



## بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی ماده مرکب چوب-پلاستیک بر پایه پلی اتیلن/پلی پروپیلن/پلی اتیلن ترفتالات بازیافتی: بخش دوم بهینه سازی مقید

علیرضا مالکی خوراسگانی<sup>1\*</sup>، حمزه شاهرجبیان<sup>2</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد

2- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد

\* نجف آباد، صندوق پستی 8514143131، h.shahrajabian@pmc.iaun.ac.ir

### اطلاعات مقاله

دریافت: 97/1/11

پذیرش: 97/2/31

### کلیدواژگان:

بهینه سازی مقید

چوب پلاستیک با زمینه

PP/HDPE/rPET

روش سطح پاسخ

الگوریتم ژنتیک

### چکیده

هدف از این تحقیق، تعیین پارامترهای بهینه فرآیندی از قبیل پلی اتیلن ترفتالات بازیافتی (rPET)، سازگارکننده و درصد چوب در ماده مرکب چوب پلاستیک با زمینه PP/HDPE/rPET به منظور بیشینه کردن استحکام مخصوص (نسبت استحکام به چگالی) با در نظر گرفتن مدول کششی، انرژی ضربه و میزان جذب آب به عنوان فیوید، می باشد. برای این منظور، نمونه های چوب پلاستیک شامل rPET به میزان 0، 15، 25 و 35 درصد رزین (phr)، سازگارکننده به میزان 4، 8 و 12 phr و درصد چوب به میزان 30 و 40 درصد وزنی تهیه شد. آزمون های تجربی به منظور تعیین استحکام کششی، مدول کششی، انرژی ضربه، چگالی، و میزان جذب آب انجام شد. از روش سطح پاسخ (RSM) برای ایجاد مدل های ریاضی بین پارامترهای ورودی (میزان rPET، سازگارکننده و درصد چوب) و پارامترهای پاسخ (استحکام کششی، چگالی، مدول کششی، میزان جذب آب و انرژی ضربه) استفاده شد. آنالیز واریانس (ANOVA) برای تعیین درجه اهمیت مدل و هر یک از پارامترهای ورودی بر پارامترهای خروجی استفاده شد. کد الگوریتم ژنتیک برای تعیین شرایط بهینه مقید اجرا شد. استحکام مخصوص به عنوان تابع اصلی برای الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته شده و مدول کششی، انرژی ضربه و میزان جذب آب به عنوان فیوید تابع اصلی در نظر گرفته شد.

## Investigation of the physical and mechanical properties of Wood plastic composites based on high density polyethylene/ polypropylene/recycled poly (ethylene terephthalate): part II, Constrained Optimization

Ali-reza Maleki Khorasgani, Hamzeh Shahrajabian\*

Department of Mechanical Engineering, Najafabad branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

\* P.O.B. 8514143131 Najafabad, Iran, h.shahrajabian@pmc.iaun.ac.ir

### Keywords

Constrained optimization  
HDPE/rPET/wood composites  
Response surface methodology  
Genetic algorithm

### Abstract

The purpose of this study is determination of the optimal process parameters such as recycled PET (RP), compatibilizer (COM), and wood flour (W) in HDPE/rPET/wood composites to maximize specified strength (the ratio of tensile strength to density) by consideration of water absorption (WA), tensile modulus (M), and impact energy (IE) as the constraints. In this regards, the wood composites samples were prepared with various contents of rPET (0, 15, 25, and 35 phr), MAPE as a compatibilizer (4, 8, and 12 phr), and wood flour (30 and 40 % wt.). The experimental tests were carried out to determine tensile strength (TS), tensile modulus, impact energy (IM), density ( $\rho$ ), and water absorption (WA). Response surface methodology (RSM) was used to create the mathematical models between input parameters (RP, COM, W) and responses (TS,  $\rho$ , WA, M, and IE). The analysis of variance (ANOVA) was done to determine the significance of the model and each input parameter. Genetic algorithm (GA) code was performed to determine optimum condition. Specific strength formed the main function for GA, and water absorption, tensile modulus, and impact energy constituted the constraints of the function.

### 1- مقدمه

استفاده می شود. پرکننده های طبیعی در مقایسه با پرکننده های صنعتی و مصنوعی دارای مزایایی از قبیل کمتر بودن چگالی و هزینه می باشند. استفاده از پرکننده های طبیعی در مواد ترموپلاستیک باعث افزایش استحکام و سفتی

مواد مرکب چوب پلاستیک<sup>1</sup> خانواده جدیدی از مواد مرکب هستند که در آنها از مواد پرکننده طبیعی مانند الیاف مواد سلولوزی مانند چوب و پودر چوب

<sup>1</sup> Wood plastic composites (WPCs)

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Maleki Khorasgani, A.R., and Shahrajabian, H. Maleki Khorasgani, A.R., "Investigation of the physical and mechanical properties of Wood plastic composites based on high density polyethylene/ polypropylene/recycled poly (ethylene terephthalate): part II, Constrained Optimization", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 1, pp. 119-126, 2019.

و کاهش چگالی می‌شود [11]. از طرفی مواد مرکب چوب پلاستیک قابلیت بازیابی و تجدید پذیری مناسبی دارند.

