



KARBON NANOTÜPLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ (KNGFD) KİRİŞLERİN STATİK ANALİZİ

Mesut Şimşek¹, Sarp Adalı² ve Sinan Eraslan³

^{1,3} Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

² Kwazulu-Natal Üniversitesi, Durban, Güney Afrika Cumhuriyeti

ABSTRACT

In this study, the static behavior of a functionally graded (FG) carbon nanotube reinforced beams having various boundary conditions are investigated using Timoshenko and Euler-Bernoulli beam theories. The considered beams have the uniform, X, O and V distribution of carbon nanotube. The material properties vary in the thickness direction according to the classical rule of the mixture. The static analysis of the beam under uniformly distributed load is performed via Ritz method. In this study, the effects of various types of carbon nanotube distributions, the volume fraction and boundary on the deflection and axial normal stress are examined.

ÖZET

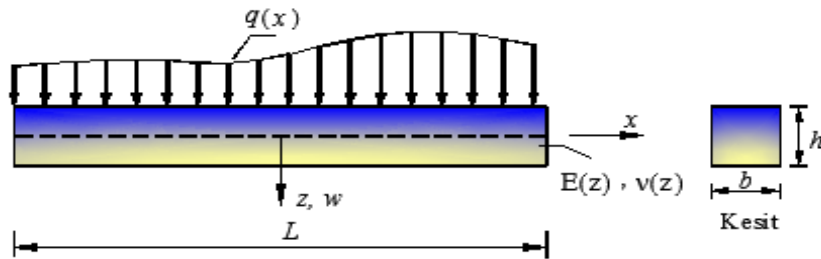
Bu çalışmada farklı sınır şartlarına sahip, karbon nanotüplerle (KN) güçlendirilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) kirişlerin statik davranışı Timoshenko ve Euler-Bernoulli kiriş teorilerine göre incelenmiştir. Çalışmada ele alınan kirişin FD tipi literatürde de yer alan düzgün dağılım, X dağılımı, O dağılımı ve V dağılımı olarak dört farklı şekilde seçilmiştir. Kirişin malzeme özellikleri kalınlık boyunca klasik karışım kurallarına göre değişmektedir. Düzgün yayılı yük etkisindeki kirişin statik analizi, toplam potansiyel enerjinin denge halinde minimum olması prensibinden hareketle direkt varyasyon yöntemlerinden olan Ritz yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada, karbon nanotüplerin farklı dağılımları ve hacim oranları ile mesnet koşullarının yer değiştirmeler ve gerilmeler üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

GİRİŞ

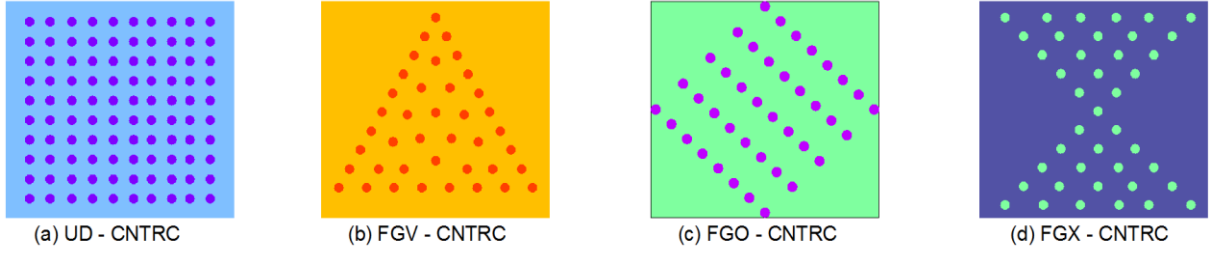
1991 yılında Japon fizikçi Sumio Iijima'nın keşfinden sonra KN'ler farklı alanlardan birçok bilim insanının hemen dikkatini çekmiştir. Basitçe karbon atomlarının bal peteği örgülü yapılarla oluşturduğu ve grafen adı verilen bir tabakanın silindir formu almasıyla oluşurlar. KN'ler göze çarpan mekanik, kimyasal, elektronik ve termal özellikleri sayesinde yüksek mukavemet, yüksek iletkenlik, sertlik ve düşük malzeme yoğunluğuna sahiptirler. Bahsi edilen özellikleri sayesinde bu gelişmiş malzeme kompozit elemanlar için mükemmel bir bileşen adayı olmuştur [1]. Bu çalışmada da sahip oldukları yüksek mukavemet sayesinde KN'ler güçlendirici bileşen olarak kullanılmıştır. KN'ler genellikle 0,4 ile 100 nm arasında bir çapa ve 1 mikrometreden santimetre mertebesinde boy uzunluğuna sahiptirler [2]. KN'lerin tek bir grafen tabakanın silindir forma sokulmasıyla elde edilen tek duvarlı karbon nanotüpler (TDKN) ve aralarında belirli mesafe bulunan aynı merkezli birden fazla nanotüpün iç içe geçmesiyle oluşturulan çok duvarlı karbon nanotüpler (ÇDKN) olarak en genel iki türevi vardır. Deneysel çalışmalar neticesinde TDKN'lerin Young Modüllerinin 1,5 TPa ve

