



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

ابوالفضل درویشه^۱، سارا انامی راد^۲، منصور درویشه^۳، رضا انصاری^۴، حامد رجبی^{۵*}

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

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

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.

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

Abolfazl Darvizeh¹, Sara AnamiRad², Mansoor Darvizeh², Reza Ansari², Hamed Rajabi^{1*}

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^۱ 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- روش ها

۲-۱- عکس برداری الکترونی

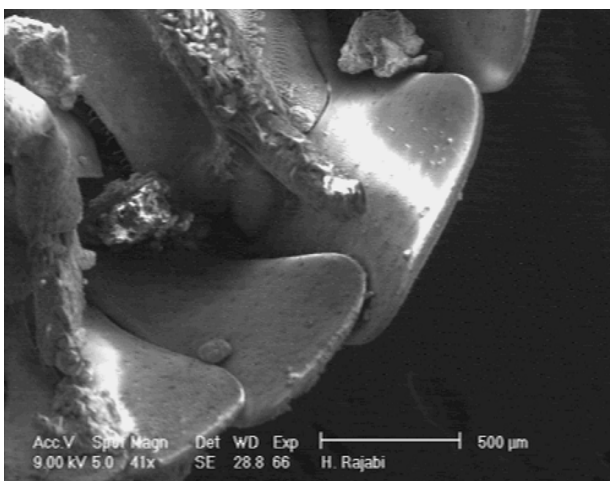
برای انجام آزمایش های لازم، تعدادی خرماکی از باغ های محلی و مناطق جنگلی جمع آوری شدند. قبل از تصویربرداری با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی^۸، نمونه ها به داخل دستگاه پوشانده منتقل شده و با استفاده از دستگاه لایه نشانی طلا^۹ با یک لایه نازک طلا-پالادیوم پوشش داده شدند. سپس یک دستگاه فیلیپس^{۱۰} برای مشاهده، استنباط و توصیف ساختار میکروسکوپی پوسته خرماکی مورد استفاده قرار گرفت و تصاویری از قسمت های مختلف پوسته به دست آمد.

۲-۲- شبیه سازی پوسته خرماکی

یکی از قسمت های کلیدی کار، رسیدن به الگوی صحیح و مناسبی از پوسته خرماکی و انتخاب نرم افزار مناسب برای طراحی مدلی کاملاً شبیه به پوسته جانور بود. برای نیل به این هدف، مطالعات گسترده ای بر روی خرماکی و تصاویر موجود از این جانور انجام شد و پس از بررسی های مفصلي که درمورد چگونگی اتصال پوسته و استرنوم انجام شد این نتیجه به دست آمد که صفحات مختلف پوسته خرماکی به طور مستقیم به یکدیگر متصل نشده اند، بلکه اتصال آنها در قسمت استرنوم جانور که در زیر بدن آن قرار گرفته است اتفاق می افتد. در واقع هر صفحه از پوسته بر روی صفحه بعدی همپوشانی دارد و شکلی انعطاف پذیر اما محافظ به کل بدن می دهد (شکل ۱). از این رو در مدل سازی استرنوم جانور نیز به همراه پوسته طراحی گردید. مدل هایی از دو وضعیت صاف و کروی جانور، با استفاده از نرم افزار سالیدورک^{۱۱} طراحی شد. در شکل ۲ مدل های طراحی شده از پوسته نشان داده شده است.

۲-۳- بارگذاری و شرایط مرزی

مدل های طراحی شده در نرم افزار سالیدورک برای اعمال بار به نرم افزار ابکس منتقل شدند. در این نرم افزار 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 مدل ها نسبت داده شد [۱۱، ۱۰، ۱].