یکی از راههای بازیافت مواد پلاستیکی گرمانرم استفاده آنها در تهیه مواد مرکب چوب پلاستیک می‌باشد [2-4]. این کار منجر به کاهش اثرات زیست تخریبی پلاستیکها در طبیعت می‌شود. یکی از پلاستیکهایی که امروزه کاربرد فراوانی در زندگی روزمره پیدا کرده و مقدار بسیار زیادی از آن در طبیعت رها می‌شود، پلی اتیلن ترفتالات<sup>1</sup> می‌باشد. از پلاستیک PET برای تهیه بطریهای نوشیدنی به خصوص بطری‌های آب استفاده می‌شود [5,6]. استفاده از PET ضایعاتی مورد توجه برخی محققان در تولید چوب پلاستیک شده است [7-9]. یکی از مهمترین مزایای مواد مرکب چوب پلاستیک، استحکام مخصوص (نسبت استحکام کششی به چگالی) آنها می‌باشد. از اینرو تولید محصولات چوب پلاستیک با بالاترین استحکام مخصوص ( $\sigma^*$ ) می‌تواند یک هدف مهم باشد. پارامترهای زیادی از قبیل درصد پرکننده (مثل پودر چوب) و درصد سازگارکننده بر استحکام مخصوص مواد چوب پلاستیک موثر هستند. در مواد مرکب حاوی PET ضایعاتی، درصد ضایعاتی روی خواص مکانیکی از قبیل استحکام مخصوص موثر است [10]. برای رسیدن به بیشترین مقدار استحکام مخصوص، فرآیند بهینه سازی ( $\sigma^*_{\text{maximum}} - \sigma^*_{\text{minimum}}$ ) امری ضروری است. در فرآیند بهینه سازی، پارامترهای بهینه (درصدهای چوب، سازگارکننده و PET ضایعاتی) برای بیشینه مقدار استحکام مخصوص بدست می‌آید.

**1-1- اشاره به مراجع**

الگوریتم ژنتیک<sup>2</sup> یک روش بهینه سازی ابتکاری بوده که راه‌حل‌های بهینه را با سرعت بالا هنگامی که مدل تحلیلی یا تجربی موجود باشد، جستجو می‌کند. روش GA بر روی جمعیتی از راه‌حل‌های بالقوه با اعمال اصل بقای مناسب‌ترین نسل، برای تولید بهترین راه‌حل عمل می‌کند. مزیت بزرگ GA نسبت به سایر الگوریتم‌ها این است که سایر الگوریتم‌ها نیاز به حدس اولیه دارند که شدیداً روی جواب موثر است، اما GA به این حدس اولیه نیاز ندارد. روش GA به یک بازه جستجو نیاز دارد، که بر اساس اطلاعات اولیه خواص فیزیکی مسئله بیان می‌شود. GA بدون اینکه تابع هدف را در همه نقاط محاسبه کند، بصورت سطحی در کل فضای حل جستجو می‌کند. این نوع جستجو باعث می‌شود که GA در نقاط بهینه محلی گیر نکند. برخی محققان از روش GA برای بهینه سازی مسائل خود استفاده کردند. سوری<sup>3</sup> و همکاران [11] از روش GA برای بهینه سازی پالت‌های چوب پلاستیک استفاده کردند و نتیجه بهینه سازی آنها سازگاری مناسبی با نتایج آزمایشگاهی داشت. جعفری و همکاران [12] از روش GA برای تعیین پارامترهای بهینه‌ای که روی توزیع تنش اطراف شیار موثر هستند، استفاده کردند. شاه<sup>4</sup> و همکاران [13] پارامترهای بهینه سیکل پخت را برای حداقل کردن تنشهای پسماند در ماده مرکب لمینیتی تقویت شده با الیاف را با GA تعیین کردند. شهبازی و همکاران [14] از الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی پارامترهای فرآیندی هیدروفرمینگ قطعات لوله‌ای کامپوزیتی آلومینیوم-مس استفاده کردند. مجابی و همکاران [15] از الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی کنترل هوشمند ارتعاشات ورق کامپوزیتی یک-سرگردار استفاده کردند. شکرپه و همکاران [16] از الگوریتم ژنتیک برای

بهینه سازی پارامترهای مدل ناحیه چسبناک در مود اول تیر دولبه یک-سرگردار کامپوزیتی استفاده کردند.

الگوریتم ژنتیک به مدلهای تحلیلی مانند مدلهای چندجمله‌ای به عنوان مسئله ورودی برای بهینه سازی نیاز دارد. روشهایی برای به دست آوردن یک مدل چندجمله‌ای از داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد. یکی از روشهای موثر برای ایجاد یک مدل چندجمله‌ای از داده‌های تجربی، روش سطح پاسخ<sup>5</sup> می‌باشد. بومیک<sup>6</sup> و همکاران [18] از RSM برای پیش بینی و بهینه سازی پارامترهای فرآیندی در فرآیند ماشینکاری با جت آب مواد مرکب چوب پلاستیک استفاده کردند. وحدت آزاد و همکاران [1] از RSM برای مدلسازی به منظور بهینه سازی آنالیز حساسیت جذب انرژی ساختار ساندویچی مخروطی استفاده کردند. راثو<sup>7</sup> و همکاران [19] از RSM برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی پارامترهای فرآیندی در برش با لیزر ماده مرکب تقویت شده با الیاف کربن استفاده کردند. روش سطح پاسخ می‌تواند یک رابطه ریاضی بین متغیرهای ورودی و خروجی ایجاد کند. این رابطه ریاضی می‌تواند توسط GA بهینه شود. گاهی اوقات، بهینه سازی برخی از خواص مکانیکی باعث تخریب برخی خواص مکانیکی دیگر می‌شود. برای مثال، بیشینه استحکام مخصوص ممکن است باعث افت خواص دیگر مانند سفتی، مقاومت جذب آب و یا انرژی ضربه شود. بهینه سازی مقید، روش مفیدی است که می‌تواند شرایط بهینه را براساس برخی قیود پیدا کند. این قیود می‌توانند خواص مکانیکی و فیزیکی مهم دیگری باشند که در بازه مشخصی قرار می‌گیرند. تکنیک تابع جریمه به دلیل قابلیت کاربرد و سادگی به طور گسترده برای حل مسائل بهینه سازی مقید مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاهرجبیان و همکاران [20] از بهینه‌سازی مقید، برای بیشینه کردن نرخ باربرداری در سوراخکاری ماده مرکب اپوکسی/الیاف کربن با توجه به قیود نیروی سوراخکاری، لایه لایه شدگی و زبری سطح استفاده کردند. در تحقیق پیشین [10] به بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی چوب پلاستیک با زمینه پلی اتیلن چگالی بالا<sup>8</sup>/پلی پروپیلن<sup>9</sup> PET<sup>10</sup> ضایعاتی<sup>11</sup> پرداخته شد. هدف از انجام این تحقیق استفاده از داده‌های تحقیق پیشین برای یافتن بیشینه استحکام مخصوص چوب پلاستیک با زمینه HDPE/PP/rPET با ملاحظه مدول کششی، میزان جذب آب و انرژی ضربه به عنوان قیود می‌باشد. برای این منظور استحکام کششی، چگالی، مدول کششی، میزان جذب آب و انرژی ضربه به عنوان متغیرهای وابسته (پاسخ) و میزان پودر چوب، rPET و پایدارکننده به عنوان متغیرهای وابسته (متغیر ورودی) در نظر گرفته شدند. از RSM برای ایجاد مدل ریاضی بین متغیرهای ورودی و پاسخ‌ها استفاده شده و از GA برای یافتن شرایط بهینه به کار گرفته شد.

## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- مواد

پلی اتیلن چگالی بالا با پایه تجاری HD-52518 با شاخص جریان مذاب 18 gr/10min (2.16 kg/2.190 °C)، چگالی 0.952 gr/cm<sup>3</sup>، دمای ذوب 127 °C محصول شرکت پتروشیمی جم و پلی پروپیلن با پایه تجاری H1500 با شاخص جریان مذاب 12 gr/10min (2.16 kg/2.230 °C)، چگالی 0.9 gr/cm<sup>3</sup> و دمای ذوب 160 °C از شرکت لوتنه کمیکال<sup>11</sup> خریداری شد. از پلی اتیلن

<sup>7</sup> Rao

<sup>8</sup> High density polyethylene (HDPE)

<sup>9</sup> Polypropylene (PP)

<sup>10</sup> Recycled PET (rPET)

<sup>11</sup> LOTTE CHEMICAL

<sup>1</sup> Poly (ethylene terephthalate) (PET)

<sup>2</sup> Genetic Algorithm (GA)

<sup>3</sup> Soury

<sup>4</sup> Shah

<sup>5</sup> Response Surface Methodology (RSM)

<sup>6</sup> Bhowmik

جدول 2 ترکیب نمونه‌های چوب پلاستیک با زمینه PP/HDPE/rPET

Table 2 The composition of PP/HDPE/rPET/wood composites

شماره	RP (phr)	COM (phr)	W (% wt.)
1	0	4	30
2	15	4	30
3	25	4	30
4	35	4	30
5	0	4	40
6	15	4	40
7	25	4	40
8	35	4	40
9	0	8	30
10	15	8	30
11	25	8	30
12	35	8	30
13	0	8	40
14	15	8	40
15	25	8	40
16	35	8	40
17	0	12	30
18	15	12	30
19	25	12	30
20	35	12	30
21	0	12	40
22	15	12	40
23	25	12	40
24	35	12	40

مالنیکه<sup>1</sup> و پلی پروپیلن مالنیکه<sup>2</sup> با پایه تجاری پریکس<sup>3</sup> 12031 و پریکس 25093 ساخت شرکت ادکام<sup>4</sup> به عنوان سازگارکننده استفاده شد. از آنتی اکسیدان ایرگوناکس<sup>5</sup> 1010 نیز به عنوان پایدار کننده حرارتی استفاده شد. PET ضایعاتی از بطریهای پسماندهای شهری اصفهان تهیه گردید. ابتدا بطری-ها آسیاب شده، سپس در چندین مرحله شسته شده و سرانجام در اجاق<sup>6</sup> به مدت 24 ساعت در دمای 80 °C خشک شدند.

## 2-2- تهیه ماده مرکب چوب پلاستیک

تهیه گرانول نمونه‌های چوب پلاستیک در دو مرحله انجام گرفت. در مرحله اول آمیزه پلیمری PP/HDPE/rPET توسط اکسترودر دومارپیچه همسوگرد انجام گرفت و در مرحله بعد پودر چوب به آمیزه پلیمری اضافه شده و توسط اکسترودر دومارپیچه همسوگرد، گرانول چوب پلاستیک تهیه شد. گرانول های تهیه شده، توسط دستگاه تزریق پلاستیک تبدیل به نمونه‌های آزمایش شدند. روند تهیه ماده مرکب چوب پلاستیک در مقاله پیشین توضیح داده شده است [10] جدول 1 سطوح هر پارامتر را نشان می‌دهد.

جدول 1 سطوح پارامترها

Table 1 The level of parameters

پارامتر	سطح 1	سطح 2	سطح 3	سطح 4
rPET (phr)	0	15	25	35
سازگار کننده (phr)	4	8	12	-
پودر چوب (% wt.)	30	40	-	-

جدول 3 نتایج آزمون‌ها روی نمونه‌های چوب پلاستیک با زمینه PP/HDPE/rPET

Table 3 The results of experimental tests on PP/HDPE/rPET composite samples

شماره	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	WA (%)	TS (MPa)	M (MPa)	IE (J)
1	1056	0.57	23	2450	2.43
2	1093	0.6	22	2660	2.3
3	1121	0.62	25	2870	2.21
4	1140	0.75	24	3250	2.1
5	1078	0.78	22	2510	2.32
6	1102	0.8	21.5	2730	2.19
7	1135	0.86	23.5	3040	2
8	1158	0.9	23	3340	1.8
9	1067	0.5	25	2590	2.58
10	1099	0.52	29	2980	2.65
11	1138	0.55	30.5	3760	2.49
12	1152	0.58	30	3920	2.46
13	1097	0.65	24.5	2680	2.46
14	1114	0.67	29	3790	2.38
15	1146	0.69	29	3790	2.3
16	1167	0.7	28	4100	2.19
17	1074	0.47	25.5	2690	2.8
18	1108	0.46	28	3210	2.9
19	1149	0.49	31	3760	2.5
20	1165	0.52	29.5	3900	2.1
21	1110	0.62	24	2810	2.7
22	1129	0.64	27	3440	2.6
23	1167	0.66	30	3900	2.3
24	1190	0.68	28	4050	2

