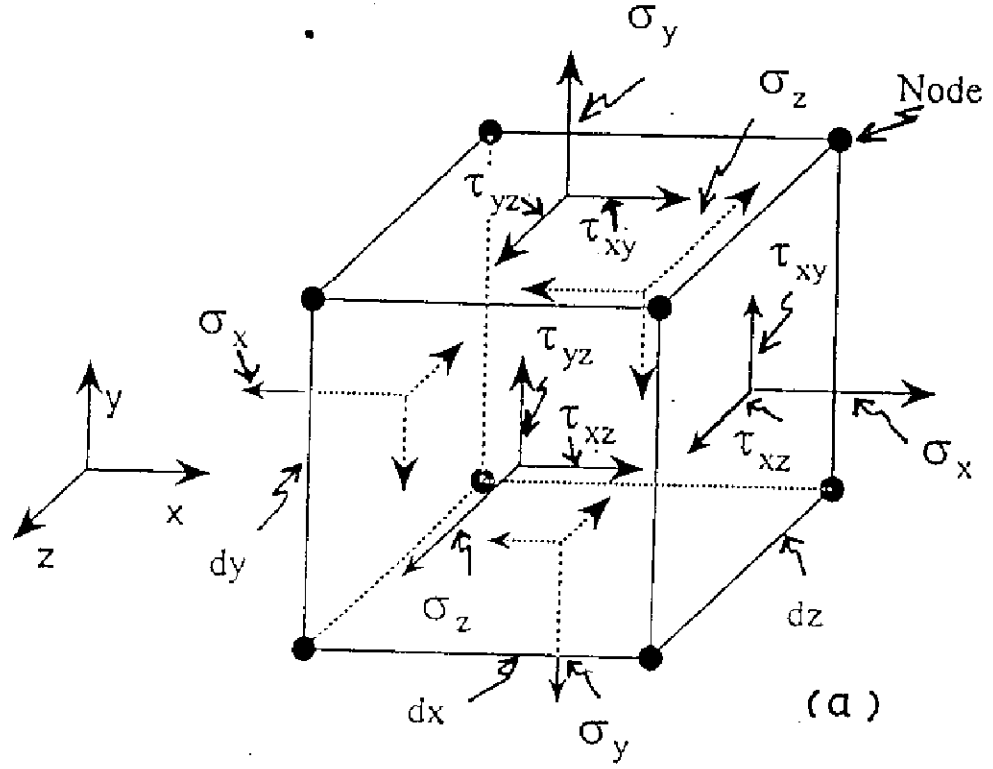
kullanılan elastisite teorilerine göre, yukarıda belirtilen malzeme özelliklerinin herbiri için farklı denklemler kullanılır. Diş yapısı itibarı ile elastik ve isotropik sayılmaya uygun bir malzemedir.

Sonlu Elemanlar Yöntemi uygulanırken, seçilen elemanın bağlantı noktalarındaki gerilmeler, birim uzamalar ve açısal değişiklikler bahsedilen teoriler yardımıyla belirlenir. Bunlardan faydalanarak elemanın içindeki değişimler de hesaplanır. Yapının genel özellikleri de eleman özelliklerinden yararlanılarak elde edilir.

Üç boyutlu analizde üç adet normal gerilme σ_x , σ_y , σ_z , ve 3 adet kayma gerilmesi τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} vardır. Eleman isotropik olarak varsayıldığı zaman normal gerilmeler yüzeylere dik yüklemelerle, kayma gerilmeleri ise yüzeylerde etki eden yüklemelerle ilintilidir. x,y,z indisleri bu gerilmelerin uzayda hangi doğrultularda ya da hangi düzlemlerde oluştuğunu göstermektedir. Bu gerilmeler ve toplam deformasyon üç boyutlu bir eleman olan bir küp üzerinde Şekil 1'de gösterilmiştir. Elemanın arka yüzeylerindeki gerilmeler ve değişiklikler kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Bağlantı noktaları da şekilde gösterilmiştir.

İki boyutlu çalışmalarda derinlik ve derinlik boyunca olan değişimler yok sayıldığından, bir düzlem tanımlanır (genel xy düzlemi) ve buna dik olan değişimi simgeleyen gerilmeler sıfır alınır (genelde z indisine sahip gerilmeler). Bu tür iki boyutlu çalışma düzlem gerilmesi (plane stress) olarak tanımlanır ve geçerli olan gerilmeler, σ_x , σ_y ve τ_{xy} olarak alınır. Bu gerilmeler ve deformasyon iki boyutlu bir eleman olan bir dörtgen üzerinde Şekil 2'de gösterilmiştir. Birim uzamalar (ϵ değerleri) ve açısal değişiklikler (γ değerleri), istenirse, gerilmeler kullanılarak belirlenir.

