



Karbon nanotüp takviyeli kayma deformasyonlu hibrit güçlendirmeli kirişlerin büyük yer değiştirme davranışlarının analizi

Analysis of large displacement behavior of carbon nanotube reinforced shear deformable hybrid strengthened beams

Sedat Kömürcü^{1*}

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnşaat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
komurcus@itu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 29.11.2024
Kabul Tarihi/Accepted: 26.06.2025

Düzeltilme Tarihi/Revision: 11.05.2025

doi: 10.5505/pajes.2025.88347
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada karbon nanotüp takviyeli hibrit (CNTH) kirişlerin yapısal tasarımlarında karşılaşılan ancak analitik olarak çözümünün elde edilmesi zor olan önemli bir mühendislik problemine sayısal bir çözüm bulunmaktadır. Bu amaçla CNTH kirişlerin büyük yer değiştirme analizlerinde yüksek hassasiyetli sonuçların elde edilmesi hedeflenmektedir. CNTH yapılar; mekanik, termal ve elektriksel özellikleri iyileştirmek için karbon nanotüpün (CNT) bir matris içine dâhil edilerek oluşturulduğu gelişmiş malzemeler kullanılır. Ayrıca CNT bileşenleri karbon fiber (CF) ile birlikte hibrit bir yapı meydana getirmektedir. CNTH kirişlerin değişen yüklem koşulları altındaki mekanik eğilme davranışları, formüle edilen sonlu eleman kullanılarak analiz edilmektedir. Analizlerde hem yer değiştirme (u, w, ϕ) hem de iç kuvvet (N, T, M) bileşenleri nodal değerler olarak belirlenmektedir. CNTH kirişlerin mekanik davranışlarını ortaya koymak için Halpin-Tsai denklemi ve Voigt karışım kuralı kullanılmaktadır. CNT hacim oranı, fiber oranı ve CNT geometrik parametrelerinin kompozit kirişlerin mekanik performansı üzerindeki etkisi belirlenmektedir. Sayısal bulgular, yük taşıma kapasitesi ve deformasyon özelliklerine ilişkin önemli hususlara ışık tutarak CNTH kirişlerin mekanik davranışlarına yönelik bilgiler vermektedir. Bu çalışma, havacılık, otomotiv, elektronik, biyomühendislik, inşaat ve çeşitli alanlarda kullanılan CNTH yapıların tasarımı ve optimizasyonu için etkili bir yöntem sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Büyük yer değiştirme analizi, CNT takviyesi, Hibrit çubuk, Karbon nanotüp, Kayma deformasyonu

Abstract

In this study, a numerical solution is found for a significant engineering problem encountered in the structural design of carbon nanotube reinforced hybrid (CNTH) beams, but which is difficult to solve analytically. For this purpose, it is aimed to obtain high precision results in large displacement analyses of CNTH beams. CNTH structures are advanced materials in which carbon nanotube (CNT) is incorporated into a matrix to improve mechanical, thermal and electrical properties. In addition, CNT components form a hybrid structure with carbon fiber (CF). The mechanical bending behavior of CNTH beams under varying loading conditions is analyzed using the formulated finite element. Both displacement (u, w, ϕ) and internal force (N, T, M) components are determined as nodal values. The material properties of CNTH beams are included in the calculations using the Halpin-Tsai equation and the Voigt mixture rule technique. The effect of CNT volume fraction, fiber ratio, and CNT geometric parameters on the mechanical performance of composite beams is determined. The numerical findings provide information on the mechanical behavior of CNTH beams by shedding light on important issues regarding load carrying capacity and deformation properties. This study provides a significant method for the design and optimization of CNTH structures used in aerospace, automotive, electronics, bioengineering, construction and various engineering fields.

Keywords: Carbon nanotube, CNT reinforced, Hybrid rod, Large deflection analysis, Shear deformation

1 Giriş

Teknolojinin gelişmesiyle beraber yüksek dayanımlı malzemelere olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Yüksek dayanımlı malzemelerin oluşturulma süreçleri geleneksel malzemelerden oldukça farklı olup bu süreçlerde ileri yöntemler kullanılmaktadır. Bununla beraber, malzemelerin yüksek dayanıma sahip olmasına ek olarak yüksek elastiklik ve büyük yer değiştirme yapabilme yeteneği de beklenen özellikler arasındadır. Bu durumda yapıların geometrik doğrusal olmayan davranışlarının iyi bir şekilde belirlenmesini gereklidir. CNT yapıların keşfedilmesiyle yüksek dayanımlı malzemelerin üretimlerinde yeni bir dönem başlamıştır. CNT'lerin diğer malzemeler ile beraber kullanılmasıyla üstün özelliklere sahip malzemeler oluşturulmaktadır. Hibritleştirilmiş CNTH yapılar, CNT'nin fiber yüzeyi üzerinde biriktirilmesi veya doğrudan büyütülmesi yoluyla oluşturulurlar. Eklenen CNT, fiberin yüzey özelliklerini değiştirecek ve sonuç olarak yüksek performanslı, çok

fonksiyonlu ileri kompozitlerin geliştirilmesine olanak sağlayacaktır. Bu nedenle fiber ve CNT'nin hibridizasyonu, fiber ve matris arasındaki ara yüzey aderansını geliştirmek için en iyi yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. CNT ilk defa Iijima tarafından keşfedildi [1],[2]. CNT'ler grafitin silindirik mikro tüpler halinde formlaşmasıyla meydana gelen yapılardır. CNT'ler atomlar arası etkileşim ve mükemmel şekilde ortaya çıkan kafes yapıları sayesinde çok yüksek dayanım ve mekanik özelliklere sahiptirler. Bu özelliklerinin yanında oldukça düşük yoğunluğa sahiptirler ve hafiftirler. Bu sayede uçak ve uzay mühendisliği, otomotiv, inşaat, spor aletleri gibi sayısız alanda tercih edilen üst düzey takviye malzemeleridirler.

CNTH yapıların sentezi ve oluşturulması ile ilgili bilgileri kimya ve malzeme bilimi alanlarında ortaya konmuş olan çalışmalarda görmekteyiz. Örneğin, polimerlerin CNT'ler ile takviye edilmesi incelenmiş ve nanotüp yüzey alanının kompozit malzeme özelliklerini artırmadaki rolü vurgulanmıştır [3]. Salvetat ve ark. tek duvarlı karbon nanotüplerin elastisite ve kayma modüllerini araştırarak

*Corresponding author/Yazışılan Yazar

mekanik performansları hakkında temel bilgiler sağlamışlardır [4]. Teorik ve sayısal modeller, CNT takviyeli kirişlerin mekanik davranışını tahmin etmek için oldukça önemlidirler. Odegard ve ark. bu kompozitlerin özelliklerini anlamak ve tahmin etmek için teorik modeller geliştirmişlerdir [5]. Coleman ve ark. [6] tarafından yapılan araştırma CNT'ler ile matris arasındaki ara yüzey bağlanmasını ve yük transfer mekanizmalarını anlamak için önemlidir. CNT takviyeli kirişlerin yapı mühendisliğindeki pratik uygulamaları oldukça geniştir. Matris içindeki CNT yönelimi ve hizalanması incelenmiş olup, uygun hizalanmış CNT'lerin kompozit kirişlerin mekanik performansını önemli ölçüde artırabileceği gösterilmiştir [7],[8]. CNT takviyeli kompozitlerin termal ve elektriksel özellikleri araştırılmış ve çok yönlü uygulama potansiyeli ortaya konmuştur [9].

