



## بررسی ساختار میکروسکوپی و رفتار مکانیکی پوسته خرخاکی با استفاده از مشاهدات تجربی و مدل سازی عددی

ابوالفضل درویشه<sup>۱</sup>، سارا انامی راد<sup>۲</sup>، منصور درویشه<sup>۳</sup>، رضا انصاری<sup>۴</sup>، حامد رجبی<sup>۵\*</sup>

- ۱- استاد مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی احرار، رشت
  - ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
  - ۳- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
  - ۴- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
  - ۵- مربی مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی احرار، رشت
- \* رشت، صندوق پستی ۴۱۹۳۱-۶۳۵۸۴، harajabi@ahrar.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

در این مقاله ساختار میکروسکوپی پوسته خرخاکی با استفاده از تصاویر به دست آمده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفته و پاسخ دینامیکی پوسته این جانور، تحت ضربه یک پرتابه مخروطی به روش اجزای محدود مطالعه شده است. شکل خاص پوسته جانور که یک کامپوزیت می باشد، باعث شده که علی رغم ضخامت ناچیز، در برابر بارهای خارجی، مقاومت مطلوبی از خود نشان دهد. همچنین جانور قادر است در صورت احساس خطر خود را جمع کرده و بدن خود را به شکل یک کره درآورد. بنابراین به منظور بررسی اثرات احتمالی این قابلیت تغییر شکل در بدن حشره، بارگذاری بر روی پوسته در هر دو وضعیت صاف و کروی، با زوایای برخورد مختلف و سرعت های متفاوت انجام شد. با مقایسه بین دو وضعیت صاف و کروی این نتیجه حاصل شد که میزان تمرکز تنش ایجاد شده در پوسته در حالتی که جانور خود را به شکل کره جمع می کند، کمتر از حالت نرمال است که این امر بیانگر تأثیر مثبت مکانیزم حفاظتی جانور می باشد. نتایج حاصل از این تحقیق می تواند در راستای طراحی و ساخت ساختارهای نوین مهندسی داری نسبت استحکام به وزن بالا، مورد استفاده قرار گیرد.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: ۱۵ آذر ۱۳۹۲  
پذیرش: ۰۳ اسفند ۱۳۹۲  
ارائه در سایت: ۰۱ شهریور ۱۳۹۳  
کلید واژگان:  
روش اجزای محدود  
پوسته خرخاکی  
ساختار میکروسکوپی  
خواص مکانیکی  
توزیع تنش

## Investigation of microstructure and mechanical behavior of Woodlouse shells using experimental methods and numerical modeling

Abolfazl Darvizeh<sup>1</sup>, Sara AnamiRad<sup>2</sup>, Mansoor Darvizeh<sup>2</sup>, Reza Ansari<sup>2</sup>, Hamed Rajabi<sup>1\*</sup>

- 1- Department of Mechanical Engineering, Ahrar Institute of Technology & Higher Education, Rasht, Iran
- 2- Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

\* P.O. Box 41931-63584, Rasht, Iran. harajabi@ahrar.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 06 December 2013  
Accepted 22 February 2014  
Available Online 23 August 2014

#### Keywords:

Finite Element Method  
Woodlouse Shell  
Microscopic Structure  
Mechanical Properties  
Stress Distribution.

### ABSTRACT

In this paper, a scanning electron microscope (SEM) is used for microstructural investigations of a woodlouse shell. Finite element (FE) method is employed to study the dynamic behavior of the shell subjected to the impact of a cone-shaped projectile. Despite of small thickness, the shell, as a composite material, enables the insect to bear large external forces. The woodlouse is also able to roll up into a complete sphere to protect itself from danger. In order to study this defense mechanism, the external loads are applied to the shell in different configurations: when the shell is in (1) normal and (2) rolled-up forms. The simulations are performed at different velocities and at different impact angles. Comparisons of the results obtained from different simulations indicate that the defense mechanism of the woodlouse has an important role in decreasing the stress concentrations. Indeed, it is a defense mechanism which effectively increases the load-bearing capacity of the insect shell. The results of the present research may be useful in the design and manufacture of modern engineering structures with a high strength to weight ratio.

### ۱- مقدمه

می دهد. این علم به دنبال تقلید خلاقانه از طبیعت، ساختارها، سیستم ها و مکانیزم های موجود در آن، به منظور ساخت ابزارهای مکانیکی و برداشتن مشکلات پیش روی صنعت و تکنولوژی می باشد. مدت هاست بشر تلاش نموده ساختارهایی را طراحی کند که در برابر عوامل خارجی و به خصوص بارهای ضربه ای مقاومت زیادی را از خود بروز

علم تقلیدات زیستی<sup>۱</sup> علم جدیدی است که با استفاده از دانش و ظرفیت های مهندسی برای شناخت و تقلید از سیستم های حیاتی، حل مشکلات انسانی، ارتقای طراز تکنولوژی های رایج و کنترل بحران های زیست محیطی را نوید

1- Biomimetic

### Please cite this article using:

A. Darvizeh, S. Anami Rad, M. Darvizeh, R. Ansari, H. Rajabi, Investigation of microstructure and mechanical behavior of Woodlouse shells using experimental methods and numerical modeling, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 183-190, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۲- روش‌ها

### ۲-۱- عکس برداری الکترونی

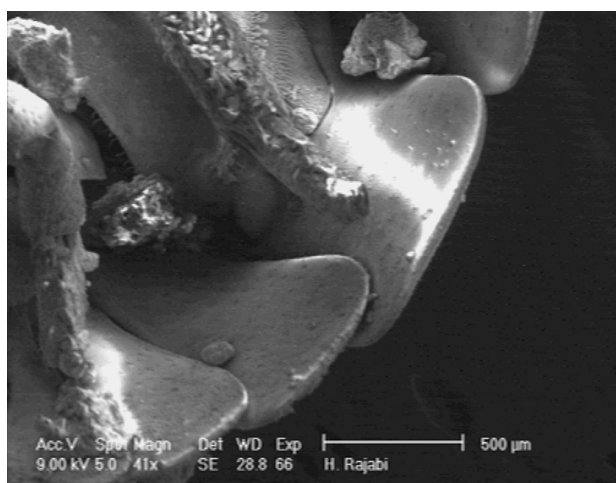
برای انجام آزمایش‌های لازم، تعدادی خرماکی از باغ‌های محلی و مناطق جنگلی جمع‌آوری شدند. قبل از تصویربرداری با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی<sup>۸</sup>، نمونه‌ها به داخل دستگاه پوشاننده منتقل شده و با استفاده از دستگاه لایه نشانی طلا<sup>۹</sup> با یک لایه نازک طلا-پالادیوم پوشش داده شدند. سپس یک دستگاه فیلیپس<sup>۱۰</sup> برای مشاهده، استنباط و توصیف ساختار میکروسکوپی پوسته خرماکی مورد استفاده قرار گرفت و تصاویری از قسمت‌های مختلف پوسته به دست آمد.