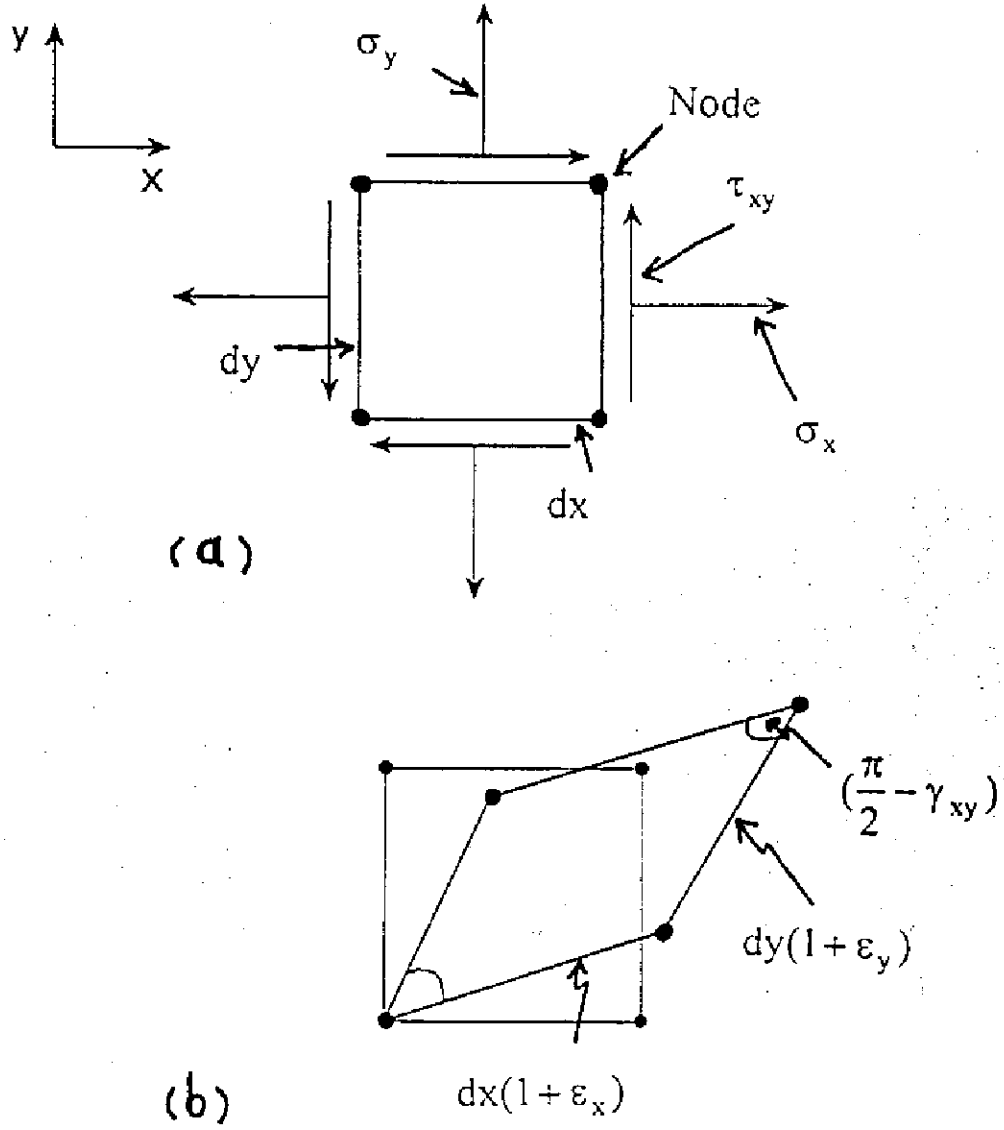
Bu, temel matematik ve mekanik bilgisi gerektiren süreç günümüzde bilgisayarların gelişmesi ile neredeyse atıl duruma gelmiştir. Ya da başka bir deyişle, kullanıma sunulan paket programlar gereken tüm matematiksel işlemleri, girilen veriler doğrultusunda kullanıcıdan bağımsız yapmakta ve özel formülasyon geliştirmesi gerektirmeyen tüm yapılar standart olarak incelenebilmektedir. Mü-



Şekil 1. Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Bir Örnek Eleman.

a) Eksenler ve Gerilmeler.

b) Deformasyon Sonunda Birim Uzunluklar ve Açısal Değişiklikler.



