

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده عمران و معماری

گروه مهندسی عمران

## بررسی تئذ سازه ای پانل های لانه زنبوری به روش اجزای محدود

دانشجو: احمد قاسمی

استاد راهنما

دکتر علی کیهانی

دکتر فریبرز فریبرز

استاد مشاور

دکتر رامین امینی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد به منظور اخذ درجه کارشناسی ارشد

تاسان ۹۰



# تقدیم بہ:

پدر، مادر و ہمسر عزیزتر از جانم

آنانی کہ بارہمایی ہا و زحمات بی درنشان مسیہ شرف و خوشبختی را آشکار ساختہ،

دعای خالصانہ شان بدرقہ راہ و وجودشان دگر می وجودم است.

آنانی کہ کوشیدند تا بدانم ہدف غایی وجود این است

کہ ہستی را پروردگاریست بی مانند.

# قدردانی

حال که به لطف و رحمت لایتناهی حضرت حق، مراحل این پایان نامه رو به اتمام نهاده، بر خود لازم دانسته تا از همه دوستانی که در پیشبرد

اهداف این پایان نامه ایجاب را مساعدت و یاری نموده اند، سپاس و قدردانی به عمل آورم.

لیکن، پس از حمد باری تعالی بر خود واجب می دانم نسبت به زحمات خانواده عزیزم قدردان باشم و همچنین با سپاس فراوان از همه کسانی که یاریم کردند تا بدانم آنچه را نمی دانستم به خصوص استاید که را تقدیم جناب آقای دکتر علی کیهانی، جناب آقای دکتر فریبرز فریبرز و جناب آقای دکتر راسین اینی.

در انتها سپاس گزار کلیه دوستان و عزیزانی هستم که در مراحل مختلف تحصیلی مرا یاری نمودند؛ هر چند مجالی برای بیان نام تک تک این

دوستان نیست، لیکن همیشه خود را مرهون لطف و مهربانی آن ها دانسته و امید دارم به لطف الهی روزی توان جبران محبت ایشان را

داشته باشم.



## چکیده

ساختار پانل های لانه زنبوری متشکل از سلولهای شش ضلعی میان تهی است که دیواره آنها بر خلاف سایر پانل های ساندویچی، عمود بر صفحات پوسته قرار می گیرد. این نوع سازه ها دارای انعطاف به سختی و استحکام به وزن بالایی می باشند. کاربرد پانل ساندویچی، به خصوص با استفاده از مواد سبکی همچون آلومینیوم در اغلب فعالیتهای مهندسی نظیر هوایی، فضایی، دریایی و زمینی و اخیراً ساختمانی بسیار مورد توجه است.

اهتمام اصلی در این پایان نامه، مدل سازی رفتار پانل لانه زنبوری با استفاده از نرم افزار ANSYS می باشد. صحت مدل های ارائه شده بر مبنای نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده توسط سایر محققین مورد تأیید قرار گرفته است.

در این تحقیق ابتدا پانل با مشخصات مختلف از جمله در ابعاد هسته، ضخامت هسته و رویه و ارتفاع هسته مورد بررسی قرار گرفت. پانل مورد نظر با ابعاد ۱ در ۳ متر در نظر گرفته شد و تحت بارهای گسترده و متمرکز در مرکز آن آنالیز گردید. تکیه گاهها بصورت مفصلی در دو انتهای پانل مدل گردید، پس از آن تأثیر عبور لوله در امتداد طولی لوله مورد بررسی قرار گرفت و تحت بارگذاری و تکیه گاههای یکسان با پانل معمولی مقایسه شد.

همانگونه که در نتایج حاصل از اجزای محدود مشاهده گردید، خواص خمشی با افزایش ارتفاع هسته به شکل قابل توجهی افزایش می یابد بدون اینکه تغییر زیادی در وزن مشاهده شود. همچنین با افزایش ضخامت رویه و هسته خواص خمشی افزایش یافته و منجر به کاهش خیز، تنش و کرنش فون میسز در پانل می شود. مدل ها حاکی از آن است که حداکثر تنش و کرنش فون میسز از وسط پانل در حالت عادی به محل عبور لوله در پانل بریده شده منتقل می گردد.

کلمات کلیدی: پانل ساندویچی، ساختار لانه زنبوری، تحلیل اجزای محدود، تحلیل استاتیکی غیرخطی

## فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه و تاریخچه.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۱
۱-۱-۱- ساختارهای ساندویچی.....	۱
۱-۱-۲- مدول خمشی ساختارهای ساندویچی متقارن.....	۷
۱-۱-۳- تنش مستقیم در پوسته.....	۷
۱-۱-۴- تنش برشی در پوسته و هسته.....	۷
۱-۲- اصطلاحات مورد استفاده در هانی کمب.....	۱۲
۱-۳- تاریخچه.....	۱۳
۱-۴- لزوم استفاده از هانی کمب.....	۱۴
۱-۵- جنس تیغه ها.....	۱۹
فصل دوم: آشنایی با هانی کمب.....	۲۱
۱-۲- کاربردهای هانی کمب.....	۲۲
۱-۲-۱- ساختمان.....	۲۲
۱-۲-۲- صنایع هوایی.....	۲۵
۱-۲-۳- حمل و نقل.....	۲۹
۱-۲-۴- فیلتر تداخل الکترومغناطیسی.....	۳۱
۱-۲-۵- تجهیزات ورزشی.....	۳۱
۲-۲- روشهای ساخت.....	۳۲



- ۳۲.....۱-۲-۲-روش انبساطی.....
- ۳۴.....۲-۲-۲-روش کرکره ای.....
- ۳۶.....۳-۲-۲-مقایسه محصولات ساخته شده از روشهای مختلف.....
- ۳۹.....۳-۲-انواع هانی کمب ها.....
- ۳۹.....۱-۳-۲-انواع هانی کمب از نظر جنس.....
- ۴۱.....۲-۳-۲-انواع هانی کمب ها از نظر شکل سلولها.....
- ۴۳.....۴-۲-خواص هانی کمب.....
- ۴۴.....۱-۴-۲-سختی و محدوده خطی هانی کمب.....
- ۴۵.....۲-۴-۲-ضریب پواسون.....
- ۴۸.....۳-۴-۲-خستگی.....
- ۴۹.....۵-۴-۲-خزش.....
- ۵۰.....۵-۲-انواع شکست سازه های پانل لانه زنبوری.....
- ۵۱.....۶-۲-انتخاب هانی کمب.....
- ۵۳.....۷-۲-روشهای اتصال پانل های لانه زنبوری.....
- ۵۷.....۸-۲-آزمایشها.....
- ۵۹.....۱-۸-۲-آزمایش کشش.....
- ۵۹.....۲-۸-۲-آزمایش فشار.....
- ۶۰.....۳-۸-۲-جداشدگی پوسته.....
- ۶۰.....۴-۸-۲-برش در جهت LT,WT.....
- ۶۱.....۵-۸-۲-آزمایش خمش سه نقطه ای.....
- ۶۲.....۶-۸-۲-آزمایش تیر طره مضاعف.....

۶۲.....	آزمایش کمانش و خرابی نهایی تحت نیروی محوری
۶۳.....	فصل سوم: پیشینه تحقیقات انجام شده.....
۷۷.....	فصل چهارم: نحوه مدل سازی پانل لانه زنبوری در نرم افزار ANSYS.....
۷۷.....	۱-۴- مقدمه.....
۷۹.....	۲-۴- مروری بر مفهوم تحلیل غیرخطی.....
۸۱.....	۳-۴- جایگاه و اهمیت کالیبراسیون نمونه ها.....
۸۱.....	۴-۴- معرفی گزینه های المان ها، مدل های رفتاری و ثابت های حقیقی.....
۸۲.....	۵-۴- المان مدل سازی پانل لانه زنبوری در نرم افزار ANSYS.....
۸۳.....	۶-۴- مصالح (مدل رفتاری) مورد استفاده در شبیه سازی پانل لانه زنبوری.....
۸۳.....	۷-۴- نحوه مدل سازی یک پانل لانه زنبوری در ANSYS.....
۸۷.....	۸-۴- کالیبراسیون یک پانل لانه زنبوری.....
۸۸.....	۱-۸-۴- مشخصات مصالح پانل لانه زنبوری.....
۸۸.....	۲-۸-۴- نتایج به دست آمده از تحلیل اجزای محدود و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی.....
۸۸.....	۹-۴- نکات کلی مدل سازی اجزای محدود پانل لانه زنبوری.....
۸۹.....	۱۰-۴- داده های ورودی اجزای محدود.....
۹۰.....	۱۱-۴- شبکه بندی مدل.....
۹۰.....	۱۲-۴- بارگذاری و شرایط تکیه گاهی.....
۹۲.....	۱۳-۴- روش تحلیل.....

۹۵.....۱۴-۴- زبان پارامتری ANSYS و ساخت مکرر.....

## فصل پنجم: تحلیل اجزای محدود پانل لانه زنبوری (توسط نرم افزار ANSYS).....۹۷

۹۸.....۱-۵- بررسی پانل لانه زنبوری.....

۹۸.....۱-۱-۵- مقدمه.....

۹۸.....۲-۱-۵- نمونه ها.....

۹۸.....۳-۱-۵- مکانیزم خرابی نمونه ها.....

۹۹.....۴-۱-۵- نتایج تحلیل اجزای محدود و بررسی آن.....

۱۱۹.....۲-۵- بررسی تاثیر عبور لوله از پانل لانه زنبوری.....

۱۱۹.....۱-۲-۵- مقدمه.....

۱۱۹.....۲-۲-۵- نمونه ها.....

۱۲۰.....۳-۲-۵- مکانیزم خرابی نمونه ها.....

۱۲۱.....۴-۲-۵- نتایج تحلیل اجزای محدود و بررسی آن.....

## فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات.....۱۲۸

۱۲۹.....۱-۶- پیش گفتار.....

۱۲۹.....۲-۶- نتیجه گیری.....

۱۳۱.....۳-۶- پیشنهادات.....

۱۳۲.....منابع.....

## فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱- بازده ساندویچ هانی کمب.....	۱۷
جدول ۲-۱- مقایسه بین خصوصیات هسته هانی کمب و فوم.....	۱۸
جدول ۳-۱- مقایسه سازهای برای ساز ههای با وزن مشابه.....	۱۹
جدول ۱-۲- خواص مکانیکی برای هانی کمب در دمای اتاق.....	۴۴
جدول ۲-۲- محدوده تناسبی هسته هانی کمب.....	۴۵
جدول ۲-۳- ضریب پواسون محاسبه شده با فرض رفتار ایزوتروپیک.....	۴۷
جدول ۴-۲- آزمایشهای پانل ساندویچی.....	۵۷
جدول ۵-۲- آزمایشهای اتصال پانل ساندویچی.....	۵۸
جدول ۱-۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و اجزای محدود.....	۸۸
جدول ۲-۴- مدول الاستیسیته و ضریب پواسون آلومینیوم.....	۸۹
جدول ۱-۵- شناسه مدلهای اجزای محدود نمونهها (ابعاد بر حسب میلی متر).....	۱۰۵
جدول ۲-۵- مقایسه پانل P-1 و P-2 و P-3 تحت بار گسترده.....	۱۱۳
جدول ۳-۵- مقایسه پانل P-1 و P-2 و P-3 تحت بار متمرکز.....	۱۱۳
جدول ۴-۵- مقایسه پانل P-4 تحت بار گسترده.....	۱۱۴
جدول ۵-۵- مقایسه پانل P-4 تحت بار متمرکز.....	۱۱۴
جدول ۶-۵- مقایسه پانل P-5 تحت بار گسترده.....	۱۱۴
جدول ۷-۵- مقایسه پانل P-5 تحت بار متمرکز.....	۱۱۴
جدول ۸-۵- مقایسه پانل P-1 ، P-2 و P-4 و P-5 تحت بار گسترده.....	۱۱۵

- جدول ۹-۵- مقایسه پانل P-1 ، P-2 و P-4 و P-5 تحت بار متمرکز..... ۱۱۶
- جدول ۱۰-۵- شناسه مدل‌های اجزای محدود نمونه‌ها (ابعاد بر حسب میلی‌متر)..... ۱۱۹
- جدول ۱۱-۵- مقایسه پانل P-1 و P-6 تحت بار گسترده..... ۱۲۱
- جدول ۱۲-۵- مقایسه پانل P-1 و P-6 تحت بار متمرکز..... ۱۲۱
- جدول ۱۳-۵- مقایسه پانل P-2 و P-7 تحت بار گسترده..... ۱۲۲
- جدول ۱۴-۵- مقایسه پانل P-2 و P-7 تحت بار متمرکز..... ۱۲۲
- جدول ۱۵-۵- مقایسه پانل P-3 و P-8 تحت بار گسترده..... ۱۲۳
- جدول ۱۶-۵- مقایسه پانل P-3 و P-8 تحت بار متمرکز..... ۱۲۳

## فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱- سازه های ساندویچی در طبیعت.....	۵
شکل ۱-۲- شکل شماتیک ساختار ساندویچی .....	۶
شکل ۱-۳- رفتار ساختار ساندویچی تحت نیروی خمشی.....	۶
شکل ۱-۴- توزیع تنش در ساختار ساندویچی.....	۶
شکل ۱-۵- سلولهای هانی کمب شش ضلعی.....	۸
شکل ۱-۶- پانل ساندویچ هانی کمب.....	۹
شکل ۱-۷- توپولوژی و چگالی نسبی هانی کمب با سلولهای متفاوت.....	۱۰
شکل ۱-۸- توپولوژی و چگالی نسبی هانی کمب کرکره ای با سلولهای متفاوت.....	۱۱
شکل ۱-۹- اصطلاحات علمی هانی کمب.....	۱۲
شکل ۱-۱۰- صافی آیرودینامیکی (a). صفحه- استرینگر بال هواپیما با پوسته نازک و تحت بار . (b)	
یک پره ساندویچ هانی کمب DC10 با سطح آینه مانند. ....	۱۵
شکل ۱-۱۱- مقایسه تستهای خستگی Sonic یک پانل هانی کمب با یک سازه پوست های مقاوم شده .....	۱۶
شکل ۲-۱- کاربرد هانی کمب بعنوان نمای ساختمان و پارتیشن.....	۲۳
شکل ۲-۲- کاربرد هانی کمب در فرآورده ههای چوبی.....	۲۴
شکل ۲-۳- کاربرد هانی کمب بعنوان ترمیم در نمای ساختمان.....	۲۴
شکل ۲-۴- پناهگاه نظامی سیار .....	۲۵
شکل ۲-۵- آشیانه تعمیر هواپیما.....	۲۵

- شکل ۲-۶- هانی کمب در هواپیماهای بویینگ..... ۲۶
- شکل ۲-۷- استفاده هانی کمب در هواپیمای Mc Donnell-Douglas F1۵..... ۲۶
- شکل ۲-۸- استفاده هانی کمب در هلیکوپتر Sikorsky Blackhawk..... ۲۷
- شکل ۲-۹- پره هلی کوپتر..... ۲۷
- شکل ۲-۱۰- هواپیمای SR-71 Blackbird..... ۲۷
- شکل ۲-۱۱- استفاده از هانی کمب در شاتل فضایی..... ۲۸
- شکل ۲-۱۲- کاربردهای هانی کمب در سیستم حمل و نقل..... ۳۰
- شکل ۲-۱۳- پوسته دم بویینگ ۷۲۷..... ۳۱
- شکل ۲-۱۴- پانل تهویه مطبوع با حفاظت الکترومغناطیسی..... ۳۱
- شکل ۲-۱۵- روش تولید انبساطی هانی کمب..... ۳۳
- شکل ۲-۱۶- جهت خطوط چاپ شده..... ۳۴
- شکل ۲-۱۷- روش تولید کرکره ای هانی کمب..... ۳۵
- شکل ۲-۱۸- ترکیب سلولهای هسته کرکره ای..... ۳۷
- شکل ۲-۱۹- اشکال مختلف سلولهای هانی کمب..... ۴۲
- شکل ۲-۲۰- هسته منعطف آلومینیوم (a) هسته منعطف (b) هسته منعطف دوگانه (c) پیچاندن دور  
یک توپ بیسبال..... ۴۲
- شکل ۲-۲۱- منحنی نیرو- تغییر مکان هانی کمب..... ۴۴
- شکل ۲-۲۲- کمانش دیواره های سلول تحت بار فشاری..... ۴۶
- شکل ۲-۲۳- رابطه بین  $E$  و  $\mu$ ..... ۴۶
- شکل ۲-۲۴- منحنی غیر کلاسیک برای سلولهای شش ضلعی..... ۴۷

- شکل ۲-۲۵- مراحل زمانی مختلف در منحنی خزش. در  $PSi$  ۵۰ تنش و ۲۰۰ درجه فارنهایت..... ۴۹
- شکل ۲-۲۶- انواع شکست سازه های پانل لانه زنبوری..... ۵۲
- شکل ۲-۲۷- روشهای اتصال مسطح پانل لانه زنبوری..... ۵۳
- شکل ۲-۲۸- روشهای اتصال گوشه پانل لانه زنبوری..... ۵۳
- شکل ۲-۲۹- روشهای اتصال ویژه پانل لانه زنبوری..... ۵۴
- شکل ۲-۳۰- روشهای بستن انتهای پانل لانه زنبوری..... ۵۴
- شکل ۲-۳۱- روشهای مهار پانل لانه زنبوری..... ۵۵
- شکل ۲-۳۲- روشهای بریدن و خم نمودن پانل لانه زنبوری..... ۵۵
- شکل ۲-۳۳- ابزار مورد نیاز جهت اتصالات پانل لانه زنبوری..... ۵۶
- شکل ۲-۳۴- آزمایش ساندویچ مرکب تحت کشش..... ۵۹
- شکل ۲-۳۵- آزمایش ساندویچ مرکب تحت فشار..... ۵۹
- شکل ۲-۳۶- آزمایش جدا شدگی پوسته..... ۶۰
- شکل ۲-۳۷- آزمایش برش (a) نمای شماتیک (b) قبل (c) بعد از برش در جهت LT (d) بعد از برش در جهت T..... ۶۱
- شکل ۲-۳۸- آزمایش خمش سه نقطه ای..... ۶۱
- شکل ۲-۳۹- آزمایش تیر طره مضاعف..... ۶۲
- شکل ۲-۴۰- آزمایش نیروی محوری (a) شکست چین خوردگی وجه (b) شکست موجداربرشی..... ۶۲
- شکل ۴-۱- مفهوم گام بارگذاری و زیر گام در تحلیل غیر خطی..... ۸۰
- شکل ۴-۲- shell 63 المان..... ۸۳



- شکل ۴-۳- مراحل اعمال گام های بارگذاری.....۸۶
- شکل ۴-۴- جزئیات ابعاد و بارگذاری پانل لانه زنبوری .....۸۷
- شکل ۴-۵- مدل شبکه بندی شده پانل(با تقارن).....۸۹
- شکل ۴-۶- تاثیر تعداد المان در دقت.....۹۰
- شکل ۴-۷- شرایط تکیه گاهی.....۹۱
- شکل ۴-۸- نحوه بارگذاری.....۹۲
- شکل ۴-۹- روش تکرار نیوتن رافسون.....۹۳
- شکل ۴-۱۰- رفتار همگرایی طول کمان.....۹۴
- شکل ۵-۱- کانتور اجزای محدود (a) خیز درجهت عمود (b) تنش فون میسز (c) کرنش فون میسز.....۹۹
- شکل ۵-۲- منحنی های حداکثر خیز نمونه P-1.....۱۰۰
- شکل ۵-۳- منحنی های حداکثر تنش فون میسز نمونه P-1.....۱۰۰
- شکل ۵-۴- منحنی های حداکثر کرنش فون میسز نمونه P-1.....۱۰۰
- شکل ۵-۵- منحنی های حداکثر خیز نمونه P-2.....۱۰۲
- شکل ۵-۶- منحنی های حداکثر تنش فون میسز نمونه P-2.....۱۰۲
- شکل ۵-۷- منحنی های حداکثر کرنش فون میسز نمونه P-2.....۱۰۲
- شکل ۵-۸- منحنی های حداکثر خیز نمونه P-3.....۱۰۴
- شکل ۵-۹- منحنی های حداکثر تنش فون میسز نمونه P-3.....۱۰۴
- شکل ۵-۱۰- منحنی های حداکثر کرنش فون میسز نمونه P-3.....۱۰۴
- شکل ۵-۱۱- منحنی های حداکثر خیز نمونه های P-1, P-2, P-3.....۱۰۶
- شکل ۵-۱۲- منحنی های حداکثر تنش فون میسز نمونه های P-1, P-2, P-3.....۱۰۶

- شکل ۵-۱۳- منحنی‌های حداکثر کرنش فون میسز نمونه های P-1, P-2, P-3..... ۱۰۶
- شکل ۵-۱۴- منحنی‌های حداکثر خیز نمونه P-4..... ۱۰۹
- شکل ۵-۱۵- منحنی‌های حداکثر تنش فون میسز نمونه P-4..... ۱۰۹
- شکل ۵-۱۶- منحنی‌های حداکثر کرنش فون میسز نمونه P-4..... ۱۰۹
- شکل ۵-۱۷- منحنی‌های حداکثر خیز نمونه P-5..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۸- منحنی‌های حداکثر تنش فون میسز نمونه P-5..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۹- منحنی‌های حداکثر کرنش فون میسز نمونه P-5..... ۱۱۱
- شکل ۵-۲۰- کانتور اجزای محدود (a) خیز درجهت عمود (b) تنش فون میسز (c) کرنش فون میسز..... ۱۲۰
- شکل ۵-۲۱- نمودار حداکثر خیز نمونه های P-1, P-2, P-3, P-6 و P-7, P-8..... ۱۲۴
- شکل ۵-۲۲- نمودار حداکثر تنش فون میسز نمونه های P-1, P-2, P-3, P-6 و P-7, P-8..... ۱۲۵
- شکل ۵-۲۳- نمودار حداکثر کرنش فون میسز نمونه های P-1, P-2, P-3, P-6 و P-7, P-8..... ۱۲۵

فصل اول

# مقدمہ و تاریخچه

## ۱-۱ - مقدمه

### ۱-۱-۱- ساختارهای ساندویچی

ساختمان های با ساختار پانل های ساندویچی در زمره سیستم های پیش ساخته محسوب شده و از امتیازات ساختمان های پیش ساخته برخوردارند . مفاهیمی که در ادبیات فنی ساختمان های پیش ساخته به کار می روند، مواردی نظیر تولید انبوه، فرآیندهای تضمین کیفیت و کنترل کیفیت، ویژگی های خاص ساخت در کارگاه، حمل و نقل و نصب در این ساختارها نیز کاربرد دارند.