Çubukların geometrik doğrusal olmayan davranışlarının araştırılması üzerine yapılan çalışmaların başlangıcı günümüzden daha öncelere dayanmaktadır. Bisshopp ve Drucker, konsol kirişlerin büyük yer değiştirme analizi için bir çözüm önerdiler [10]. Reissner tek eksenli sonlu şekil değiştirme teorisi üzerine öncü çalışmalar yürütmüştür [11], [12]. Bu çalışmalar ışığında kirişlerin eğilme analizine yönelik araştırmalar günümüze kadar gelişerek devam etti. Kompozit kirişlerin büyük yer değiştirme analizi üzerine Pagani ve Carrera tarafından bir çalışma yapıldı [13]. Savoia ve Tullini ortotrop malzemelerin kullanıldığı kiriş teorisi üzerine bir çalışma ortaya koydular [14]. Khdeir ve Reddy, tabakalı kompozit kirişlerin eğilmesi üzerine bir çözüm önerdiler [15]. Hajianmaleki ve Qatu, farklı sınır koşullarına sahip tabakalı kirişlerin statik ve titreşim analizleri yaptılar [16]. Vo ve Thai, kayma deformasyon teorileri kullanarak kompozit kirişlerin statik davranışını incelediler [17]. Minguet ve Dugundjit, büyük yer değiştirmeler altında kompozit çubukları incelediler [18]. Ghazavi ve Gordaninejad, tabakalı kompozit malzemelerden oluşan kalın kirişlerin doğrusal olmayan eğilme davranışını incelediler [19]. Pai ve Nayfeh, geometrik doğrusal olmayan bir kompozit kiriş teorisi ortaya koydular [20]. Emam, burkulma sonrası davranış kayma ile deforme olabilen kompozit kirişler için inceledi [21]. Baghani ve ark. elastik temel üzerinde lamine kompozit kirişlerin büyük genlikli serbest titreşimleri ve burkulma sonrası analizi üzerinde çalıştılar [22]. Mareishi ve ark. piezoelektrik elyaf takviyeli kompozit kirişlerin doğrusal olmayan titreşimi ve burkulma sonrası analizlerini yaptılar [23].

Son yıllarda CNTH malzemelerin kullanıldığı analizler yapılmaktadır. CNTH malzemelerden oluşan plakların burkulma analizi Kumar ve ark. tarafından yapılmıştır [24]. Analiz sonuçlarını çeşitli makine öğrenmesi metodlarıyla desteklediler. Zhu ve ark. CNT takviyeli kompozit plakların birinci mertebe kayma deformasyon teorisine göre statik ve serbest titreşim analizlerini yaptılar [25]. Çalışmada sonlu elemanlar yöntemini kullandılar. Zhang ve Liew CNT donatılı fonksiyonel derecelendirilmiş elastik zemin üzerine oturan plakların büyük yer değiştirme analizlerini yaptılar [26]. Chen ve ark. CNT takviyeli polimerler üzerine bir çalışma gerçekleştirdiler [27]. Bu çalışmayla, malzemenin mekanik özellikleri hakkında iyileştirmeler önerdiler. Duy ve ark. sonlu elemanlar yöntemiyle fonksiyonel derecelendirilmiş CNT takviyeli kirişlerin serbest titreşim analizlerini yaptılar [28]. Çeşitli CNT dağılımlarının titreşim analizlerine olan etkisini incelediler. Taheri ve Memarzadeh CNT takviyeli kompozit plakların burkulmasında çatlak etkisini incelediler [29]. Çalışmada sonlu elemanlar yöntemini kullandılar ve kayma etkilerini modele dâhil ettiler. Talebizadehsardari ve ark. tarafından CNT takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş eğri

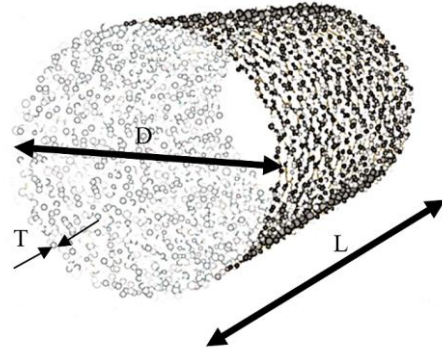
eksenli kirişlerin analizleri yapıldı [30]. Güler ve ark. CNT takviyeli yapıların elektriksel ve optik özelliklerini incelediler [31]. CNT'lerin bu özellikleri artırıcı etkisi olduğunu vurguladılar. Yılmaz ve ark. CNT güçlendirilmiş kompozitlerin statik eğilme analizleri üzerine bir çalışma sundular [32]. Bu yapıların diğer yapılara göre daha yüksek enerji emilimi sağladığını belirttiler. CNT takviyeli yapıların analizlerini içeren çalışmalar günümüzde yoğun bir şekilde devam etmektedir.

Bu çalışmada elde edilen yapı, CNT ile takviye edilerek üstün özellikler kazandırılan hibrit kirişlerin büyük yer değiştirme analizlerini yaparak önemli bir problemin çözümüne katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada CNTH kompozit kirişlerin analizleri yüksek hassasiyette yapılmaktadır ve kullanılan CNT ve fiber oranının yapının mekanik davranışına olan etkisi oluşturulan formülasyon ile incelenmektedir. Bu sayede uzay, havacılık, makine, elektronik, inşaat, denizcilik, biyomekanik, robotik, kimya ve tıp alanlarında kullanım alanı bulan karbon nanotüp takviyeli hibrit yapıların etkili bir şekilde analizleri gerçekleştirilmektedir.

2 Formülasyon

2.1 Karbon nanotüp takviyeli fiber donatılı hibrit kiriş yapısı

Karbon nanotüp takviyeli hibrit kirişler, CNT'leri, fiber gibi takviye malzemelerini içeren bir malzeme matrisiyle bütünleştirilerek kirişin mukavemetini artırmayı ve modern mühendislik çözümleri için kirişin mekanik özelliklerini geliştirmeyi amaçlayan kompozit yapı elemanlarıdır. CNT'ler, yüksek mukavemet, sertlik, yüksek iletkenlik ve dayanıklılık gibi üstün mekanik özellikleri nedeniyle malzeme bilimi ve mühendislik alanında büyük ilgi görmüştürler. Bu özellikler, CNT'leri yapısal elemanların performansını artırmak için tercih edilen bir takviye malzemesi haline getirmiştir. CNT, benzersiz yapısı sayesinde oldukça üstün özelliklere sahiptir. Çelikten yüzlerce kat daha sağlam ve bakırdan çok daha fazla iletkenliğe sahiptir. Bu üstün özellikleri sayesinde; sensörlerde, elektrokimyasal güç kaynaklarında, yapıstırıcılarda, camlarda, boyalarda, betonda, alüminyumda, plastikte, seramiklerde, bakırda, kauçuk malzemelerde kullanılabilmektedir. Tüm bu alanlar düşünüldüğünde CNT yapıların oldukça geniş bir kullanım alanına sahip oldukları görülmektedir. Şekil 1'de tek duvarlı karbon nanotüp yapısı şematik olarak görülmektedir. Burada D, T ve L sırasıyla CNT'nin çapını, kalınlığını ve boyunu göstermektedir.

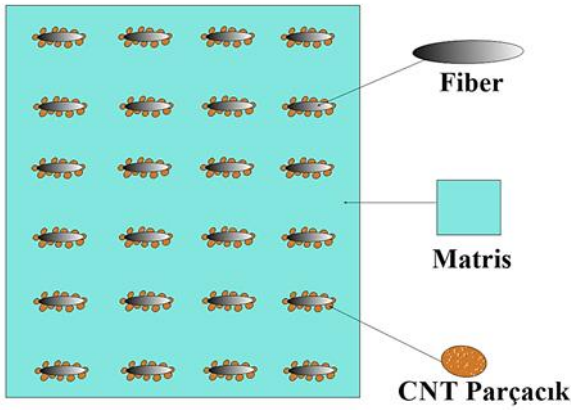


Şekil 1. CNT yapısı ve geometrik parametreleri.