Şekil 2. İki Boyutlu Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Bir Örnek Eleman.

a) Eksenler ve Gerilmeler.

b) Deformasyon Sonunda Birim Uzunluklar ve Açısal Değişiklikler.

hendislik temelinde sahip bulunmayan araştırmacıların Sonlu Elemanlar Yöntemi ni yaygın bir şekilde kullanmaya başlamalarına da neden budur.

Günümüz kişisel bilgisayarları, iki boyutlu sonlu elemanlar paketlerini kullanabilmektedir. Bu paketler arasında SAP80 (Structural Analysis Program) sayılabilir.

Bu noktada önemli bir konunun altını çizmek gerekmektedir. İki boyutlu programlar, her ne kadar kullanımı kolay olsa da, gerçekçi sonuç vermekten uzaktırlar. Bunlarda temel eksiklik yapının simetrik alınmasıdır ki, bu koşulu pratikte hiçbir yapı için sağlamak olası değildir. Bunun yanında incelenen alan kesitine dik olan değişimler her zaman kolaylıkla gözardı edilmez. Çözüm üç boyutlu programlar kullanmak ve sonuçların hassasiyetini arttırmaktır. Ne yazık ki günümüzde, üç boyutlu analiz yapan programlar hala büyük bilgisayarlar gerektirmekte ve pahalı olmaktadır. Bunların arasında SAPIV, NASTRAN (NASA STRuctural ANalysis Program), MARK, ANSYS, CAT A (Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application) sayılabilir.

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNİN DIŞ HEKİMLİĞİNDEKİ UYGULAMALARI

Sonlu Elemanlar Yöntemini diş hekimliğine dönük uygulamalarda ilk kullananlar arasında Farah ve arkadaşları (17,18) gelmektedir. İlk çalışmalarında restore edilmiş bir molar dişdeki gerilmeleri incelemişler, daha sonraki çalışmalarında ise porselen kronların yük altındaki gerilme dağılımlarını belirlemişlerdir. Selna ve arkadaşları (34) okluzal kuvvetlerin üst ikinci küçük azı dişde yarattığı gerilme dağılımını belirlemek için sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Alt ikinci küçük azı dişde kronlarda oluşan gerilme dağılımı Yettram ve arkadaşları (5) tarafından incelenmiştir. Amalgam Class II restorasyonlardaki bozulmalar Derand (13) tarafından araştırılmıştır. Periodontal membran ve mandibular kemiğin çalışmalara ilk katılışlarını Ktoh ve arkadaşlarının (23) eserinde görmekteyiz. Parsiyel protez uygulamaları konusundaki ilk çalışmalardan biri Takahashi ve arkadaşlarının (37) yapılmıştır. Ardından ısı gerilmeye maruz kalan Class Amalgam restoras-

yonların incelendiği bir çalışma olarak Wright ve arkadaşlarının (47) eserini görmekteyiz. Dayanış (11) doktora çalışmasında, MOD kaviteelerde kavite şeklinin dayanıklılık üzerindeki etkilerini iki boyutlu olarak araştırmıştır. Pin kullanılan restorasyonlarda, pinin oturacağı yuva pozisyonunun gerilme dağılımına etkilerinin incelenmesi Takahashi ve arkadaşları (38) tarafından araştırılmıştır.