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

دهند. در این راستا مواد نوین و پیچیده ای از قبیل کامپوزیت ها، سرامیک ها، متامواد و غیره توسط دانشمندان و مهندسان ساخته و به کار گرفته شده اند. بسیاری از این مواد علی رغم فراهم آوردن برخی خواص مکانیکی مطلوب ضعف هایی نیز دارند. شاید از مهم ترین این ضعف ها بتوان به مراحل دشوار و پرهزینه تولید آن ها اشاره نمود. اما در این زمینه، تمرکز علم تقلیدات زیستی بر روی جانوران مفصل دار بوده است [۱] زیرا اسکلت آن ها به علت وجود فیبر کیتین در یک قالب پروتئینی، دوام و ایستادگی بالایی دارد و سبب ظهور ویژگی هایی مانند بهبود چشمگیر استحکام در یک وزن نسبتاً پایین می شود. اسکلت بندی 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].

سخت پوستان، گونه ای از جانوران مفصل دار هستند که اسکلت آن ها دارای مقادیر زیادی کلسیت است [۴]. خرماکی یک سخت پوست با استخوان بندی سخت و قطعه قطعه 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^۱، لایه نازک مومی بیرونی که گواه وجود رطوبت در لایه های دیگر می باشد، اگزوکوتیکول^۲، که از کیتین و پروتئین های شیمیایی سخت شده تشکیل شده است و اندوکوتیکول^۳، که شامل پروتئین های کیتین و غیر سخت شده می باشد. لایه خارجی پوسته سخت پوست، کوتیکل^۴ نام دارد که به عنوان یک مانع، بین بافت زنده و محیط پیرامون عمل می نماید. جلوگیری از دست دادن آب در بدن جانور، یکی از نقش های اساسی کوتیکل است که برای حفظ حیات جانور الزامی است [۹]. به طور کلی، سخت پوستان مکانیزم های دفاعی فعال و غیرفعال متنوعی را در برابر حیواناتی که از آنها تغذیه می کنند نشان می دهند، از جمله محافظت به وسیله پوسته سخت و بازوهای شیمیایی برای ترساندن مهاجمان [۱۰]. در خرماکی انعطاف پذیری بسیار زیاد بدن این جانور منجر به پیدایش مکانیزم حفاظتی جالب توجهی شده است، به گونه ای 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 ویژگی های مکانیکی اسکلت سخت پوستان رو به رشد است اما داده های مفصل درباره ویژگی های مکانیکی پوسته سخت پوستان خاکی مانند خرماکی هنوز موجود نیست. تنها تحقیق انجام گرفته بر روی خواص مکانیکی پوسته خرماکی توسط گروسمن^۵ و شیمز^۶ انجام شده است. آنها در مطالعات خود با استفاده از آزمون دندان گذاری نانو^۷، 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، حالت های مختلف بارگذاری اعم از زوایا و سرعت های برخورد مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق می تواند در راستای ساخت سازه های 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

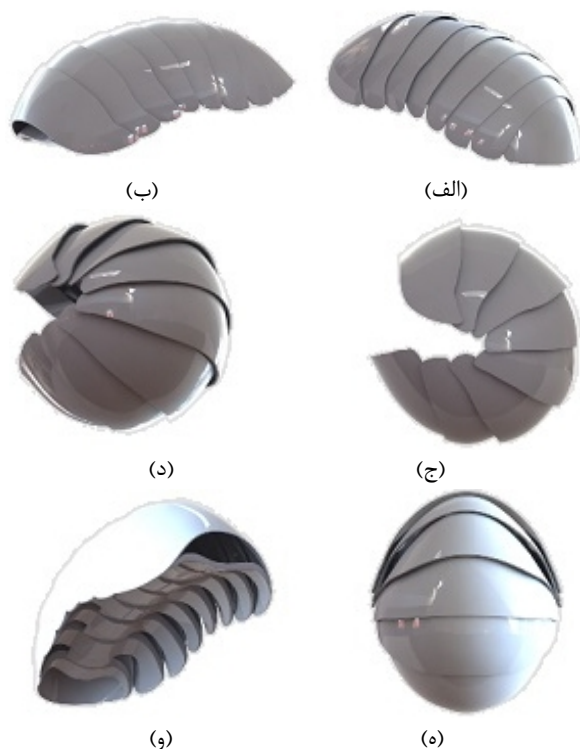
بارگذاری ۲۰ درجه می‌باشند. همان‌طور که در شکل‌های ۴-الف و ۵-الف مشخص است، قبل از برخورد پرتابه به پوسته، هیچ تنش در پوسته ایجاد نشده است و با گذشت زمان، تنش در کل پوسته توزیع می‌شود. شکل خاص صفحات پوسته باعث می‌شود که به محض اولین تماس پرتابه با پوسته، تنش در پوسته توزیع شود. نحوه قرارگیری صفحات بر روی 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- محل های 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.