از جمله مزایای سیستم پانل های ساندویچی عبارتند از:

- ۱- سرعت در تولید سازه ها با ماشین آلات بصورت خودکار و یا نیمه خودکار
- ۲- افزایش مقاومت سازه ها
- ۳- کاهش وزن (سبک سازی) در تولید سازه ها
- ۴- کاهش مصرف انرژی در تولید سازه ها
- ۵- دقت اجرا در ساخت قطعات
- ۶- کاهش هزینه تولید و قیمت تمام شده ساختمان به لحاظ امکان تولید انبوه
- ۷- کاهش ضایعات تولید (زباله و نخاله ساختمانی) و صرفه جویی در نیروی انسانی و مصالح
- ۸- بهره برداری بهینه از مواد اولیه مورد نیاز تولید
- ۹- امکان کنترل کیفی تولیدات در محل واحد صنعتی از ابعاد مختلف منطبق با استانداردهای قابل قبول.
- ۱۰- امکان برنامه ریزی ، هدف گذاری و پیش بینی اتمام عملیات ساختمانی به لحاظ امکان کنترل عوامل تولید.
- ۱۱- سهولت در انبار کردن قطعات پیش ساخته (در شرایطی که ضرورت داشته باشد).
- ۱۲- وجود نظم عملیاتی در کارگاه نصب قطعات پیش ساخته

۱۳- امکان تعبیه عایق های حرارتی و صوتی در این نوع سازه ها که موجبات کاهش مصرف انرژی و زندگی آرام برای ساکنین می گردد.

۱۴- امکان بهره برداری از قالب ها در ابعاد استاندارد به منظور بهره گیری در تولید انواع سفارشات

۱۵- رعایت شرایط زیست محیطی و جلوگیری از آلودگی محیط زیست متاثر از کاهش زباله و نخاله ساختمانی

۱۶- پوشش وسیع عمرانی فارغ از تولید واحدهای مسکونی جهت ایجاد فضاهای غیر مسکونی ، مبلمان شهری

۱۷- امکان استمرار تولید در هر شرایط جوی (دائمی بودن تولید)

۱۸- امکان تولید انبوه از جمله تولید انبوه مسکن

۱۹- امکان ارتقاء تخصصها و مهارتهای شغلی نیروی کار شاغل در بخش ساختمان و مسکن (ارتقای کارگر ساده و فصلی به کارگر صنعتی و تکنیسین در بخش ساختمان).

۲۰- اشتغال زایی نیروی کار بخش ساختمان و مسکن در بستری بادوام با توجه به دائمی بودن تولید

۲۱- تاثیرگذاری در شیوه تولید ، تنوع تولید و ارتقای کیفی مصالح پایه ساختمانی در صنعت ساختمان

۲۲- پشتیبانی موثر حیاتی در مواجهه با سوانح و بلایای طبیعی از جمله زلزله در شرایط بحرانی

۲۳- ایجاد زمینه تحقیق و پژوهش ، ظهور و نبوغ کارآفرینان در عرصه معماری و صنعت ساختمان

۲۴- صدور خدمات فنی و مهندسی در زمینه ساخت صنعتی

در مقابل نقاط ضعف سیستم پانل های ساندویچی مواردی چون بالا بودن هزینه حمل و نقل قطعات، نیازمندی به هزینه جراثقال برای حمل در محل و طرح معماری محدود را در بر دارد. سیستم پانل های ساندویچی با رویکردی میانه در مقایسه با سیستم های درجا و پیش ساخته می توانند مزایای روش های سیستم های پیش ساخته را در برداشته و از طرفی دیگر از برخی مشکلات آن ها رهایی یابند.

این سیستم ها به دلیل استفاده از فناوری ساختار طراحی شده ، دارای وزن کم و سهولت نقل و انتقال می باشند .مهمترین نکته سازه ای در سیستم پانل های لانه زنبوری، تکمیل نیازمندی های اتصالات بعد از نصب پانل ها در محل و قبل از اتمام نازک کاری آن ها می باشد که این موضوع موجبات ایجاد ساختاری یکپارچه با اتصالات همگون و مطمئن را فراهم می آورد.

در واقع در سیستم پانلی پس از استقرار پانل های حمل شده به محل اجرا و نصب تمامی ملزومات ، اتصالات انجام گرفته و در نهایت ساختار صلب با قابلیت باربری سه بعدی و عملکرد مناسبی برای تحمل تمامی بارهای جانبی فراهم می آید .

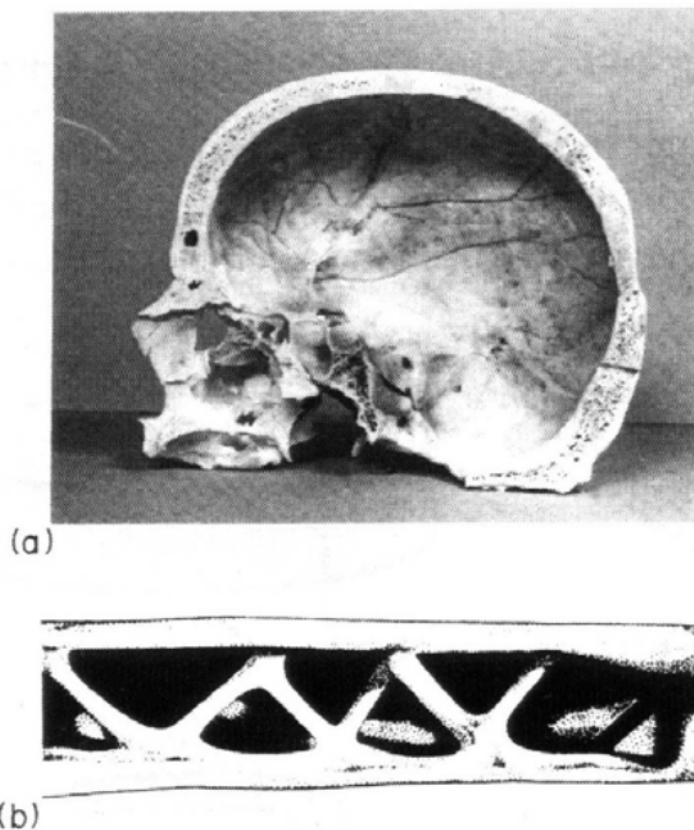
سبک سازی سازه مزایای مختلفی از جمله کاهش مساحت و حجم مورد نیاز شالوده ، کاهش در هزینه های اسکلت و حمل مصالح مورد نیاز را موجب می شود که در این سیستم شاهد این موضوع می باشیم.

سیستم پانل های ساندویچی در صورت استفاده از یک لایه عایق در ساختار خود موجب می شود تا اعضای این مجموعه بتوانند به عنوان عایق های حرارتی و صوتی ایفای نقش نمایند.

از آنجا که اعضای سازه پانلی جداکننده فضاها می باشند و به دلیل ساخت اعضای نیمه پیش ساخته در کارخانه و حمل و نصب سریع آن، سرعت اجرای کار به نحو قابل توجهی افزایش می یابد.

با توجه به تولید صنعتی پانل ها که اسکلت اصلی سیستم پانلی را تشکیل می دهند و همچنین ظرافت ها و نوع ساخت ، این سیستم ها از نوع اجرای صنعتی ساختمان ها محسوب می شود. در این راستا با در نظر گرفتن مدیریت پروژه و فرآیند مهندسی ارزش ، می توان بهره وری تولید مسکن را افزایش داد.

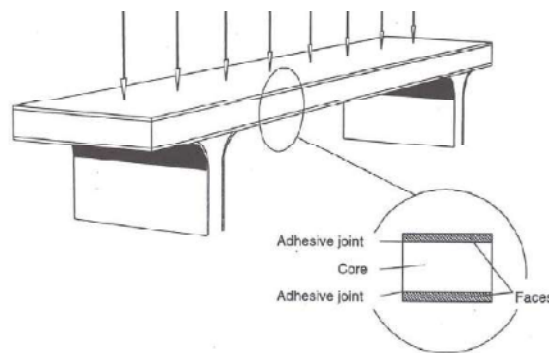
در طبیعت سازه های ساندویچی گوناگونی موجود می باشند همانگونه که در شکل ۱-۱ مشاهده می شود مقطعی از جمجمه انسان به نمایش درآمده که دو لایه استخوان متراکم یک لایه استخوان اسفنجی را در بر گرفته و در ذیل آن مقطعی از بال یک پرنده به نمایش در آمده است.



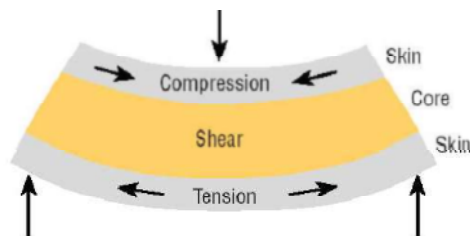
شکل ۱-۱- سازه ساندویچی در طبیعت

یک ساختار ساندویچی اصولاً از دو ورق نازک با استحکام کششی و فشاری مناسب و یک لایه میانی نسبتاً ضخیم و مقاوم در برابر تنش های برشی تشکیل می شود. در این نوع ساختار ها، ورقها معمولاً با استفاده از چسب یا فرآیند جوشکاری به لایه میانی متصل می شوند.

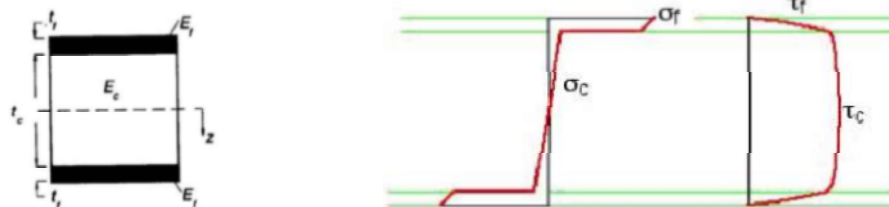
در شکل های ۱-۲-۳-۴ شماتیک ، رفتار و توزیع تنش در ساختارهای ساندویچی به نمایش در آمده است.