Protez uygulamalarında rezorpsiyonun yavaşlatılmasını sağlayan etkenler Aydınlik ve arkadaşlarının (3) yine sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Diőe gelen yükün açısının diş üzerindeki etkilerini inceleyen Takahashi ve arkadaşları (39) üst ön keser, alt ikinci küçük azı ve alt birinci büyük azı dişleri çalışmalarına konu almışlardır. Üç boyutlu sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı ilk çalışmalardan birisi Cook ve arkadaşlarının (8) gerçekleştirilmiş ve bu araştırmada geçirgen implantların kemikle olan etkileşimi incelenmiştir. Yine üç boyutlu olarak gerçekleştirilen bir başka çalışmada Rubin ve arkadaşları (33) bir alt sağ birinci büyük azı diş modelleyip mine ve dentindeki çekme ve sıkışma gerilmelerini belirlemişlerdir. Borchers ve arkadaşları (5) ankerli tipte bir seramik implant etrafında oluşan gerilmeleri yine üç boyutlu bir modelleme ile incelemişlerdir. Amalgam ve diş arasındaki etkileşimin doğurduğu gerilmeler Peters ve arkadaşlarının (26) araştırılmıştır. Bu çalışmada bir alt ikinci büyük azı dişin restore edilmiş durumu modellenmiş ve kayma gerilmeleri sınırlı da olsa ilk defa gözönüne alınmıştır. Farklı kaviteelerin restore edilmiş bir büyük azı dişdeki gerilmeler üzerindeki etkisi, iki boyutlu olarak, de Vree ve arkadaşlarının (16) incelenmiştir.

Post-core uygulamalarını ilk olarak Peters ve arkadaşlarının (27) çalışmalarında görmekteyiz. İki boyutlu olarak modellenen bir ikinci küçük azı dişde post çapının, post boyu ve şeklinin, post ve siman arasındaki etkileşimin dıőteki gerilmeler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Benzer bir çalışma özellikle dentindeki gerilmeleri ortaya koymak amacıyla Reinhard ve arkadaşlarının (29) gerçekleştirilmiştir. Spierings ve arkadaşları (36) restoratif diş malzemelerinin insan dişlerindeki ısı iletimi üzerindeki etkilerini, iki boyutlu olarak, bir alt büyük azı diş modeli üzerindeki incelemiş-

lerdir. Porselen ve metal kronlarda termal gerilmelerin araştırılmasında de Haff ve arkadaşları (12), restore dişlerde fotoelastisite yöntemi ile belirlenen gerilmelerin doğrulanması ve değerlendirilmesi için de Vree ve arkadaşları (15) yine iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Ortodontiye yönelik çalışmaların başlamasında Williams ve arkadaşlarının (46) katkılarını görmekteyiz. Üst ön kesici bir dişin anlık dönüş merkezinin belirlenmesinde sonlu elemanlar yöntemini kullanan yazarlar anlık dönüş merkezinin yükün miktarından daha çok yükleme noktasına bağlı olduğunu belirlemişlerdir.

Metal-seramik kronlarda gerilme dağılımı üzerinde, metal kalınlığının etkileri altın ya da nikel alaşımlar gözönünde tutularak ve iki boyutlu modelleme yapılarak Anusavice ve arkadaşları (1) tarafından incelenmiştir. Kavsaoglu (22) doktora çalışmasında, iki boyutlu modelleme kullanarak kanin distalizasyonunu incelemiştir. Ardından ortodontide de üç-boyutlu çalışmaların başladığını görmekteyiz. Tanne ve arkadaşları (40, 41) ortodontik kuvvetlerin periodontal dokularda oluşturduğu gerilmeleri ve bir üst sağ keser dişde dönüş merkezi ile kuvvet/moment oranları arasındaki ilişkiyi belirlemişlerdir. Iwamoto ve arkadaşları (21) ise seramik bir tutucunun gerilme analizlerinde yine sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Darendeliler (9) doktora çalışmasında, 17 farklı mine preparasyon tekniğini üç boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemiyle inceleyip, sağlamlık açısından en uygun restorasyon tipini belirlemiştir. Anusavice ve arkadaşları (2) kronlar üzerine sürdürdükleri incelemeleri, iki boyutlu modellemelerle devam ettirerek seramik kronlarda, seramiğin insiza uzunluğunun gerilme dağılımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışma bir üst ön keser dişin modellenmesini içermektedir. İmplantlar sonucu alveolar kemiklerde oluşan gerilmelerin incelenmesi Rieger ve arkadaşları (30) tarafından gerçekleştirilmiştir. Total protez altındaki kemik resorpsiyonunun araştırılmasında sonlu elemanlar yöntemi kullanılanlar Maeda ve arkadaşları (24) olmuş ve çalışmalarında resorpsiyon ile, kemikte oluşan birim sıkışmaların (compressive strains) ilintili olduğunu belirlemişlerdir. Alt büyük ağı dişde, Class I kavitelere ait gerilme analizleri Zhou ve arkadaşları (52) iki boyutlu olak modellenmiştir.