۳-۲-۳- 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.

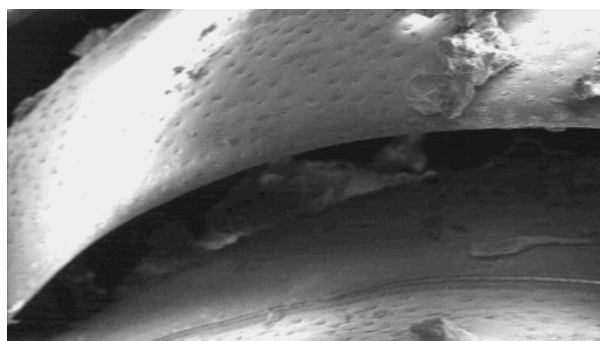
۳-۱-۱- ساختار میکروسکوپی

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 منحصر به فردی 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.

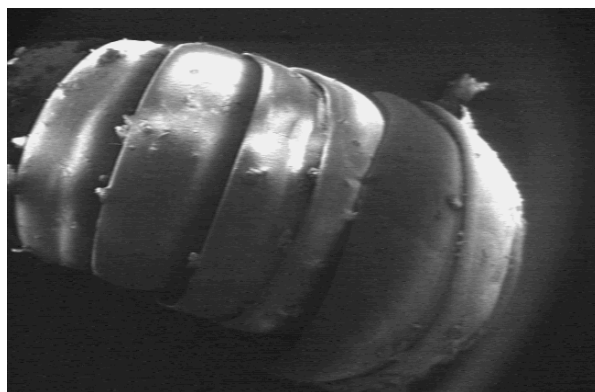
۳-۲-۲- رفتار مکانیکی

پس از مدل‌سازی و اعمال بار به پوسته در حالت‌های بارگذاری متفاوت، توزیع تنش اصلی ماکزیمم در پوسته، استخراج شد.

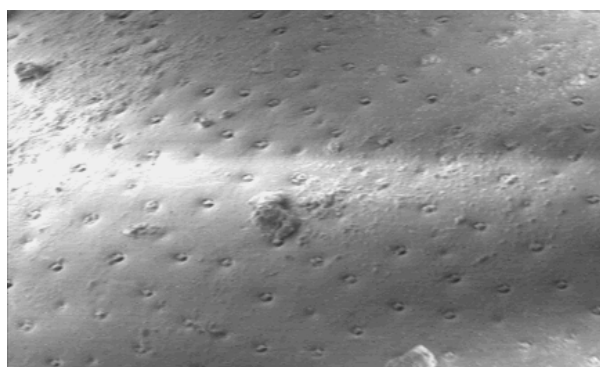
شکل‌های ۴ و ۵ چگونگی اعمال ضربه به پوسته را از قبل از برخورد تا انتهای زمان ۱ میلی ثانیه، در شش مرحله، نشان می‌دهند که مربوط به زاویه



