



## مدل سازی ساده المان محدود ساختارهای صفحه‌ای کامپوزیتی با استفاده از روش پردازش تصویر دیجیتال در متلب

شهاب عشقی<sup>۱</sup>، حامد رجبی<sup>۲</sup>، ابوالفضل درویشه<sup>۳</sup>، وحید نورائی فر<sup>۴</sup>، مجید علی طاولی<sup>۵</sup>، هاشم بابایی<sup>۶</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
  - ۲- مربی، مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی احرار، رشت
  - ۳- استاده، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد انزلی، بندرانزلی
  - ۴- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
  - ۵- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
  - ۶- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
- \* رشت، صندوق پستی ۶۳۵۸۴-۴۱۹۳۱، harajabi@ahrar.ac.ir

### چکیده

در این مقاله، روشی جدید برای مدل‌سازی المان محدود ساختارهای صفحه‌ای متشکل از چند ماده متفاوت با استفاده از تنها یک تصویر ورودی اریه شده است. این روش که در یک برنامه متلب تعبیه شده مبتنی بر پردازش تصویر دیجیتال می‌باشد. پس از انتخاب یک عکس دیجیتال توسط کاربر، برنامه به‌طور اتوماتیک تصویر ورودی را به فرمت باینری تبدیل می‌کند. سپس، سطح داخل ساختار مدنظر در عکس ورودی و مرز آن بر اساس اختلاف رنگ پیکسل‌های تشکیل دهنده شناسایی می‌شوند. مرز ساختار و سطح داخلی تشخیص داده شده به‌طور جداگانه و با اتصال پیکسل‌های آن‌ها به یکدیگر المان‌بندی می‌شوند. خروجی برنامه یک فایل در فرمت آی‌ان‌پی است که شامل مختصات نقاط مدل المان محدود، نحوه اتصال آن‌ها و همچنین ماده تشکیل دهنده هر مقطع می‌باشد که در طی فرآیند مدل‌سازی توسط کاربر تعیین شده است. نتایج حاصل بیانگر دقت بسیار بالای روش در مدل‌سازی ساختارهای صفحه‌ای کامپوزیتی با شکل هندسی پیچیده در مدت زمان بسیار کوتاه است. همچنین، نتایج به‌دست آمده از تحلیل عددی مدل خروجی دارای مطابقت کمی و کیفی مطلوب با نتایج تجربی ارایه شده پیشین می‌باشد. روش پیشنهاد شده در این مقاله زمینه مستحکم‌تری را برای مدل‌سازی‌های واقع‌گرایانه آینده از ساختارهای صفحه‌ای کامپوزیتی فراهم می‌نماید.

### اطلاعات مقاله

دریافت: ۹۴/۷/۱۸  
پذیرش: ۹۵/۱۱/۱۰

### کلیدواژگان:

کامپوزیت  
مدل‌سازی  
المان محدود  
پردازش تصویر  
ساختار چندماده‌ای

## Simple finite element modeling of planar composite structures using digital image processing technique in Matlab

Shahab Eshghi<sup>1</sup>, Hamed Rajabi<sup>2</sup>, Abolfazl Darvizeh<sup>3</sup>, Vahid Nooraefar<sup>1</sup>, Majid Alitavoli<sup>1</sup>, Hashem Babaei<sup>1</sup>

- 1-Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran  
2-Department of Mechanical Engineering, Ahrar Institute of Technology and Higher Education, Rasht, Iran  
3-Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Anzali Branch, Bandar Anzali, Iran  
\*P.O.B. 41931-63584, Rasht, Iran, harajabi@ahrar.ac.ir

### Keywords

Composite  
Modeling  
Finite element  
Image processing  
Multi-material structures

### Abstract

In this article, a new method for finite element modeling of planar multi-material structures, using only an input image, has been presented. This method which is implemented in a Matlab program is based on digital image processing technique. After importing a digital image by the user, the program automatically converts it into a binary format. The inner part and the boundary of the desired structure in the input image are recognized based on the difference between the colors of their pixels. These two regions are meshed separately by connecting their pixels to each other. The output of the program is a file in INP format which includes the coordinates of the nodes of the finite element model, their connections and the material of each part which has been defined by the user during the modeling process. The obtained results indicate the high accuracy of the method in the modeling of planar composite structures with complicated geometries in a very short time. Further, the results from the numerical analysis of the output model are in a good qualitative and quantitative agreement with the previous experimental data. The presented method in this article provides a strong background for future realistic modeling of planar composite structures.

### Please cite this article using:

Eshghi, S. Rajabi, H. Darvizeh, A. Nooraefar, V. Alitavoli, M. and Babaei, H., "Simple finite element modeling of planar composite structures using digital image processing technique in Matlab", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 2, pp. 195-202, 2016.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

## ۱-۱- تاریخچه

مطالعه بر روی مبانی طراحی در سیستم‌های زیستی از اوایل قرن ۲۰ میلادی مورد توجه دانشمندانی چون تامسون قرار گرفت [۱]. او برای نخستین بار از دید مهندسی به این ساختارهای طبیعی نگاه کرد و رابطه‌ای ریاضی برای توصیف شکل هندسی آن‌ها ارائه نمود. پس از او، افرادی همچون کاری و وینسنت با الگو برداشتن از دیدگاه تامسون به انجام مطالعاتی در زمینه مکانیزم عملکرد استخوان‌ها و ساختارهای حیاتی پرداختند که منجر به ارائه ایده‌هایی برای استفاده از ساختارهای زیستی در تکنولوژی گردید [۲، ۳]. از آنجایی که ساختار هندسی مواد زیستی تاثیر بسزایی در نحوه عملکرد و به ویژه رفتار مکانیکی آن‌ها دارد، مطالعه دقیق آن به منظور الگوبرداری برای ساخت سیستم‌های مهندسی حائز اهمیت می‌باشد [۴-۷].

با توجه به دشوار بودن انجام تست‌های تجربی بر روی بسیاری از مواد زیستی، مدل‌سازی عددی از جمله پرکاربردترین روش‌های مطالعه این قبیل ساختارها است. اولین قدم در این راه، تهیه مدلی مناسب و دقیق از ساختار مورد نظر می‌باشد. اما مدل‌سازی بسیاری از ساختارهای حیاتی از جمله بال حشرات به دلیل پیچیدگی هندسی و خصوصاً برخورداری آن‌ها از یک ساختار کامپوزیتی، پروسه‌ای سخت و زمان‌بر است [۸-۱۹]. به علاوه، مدل‌سازی چنین ساختارهایی توسط یک کاربر احتمال بروز خطای انسانی در مدل‌سازی را تا حد زیادی افزایش می‌دهد. از این رو ارائه روشی که بتواند در مدت زمانی کوتاه مدلی دقیق از این قبیل ساختارها با هندسه پیچیده تولید نماید، بسیار ارزشمند خواهد بود. انجام فرآیند مدل‌سازی با استفاده از تصویر ساختار مدنظر می‌تواند به طور قابل توجهی به دقت مدل نهایی بیافزاید.

