

## طراحی بر اساس قابلیت اطمینان برای محور محرک نانوکامپوزیتی خودرو

ابوالفضل خلخالی\*

استادیار، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

سارا نیازعلی زاده مقدم

دانشجو، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

### چکیده

در این مقاله یک مدل عددی در نرم افزار ABAQUS برای محور محرک نانوکامپوزیتی یک خودرو باربری توسعه داده شده است. اهداف مهم در طراحی محور محرک، افزایش سرعت بحرانی به صورتی است که از دامنه سرعت عملکرد محور خارج شود، افزایش گشتاور بحرانی کمانش به منظور جلوگیری از کمانش محور در بارهای پایین و همچنین کاهش وزن آن می باشد. در این مقاله از الگوریتم بهینه سازی چند هدفی NSGAII برای تعیین نقاط بهینه طراحی بهره گرفته شده است. برای نقاط طراحی مقادیر توابع هدف محاسبه شده اند. سپس برای محاسبه رابطه ریاضی توابع هدف از شبکه عصبی GMDH استفاده شده است. در نهایت بعد از اتمام فرآیند بهینه سازی جبهه جواب های بهینه روی منحنی پارتو نمایش داده شده اند. ۶ نقطه از بین تمام نقاط به عنوان نقطه بهینه معرفی شده اند، که یکی از این نقاط از روش نزدیک ترین نقطه به نقطه ایده آل بدست آمده است.

**واژه های کلیدی:** بهینه سازی چند هدفی، نانوکامپوزیت، محور محرک خودرو، شبکه عصبی.

## Reliability based Design of Nano Composite Automotive Drive Shaft

A. Khalkhali

Department of Automotive Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

S. Niazalizadeh Moghadam

Department of Automotive Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

### Abstract

In the present paper, a nano-composite drive shaft of a heavy vehicle is modeled in ABAQUS. The main purposes in designing a drive shaft are increasing the critical speed, increasing the critical buckling torque, and decreasing its weight. In this article, the multi objective optimizing algorithm, NSGA II, is used to find the optimum design points. In the next step, the objective functions are computed in the design points, and then some mathematical equations for the objective functions are calculated using neural network GMDH. At last, the final front is extracted and the optimum points are indicated in some diagrams. A point is selected using Near to Ideal Point method (NIP) as well.

**Keywords:** Multi objective optimization, Nanocomposite, Automotive drive shaft, Neural Network.

### ۱- مقدمه

روش المان حجمی نمونه که برای تخمین خواص نانوکامپوزیت از جمله مدول الاستیسیته و ضریب پواسون استفاده شده است پرداخته خواهد شد. پس از استخراج خواص مکانیکی نانوکامپوزیت می توان در نرم افزار ABAQUS مدل سازی را انجام داد. خروجی های این نرم افزار به صورت ورودی به نرم افزار GEVOm داده می شوند تا با استفاده از شبکه عصبی GMDH رابطه ریاضی هر یک از توابع هدف به دست آید. و در نهایت به منظور بهینه سازی چند هدفی و یافتن نقاط طراحی برتر، از الگوریتم NSGA II استفاده خواهد شد.

برای طراحی قطعات یک خودرو، لازم است عوامل مختلفی از جمله کارایی، هزینه، امکان سنجی و ... مورد بررسی قرار گیرد. گران بودن هزینه سوخت، عاملی است که مردم را هر روز بیش از پیش به سمت خرید خودروهای کم مصرف سوق می دهد. لذا سازندگان خودرو در تلاشند تا با بکارگیری فناوری های نوین، از مصرف سوخت خودروهای خود بکاهند. یکی از عوامل تاثیرگذار در مصرف سوخت یک خودرو، وزن آن است. پیشرفت علوم مهندسی مواد و مهندسی مکانیک در چند دهه اخیر، منجر به تولید موادی شده است که ضمن داشتن خواص مکانیکی بسیار خوب، وزن کمی را نیز دارا هستند. با پیشرفت علم مواد مرکب، دانشمندان در دو دهه اخیر موفق به ساخت مواد مرکبی با تقویت کننده هایی در ابعاد نانو شده اند. از جمله این مواد می توان به نانولوله های کربنی<sup>۱</sup> اشاره کرد. این مواد استوانه ای شکل، به دلیل نسبت بسیار زیاد طول به قطری که دارند، خواص مکانیکی و الکتریکی قابل توجهی را دارا هستند.