ÇDKN'lerin ise 1,3 TPa olduğu görülmüştür [2]. Bu haliyle konvansiyonel yüksek mukavemetli çelikten üç kata kadar daha dayanıklıdır. Fakat bu malzeme henüz çelik gibi üretilmemekte ve saf şekilde kullanılamamaktadır. Bu denli yüksek mukavemetli KN'lerin yoğunlukları ise sadece 1,3 ile 2 g/cm³ civarındadır. Bu değer de yün ve pamuğun yoğunluk değerlerine yakındır. Kompozit malzemelerdeki KN bileşeni toplam ağırlığın %2-5 gibi küçük miktarlarda bulunmasına rağmen malzeme özelliklerini büyük ölçüde geliştirmektedir [1]. KN'ler yapı alanındaki kompozit malzemelerde kirişler, plaklar, kabuklar ve kablolar gibi elemanlarda uygulama alanı bulmuştur. Şu an için endüstriyel boyutta uygulamaları sınırlıdır ve büyük çaplı endüstriyel uygulamalar için zamana ihtiyaç vardır. Bu anlamda da özellikle kimya alanında çalışmalar yapılmaktadır. Bu konuda geleceğe dair uygulama planları çok önemli kazanımlar, iyileştirmeler ve yeni ufuklar vadetmektedir [3]. KN'lerin daha büyük boyutlarda üretilmesi ile mümkün olabileceği düşünülen birçok fikir vardır. KN'ler; mikroelektronik ve nano elektronik, yüksek iletkenlik özelliği ile kuantum kablolar, kapilarite gibi deneylerin mekaniğinin incelenmesinde nano test tüpleri, elektronik cihazlar için nano kalıplar, enerji üretmek amacıyla kullanılan hidrojenin depolanması için yapısal elemanlarda, bilgisayar, roketler ve motorlar için termal korumalarda, tıp alanında teşhis ve tedavide yardımcı araç-gereçte, yapı alanında kirişler, plaklar, kabuklar ve kablolar gibi elemanlarda uygulama alanı bulmuştur. Bunlardan başka KN'ler ile güçlendirilmiş plastik kompozitler mükemmel mekanik özelliklere, aşınmaya karşı dirence ve radyo dalgalarına karşı koruma kapasitesine sahip olabilmekte, çimento fazındaki KN'ler ile oluşturulan kompozit malzemeler yüksek stabilite ve çevre dostu olmalarının yanı sıra iyi bir çarpma mukavemetine de sahip olurlar [4].

KN'ler ile güçlendirilmiş kompozit malzemelerden oluşan yapıların modellenmesinde KN'lerin daha etkili kullanılabilmesi için fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme fikri kullanılmaktadır [1]. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM), kesit veya malzeme özelliklerinin hacim üzerinde düzgünce ve sürekli bir şekilde değiştiği homojen olmayan kompozit malzemelerdir. Buradaki çalışmada kesit sabit dikdörtgen kesittir, yalnızca malzeme özellikleri belirli bir şekilde kesit boyunca değişmektedir. Bu anlamda FDM'de Young modülü, kayma modülü, kütle yoğunluğu, Poisson oranı gibi malzeme özellikleri istenilen bir doğrultuda belli bir fonksiyona bağlı olarak değişmektedir (Şekil 1). Litaretürde karbon nanotüpler kesitte dört farklı biçimde bulunur [1] (Şekil 2).