Figure 1. CNT structure and geometric parameters.

Kiriş içerisine iyi dağıtılmış nanotüpler malzemenin matrisine gömüldüğünde, yeni bir dizi özellik sağlayan ve nihai ürünün diğer temel özellikleri üzerinde olumlu etkiye sahip olan iletken

bir ağ oluşturur. Bu kirişler, polimerler, metaller veya seramikler gibi çeşitli matrislere gömülü tek duvarlı veya çok duvarlı CNT'leri içerirler. İleri teknolojiler kullanılarak oluşturulan yüksek dayanımlı ve ileri düzeyde yer değiştirme yapabilme yeteneğine sahip malzemelerden oluşan mekanik yapıların incelenmesi günümüzde araştırılmaya devam edilen bir konudur. Karbon nanotüp yapıların keşfedilmesiyle yüksek dayanımlı malzemelerin üretimlerinde yeni bir çalışma alanı ortaya çıkmıştır. Karbon nanotüplerin özellikle metal matrisli malzemeler ile beraber kullanılarak zorlu çevre ve ortam koşullarına karşı dayanım gösterebilen malzemelerin oluşturulması günümüzde uygulanmaktadır. Şekil 2'de CNT takviyeli fiberler içeren hibrit kirişin kesiti görülmektedir. Takviye malzemelerinin kiriş içerisinde düzgün dağıldığı varsayılarak formülasyon yapılmaktadır. Kirişi oluşturan temel malzeme bileşenleri, matris, CNT parçacıklar ve fiberlerdir.



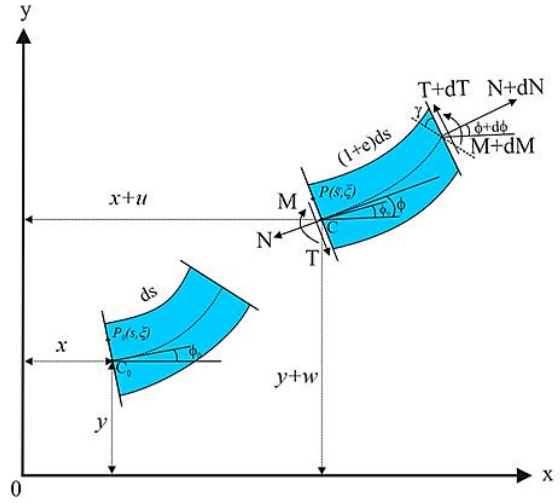
Şekil 2. CNTH kiriş en kesiti ve bileşenleri.

Figure 2. CNTH beam cross-section and components.

2.2 CNTH kiriş formülasyonu

CNTH kirişin formülasyonu, büyük yer değiştirme etkilerini içeren ve birinci mertebe kayma deformasyonlu kiriş teorisi kullanılarak oluşturulmaktadır. Birinci mertebe kayma deformasyon teorisi, kayma deformasyonlarını hesaba katarak malzemenin daha gerçekçi bir şekilde modellenmesini sağlar. Bu teoride düzlem kesit varsayımı uygulanmamakta olup kesitler eğilme sırasında hafifçe dönebilir veya kayabilir. Kesitin dönmesiyle beraber kayma deformasyonları ortaya çıkmaktadır. Bu teoride kayma gerilmeleri doğrusal olmayan bir dağılım göstermektedir. Teori, CNTH kirişlerin analizinde hassas sonuçlar elde edebilmek için tercih edilmiştir.

Formülasyonda kullanılan temel büyüklükler Şekil 3'te gösterilmektedir. Mevcut durumda enine kesit dönüşü ϕ olup kayma açısı γ 'dir. Bağımsız geometrik değişkenler; yatay yer değiştirme u , düşey yer değiştirme w ve dönme ϕ 'dir. Deformasyonun öncesinde ds düzlem eğrisel kiriş elemanı olup kiriş eğrisi üzerinde $\cos(\phi_0) = x'$ ve $\sin(\phi_0) = y'$ olarak yazılmaktadır. Bu ifadeler s parametresine göre olan türevleri göstermektedir. Elemanı analiz etmek amacıyla $P_0(s, \xi)$ noktasındaki parçacığın hareketi incelenmektedir. N , T ve M sırasıyla normal kuvvet, kesme kuvveti ve momenti göstermektedir.



Şekil 3. Kartezyen koordinatlarda kiriş elemanı.

Figure 3. Beam element in Cartesian coordinates.

Çubuğun eğilme açısındaki değişim ($d\phi$), küçük açılar için yapılan lineer yaklaşımlara kıyasla daha karmaşık bir etki oluşturmaktadır. Parçacık deformasyon sonrasında $P(\bar{s}, \xi)$ noktasına doğru hareket etmektedir. $\bar{s}$ deforme olmuş durumda sabit bir noktadan merkezsiz eksene olan mesafedir. s ve $\bar{s}$ arasındaki diferansiyel ilişki aşağıda tanımlanmaktadır.

$$d\bar{s} = (1 + e)ds \quad (1)$$

Bu ifadede de e merkezsiz eksendeki uzama şekil değiştirmesi olup P_0 ve P 'nin kesit alanları boyunca C_0 ve C noktalarında tarafsız eksen üzerindeki izdüşümleri sırasıyla $C_0(s, 0)$ ve $C(\bar{s}, 0)$ olarak gösterilmektedir. Deformasyonlar arasındaki bağıntı aşağıdaki formda yazılmaktadır.

$$1 + e = \sqrt{(x' + u')^2 + (y' + w')^2} \quad (2)$$

Uzama, kayma ve eğilme ile ilişkilendirilen genelleştirilmiş şekil değiştirme ifadeleri sırasıyla gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon} &= (x' + u')\cos\phi + (y' + w')\sin\phi - 1 = (1 + e)\cos\gamma \\ \bar{\gamma} &= \gamma_{xy} = \gamma_{yx} = (y' + w')\cos\phi - (x' + u')\sin\phi \\ \bar{\kappa} &= \frac{d\phi}{ds} - \kappa_0 \end{aligned} \quad (3)$$

Gerilme ve şekil değiştirmeler aracılığıyla denge denklemlerini türetebilmek için virtüel iş prensibi kullanılmaktadır.

$$\iiint \sigma^{(k)} \delta e_{xx} dV_0 + \iiint \tau^{(k)} \delta \gamma_{xy} dV_0 - \int q_x \delta u ds - \int q_y \delta w ds - \int m_z \delta \phi ds = 0 \quad (4)$$

Burada q_x , q_y ve m_z sırasıyla x , y ve z eksenlerinde etkiyen yüklerdir. Hareketin doğrusal olmayan denge denklemleri aşağıdaki formda elde edilir.

$$\begin{aligned} -\frac{d}{ds} [N\cos\phi - T\sin\phi] - q_x &= 0 \\ -\frac{d}{ds} [N\sin\phi + T\cos\phi] - q_y &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$-\frac{dM}{ds} - (x' + u')[N\sin\phi + T\cos\phi] + (y' + w')[N\cos\phi - T\sin\phi] - m_z = 0$$

Halpin-Tsai denklemi [33] yazıldığında CNTH kiriş yapısı için uygun olan malzeme parametreleri elde edilmektedir. Burada E , L , D ve T değerleri sırasıyla SWCNT'nin elastisite modülü, uzunluğu, çapı ve kalınlığını göstermektedir. İfadeye kullanılan α ve β parametreleri sayesinde denklem kompakt bir forma indirgenmektedir. E_{cntm} CNT-matris kompozit malzemenin elastisite modülü. E_m matris malzemenin elastisite modülüdür. V_{cnt} oranı sıfıra eşit olduğunda E_{cntm} modülünün matris modülüne eşit olduğu görülmektedir.