هدف این مقاله، طراحی بر اساس قابلیت اطمینان برای محور محرک نانوکامپوزیتی خودرو می باشد. به این منظور، در ابتدا به شرح

### ۱-۱- اشاره به مراجع

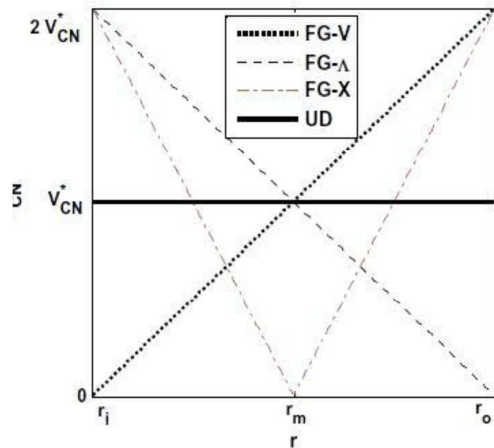
در سال های اخیر تحقیقات فراوانی بر روی محورهای کامپوزیتی و هیبریدی انجام شده است. به عنوان مثال ابوطالب و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۰ یک مدل المان محدود را برای تحلیل یک محور محرک تمام کامپوزیتی توسعه دادند. آنها در طراحی این محور کامپوزیتی از ترکیب لایه های با الیاف کربن و شیشه استفاده کردند و اثرات جهت گیری الیاف و لایه چینی را روی اولین فرکانس طبیعی خمشی و گشتاور کمانش مورد بررسی قرار دادند. لی و همکاران [۲] طراحی و تولید یک محور محرک خودرو یکپارچه هیبریدی آلومینیوم-کامپوزیت را انجام دادند. تلاش آن ها برای این

1 Carbon Nano Tubes (CNTs)

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: ab\_khalkhali@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۱۴



شکل ۱- پروفیل توزیع نانولوله کربنی در نانوکامپوزیت در جهت شعاعی

## ۲-۲- مدلسازی

در این قسمت محور محرک نانوکامپوزیتی خودرو در نرم‌افزار ABAQUS مدل می‌شود. برای ۳ شعاع متفاوت، ۳ ضخامت متفاوت و همچنین ۳ درصد حجمی نانولوله کربنی متفاوت، تحلیل فرکانسی و تحلیل کماتش انجام گرفته است. پس از انجام تحلیل فرکانسی، مقادیر اولین فرکانس طبیعی برای هر ۲۷ حالت در نظر گرفته شده استخراج می‌شود. همچنین گشتاور بحرانی کماتش برای هر یک از حالت‌های در نظر گرفته شده محور محاسبه می‌گردد.

در مرحله بعد مدلسازی با استفاده از شبکه عصبی GMDH انجام گرفته است و برای هر یک از توابع هدف، یعنی اولین فرکانس طبیعی و گشتاور بحرانی کماتش، رابطه‌ای ریاضی بدست آمده است.

## ۲-۳- بهینه‌سازی

در اکثر مسائل بهینه‌سازی مهندسی بیش از یک تابع هدف برای طراحان از اهمیت برخوردار است و معمولاً چند تابع هدف که در تضاد با همدیگر هستند باید به طور همزمان توسط طراح بهینه شوند. هدف این مقاله افزایش فرکانس طبیعی اول، افزایش گشتاور بحرانی کماتش و کاهش وزن محور محرک می‌باشد. به منظور انجام بهینه‌سازی، از الگوریتم مرتب‌سازی نقاط غیر برتر NSGA II بهره گرفته شده است.

## ۳- تحلیل اجزاء محدود

برای مدل‌سازی محور در این مقاله، محور به ۱۰ لایه تقسیم شده است، که خواص الاستیک معادل هر لایه با استفاده از روش المان حجمی نمونه<sup>۳</sup> محاسبه شده است. مدل المان حجمی نمونه به صورت یک استوانه توخالی متشکل از سه استوانه توخالی اعم از نانولوله کربنی، فاز میانی و ماده زمینه می‌باشد. با توجه به درصد حجمی نانولوله کربنی، شعاع خارجی المان حجمی متغیر می‌باشد، که برای

بود که این محور را با روش جدیدی بسازند تا نتایج بهتری در مقایسه با روش‌های قبلی داشته باشد.