### ۲-۲- شبیه سازی پوسته خرماکی

یکی از قسمت‌های کلیدی کار، رسیدن به الگوی صحیح و مناسبی از پوسته خرماکی و انتخاب نرم‌افزار مناسب برای طراحی مدلی کاملاً شبیه به پوسته جانور بود. برای نیل به این هدف، مطالعات گسترده‌ای بر روی خرماکی و تصاویر موجود از این جانور انجام شد و پس از بررسی‌های مفصلی که در مورد چگونگی اتصال پوسته و استرنوم انجام شد این نتیجه به دست آمد که صفحات مختلف پوسته خرماکی به طور مستقیم به یکدیگر متصل نشده‌اند، بلکه اتصال آنها در قسمت استرنوم جانور که در زیر بدن آن قرار گرفته است اتفاق می‌افتد. در واقع هر صفحه از پوسته بر روی صفحه بعدی همپوشانی دارد و شکلی انعطاف‌پذیر اما محافظ به کل بدن می‌دهد (شکل ۱). از این رو در مدل‌سازی استرنوم جانور نیز به همراه پوسته طراحی گردید. مدل‌هایی از دو وضعیت صاف و کروی جانور، با استفاده از نرم‌افزار سالیدورک<sup>۱۱</sup> طراحی شد. در شکل ۲ مدل‌های طراحی شده از پوسته نشان داده شده است.

### ۲-۳- بارگذاری و شرایط مرزی

مدل‌های طراحی شده در نرم‌افزار سالیدورک برای اعمال بار به نرم‌افزار ابکس منتقل شدند. در این نرم‌افزار خواص مکانیکی مدل باید به عنوان پیش فرض تعریف شود. از این رو خواص مکانیکی پوسته خرماکی از قبیل مدول یانگ (۲۰ گیگاپاسکال)، ضریب پواسون (۰/۳) و چگالی (۱۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب) در این محیط به مدل‌ها نسبت داده شد (۱، ۱۰، ۱۱).



شکل ۱ تصویر SEM از محل اتصال پوسته و استرنوم خرماکی. صفحات پوسته در قسمت تحتانی به استرنوم جانور متصل شده‌اند

دهند. در این راستا مواد نوین و پیچیده‌ای از قبیل کامپوزیت‌ها، سرامیک‌ها، متامواد و غیره توسط دانشمندان و مهندسان ساخته و به کار گرفته شده‌اند. بسیاری از این مواد علی‌رغم فراهم آوردن برخی خواص مکانیکی مطلوب ضعف‌هایی نیز دارند. شاید از مهم‌ترین این ضعف‌ها بتوان به مراحل دشوار و پرهزینه تولید آن‌ها اشاره نمود. اما در این زمینه، تمرکز علم تقلیدات زیستی بر روی جانوران مفصل‌دار بوده است [۱] زیرا اسکلت آن‌ها به علت وجود فیبر کیتین در یک قالب پروتئینی، دوام و ایستادگی بالایی دارد و سبب ظهور ویژگی‌هایی مانند بهبود چشمگیر استحکام در یک وزن نسبتاً پایین می‌شود. اسکلت‌بندی پایدار باید وظایف مختلفی را تأمین نماید از جمله مقاومت در برابر خراشیدگی و ضربه (ناشی از بارهای خارجی ایجاد شده توسط شکارچیان)، و حتی جلوگیری از تنش اسمزی و خشک شدن [۲، ۳].

سخت‌پوستان، گونه‌ای از جانوران مفصل‌دار هستند که اسکلت آن‌ها دارای مقادیر زیادی کلسیت است [۴]. خرماکی یک سخت‌پوست با استخوان‌بندی سخت و قطعه‌قطعه است. پوسته سخت پوستان در جزئیات ساختار متفاوت است، اما به طور کلی از چند لایه مختلف تشکیل شده که توسط شماری از محققان مورد مطالعه قرار گرفته است [۵-۸]: اپی کوتیکول<sup>۱</sup>، لایه نازک مومی بیرونی که گواهِ وجود رطوبت در لایه‌های دیگر می‌باشد، اگزوکوتیکول<sup>۲</sup>، که از کیتین و پروتئین‌های شیمیایی سخت‌شده تشکیل شده است و اندوکوتیکول<sup>۳</sup>، که شامل پروتئین‌های کیتین و غیر سخت‌شده می‌باشد. لایه خارجی پوسته سخت‌پوست، کوتیکل<sup>۴</sup> نام دارد که به عنوان یک مانع، بین بافت زنده و محیط پیرامون عمل می‌نماید. جلوگیری از دست دادن آب در بدن جانور، یکی از نقش‌های اساسی کوتیکل است که برای حفظ حیات جانور الزامی است [۹]. به طور کلی، سخت‌پوستان مکانیزم‌های دفاعی فعال و غیرفعال متنوعی را در برابر حیواناتی که از آنها تغذیه می‌کنند نشان می‌دهند، از جمله محافظت به وسیله پوسته سخت و بازوهای شیمیایی برای ترساندن مهاجمان [۱۰]. در خرماکی انعطاف‌پذیری بسیار زیاد بدن این جانور منجر به پیدایش مکانیزم حفاظتی جالب توجهی شده است، به گونه‌ای که جانور قادر است در صورت احساس خطر، بدن خود را به دور خود جمع نموده و با تشکیل یک ساختار کروی در برابر عوامل خارجی، از خود محافظت کند.

توجه به توصیف ویژگی‌های مکانیکی اسکلت سخت‌پوستان رو به رشد است اما داده‌های مفصل درباره ویژگی‌های مکانیکی پوسته سخت‌پوستان خاکی مانند خرماکی هنوز موجود نیست. تنها تحقیق انجام گرفته بر روی خواص مکانیکی پوسته خرماکی توسط گروسمن<sup>۵</sup> و شیمز<sup>۶</sup> انجام شده است. آنها در مطالعات خود با استفاده از آزمون دندان‌گذاری نانو<sup>۷</sup>، مدول یانگ و سختی پوسته خرماکی را محاسبه نمودند [۱].