Şekil 1. Fonksiyonel derecelendirilmiş bir kiriş



Şekil 2. KN'lerin fonksiyonel derecelendirilme tipleri

TEORİ ve FORMÜLASYON

KN'ler, kompozit malzemenin güçlendirici bileşenidir. Oluşan yeni kompozit malzemenin özellikleri ki buna efektif malzeme özellikleri denir ve klasik karışım kuralı yöntemi ile aşağıdaki gibi tayin edilmiştir [5]. Efektif özelliği belirleyen başlıca iki etken güçlendirici ve matris fazının özellikleridir.

$$E_{11} = \eta_1 V_{cnt} E_{11}^{cnt} + V_m E^m$$

$$\frac{\eta_2}{E_{22}} = \frac{V_{cnt}}{E_{22}^{cnt}} + \frac{V_m}{E^m}$$

$$\frac{\eta_3}{G_{12}} = \frac{V_{cnt}}{G_{12}^{cnt}} + \frac{V_m}{G^m}$$

E_{11} : Eksenel Doğrultuda Young Modülü
 E_{22} : Eksene Dik Doğrultuda Young Modülü
 G_{12} : Kayma Modülü
 $E_{11}^{cnt}, E_{22}^{cnt}, G_{12}^{cnt}$: KN'lerin Young ve Kayma Modülü
 E^m, G^m : Matris Fazının Young ve Kayma Modülü
 η_i : Etki Katsayısı
 V_{cnt}, V_m : KN'lerin ve Matrisin Hacim Yüzdesi

Her bir fonksiyonel dağılım için hacim yüzdeleri aşağıdaki gibi verilmektedir. Bu aşamada dağılım tipine göre bulunan KN hacim yüzdesine göre de yukarıdaki ifadelerden efektif malzeme özellikleri bulunur [5].

$$UD : V_{cnt} = V_{cnt}^*$$

$$FGV : V_{cnt} = \left(1 - \frac{2z}{h}\right) V_{cnt}^*$$

$$FGO : V_{cnt} = 2 \left(1 - \frac{2|z|}{h}\right) V_{cnt}^*$$

$$FGX : V_{cnt} = \frac{4|z|}{h} V_{cnt}^*$$

$$V_{cnt}^* = \frac{\Lambda_{cnt}}{\Lambda_{cnt} + \left(\frac{\rho_{cnt}}{\rho_m}\right) - \left(\frac{\rho_{cnt}}{\rho_m}\right) \Lambda_{cnt}}$$

Λ_{cnt} : KN'lerin Kütleli Yüzdesi
 ρ_{cnt}, ρ_m : KN ve Matris Yoğunluğu

Yukarıda ifade edilen η_i etki katsayıları karışım yüzdesine göre deneylerle belirlenmiştir. Sayısal işlemlerde de bu değerler aşağıdaki gibi alınmıştır [5].

$$V_{cnt}^* = 0.12 ; \eta_1 = 1.2833 \quad \eta_2 = \eta_3 = 1.0556$$

$$V_{cnt}^* = 0.17 ; \eta_1 = 1.3414 \quad \eta_2 = \eta_3 = 1.7101$$

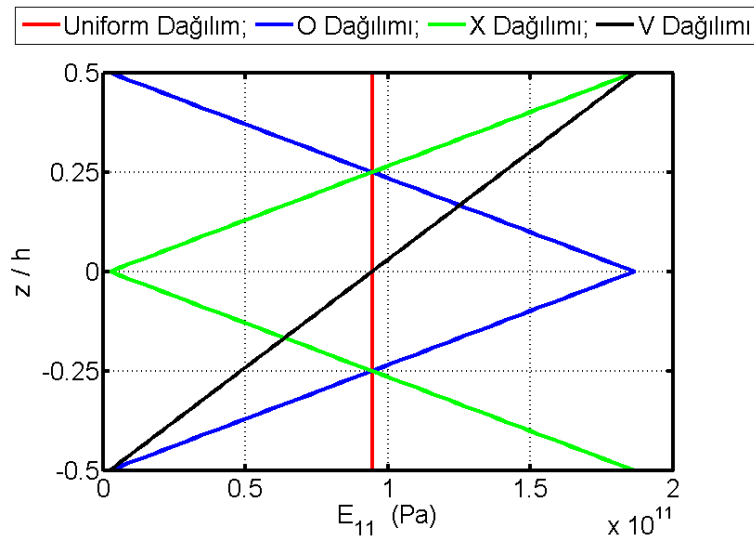
$$V_{cnt}^* = 0.28 ; \eta_1 = 1.3238 \quad \eta_2 = \eta_3 = 1.7380$$