به منظور تحلیل محور محرک نانوکامپوزیتی لازم است ابتدا خواص ماده‌ی نانوکامپوزیتی تحت شرایط هندسی مختلف که همان پارامترهای مسئله هستند بدست آید. برای این منظور دو روش متداول وجود دارد. روش اول که روش نسبتاً دقیق‌تر اما پیچیده‌تری محسوب می‌شود، دینامیک مولکولی می‌باشد. در این روش پیوند بین اتم‌های ماده در نرم‌افزارهای مربوطه مدل شده و خواص مکانیکی آن‌ها استخراج می‌شود. به عنوان مثال، در سال ۲۰۰۶ میلادی، چن لی ژانگ و همکاران [۳]، خواص الاستیک نانوکامپوزیت‌های نانولوله کربنی تک دیواره‌ای را تحت ضرایب حجمی مختلف نانولوله‌ها به دست آوردند. روش دوم روش مدل پیوسته‌ی المان حجمی نمونه می‌باشد. مقاله‌های بسیار زیادی در دهه‌ی اخیر در این مورد به چاپ رسیده است. برای تخمین مدول نانوکامپوزیت در جهت‌های مختلف دو حالت کلی در نظر گرفته می‌شود: با در نظر گرفتن اثر فاز میانی و بدون در نظر گرفتن آن. فاز میانی در واقع فازی مجازی است که بیانگر تاثیر قدرت پیوندهای بین دو فاز ماده‌ی زمینه و ماده‌ی تقویت‌کننده می‌باشد. از جمله مقالاتی که در سال‌های اخیر در این مورد به چاپ رسیده است، می‌توان به کار آیت‌اللهی و همکاران [۴] اشاره کرد که به بررسی تاثیر پارامترهای مختلفی از جمله جهت‌گیری و طول نانولوله‌های کربنی بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت پرداخته‌اند و برای این منظور از المان‌های حجمی نمونه، با در نظر گرفتن اثر فاز میانی استفاده کرده‌اند. همچنین چن و همکاران [۵] به بررسی خواص نانوکامپوزیت‌ها بدون در نظر گرفتن اثر فاز میانی، توسط یک المان حجمی مکعبی پرداختند.

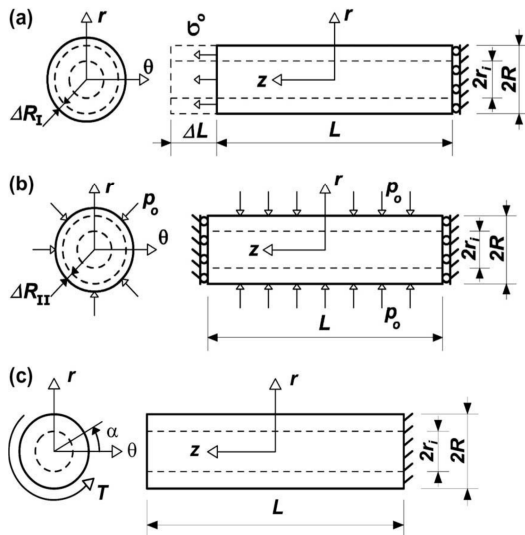
## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- تخمین خواص مکانیکی

یکی از مسائلی که این روزها در طراحی نانوکامپوزیت‌ها مورد توجه محققان قرار گرفته است، بحث توزیع نانولوله‌های کربن در داخل ماده زمینه می‌باشد. به نانوکامپوزیت‌هایی که نانولوله‌های کربن در آن‌ها به صورت غیر یکنواخت و تابعی توزیع شده باشد، نانوکامپوزیت‌هایی با آرایش تابعی<sup>۲</sup> گفته می‌شود. در مقاله خلخالی و همکاران [۶]، چهار نوع مختلف توزیع نانولوله‌های کربن برای محور مورد نظر در نظر گرفته شده است (FG-V, FG-X, FG-A, UD) و در شکل ۱ پروفیل توزیع هر یک از این چهار حالت نشان داده شده است. در این مقاله توزیع نانولوله‌های کربنی به صورت V شکل در نظر گرفته شده، و با در نظر گرفتن محور به صورت ۱۰ لایه، درصد حجمی نانولوله کربنی در هر لایه مقدار متفاوتی بدست آمده است. پس از مدلسازی المان حجمی نمونه در نرم‌افزار آباکوس، و قرار دادن مدل تحت کشش، فشار شعاعی و گشتاور پیچشی، امکان استخراج خواص مکانیکی نانوکامپوزیت برای درصدهای حجمی متفاوت نانولوله‌های کربنی بوجود می‌آید. مقادیر بدست آمده از این روش برای مدلسازی محور در نرم‌افزار ABAQUS استفاده می‌شوند.

<sup>۳</sup> RVE (Representative Volume Element)

<sup>۲</sup> Functionally Graded (FG)



شکل ۳- حالت‌های بارگذاری آزمایش شده: الف- کشش محوری  
ب- فشار عرضی پ- پیچش

لازم به ذکر است که تنش‌ها و گشتاور وارده در سه تست فوق باید به اندازه‌ای کوچک باشد که اطمینان حاصل شود ماده در حالت الاستیک قرار داشته و تسلیم نمی‌شود. برای این منظور مقدار هر یک از تنش‌ها و گشتاور وارده به صورت رابطه ۱ در نظر گرفته می‌شوند:

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= 1 \text{ nPa} \\ P_0 &= 1 \text{ nPa} \\ T_0 &= 10^{-17} \text{ N.m} \end{aligned} \quad (1)$$

از انجام تست‌های فوق، چهار پارامتر بدست می‌آید:

- ۱- تغییر طول المان در آزمایش الف:  $\Delta L$
  - ۲- تغییر شعاع المان در آزمایش الف:  $\Delta R_I$
  - ۳- تغییر شعاع المان در آزمایش ب:  $\Delta R_{II}$
  - ۴- زاویه پیچش المان در آزمایش پ:  $\alpha$
- سیس با استفاده از روابط (۲) تا (۹) خواص الاستیک نانوکامپوزیت محاسبه خواهند شد [۸]:

$$E_z = \left( \frac{L}{\Delta L} \right) \sigma_z \quad (2)$$

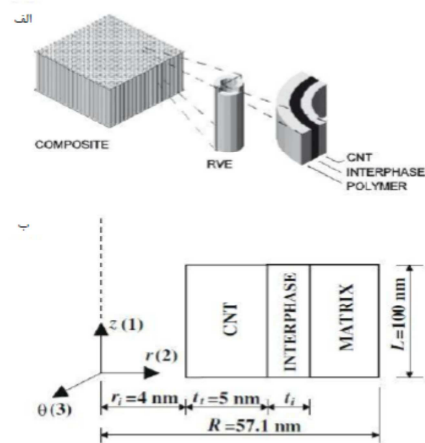
$$v_{zr} = - \left( \frac{\Delta R_I}{R} \right) / \left( \frac{\Delta L}{L} \right) \quad (3)$$

$$\sigma_r = -p_0 \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = -p_0 \left( \frac{R^2 + r_i^2}{R^2 - r_i^2} \right) \quad (5)$$

درصد حجمی ۱۵٪ این شعاع برابر با ۲۵ نانومتر محاسبه می‌شود. شعاع داخلی المان نیز برابر با شعاع متداول در نظر گرفته شده برای نانولوله‌های کربنی، یعنی ۴ نانومتر می‌باشد. طول المان برابر با ۱۰۰ نانومتر در نظر گرفته می‌شود. قطر نانولوله کربنی نیز مطابق با مقدار متداول برابر با ۵ نانومتر در نظر گرفته می‌شود [۷]. ضخامت لایه میانی  $t_i$  نیز بر طبق نتایج حاصله از مرجع [۷] برابر با ضخامت نانولوله کربنی در نظر گرفته می‌شود.

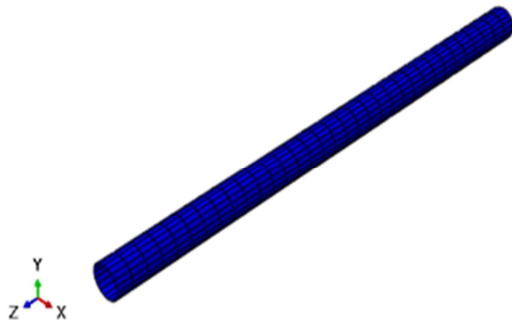
در شکل ۲ مدل و پارامترهای هندسی آن به طور صورت طرحواره مشخص شده است.



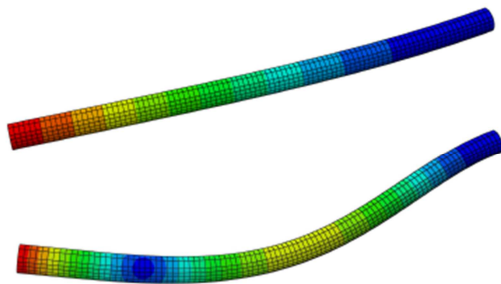
شکل ۲- المان حجمی نمونه. الف- مدل سه-بعدی تکرار شونده.  
ب- مدل دو-بعدی متقارن محوری

به منظور محاسبه خواص الاستیک نانوکامپوزیت در این روش، المان حجمی نمونه در نرم‌افزار اجزاء محدود تحت سه نوع بارگذاری مختلف قرار گرفته و نتایج هر بخش استخراج شده و پس از انجام محاسبات لازم بر روی آن‌ها، خواص الاستیک ماده استخراج می‌شود. آزمایش اول به این صورت است که درجات آزادی یک انتهای المان حجمی کاملاً بسته شده و انتهای دیگر آن تحت کشش یکنواخت  $\sigma_0$  قرار می‌گیرد. در این بخش میزان تغییر طول المان و تغییرات شعاع آن استخراج می‌شود. در آزمایش دوم، درجات آزادی دو سر المان را کاملاً بسته و سطح المان تحت فشار یکنواخت  $P$  قرار داده می‌شود. تغییرات شعاع المان از این تست استخراج می‌شود. در تست سوم مجدداً درجات آزادی یک سر المان را کاملاً بسته و سر دیگر تحت گشتاور  $T$  قرار می‌گیرد. هر سه آزمایش در شکل ۳ به صورت طرحواره نشان داده شده‌اند.

نتایج بدست آمده برای فرکانس طبیعی اول و گشتاور بحرانی کماتش، در جدول ۲ نشان داده شده اند.