استفاده از تصویر یک ساختار برای ایجاد مدلی از آن توسط برخی محققین مورد توجه قرار گرفته است. اما، بیشتر این تحقیقات در زمینه مدل‌سازی ساده از ساختار سنگ‌ها و بررسی خواص مکانیکی آن‌ها و همچنین محاسبه مقدار درصد عناصر مختلف در مواد تشکلی دهنده آن‌ها بوده است [۲۰-۲۶].

هدف از این مقاله ارائه روشی برای مدل‌سازی نیمه اتوماتیک یک جسم کامپوزیتی صفحه‌ای از روی تصویر ساختار آن می‌باشد، به طوری که امکان تفکیک و تشخیص مواد گوناگون در ساختار ماده وجود داشته باشد. کد الگوریتم ارائه شده در زبان متلب<sup>۱</sup> نوشته شده است و خروجی آن فایل آبی‌ان‌پی<sup>۲</sup> است که فایل قابل استفاده توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس<sup>۳</sup> می‌باشد.

## ۱-۲- بررسی انواع تصویر

پردازش تصویر به منظور ایجاد تغییر در یک عکس انجام می‌پذیرد. این تغییر به منظور: (۱) افزایش اطلاعات تصویر جهت درک بهتر از آن و (۲) آماده کردن تصویر به منظور استفاده در کارهای مختلف انجام می‌شود. تصاویر دیجیتال از مجموعه پیکسل‌هایی تشکیل می‌شوند که هر کدام از آن‌ها رنگ خاصی را به خود اختصاص می‌دهند و مجموع آن‌ها در کنار یکدیگر یک تصویر کامل را به وجود می‌آورد. در تصاویر دیجیتال هر پیکسل، بسته به نوع تصویر، با یک یا چند عدد تعریف می‌شود. به طور کلی چهار نوع تصویر دیجیتال وجود دارد:

(۱) تصاویر باینری<sup>۴</sup> که پیکسل‌های آن‌ها فقط شامل رنگ‌های سفید و سیاه می‌باشند. در این گونه تصاویر، هر پیکسل سفید با عدد یک و هر پیکسل مشکی با عدد صفر مشخص می‌شود. نوشته‌های تایپ شده، اثر انگشت یا نقشه‌های عمرانی جزو چنین تصاویری می‌باشند که در آن‌ها حضور رنگی غیر از سفید و مشکی غیر ضروری است.

(۲) تصاویر خاکستری<sup>۵</sup> که شامل بازه رنگ سیاه تا سفید می‌باشند. عدد پیکسل در این تصاویر بین صفر تا ۲۵۵ تغییر می‌کند و در نتیجه پیکسل‌ها در ۲۵۶ سطح از بازه رنگ توسط قرار می‌گیرند. عدد صفر نشان دهنده رنگ سیاه و عدد ۲۵۵ بیانگر رنگ سفید می‌باشد. چنین عکس‌هایی جزئیات بیشتری نسبت به عکس‌های نوع اول نمایش می‌دهند. تصاویر گرفته شده توسط اشعه ایکس جزو این گونه تصاویر است.

(۳) تصاویر با رنگ واقعی یا آر‌جی‌بی<sup>۶</sup> که در آن‌ها هر پیکسل رنگ خاص خود را دارد. هر پیکسل با مقادیری از رنگ قرمز، سبز یا آبی مشخص می‌شود و اعداد این مقادیر در بازه صفر تا ۲۵۵ تغییر می‌کنند. ۲۵۶ بازه مختلف رنگ برای سه رنگ اصلی به این معنا است که می‌توان ۲۵۶<sup>۳</sup> رنگ تولید نمود و این مقدار رنگ برای تولید یک عکس واقعی کافی است.

(۴) با توجه به توضیحات تصاویر رنگی، حدود ۱۶ میلیون رنگ می‌توان تولید نمود که این رنگ‌ها در کنار یکدیگر یک نقشه از همه رنگ‌های موجود را نشان می‌دهند. در اینگونه عکس‌ها رنگ هر پیکسل تنها با اندیسی در میان ۱۶ میلیون رنگ در نقشه گستره رنگ‌ها<sup>۷</sup> مشخص می‌شود. با اختصاص دادن آدرس به هر کدام این رنگ‌ها می‌توان تصاویر با حجم کمتر نسبت به عکس‌های آر‌جی‌بی تولید نمود که به آن‌ها تصاویر ایندکس<sup>۸</sup> می‌گویند.

## ۲- مواد و روش‌ها

## ۲-۱- مدل‌سازی عددی

## ۲-۱-۱- آماده‌سازی تصویر ورودی

فرآیند مدل‌سازی با انتخاب تصویری از ساختار مدنظر توسط کاربر شروع می‌شود. تصویر مورد نیاز برای ورودی برنامه از نوع اول یعنی باینری است. از این رو در صورت انتخاب یک تصویر رنگی توسط کاربر، این تصویر ورودی به کمک تابعی در متلب با نام 'rgb2gray' تبدیل به یک عکس خاکستری می‌شود. در مرحله بعد ماتریس عکس خاکستری که شامل اعدادی در بازه صفر تا ۲۵۵ می‌باشد بر مقدار ماکسیمم یعنی ۲۵۵ تقسیم می‌گردد. این فرآیند سبب می‌شود تا بازه تغییرات اعداد ماتریس بین صفر و یک قرار گیرد. از آنجایی که نقاط تیره در تصویر مقادیری کمتر از ۰/۵ و در مقابل پیکسل‌های روشن مقادیری بیشتر از ۰/۵ دارند با تبدیل اعداد بزرگتر از ۰/۵ به ۱ و تبدیل اعداد کوچکتر یا مساوی ۰/۵ به صفر می‌توان تصویر موجود را به یک عکس باینری تبدیل نمود. شکل ۱ مراحل تبدیل عکس رنگی به سیاه سفید را نشان می‌دهد. وجود دو رنگ متضاد در یک تصویر باینری می‌تواند به تشخیص اجزای مختلف مدل کمک کند.

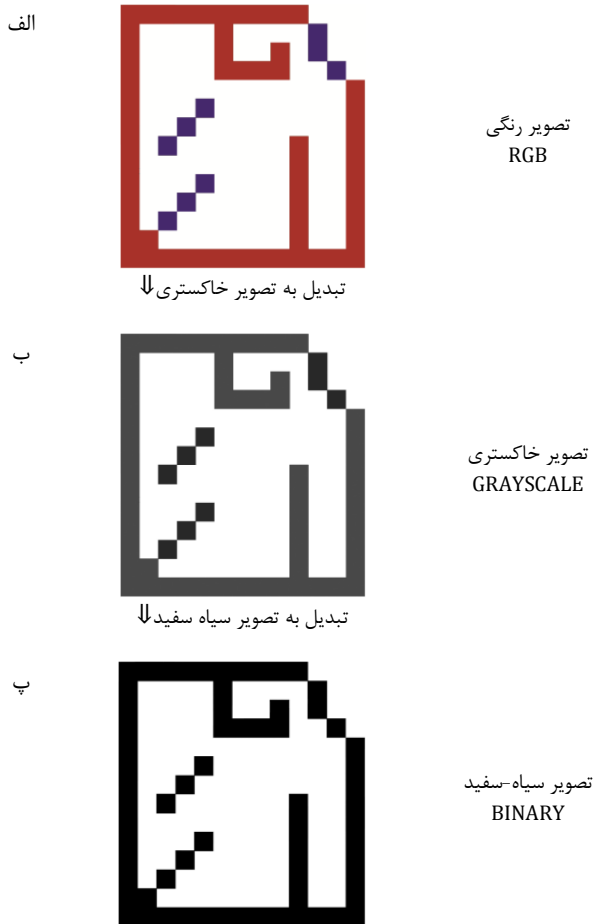
## ۲-۱-۲- موقعیت یابی پیکسل‌های مشکی

در این مرحله موقعیت پیکسل‌های سفید داخل شکل و پیکسل‌های مشکی به صورت جداگانه توسط برنامه مشخص می‌شود. با توجه به اینکه در عکس باینری حاصل از مرحله قبل (عکس ۱پ)، مقدار هر پیکسل مشکی در