Tanne ve arkadaşları (42) farklı uzunluklardaki dişlerin ve farklı yüksekliklerdeki alveolar kemiklerin dişin biomekanik özellikleri üzerindeki etkilerini, bir üst ön kesici dişin üç boyutlu modellenmesi ile incelemişlerdir. İmplant şekillerinin çene kemiğindeki gerilmeler üzerindeki etkileri Siegele ve arkadaşları (35) araştırılmıştır. Yazarlar çalışmalarında silindirik, konik, basamaklı, vida tipli ve içi boş silindirik implantları iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişler ve implantların yüzeylerinin düz olması durumunda daha az gerilmeye neden olduklarını belirlemişlerdir.

90'lı yıllara gelindiğinde, artık sonlu elemanlar yönteminin biomekanik konularda iyice benimsendiğini ve bu yöntem yardımıyla yapılan araştırmaların gittikçe ivme kazandığını görmekteyiz.

Tanne ve arkadaşları (43) çalışmalarında dişlerdeki yükleme sonucu oluşan gerilmelerin, alveolar kemiğin şekil değiştirmesine yetecek kadar büyük olduğunu, bir üst ön kesici dişin üç boyutlu modelleyerek, göstermişlerdir. Çelik ve arkadaşları (7) eğik köklü bir dişteki gerilmeleri ve yer değiştirmeleri iki boyutlu olarak incelemişlerdir. Ortodontik uygulamalar için maksiller ve mandibular yayların tasarımı üzerine yapılan bir çalışmada Haskell ve arkadaşları (19) yine sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Rieger ve arkadaşları (31,32) iki çalışmalarında 6 ve 11 adet kemik içi implantın kemik üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Amaç her yönden uygun optimum bir implant tasarımı olarak belirlenmiştir. Çalışmalar iki boyutlu olarak yapılmıştır.

Yang ve arkadaşları (50) sabit protezlerle, eğimli molar desteklerin karşılaştırılmasını iki boyutlu yöntemle incelemişlerdir. Derand (14) siman ya da resinle yapıştırılan porselen inleylerdeki gerilme düzeylerini karşılaştırırken yine iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Ban ve arkadaşları (4) dental simanların farklı eksenlerdeki mukavemetlerini, yükleme altında bulmuşlar ve çalışmalarında çinko-fosfat, polikarboksilat, cam iyonomer, silikat ve çinko oksit-ijenol simanları incelemişlerdir. Darendeliler ve arkadaşları (10) çalışmalarında bir üst ön kesici dişin üç boyutlu olarak modellenmişler ve yükleme altındaki dişde oluşabilecek kırıkların sadece normal gerilme-

lerden değil, kayma gerilmelerinin sonucu olarak da meydana çıkabileceğini ilk defa göstermişlerdir. Yaman (48) çalışmasında pin ve farklı mine preparasyon teknikleri kullanarak, bir üst ön keser dişi üç boyutlu olarak modellemiş, tutuculuk ve dayanıklılığın araştırılması sonucu kayma gerilmelerinin önemini belirlemiştir. Cailleteau ve arkadaşları (6) çalışmalarında, bir üst ön keser dişi kullanarak, post kullanılarak restore edilen ve endodontik tedavi görmüş dişlerdeki kanal içi gerilmeleri belirlemiştir. Çalışmaları iki boyutlu bir modelleme üzerindedir. Holmes ve arkadaşları (20) bir İMZ implant sisteminde polioksimetilen ya da titanyum element kullanımının gerilmelerin iletilmesindeki etkilerini incelemişlerdir.

Telli ve arkadaşları (44) iki boyutlu olarak yaptıkları bir çalışmada lateral ve vertikal kondensasyon uygulanan bir dişdeki gerilmeleri araştırmışlardır. Yaman ve arkadaşları (49) vertikal kondensasyon uygulanan bir üst ön keser dişi üç boyutlu olarak modelleyerek, endodontik tedavi esnasında dişde oluşan gerilmeleri ve deplasmanları belirlemiştir.