شکل ۴- مدل اجزاء محدود محور محرک نانوکامپوزیتی خودرو



شکل ۵- شکل مود اول و دوم محور محرک نانوکامپوزیتی خودرو در تحلیل فرکانسی

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\Delta R_{II}}{R} \quad (۶)$$

$$G_{r\theta} = \frac{TL}{\alpha J} \quad (۷)$$

$$E_t = \frac{4p_0 R^2 E_z G_{r\theta}}{p_0 E_z (R^2 - r_i^2) - 2E_z G_{r\theta} \left(\frac{\Delta R_{II}}{R}\right) (R^2 - r_i^2) + 4} \quad (۸)$$

$$v_{r\theta} = E_r \left[ -\frac{v_{zr}^2}{E_z} + \frac{\Delta R_{II}}{R p_0} + \left( -\frac{v_{zr}^2}{E_z} + \frac{1}{E_r} \right) \left( \frac{R^2 + r_i^2}{R^2 - r_i^2} \right) \right] \quad (۹)$$

در رابطه‌ی ۲،  $\sigma_z$  تنش میانگین ایجاد شده در مقطع المان حجمی است که از نظر عددی با  $\sigma_0$  برابر می‌باشد. و در رابطه‌ی ۷  $J$  ممان اینرسی قطبی مقطع می‌باشد.

خواص مکانیکی به دست آمده برای  $V_{CNT}^* = 0.23$ ،  $R_m = 0.015 \text{ m}$  و  $t = 0.001 \text{ m}$  در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد، که با توجه به توزیع  $V$  شکل ذرات نانولوله کربنی، برای شعاع‌های مختلف مقادیر بدست آمده برای مدول الاستیک، ضریب پواسون و چگالی متفاوت می‌باشد.

سپس با استفاده از خواص مکانیکی به دست آمده در این بخش، به تحلیل محور محرک نانوکامپوزیتی پرداخته خواهد شد.

مدل‌سازی اجزاء محدود محور محرک خودرو در این مقاله، توسط نرم‌افزار ABAQUS انجام گرفته است. محور به صورت یک لوله استوانه‌ای به طول  $1/73$  متر در نظر گرفته شده است. قطر لوله و همچنین ضخامت دیواره به صورت متغیر در نظر گرفته شده‌اند. ماده زمینه تشکیل دهنده نانوکامپوزیت، پلیمر PmPV با مشخصات  $E = 2.1 \text{ GPa}$ ،  $\rho = 1150 \text{ kg/m}^3$  و  $\nu = 0.34$  [9] در نظر گرفته شده است. همچنین برای نانولوله‌های کربن  $E = 1 \text{ TPa}$ ،  $\rho = 1400 \text{ kg/m}^3$  و  $\nu = 0.3$  در نظر گرفته شده است [۷]. برای در نظر گرفتن آرایش تابعی نانولوله‌ها، محور به ۱۰ لایه در راستای شعاع تقسیم شده است. همچنین از المان S4R نرم‌افزار ABAQUS که یک المان با ۴ گره و ۶ درجه آزادی (۳ دوران و ۳ جابجایی) می‌باشد استفاده شده است. مدل اجزاء محدود این محور محرک در شکل ۴ و شکل مود اول و دوم این محور در تحلیل فرکانسی، در شکل ۵ نشان داده شده‌اند

جدول ۱- خواص مکانیکی بدست آمده برای نانوکامپوزیت حاوی ۲۳٪ نانولوله کربنی

Layer	r (m)	E <sub>1</sub> (GPa)	E <sub>2</sub> (GPa)	G (GPa)	ضریب پواسون	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
1	0.0145	4.30e+11	34026247206	3.54e+11	0.304321	1250
2	0.014611	3.34e+11	23588974097	1.98e+11	0.304206	1227.5
3	0.014722	2.38e+11	17061687299	8.97e+10	0.304043	1205
4	0.014833	1.42e+11	12088151984	2.69e+10	0.303833	1182.5
5	0.014944	45560162194	5242583178	2.69e+09	0.311729	1160
6	0.015056	45560162194	5242583178	2.69e+09	0.311729	1160
7	0.015167	1.42e+11	12088151984	2.69e+10	0.303833	1182.5
8	0.015278	2.38e+11	17061687299	8.97e+10	0.304043	1205
9	0.015389	3.34e+11	23588974097	1.98e+11	0.304206	1227.5
10	0.0155	4.30e+11	34026247206	3.54e+11	0.304321	1250

جدول ۳- نتایج بدست آمده برای گشتاور بحرانی کمانش و فرکانس طبیعی اول در نرم افزار آباکوس