$$V_{cnt} + V_m = 1$$

Klasik karışım kuralı gereğince kompozit malzemenin etkili (efektif) Poisson oranı ve etkili (efektif) birim hacim kütlesi de aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\nu = V_{cnt}\nu^{cnt} + V_m\nu^m \quad , \quad \rho = V_{cnt}\rho^{cnt} + V_m\rho^m$$

Yukarıda verildiği gibi klasik karışım kuralına göre malzemenin elastisite modülünün kesit üzerindeki değişimi şekilde gösterildiği gibi olmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Elastisite modülünün kalınlık boyunca değişimi

Euler-Bernoulli Kiriş Teorisine (EBKT) Göre Enerji İfadesi

Klasik kiriş teorisi olarak da bilinen Euler-Bernoulli kiriş teorisinde, düzlem ve elastik eğriye dik kesitler eğilmeden sonra da düzlem ve elastik eğriye dik kalırlar kabulü neticesinde kayma şekil değiştirmeleri ihmal edilir. Bu kabule göre, EBKT'de yer değiştirme bileşenleri ve bu bileşenlere göre şekil değiştirme bileşenleri aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$u_x(x, z) = u_0(x) - z \frac{\partial w_0(x)}{\partial x}, \quad u_y(x, y, z) = 0, \quad u_z(x) = w_0(x)$$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}$$

Toplam potansiyel enerji; iç kuvvetlerin doğurduğu şekil değiştirme enerjisi ile dış kuvvetlerin potansiyel enerjisinin toplamına eşittir.

$$\Pi = U_i + U_d$$

İç kuvvetlerin potansiyel enerjisi, enerji yoğunluğu adı verilen ifadenin hacim üzerinde integrali alınarak bulunur.

$$U_i = \frac{1}{2} \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV$$

Bu ifade EBKT'e göre yalnızca aksenal şekil değiştirme olduğundan, Hooke kanunu yardımıyla aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$U_i = \frac{1}{2} \int_V \sigma_{xx} \varepsilon_{xx} dV \Rightarrow U_i = \frac{1}{2} \int_V E_{11} \varepsilon_{xx}^2 dV$$

ε_{xx} şekil değiştirmesi, yer değiştirmeler cinsinden yerine yazılarak enerji ifadesi yer değiştirmeler cinsinden ifade edilebilir.

$$U_i = \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{L/2} A_{xx} \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{L/2} D_{xx} \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \right)^2 dx - \int_{-L/2}^{L/2} B_{xx} \frac{\partial u_0}{\partial x} \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} dx$$

$$(A_{xx}, B_{xx}, D_{xx}) = \int_A E_{11} (1, z, z^2) dA$$

Burada, A_{xx} , B_{xx} ve D_{xx} sırasıyla, aksenal uzama rijitliğini, girişim rijitliği ve eğilme rijitliğini belirtmektedir. Dış kuvvetlerin potansiyeli ise aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$U_d = - \int_{-L/2}^{L/2} Q w(x) dx$$

Timoshenko Kiriş Teorisine (TKT) Göre Enerji İfadesi

Timoshenko kiriş teorisinde, düzlem ve elastik eğriye dik kesitler eğilmeden sonra düzlem kalırlar fakat elastik eğriye dik kalmazlar kabulü neticesinde kayma şekil değiştirmeleri analizlere katılmış olur. Bu kabul e göre, TKT'de yer değiştirme bileşenleri ve bu bileşenlere göre şekil değiştirme bileşenleri aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$u_x(x, z) = u_0(x) - z\varphi(x), \quad u_y(x, y, z) = 0, \quad u_z(x) = w_0(x)$$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial \varphi(x)}{\partial x}, \quad \gamma_{xz} = -\varphi(x) + \frac{\partial w_0(x)}{\partial x}$$