SONUÇ

Sonlu Elemanlar Yöntemi, dişhekimliğinde yapılan çalışmalara yeni bir boyut getirerek dişhekimliğinin karşılaştığı birçok soruna ilk defa çözüm getirmiş bir yaklaşımdır. Bunun yanında günümüze kadar diğer başka yöntemlerde elde edilen sonuçların doğruluğunu sınamak ve konu hakkında daha sağlıklı bilgi edinmek amacıyla da kullanılmaktadır. Dişlerin mukavemetlerini ölçmek için yapılan deneylerde elde edilen değerler dişlerin kırılma mukavemetlerini vermekte, diş sağlamlığı açısından önemli faktörler olan iç çatlaklar ve kırık ilerlemelerine neden olan kuvvetler bilinmemektedir. Buna ilaveten, foto-elastisite ve birim uzama ölçümleri (strain-gage measurements) uygulanarak yapılan mukavemet değerleri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında sonlu elemanlar yönteminin çok daha hassas ve değerli bilgiler de belirgin bir biçimde karşımıza çıkmaktadır. Kısacası sonlu elemanlar yönteminin bu tip sorulara kolaylıkla cevap verecek bir yaklaşım olduğu görülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Anusavica, K.J., Hojjatie, B. Dehoff, P.H.: Influence of Metal Thickness on Stress Distribution in Metal-Ceramic Crowns, Journal of Dental Research, 65 (9): 1173-78, 1986.
2. Anusavica K.J., Hojjatie, B. Influence of Incisal Length of Ceramic and Loading Orientation on stress Distribution in Ceramic Crowns, J. of Dent. Res. 67 (11): 1371-1375, 1988.
3. Aydınlik, E., Akay, H.U.: Effect of a Resilient Layer in a Removable Partial Denture Base on Stress Distribution to The Mandible, J. of Prosth. Dent. 44 (1): 17-20, 1980.
4. Ban, S., Hasegawa, J., Anusavice, K.J.: Effect of Loading Conditions on Bi-axial Flexure Strength of Dental Cements. Dental Materials, 8 (2): 100-4, 1992.
5. Borchers, L., Reichart, P.: Three-Dimensional Stress Distribution Around a Dental Implant at Different Stages of Interface Development, J. Dent. Res. 62 (2): 155,159, 1983.
6. Cailleteau, J. G., Rieger M.R., Akin, J.E.: A Comparison of Intracanal Stresses in a Post-Restored Tooth Utilizing the Finite-Element Method, J. Endodont. 18 (11): 540-4, 1992.
7. Çelik, E., Aydınlik, E.: Eğik (Dilacer) Köklü Bir Dişde ve Destek Dokularında Okluzal Yükler Altında Oluşan Streslerin ve Deplasmanların Sonlu Elemanlar Stres Analizi Yöntemi ile İncelenmesi, G.Ü. Dişhek. Fak. Derg. 8 (1): 33-46, 1990.
8. Cook, S. D., Klawitter, J.J., Weinstein, A.M.: A Model for the Implant-Bone Interface Characteristics of Porous Dental Implants, Journal Of Dental Research, 61 (8): 1006-9, 1982.
9. Darendeliler, S.: Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak Yapılan Üç Boyutlu Gerilme Analizi ile Mine Preparasyon Teknikleri ve Pin kullanımı Kapsayan Çeşitli Ön Diş Restorasyonlarının Kıyaslanarak Kırılma Olasılığı. En Az Olan Restorasyon Tipinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Diş Hastalıkları ve tedavisi Anabilim Dalı, Ankara 1988.