در این مقاله ساختار حفاظتی پوسته خرماکی در دو وضعیت مختلف پوسته (عادی و تدافعی) مورد بررسی قرار گرفته و توزیع تنش در آن در حالات بارگذاری مختلف مطالعه شده است. به منظور حصول درک صحیحی از چگونگی تأثیر تغییر شکل پوسته بر افزایش قابلیت نیرو، حالت‌های مختلف بارگذاری اعم از زوایا و سرعت‌های برخورد مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند در راستای ساخت سازه‌های مهندسی نوین با نسبت استحکام به وزن بالا مورد استفاده قرار گیرد.

- 1- Epicuticle
- 2- Exocuticle
- 3- Endocuticle
- 4- Cuticle
- 5- Grossmann
- 6- Schmitz
- 7- Nanoindentation

8- SEM  
9- Sputter Coater  
10- XL30 SEM  
11- SolidWorks

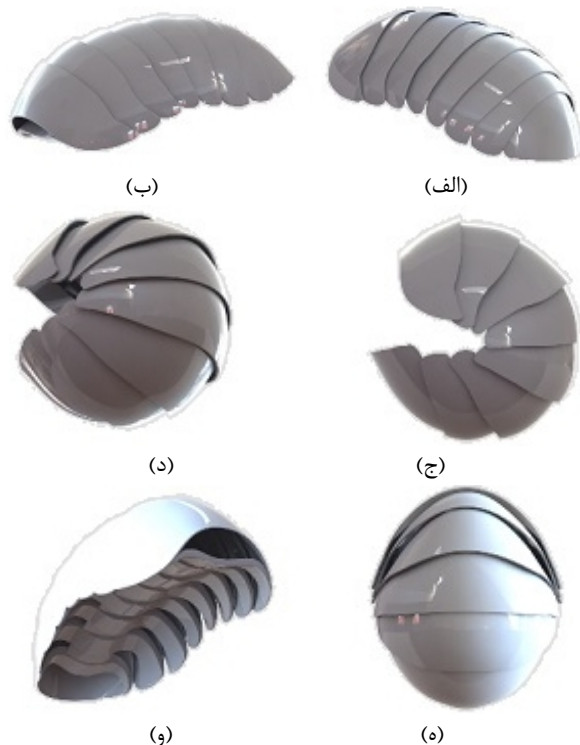
بارگذاری ۲۰ درجه می‌باشند. همان‌طور که در شکل‌های ۴- الف و ۵- الف مشخص است، قبل از برخورد پرتابه به پوسته، هیچ تنشی در پوسته ایجاد نشده است و با گذشت زمان، تنش در کل پوسته توزیع می‌شود. شکل خاص صفحات پوسته باعث می‌شود که به محض اولین تماس پرتابه با پوسته، تنش در پوسته توزیع شود. نحوه قرارگیری صفحات بر روی هم به گونه‌ای است که مانع از تمرکز تنش در یک نقطه شده و انتقال تنش از یک صفحه به صفحه بعد صورت می‌گیرد.

### ۳-۲-۱- مقایسه دو وضعیت صاف و کروی

در جدول‌های ۱ و ۲ توزیع تنش ماکزیمم در پوسته‌های صاف و کروی به همراه کانتورهای تنش برای همه زوایا و سرعت‌های مورد آزمایش، نشان داده شده است. توزیع تنش نشان داده شده در پوسته‌ها، مربوط به لحظه ۰/۷ میلی ثانیه، یعنی اندکی پس از برخورد پرتابه به پوسته‌ها می‌باشد. علاوه بر آن در نمودار نشان داده شده در شکل ۶ مقدار تنش ماکزیمم در دو وضعیت صاف و کروی پوسته، برای تمام زوایای برخورد در هر دو سرعت برخورد ۳ و ۴ متر بر ثانیه با یکدیگر مقایسه شده است. واضح است که در کلیه زوایای ۱۰ تا ۹۰ درجه میزان تنش ماکزیمم در پوسته کروی به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از پوسته صاف بوده است که این امر بیانگر تأثیر مثبت مکانیزم حفاظتی تغییر شکل بدن خرماکی می‌باشد.

### ۳-۲-۲- بررسی تأثیر سرعت برخورد

از بررسی تصاویر مربوط به توزیع تنش ماکزیمم نشان داده شده در جدول- های ۱ و ۲ و نمودار نشان داده شده در شکل ۶، این نتیجه به دست آمد که وقتی پرتابه به عنوان مثال با زاویه برخورد ۲۰ درجه و سرعت ۳ متر بر ثانیه به پوسته برخورد می‌کند، مقدار تنش ماکزیمم در پوسته صاف برابر ۴۲۵ مگاپاسکال و مقدار آن در پوسته کروی برابر ۶۳ مگاپاسکال می‌باشد.



شکل ۲ الف و ب- مدل‌های ساخته شده از پوسته خرماکی در حالت صاف، در نرم‌افزار سالید ورک، ج، د و ه- مدل پوسته در حالت کروی از نماهای مختلف، و- محل‌های اتصال پوسته و استرنوم و نواحی بین استرنوم

بارگذاری به صورت دینامیکی انجام گرفت. یک پرتابه به شکل مخروط برای ضربه زدن به پوسته طراحی گردید. نوک مخروط به شکل کروی در نظر گرفته شد تا بتواند سطح تماس بهتری با پوسته داشته باشد. این شکل بارگذاری از مشابهت بیشتری با عوامل محیطی تأثیرگذار بر پوسته برخوردار است. قسمت استرنوم بدن جانور به عنوان تکیه‌گاه در نظر گرفته شد و مقادیر مربوط به جابجایی و دوران در همه جهات برای این قسمت از مدل صفر تعریف گردید.

فاصله مرکز مخروط تا پوسته برابر ۴ میلی‌متر و جهت پرتاب مخروط هم جهت با محور آن در نظر گرفته شد. مدل‌ها مش‌بندی شده و تحت ضربه پرتابه، با سرعت‌های متفاوت و مشخص قرار گرفتند. همچنین این بارگذاری در زوایای برخورد ۱۰ تا ۹۰ درجه نسبت به مماس بر سطح پوسته، انجام شد.