$$E_{cntm} = \frac{E_m}{8} \left[5 \left(\frac{1 + 2\alpha V_{cnt}}{1 - \alpha V_{cnt}} \right) + 3 \left(\frac{1 + 2 \left(\frac{L}{D} \right) \beta V_{cnt}}{1 - \beta V_{cnt}} \right) \right] \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{\left(\frac{E_{cnt}}{E_m} \right) - \left(\frac{D}{4T} \right)}{\left(\frac{E_{cnt}}{E_m} \right) + \left(\frac{D}{2T} \right)}; \quad \beta = \frac{\left(\frac{E_{cnt}}{E_m} \right) - \left(\frac{D}{4T} \right)}{\left(\frac{E_{cnt}}{E_m} \right) + \left(\frac{L}{2T} \right)}$$

CNT, çok yüksek elastisite modülü ve mukavemete sahip nano ölçekli bir yapıdır. Bir kompozitte, takviye edici faz olarak kullanıldığında malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde değiştirmektedir. Matris, nanotüplerin de içinde yer aldığı çevreleyen malzemedir. Bu genellikle polimer, metal veya seramik gibi bir malzeme olabilir. Bu ifadeyle beraber kirişte kullanılan fiberlerin etkisinin de hesaba katılması gerekmektedir. Bu şekilde E_{CNTH} hibrit kiriş modülü elde edilmektedir.

$$E_{CNTH} = (E_{fib} - E_{cntm})V_{fib} + E_{cntm} \quad (7)$$

Normal kuvvet, kesme kuvveti ve moment ifadeleri, normal ve kayma gerilmeleri aracılığıyla yazılmaktadır.

$$N = \iint_{A_0} \sigma dA_0$$

$$T = \iint_{A_0} \tau dA_0 \quad (8)$$

$$M = - \iint_{A_0} \xi \sigma dA_0$$

Sınır koşulları aşağıda gösterilen formda yazılmaktadır. Üzerinde şapka işareti ile gösterilen terimler kirişin sınırlarındaki bilinen değerleri göstermektedir.

$$\begin{aligned} -u + \hat{u} &= 0 \\ -w + \hat{w} &= 0 \\ -\phi + \hat{\phi} &= 0 \\ N \cos \phi - T \sin \phi - \hat{P} &= 0 \\ N \sin \phi + T \cos \phi - \hat{Q} &= 0 \\ M - \hat{M} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Değişim yöntemleri mekaniğine göre [34], eğer $P(u)$ potansiyelse, gradyanı $P(u)$ operatörü olan bir fonksiyonel $I(u)$ vardır ve aşağıdaki şekilde gösterilir; Burada, K ve τ parametrelerdir.

$$I(u) = \int_0^1 \langle K(u_0 + \tau(u - u_0)), u - u_0 \rangle d\tau \quad (10)$$

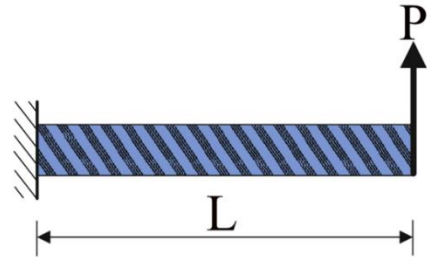
τ üzerinden integre edilmesiyle $I(u)$ şeklinde ifade edilen fonksiyonel CNTH kirişlerin büyük yer değiştirme analizleri için elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} I(u) &= \langle N, [(y' + w') \sin \phi + (x' + u') \cos \phi - 1] \rangle \\ &+ \langle T, [(y' + w') \cos \phi - (x' + u') \sin \phi] \rangle + \langle M, \left(\frac{d\phi}{ds} - \kappa_0 \right) \rangle \\ &- \left\langle \frac{N}{2E_{CNTH}A_0}, N \right\rangle - \left\langle \frac{T}{2G_{CNTH}k'A_0}, T \right\rangle - \left\langle \frac{M}{2E_{CNTH}I}, M \right\rangle \quad (11) \\ &- [(u - \hat{u}), (N \cos \phi - T \sin \phi)]_e - [(w - \hat{w}), (N \sin \phi + T \cos \phi)]_e \\ &- [(\phi - \hat{\phi}), M]_e - [\hat{P}, u]_\sigma - [\hat{Q}, w]_\sigma - [\hat{M}, \phi]_\sigma \\ &- \langle q_x, u \rangle - \langle q_y, w \rangle - \langle m_z, \phi \rangle \end{aligned}$$

Sonlu eleman analizlerinde nodal büyüklükler yatay ve dikey yer değiştirmeler ve dönme deplasmanları ile normal kuvvet, kesme kuvveti ve moment olmak üzere altı adettir $\{u, w, \phi, N, T, M\}$. Analizlerde 5 nodlu eleman kullanılmaktadır. Sayısal integrasyonlarda Legendre-Gauss integrasyon şeması kullanılmaktadır [35]. Çözüm yöntemi olarak artımsal formülasyon yapısı kullanılmaktadır.

3 Sayısal analiz

Bu bölümde CNTH kirişin büyük yer değiştirme analizi, bir ucu sabit mesnetli diğer ucu serbest olan ve serbest ucunda tekil yük ile yüklenen bir konsol kiriş örneği ile sunulmaktadır. Kiriş geometrisi Şekil 4'te görülmektedir. Kiriş uzunluğu 1 m olup, kiriş kesiti kare kesit olup yüksekliği ve eni sırasıyla $h=1$ cm ve $b=1$ cm'dir. Kirişin serbest ucuna $P=500$ N tekil yük uygulanmaktadır. Sonlu eleman analizleri 8 eleman kullanılarak yapılmaktadır.



Şekil 4. Konsol CNTH kiriş ve yükleme durumu.

Figure 4. Cantilever CNTH beam and loading condition.

CNTH kiriş malzeme parametreleri Tablo 1'de görülmektedir. Kiriş oluşturan CNT, fiber ve matris olmak üzere üç temel malzeme formu bulunmaktadır. Kullanılan CNT yapısı tek duvarlı (SWCNT) olarak kullanılmaktadır. E , L , D ve T değerleri sırasıyla SWCNT'nin elastisite modülü, uzunluğu, çapı ve kalınlığını göstermektedir. Kullanılan fiber malzemesinde Zirkonya (ZrO_2), matris malzemesinde ise Alüminyum (Al) kullanılmaktadır [24].

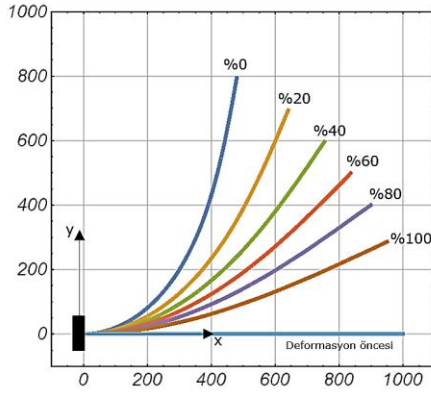
Tablo 1. CNTH kiriş malzeme özellikleri.