TKT'e göre kayma şekil değiştirmeleri dikkate alındığından iç kuvvetlerin enerjisi aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$U_i = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \tau_{xz} \gamma_{xz}) dV \Rightarrow U_i = \frac{1}{2} \int_V E_{11} \varepsilon_{xx}^2 dV + \frac{1}{2} \int_V k_s G_{12} \gamma_{xz}^2 dV$$

Burada, k_s kayma şekil değiştirmeleri için geometriye bağlı sabit bir düzeltme katsayısıdır. Bazı matematiksel işlemlerden sonra şekil değiştirme enerjisi izleyen şekilde ifade edilebilir;

$$U_i = \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{L/2} A_{xx} \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{L/2} D_{xx} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 dx - \int_{-L/2}^{L/2} B_{xx} \frac{\partial u_0}{\partial x} \frac{\partial \varphi}{\partial x} dx$$

$$+ \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{L/2} k_s A_{xz} \left[(\varphi)^2 + \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} \right)^2 - \varphi \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} \right) \right] dx$$

$$(A_{xx}, B_{xx}, D_{xx}) = \int_A E_{11} (1, z, z^2) dA \text{ ve } A_{xz} = \int_A G_{12} dA$$

TKT'ndeki farklılık, kayma etkileri göz önüne alındığı için ortaya çıkan A_{xz} kayma rijitliği ve dönme fonksiyonunun çökmeye bağlı olmamasıdır. Dış kuvvetlerin potansiyeli iki kiriş teorisi içinde aynıdır.

ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Ritz metodunda bilinmeyen fonksiyonlar için bazı ifadeler seçilir. Dikkat edilmesi gereken nokta seçilen ifadelerin geometrik sınır şartlarını sağlaması gerektiğidir. Bu çalışmada bilinmeyen fonksiyonlar için N terimli polinom ifadeler seçilmiştir. $u_0(x)$ aksenal uzama, $w_0(x)$ düşey deplasman ve $\varphi(x)$ dönme fonksiyonları için, koordinat eksenleri kirişin orta noktasından geçtiği bir sistemde ifadeler aşağıdaki gibi seçilmektedir.

$$w_0(x) = A_m \phi_{mw}(x) \Rightarrow \phi_{mw}(x) = \left(x + \frac{L}{2}\right)^{pw} \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^{qw} x^{m-1}$$

$$u_0(x) = B_m \phi_{mu}(x) \Rightarrow \phi_{mu}(x) = \left(x + \frac{L}{2}\right)^{pu} \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^{qu} x^{m-1}$$

$$\varphi(x) = C_m \phi_{m\varphi}(x) \Rightarrow \phi_{m\varphi}(x) = \left(x + \frac{L}{2}\right)^{p\varphi} \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^{q\varphi} x^{m-1}$$

Ritz yönteminde seçilen fonksiyonların kesin tayini için A_m , B_m ve C_m katsayıları bulunmalıdır. Toplam potansiyel enerjinin minimum olması ilkesi direkt olarak denge konumunu verir. Buna göre, toplam potansiyel enerji ifadesinin seçilen fonksiyonların bilinmeyen katsayılarına göre türevleri sıfıra eşit olmalıdır. Bu üç şart ile denge denklem takımı elde edilir. Bu durumda

$$\frac{\partial \Pi}{\partial A_k} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial B_k} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial C_k} = 0$$

olmaktadır. EBKT'e göre ise dönme fonksiyonu olmayacağından yalnızca ilk iki ifade ile denge denklem takımı kurulmaktadır. TKT için denge denklem takımı matris formda aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\begin{bmatrix} [K_1] & [0] & [K_3] \\ [0] & [K_5] & [K_6] \\ [K_7] & [K_8] & [K_9] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{B\} \\ \{C\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{0\} \\ \{0\} \end{Bmatrix}$$


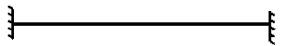
Burada $[K_i]_{N \times N}$ rijitlik matrisleri, $\{F\}$ yük vektörüdür. Bu denklem takımı kolayca çözülerek bilinmeyen katsayılar bulunur.