4. Binary  
5. Grayscale  
6. RGB  
7. Color map  
8. Index

1. Matlab  
2. INP  
3. Abaqus

همسایگی پیکسل‌های B می‌باشد، به دلیل تغییر رنگ آن، مورد بررسی قرار نمی‌گیرد. با شناسایی پیکسل‌های جدید ( $C_1$  تا  $C_8$ ) آنها نیز به عنوان پیکسل‌های داخل شکل ذخیره می‌شوند. این روند تا جایی ادامه می‌یابد که تمام پیکسل‌های سفید در فضای داخل شکل شناسایی گردند. باید توجه داشت که وجود پیکسل‌های مشکی مانند پیکسل‌های ۶۵ تا ۶۷ در شکل خللی در روند شناسایی پیکسل‌های سفید، با استفاده از این الگوریتم، ایجاد نمی‌کنند. در شکل ۳ تعداد پیکسل‌های شناخته شده در هر مرحله برای مدل شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ مراحل تبدیل تصویر رنگی به تصویر سیاه-سفید (باینری)

63	64	1	2	3	4	12	13	14	15	68	69	70
62	L <sub>4</sub>	K <sub>5</sub>	J <sub>6</sub>	I <sub>13</sub>	5	M <sub>2</sub>	L <sub>1</sub>	K <sub>1</sub>	J <sub>1</sub>	16	71	72
61	K <sub>4</sub>	J <sub>7</sub>	I <sub>12</sub>	H <sub>14</sub>	6	N <sub>1</sub>	M <sub>1</sub>	11	I <sub>1</sub>	17	73	74
60	J <sub>6</sub>	I <sub>11</sub>	H <sub>13</sub>	G <sub>12</sub>	7	8	9	10	H <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	18	75
59	I <sub>10</sub>	H <sub>12</sub>	G <sub>11</sub>	F <sub>11</sub>	E <sub>8</sub>	D <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	F <sub>1</sub>	G <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	19
58	J <sub>1</sub>	I <sub>9</sub>	H <sub>11</sub>	67	D <sub>11</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	E <sub>2</sub>	F <sub>2</sub>	G <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	20
57	I <sub>8</sub>	J <sub>1</sub>	66	D <sub>10</sub>	C <sub>8</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	E <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	G <sub>3</sub>	21
56	H <sub>10</sub>	65	D <sub>9</sub>	C <sub>7</sub>	B <sub>4</sub>	A <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	37	G <sub>4</sub>	H <sub>3</sub>	22
55	G <sub>10</sub>	F <sub>10</sub>	E <sub>7</sub>	D <sub>8</sub>	C <sub>6</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	36	H <sub>4</sub>	I <sub>4</sub>	23
54	H <sub>9</sub>	G <sub>9</sub>	F <sub>9</sub>	49	D <sub>7</sub>	C <sub>5</sub>	D <sub>5</sub>	E <sub>3</sub>	35	I <sub>5</sub>	J <sub>2</sub>	24
53	I <sub>7</sub>	H <sub>8</sub>	48	F <sub>8</sub>	E <sub>6</sub>	D <sub>6</sub>	E <sub>4</sub>	F <sub>4</sub>	34	J <sub>3</sub>	K <sub>2</sub>	25
52	J <sub>5</sub>	47	H <sub>7</sub>	G <sub>8</sub>	F <sub>7</sub>	E <sub>5</sub>	F <sub>5</sub>	G <sub>5</sub>	33	K <sub>3</sub>	L <sub>2</sub>	26
51	46	J <sub>4</sub>	I <sub>6</sub>	H <sub>6</sub>	G <sub>7</sub>	F <sub>6</sub>	G <sub>6</sub>	H <sub>5</sub>	32	L <sub>3</sub>	M <sub>3</sub>	27
50	45	44	43	42	41	40	39	38	31	30	29	28

شکل ۲ شبیه‌سازی پیکسل‌های شکل

ماتریس عکس معادل صفر می‌باشد، می‌توان با استفاده از دستور 'find' در متلب موقعیت آن‌ها را در ماتریس تصویر به صورت یکپارچه مشخص نمود. به این ترتیب، موقعیت پیکسل‌های مشکی، یعنی شماره سطر و ستون آن‌ها در ماتریس تصویر، در یک آرایه سلولی<sup>۱</sup> ذخیره می‌گردد.

### ۲-۱-۳- موقعیت یابی پیکسل‌های سفید

یافتن پیکسل‌های سفید به سادگی پیکسل‌های مشکی نیست. دلیل اول آن وجود پیکسل‌های سفید مزاحم در اطراف شکل ساختار مدنظر در عکس می‌باشد که نمی‌بایست در مدل‌سازی ساختار وارد شوند. دلیل دوم، ساختار پیچیده و نامنظم فضای سفید احاطه شده توسط پیکسل‌های مشکی است که یافتن مرزهای هر ناحیه را دشوار می‌نماید. به علاوه، برنامه می‌بایست قادر باشد که در صورت وجود چندین ناحیه سفید که توسط پیکسل‌های مشکی جدا شده‌اند (به دلیل چند ماده‌ای بودن ساختار ورودی)، آن‌ها را تشخیص دهد و در آرایه‌های سلولی جدا از هم ذخیره نماید. برای این منظور الگوریتمی با نام الگوریتم پیشرو در این مقاله ارائه شده است.

### ۲-۱-۳-۱- الگوریتم پیشرو

شکل ۲ یک شبیه‌سازی از تصویر ۱ است که در آن پیکسل‌ها با حروف و اعداد مختلف نشانه‌گذاری شده‌اند که برای توضیح الگوریتم آماده شده است.

این تصویر دارای سه بخش می‌باشد:

(۱) پیکسل‌های ۱ تا ۶۷ که رنگ سیاه دارند بیانگر ماده‌ای با جنس متفاوت در شکل هستند.

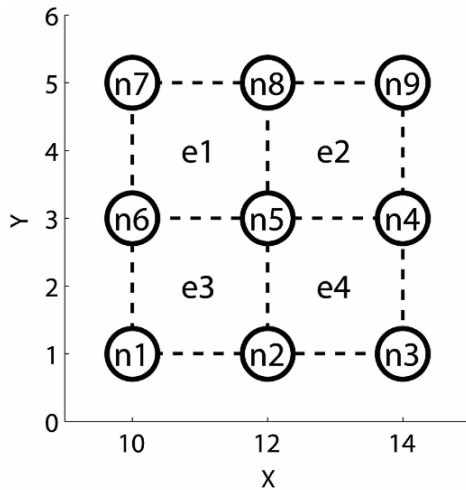
(۲) پیکسل‌های ۶۸ تا ۷۵ که رنگ سفید دارند خارج شکل را نشان می‌دهند.