Table 1. CNTH beam material properties.		
Yapı	Malzeme	Özellik
CNT	SWCNT	$E_{cnt} = 640$ GPa
		$L_{cnt} = 25$ μ m
		$D_{cnt} = 1.4$ nm
		$T_{cnt} = 0.34$ nm
Matris	Alüminyum (Al)	$E_m = 70$ GPa
Fiber	Zirkonya (ZrO_2)	$E_f = 151$ GPa

Uygulanan yük etkisi altındaki CNTH kirişin değişen CNT oranına (V_{cnt}) göre büyük yer değiştirme analizi sonucunda ortaya çıkan deformasyon durumları Şekil 5'te görülmektedir. Kirişin büyük yer değiştirme analizi sonucunda x - y eksenlerinde deformasyon eğrileri yer almaktadır. Grafikte

CNT oranı %0'dan %100'e kadar değişmekte ve her bir eğri farklı bir CNT oranına karşılık gelmektedir. Artan CNT oranı, kirişin düşey yer değiştirme kapasitesini etkilemektedir. %0 CNT oranı durumunda, kiriş en yüksek deformasyona uğramaktadır. Malzemenin rijitliği düşük olduğu için düşey yük etkisinde daha büyük eğilme gözlemlenmektedir. Bu, malzemenin takviye olmadan zayıf mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. CNT oranı arttıkça, kirişin deformasyonu belirgin bir şekilde azalmaktadır. %100 CNT oranında, düşey deformasyon en düşük seviyeye inmektedir. Daha fazla CNT oranı, malzemenin daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olmasını sağlamaktadır.

Tüm eğriler doğrusal olmayan bir yükseliş sergilemektedir. Bu, büyük yer değiştirme etkisi altında kirişin doğrusal elastik davranıştan uzaklaşarak doğrusal olmayan deformasyon sürecine girdiğini göstermektedir. CNT takviyesinin, kirişin düşey deformasyonunu azaltan önemli bir faktör olduğu görülmektedir. Yüksek CNT oranları ile rijitlik artarken deformasyonlar kontrol altına alınmaktadır. %0 CNT oranında büyük yer değiştirme etkileri çok daha belirgin, CNT oranının artmasıyla deformasyon oldukça küçük değerlerde kalmaktadır. Yapısal yük taşıma performansı artırılmak istenen kirişler için uygun bir CNT oranının seçilmesi gerekmektedir. Yapılan analizler, karbon nanotüp oranının artmasıyla malzemenin daha dayanıklı hale geldiğini ve yapısal açıklık ortaya koymaktadır.



Şekil 5. CNTH kirişin deformasyonu.

Figure 5. Deformation of CNTH beam.

Kirişin serbest ucunda ölçülen u yatay ve w düşey yer değiştirme değerleri, değişen CNT oranına göre Tablo 2'de görülmektedir. CNT oranı arttıkça kirişin büyük yer değiştirme davranışları önemli ölçüde değişmektedir. $V_{cnt}=0$ olduğu durumda en büyük negatif yatay yer değiştirme görülmektedir ($u=-520.79$ mm). V_{cnt} oranı arttıkça u değerinin mutlak büyüklüğü azalmaktadır, bu da kirişin yatay yer değiştirme kapasitesinin önemli ölçüde kontrol altına alındığını göstermektedir. $V_{cnt}=0$ durumunda en büyük düşey yer değiştirme ($w=793.49$ mm) gözlenmektedir. Bu, CNT takviyesi olmadığında kirişin yük altında daha fazla eğildiğini ifade etmektedir. V_{cnt} oranı arttıkça w değerinde belirgin bir azalma görülmektedir. %100 CNT oranında düşey yer değiştirme $w=285.94$ mm olarak ölçülmüştür. Düşey deformasyondaki bu azalma, malzemenin artan mukavemeti ve rijitliğine işaret etmektedir. CNT oranı arttıkça hem yatay hem de düşey yer değiştirme değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Bu, kirişin yük taşıma kapasitesinin ve mekanik dayanımının CNT ile artırıldığını göstermektedir. Deformasyonun azalması, CNT'nin kirişe sağladığı yüksek mukavemetin sonucudur.

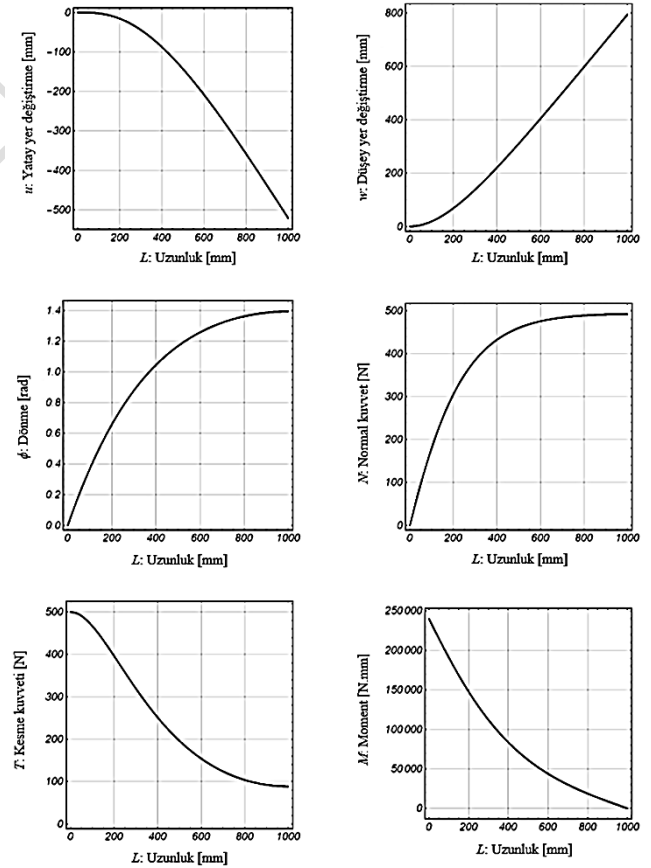
Ayrıca, rijitliğin artışı kirişin daha kararlı bir şekilde davranmasını sağlar.

Tablo 2. Değişen CNT oranına göre u ve w uç yer değiştirmeler.

Table 2. u and w tip displacements for changing CNT ratios.

V_{cnt} [%]	u [mm]	w [mm]
0	-520.79	793.49
0.2	-359.47	693.63
0.4	-246.68	595.49
0.6	-164.13	498.28
0.8	-101.69	399.65
1	-50.51	285.94

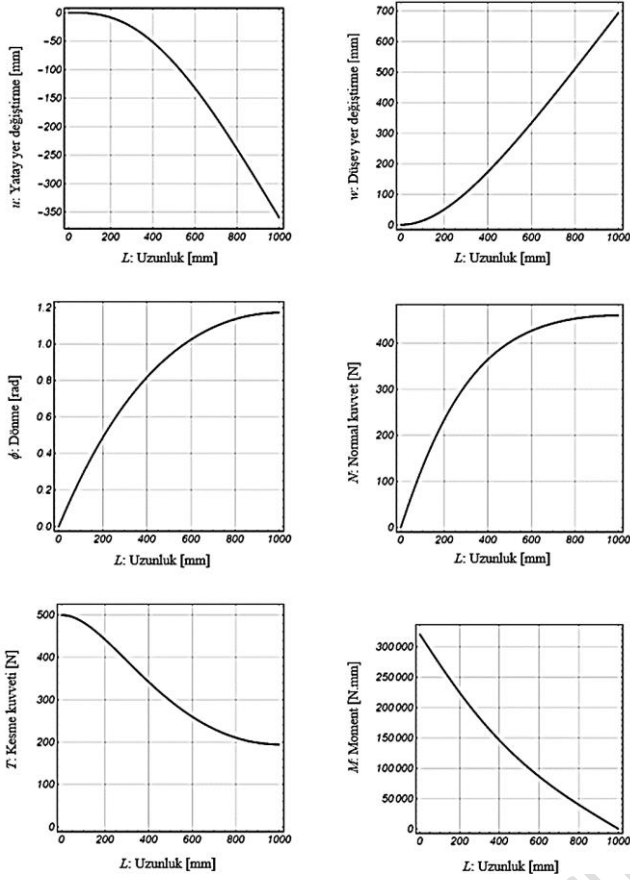
CNTH kirişin $V_{cnt}=0$, $V_{fib}=0$ oranları kullanıldığında büyük yer değiştirme analizi sonucunda ortaya çıkan deplasmanlar ve iç kuvvetler Şekil 6'da görülmektedir. Kiriş boyunca yatay ve düşey yönde meydana gelen yer değiştirmelerin giderek arttığı görülmektedir. Mesnetten itibaren dönme açısında bir artış gözleniyor, uç kısma doğru bu artış hızı azalmakta ancak toplam dönme miktarı artmaktadır. Normal kuvvet grafiği, mesnette sıfırken uç kısımda, yüklenen tekil yük değerine yaklaşmaktadır. Kesme kuvveti, yüklemeye beraber mesnette maksimum yük değerine giderken kirişin uç kısmına doğru kesme kuvvetlerinin etkisinin azaldığı görülmektedir. Moment değeri, mesnette en yüksek değerde olup uç kısma doğru azalmaktadır.