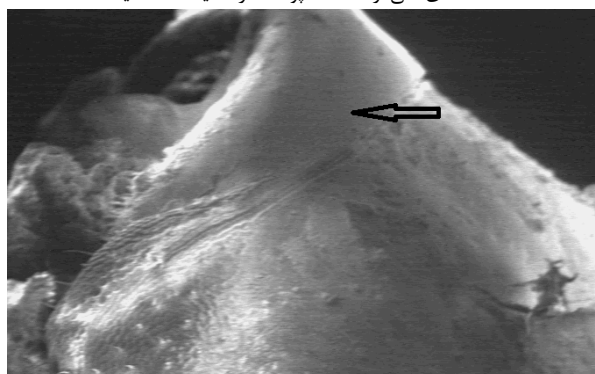
ب- چیدمان صفحات پوسته بر روی یکدیگر



الف- نمای کلی از صفحات پوسته در ناحیه قفسه سینه



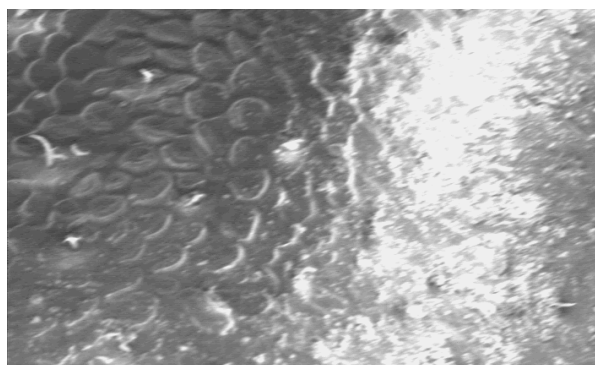
د- فرو رفتگی های موجود روی سطح خارجی پوسته



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

پوسته ها در هر دو وضعیت صاف و کروی، با صرف نظر از خطاهای کوچک در برخی حالت ها، تا زاویه برخورد ۵۰ درجه، مقدار تنش ماکزیمم کاهش یافته و پس از آن تا رسیدن به زاویه ۹۰ درجه این مقادیر افزایش می یابند. بنابراین می توان 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.

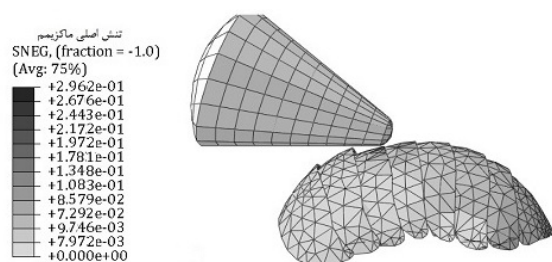
۴- بحث و نتیجه گیری

در غیاب مطالعه ای 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 ضربه ای توسط حشره انجام گرفت.

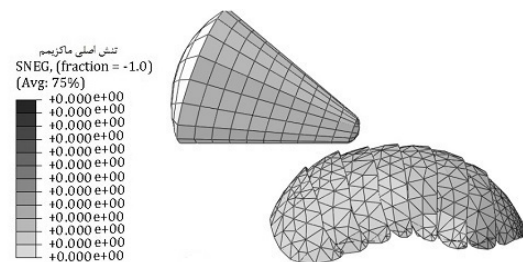
با افزایش سرعت برخورد پرتابه به پوسته در هر یک از حالات صاف و کروی، تنش ماکزیمم در پوسته افزایش می یابد. به این صورت که در سرعت ۴ متر بر ثانیه در زاویه برخورد ۲۰ درجه، مقدار تنش در پوسته صاف به ۵۱۲ مگاپاسکال و در پوسته کروی به ۸۴/۷ مگاپاسکال افزایش می یابد. به همین ترتیب، این روند در سایر زوایای برخورد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

۳-۲-۳- بررسی تأثیر زاویه برخورد

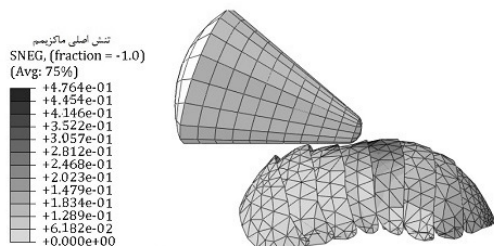
همان طور که در منحنی های نشان داده شده در شکل ۶ مشخص است، در