SAYISAL SONUÇLAR

Sayısal işlemler için malzeme ve geometrik özellikler aşağıda verilmiştir. Burada, KN'lerin ve matris fazı olarak akrilik cam olarak da bilinen bir polimer malzemenin elastik sabitleri, Poisson oranları, birim hacim kütleleri, karışımdaki KN oranı yüzdeleri, narinlik oranları, Ritz fonksiyonlarında seçilen terim sayısı ve sabit dikdörtgen kesit için düzeltme katsayısı

görülmektedir. Tablo 1’de ise kirişin iki ucu ankastre veya basit mesnet olması durumları için seçilen üs parametrelerinin değerleri görülmektedir.

Çizelge 1. Farklı sınır şartları için fonksiyon üsleri

Sınır koşulları	Sol uç fonksiyon üsleri	Sağ uç fonksiyon üsleri
	$pw = 1, pu = 1, p\phi = 0$	$qw = 1, qu = 0, q\phi = 0$
	$pw = 1, pu = 1, p\phi = 1$	$qw = 1, qu = 1, q\phi = 1$

$$E_{11}^{cnt} = 600 \text{ GPa}$$

$$E_{22}^{cnt} = 10 \text{ GPa}$$

$$G_{12}^{cnt} = 17.2 \text{ GPa}$$

$$\rho^{cnt} = 1400 \text{ kg/m}^3$$

$$\nu^{cnt} = 0.19$$

$$E^m = 2.5 \text{ GPa}$$

$$\rho^m = 1190 \text{ kg/m}^3$$

$$\nu^m = 0.3$$

$$V_{cnt} = 0.12$$

$$V_{cnt} = 0.17$$

$$V_{cnt} = 0.28$$

$$\frac{L}{h} = 5, \quad \frac{L}{h} = 12$$

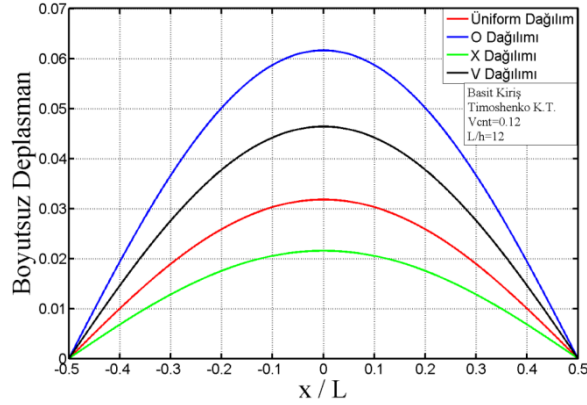
$$N = 12, \quad ks = 5/6$$

Sayısal sonuçlar daha genel olması için boyutsuz olarak verilmiştir. Çökme ve gerilmeler için aşağıdaki boyutsuz ifadeler tanımlanmıştır;

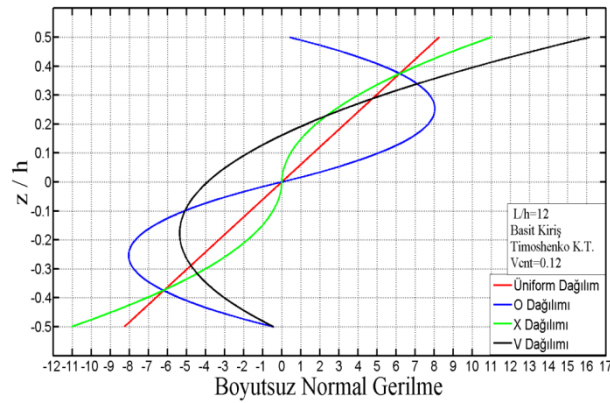
$$\bar{w} = 100w \frac{E_m I}{QL^4}, \quad \bar{\sigma}_{xx} = \sigma_{xx} \frac{A}{QL}$$