شکل ۱-۲- شماتیک ساختار ساندویچی



شکل ۱-۳- رفتار ساختار ساندویچی تحت نیروی خمشی



شکل ۱-۴- توزیع تنش در ساختارهای ساندویچی



### ۱-۱-۲- مدول خمشی ساختارهای ساندویچی متقارن

$$D = \int E z^2 dz = \frac{E_f t_f^3}{6} + 2E_f t_f \left[ \frac{d}{2} \right]^2 + \frac{E_c t_c^3}{12} = \frac{E_f t_f^3}{6} + \frac{E_f t_f d^2}{2} + \frac{E_c t_c^3}{12} = 2D_f + D_0 + D_c$$

که در رابطه فوق  $2D_f$ ، مدول خمشی صفحات نسبت به محور خنثی هر یک صفحه و  $D_0$ ، مدول خمشی صفحات نسبت به محور وسط ساختار ساندویچی و  $D_c$ ، مدول خمشی هسته و  $d$  فاصله بین مراکز ثقل صفحات ( $d = t_f + t_c$ ) می باشند.

### ۱-۱-۳- تنش مستقیم در پوسته

با فرض اینکه پوسته ها نازک ( $t_c \gg t_1, t_2$ ) و هسته ضعیف ( $E_f \gg E_c$ )

$$\sigma_f = \frac{M_x z (d - e) E_f}{D_0} = \frac{M_x}{t d}$$

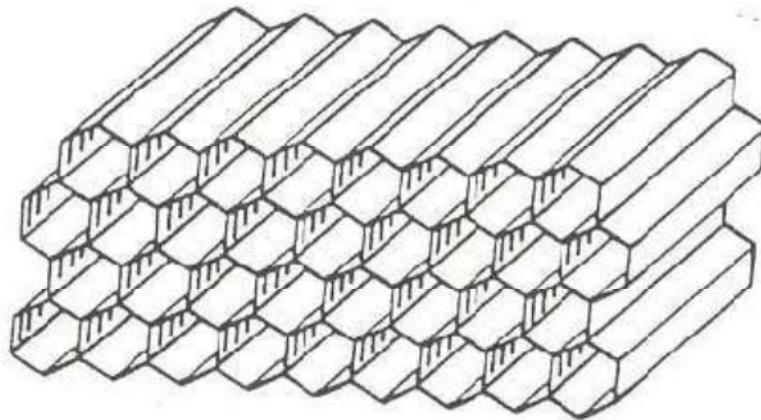
### ۱-۱-۴- تنش برشی در پوسته و هسته

$$\tau_f = \frac{I_x}{(D_0 + 2D_f)} \cdot \frac{E_f}{2} \left( \frac{t_c^2}{4} + t_f t_c + t_f^2 - z^2 \right)$$

$$\tau_c = \frac{I_x}{D} \left[ \frac{E_f t_f d}{2} + \frac{E_c}{2} \left( \frac{t_c^2}{4} - z^2 \right) \right]$$

در این پروژه سازه های ساندویچی با مغزی هانی کمب مورد بررسی قرار می گیرد. مباحثی همچون روش ساخت، کاربرد، خواص این پانلها ارائه و بحث خواهد شد.

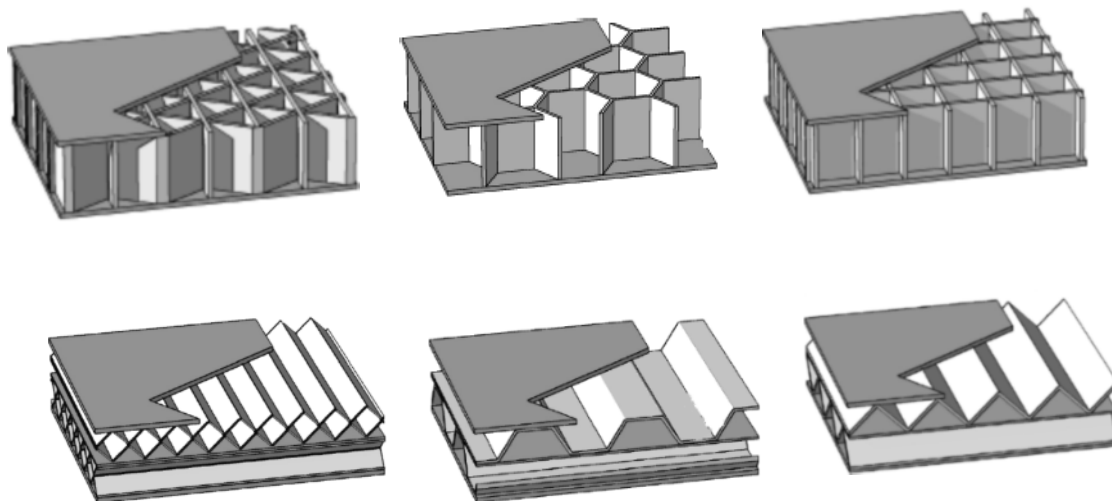
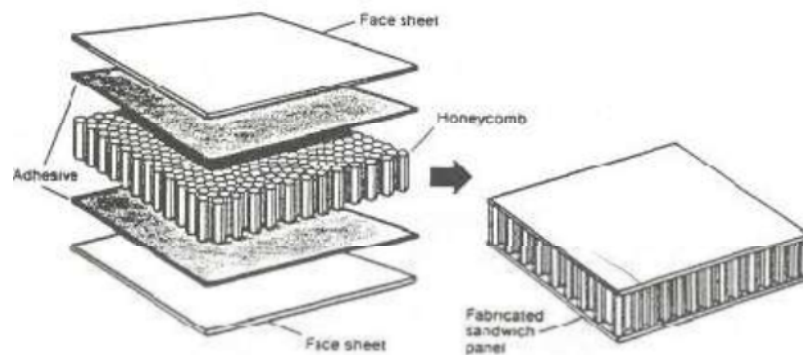
هانی کمب به سازه هایی گفته می شود که از چیده شدن سلولهای باز (میان تهی) در کنار هم بوجود می آید. اتصال ورقه های بسیار نازک از ماده ای خاص به یکدیگر، این سلولها را تشکیل می دهد و اشکال مختلفی دارند که معروفترین این شکلها عبارتند از: شش ضلعی، مستطیلی، دایره ای. شکل ( ۱- ۵) به نوع شش ضلعی آن اشاره دارد. روشهای گوناگونی برای در کنار هم قرار دادن این سلولها وجود دارد مانند استفاده از چسب یا لحیم کاری و ... که در فصل بعدی توضیح داده خواهد شد.



شکل ۱- ۵- سلولهای هانی کمب شش ضلعی

مفهوم اصلی سازه ساندویچی هانی کمب، چسباندن صفحات نازک، متراکم و قوی به سلولهای هانی کمب ضخیم و سبک وزن است. در این محصولات، نسبت استحکام به وزن و سفتی به وزن بالا قابل دسترسی است. هانی کمب پیکربندی بی همتا و جالب توجه از مواد است که امتیازات فراوانی مانند خواص مکانیکی خوب، خواص برخورد عالی، خاصیت دی الکتریکی پایین، ضرایب انتقال حرارت پایین، کنترل سیال، خواص صوتی خوب، مساحت سطح مقطع پایین در این سلولها را فراهم می کند. شکل (۱- ۶) پانل ساندویچی شامل رویه ها، چسب و هسته هانی کمب را نشان می دهد. [۱]

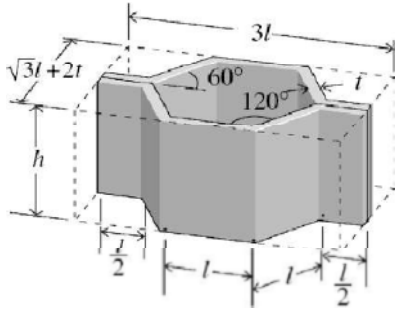
هانی کمب ها نه تنها در پانلهای ساندویچی بلکه در کاربردهای زیاد دیگری نیز مانند: جاذب انرژی، هدایت کننده هوا، پانلهای حرارتی، پانلهای آگوستیک، نفوذ نور و سپر در مقابل فرکانسهای رادیویی مورد استفاده قرار می گیرند.



شکل ۱-۶- پانل ساندویچ هانی کمب

شکل (۷-۱) توپولوژی و چگالی نسبی هانی کمب با سلولهای متفاوت را نمایش می دهد. [ ۲ ]

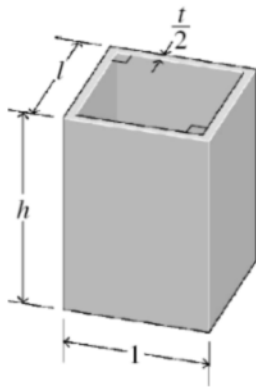
هانی کمب شش ضلعی:



$$\rho/\rho_s = \frac{8t}{3(\sqrt{3}l + 2t)}$$

$$\cong \frac{8t}{3\sqrt{3}l} \text{ for } L \gg t$$

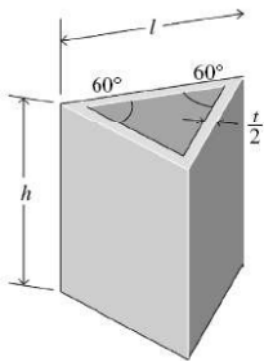
هانی کمب چهار گوش:



$$\rho/\rho_s = \frac{(2l-t)t}{l^2}$$

$$\cong \frac{2t}{l} \text{ for } L \gg t$$

هانی کمب مثلثی:



$$\rho/\rho_s = \frac{(2\sqrt{3}l-t)t}{l^2}$$

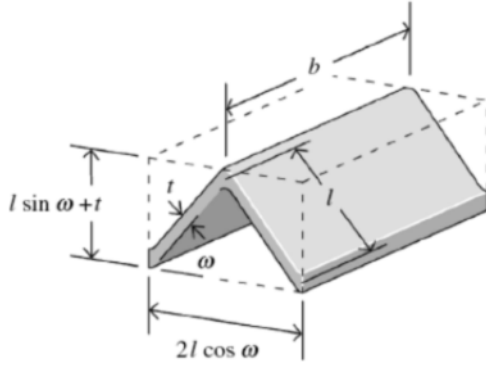
$$\cong 2\sqrt{3} \frac{t}{l} \text{ for } L \gg t$$

شکل ۷-۱- توپولوژی و چگالی نسبی هانی کمب با سلولهای متفاوت

شکل (۸-۱) توپولوژی و چگالی نسبی هانی کمب کرکره ای با سلولهای متفاوت را نمایش می دهد.