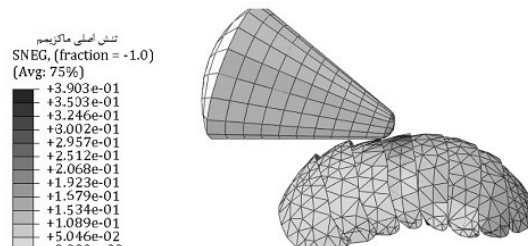
ب- لحظه برخورد پرتابه به پوسته در زمان ۰/۳ میلی ثانیه



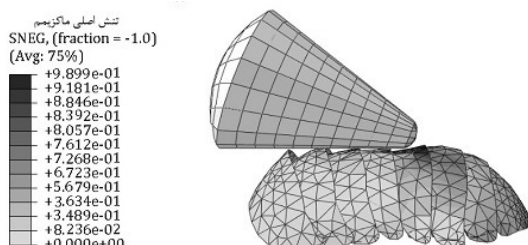
الف- قبل از برخورد



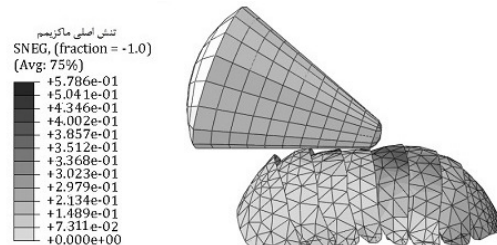
د- لحظه ۰/۶ میلی ثانیه



ج- لحظه ۰/۴ میلی ثانیه

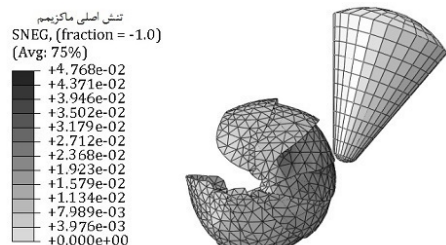


و- انتهای بازه زمانی، لحظه ۱ میلی ثانیه

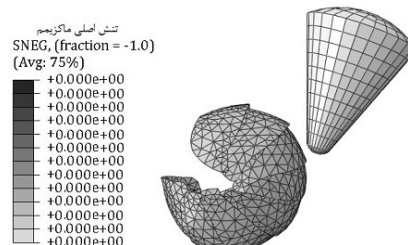


ه- لحظه ۰/۸ میلی ثانیه

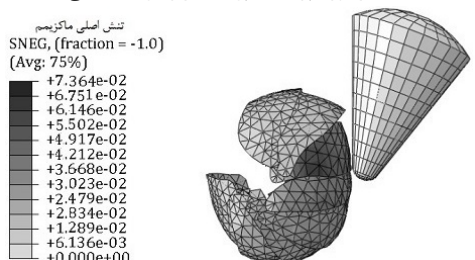
شکل ۴ مراحل برخورد پرتابه به پوسته صاف در طول مدت زمان ۱ میلی ثانیه، به همراه مقادیر تنش مربوط به هر حالت بر حسب گیگاپاسکال



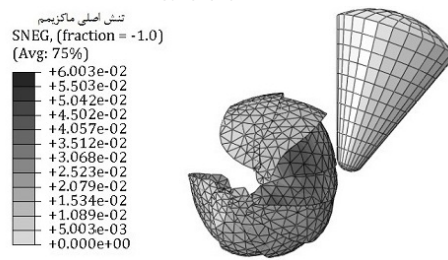
ب- لحظه برخورد پرتابه به پوسته در زمان ۰/۳ میلی ثانیه