### ۳- نتایج

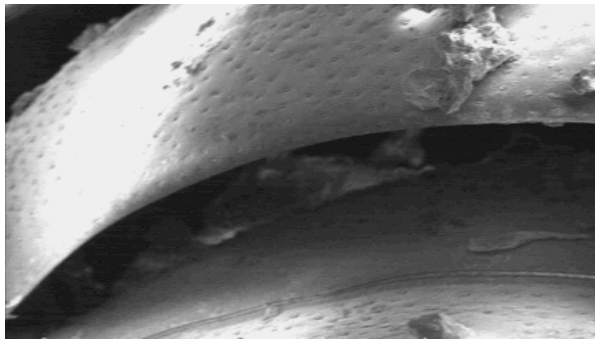
پس از بررسی تصاویر میکروسکوپی استخراج شده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی و نیز پس از اتمام سیکل بارگذاری بر روی مدل‌ها در شرایط بارگذاری مختلف، در نرم‌افزار اباکس، نتایج به دست آمده مورد مطالعه قرار گرفتند که در ذیل به تفکیک در مورد آن‌ها توضیح داده خواهد شد.

### ۳-۱- ساختار میکروسکوپی

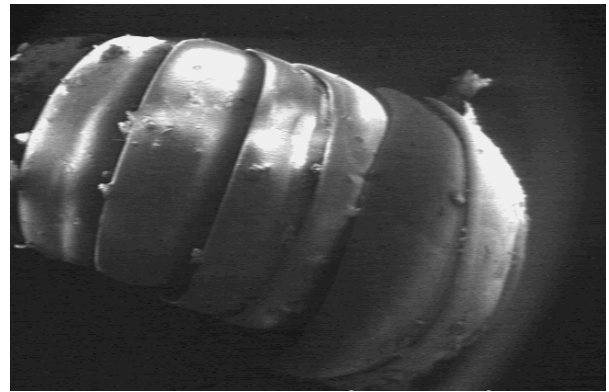
پس از عکس‌برداری توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی و انتقال تصاویر میکروسکوپی گرفته شده به یک رایانه شخصی، عکس‌ها مورد بررسی قرار گرفتند تا اطلاعات مربوط به نحوه قرار گرفتن صفحات پوسته بر روی یکدیگر و چگونگی اتصال آنها با یکدیگر استخراج شود. همان‌طور که در شکل‌های ۳- الف و ب مشاهده می‌شود صفحات پوسته در قسمت فوقانی پوسته بدون هیچ اتصالی کاملاً بر روی هم سوار شده‌اند و با یکدیگر هم‌پوشانی دارند. این نحوه قرارگیری صفحات پوسته نسبت به هم و توانایی حرکت آزادانه آن‌ها بر روی یکدیگر، این امکان را به جانور می‌دهد که بتواند بدن خود را به شکل یک کره به دور خود جمع کند و در برابر آسیب‌های احتمالی از سوی محیط اطراف، از خود محافظت نماید. محل قرارگیری هر صفحه بر روی صفحه بعدی دارای ساختار منحصربه‌فردی است و ناحیه خاصی در هر صفحه از پوسته جانور به این محل اختصاص یافته است، این قسمت در شکل ۳- ج با فلش نشان داده شده است. سطح پوسته در حالت عادی سطحی کاملاً صاف به نظر می‌رسد، در حالی که با بزرگ‌نمایی بیشتر بر روی سطح خارجی پوسته خرماکی، مشاهده شد که سطح پوسته دارای فرو رفتگی‌های بسیار ریزی در مقیاس میکرون می‌باشد که با چشم غیر مسلح دیده نمی‌شود (شکل ۳- د). همچنین با بررسی‌های میکروسکوپی که انجام شد این نتیجه به دست آمد که سطح پوسته پوشیده از فیبرهای موم مانند می‌باشد که در شکل ۳- ه به خوبی مشخص است. وجود این لایه موم مانند در سطح خارجی پوسته جانور گواه وجود رطوبت در لایه‌های زیرین پوسته می‌باشد و از آن‌ها محافظت می‌کند. شکل ۳- و نمای کلی از قسمت تحتانی بدن جانور را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است بدن جانور در فضای بین پوسته و استرنوم قرار گرفته و فضاهای خالی بین بخش‌های استرنوم محل قرارگیری پاهای جانور می‌باشد.

### ۳-۲- رفتار مکانیکی

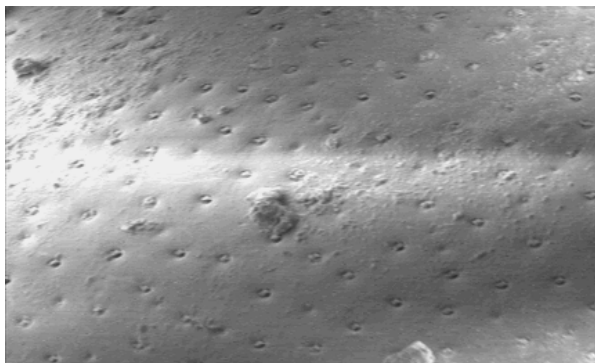
پس از مدل‌سازی و اعمال بار به پوسته در حالت‌های بارگذاری متفاوت، توزیع تنش اصلی ماکزیمم در پوسته، استخراج شد. شکل‌های ۴ و ۵ چگونگی اعمال ضربه به پوسته را از قبل از برخورد تا انتهای زمان ۱ میلی ثانیه، در شش مرحله، نشان می‌دهند که مربوط به زاویه



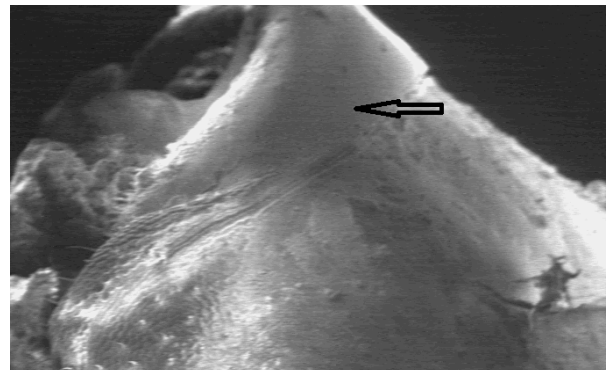
ب- چیدمان صفحات پوسته بر روی یکدیگر



الف- نمای کلی از صفحات پوسته در ناحیه قفسه سینه



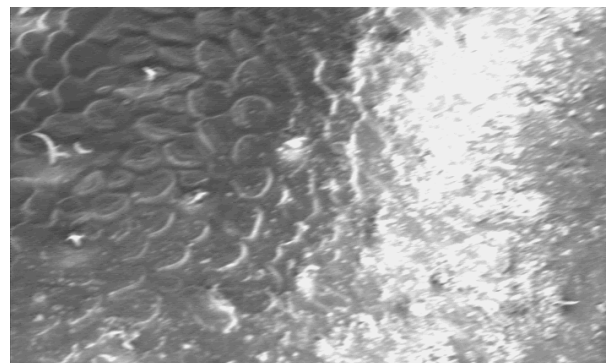
د- فرو رفتگی های موجود روی سطح خارجی پوسته