(۳) بقیه پیکسل‌های سفید که با حروف A تا N نمایش داده شده‌اند، پیکسل‌هایی هستند که درون ساختار مدنظر را تشکیل می‌دهند.

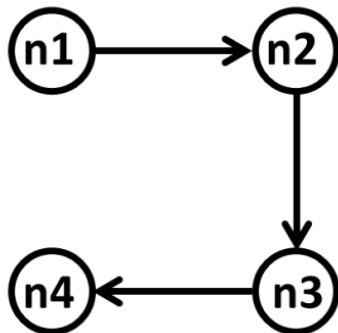
عملکرد الگوریتم پیشرو نیازمند مداخله کاربر می‌باشد. به این منظور، کاربر بر روی پیکسلی مانند A<sub>1</sub> کلیک می‌کند. جایگاه این نقطه در ماتریس تصویر مشخص گردیده و به عنوان اولین پیکسل سفید داخل پوسته شناسایی و ذخیره می‌گردد. عدد مربوط به این پیکسل نیز از ۱ به ۰/۵ تغییر می‌کند. دلیل این تغییر در مقدار پیکسل، عدم شناسایی مجدد آن به عنوان یک پیکسل سفید جدید داخل پوسته در مراحل بعدی می‌باشد. در مرحله بعد، چهار پیکسل B<sub>1</sub> تا B<sub>4</sub> در اطراف A<sub>1</sub> شناسایی می‌شوند. این پیکسل‌ها در سمت چپ، راست، بالا و پایین A<sub>1</sub> قرار دارند. با یافتن پیکسل‌های سفید از میان این چهار پیکسل، مختصات آن‌ها نیز به عنوان نقاط جدید داخل پوسته ذخیره می‌شوند و مقدار پیکسل آن‌ها از ۱ به ۰/۵ تغییر خواهد کرد. دلیل انتخاب تنها چهار پیکسل در چهار طرف بالا، پایین، چپ و راست یک پیکسل سفید این است که اگر چهار نقطه دیگر که در جهت راست-بالا، راست-پایین، چپ-بالا و چپ-پایین قرار دارند نیز مورد بررسی قرار گیرند، این احتمال وجود دارد که الگوریتم به اشتباه نقطه‌ای در خارج از فضای داخل عکس را انتخاب کند. به عنوان مثال پیکسل ۷۵ در شکل ۲ که در صورت عدم رعایت ترتیب ذکر شده می‌تواند پس از شناسایی پیکسل I<sub>3</sub> به عنوان نقطه‌ای در داخل شکل شناسایی شود، در حالی که این پیکسل در فضای خارج از پوسته قرار دارد. در ادامه در اطراف هر یک از نقاط B<sub>1</sub> تا B<sub>4</sub> چهار نقطه جدید پیدا می‌شود و مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این میان، پیکسل A<sub>1</sub> نیز که در

1. Cell

نقطه‌ای و مربع فرض شده‌اند. همچنین فرض بر این است که المان‌های  $e1$  و  $e2$  جنس ماده متفاوتی نسبت به المان‌های  $e3$  و  $e4$  داشته باشند. در نتیجه این ساختار دارای دو مقطع می‌باشد. شکل ۵ ترتیب انتخاب نقاط برای تشکیل یک المان را نشان می‌دهد.



شکل ۴ نقطه‌ها و المان‌های تشکیل دهنده یک مدل ساده

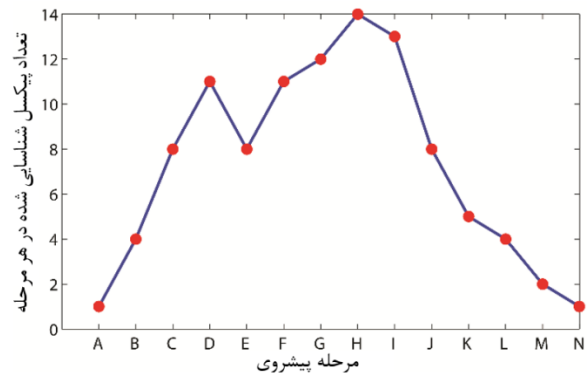


شکل ۵ ترتیب اتصال نقاط برای تولید یک المان

در فایل آی‌ان‌پی هر نقطه از مدل به شکل زیر شماره‌گذاری می‌شود: اولین عدد شماره نقطه، عدد دوم مختصات نقطه در محور  $x$ ، عدد سوم مختصات نقطه در محور  $y$  و عدد چهارم مختصات نقطه در محور  $z$  می‌باشد. در اینجا، به دلیل دو بعدی بودن مدل مختصات  $z$  در همه نقطه‌ها صفر در نظر گرفته شده‌است.

```
*NODE
1, 10, 1, 0
2, 12, 1, 0
3, 14, 1, 0
4, 14, 3, 0
5, 12, 3, 0
6, 10, 3, 0
7, 10, 5, 0
8, 12, 5, 0
9, 14, 5, 0
```

المان‌های مدل با توجه به چگونگی اتصال نقطه‌ها تعریف و شماره‌گذاری می‌شوند. در این مقاله از المان‌های چهار نقطه‌ای (S4R) استفاده می‌شود که



شکل ۶ تعداد پیکسل‌های شناخته شده در هر مرحله برای مدل شکل ۱

الگوریتم شناسایی ارائه شده در چندین مرحله به شناسایی بخش‌های مختلف در عکس ورودی ساختار مدنظر می‌پردازد. تعداد این مراحل و همچنین تعداد پیکسل‌های شناسایی شده در هر مرحله کاملاً وابسته به ابعاد و هندسه شکل است.

مرحله A، به عنوان نخستین مرحله مدل‌سازی، همواره دارای ۱ پیکسل می‌باشد. این پیکسل همان پیکسلی است که با کلیک کاربر انتخاب شده است. تعداد مراحل و تعداد پیکسل‌های پیدا شده در هر مرحله کاملاً وابسته به ساختار پوسته است. با نزدیک شدن به مرزهای شکل تعداد پیکسل‌های جدید یافت شده کاهش می‌یابد تا جایی که در این شکل در آخرین مرحله تنها یک پیکسل شناسایی می‌گردد. شرط اتمام کار الگوریتم این است که پیکسل سفید دیگری در داخل ساختار یافت نشود. با این روش می‌توان هر ناحیه سفید محاط به پیکسل‌های مشکی را شناسایی کرده و مشخصات آن را جداگانه ذخیره نمود. روش ارائه شده در این مقاله امکان تولید مدل‌هایی از ساختارهای صفحه‌ای با چند جنس مختلف در کنار هم را می‌دهد.