No.	$V_{CNT}^*$	$R_m$	t (m)	فرکانس (Hz)	گشتاور (N.m)	No.	$V_{CNT}^*$	$R_m$	t (m)	فرکانس (Hz)	گشتاور (N.m)
1	0.15	0.015	0.001	42.2441	63.89	15	0.23	0.025	0.003	86.2730	2686.3
2	0.15	0.015	0.002	42.2878	269.84	16	0.23	0.035	0.001	120.5430	217.58
3	0.15	0.015	0.003	42.3499	553.17	17	0.23	0.035	0.002	120.5660	1423.4
4	0.15	0.025	0.001	70.0511	80.63	18	0.23	0.035	0.003	120.6028	3399.5
5	0.15	0.025	0.002	70.0764	483.86	19	0.32	0.015	0.001	72.7628	266.57
6	0.15	0.025	0.003	70.1132	1070	20	0.32	0.015	0.002	72.8548	1182.00
7	0.15	0.035	0.001	98.3572	95.459	21	0.32	0.015	0.003	72.9905	1182.00
8	0.15	0.035	0.002	98.3756	654.4	22	0.32	0.025	0.001	121.1226	352.63
9	0.15	0.035	0.003	98.4032	1666.4	23	0.32	0.025	0.002	121.1755	2101.70
10	0.23	0.015	0.001	51.7753	142.9	24	0.32	0.025	0.003	121.2583	4947.10
11	0.23	0.015	0.002	51.8328	656.63	25	0.32	0.035	0.001	169.4019	573.94
12	0.23	0.015	0.003	51.9179	1342.1	26	0.32	0.035	0.002	169.4410	2813.4
13	0.23	0.025	0.001	86.1879	185.72	27	0.32	0.035	0.003	169.5008	6581.6
14	0.23	0.025	0.002	86.2224	1083.8						

معادله ریاضی به دست آمده برای گشتاور بحرانی کمانش در روابط (۱۰) تا (۱۵) و معادله مربوط به فرکانس در روابط (۱۶) تا (۱۹) نشان

داده شده‌اند

$$Y_1 = 2710.377 - 18217.9V_{CNT} - 21512.332V_{CNT}^2 + 1958460.879t \quad (10)$$

$$Y_2 = -1082.413 + 140694.053R_m - 1301710.481t - 4464134.162R_m^2 + 180182783.13t^2 + 78345096.472R_mt \quad (11)$$

$$Y_3 = 525.173 - 23203.575V_{CNT} + 114152.605R_m + 37507.619V_{CNT}^2 - 4139517.101R_m^2 + 710872.554V_{CNT}R_m \quad (12)$$

$$Y_4 = 36.401 + 7.458V_{CNT} + 0.932Y_1 + 1.697V_{CNT}^2 + 1.760e - 05Y_1^2 - 0.0307V_{CNT}Y_1 \quad (13)$$

$$Y_5 = 147.865 + 0.123Y_2 + 0.151Y_3 + 3.573e - 06Y_2^2 - 3.89e - 05Y_3^2 + 0.0003Y_2Y_3 \quad (14)$$

$$\text{Torque} = -44.345 + 0.664Y_4 + 0.335Y_5 - 0.0001Y_4^2 - 7.352e - 05Y_5^2 + 0.0002Y_4Y_5 \quad (15)$$

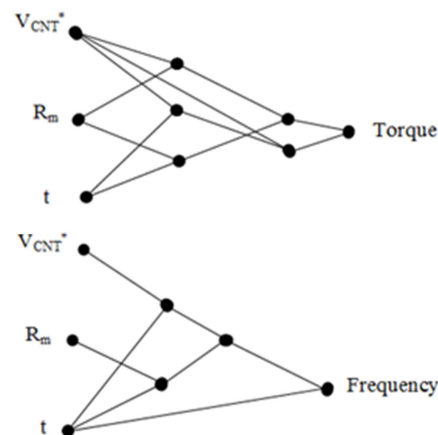
$$Y_1 = -38.407 + 6324.548R_m + 8029.207t - 58595.589R_m^2 - 2632150.742t^2 + 275490.035R_mt \quad (16)$$

$$Y_2 = 100.704 - 412.464V_{CNT} - 4954.497t + 1424.826V_{CNT}^2 - 360627.658t^2 + 36373.178V_{CNT}t \quad (17)$$

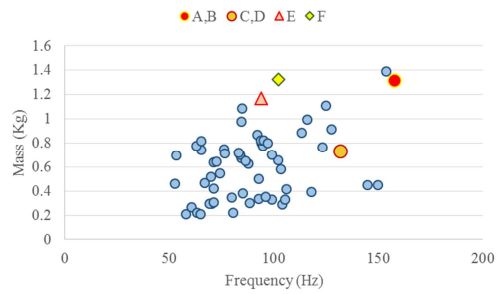
$$Y_3 = -63.996 - 0.197Y_1 + 1.693Y_2 + 0.0019Y_1^2 - 0.008Y_2^2 + 0.0079Y_1Y_2 \quad (18)$$