[ ۲ ]

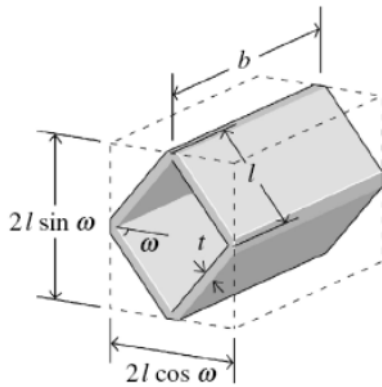
هانی کمب کرکره ای مثلثی :



$$\rho/\rho_s = \frac{t}{(\frac{1}{2} l \sin 2w + t \cos w)}$$

$$\cong 2 \frac{t}{l} \text{ for } w=45^\circ, L \gg t$$

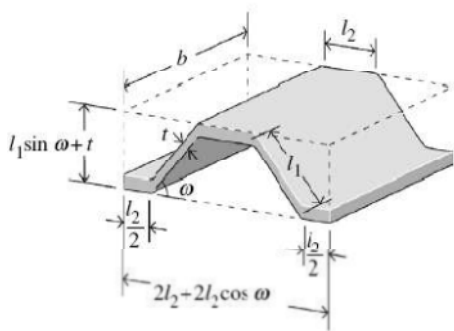
هانی کمب کرکره ای لوزی منشوری :



$$\rho/\rho_s = \frac{2t}{l \sin 2w}$$

$$\cong 2 \frac{t}{l} \text{ for } w=45^\circ$$

هانی کمب کرکره ای نیم شش ضلعی :

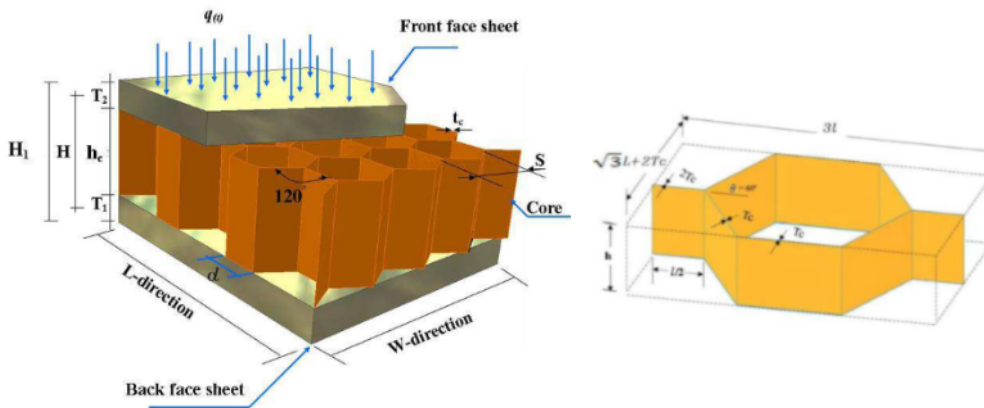


$$\rho/\rho_s = (l_1 + l_2)t / (l_2 + l_1 \cos w)(l_1 \sin w + t)$$

شکل ۸-۱- توپولوژی و چگالی نسبی هانی کمب کرکره ای با سلولهای متفاوت

## ۲-۱- اصطلاحات مورد استفاده در هانی کمب

در شکل ( ۹-۱ ) بعضی از اصطلاحات مورد استفاده در هانی کمب نشان داده شده است و برخی دیگر در ادامه توضیح داده می شود.



شکل ۹-۱ - اصطلاحات علمی هانی کمب

چگالی هانی کمب: وزن یک فوت مکعب هسته بر حسب پوند یا وزن یک متر مکعب هسته بر حسب کیلوگرم است.

سلول: یک واحد منفرد از هانی کمب که می تواند به اشکال گوناگون باشد ولی معمولاً به شکل شش ضلعی است.

ورق: جزء ورقه ای هانی کمب که از آن به جان یا تیغه هانی کمب نیز تعبیر می شود.

گره: قسمت پیوند یافته بین ورقه های (تیغه های) مجاور یا به ناحیه ای با ورقه های دو لایه گفته می شود.

دیواره آزاد: ورق های تک لایه دیواره سلول است.

باریکه: مجموعه ورق های به هم چسبیده (هانی کمب قبل از انبساط) است.

اندازه سلول: قطر کوچک شش ضلعی (فاصله دو روبروی هم در شش ضلعی) است.

### ۱-۳- تاریخچه هانی کمب

هانی کمب دقیقاً شبیه شانه های زنبور عسل که در طبیعت وجود دارد، می باشد و نام خود را نیز از آن گرفته است. هانی کمب می تواند از هر ماده نازک مسطح ساخته شود. در گذشته بیش از ۵۰۰ نوع هانی کمب از مواد گوناگون ساخته شده است. هانی کمب کاغذی حدود ۲۰۰۰ سال پیش توسط چینی ها ساخته شد اما به صورت سازه امروزی از آن استفاده نمی کردند و جنبه تزئینی داشت.

اولین نوآوری درباره هسته هانی کمب، که شامل روشی برای ساخت هانی کمب های کاغذی بود، احتمالاً متعلق به بودویگ آلمانی در سال ۱۹۰۵ است. طبق پیشینه ای که داریم یکی از اولین سازه های ساندویچی دست ساز، مربوط به یک پل راه آهن در والز بود که در سال ۱۸۴۵ ساخته شد. در سال ۱۹۱۹ اولین پانل ساندویچی هواپیما با استفاده از رویه های نازک از چوب ماهون و هسته ای از چوب بالسا ساخته شد. این پانلهای اولیه در سازه هواپیماهای نیروی دریایی مورد استفاده قرار گرفت. در سال ۱۹۲۰ یک نیروی هوایی کامل به برزیل و نیروی هوایی دیگری در سال ۱۹۳۰ به سمت شیکاگو به وسیله این هواپیما پرواز داده شد که برای آن دوره از تاریخ، نمایش پروازی قابل توجهی بود. سپس در سالهای میانی جنگ جهانی اول و دوم پوسته های چند لایه در دو طرف هسته ای از جنس چوب بالسا به عنوان سازه اصلی در هواپیماهای نیروی دریایی ساخت ایتالیا، مورد استفاده قرار گرفت. [ ۱ ]

ساخت هانی کمب های سازه ای جدید حدوداً در سالهای ۱۹۳۰ شروع شد یعنی از زمانی که لینکولن در آمریکا هانی کمب هایی از کارتن به منظور استفاده در لوازم منزل ساخت. این ماده به عنوان هسته پانل ساندویچی که دارای رویه های نازک از چوب سخت بود، به کار گرفته شد.

در طول سالهای جنگ جهانی دوم توسط شرکت مارتین ، هانی کمب کاغذی در بشقاب آنتن رادار به کار گرفته شد. در این زمان ساخت هانی کمب ها دوران رشد و بلوغ خود را طی می کرد.

اگرچه هسته های کاغذی رطوبت جذب می کردند ولی در کل، تجربه موفق‌تری به حساب می آمد. با گذشت زمان شرکت مارتین ساخت هانی کمب هایی از جنس پارچه کتان را گسترش داد و بعد از اتمام جنگ جهانی دوم تولید هسته های هانی کمب ساخته شده از الیاف کتان، الیاف شیشه و ورقه های آلومینیومی را شروع کرد.

در همین زمان شرکت هواپیماسازی هاولاند، بمب افکن Mosquito را در دست طراحی و ساخت داشت که پانلهای ساندویچی به عنوان بخشی از اسکلت آن به کار گرفته شد. عملکرد عالی این هواپیما، باعث گرایش بسیاری از طراحان هواپیما، مخصوصاً در انگلیس، به سمت سازه های ساندویچی شد. و این امر به خاطر برتری اصلی آنها به منظور ساخت هواپیماهایی با قابلیت بالا بود. نتیجه تلاش بسیاری از گروههای طراحی هواپیما منجر به شروع راههای بهتر برای درست کردن سازه های ساندویچی و انتخاب مواد مناسب برای درست کردن هسته و رویه شد. [ ۱ ] اولین پانل ساندویچی کاملاً آلومینیومی در سال ۱۹۴۵ تولید شد. در این موفقیت ساخت چسب هایی با رئولوژی مناسب (سیالیت حین پخت) در اتصال رویه ها به هسته نقش مهمی داشت.

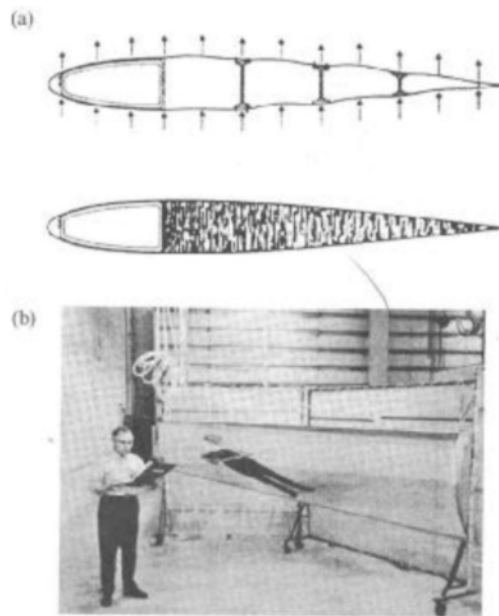
#### ۴-۱- لزوم استفاده از هانی کمب

چرا و چه وقت باید از سازه ساندویچی هانی کمب استفاده شود؟ دلیل اصلی استفاده از این سازه ها کنترل وزن و سبک کردن سازه است. اگر چه از یک پانل هانی کمب می توان پوسته های صیقلی و در نتیجه مقاومت به خستگی بسیار خوب را نیز انتظار داشت.

شکل (۱ - ۱۰ a) صفحه- استرینگر بال هواپیما با پوسته های نازک تحت بار را نشان می دهد. اگر پوسته ها نازک و فاصله بین استرینگرها زیاد باشد، پوسته ها تحت بار، تغییر شکل خواهند داد در حالی که اگر از سازه هانی کمب استفاده شود، سطح بال هواپیما، تحت بار صاف نگه داشته می شود. شکل (۱-۱۰ b) یک پره ساندویچ هانی کمب DC-10 را با انعکاس مردی روی سطح شیشه



مانند آن نشان می دهد. پانلهای ساندویچی در فضای آینه ای نور افکنها و حتی روی بعضی از تخت خوابها در هتل لا سوگاس مورد استفاده قرار می گیرند.

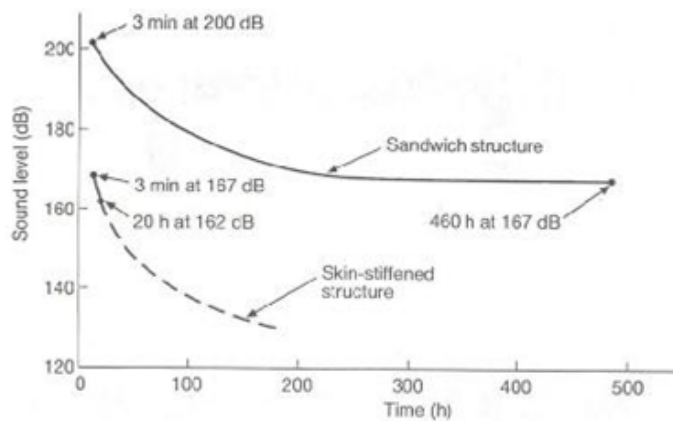


شکل ۱۰-۱- صافی آیرودینامیکی. (a) صفحه- استرینگر بال هواپیما با پوسته نازک و تحت بار. (b) یک پره ساندویچ هانی کمب DC-10 با سطح آینه مانند.

امتیاز مثبت مهم دیگر برای سازه های ساندویچی، مقاومت به خستگی آنها است. شکل ( ۱-۱۱) نتایج تست خستگی سونیک برای پانل هانی کمب و سازه پوست های مقاوم شده را با هم مقایسه می کند.