آنالیز آماری اولیه نشان داد که مدل رگرسیونی درجه دو مناسب است. بنابراین مدل رگرسیونی زیر برای ایجاد رابطه ریاضی بین پارامترهای ورودی و خروجی استفاده شد:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=j}^k b_{ij} x_i x_j, \quad i < j \quad (1)$$

که در آن  $y$  پاسخ،  $b_i$  ضرایب رگرسیون و  $x_i$  ها پارامترهای ورودی می‌باشند. در زیر روابط ریاضی به‌دست آمده از RSM بین متغیرهای ورودی و پاسخ‌ها آمده است:

$$\rho = 984.35 + 2.415A + 3.265B + 1.925C \quad (2)$$

## 2-3- روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ، ابزار سودمندی برای ایجاد مدل ریاضی از قبیل تابع چندجمله‌ای، بین یک یا چند پاسخ و متغیرهای مستقل ورودی با استفاده از تکنیک‌های ریاضی و آماری می‌باشد. ارزش RSM هنگامی مشخص می‌شود که تعداد آزمایش‌ها بر اساس روشهای طراحی آزمایش کم باشد. در واقع می‌توان گفت برای تعداد کم آزمایش‌ها، روش RSM ابزار بسیار ارزشمند و مناسبی برای ایجاد رابطه ریاضی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها است. قابلیت‌های زیادی برای RSM وجود دارد که عبارتند از: طراحی آزمایش، بهینه سازی، آنالیز واریانس و ارزیابی برهمکنش بین چندین پارامتر.

در این کار، از RSM برای ایجاد مدل ریاضی بین پارامترهای ورودی و پاسخ‌ها استفاده شد. پارامترهای ورودی عبارتند از میزان پودر چوب ( $w$ )، میزان rPET ( $RP$ ) و میزان سازگارکننده ( $COM$ )، و پاسخ‌ها عبارتند از از استحکام کششی ( $TS$ )، مدول کششی ( $M$ )، چگالی ( $\rho$ )، میزان جذب آب ( $WA$ ) و انرژی ضربه ( $IE$ ). آزمونهای تجربی بر اساس روش طراحی آزمایش فول فکتوریال انجام شد. پارامتر  $RP$  در چهار سطح، پارامتر  $COM$  در سه سطح و پارامتر  $w$  در دو سطح تغییر کردند. جدول 2 ترکیب نمونه‌های آزمایش را نشان می‌دهد. نتایج آزمونهای تجربی در جدول 3 نشان داده شده است.

<sup>4</sup> Addcomp

<sup>5</sup> Irganox

<sup>6</sup> Oven

<sup>1</sup> Maleic anhydride graft-polyethylene (MAPE)

<sup>2</sup> Maleic anhydride graft- polypropylene (MAPP)

<sup>3</sup> PRIEX

میزان جذب آب ندارند. بر اساس جدول 5، مقدار  $R^2$ ،  $R^2$  adjusted و  $R^2$  predicted به ترتیب برابر با 0.9743، 0.9653 و 0.9489 می‌باشند. مقدار  $R^2$  برای  $R^2$  predicted نشان دهنده این است که مدل می‌تواند 97% تغییرات داده‌های آزمایشگاهی اطراف میانگین آن را شرح دهد. مقدار  $R^2$  predicted برابر با 0.9489 سازگاری معقولی با  $R^2$  adjusted دارد. این نشان دهنده این است که مدل به خوبی منطبق شده و ارتباط خیلی خوبی بین مقادیر پیش‌بینی شده و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد.

جدول 5 آنالیز واریانس برای میزان جذب آب

Table 5 ANOVA for water absorption

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F مقدار	P مقدار	مشارکت (%)
مدل	6	0.32	0.054	107.5	<0.0001	96.66
RP	1	0.027	0.027	52.71	<0.0001	7.78
COM	1	0.11	0.11	212.58	<0.0001	33.02
W	1	0.17	0.17	337.66	<0.0001	51.21
		$R^2=0.9743$	$R^2$ adjusted=0.9653	$R^2$ predicted=0.9489		

جدول 6 نتایج آنالیز واریانس برای استحکام کششی را نشان می‌دهد. طبق جدول 6، همه پارامترها دارای اهمیت می‌باشند زیرا مقدار P برای همه آنها کمتر از 0.05 می‌باشد. پارامتر COM با درصد مشارکت 41.99% با اهمیت-ترین پارامتر بوده و پارامتر RP با درصد مشارکت 18.56% پارامتر با اهمیتی می‌باشد. پارامتر w با درصد مشارکت 3.49% تاثیر قابل توجهی بر استحکام کششی ندارند. بر اساس جدول 6، مقدار  $R^2$ ،  $R^2$  adjusted و  $R^2$  predicted به ترتیب برابر با 0.9156، 0.8858 و 0.8332 می‌باشند. مقدار  $R^2$  برای  $R^2$  predicted نشان دهنده این است که مدل می‌تواند حدود 92% تغییرات داده‌های آزمایشگاهی اطراف میانگین آن را شرح دهد. مقدار  $R^2$  predicted برابر با 0.8332 سازگاری معقولی با  $R^2$  adjusted برابر با 0.8858 دارد. این نشان دهنده این است که مدل به خوبی منطبق شده و ارتباط خوبی بین مقادیر پیش‌بینی شده و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد.