ج- محل قرار گرفتن هر صفحه از پوسته بر روی صفحه بعدی



و- نمای کلی از قسمت تحتانی بدن خرخاکی



ه- لایه نازکی از فیبرهای موم مانند بر روی سطح خارجی پوسته

## شکل ۳ تصاویر SEM از پوسته خرخاکی

پوسته‌ها در هر دو وضعیت صاف و کروی، با صرف نظر از خطاهای کوچک در برخی حالت‌ها، تا زاویه برخورد ۵۰ درجه، مقدار تنش ماکزیمم کاهش یافته و پس از آن تا رسیدن به زاویه ۹۰ درجه این مقادیر افزایش می‌یابند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اگر جسمی با زاویه برخورد ۵۰ درجه به پوسته جانور برخورد کند کمترین میزان تنش را در آن به وجود خواهد آورد.

## ۴- بحث و نتیجه گیری

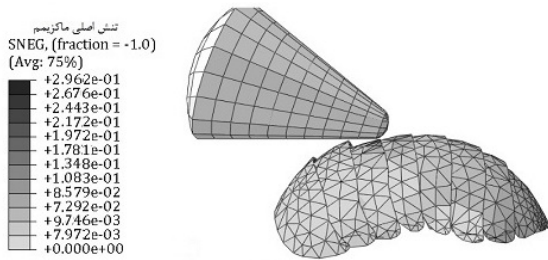
در غیاب مطالعه‌ای در خصوص بررسی رفتار مکانیکی پوسته محافظ حشره خرخاکی، این تحقیق به بررسی چگونگی تأثیر گذاری این پوسته و مکانیزم تغییر شکل آن بر میزان تحمل بار خارجی ضربه‌ای توسط حشره انجام گرفت.

با افزایش سرعت برخورد پرتابه به پوسته در هر یک از حالات صاف و کروی، تنش ماکزیمم در پوسته افزایش می‌یابد. به این صورت که در سرعت ۴ متر بر ثانیه در زاویه برخورد ۲۰ درجه، مقدار تنش در پوسته صاف به ۵۱۲ مگاپاسکال و در پوسته کروی به ۸۴/۷ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. به همین ترتیب، این روند در سایر زوایای برخورد ۱۰ تا ۹۰ درجه نیز با سرعت‌های مشابه، تکرار شد. در همه زوایا، با افزایش سرعت برخورد پرتابه به پوسته، در هر یک از حالات صاف و کروی، تنش ماکزیمم در پوسته افزایش می‌یابد.

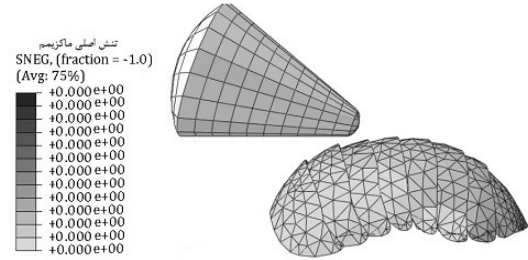
## ۳-۲-۳- بررسی تأثیر زاویه برخورد

همان‌طور که در منحنی‌های نشان داده شده در شکل ۶ مشخص است، در

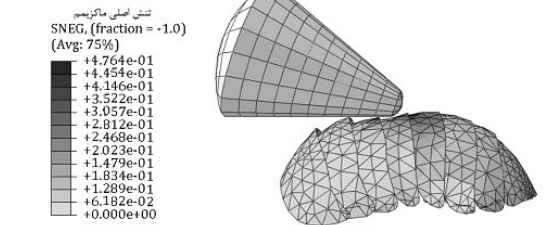




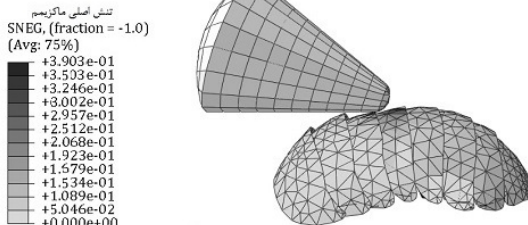
ب- لحظه برخورد پرتابه به پوسته در زمان ۰/۳ میلی ثانیه



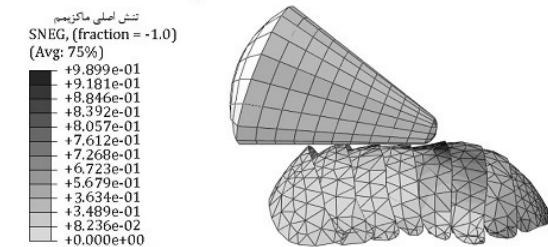
الف- قبل از برخورد



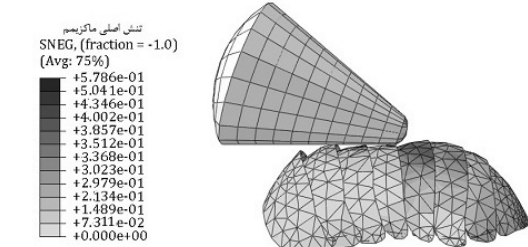
د- لحظه ۰/۶ میلی ثانیه



ج- لحظه ۰/۴۵ میلی ثانیه

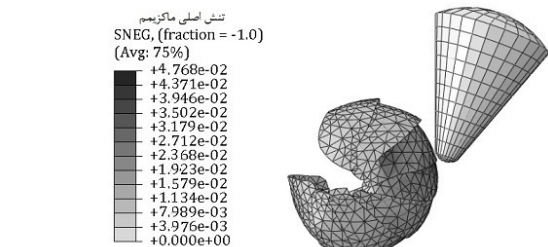


و- انتهای بازه زمانی، لحظه ۱ میلی ثانیه

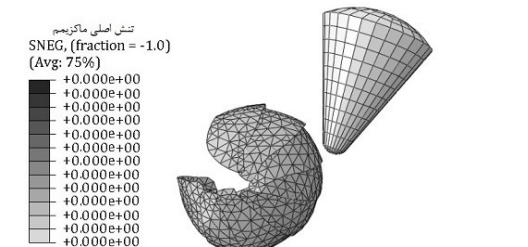


ه- لحظه ۰/۸ میلی ثانیه

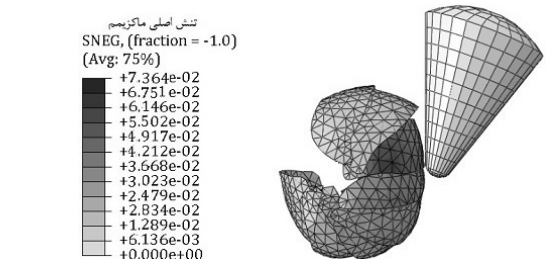
شکل ۴ مراحل برخورد پرتابه به پوسته صاف در طول مدت زمان ۱ میلی ثانیه، به همراه مقادیر تنش مربوط به هر حالت بر حسب گیگاپاسکال