ملاحظه می شود که پانل هانی کمب تحت ۱۶۷ دسی بل، ۴۶۰ ساعت دوام دارد در حالی که سازه معمولی فقط به مدت ۳ دقیقه این بار را تحمل می کند. بنابراین سازه هانی کمب ۹۲۰۰ مرتبه بیشتر دوام می آورد. دلیل مقاومت به خستگی بالاتر پانل هانی کمب نسبت به سازه معمولی این است که در ساختار صفحه- استرینگر سازه معمولی از پر چهایی استفاده می شود که تنش را به صورت

موضعی بالا می برد و باعث انهدام زودتر سازه می شود. در حالی که سطوح پانل هانی کمب به صورت پیوسته به سلولها متصل شده اند، بنابراین تمرکز تنش ظاهر نمی شود.



شکل ۱۱-۱- مقایسه تستهای خستگی سونیک یک پانل هانی کمب با یک سازه پوست های مقاوم شده

اما دلیل اصلی برای استفاده از هانی کمب، کنترل وزن سازه های مورد نظر می باشد. جدول (۱-۱) مقادیر استحکام کششی و سختی سازه های هانی کمبی مختلف را، با هم مقایسه می کند. این سازه ها با تقسیم یک قطعه آلومینیومی به ضخامت ۱.۶ mm بین دو نیمه رویه بالا و پایین، سازه ساندویچی را می سازند. همانطور که ملاحظه می شود سازه ساندویچی که بین دو صفحه آن، فاصله مناسب وجود دارد، ۳۷ برابر در سختی و ۷ برابر در استحکام خمشی، قویتر از صفحه آلومینیومی توپر است در حالی که فقط ۹ درصد از آن سنگین تر است. البته باید به این نکته توجه داشت که سازه هانی کمبی از نظر هزینه گرانتر از سازه معمولی است.

جدول ۱-۱ - بازده ساندویچ هانی کمب [ ۳ ]

سختی نسبی	۱	۷	۳۷
خزش	۱.۰۰۰	۰.۱۴۰	۰.۰۲۷
مقاومت خمشی نسبی	۱	۳	۷
وزن	۰.۹۱۰	۰.۹۷۸	۰.۹۹۴

Assumes ۰.۰۶۴in (۱.۶۲۶mm) aluminum ۳.۰pcf (۴۸ kg/m<sup>3</sup>)core, ۰.۰۳psf (۱.۴N/m<sup>3</sup>) adhesive

وقتی که وزن کم به عنوان ملاک طراحی انتخاب شده باشد و پوسته ها دارای مشکل کمانش باشند، باید از هانی کمب استفاده شود. اگر بارهای وارده خیلی زیاد و پوسته های ضخیم مورد نیاز باشد (بدون مسئله کمانش) استفاده از صفحه- استرینگر، اقتصادی ترین راه حل می تواند باشد. جای دیگری که هانی کمب نمی تواند بهترین پیشنهاد باشد وقتی است که بارگذاری ها خیلی کم هستند و برای مقاصد تخریب باید حداقل مقدار ضخامت پوسته مورد استفاده قرار بگیرد.

مواد دیگری که برای هسته به کار می رود و با هانی کمب رقابت می کند، فوم است. در جدول (۱-۲) خصوصیات این دو نوع جنس هسته با هم مقایسه شده اند. همانطور که ملاحظه می شود استحکام کششی هانی کمب خیلی بهتر است و مدول برشی قابل توجهی دارد. تبعاً موقعی که خواص مکانیکی هسته در طراحی ساندویچ، فاکتور تعیین کننده ای باشد هانی کمب، انتخاب بهتری است. فوم در پانلهای با بارگذاری سبک و عایق به کار گرفته می شود؛ اگر چه در حالت معمولی نیز می توان با پر کردن سلولهای هانی کمب بوسیله فوم یا نوع دیگری از مواد عایق از آن استفاده کرد. که نتیجه آن یک سازه عایق با خواص مکانیکی خوب خواهد بود.

جدول ۱-۲- مقایسه بین خصوصیات هسته هانی کمب و فوم

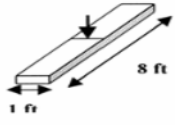
برشی		فشاری			مصالح
مدول	مقاومت	مدول	مقاومت	چگالی	
ksi	psi	ksi	psi	Pcf	
۴۵	۲۱۰	۷۵	۳۰۰	۳.۱	Aluminum honeycomb
۶	۱۷۵	۲۰	۳۲۵	۳.۰	Nomex honeycomb
۱۹	۱۹۵	۲۳	۴۱۰	۳.۰	Fiberglass honeycomb
۳	۱۱۴	۱۰	۱۲۸	۳.۱	Relacell foam
۱.۱	۵۱	۲.۷	۶۹	۳.۰	Keegacell foam
۲.۵	۷۰	۲.۵	۸۰	۳.۰	Rigicell foam
۲.۵	۷۲	۱۰.۲	۱۰۰	۳.۱	Divinycell foam



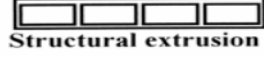
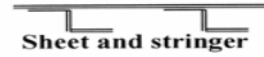
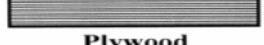
بطور خلاصه هانی کمب در مواقعی به کار گرفته می شود، که مسئله کمانش پوسته مطرح

باشد.

جدول (۱-۳) خواص بعضی از سازه های استاندارد را با بار وارده یکسان نسبت به هانی کمب نشان می دهد تمامی این پانلهای ۲.۵ mm ضخامت و وزن یکسان ۱۴.۶ kg/m<sup>2</sup> دارند. نتایج با توجه به چگونگی انتخاب تکیه گاه، بارگذاری و ضخامت پانل، کمی متفاوت خواهد بود. جدول ذکر شده رفتار کلی سازه های مورد بحث را نشان می دهد. فوم نسبت به هانی کمب استحکام و مدول برشی کمتری دارد بنابراین تیر مربوط به آن قابلیت تحمل بار کمتری داشته و تغییر شکل بیشتری از خود نشان می دهد. صفحه- استرینگر و سازه اکستروود شده پوسته های نازکی دارند و کمانش می کند. بنابراین توانایی تحمل بار آن در حد تیر هانی کمبی نیست.

جدول ۱-۳ - مقایسه سازه ای برای سازه های با وزن مشابه



Design	Relative strength(%)	Relative stiffness(%)
 Honeycomb sandwich	100	100
 Foam sandwich	26	68
 Structural extrusion	62	99
 Sheet and stringer	64	86
 Plywood	3	17

معمولاً وزن تیغه های استرینگر و اکستروود شده از هسته هانی کمب با چگالی کم، بیشتر است و برای هم وزن کردن تیرها باید مقداری از مواد رویه را کاهش داد؛ بنابراین این تیرها تغییر شکل بیشتری می دهند یا به عبارت دیگر سختی آنها کمتر است.

### ۱-۵- جنس تیغه ها

چون هانی کمب از هر ماده صاف و نازک ورق می تواند ساخته شود، از سال ۱۹۴۰ هانی کمب با جنسهای مختلف تیغه درست شد. جنس تیغه هایی که بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند در دو دسته فلزی و غیرفلزی از:

(۱) فلزی : آلومینیوم، فولاد زنگ نزن ، تیتانیوم

(۲) غیرفلزی : فایبرگلاس، نومکت، کارتن

جنس تیغه هایی که کمتر معمول است عبارتند از: مس، سرب، پنبه نسوز، کپتون (نوعی پلاستیک عایق حرارتی)، میلار و کولار و الیاف کربن که خواص مکانیکی هانی کمب ساخته شده از

آن بشدت بالا است مخصوصاً برای یک هسته غیرفلزی این گونه خواص قابل توجه است. در حقیقت هسته کربنی اولین هسته غیرفلزی است که مدول برشی آن به بزرگی هانی کمب آلومینیومی می باشد.

آلیاژهای آلومینیومی مورد استفاده در تیغه معمولاً، ۳۰۰۳ برای کاربرد تجاری و برای کاربردهای خاص ۵۰۵۶، ۵۰۵۲ و ۲۰۲۴ می باشد. استفاده از آلیاژ ۵۰۵۲ بیشتر معمول است. وقتی که دمای کارکرد بالا باشد، استفاده از آلیاژ ۲۰۲۴ مناسب است. این آلیاژ می تواند دمای کارکرد  $177\text{ C}^0$  را تحمل کند.

در فصل بعد در مورد کلیات هانی کمب بحث خواهد گردید.

فصل دوم

# آشنایی با مانی کمب

## ۲-۱- کاربردهای هانی کمب

استفاده اصلی از هانی کمب در کاربردهای سازه ای است. به این دلیل که پانلهای ساندویچی هانی کمب به شدت در میزان سفتی و استحکام به وزن مؤثر هستند. از آنجا که وزن سبک یک امتیاز مهم برای ساختمان ساندویچ هانی کمب است، دستیابی به آن خیلی مشکل است. هانی کمب ماده ای با قابلیت بالا می باشد و علاوه بر کاربردهای سازه ای می تواند در بسیاری از کاربردهای دیگر مانند ساختمان، جاذب انرژی، هدایت کننده جریان هوا، صوتی، حرارتی و برای محافظ فرکانسی رادیویی استفاده شود.

### ۲-۱-۱- ساختمان

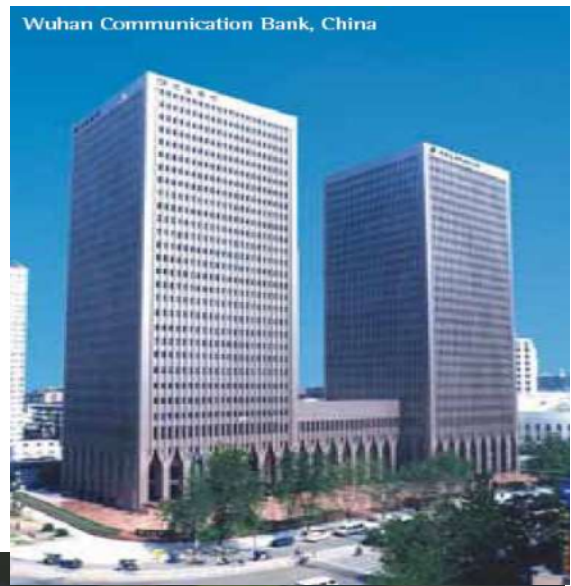
هانی کمب بطور گسترده در نمای ساختمانها و پارتیشنها (شکل (۲-۱))، درها و فرآورده های چوبی (شکل (۲-۲))، خانه های سیار، چادرها، تابلوها و سازه های مشابه بکار می رود. این هسته به خاطر رقابت سنگین بازار باید خیلی ارزان باشد. بنابراین قیمت پایین مشخصه ای تعیین کننده است. در این سازه ها وزن سبک اگر چه معمولاً مطلوب است، اما یک اولویت نیست. از کاربردهای دیگر هانی کمب می توان استفاده از آن جهت ترمیم ساختمانها نام برد. همانطور که در شکل ۲-۳ مشاهده می شود با ترمیم بدنه خارجی ساختمان با هانی کمب، هزینه گرمایشی آپارتمان با متراژ ۵۹/۱۷ متر مربع از ۴۰/۸۰ یورو در ماه به ۴/۷۳ یورو در ماه کاهش یافته است.