جدول 6 آنالیز واریانس برای استحکام کششی

Table 6 ANOVA for tensile strength

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F مقدار	P مقدار	مشارکت (%)
مدل	6	191.36	31.89	30.74	<0.0001	90.56
RP	1	41.29	41.29	39.80	<0.0001	18.76
COM	1	89.85	89.85	86.62	<0.0001	41.99
W	1	9.38	9.38	9.04	0.0079	3.49
		$R^2=0.9156$	$R^2$ adjusted=0.8858	$R^2$ predicted=0.8332		

جدول 7 نتایج آنالیز واریانس برای مدول کششی را نشان می‌دهد. طبق جدول 7، همه پارامترها دارای اهمیت می‌باشند زیرا مقدار P برای همه آنها کمتر از 0.05 می‌باشد. پارامتر RP با درصد مشارکت 66.34% با اهمیت-ترین پارامتر بوده و پارامتر COM با درصد مشارکت 20.01% پارامتر با اهمیتی می‌باشد. پارامتر w با درصد مشارکت 0.73% تاثیر قابل توجهی بر مدول کششی ندارند. بر اساس جدول 7، مقدار  $R^2$ ،  $R^2$  adjusted و  $R^2$  predicted به ترتیب برابر با 0.9509، 0.9373 و 0.9139 می‌باشند. مقدار  $R^2$  برای  $R^2$  predicted نشان دهنده این است که مدل می‌تواند حدود 95% تغییرات داده‌های آزمایشگاهی اطراف میانگین آن را شرح دهد. مقدار  $R^2$  predicted برابر با 0.9139 سازگاری معقولی با  $R^2$  adjusted برابر با 0.9373 دارد. این نشان

$$WA = 0.59 + 0.045A - 0.082B + 0.084C - 0.022A.B + 0.022A^2 - 0.044B^2 \quad (3)$$

$$TS = 28.37 + 1.78A + 2.38B - 0.63C + 0.79A.B - 1.13A^2 - 2.44B^2 \quad (4)$$

$$M = 3322.72 + 591.89A + 298.38B + 60.42C + 118.98A.B - 201.87B^2 \quad (5)$$

$$IE = 2.45 - 0.24A + 0.16B - 0.087C - 0.071A.B - 0.14A^2 \quad (6)$$

متغیرهای کدشده بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$A = \frac{RP-17.5}{17.5}; B = \frac{COM-8}{4}; C = \frac{W-35}{5}$$

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1 آنالیز واریانس برای پارامترهای خروجی (پاسخ‌ها)

اثر پارامترهای ورودی از قبیل RP، COM و w روی پارامترهای خروجی (پاسخ‌ها) در این بخش بررسی خواهد شد. برای بررسی اثر هر پارامتر روی پاسخ و تعیین اهمیت مدل و هر پارامتر، آنالیز واریانس در سطح اهمیت 5% و سطح اطمینان 95% انجام شد. جدول 4 نتایج آنالیز واریانس برای چگالی را نشان می‌دهد. پارامترهای مهم این جدول عبارتند از: مقدار F (آزمون آماری فیشر)، مقدار P،  $R^2$  (ضریب همبستگی)،  $R^2$  adjusted و  $R^2$  predicted. آخرین ستون جدول 4 (درصد مشارکت) نشان دهنده درصد تاثیر هر پارامتر بر پاسخ است. هر پارامتری که دارای مقدار P کمتر از 0.05 باشد دارای اهمیت است، و با اهمیت-ترین پارامتر دارای بیشترین مقدار F (یا بیشترین مقدار درصد مشارکت) می‌باشد. بر این اساس و مطابق با جدول 4، همه پارامترها دارای اهمیت می‌باشند زیرا مقدار P برای همه آنها کمتر از 0.05 می‌باشد. پارامتر RP با درصد مشارکت 79.78% با اهمیت-ترین پارامتر می‌باشد. پارامترهای دیگر تاثیر قابل توجهی بر چگالی ندارند. بر اساس جدول 4، مقدار  $R^2$ ،  $R^2$  adjusted و  $R^2$  predicted به ترتیب برابر با 0.9704، 0.9660 و 0.9582 می‌باشند. مقدار ایده‌آل برای  $R^2$  برابر با یک است. مقدار  $R^2$  برای  $R^2$  predicted نشان دهنده این است که مدل می‌تواند 97% تغییرات داده‌های آزمایشگاهی اطراف میانگین آن را شرح دهد. مقدار  $R^2$  predicted برابر با 0.9582 سازگاری معقولی با  $R^2$  adjusted برابر با 0.9660 دارد. این نشان دهنده این است که مدل به خوبی منطبق شده و ارتباط خیلی خوبی بین مقادیر پیش‌بینی شده و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد.

جدول 4 آنالیز واریانس برای چگالی

Table 4 ANOVA for density

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F مقدار	P مقدار	مشارکت (%)
مدل	5	28348.30	9449.43	218.65	<0.0001	96.75
RP	1	23394.86	23394.86	541.34	<0.0001	79.78
COM	1	2730.06	2730.06	63.17	<0.0001	9.04
W	1	2223.37	2223.37	51.45	<0.0001	7.31
		$R^2=0.9704$	$R^2$ adjusted=0.9660	$R^2$ predicted=0.9582		

جدول 5 نتایج آنالیز واریانس برای میزان جذب آب را نشان می‌دهد. بر اساس جدول 5، همه پارامترها دارای اهمیت می‌باشند زیرا مقدار P برای همه آنها کمتر از 0.05 می‌باشد. پارامتر w با درصد مشارکت 51.21% با اهمیت-ترین پارامتر بوده و پارامتر COM با درصد مشارکت 33.02% پارامتر با اهمیتی می‌باشد. پارامتر RP با درصد مشارکت 7.78% تاثیر قابل توجهی بر

که در آن  $w_i (i=1,2,\dots,N)$  مقادیر جریمه برای نقض توابع قید می‌باشند.

### 3-3-اهداف و قیود

هدف اصلی این تحقیق، تعیین پارامترهای بهینه (COM, RP) و  $w$  برای رسیدن به بیشینه مقدار استحکام مخصوص ( $\sigma^*$ ) یا کمینه مقدار  $\sigma^*$  - با در نظر گرفتن میزان جذب آب، مدول کششی و انرژی ضربه به عنوان قیود می‌باشد. از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله بهینه سازی و تعیین پارامترهای بهینه استفاده شد. برای رسیدن به این هدف، GA به تابع هدف و توابع قیود نیاز دارد. برای این منظور تابع مقیدی با عنوان  $\sigma^*$ -constrained به عنوان تابع برای بهینه سازی در نظر گرفته شد، بطوریکه این تابع ترکیبی از  $\sigma^*$  - به عنوان تابع هدف و توابع قید وزن داری که از RSM به دست آمده (WA, M) و (IE) می‌باشد. استحکام مخصوص ( $\sigma^*$ ) به عنوان تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma^* \left( \frac{\text{MPa.m}^3}{\text{kg}} \right) = \frac{TS \text{ (MPa)}}{\rho \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} \quad (8)$$