Şekil 6. $V_{cnt}=V_{fib}=0$ oranları için u : yatay yer değiştirme, w : düşey yer değiştirme, ϕ : dönme, N : normal kuvvet, T : kesme kuvveti ve M : moment grafikleri.

Figure 6. u : horizontal displacement, w : vertical displacement, ϕ : rotation, N : normal force, T : shear force and M : moment graphs for $V_{cnt}=V_{fib}=0$ ratios.

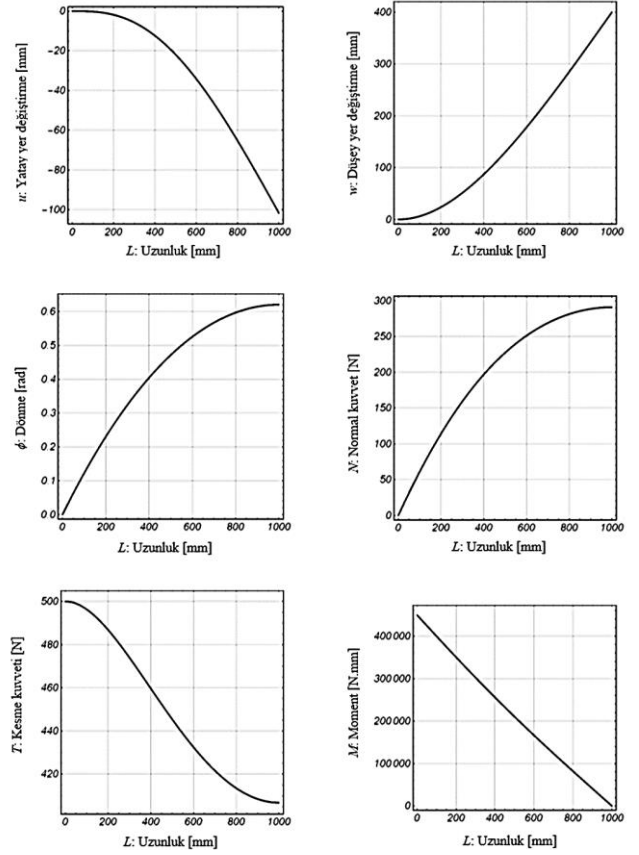
CNTH kirişin $V_{cnt}=0.2$, $V_{fib}=0$ oranları kullanıldığında büyük yer değiştirme analizi sonucunda ortaya çıkan deplasmanlar ve iç kuvvetler Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7. $V_{cnt}=0.2$ ve $V_{fib}=0$ oranları için u: yatay yer değiştirme, w: düşey yer değiştirme, ϕ : dönme, N: normal kuvvet, T: kesme kuvveti ve M: moment grafikleri.

Figure 7. u: horizontal displacement, w: vertical displacement, ϕ : rotation, N: normal force, T: shear force and M: moment graphs for $V_{cnt}=0.2$ ve $V_{fib}=0$ ratios.

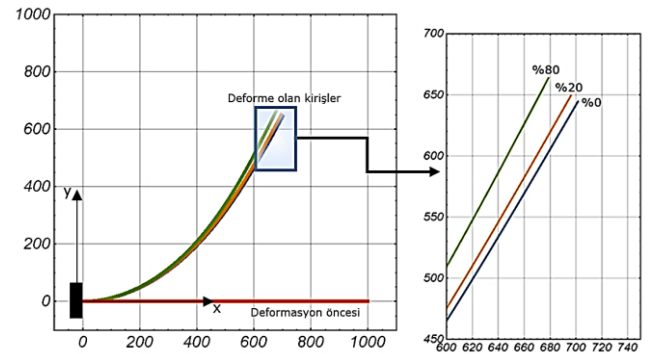
CNTH kirişin $V_{cnt}=0.8$, $V_{fib}=0$ oranları kullanıldığında büyük yer değiştirme analizi sonucunda ortaya çıkan deplasmanlar ve iç kuvvetler Şekil 8'de görülmektedir. Yatay ve düşey yönde oluşan yer değiştirmelerin giderek arttığı görülmektedir. Aynı zamanda kirişin dönme açısının uç kısma doğru artışı gözlemlenmektedir. Kirişe yüklenen tekil yük etkisi düşünüldüğünde ortaya çıkan normal kuvvet ve kesme kuvveti grafiklerinin yüklemeye uyumlu olarak ve kirişin yaptığı büyük yer değiştirmeler sonucu aldığı forma göre uygun bir şekilde değişimleri görülmektedir. Moment diyagramı, beklendiği üzere kirişin mesnet kısmında maksimum değerde oluşmaktadır. Elde edilen grafiklerden görüldüğü üzere, V_{cnt} oranının kirişte artmasıyla kiriş rijitliği artmakta ve ortaya çıkan deplasmanlar azalmaktadır. Burada kayda değer olan kısım, yapının büyük yer değiştirme analizlerinin oldukça hassas bir şekilde yapılabilmesidir. CNTH yapılar ileri malzemelerin kullanıldığı ancak geleneksel malzemelere göre daha maliyetli malzemelerin kullanıldığı yapılar olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle kullanıldığı alanlarda uygun CNT oranıyla tasarlanmaları ve analizlerin yüksek hassasiyetle yapılması önemli birer husustur.



Şekil 8. $V_{cnt}=0.8$ ve $V_{fib}=0$ oranları için u: yatay yer değiştirme, w: düşey yer değiştirme, ϕ : dönme, N: normal kuvvet, T: kesme kuvveti ve M: moment grafikleri.

Figure 8. u: horizontal displacement, w: vertical displacement, ϕ : rotation, N: normal force, T: shear force and M: moment graphs for $V_{cnt}=0.8$ ve $V_{fib}=0$ ratios.

CNTH kirişin $V_{cnt}=0.3$ oranı ve farklı fiber oranları[%] için kullanıldığında büyük yer değiştirme analizi sonucunda ortaya çıkan deformasyonlar Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 9. CNTH kirişte farklı fiber oranları için büyük yer değiştirme analizi sonucunda ortaya çıkan deformasyonlar.

Figure 9. Deformations resulting from large displacement analysis for different fiber ratios in the CNTH beam.