نوع خاصی از هانی کمب کارتنی (که به دلیل غوطه وری، بعد از انبساط، در رزین فنولیک گرانتر است و این امر باعث افزایش خاصیت ضد آب و استحکام آن می شود) به عنوان پناهگاه سیار نظامی بصورتی که در شکل (۲-۴) نمایش داده شده است استفاده می شود. این واحدها باید سبک باشند تا از طریق هوایی به جاهایی با شرایط سخت براحتی منتقل شوند.





Asan Medical Center, Korea



Wuhan Communication Bank, China



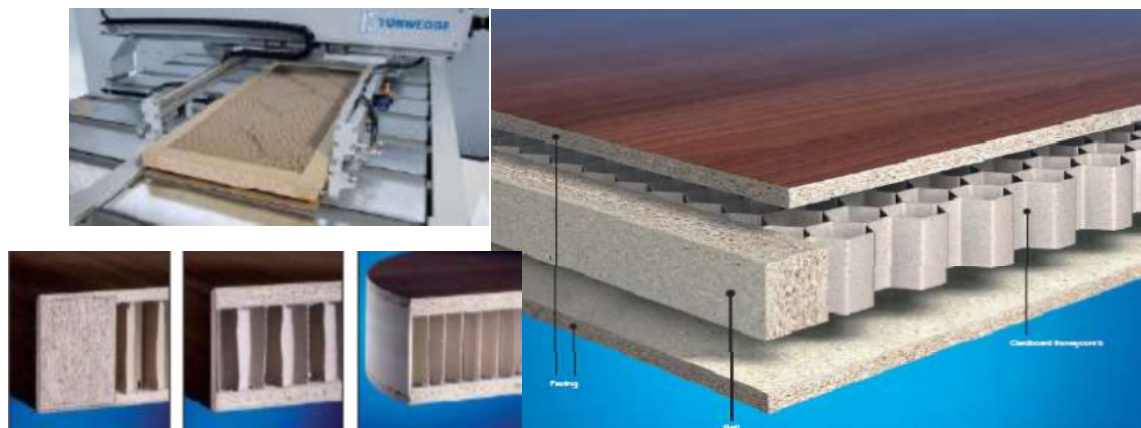
Incheon Airport Transportation Center, Korea



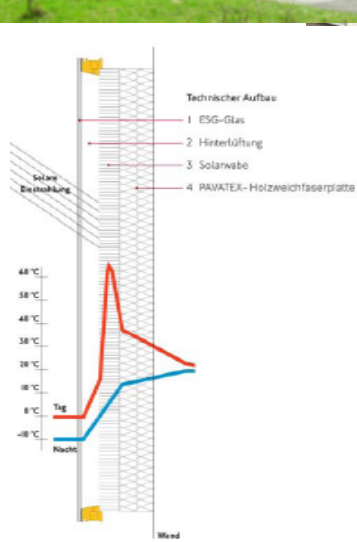
Vladivostok Office Building, Russia



شکل ۱ - ۲ - کاربرد هانی کمب بعنوان نمای ساختمان و پارتیشن



شکل ۲-۲- کاربرد هانی کمب در فرآورده های چوبی



شکل ۲-۳- کاربرد هانی کمب بعنوان ترمیم در نمای ساختمان



شکل ۲-۴ پناهگاه نظامی سیار

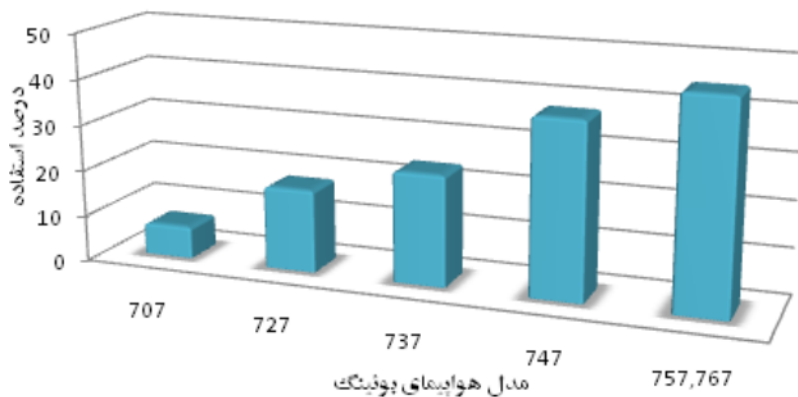
کاربرد نظامی دیگر این هسته ها ساخت آشیانه تعمیر هواپیما است (شکل (۲ - ۵)). آشیانه با همه بزرگی آن در ۴ جعبه جاسازی می شود.



شکل ۲-۵ - آشیانه تعمیر هواپیما

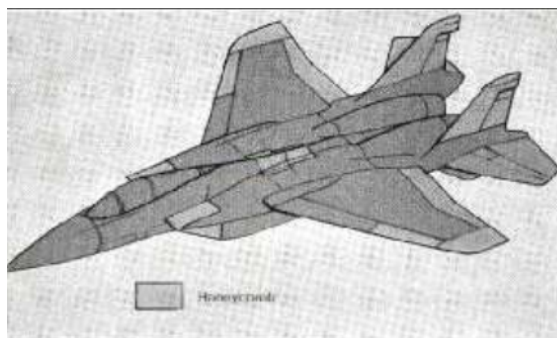
## ۲-۱-۲- صنایع هوایی

اکثر هواپیماهای چند موتوره که امروزه در جهان غرب پرواز می کنند دارای قطعاتی از نوع هانی کمب هستند. شرکت بویینگ در جت های تجاری خود از کاربران بزرگ هانی کمب بوده و هست. شکل (۲-۶) میزان رشد استفاده از هانی کمب در هواپیماهای بویینگ از نوع ۷۰۷ تا نوع جدید ۷۵۷ را نشان می دهد.

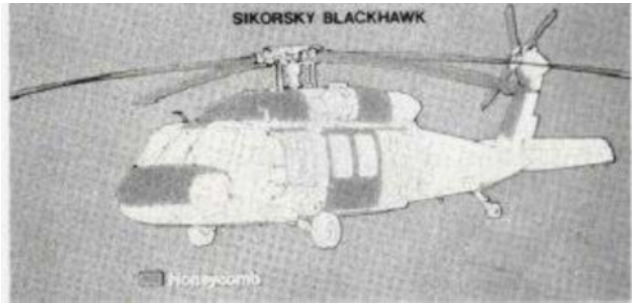


شکل ۲-۶- هانی کمب در هواپیماهای بوبینگ

در تمام دنیا هانی کمب در هواپیماهای بمب افکن و جنگنده و هلی کوپترهای نیروهای نظامی نیز مورد استفاده قرار می گیرد. شکل ( ۲- ۷) جاهایی از هواپیمای Mc Donnell-Douglas F-15 که سازه هانی کمب استفاده شده است را نشان می دهد. شکل ( ۲- ۸) موارد استفاده هانی کمب در هلی کوپتر Sikorsky Blackhawk را نشان میدهد. اغلب پره های روتور هلی کوپتر به گونه ای که در شکل ( ۲- ۹) نمایش داده شده است ساخته می شوند. در این پره ها تیر، خمش طولی و نیروهای برشی را تحمل می کند در حالی که ساندویچ هانی کمب بارهای عرضی را به تیر منتقل کرده و هسته شکل آیرودینامیکی پره را حفظ می کند. [ ۱ ]



شکل ۲-۷- استفاده هانی کمب در هواپیمای F-۱۵ Mc Donnell-Douglas



شکل ۲-۸- استفاده هانی کمب در هل یکوپتر Sikorsky Blackhawk



شکل ۲-۹- پره هلی کوپتر

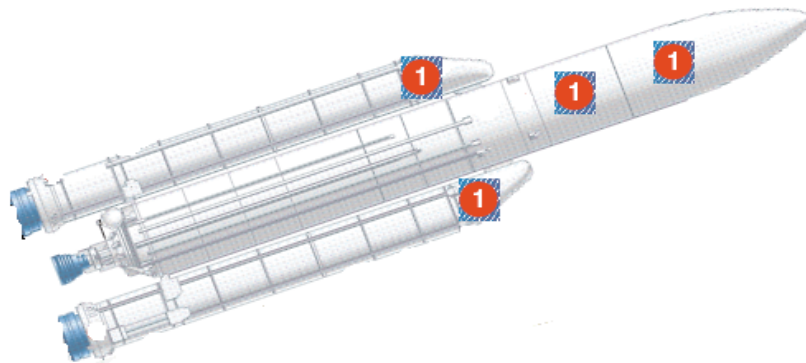
هواپیمای SR-71 Blackbird هواپیمای بسیار جالبی است (شکل ( ۲-۱۰ )). این هواپیما در سال ۱۹۶۵ ساخته شد و که سبکترین و سریع ترین هواپیما بود. هواپیمایی با نیروی توربوجت که سریعتر از سه برابر سرعت صوت پرواز می کند و به حدی بالا پرواز می کرد که انحناء زمین دیده می شد. چون دمای روی هواپیما در بعضی از نقاط آن به ۳۹۹ درجه سانتیگراد می رسید برای پانلهای ساندویچی آن از هانی کمب هایی با جنس پنبه نسوز استفاده می شد. اکثر این هواپیما از تیتانیوم ساخته شده بود. [ ۱ ]



شکل ۲-۱۰- هواپیمای SR-71 Blackbird

استفاده عجیب دیگر هانی کمب در جنگنده مخفی F117A و بمب افکن مخفی B2 است. در این هواپیماها از نوع خاصی هانی کمب که قابلیت جذب امواج رادیویی را دارد، استفاده شده است. برای برآوردن این خاصیت مطلوب، هسته های نومکث و فایبر گلاس (که باید غیرفلزی باشند) با روش خاصی تولید می شوند.

در صنایع هوایی به طور معمول صرفه جویی ۰/۴۵ کیلوگرم در وزن معادل صرفه جویی بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ دلار در قیمت است. اما در وسایل نقلیه فضایی کاهش ۰/۴۵ به منزله صرفه جویی در دهها هزار دلار در قیمت است. چون پرتاب یک پوند به داخل فضا می تواند بسیار پرهزینه باشد. در شاتل فضایی به خاطر داشتن وزن کمینه مقدار زیادی هانی کمب و رویه های کامپوزیتی استفاده می شود شکل (۲-۱۱) جاهایی از شاتل که از این مواد استفاده شده است، را نشان می دهد. [ ۳ ]



شکل ۲ - ۱۱- استفاده از هانی کمب در شاتل فضایی

کاربرد جدید دیگر فضایی برای هانی کمب استفاده از آن برای ساخت تلسکوپ فضایی jet propulsion laboratory (JPL) است. در این تلسکوپ از پانلهایی به شکل شش ضلعی که از هانی کمب های آلومینیومی و رویه های کربنی ساخته شده است، استفاده می شود. سطح آن انحناء ناچیزی دارد و برای پذیرش ته نشین بخارات طلا، نقره یا آلومینیوم باید به شدت صیقلی باشد.