#### ۴- بهینه‌سازی

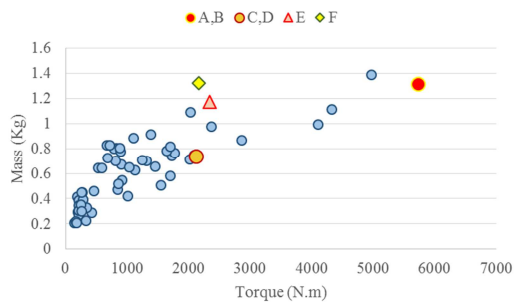
برای انجام مدل‌سازی، ۲۷ شبیه‌سازی اجزاء محدود مختلف انجام شده. تمام داده‌های بدست آمده به دو جدول تقسیم می‌شوند که در یک جدول گشتاور بحرانی کمانش و در جدول دیگر اولین فرکانس طبیعی به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود. ورودی‌های هر دو جدول عبارتند از  $V_{CNT}^*$ ،  $R_m$  و  $t$  که به ترتیب بیانگر درصد حجمی نانولوله کربنی در نانوکامپوزیت، شعاع میانگین محور و ضخامت دیواره محور محرک هستند. ساختار شبکه عصبی با استفاده از الگوریتم ژنتیک طراحی شده و در این روش تعداد جمعیت اولیه معادل ۱۰۰، احتمال تلفیق برابر ۰.۷، احتمال جهش برابر ۰.۰۷ و ۱۰۰۰ بار تکرار در نظر گرفته شده است. شکل ۶ ساختار شبکه عصبی GMDH مربوط به گشتاور بحرانی کمانش و اولین فرکانس طبیعی برای محور محرک نانوکامپوزیتی را نشان می‌دهد.



شکل ۶- ساختار شبکه عصبی GMDH برای گشتاور بحرانی کمانش و فرکانس



ب) نمودار جرم بر حسب گشتاور



پ) نمودار جرم بر حسب فرکانس

شکل ۷- نمودارهای بدست آمده در تحلیل معین

### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی و مقایسه‌ی نتایج بهینه‌سازی چندهدفه و تک‌هدفه پرداخته شد. محور محرک به صورت لایه‌ای و با در نظر گرفتن حجم متفاوتی از نانولوله‌های کربنی در هر لایه، در نظر گرفته شد. پس از تحلیل اجزاء محدود در نرم‌افزار ABAQUS، نتایج بدست آمده به عنوان ورودی به نرم‌افزار GEVOم داده شد و یک رابطه ریاضی برای هر یک از توابع هدف بدست آمد. در مرحله‌ی بعد بهینه‌سازی به صورت تک‌هدفه و چند هدفه انجام گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده در بخش ۴، می‌توان دریافت که با استفاده از روش بهینه‌سازی چندهدفی، نتایج مطلوبی بدست خواهد آمد. در واقع می‌توان با بکارگیری حجم کمتری از نانولوله‌های کربنی در نانوکامپوزیت، علاوه بر رسیدن به استحکام مورد نظر، افزایش فرکانس طبیعی اول به اندازه‌ی قابل توجه، وزن را نیز تا اندازه‌ای قابل قبول کاهش داد.

$$\text{Frequency} = 4.056 - 0.623t + 1.0106Y_3 - 0.0025t^2 + 0.0008Y_3^2 - 66.789tY_3 \quad (19)$$

در بهینه‌سازی چند هدفی، طبق رابطه (۲۰) میانگین گشتاور بحرانی کمانش، میانگین فرکانس طبیعی اول و جرم به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده‌اند.

$$f = [\text{Mean}_{\text{Torque}} \quad \text{STD}_{\text{Torque}} \quad \text{Mass}] \quad (20)$$

متغیرهای طراحی طبق رابطه (۲۱) درصد حجمی نانولوله کربن در نانوکامپوزیت، شعاع میانگین محور و همچنین ضخامت دیواره‌ی محور محرک می‌باشند.

$$x = [V_{\text{CNT}}^* \quad R_m \quad t] \quad (21)$$

به منظور بدست آوردن بردارهای طراحی بهینه، ابتدا بهینه‌سازی سه هدفه انجام داده می‌شود. سپس نتایج بهینه‌سازی مجدداً جبهه بندی می‌شوند تا جبهه جواب برتر بدست آید. سپس با استفاده از روش NIP بهینه‌ترین نقاط طراحی موجود انتخاب می‌شوند. بهترین مقدار هر پارامتر خروجی انتخاب می‌شوند. در نهایت ۶ نقطه بهینه بدست آمده‌اند که تمامی این ۶ نقطه می‌توانند با توجه به نیاز طراح، نقاط مناسبی برای طراحی باشند. این ۶ نقطه در جدول ۳ آورده شده‌اند.