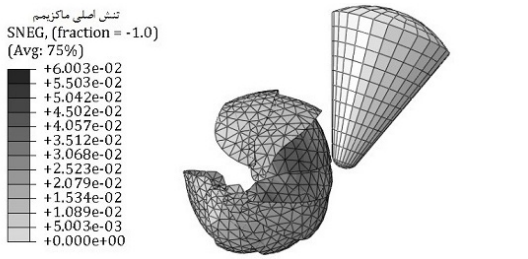
ب- لحظه برخورد پرتابه به پوسته در زمان ۰/۳ میلی ثانیه



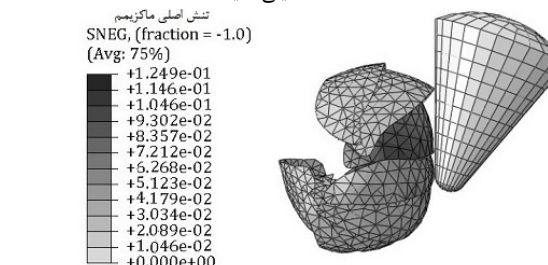
الف- قبل از برخورد



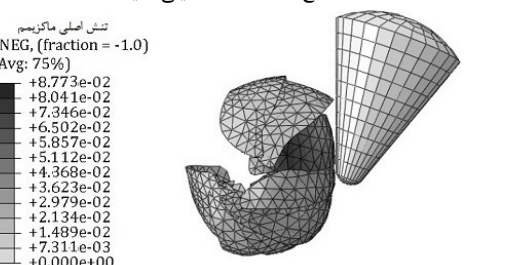
د- لحظه ۰/۶ میلی ثانیه



ج- لحظه ۰/۴۵ میلی ثانیه



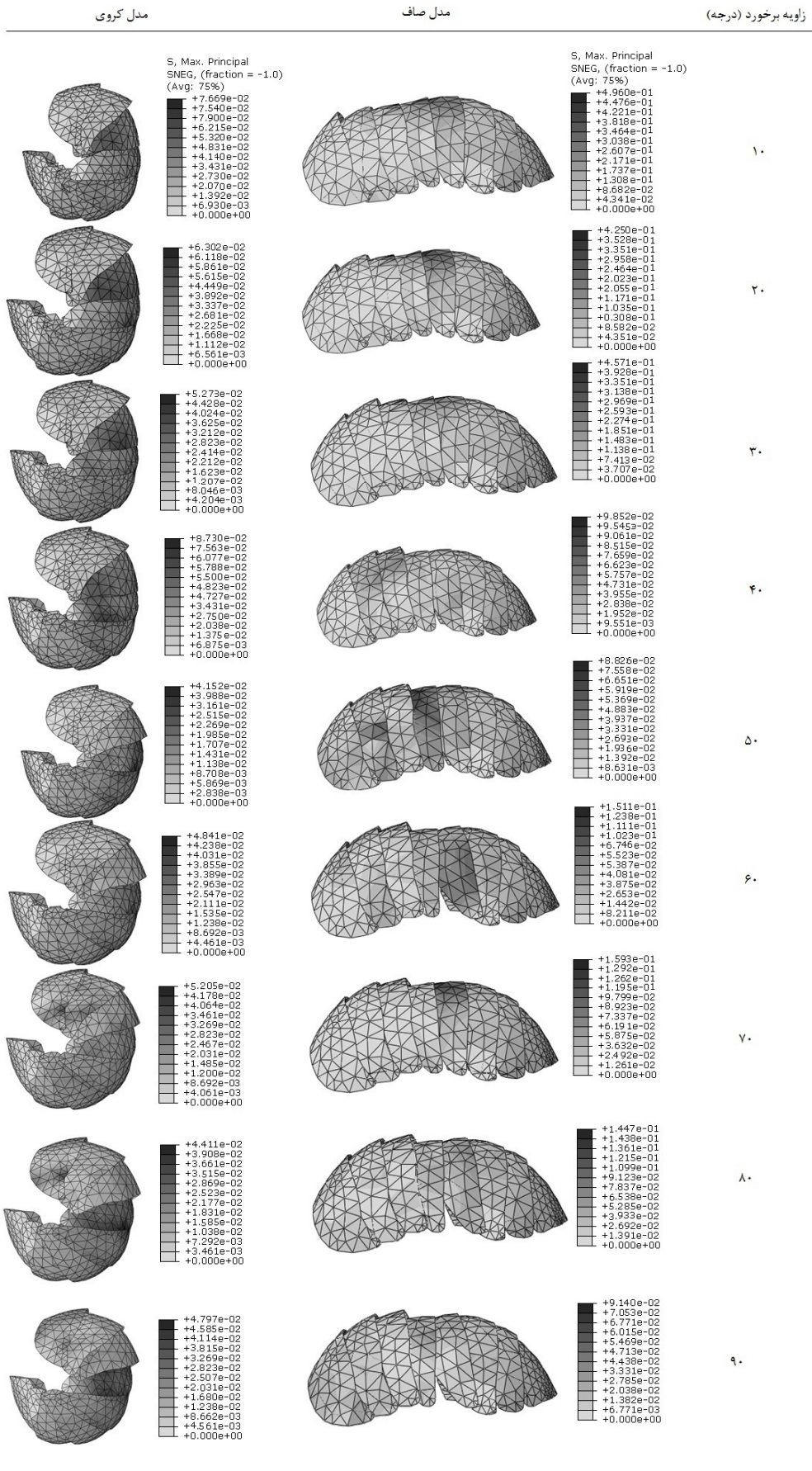
و- انتهای بازه زمانی، لحظه ۱ میلی ثانیه



ه- لحظه ۰/۸ میلی ثانیه

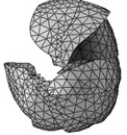
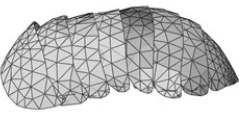
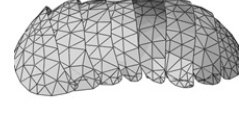
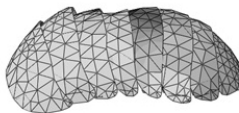
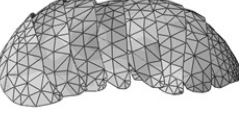
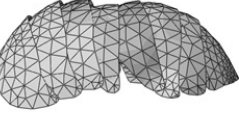
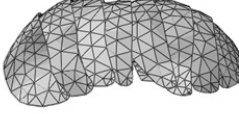
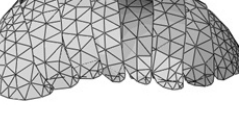
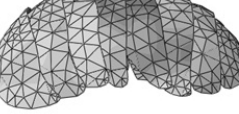
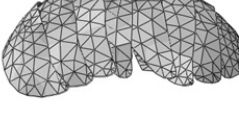
شکل ۵ مراحل برخورد پرتابه به پوسته کروی در طول مدت زمان ۱ میلی ثانیه، به همراه مقادیر تنش مربوط به هر حالت بر حسب گیگاپاسکال

جدول ۱ توزیع تنش در پوسته های صاف و کروی، در زوایای ۱۰ تا ۹۰ درجه و در سرعت ۳ متر بر ثانیه (مقادیر تنش در کانتورها بر حسب گیگاپاسکال می باشد)





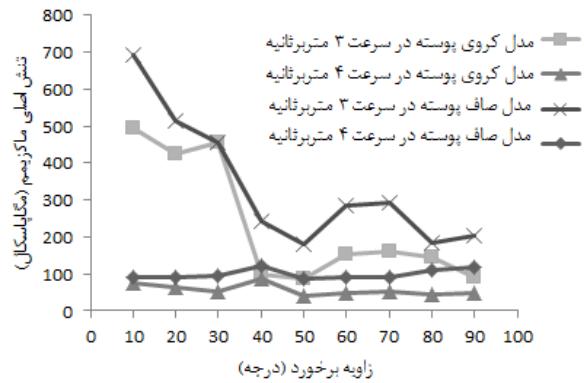
جدول ۲ توزیع تنش در پوسته های صاف و کروی، در زوایای ۱۰ تا ۹۰ درجه و در سرعت ۴ متر بر ثانیه (مقادیر تنش در کانتورها بر حسب گیگاپاسکال می باشد)

مدل کروی	مدل صاف	زاویه برخورد (درجه)
<p>S, Max. Principal SNEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%)</p>  <p>+9.202e-02 +8.722e-02 +7.461e-02 +6.699e-02 +5.969e-02 +5.110e-02 +4.477e-02 +3.722e-02 +2.385e-02 +2.538e-02 +1.110e-02 +7.723e-03 +0.000e+00</p>	 <p>S, Max. Principal SNEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%)</p> <p>+6.925e-01 +6.338e-01 +5.981e-01 +5.561e-01 +4.785e-01 +4.518e-01 +3.977e-01 +2.392e-01 +2.794e-01 +1.794e-01 +1.396e-01 +5.810e-02 +0.000e+00</p>	۱۰
<p>+8.479e-02 +8.170e-02 +7.981e-02 +6.194e-02 +5.569e-02 +4.617e-02 +4.127e-02 +3.231e-02 +2.765e-02 +2.665e-02 +1.692e-02 +5.505e-03 +0.000e+00</p>	 <p>+5.124e-01 +5.078e-01 +4.881e-01 +4.515e-01 +4.085e-01 +3.946e-01 +3.508e-01 +2.900e-01 +2.392e-01 +1.792e-01 +1.390e-01 +4.940e-02 +0.000e+00</p>	۲۰