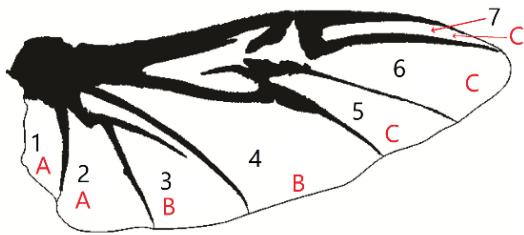
#### ۲-۱-۴- تولید خروجی

آماده‌سازی خروجی آخرین مرحله از فرآیند مدل‌سازی است. در این مرحله آدرس‌های ذخیره شده از پیکسل‌های سیاه و سفید شناسایی شده برای ساخت مدلی مناسب در یک نرم‌افزار تحلیلی المان محدود مانند آباکوس مورد استفاده قرار می‌گیرند. فایل خروجی یک فایل آی‌ان‌پی است که می‌تواند اطلاعاتی در خصوص نحوه المان‌بندی مدل و همچنین جنس مواد تشکیل‌دهنده آن را در برگیرد. از این رو، آدرس نقاط و همچنین ارتباط بین آن‌ها برای تولید المان‌های مدل در غالب این فایل ذخیره می‌گردد. جنس هر ساختار توسط کاربر در هنگام انتخاب نواحی مختلف برای مدل‌سازی قابل تعیین است. زیرا، برنامه به گونه‌ای طراحی شده که پس از مدل‌سازی هر بخش (نواحی بسته احاطه شده توسط پیکسل‌های مشکی) از ساختار ورودی جنس ماده تشکیل دهنده آن شامل مدول الاستیسیته، مدول برشی، استحکام نهایی، ضریب پواسون و چگالی را از کاربر، به عنوان ورودی، درخواست می‌کند. در نتیجه خروجی یک مدل المان‌بندی شده با قابلیت برخورداری از مقطع‌های مختلف و جنس‌های متفاوت خواهد بود.

#### ۲-۱-۴-۱- تولید خروجی آی‌ان‌پی

شکل ۴، چهار المان از مجموعه المان‌ها را نمایش می‌دهد. حرف  $n$  نشان دهنده نقاط تشکیل دهنده المان است که در بخش قبل تولید شد و  $e$  نشان دهنده المان‌های ساختار می‌باشد. این المان‌ها در برنامه به صورت چهار

ذکر است که رفتار ماده تشکیل دهنده بال به صورت الاستیک خطی فرض می‌شود [۲۷].



شکل ۶ شماره گذاری پوسته‌ها و تفکیک جنس آن‌ها



الف

تصویر رنگی  
از بال  
(RGB)

تبدیل به تصویر خاکستری ↓



ب

تصویر  
خاکستری  
(GRAY  
SCALE)

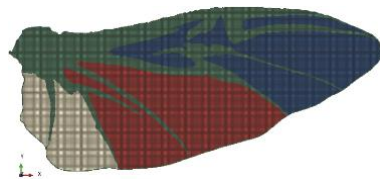
تبدیل به تصویر سیاه سفید ↓



پ

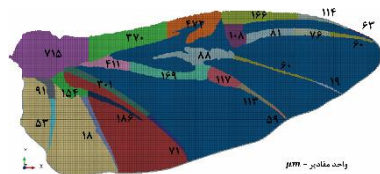
تصویر سیاه-  
سفید  
(BINARY)

تبدیل عکس به مدل نهایی در آباکوس ↓



ت

مدل نهایی  
در آباکوس  
با ضخامت  
ثابت رگه



ث

مدل نهایی  
در آباکوس  
با ضخامت  
متغیر رگه

شکل ۷ مراحل تبدیل تصویر رنگی بال به سیاه-سفید، (الف) تصویر رنگی ورودی [۲۷]، (ب) تبدیل تصویر ورودی به یک تصویر خاکستری، (پ) تبدیل تصویر خاکستری به یک تصویر سیاه-سفید و (ت) مدل وارد شده در نرم‌افزار آباکوس با ضخامت ثابت رگه‌ها، (ث) مدل وارد شده در آباکوس با ضخامت متغیر رگه‌ها

نسبت به المان‌های سه نقطه‌ای (S3R) دامنه استفاده گسترده‌تری دارند. در تعریف المان‌ها، عدد اول نشان‌دهنده شماره المان و اعداد دوم تا پنجم بیانگر شماره نقاطی است که آن المان را تشکیل می‌دهند.

```
*ELEMENT, TYPE=S4R
1,7,8,5,6
2,8,9,4,5
3,6,5,2,1
4,5,4,3,2
```

با توجه به شماره المان‌ها در هر مقطع، مقاطع مختلف طبقه‌بندی و نام‌گذاری می‌شوند. اولین مقطع از المان‌های ۱ و ۲ و همچنین مقطع دوم از المان‌های ۳ و ۴ تشکیل شده است. نام المان اول section1 و المان دوم section2 انتخاب شده است.

```
*Elset, elset=section1
1,2
*Elset, elset=section2
3,4
```

مشخصات جنس مواد تشکیل دهنده مدل وارد و نام‌گذاری می‌شود. به عنوان مثال برای ساختاری متشکل از یک ماده اورتوپوستیک:

```
*Material, name=Material1
*Density
D1
*Elastic, type=LAMINA
E1, E2, E3, 01, 02, 03, G1, G2, G3
*Material, name=Material2
*Density
D2
*Elastic, type=LAMINA
E1, E2, E3, 01, 02, 03, G1, G2, G3
```

در اینجا مشخصات مربوط به دو جنس مختلف تعریف شده است. در تعریف هر ماده باید چگالی، مدول یانگ، ضریب پواسون و مدول برشی به عنوان مشخصه‌های آن ماده وارد شود. در مرحله آخر جنس مربوط به هر مقطع مشخص می‌شود.

```
*shell section, elset=section1, material=Material1
*shell section, elset=section2, material=Material2
```

در اینجا مقطع شماره ۱ دارای جنس شماره ۱ و مقطع ۲ دارای جنس شماره ۲ می‌باشد.

## ۲-۲- آنالیز عددی

روش ارائه شده در این مقاله، برای مدل‌سازی بال سوسکی معروف به سوسک کرگدن<sup>۱</sup> با نام علمی 'Dynastinae' به کار گرفته شد. شکل ۶ شماره گذاری پوسته‌ها و تفکیک جنس آن‌ها را در مراحل مختلف برای مدل شکل الف نشان می‌دهد. شکل ۷ الف بال این سوسک را نشان می‌دهد.

## ۲-۲-۱- بررسی ساختار تشکیل دهنده بال

با توجه به شکل ۶ این بال متشکل از ۷ محیط بسته موسوم به پوسته است که در محاصره رگه‌ها قرار دارند. هر یک از پوسته‌ها جنسی متفاوت نسبت به پوسته دیگر دارد که در شکل با حروف A، B و C مشخص شده‌اند [۲۷]. مشخصات جنس و ضخامت هر یک از پوسته‌ها و رگه‌های بال در جدول ۱ ارائه شده است. جنس رگه‌ها در همه نقاط یکسان فرض می‌شود اما ضخامت آن‌ها در یک مدل ثابت (شکل ۷ت) و برابر با ضخامت متوسط رگه‌ها در بال واقعی و در دیگری متغیر و منطبق با بال حشره می‌باشد (شکل ۷ث). لازم به

1. Rhinoceros beetles

پوسته‌ها (قسمت‌های سفید رنگ) با استفاده از الگوریتم ذکر شده در بخش ۲-۱-۳ با کلیک کاربر در داخل هر یک از آن‌ها شناسایی و در هر مرحله جنس مربوط به آن پوسته توسط کاربر وارد می‌شود. شکل ۸ تعداد پیکسل‌های شناسایی شده در هر مرحله را برای هر یک از پوسته‌های ۱ تا ۷ نشان می‌دهد.