10. Darendeliler, S., Darendeliler, H., T.: Analysis of a Central Maxillary Incisor by using a Three-Dimensional Finite Element Method, *J. Oral-Rehabilitation*, 19 (4): 371-83, 1992.
11. Dayangaç, B.: Sonlu Elemanlar Stres Analizi Yöntemi ile M.O.D. Amalgam Dolgu Kırılma Olasılığını Azaltabilecek Kavite Şeklinin İncelenmesi. Doçentlik Tezi, H.Ü. Dişhek. Fak. Diş Hast. ve Tedavi Anabilim Dalı, Ankara, 1978.
12. De Hoff, P.H., Anusavice, K.J., Boyce, R.J.: Analysis of Thermally-Induced Stresses in Porcelain-metal Systems. *J. Dent. Res.* 62 (5): 593-97, 1983.
13. Derand, T.: Marginal Failure of Amalgam Class II Restoration. *J. Dent. Res.* 56 (5): 481-85, 1977.
14. Derand, T.: Stress Analysis of Cemented or Resin-Bonded Loaded Porcelain Inlays, *Dental Materials*, 7 (1): 21-4, 1991.
15. de Vree, J.H.P., Peters, M.C., Plasschaert, A.J.: A Comparison of Photoelastic and Finite Element Stress Analysis in Restored Tooth Structures. *J. Oral Rehabilitation*, 10 (6): 505-17, 1983.
16. de Vree J.H.P., Peters, M.C.R.B., Plasschaert, A.J.M.: The Influence of Modification of Cavity Design on Distribution of Stresses in a restored Molar. *J. Dent. Res.* 63 (10): 1217-20, 1984.
17. Farah, J.W., Craig, R.G.: Finite Element Stress Analysis of a Restored Axisymmetric First Molar. *J. Dent. Res.* 53 (4): 859-65, 1974.
18. Farah J.W., Craig, R.G.: Distribution of Stress in Porcelain-Fused-to-Metal and Porcelain Jacket Crowns. *J. Dent. Res.* 54 (2): 55-59, 1975.
19. Haskell, B.S., Spencer, W. A.: Auxiliary Springs in Continuous Arch Treatment. *Ame. J. Orthodon and Dentofac Orthopedics*, 97 (5): 387-39, 1990.
20. Holmes, D.C., Grigsby, W.R., Goel V.K., Keller, J. C. Comparison of Stress Transmission in the IMZ Implant system with Polyoxymethylene or Titanium Intramobile Element: A Finite Element Stress Analysis, *Int. J. Oral Maxillofac Implants*, 7 (4): 450-458, 1992.
21. Iwamoto, H., Oh, S., Ohta, Y. Stress Analysis of Ceramic Bracket by the Finite Element Method, *Nippon-Kyosei-Shika-Gakkai-Zasshi*, 47 (3): 612,20, 1988.
22. Kavsaoğlu, A.A. E. Sonlu Elemanlar Stres Analiz Yöntemi ile Kanin Distalizasyonunda Kullanılan Farklı Yöntemlerin Karşılaştırılması, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Ortodonti Anabilim Dalı, Ankara, 1986.
23. Kitoh, M., Suetsugu, T., Murakami, Y.: Mechanical Behaviour of Tooth, Periodontal Membrane, and Mandibular Bone by the Finite Element Method. *Bull. Tokyo. Med. Dent. Univ.*, 24 (1): 81-7, 1977.
24. Maeda, Y., Wood, W.W.: Finite Element Method Simulation of Bone Resorption Beneath a Complete Denture. *J. Dent Res.* 68 (9): 1370-3, 1989.
25. Meirovitch, L.: Elements of Vibration Analysis 2nd Ed. Mc Graw-Hill. 1986.
26. Peters, M.C.R.B., Poort H.W.: Biomechanical Stress Analysis of the Amalgam-Tooth Interface. *J. Dent. Res.* 62 (3): 358-62, 1983.
27. Peters, M.C.R.B., Poort, H.W., Farah J.W., Craig, R.G.: Stress Analysis of a Tooth Restored with a Post and Core. *J. Dent. Res.* 62 (6): 760-3 1983.
28. Reddy, J. N. : An Introduction to the Finite Element Method, 2nd Ed. Mc. Graw-Hill 1993.
29. Reinhard, R. A., Krejci, R. F., Pao, Y.C., Stannard, J. G.: Dentin Stresses in Post-Recons Reconstructed Teeth with Diminishing Bone Support. *J. Dent. Res.* 62 (9): 1002-8, 1983.
30. Rieger, M.R., Fareed, K., Adams, W.K., Tanquist, R.A.: Bone Stress Distribution for Three Endosseous Implants, *J. Pros. Dent.* 61: 223-228, 1989.