به عنوان مورد مورد مطالعه در این تحقیق، بیشینه مقادیر مجاز برای میزان جذب آب 0.65%، و کمینه مقدار مجاز برای مدول کششی، و انرژی ضربه به ترتیب 3600 MPa و 2.5 J/m<sup>2</sup> به عنوان قیود در نظر گرفته شد. "شکل 1" ساختار مدل مقید پیشنهادی که بایستی توسط GA بهینه شود را نمایش می‌دهد. تابع هدف در بهینه‌سازی توسط GA بصورت زیر می‌باشد:

$$\text{objective: } \min \text{ constrained-}\sigma^* = -\frac{TS}{\rho} + \quad (9)$$

$$w_1 \begin{cases} 1 \text{ if } WA(RP; COM; W) \geq 0.65 \\ 0 \text{ if } WA(RP; COM; W) < 0.65 \end{cases} +$$

$$w_1 \begin{cases} 1 \text{ if } WA(RP; COM; W) < 3600 \\ 0 \text{ if } WA(RP; COM; W) \geq 3600 \end{cases} +$$

$$w_1 \begin{cases} 1 \text{ if } WA(RP; COM; W) < 2.5 \\ 0 \text{ if } WA(RP; COM; W) \geq 2.5 \end{cases}$$

### 3-4-بهینه سازی توسط GA

فرآیند بهینه‌سازی با نوشتن کد الگوریتم ژنتیک در نرم افزار MATLAB برای حل معادله مقید 11 انجام شد. تنظیم پارامترهای GA تاثیر شایانی روی کارایی و کیفیت کد GA دارد، بطوریکه اگر پارامترهای GA به درستی تنظیم نشود، GA نمی‌تواند جواب درستی بدهد. معمولاً جواب‌های GA از طریق سعی و خطا به دست می‌آید. در این تحقیق با انجام چندین اجرای کد و همچنین براساس مطالعات قبلی، پارامترهای زیر برای انجام بهینه سازی در نظر گرفته شد:

نوع تابع: Double vector

اندازه جمعیت: 50

تابع تقاطع: متوسط<sup>۴</sup>

نرخ تقاطع: 0.8

نرخ مهاجرت: 0.08

تعداد نسل: 400

دهنده این است که مدل به خوبی منطبق شده و ارتباط خیلی خوبی بین مقادیر پیش‌بینی شده و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد.

جدول 7 آنالیز واریانس برای مدول کششی

Table 7 ANOVA for tensile modulus

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P	مشارکت (%)
مدل	5	6525000	1305000	69.71	<0.0001	94.54
RP	1	4590000	4590000	245.17	<0.0001	66.34
COM	1	1411000	1411000	75.38	<0.0001	20.01
W	1	87604	87604	4.68	0.0442	0.73
		$R^2 \text{ predicted}=0.9139$	$R^2 \text{ adjusted}=0.9373$	$R^2=0.9509$		

جدول 8 نتایج آنالیز واریانس برای انرژی ضربه را نشان می‌دهد. طبق جدول 8، همه پارامترها دارای اهمیت می‌باشند زیرا مقدار P برای همه آنها کمتر از 0.05 می‌باشد. پارامتر RP با درصد مشارکت 44.84% با اهمیت‌ترین پارامتر بوده و پارامتر COM با درصد مشارکت 24.84% پارامتر با اهمیت می‌باشد. پارامتر w با درصد مشارکت 9.69% تاثیر قابل توجهی بر انرژی ضربه ندارند. بر اساس جدول 8، مقدار  $R^2$  adjusted،  $R^2$  predicted و  $R^2$  به ترتیب برابر با 0.8880، 0.8568 و 0.7969 می‌باشند. مقدار  $R^2$  برابر با 0.8880 نشان دهنده این است که مدل می‌تواند حدود 89% تغییرات داده‌های آزمایشگاهی اطراف میانگین آن را شرح دهد. مقدار  $R^2$  predicted برابر با 0.7969 سازگاری معقولی با  $R^2$  adjusted برابر با 0.8568 دارد. این نشان دهنده این است که مدل به خوبی منطبق شده و ارتباط نسبتاً خوبی بین مقادیر پیش‌بینی شده و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد.

جدول 8 آنالیز واریانس برای انرژی ضربه

Table 8 ANOVA for impact energy

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P	مشارکت (%)
مدل	5	1.47	0.29	28.53	<0.0001	87.87
RP	1	0.76	0.76	74.42	<0.0001	44.84
COM	1	0.43	0.43	41.72	<0.0001	24.84
W	1	0.18	0.18	17.71	0.0005	9.69
		$R^2 \text{ predicted}=0.7969$	$R^2 \text{ adjusted}=0.8568$	$R^2=0.8880$		

### 3-2-بهینه سازی مقید

بسیاری از مسائل عملی مهندسی می‌بایستی نسبت به برخی قیود بهینه شوند. پارامترهای ورودی در نقطه بهینه نباید مجاز باشند که از مقایر بحرانی مشخص شده برای قیود فراتر روند. مقادیر بحرانی توسط مصرف کننده محصول تعیین می‌شوند. تکنیک‌های متنوعی برای حل مسائل بهینه سازی مقید وجود دارد. یکی از ساده‌ترین و در عین حال موثرترین این تکنیک‌ها، تکنیک تابع جریمه<sup>۱</sup> می‌باشد. در این روش، یک تابع برازش جدید،  $F(x)$ ، تعریف می‌شود. تابع  $F(x)$  ترکیبی از توابع قید وزن دار شده،  $p_i(x)$  و تابع هدف،  $f(x)$  می‌باشد. تابع  $F(x)$  به صورت زیر تعریف می‌شود [21]:

$$F(x) = f(x) + \sum_{i=1}^N w_i p_i(x) \quad (7)$$

<sup>1</sup> Penalty function technique

<sup>2</sup> Population size

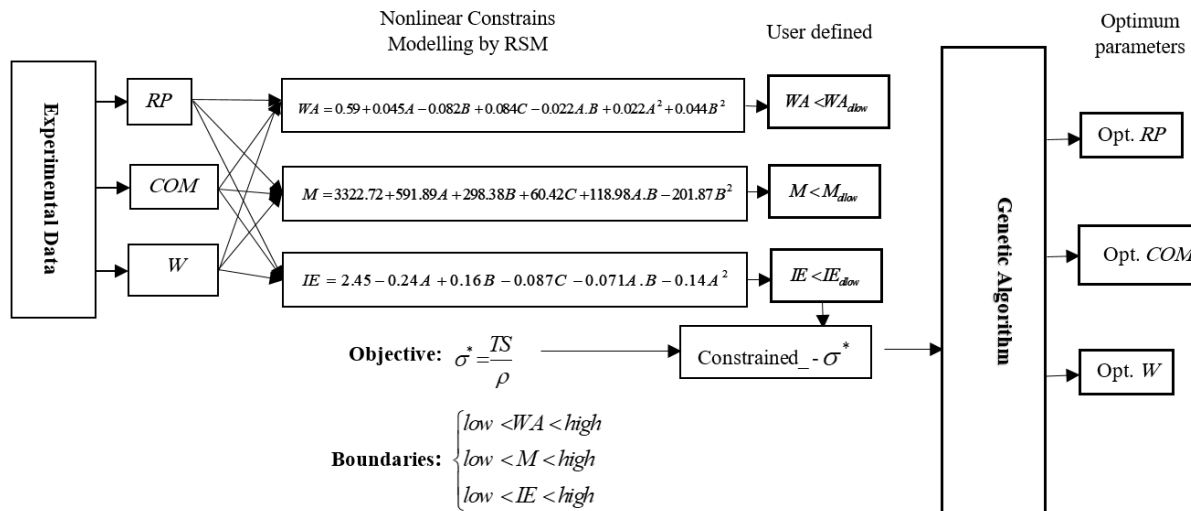
<sup>3</sup> Crossover function

<sup>4</sup> Intermediate

<sup>5</sup> Crossover rate

<sup>6</sup> Mutation rate

<sup>7</sup> Number of generation



شکل 1 ساختار مدل مقید پیشنهادی GA برای خواص مکانیکی

Fig. 1 The architecture of the proposed constrained GA for mechanical properties

ابزار مناسبی برای بهینه‌سازی مقید می‌باشد. درجه اهمیت مدل توسعه‌یافته و پارامترهای ورودی توسط ANOVA تعیین شد. نتایج ANOVA نشان داده که پارامتر RP موثرترین پارامتر برای چگالی (با درجه اهمیت 80%)، مدول کششی (با درجه اهمیت 66.3%) و انرژی ضربه (با درجه اهمیت 45%) است، درحالی‌که پارامترهای W و COM به ترتیب موثرترین پارامتر برای جذب آب (با درجه اهمیت 51.2%) و استحکام کششی (با درجه اهمیت 42%) هستند. به علاوه، ANOVA نشان داد که مدل توسعه‌یافته از پایه RSM برای پیش‌بینی خواص مکانیکی و فیزیکی چوب-پلاستیک بر پایه PP/HDPE/rPET به‌دست آمده، موثر است.

جدول 9 پارامترهای بهینه بدست آمده از GA را نشان می‌دهد. مقایسه مقادیر بهینه پیش‌بینی شده با نتایج تجربی نشان می‌دهد که روش مورد استفاده در این تحقیق کارآمد می‌باشد. براساس داده‌های خطا در جدول 9 سازگاری خوبی بین داده‌های پیش‌بینی شده و آزمایشگاهی وجود دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که جفت شدن RSM و GA ابزار مناسبی برای پیش‌بینی مقادیر بهینه RP، COM و W به منظور پیش‌بینی کردن  $\sigma^*$  با توجه به قيود میزان جذب آب، مدول کششی و انرژی ضربه می‌باشد.

جدول 9 پارامترهای بهینه

Table 9 Optimum parameters

RP (phr)	COM (phr)	W (%wt.)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) Pre.	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) Exp.	Error (%)
25	10	30	1105	1040	6
TS (MPa) Exp.	TS (MPa) Pre.	Error (%)	WA (%) Exp.	WA (%) Pre.	Error (%)
29.5	30.1	2	0.48	0.5	4
M (MPa) Exp.	M (MPa) Pre.	Error (%)	IE (J/m <sup>2</sup> ) Exp.	IE (J/m <sup>2</sup> ) Pre.	Error (%)
3710	3640	2	2.52	2.5	0.8
$\sigma^*$	$\sigma^*$	Error (%)			
(MPa.kg/m <sup>3</sup> ) Exp.	(MPa.kg/m <sup>3</sup> ) Pre.				
0.026	0.03	13			

#### 4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، بهینه‌سازی مقید براساس RSM و GA برای خواص مکانیکی و فیزیکی چوب-پلاستیک بر پایه PP/HDPE/rPET انجام شد. از RSM به منظور ایجاد رابطه ریاضی بین پارامترهای ورودی (RP، COM و W) و خروجی (استحکام کششی، مدول کششی، انرژی ضربه، چگالی و میزان جذب آب) استفاده شد. برای بهینه‌کردن استحکام مخصوص (نسبت استحکام کششی به چگالی) با توجه به قيودی از قبیل مدول کششی، میزان جذب آب و انرژی ضربه از GA استفاده شد. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که پارامترهای بهینه بدست آمده شامل 25 phr از RP، 10 phr از COM و 30 wt.% از W می‌باشد. تایید نتایج بهینه‌سازی با آزمون تجربی نشان داد که سازگاری خوبی بین مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده وجود دارد، و بنابراین روش پیشنهاد شده