Kirişin serbest ucunda ölçülen u yatay ve w düşey yer değiştirme değerleri, değişen fiber oranına göre Tablo 3'te görülmektedir ($V_{cnt}=0.3$). Değişen fiber oranlarına göre CNTH kirişin mekanik davranışı kayda değer bir şekilde

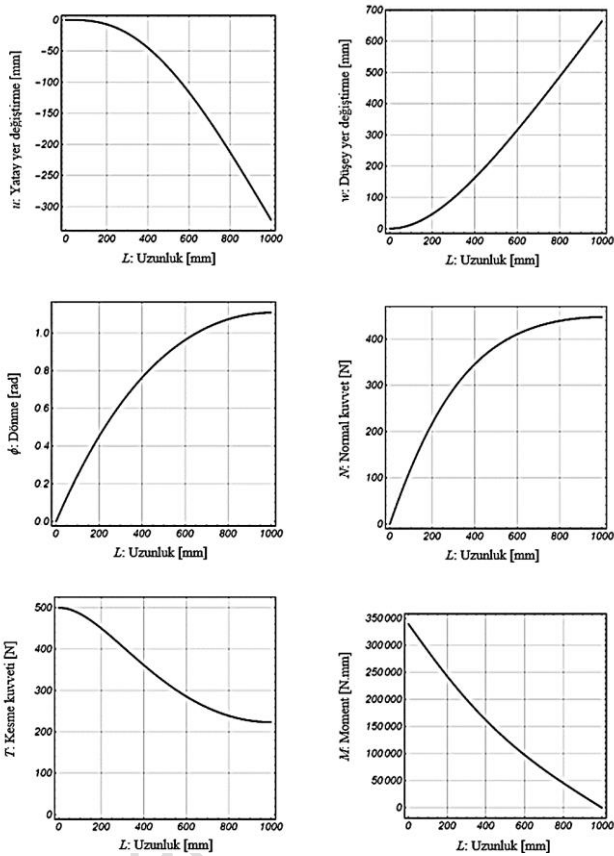
değişmemektedir. Ancak takviye malzemesi olarak kullanılan fiberlerin önemli birer yapı elamanı olduğu bilinmektedir. Bu nedenle CNTH kiriş tasarımında fiber oranının uygun bir aralıkta kullanılması gerekmektedir.

Tablo 3. CNTH kirişte değişen fiber oranına göre u ve w uç yer değiştirme değerleri ($V_{cnt}=0.3$).

Table 3. u and w tip displacement values according to the changing fiber ratio in the CNTH beam ($V_{cnt}=0.3$).

V_{fib} [%]	u [mm]	w [mm]
0	-298.45	644.41
0.2	-303.93	649.16
0.8	-321.18	663.69

CNTH kirişin $V_{cnt}=0.3$, $V_{fib}=0.8$ oranları kullanıldığında büyük yer değiştirme analizi sonucunda ortaya çıkan deplasmanlar ve iç kuvvetler Şekil 10'da görülmektedir. CNTH kirişin büyük yer değiştirme analiz sonuçlarından, deplasmanlar ve iç kuvvetlerin yapının deformasyon formuyla uyumlu bir şekilde olduğu görülmektedir.



Şekil 10. CNTH kirişte meydana gelen $V_{cnt}=0.3$ ve $V_{fib}=0.8$ oranları için u: yatay yer değiştirme, w: düşey yer değiştirme, ϕ : dönme, N: normal kuvvet, T: kesme kuvveti ve M: moment grafikleri.

Figure 10. u: horizontal displacement, w: vertical displacement, ϕ : rotation, N: normal force, T: shear force and M: moment graphs for $V_{cnt}=0.3$ ve $V_{fib}=0.8$ ratios.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, CNTH kirişlerin büyük yer değiştirme davranışları birinci mertebe kayma deformasyon teorisi göz önüne alınarak oluşturulan sonlu eleman formülasyonu ile elde edilmektedir. Elde edilen sonuçları aşağıdaki şekilde not edebiliriz;

- Elde edilen formülasyonun CNTH kirişlere uygulanması sayesinde CNTH kirişin büyük yer değiştirme analizi yüksek hassasiyetle yapılmaktadır. Kullanılan kiriş kinematığı, malzeme modeli, sınır koşulu terimleri ve sonlu eleman parametrelerinin seçimi CNTH kirişlerin büyük yer değiştirme analizlerinin başarılı bir şekilde yapılmasını sağlamaktadır.
- Çubukların büyük yer değiştirme analizi için deplasman değerlerinin yanında aynı zamanda normal kuvvet, kesme kuvveti ve moment büyüklükleri de düğüm noktası bilinmeyenleri olarak elde edilmesi sonlu eleman analizleri bakımından önemli bir sonuçtur. Bu sayede herhangi bir ek işleme gerek kalmadan iç kuvvetler ve deplasmanlar pratik bir şekilde elde edilmektedir.
- Çubuklardaki CNT oranı arttıkça çubuğun rijitliğinin artmasına paralel olarak elde edilen yer değiştirmeler azalmaktadır. Kirişin elektriksel, ısısal vb. mekanik özellikleri iyileştirmek amaçlanırken kirişin rijitliğinin de kayda değer bir oranda arttığı görülmektedir.
- Kullanılan fiber oranının artması çubuğun eğilme davranışına CNT malzemeye oranla daha az katkı sunmaktadır. Ancak fiberler kiriş tasarımında özellikle CNT elemanların matris içerisinde bağlanmalarına yardımcı olmaları sebebiyle oldukça önemli yapılardır. Bu durum CNTH kirişlerin tasarımında fiber oranı belirlenirken fiberlerin kirişin rijitliğine olan etkisinin göz önüne alınması gerektiğini göstermektedir.
- Yüksek CNT oranları, kirişin hem yatay hem de düşey deformasyonlarını sınırlandırmaktadır. Malzemede, özellikle düşey deformasyona duyarlı uygulamalarda CNT oranının uygun bir oranda ayarlanması büyük avantajlar sağlayabilir. Ancak yüksek CNT oranları, tasarım ve maliyet açısından tercih edilmeyebilir.

CNTH yapılar geleneksel malzemelere göre daha maliyetli malzemelerin kullanıldığı yapılardır. Bu nedenle kullanıldığı alanlarda uygun CNT oranıyla tasarlanmaları ve analizlerin yüksek hassasiyetle yapılması önemli hususlardır. Bu çalışmada elde edilen fonksiyonel karbon nanotüp ile güçlendirilmiş metal matrisli kompozit kirişlerin geometrik doğrusal olmayan analizlerinin hassas bir şekilde yapılabilmesine katkı sağlamaktadır. Çalışma, CNT mikro parametrelerinden başlayarak CNTH kirişin makro düzeyde analizlerinin sunulduğu bir formattadır. Bu yönüyle birçok farklı disiplini ilgilendiren veriler içermektedir. Bu sayede uzay, havacılık, makine, inşaat, denizcilik, biomekanik, robotik ve tıp alanlarında kullanım alanı bulan CNTH yapıların etkili bir şekilde analizlerinin gerçekleştirilmesi mümkün olmaktadır.

5 Conclusions

In this study, the large displacement behaviors of CNTH beams are obtained with the finite element formulation generated by considering the first order shear deformation theory. We can note the obtained results as follows;

- Thanks to the application of the obtained formulation to CNTH beams, the large displacement analysis of the CNTH beam is performed with high precision. The selection of the beam kinematics, material model, boundary condition terms and finite element

parameters used ensure that the large displacement analyses of CNTH beams are performed successfully.

- In addition to the displacement values for the large displacement analysis of the beams, the fact that the normal force, shear force and moment values are also obtained as nodal unknowns is a significant result in terms of finite element analyses. In this way, internal forces and displacements are obtained in a practical way without the need for any additional processing.
- As the CNT ratio in the beams increases, the displacements obtained decrease in parallel with the increase in the rigidity of the beams. While it is aimed to improve the electrical, thermal etc. mechanical properties of the beam, it is observed that the rigidity of the beam also increases significantly.
- The increase in the fiber ratio used contributes less to the bending behavior of the beams compared to the CNT material. However, fibers are very important structures in beam design, especially because they help the CNT elements to connect within the matrix. This situation shows that the effect of fibers on the rigidity of the beam should be taken into consideration when determining the fiber ratio in the design of CNTH beams.
- High CNT ratios limit both horizontal and vertical deformations of the beam. Adjusting the CNT ratio at an appropriate rate in the material, especially in applications precise to vertical deformation, can provide great advantages. However, high CNT ratios may not be preferred in terms of design and cost.