Fonksiyonel Derecelendirme Şablonlarının Çökme ve Gerilmelere Etkisi

Şekil 4 ve 5’de basit kirişte meydana gelen çökmelerin ve gerilmelerin KN’lerin kesitteki dağılımlarına göre değişimi çizilmiştir. Deplasman grafiğinden, en iyi dağılım tipinin X dağılımı olduğu görülmektedir. Bu dağılımda kirişteki deplasmanlar en azdır. Gerilme grafiğinde ise üniform dağılım şeklinin kesitte lineer bir gerilme dağılımı, diğer KN dağılımlarının ise nonlineer bir gerilme dağılımı sergilediği görülebilir. Bunun yanı sıra V dağılımı dışındaki tüm dağılımların kesitte simetrik olması nedeniyle tarafsız eksen ile geometrik simetri ekseninin çakıştığı görülmektedir. Ortaya çıkan maksimum gerilme değerlerine bakınca, kirişte minimum gerilmenin ise üniform dağılımda olduğu görülebilir.

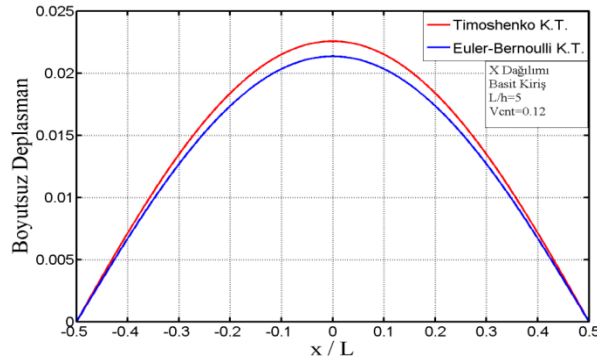


Şekil 4. Farklı dağılım tiplerinin çökmeye etkisi

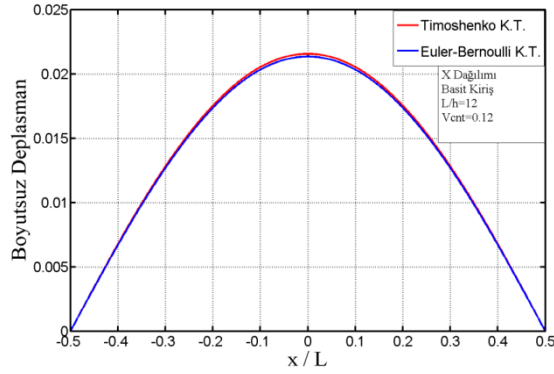


Şekil 5. Farklı dağılım tiplerinin gerilmeye etkisi

Narinliğin Kiriş Teorilerine Etkisi

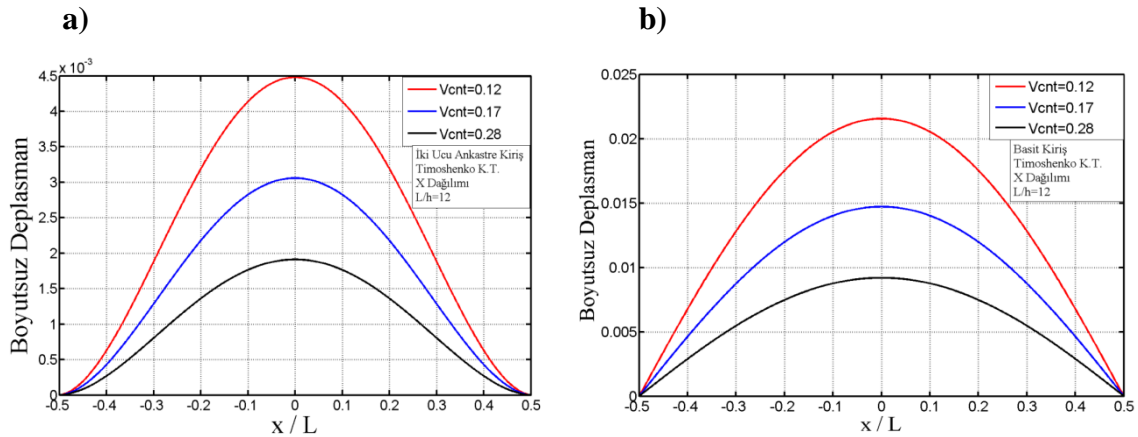
Şekil 6. Kayma şekil değiştirmesinin etkisi, $L/h = 5$