<p>+9.386e-02 +8.217e-02 +7.415e-02 +6.769e-02 +5.523e-02 +5.217e-02 +4.261e-02 +3.726e-02 +2.985e-02 +2.226e-02 +1.432e-02 +7.415e-03 +0.000e+00</p>	 <p>+4.547e-01 +4.181e-01 +3.681e-01 +3.077e-01 +2.969e-01 +2.525e-01 +2.074e-01 +1.851e-01 +1.585e-01 +1.162e-01 +6.812e-02 +4.407e-02 +0.000e+00</p>	۳۰
<p>+1.235e-01 +1.191e-01 +9.361e-02 +8.991e-02 +8.769e-02 +7.923e-02 +6.691e-02 +5.235e-02 +3.385e-02 +2.638e-02 +1.692e-02 +1.351e-03 +0.000e+00</p>	 <p>+2.430e-01 +1.920e-01 +1.951e-01 +1.733e-01 +1.539e-01 +1.146e-01 +9.757e-02 +9.157e-02 +7.705e-02 +5.778e-02 +3.851e-02 +2.701e-02 +0.000e+00</p>	۴۰
<p>+8.831e-02 +7.598e-02 +7.269e-02 +6.807e-02 +6.923e-02 +6.077e-02 +5.381e-02 +4.538e-02 +3.385e-02 +2.538e-02 +1.692e-02 +8.461e-03 +0.000e+00</p>	 <p>+1.810e-01 +1.608e-01 +1.531e-01 +1.380e-01 +1.029e-01 +8.538e-02 +7.677e-02 +5.751e-02 +3.046e-02 +2.738e-02 +2.892e-02 +1.981e-02 +0.000e+00</p>	۵۰
<p>+8.941e-02 +7.765e-02 +6.819e-02 +6.123e-02 +5.677e-02 +4.923e-02 +4.077e-02 +3.401e-02 +2.325e-02 +2.538e-02 +1.252e-02 +6.461e-03 +0.000e+00</p>	 <p>+2.846e-01 +2.392e-01 +2.161e-01 +2.095e-01 +1.869e-01 +1.923e-01 +1.387e-01 +1.161e-01 +9.325e-02 +6.998e-02 +4.692e-02 +2.861e-02 +0.000e+00</p>	۶۰
<p>+9.155e-02 +7.623e-02 +6.923e-02 +6.236e-02 +5.443e-02 +4.553e-02 +4.377e-02 +3.661e-02 +2.775e-02 +2.038e-02 +1.692e-02 +6.236e-03 +0.000e+00</p>	 <p>+2.916e-01 +2.663e-01 +2.321e-01 +1.985e-01 +1.869e-01 +1.623e-01 +1.298e-01 +1.161e-01 +9.325e-02 +6.980e-02 +4.662e-02 +2.631e-02 +0.000e+00</p>	۷۰
<p>+1.129e-01 +9.015e-02 +8.151e-02 +7.461e-02 +6.559e-02 +5.623e-02 +4.977e-02 +4.215e-02 +3.385e-02 +2.538e-02 +1.692e-02 +8.151e-03 +0.000e+00</p>	 <p>+1.015e-01 +1.308e-01 +1.461e-01 +1.615e-01 +9.559e-02 +8.323e-02 +7.157e-02 +5.971e-02 +4.785e-02 +3.597e-02 +2.692e-02 +1.971e-02 +0.000e+00</p>	۸۰
<p>+1.192e-01 +1.004e-01 +9.961e-02 +9.353e-02 +8.315e-02 +7.279e-02 +6.237e-02 +5.231e-02 +4.989e-02 +3.385e-02 +2.538e-02 +1.692e-02 +0.000e+00</p>	 <p>+2.031e-01 +1.892e-01 +1.615e-01 +1.415e-01 +1.269e-01 +1.153e-01 +9.788e-02 +8.231e-02 +6.385e-02 +4.538e-02 +3.692e-02 +1.788e-02 +0.000e+00</p>	۹۰