CNTH structures are structures where costly materials are used compared to traditional materials. For this reason, it is important to design them with an appropriate CNT ratio in the areas where they are used and to perform the analyzes with high precision. This study contributes to the precise nonlinear geometric analyses of the functional carbon nanotube reinforced metal matrix composite beams obtained. The study is in a format where the macro level analyzes of the CNTH beam are presented, starting from the CNT micro parameters. In this respect, it contains data that concerns many different disciplines. In this way, it is possible to effectively analyze CNTH structures, which can be used in the fields of space and aviation, machinery, construction, maritime, biomechanics, robotics and medicine.

6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Yazar fikrin oluşması, tasarımın yapılması ve literatür taraması başlıklarında; elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, kullanılan malzemelerin temin edilmesi ve sonuçların incelenmesi başlıklarında; yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmaktadır.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur."
"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır."

8 Kaynaklar

[1] Iijima S. "Helical microtubules of graphitic carbon". *Nature*, 354, 56-58, 1991.

- [2] Iijima S, Ichihashi T. "Single shell carbon nanotubes of 1-nm diameter" *Nature*, 363, 603, 1993.
- [3] Cadek M, Coleman J.N, Barron V, Hedicke K, Blau W.J. "Reinforcement of polymers with carbon nanotubes: The role of nanotube surface area". *Nano Letters*, 4(2), 353-356, 2004.
- [4] Salvétat J.P, Briggs G.A.D, Bonard J.M, Bacsá R.R, Kulik A.J, Stockli T, Burnham N.A, Forro L. "Elastic and shear moduli of single-walled carbon nanotube ropes". *Physical Review Letters*, 82(5), 944, 1999.
- [5] Odegard G.M., Gates T.S., Wise K.E., Park C. "Constitutive modeling of nanotube-reinforced polymer composites". *Composites Science and Technology*, 63(11), 1671-1687, 2003.
- [6] Coleman J.N., Khan U., Blau W.J, Gun'ko Y.K. "Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites". *Carbon*, 44(9), 1624-1652, 2006.
- [7] Ajayan P.M., Tour J.M. "Nanotube composites". *Nature*, 447(7148), 1066-1068, 2007.
- [8] Yu M.F., Files B.S, Arepalli S, Ruoff R.S. "Tensile loading of ropes of single wall carbon nanotubes and their mechanical properties". *Physical Review Letters*, 84(24), 5552-5555, 2000.
- [9] Moniruzzaman M, Winey K.I. "Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes", *Macromolecules*, 39(16), 5194-5205, 2006.
- [10] Bishopp K.E, Drucker D.C. "Large deflection of cantilever beams", *Quarterly of Applied Mathematics*, 3(3), 272-275, 1945.
- [11] Reissner E. "On one-dimensional finite-strain beam theory: The plane problem", *Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP)*, 23(5), 795-804, 1972.
- [12] Reissner E. "On finite deformations of space-curved beams", *Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP)*, 32(6), 734-744, 1981.
- [13] Pagni A, Carrera E. "Large-deflection and post-buckling analyses of laminated composite beams by Carrera Unified Formulation". *Composite Structures*, 170, 40-52, 2017.
- [14] Savoia M, Tullini N. "Beam theory for strongly orthotropic materials", *International Journal of Solids and Structures*, 33(17), 2459-2484, 1996.
- [15] Khdeir A.A., Reddy J.N. "An exact solution for the bending of thin and thick cross-ply laminated beams". *Composite Structures*, 37(2), 195-203, 1997.
- [16] Hajianmaleki M, Qatu M.S. "Static and vibration analyses of thick, generally laminated deep curved beams with different boundary conditions", *Composites: Part B*, 43(4), 1767-1775, 2012.
- [17] Vo T.P, Thai H.T. "Static behavior of composite beams using various refined shear deformation theories". *Composite Structures*, 94(8), 2513-2522, 2012.
- [18] Minguet P, Dugundji J. "Experiments and Analysis for Composite Blades Under Large Deflections Part I: Static Behavior", *AIAA Journal*, 28(9), 1573-1579, 1990.
- [19] Ghazavi A, Gordaninejad F. "Nonlinear bending of thick beams laminated from bimodular composite materials", *Composites Science and Technology*, 36, 289-298, 1989.
- [20] Pai P.F, Nayfeh A.H. "A nonlinear composite beam theory", *Nonlinear Dynamics*, 3, 273-303, 1992.
- [21] Emam S.A. "Analysis of shear-deformable composite beams in postbuckling". *Composite Structures*, 94(1), 24-30, 2011.

- [22] Baghani M, Jafari-talookolaei R.A, Salarieh H. "Large amplitudes free vibrations and post-buckling analysis of unsymmetrically laminated composite beams on nonlinear elastic foundation". *Applied Mathematical Modelling*, 35(1), 130–138, 2011.
- [23] Mareishi S, Rafiee M, He X.Q, Liew K.M. "Nonlinear free vibration, postbuckling and nonlinear static deflection of piezoelectric fiber-reinforced laminated composite beams", *Composites : Part B*, 59, 123–132, 2014.
- [24] Kumar R, Kumar A, Kumar DR. "Buckling response of CNT based hybrid FG plates using finite element method and machine learning method", *Composite Structures*, 319, 117204, 2023.
- [25] Zhu P, Lei Z.X, Liew K.M. "Static and free vibration analyses of carbon nanotube-reinforced composite plates using finite element method with first order shear deformation plate theory", *Composite Structures*, 94 1450–1460, 2012.
- [26] Zhang L.W, Liew K.M. "Large deflection analysis of FG-CNT reinforced composite skew plates resting on Pasternak foundations using an element-free approach", *Composite Structures*, 132, 974–983, 2015.
- [27] Chen W, Tao X, Liu Y. "Carbon nanotube-reinforced polyurethane composite fibers", *Composites Science and Technology*, 66, 3029–3034, 2006.
- [28] Vo-Duy T, Ho-Huu V, Nguyen-Thoi T. "Free vibration analysis of laminated FG-CNT reinforced composite beams using finite element method", *Front. Struct. Civ. Eng.*, 13(2): 324–336, 2019.
- [29] Taheri M.H, Memarzadeh P. "Effect of crack on shear buckling of CNTRC plates", *International Journal of Mechanical Sciences*, 229 107519, 2022.
- [30] Talebizadehsardari P, Eyvazian A, Asmael M, Karami B, Shahsavari D, Mahani R.B. "Static bending analysis of functionally graded polymer composite curved beams reinforced with carbon nanotubes", *Thin-Walled Structures*, 157, 107139, 2020.
- [31] Güler S.H, Güler Ö. "Karbon nanotüp katkılanmış tio2'in elektriksel ve optik özellikleri", *Pamukkale Üniversitesi Muhendislik Bilimleri Dergisi*, 23(7), 870-873, 2017.
- [32] Yılmaz Y, Çalhoğlu H, Balbay A. "Karbon nanotüp ile güçlendirilmiş cam fiber/epoksi ve karbon fiber/epoksi kompozit borusal yapıların yarı-statik ezilme ve enerji emilimi davranışlarının incelenmesi", *Pamukkale Üniversitesi Muhendislik Bilimleri Dergisi*, 28(1), 81-90, 2022.
- [33] Halpin J.C, Kardos J.L. "The Halpin-Tsai Equations A Review", *Polymer Engineering And Science*, 16(5), 344-352, 1976.
- [34] Oden J.D, Reddy J.N. *Variational methods in theoretical mechanics*, Springer, Berlin, 1976.
- [35] Bathe K-J. *Finite Element Procedures*. Prentice-Hall, Inc., 1996.