با توجه به نمودار شکل ۸ همه نمودارها با شیب یکسان برابر ۷۵/۹۶ درجه شروع به رشد می‌کنند که علت آن عدم شناسایی پیکسل مشکی توسط موج پیشرو در شروع کار است. با پیشروی موج به سمت دیواره‌ها و برخورد با پیکسل‌های مشکی تعداد پیکسل‌های سفید جدید شناسایی شده کاهش می‌یابد. زمان شروع این کاهش کاملاً به محل کلیک کاربر، ابعاد و هندسه شکل بستگی دارد که دو مورد آخر بسیار تاثیر گذارند.

تعداد پیکسل‌های داخل هر یک از نواحی ۱ تا ۷ در نمودار شکل ۹ آورده شده است. با توجه به این شکل، پوسته شماره ۴ دارای بزرگ‌ترین مساحت می‌باشد. از طرفی با توجه به شکل ۵ این پوسته دارای پیچیدگی زیادی نیست. در نتیجه موج دیرتر به پیکسل‌های مشکی محیط بر پوسته برخورد می‌کند. بنابراین، پایداری شیب موج پیشرو بیشتر است. در نقطه مقابل پوسته شماره ۷ قرار دارد که مساحتی به مراتب کوچکتر از دیگر پوسته‌ها دارد. البته، ناحیه ۱ نیز مساحت اندکی دارد ولی از آنجایی که موج به صورت یکنواخت در همه جهات حرکت می‌کند، در ناحیه ۷ زودتر به دیواره‌ها برخورد کرده است. نمودار مربوط به پوسته شماره ۶ دارای یک حرکت موج‌گونه است. دلیل این امر پیچیدگی هندسه این ناحیه می‌باشد که در طول پیشروی موج همواره با موانع مختلف در شکل برخورد کرده و دوباره مسیری دیگر پیشروی را دنبال می‌کند.

از آنجایی که هر چهار پیکسل در کنار هم یک المان از ساختار را تشکیل می‌دهند، دقت مدل خروجی بسیار بالا می‌باشد. این امر در تصویر مدل المان محدود نهایی، شکل ۷، هویدا است. شکل ۱۰ تصویر بال قبل و بعد از بارگذاری را نمایش می‌دهد. محل اعمال نیرو و شرایط مرزی نیز در شکل ۱۰ به نمایش در آمده است. نمودار شکل ۱۱ نتیجه حاصل از تحلیل مدل المان محدود به دست آمده از روش ارائه شده در این مقاله را با نتایج نتایج بدست آمده از دو روش تجربی و عددی توسط جین و همکاران مقایسه می‌کند. دلیل رفتار خطی مدل‌ها، در نظر گرفتن رفتار خطی الاستیک برای ماده تشکیل دهنده بال می‌باشد.

نمودار با نشانگر ستاره در شکل ۱۱ نتیجه حاصل از بارگذاری مدل شکل ۷ می‌باشد که در آن ضخامت در تمام نقاط رگه برابر ۴۰۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است. همچنین نمودار با نشانگر لوزی نتیجه حاصل از بارگذاری مدل شکل ۷ است که در آن ضخامت رگه‌ها متغیر در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده از دو مدل تهیه شده در مقاله حاضر از دقت بهتری در مقایسه با مدل عددی ارائه شده توسط جین و همکاران [۲۷] برخوردار است. با توجه به آنکه ضخامت میانگین موثر رگه‌های بال (ضخامت میانگین از ابتدای بال تا محل اعمال نیرو)، به ویژه رگه‌های واقع در نزدیکی لبه جلویی که نقش بیشتری در تحمل بار خارجی دارند، در مدل با ضخامت متغیر (شکل ۷) بیشتر از مدل با ضخامت ثابت (شکل ۷) می‌باشد، از این رو نیروی مورد نیاز برای ایجاد جابه‌جایی مشخص در آن نیز بیشتر شده است. همچنین باید به این نکته اشاره نمود که ساختار واقعی بال دارای چروکیدگی‌هایی می‌باشد که در انعطاف پذیری آن تاثیر بسزایی دارد و از این رو با نیروی کمتر به آن میزان از جابه‌جایی می‌رسد.

مدول برشی نیز طبق رابطه ۱ با استفاده از مدول یانگ و ضریب پواسون بدست می‌آید [۲۸].

$$G = \frac{\sqrt{E_1 E_2}}{2(1 + \nu)} \quad (1)$$

در این مرحله با توجه به الگوریتم بخش ۲-۱-۴ مدل خروجی INP از بال مورد نظر تولید می‌شود. ساختار مواد تشکیل دهنده رگه ایزوتروپیک<sup>۱</sup> و پوسته‌ها ارتوتروپیک<sup>۲</sup> می‌باشد [۲۷]. در آباکوس برای تعریف ساختارهای ارتوتروپیک از کلید واژه Lamina استفاده می‌شود [۲۹]. برای تعریف مشخصات ماده ارتوتروپیک مدول الاستیسیته در راستای x و y، چگالی و همچنین ضریب پواسون در هر بخش به عنوان ورودی از کاربر گرفته می‌شود. از آنجایی که رگه‌ها ایزوتروپیک می‌باشند مدول در دو راستا برای آن‌ها برابر در نظر گرفته می‌شود.

### ۲-۲-۲- صحت‌سنجی مدل

جین و همکاران با انجام آزمایش تست خمش به بررسی رفتار مکانیکی بال سوسک کرگدن پرداختند [۲۷]. آن‌ها با ثابت کردن بال در ابتدای آن، یک جابجایی نقطه‌ای به صورت شبه-استاتیکی به میزان ۱/۱ میلی‌متر در نقطه مشخصی در میانه بال اعمال نمودند. همچنین با انجام مدل‌سازی المان محدود در نرم‌افزار انسیس<sup>۳</sup> نتایج حاصل از تست تجربی انجام شده را شبیه‌سازی کردند. نتایج حاصل از بررسی‌های تجربی و عددی جین و همکاران برای صحت‌سنجی نتایج به دست آمده از روش مدل‌سازی ارائه شده در این مقاله به کار گرفته شده است.