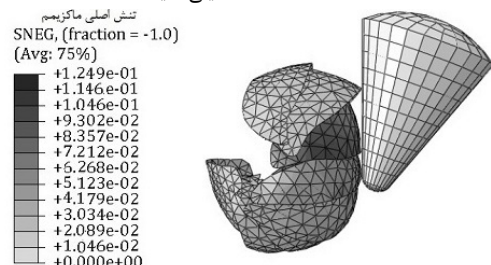
الف- قبل از برخورد



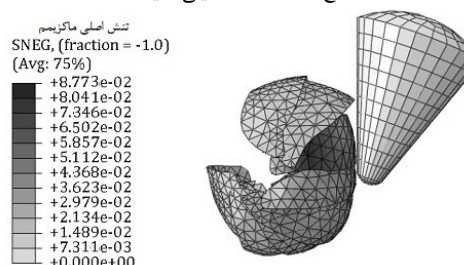
د- لحظه ۰/۶ میلی ثانیه



ج- لحظه ۰/۴ میلی ثانیه



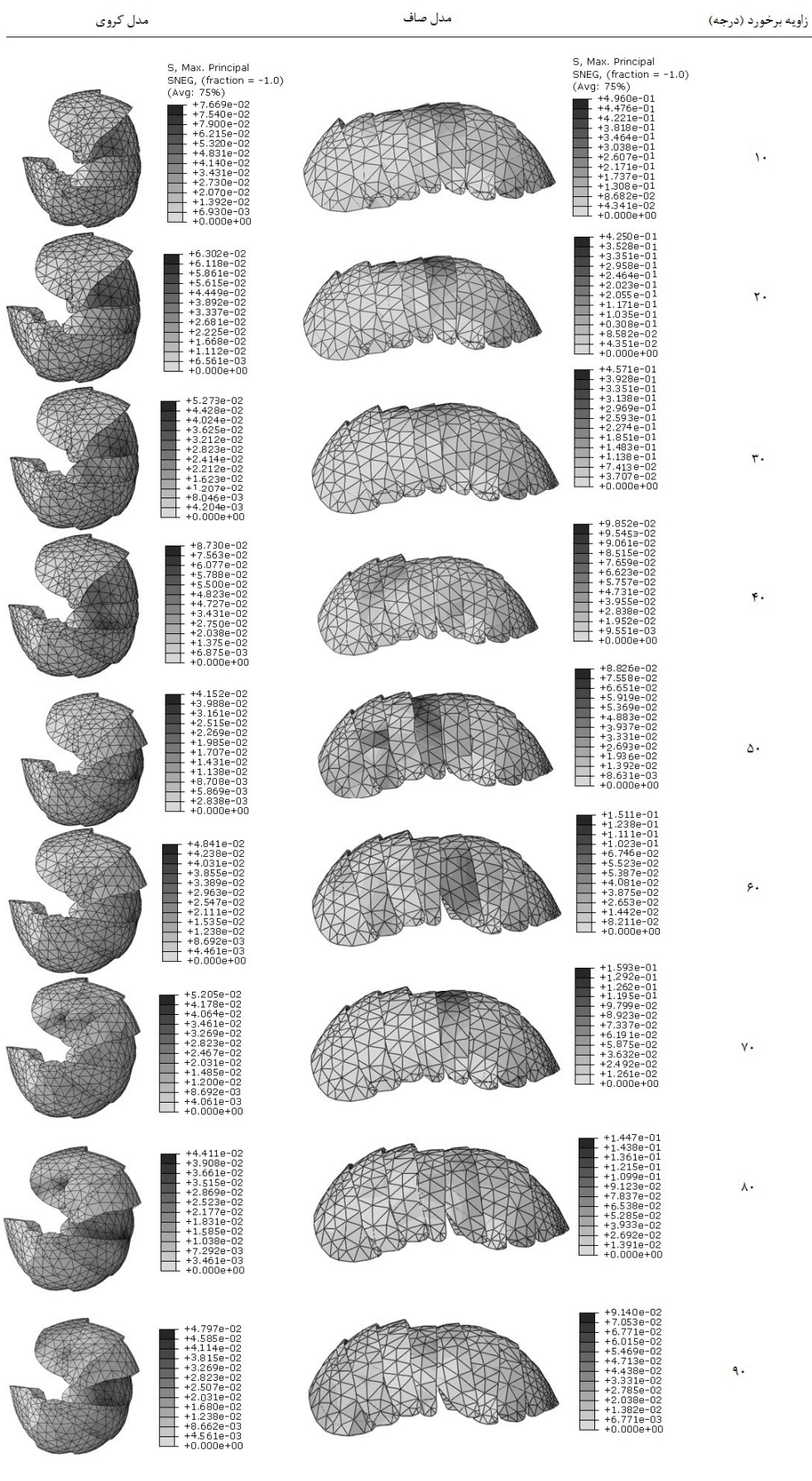
و- انتهای بازه زمانی، لحظه ۱ میلی ثانیه



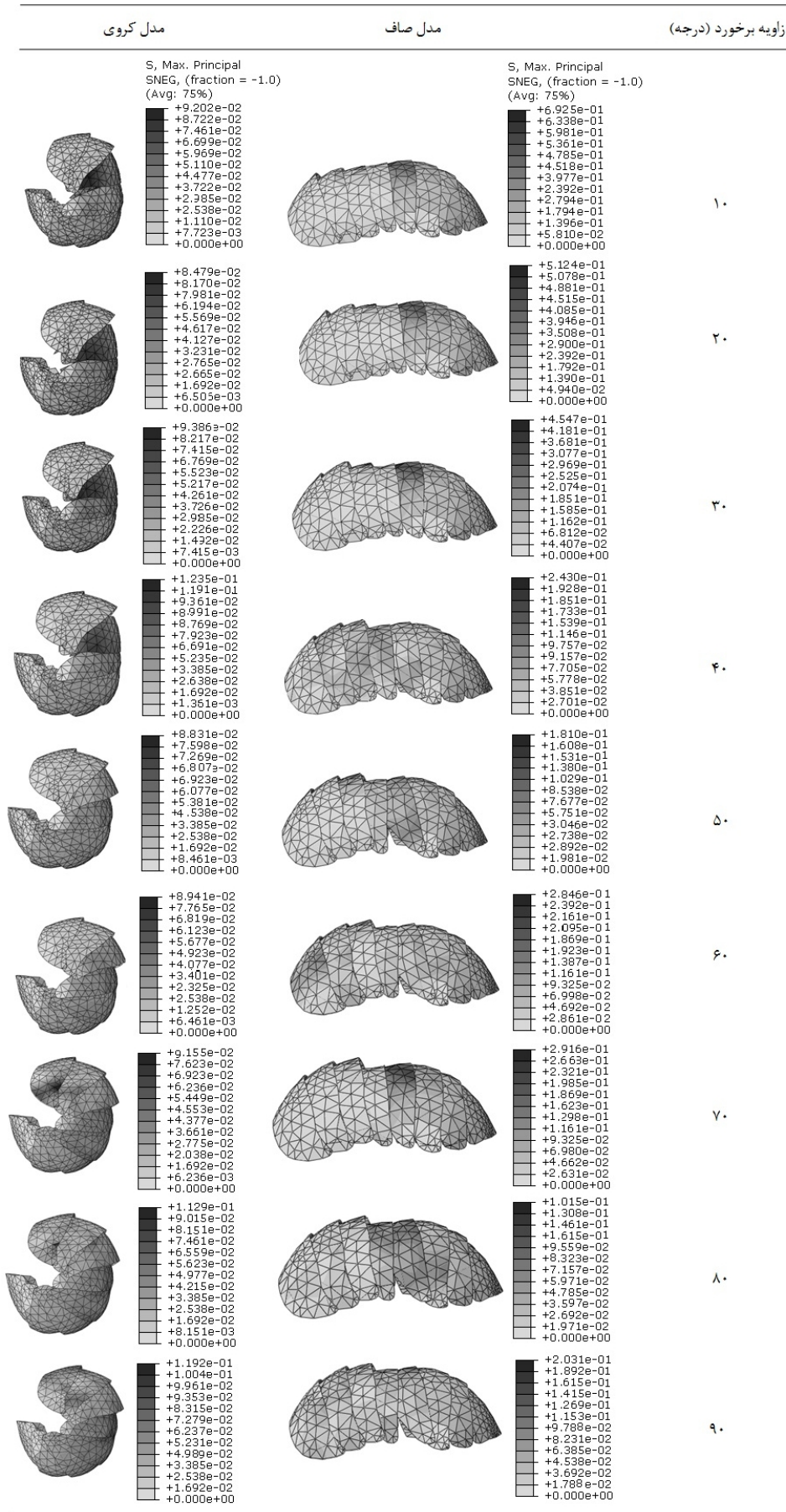
ه- لحظه ۰/۸ میلی ثانیه

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)



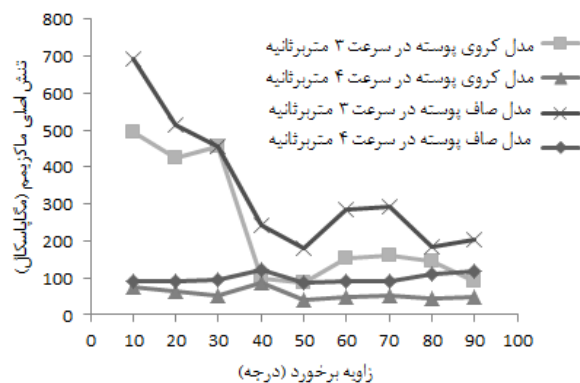
جدول ۲ توزیع تنش در پوسته های صاف و کروی، در زوایای ۱۰ تا ۹۰ درجه و در سرعت ۴ متر بر ثانیه (مقادیر تنش در کانتورها بر حسب گیگاپاسکال می باشد)



۶۰۰ درصد کاهش یابد. از این رو است که جانور در هنگام احساس خطر بدن خود را به صورت یک کره جمع می کند که ضمن حفاظت از اندام های 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 خرماکی و مکانیزم دفاعی آن می تواند در راستای ساخت سازه های 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. Eppe, 