#### 5- فهرست علائم

ANALIZ واریانس	ANOVA
سازگارکننده	COM
الگوریتم ژنتیک	GA
پلی اتیلن چگالی بالا	HDPE
انرژی ضربه (J)	IE
مدول الاستیک (مدول کششی) (MPa)	M
پلی پروپیلن	PP
پلی اتیلن ترفتالات بازیافتی	RP, rPET
روش سطح پاسخ	RSM
میکروسکوپ الکترونی روبشی	SEM
استحکام کششی (MPa)	TS
پودر چوب (%)	W
میزان جذب آب (%)	WA

#### علائم یونانی

چگالی (kg.m <sup>-3</sup> )	$\rho$
استحکام مخصوص (MPa.m <sup>3</sup> .kg)	$\sigma^*$

## 6- مراجع

- [19] Rao, S., Sethi, A., Das, A. K., Mandal, N., Kiran, P., Ghosh, R., Dixit, A. and Mandal, A., "Fiber Laser Cutting of Cfrp Composites and Process Optimization through Response Surface Methodology" *Materials and Manufacturing Processes*, pp. 1-10, 2017.
- [20] Shahrajabian, H. and Farahnakian, M., "Modeling and Multi-Constrained Optimization in Drilling Process of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composite" *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 14, No. 10, pp. 1829-1837, October 01, 2013.
- [21] Deb, K., "An Efficient Constraint Handling Method for Genetic Algorithms" *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol. 186, No. 2, pp. 311-338, 2000.
- [1] Ashori, A. and Bahreini, Z., "Evaluation of Calotropis Gigantea as a Promising Raw Material for Fiber-Reinforced Composite" *Journal of Composite Materials*, Vol. 43, No. 11, pp. 1297-1304, 2009.
- [2] Al-Maadeed, M., Shabana, Y. M. and Khanam, P. N., "Processing, Characterization and Modeling of Recycled Polypropylene/Glass Fibre/Wood Flour Composites" *Materials & Design*, Vol. 58, pp. 374-380, 2014.
- [3] Bajracharya, R. M., Manalo, A. C., Karunasena, W. and Lau, K.-t., "An Overview of Mechanical Properties and Durability of Glass-Fibre Reinforced Recycled Mixed Plastic Waste Composites" *Materials & Design (1980-2015)*, Vol. 62, pp. 98-112, 2014.
- [4] Nourbakhsh, A. and Ashori, A., "Wood Plastic Composites from Agro-Waste Materials: Analysis of Mechanical Properties" *Bioresource technology*, Vol. 101, No. 7, pp. 2525-2528, 2010.
- [5] Welle, F., "Twenty Years of Pet Bottle to Bottle Recycling—an Overview" *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 55, No. 11, pp. 865-875, 2011.
- [6] Ge, Z., Huang, D., Sun, R. and Gao, Z., "Properties of Plastic Mortar Made with Recycled Polyethylene Terephthalate" *Construction and Building Materials*, Vol. 73, pp. 682-687, 2014.
- [7] Lei, Y. and Wu, Q., "Wood Plastic Composites Based on Microfibrillar Blends of High Density Polyethylene/Poly (Ethylene Terephthalate)" *Bioresource technology*, Vol. 101, No. 10, pp. 3665-3671, 2010.
- [8] Rahman, K. S., Islam, M. N., Rahman, M. M., Hannan, M. O., Dungani, R. and Khalil, H. A., "Flat-Pressed Wood Plastic Composites from Sawdust and Recycled Polyethylene Terephthalate (Pet): Physical and Mechanical Properties" *SpringerPlus*, Vol. 2, No. 1, pp. 629, 2013.
- [9] Lei, Y. and Wu, Q., "High Density Polyethylene and Poly (Ethylene Terephthalate) in Situ Sub-Micro-Fibril Blends as a Matrix for Wood Plastic Composites" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, No. 1, pp. 73-78, 2012.
- [10] Shahrajabian, H., and Maleki, A.R., "Investigation of the Physical and Mechanical Properties of Wood Plastic Composites Based on High Density Polyethylene/ Polypropylene/Recycled Poly (ethylene terephthalate)" *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. \*, No. \*, pp. \*-\*, \*\*.
- [11] Soury, E., Behraves, A., Esfahani, E. R. and Zolfaghari, A., "Design, Optimization and Manufacturing of Wood-Plastic Composite Pallet" *Materials & Design*, Vol. 30, No. 10, pp. 4183-4191, 2009.
- [12] Jafari, M. and Rohani, A., "Optimization of Perforated Composite Plates under Tensile Stress Using Genetic Algorithm" *Journal of Composite Materials*, Vol. 50, No. 20, pp. 2773-2781, 2016.
- [13] Shah, P., Halls, V., Zheng, J. and Batra, R., "Optimal Cure Cycle Parameters for Minimizing Residual Stresses in Fiber-Reinforced Polymer Composite Laminates" *Journal of Composite Materials*, Vol. 0, No. 0, pp. 0021998317714317.
- [14] Shahbazi karami, J., Sheikhi, M.M., Manafi, D., and Chaechi, O., "Optimization of Internal Pressure and Axial Feed in Metal composite Al-Cu Tubes Hydroforming Process with Genetic Algorithm" *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 3, pp. 275-282, 2017.
- [15] Mojabi, Sh.S., and Kheirikhah, M.M., "Modeling and Intelligent Control of Vibration of Cantilever Composite Plate Embedded with Shape Memory Alloy Wires" *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 4, pp. 363-374, 2018.
- [16] Shokrieh, M.M., Damirchiloo, S., and Salamat-talab, M., "Determination of Cohesive Zone Parameters in Mode I delamination Growth of a Double Cantilever Beam Specimen Using Inverse Method" *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 1, pp. 83-90, 2017.
- [17] Bhowmik, S. and Ray, A., "Prediction and Optimization of Process Parameters of Green Composites in Awjm Process Using Response Surface Methodology" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 87, No. 5-8, pp. 1359-1370, 2016.
- [18] Vahdatazad, N., Ebrahimi, S., and Liaghat Gh., "Oblique Crashworthiness Optimization and Sensitivity Analysis of Tapered Sandwich Columns" *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 1, pp. 25-34, 2017.