۶۰۰ درصد کاهش یابد. از این رو است که جانور در هنگام احساس خطر بدن خود را به صورت یک کره جمع می‌کند که ضمن حفاظت از اندام‌های خارجی مقدار تنش پدید آمده ناشی از اعمال بار خارجی را تا حد امکان تعدیل نماید. نتایج حاصل از این تحقیق و الگوبرداری از ساختار پوسته خرخاکی و مکانیزم دفاعی آن می‌تواند در راستای ساخت سازه‌های مهندسی نوین با نسبت استحکام به وزن بالا مورد استفاده قرار گیرد.

### ۵- مراجع

- [1] J. N. Grossmann, H. Schmitz, Mechanical properties of terrestrial isopods, *ice*, 1-3, pp. 35-44, 2012.
- [2] L. Cheng, A. Thomas, J.L. Glancey, A.M. Karlsson, Mechanical behavior of bio-inspired laminated composites. *Composites Part A, Applied Science and Manufacturing*, 42(2), pp. 211-220, 2011.
- [3] F. Neues, A. Ziegler, M. Epple, The composition of the mineralized cuticle in marine and terrestrial isopods: A comparative study. *Cryst. Eng. Comm*, 9(12), pp. 1245-1251, 2007.
- [4] A. Becker, A. Ziegler, M. Epple, The mineral phase in the cuticles of two species of Crustacea consists of magnesiumcalcite, amorphous calcium carbonate, and amorphous calcium phosphate. *Dalton Transactions*, 10, pp. 1814-1820, 2005.
- [5] S. Hild, O. Marti, A. Ziegler, Spatial distribution of calcite and amorphous calcium carbonate in the cuticle of the terrestrial crustaceans *Porcellioscaber* and *Armadillidiumvulgare*. *Journal of Structural Biology*, 163(1), pp. 100-108, 2008.
- [6] F. Neues, S. Hild, M. Epple, O. Marti, A. Ziegler, Amorphous and crystalline calcium carbonate distribution in the tergite cuticle of moulting *Porcellioscaber* (isopoda, crustacea). *Journal of Structural Biology*, 175(1), pp. 10-20, 2011.
- [7] A. Al-Sawalimih, *Crystallographic Texture of the Arthropod Cuticle Using Synchrotron Wide Angle X-ray Diffraction* (doctorate). Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2007.
- [8] H. Schmalfuß, Morphology and function of cuticularmicroscales and corresponding structures in terrestrial isopods (crust., isop., oniscoidea). *Zoomorphology*, 91(3), pp.263-274, 1978.
- [9] H. Rajabi, M. Moghadami, A. Darvizeh. Investigation of irostructure, Natural Frequencies and Vibration Modes of Dragonfly Wing. *Journal of Bionic Engineering* 8 pp. 165-173, 2011.
- [10] D. Klocke, H. Schmitz, Water as a major modulator of the mechanical properties of insect cuticle, *ActaBiomaterialia* 7, pp. 2935-2942, 2011.
- [11] W.C Flannigan, Finite Element Modeling of Arthropod Exoskeleton, department of mechanical and aerospace engineering, Case Western Reserve University, 1998.



شکل ۶ توزیع تنش اصلی ماکزیمم در پوسته‌ها بر حسب زاویه برخورد

به این منظور، تصاویر میکروسکوپی از پوسته خرخاکی ارائه و در مورد چگونگی اتصال بین پوسته و استرونوم جانور و نحوه قرارگیری صفحات پوسته خرخاکی نسبت به هم بحث شد و مدل‌های طراحی شده از پوسته خرخاکی در نرم‌افزار سالدورک، ارائه گردید. سپس مدل‌ها در نرم‌افزار اِبکس تحت بارگذاری دینامیکی توسط یک پرتابه در مدت زمان ۱ میلی ثانیه قرار گرفتند. مراحل بارگذاری در ۶ سیکل برای یک حالت خاص بارگذاری در دو وضعیت صاف و کروی پوسته، نمایش داده شد و در مورد چگونگی توزیع تنش در پوسته‌ها در طول مدت زمان ۱ میلی ثانیه از لحظه بارگذاری و انتقال تنش از هر یک از بخش‌های تشکیل دهنده پوسته به بخشی دیگر از آن بحث گردید. در نهایت توزیع تنش در پوسته‌های صاف و کروی، برای همه سرعت‌ها و زوایای مختلف مطالعه گردید.

نتایج حاصل حاکی از آن است که پس از برخورد پرتابه به پوسته در شرایط بارگذاری یکسان، با افزایش سرعت برخورد در هر یک از دو وضعیت صاف و کروی، ماکزیمم تنش اصلی در پوسته افزایش می‌یابد. مقدار ماکزیمم تنش در پوسته در هر دو حالت صاف و کروی در زاویه برخورد ۵۰ درجه حداقل می‌باشد. همچنین با مقایسه بین وضعیت تنش در دو حالت صاف و کروی در شرایط بارگذاری یکسان، این نتیجه حاصل شد که تنش در همه حالت‌های بارگذاری، در حالت کروی کمتر از حالت صاف است. این موضوع مکانیزم حفاظتی بدن جانور را توجیه می‌کند، از این جهت که این مکانیزم حفاظتی سبب می‌شود که تنش وارد به بدن حشره در بعضی موارد تا بیش از