جدول ۱ مشخصات جنس قسمت‌ها مختلف بال [۲۷]

بال	راستای مدول	مدول الاستیسیته (Gpa)	ضریب پواسون	ضخامت (μm)
قسمت A	(E1) x	۴/۵	۰/۳	۳/۹۴
	(E2) Y	۲/۲۴	۰/۳	
پوسته قسمت B	(E1) x	۳/۸۸	۰/۳	۳/۱۱
	(E2) Y	۱/۷۵	۰/۳	
قسمت C	(E1) x	۲/۹۷	۰/۳	۳/۰۶
	(E2) Y	۱/۶۳	۰/۳	
رگه مدل شکل ۷		۱۱	۰/۳	۴۰۰
رگه مدل شکل ۷		۱۱	۰/۳	متغیر (مطابق شکل ۷)

### ۳- نتایج و بحث

شکل ۷ مراحل تبدیل بال سوسک اشاره شده در بخش ۲-۲ را نشان می‌دهد. این مراحل شامل انتخاب عکس ورودی توسط کاربر (شکل ۷الف)، تبدیل عکس ورودی رنگی به یک تصویر خاکستری (شکل ۷ب)، تبدیل تصویر خاکستری به تصویر باینری (شکل ۷پ) و نهایتاً تبدیل عکس به یک مدل خروجی المان محدود است (شکل ۷ت و ۷ث). از آنجایی که پیکسل‌های مشکی رگه‌های شکل را تشکیل داده‌اند، از روش ذکر شده در بخش ۲-۱-۲ آدرس نقاط تشکیل دهنده آن‌ها شناسایی و ذخیره می‌شود. پس از شناسایی این نقاط سیاه رنگ، مشخصات جنس ماده تشکیل دهنده آن‌ها و ضخامت مربوط به هر بخش توسط کاربر وارد می‌شود. سپس، نقاط تشکیل دهنده

1. Isotropic  
2. Orthotropic  
3. Ansys

از طرفی یقیناً جنس ساختار بال واقعی در نقاط مختلف متفاوت بوده و به سادگی چیزی که در مدل‌ها تعریف شده نمی‌باشد، که خود می‌تواند دلیلی برای تفاوت در نتیجه حاصل از مدلسازی و تست‌های تجربی باشد. با توجه به اینکه مدل این مقاله به طور مستقیم از روی تصویر ساختار ایجاد شده، از شباهت زیادی با بال واقعی برخوردار است. این امر دارای تاثیر زیادی بر نتیجه شبیه‌سازی دارد. از طرفی باید در نظر داشت که الگوریتم ارائه شده تنها در چند ثانیه مدلی دقیق از ساختار بال را تولید می‌کند. برای مثال مدل مربوط به شکل ۷ الف در حدود ۳۵ ثانیه توسط الگوریتم ارائه شده تولید شد، این در حالی است که جین و همکاران در تولید مدل از امکانات مدلسازی در نرم‌افزار استفاده نموده‌اند که فرآیندی بسیار وقت‌گیر است [۲۷].

روش ارائه شده در این مقاله به دلیل افزایش سرعت و دقت در امر مدلسازی می‌تواند در کاربردهای صنعتی، به ویژه در صنایع هوافضا، برای تولید مدل‌های دقیق از صفحات کامپوزیتی متشکل از چند ماده مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، از این روش می‌توان در طراحی بال ربات‌های پرنده به منظور بررسی کارایی بال پیش از مراحل ساخت استفاده نمود.

#### ۴- جمع بندی

از جمله مزایای روش ارائه شده در این مقاله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- (۱) تولید بسیار سریع مدل از یک ساختار هندسی بسیار پیچیده،
- (۲) استفاده بسیار آسان و نیاز به ورودی‌های ساده،
- (۳) قابلیت تشخیص چند ناحیه در یک ساختار،
- (۴) ارائه خروجی آن‌پی‌پی که در آن جنس ساختار و مقطع‌های مختلف آن تعریف شده است،
- (۵) توانایی تغییر آسان قسمت‌های مختلف مدل تنها با ایجاد تغییر در تصویر ورودی.

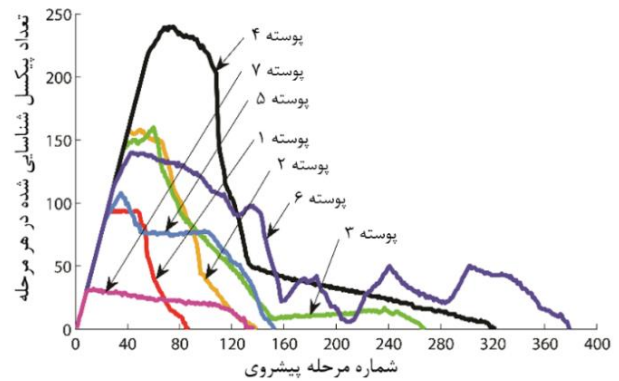
روش ارائه شده در این مقاله می‌تواند در مدلسازی دقیق ساختارهای کامپوزیتی با شکل هندسی پیچیده به کار گرفته شود. در مراحل بعدی تلاش می‌شود الگوریتم ارائه شده برای مدلسازی ساختارهای کامپوزیتی سه‌بعدی دارای چروکیدگی‌های صفحه‌ای تعمیم یابد.

#### ۵- تقدیر و تشکر

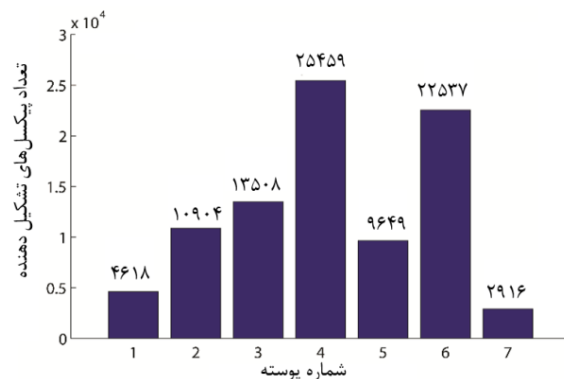
نویسندگان مقاله از آقایان نیما غروبی و کسری رضافت به دلیل مشاوره در روند انجام تحلیل عددی، نهایت تشکر را دارند.

#### ۶- مراجع

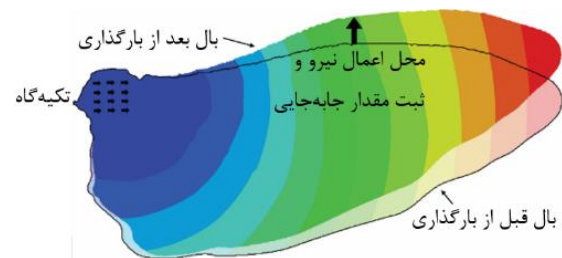
- [1] Thompson, D. W., "On Growth and Form," second ed., Cambridge University Press, Cambridge, 1968.
- [2] Currey, J. D. "Bones: Structure and Mechanics," Princeton University Press, New Jersey, 2002.
- [3] Vincent, J.F.V., "Structural Biomaterials," revised ed., Princeton University Press, New Jersey, 1991.
- [4] Dickinson, M.H., Lehmann, F. O. and Sane, S. P., "Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight," Science, Vol. 248, pp. 1954-1960, 1999.
- [5] Sudhakar, Y. and Vengadesan, S., "Flight Force Production by Flapping Insect Wing In Inclined Stroke Plane Kinematics," Computers and Fluids, Vol. 39, pp. 638-695, 2010.
- [6] Le, T.Q. Byun, D.Y. Saputra, S. Ko, J.H. Park, H.C. and Kim, M.J., "Numerical Investigation of the Aerodynamic Characteristics of a Hovering Coleopteran Insect," Journal of Theoretical Biology, Vol. 266, pp. 485-495, 2010.
- [7] Le, T.Q. Ko, J.H. Byun, D.Y. Park, S.H. and Park, H.C., "Effect of Chord Flexure on Aerodynamic Performance of a Flapping Wing," Journal of Bionic Engineering, Vol. 7, pp. 87-94, 2010.
- [8] Darvizeh, A. Shafiee, N. Darvizeh, M. Habibollahi, and H., Rajabi, H., "Investigation of the Effects of Constructional Elements on the