علت انتخاب هر کدام از نقاط جدول ۳ در زیر آمده است:

A: این نقطه بیشترین گشتاور را دارد.

B: این نقطه بیشترین فرکانس را دارد.

C: این نقطه کمترین جرم را دارد.

D: نقطه بهینه انتخاب شده با استفاده از روش نزدیک‌ترین نقطه

به نقطه‌ی ایده‌آل در فضای غیراحتمالاتی.

E و F: نقاط پیشنهاد شده که هم گشتاور و هم فرکانس مناسبی

دارند.

در جدول ۳ احتمال شکست تحت قیدهای رابطه (۲۲) محاسبه

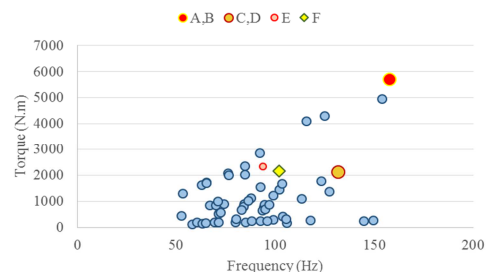
شده است:

که این مقادیر با توجه به مقادیر اولین فرکانس طبیعی و گشتاور

بحرانی کمانش برای محورهای فولادی، و همچنین وزن تقریبی

محورهای محرک فولادی انتخاب شده‌اند.

نتایج بدست آمده در نمودارهای شکل ۷ آورده شده‌اند.



لف) نمودار گشتاور بر حسب فرکانس

جدول ۳- نقاط انتخاب شده طی فرایند بهینه‌سازی

	متغیرهای طراحی			طراحی معین			احتمال شکست	
	$V_{CNT}^*$	$R_m$	t	f	T	M	f	T
A	0.312	0.033	0.003	157.67	5725.2	1.31879	0	0
B	0.312	0.033	0.003	157.67	5725.2	1.31879	0	0
C	0.3	0.028	0.002	131.71	2024.9	0.73594	0	0.9834
D	0.3	0.028	0.002	131.71	2024.9	0.73594	0	0.9834
E	0.187	0.034	0.003	97.5561	2015.6	1.324	0.5834	0.9976
F	0.197	0.03	0.003	93.1002	2239.2	1.17102	0.8399	0.0485

#### ۶- فهرست علائم

$T$	گشتاور (N.m)
$f$	فرکانس (Hz)
$V_{CNT}^*$	درصد حجمی نانولوله کربنی در نانو کامپوزیت
$R_m$	شعاع میانگین محور محرک
t	ضخامت دیواره محور محرک
CNT	زیرنویس‌ها نانولوله کربنی

#### ۷- مراجع

- [1] Abu Talib A.R., Aidy Ali, Mohamed A. Badie, Nur Azida Che Lah A.F. Golestaneh. Developing a Hybrid, Carbon/Glass Fiber-Reinforced, Epoxy Composite Automotive Drive Shaft. *Material & Design*. vol31, p514-521, 2010.
- [2] Lee D.G., Hak Sung Kim, Jong Woon Kim, Jin Kook Kim. Design and manufacture of an automotive hybrid aluminum/composite drive shaft, *Composite Structures*, Vol. 63, pp 87-99, 2004.
- [3] Shen C. L. and Zhang H. S. Temperature-dependent elastic properties of single-walled carbon nanotubes: Prediction from molecular dynamics simulation, *Applies Physics Letters*, Vol. 89, 2006.
- [4] Ayatollahi M., Shadlou S. and Shokrieh M.. Multiscale modeling for mechanical properties of carbon nanotube reinforced nanocomposites subjected to different types of loading., *Composite Structures*, Vol. 93, pp 2250-9, 2011.
- [5] Chen X. and Liu Y. J., Square representative volume elements for evaluating the effective material properties of carbon nanotube-based composites, *Computational Material Science*, Vol. 29, pp 1-11, 2004.
- [6] Khalkhali A., Khakshourmia S., Saberi P., Optimal design of functionally graded PmPV/CNT nanocomposite cylindrical tube for purpose of torque transmission. *Journal of central south university*, vol. 23, pp. 362-369, 2016.
- [7] Hernandez-Perez A., Aviles F., Modeling the influence of interphase on elastic properties of carbon nanotube composites, *Computational Materials Science*, Volume 47, pp 926-33, 2010.
- [8] Hernández-Pérez A. and Avilés F., Modeling the influence of interphase on the elastic properties of carbon nanotube Composites, *Computational Materials Science* 47(4): 926-933, 2010.
- [9] Zhu P., Lei Z. and Liew K.. Static and free vibration analysis of carbon nanotube-reinforced composite plates using finite element method with first order shear deformation plate theory, *Composite Structures*, Vol. 94, pp 1450-60, 2012.