31. Rieger, M.R., Mayberry, M., Brose, M.O.: Finite Element Analysis of Six Endosseous Implants, *J. Prost. Dent.* 63: 671-676, 1990.
32. Rieger, M.R., Adams, W.K., Kinzel, G.L.: A Finite Element Survey of Elven Endosseous Implants, *J. Pros. Den.* 63: 457-465, 1990.
33. Rubin, C., Krishnamurthy, N., Capilouto, E., Yi, H.: Stress Analysis of the Human Tooth using a Three-Dimensional Finite Element Model, *J. Dent. Res.* 62 (2): 82-86, 1983.
34. Selna, L.G., Shillingburg, H.T., Kerr, P.A.: Finite Element Analysis of Dental Structures-Axisymmetric and Plane Stress Idealizations, *J. Biomedical Materials Research.* 9 (2): 237-252, 1975.
35. Siegele, D., Soltesz, U.: Numerical Investigations of the Influence of Implant Shape on Stress Distribution in the Jaw Bone, *J. Oral Maxillofacial Implants,* 4 (4): 333-340, 1989.
36. Spierings, A.M., de Vree, J. H.P., Peters, M.C.R.B., Plasschaert, A.J.M.: The Influence of Restorative Dental Materials on Heat Transmission in Human Teeth, *J. Dent. Res.* 63 (8): 1096-1100, 1984.
37. Takahashi, N., Kitagami, T., Komori, T.: Analysis of Stress on a Fixed Partial Denture with a Blade-Vent Implant abutment, *J. Prost. Dent.* 40 (2): 186,91, 1978.
38. Takahashi, M., Kitagami, T., Komori, T.: Effects of Pin Hole Position on Stress Distributions and Interpulpal Temperatures in Horizontal Nonparallel Pin Restorations, *J. Dent. Res.* 58 (11): 2085-2090, 1979.
39. Takahashi, M., Kitagami, T., Komori, T.: Behaviour of Teeth Under Various Loading Conditions with Finite Element Method, *J. Oral Rehabilitation,* 7 (6): 453-61, 1980.
40. Tanne, K., Sakuda, M., Burstone, C.J.: Three-Dimensional Finite Element Analysis for Stress in the Periodontal Tissue by Orthodontic Forces, *American Orthodontic Dentofacial Orthopedics,* 92 (6): 499-505, 1987.
41. Tanne, K., Koenig, H. A., Burstone, C. J.: Moment to Force Ratios and the Center of Rotation, *American Orthodontic Dentofacial Orthopedics,* 94 (5): 426-431, 1988.
42. Tanne, K., Burstone, C. J., Sahude, M.: Biomechanical Responses of Tooth Associated with Different Root Lengths and Alveolar Bone Heights: Changes of Stress Distributions in the PDL, *J. Osaka University Dental School,* 29: 17-24, 1989.
43. Tanne, K., Nagataki, T., Matsubara, S., Kato, J., Terada, Y., Sibaguchi, T., Tanaka, E., Sakuda, M.: Association Between Mechanical Stress and Bone Remodeling, *J. Osaka University Dental School,* 30: 64-71, 1990.
44. Telli, C., Gülkan, P., Günel, H.: A Critical Reevaluation of Stresses Generated During Vertical and Lateral Condensation of Gutta-Percha in the Root Canal, *Endodontic and Dental Traumatology,* 10: 1-10, 1994.
45. Warburton, G.B.: The Dynamical Behaviour of Structures, 2nd Edition, Pergamon International Library, 1976.
46. Williams, K. R., Edmundson, J. T.: Orthodontic Tooth, Movement Analysed by the Finite Element Method, *Biomaterials,* 5 (6): 347-351, 1984.
47. Wright, K. W.J., Yettram, A. L.: Finite Element Stress Analysis of a Class I Amalgam Restoration Subjected to Setting and Thermal Expansion, *J. Dent. Res.* 57 (5-6): 715-723, 1978.
48. Yaman Darendeliler, S.: Ön Diş Restorasyonlarında Çeşitli Mine Preparasyon Teknikleri ve Pin Kullanımının Tutuculuk ve Dayanıklılık Üzerindeki Etkisinin 3 Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi, *G. Ün. Dişhekimliği Fakültesi Dergisi,* 9 (2): 15-28, 1992.
49. Yaman Darendeliler, S., Alaçam, T., Yaman, Y.: Analysis of Stress Distribution in a Vertically Condensed Maxillary Central Incisor Root Canal, *J. Endodontics (Baskıda).*

50. Yang, H. S., Thompson, V.P.: A Two-Dimensional Stress Analysis Comparing Fixed Prosthodontic Approaches to the Tired Molar Abutment, *International J. Prosth.* 4(5): 416-424, 1991.

51. Yettram, A.L., Wright, K. W., Pickard, H.M.: Finite Element Stress Analysis of the Crowns of Normal and Restored Teeth, *J. Dental Res.* 55 (6): 1004-1011, 1976.

52. Zhou, S., H. Wang, Y.: Analysis of Stresses and Breaking Loads for Class I Cavity Preparations in Mandibular First Molars, *Quintessence International*, 20: 205-210, 1989.

53. Zienkiewicz, O. C.: *The Finite Element Method* 3rd Edition, Mc, Mc Graw-Hill Book Company Limited, 1977.