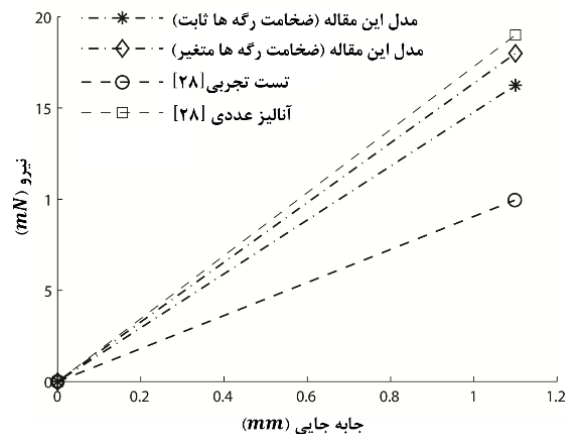
شکل ۸ نمودار تعداد پیکسل‌های شناسایی شده در هر مرحله



شکل ۹ تعداد پیکسل‌های تشکیل دهنده هر پوسته



شکل ۱۰ شرایط بارگذاری و شکل بال قبل و بعد از بارگذاری



شکل ۱۱ مقایسه نتایج بدست آمده از مدل ارائه شده در این مقاله و داده‌های تجربی پیشین

- Biomechanical Behavior of Desert Locust Hind Wing," In Persian, The Modares Journal of Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 14, pp.235-244, 2014.
- [9] Rajabi, H. Moghadami, M. and Darvizeh, A. "Investigation of Microstructure, Natural Frequencies and Vibration Modes of Dragonfly Wing," Journal of Bionic Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 165-173, 2011.
- [10] Rajabi, H. Ghoroubi, N. Darvizeh, A. Dirks, J.H. Appel, E. and Gorb, S.N., "A Comparative Study of the Effects of Vein-Joints on the mechanical Behaviour of Insect Wings: I. Single joints," Bioinspiration and Biomimetics, Vol. 10, No. 5, pp. 056003, 2015.
- [11] Darvizeh, M. Darvizeh, A. Rajabi, H. and Rezaei, A. "Free Vibration Analysis of Dragonfly Wings using Finite Element Method," International Journal of Multiphysics, Vol. 3, No. 1, pp. 101-110, 2009.
- [12] Huai-Hui, R. Xi-Shu, W. Ying-Long, C. and Xu-Dong, L., "Biomechanical Behaviors Of Dragonfly Wing: Relationship Between Configuration And Deformation," Chinese Physics B, Vol. 21. No.3, pp. 034501, 2012.
- [13] Kesel, A. B. Philippi, U. and Werner N., "Biomechanical Aspects Of The Insect Wing: An Analysis Using The Finite Element Method," Computers in Biology and Medicine, Vol. 28, No. 4, pp. 423-437, 1998.
- [14] Herbert, R. C. Young, P. G. Smith, C. W. Wootton, R. J. and Evans K. E., "The Hind Wing Of The Desert Locust (*Schistocerca Gregaria* Forskal) III. A Finite Element Analysis Of A Deployable Structure," Journal of Experimental Biology, Vol. 203, pp. 2945-2955, 2000.
- [15] Darvizeh, A. Anami Rad, S. Darvizeh, M. Ansari, R. and Rajabi, H., "Investigation of Microstructure and Mechanical Behavior of Woodlouse Shells Using Experimental Methods and Numerical Modeling," The Modares Journal of Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 7, pp. 183-190, 2014.
- [16] Rajabi, H. and Darvizeh, A., "Experimental Investigations of the Functional Morphology of Dragonfly Wings," Chinese Physics B, Vol. 22, No. 8, pp. 088702, 2013.
- [17] Rajabi, H. Rezasefat, M. Darvizeh, A. Dirks, J-H. Eshghi, Sh. Shafiei, A., Mirzababaie Mostofi, T. and Gorb, S. N., "A Comparative Study Of The Effects Of Constructional Elements On The Mechanical Behaviour Of Dragonfly Wings," Applied Physics A, Vol. 122, No. 1, pp. 1-13, 2016.
- [18] Rajabi, H. Darvizeh, A. Shafiei, A. Taylor, D. and Dirks, J.H., "Numerical Investigation of Insect Wing Fracture Behaviour," Journal of biomechanics, Vol. 48, No. 1, pp. 89-94, 2015.
- [19] Jongerius, S. R. and Lentink, D., "Structural Analysis Of A Dragonfly Wing," Experimental Mechanics, Vol. 50, No. 9, pp. 1323-1334, 2010.
- [20] Abouelatta, O.B., "Classification of Copper Alloys Microstructure using Image Processing and Neural Network," Journal of American Science, Vol. 9, No. 6, 2013.
- [21] Chen, S. Yue, Z. Q. and Tham, L. G., "Digital Image-Based Numerical Modeling Method For Prediction Of Inhomogeneous Rock Failure," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41, No. 6, pp. 939-957, 2004.
- [22] Li, D. and Wong, L. N. Y., "The Brazilian Disc Test For Rock Mechanics Applications: Review And New Insights," Rock mechanics and rock engineering, Vol. 46, No. 2, pp. 269-287, 2013.
- [23] Zhu, W. C. Liu, J. Yang, T. H. Sheng, J. C. and Elsworth, D., "Effects Of Local Rock Heterogeneities On The Hydromechanics Of Fractured Rocks Using A Digital-Image-Based Technique," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 43, No. 8, pp. 1182-1199, 2006.
- [24] Chen, S. Yue, Z. Q. and Tham, L. G., "Digital Image Based Approach for Three-Dimensional Mechanical Analysis of Heterogeneous Rocks," Rock mechanics and rock engineering, Vol. 40, No. 2, pp. 145-168, 2007.
- [25] Yue, Z. Q. Chen, S. and Tham, L. G., "Finite Element Modeling of Geomaterials Using Digital Image Processing," Computers and Geotechnics. Vol. 30, No. 5, pp. 375-397, 2003.
- [26] Li, X. Zhang, J. Liu, K. and Zhang, X. N., "Finite Element Modeling of Geomaterial Using Digital Image Processing and Computerized Tomography Identification," Yantu Lixue (Rock and Soil Mechanics), Vol. 27, No. 8, pp. 1331-1334, 2006.
- [27] Jin, T. Goo, N. S. and Park, H. C., "Finite Element Modeling Of A Beetle Wing," Journal of Bionic Engineering, Vol. 7, pp. S145-S149, 2010.
- [28] Huber, M., "The Theory Of Crosswise Reinforced Ferroconcrete Slabs And Its Application To Various Important Constructional Problems Involving Rectangular Slabs," Der Bauingenieur 4, Vol. 12, pp. 354-360, 1923.
- [29] Abaqus analysis user's manual, Version 6.10, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2010.