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. Eppe, The mineral phase in the cuticles of two species of Crustacea consists of magnesium calcite, 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 *Armadillidium vulgare*. *Journal of Structural Biology*, 163(1), pp. 100-108, 2008.
- [6] F. Neues, S. Hild, M. Eppe, 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-Sawalmih, *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 cuticular microstructures 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 microstructure, 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, *Acta Biomaterialia* 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 پوسته ها بر حسب زاویه برخورد

به این منظور، تصاویر میکروسکوپی از پوسته خرماکی ارائه و در مورد چگونگی اتصال بین پوسته و استرنوم جانور و نحوه قرارگیری صفحات پوسته خرماکی نسبت به هم بحث شد و مدل های طراحی شده از پوسته خرماکی در نرم افزار سالدورک، ارائه گردید. سپس مدل ها در نرم افزار اباکس 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 پوسته ها در طول مدت زمان ۱ میلی ثانیه از لحظه بارگذاری و انتقال تنش از هر یک از بخش های تشکیل دهنده پوسته به بخشی دیگر از آن بحث گردید. در نهایت توزیع تنش در پوسته های صاف و کروی، برای همه سرعت ها 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 می یابد. مقدار ماکزیمم تنش در پوسته در هر دو حالت صاف و کروی در زاویه برخورد ۵۰ درجه حداقل می باشد. همچنین با مقایسه بین وضعیت تنش در دو حالت صاف و کروی در شرایط بارگذاری یکسان، این نتیجه حاصل شد که تنش در همه حالت های بارگذاری، در حالت کروی کمتر از حالت صاف است. این موضوع مکانیزم حفاظتی بدن جانور را توجیه می کند، از این جهت که این مکانیزم حفاظتی سبب می شود که تنش وارد به بدن حشره در بعضی موارد تا بیش از