Şekil 6 ve 7'de basit kirişte farklı narinlik oranlarında meydana gelen çökmelerin kiriş teorisine göre değişimi görülmektedir. Euler-bernoulli kiriş teorisi ile Timoshenko kiriş teorisi arasındaki fark narinlik oranının küçük olduğu durumda açılmaktadır. Bunun nedeni ise Euler-Bernoulli kiriş teorisinde kayma şekil değiştirmelerinin ihmal edilmesidir. Narinlik oranının daha az olması durumunda kayma şekil değiştirmeleri artar. Timoshenko kiriş teorisinde kayma şekil değiştirmeleri ihmal edilmediği içinde iki kiriş teorisi için alınan sonuçlar arasında farklılıklar oluşabilir. Ancak narinlik oranının büyük değerleri için aradaki fark ihmal edilebilecek boyutlardadır. Çünkü narinlik oranı arttığı zaman kayma şekil değiştirmelerinin değeri azalmakta ve ihmal edilebilecek boyutlara ulaşmaktadır.

Şekil 7. Kayma şekil değiştirmesinin etkisi, $L/h=12$

Karbon Nanotüplerin Karışım Oranlarının ve Sınır Şartlarının Çökmelere Etkisi

Şekil 8’de özellikleri verilen kirişlerde meydana gelen çökmelerin, KN’lerin karışım oranına ve kirişlerin mesnetlenme şartlarına göre değişimi görülmektedir. Deplasman grafiğinden görüleceği gibi KN oranı arttıkça kirişte oluşan deplasmanlar azalmaktadır. Bunun sebebi ise güçlendirici olarak kullanılan, yüksek dayanımlı KN’lerin karışımında daha fazla bulunarak kompozit malzemenin etkili dayanım değerlerini artırmasıdır. Kirişin mesnetlenme koşullarına gelince ise basit kirişte meydana gelen deplasmanlar, iki ucu ankastre kirişte meydana gelen deplasmanlardan yaklaşık 5 kat daha fazladır.



Şekil 8. Karışım Oranlarının çökmeye etkisi, a) Ankastre kiriş, b) Basit kiriş

SONUÇLAR

Bu çalışmada farklı sınır şartlarına sahip, karbon nanotüplerle (KN) güçlendirilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) kirişlerin statik davranışı Timoshenko ve Euler-Bernoulli kiriş teorilerine göre incelenmiştir. Düzgün yayılı yük etkisindeki kirişin statik analizi, toplam potansiyel enerjinin denge halinde minimum olması prensibinden hareketle direkt varyasyon yöntemlerinden olan Ritz yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada, karbon nanotüplerin farklı dağılımları ve hacim oranları ile mesnet koşullarının yer değiştirmeler ve gerilmeler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada elde edilen başlıca bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Deplasman bakımından, en iyi dağılım tipinin X dağılımı olduğu görülmektedir. Bu dağılımda kirişteki deplasmanlar en azdır.

- Gerilme bakımından ise üniform dağılım şeklinde, kesitte lineer bir gerilme dağılımı ve minimum gerilme olduğu görülmüştür.
- KN oranı arttıkça kirişte oluşan deplasman azalmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] R. Ansari, M. Faghih Shojaei, V. Mohammadi, R. Gholami, F. Sadeghi, Nonlinear forced vibration analysis of functionally graded carbonnanotube-reinforced composite Timoshenko beams, *Composite Structures*. 113 (2014) 316–327.
- [2] K.M. Liew, Z.X. Lei, L.W. Zhang, Mechanical analysis of functionally graded carbon nanotube reinforced composites: A review, *Composite Structures*. 120 (2015) 90–97.
- [3] B.O. Küçükyıldırım, A. Akdoğan Eker, Karbon nanotüpler, sentezleme yöntemleri ve kullanım alanları, *Mühendis ve Makine*. Cilt 53, Sayı 630, s. 34-44.
- [4] D. Shi, Z. Guo, N. Bedford, *Nanomaterials and Devices*, 2015: s. 49-82.
- [5] N. Wattanasakulpong, V. Ungbhakorn, Analytical solutions for bending, buckling and vibration responses of carbon nanotube-reinforced composite beams resting on elastic foundation, *Computational Materials Science*. 71 (2013) 201–208.