همچنین باید تحت تغییرات دما از ۶۲ - درجه سانتیگراد تا ۸۲ + درجه سانتیگراد، شکل خود را حفظ کند بنابراین باید ضریب انبساط حرارتی بسیار کمی داشته باشد. برای برآورده شدن چنین خاصیتی از روبه های کامپوزیتی با چیدمانی لایه لایه ای استفاده می شود چون ضریب انبساط حرارتی تقریباً صفر دارند. قطعه های شش ضلعی کوچک (که ذکر آنها گذشت) در کنار هم قرار داده می شوند تا تلسکوپ به بزرگی قطر ۱۵/۲ متر ساخته شود. بر اساس این ایده ساندویچ هانی کمب فقط ۱۲ درصد پایه های یک تلسکوپ شیشه ای وزن دارد.

## ۲-۱-۳- حمل و نقل

صنعت حمل و نقل نیز به امتیازات پانل ساندویچ های هانی کمب از جمله جاذب انرژی بودن و سبکی آنها رو آورده است.

در خودروها کاهش وزن ، اهمیت ویژه ای دارد. در فرانسه روی یک خودروی ریلی فوق سبک و کاملاً ساخته شده از پانلهای هانی کمب کار می شود. درها و کف بسیاری از خودروهای ریلی از ساندویچ های هانی کمب است. سقف و کف بعضی از قطارهای سریع در سطح شهر نیویورک و سان فرانسیسکو از پانلهای هانی کمب ساخته شده است.

در شکل ۲-۱۲ مواردی از کاربردهای هانی کمب در وسائط حمل و نقل نشان داده شده است. در سال ۱۹۷۴ شرکت Hexcel یک تریلی کامیون ۱۲ متری را با استفاده از هانی کمب طراحی کرده و ساخت. این واگن فقط ۳۶۲۹ کیلوگرم وزن داشت و ۱۳۶۱ کیلوگرم سبکتر از یک واگن معمولی بود.

شرکت Hexcel به دلیل قیمت بالا نسبت به واگنهای استاندارد این ایده را به هیچ یک از کمپانیهای کامیون سازی نتوانست بفروشد.



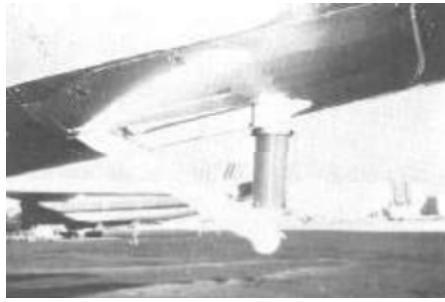
شکل ۲ - ۱۲- کاربردهای هانی کمب در سیستم حمل و نقل

ساخت بدنه ماشینهای مسابقه از ساندویچ های هانی کمبی، تجربه بسیار موفق بوده است. چون این سازه ها با وزن کم، دارای صلبیت و استحکام بالا هستند. همچنین بعضی از قایق های پرند بسیار سریع نیز از امتیازات سازه های هانی کمبی بهره می برند.

در نیروی دریایی ایالات متحده برای ساخت دیواره های کشتی از پانلهای هانی کمب استفاده می شود. این امر منجر به کاهش وزن روی آب شده و مانور و پایداری کشتی را بهبود می بخشد.

استفاده جالب دیگر از هسته لوله ای هانی کمب در هواپیمای بوئینگ ۷۲۷ است. پایه ای روی مقطع دم این هواپیما به صورتی که در شکل (۲-۱۳) نشان داده شده است قرار دارد. داخل استوانه قائم، هسته لوله ای قرار دارد. اگر در هنگام بلند شدن، هواپیما بیش از حد چرخش داشته باشد برخورد توسط هانی کمب انجام خواهد شد و با جذب انرژی ضربه مانع از تخریب پوسته دم هواپیما می شود.

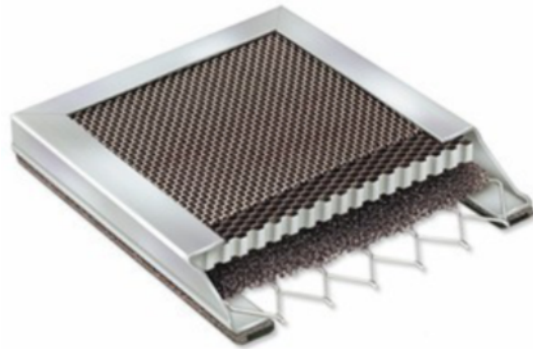




شکل ۲- ۱۳ - پوسته دم بویینگ ۷۲۷

#### ۲-۱-۴- فیلتر تداخل الکترومغناطیسی

هانی کمب در قطعات غیر سازه ای نیز مورد استفاده قرار می گیرد. در شکل ۲-۱۴ یک تهویه لانه زنبوری مشاهده می گردد. در این کاربرد ، پانل لانه زنبوری جهت حفاظت در برابر امواج الکترومغناطیسی بکار گرفته میشود و یک فضای مناسب با تهویه مطبوع بوجود می آورد.



شکل ۲- ۱۴ - پانل تهویه مطبوع با حفاظت الکترومغناطیسی

#### ۲-۱-۵- تجهیزات ورزشی

در زمینه ابزار ورزشی یکی از کاربردهای اصلی هانی کمب ساخت اسکی برف بود که در سال ۱۹۷۰ این کار انجام شد. اسکی های آبی ساخته شده دارای ساختمان ساده تری بودند چون فقط شامل هانی کمب آلومینیومی و رویه های فایبرگلاس بودند.

## ۲-۲- رو شهای ساخت

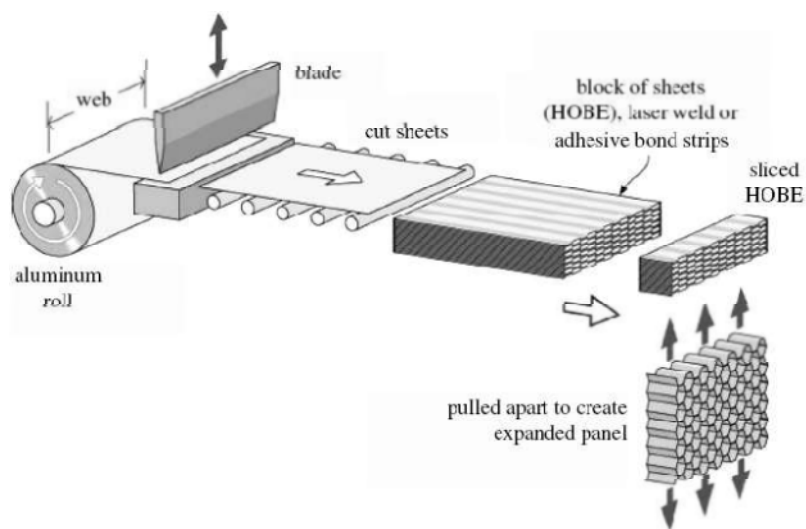
برای اتصال صفحه های هانی کمب پنج راه اصلی وجود دارد: اتصال چسبی، جوش مقاومتی، لحیم کاری، اتصال نفوذی و هم جوشی حرارتی. این روشها بر چگونگی اتصال نودها استوار هستند. تولید به روش اتصال چسبی به مراتب معمولترین روش است؛ شاید ۹۵ درصد از هسته های هانی کمب از این روش ساخته می شود. روشهای جوش مقاومتی، لحیم کاری یا اتصال نفوذی فقط برای هسته هایی که دمای بالا یا شرایط محیطی سخت را تحمل می کنند، استفاده میشود چون تولید هسته با این روشها بسیار پر هزینه است. بالاترین دمایی که نودهای متصل شده توسط چسب می توانند تحمل کنند حدود  $750\text{ F}^{\circ}$  ( $399\text{ C}^{\circ}$ ) است، که بوسیله چسب پلی آمید فراهم می شود. ولی استفاده از چسبهای نایلون اپوکسی و نیتریل فنولیک معمولتر است و دمای کارکرد ماکزیمم آنها حدود  $400\text{ F}^{\circ}$  ( $204\text{ C}^{\circ}$ ) است. در بعضی از مواد ترموپلاستیک، نودهای به اندازه ای حرارت داده می شوند که بطور موضعی ذوب و سپس به هم فشرده می شوند. صفحات در محل ریبون و در نودها به هم جوش می خورند بنابراین در این روش نیازی به چسب نیست.

برای تبدیل مواد ورقه ای به هانی کمب دو تکنیک اصلی وجود دارد: فرآیند انبساطی و فرآیند کرکره ای.

## ۲-۲-۱- روش انبساطی

تقریباً همه هسته های متصل شده به وسیله چسب، با فرآیند انبساطی نشان داده شده در شکل (۲-۱۵) ساخته می شوند. برای هسته های فلزی، پوششی مقاوم در برابر خوردگی، روی ورقه های نازک کشیده شده و سپس خطوط چسبی چاپ می شود. ورقه ها بریده شده، روی هم انباشته می شوند، بنابراین صفحات در محل خطوط چسبی به هم متصل خواهند شد. چسب تحت دما و فشار بالا پخته شده و استحکام لازم را بدست می آورد. سپس باریکه های HOBE به ضخامت مورد نیاز

بریده شده و تحت عملیات کشش قرار می گیرند. وقتی هسته های فلزی منبسط می شوند ورقه ها در دیواره بین گر ه ها (قسمت هایی که اتصال چسبی ندارند) به حالت تسلیم خمیری رسیده و شکل هندسی پس از انبساط را حفظ می کنند.



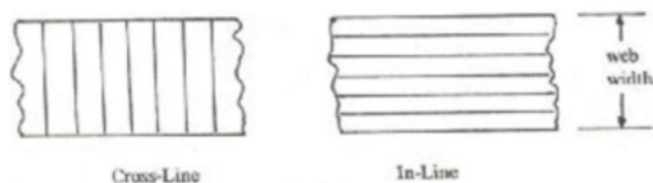
شکل ۲-۱۵- روش تولید انبساطی هانی کمب. [ ۲ ]

روش کار در مورد هانی کمب های غیرفلزی کمی متفاوت است. در این حالت، هانی کمب پس از انبساط، شکل خود را حفظ نمی کند و باید توسط گیر ه های مخصوصی در این حالت نگهداری شود.

اکثر هسته های کاغذی (مانند نومکث) شکل منبسط شده خود را حفظ می کنند. بلوک هانی کمب که گاهی ابعادهش به  $3 \times 8 \times 4$  فوت مکعب می رسد در یک رزین مایع ( که معمولاً فنولیک یا پلی آمید است) غوطه ور و سپس در کوره پخته می شود.

سیکل غوطه وری و پخت هانی کمب تا رسیدن آن به چگالی مطلوب تکرار می شود. معمولاً فقط دو یا سه بار غوطه وری، نیاز است ولی گاهی اوقات بلوک بیش از ۳۰ مرتبه باید در رزین غوطه ور شود. اکثر هسته های فایبرگلاس باید در گیر ه های نگه دارنده باقی بمانند تا فرآیند غوطه وری و پخت داخل کوره، انجام شود. [ ۲ ]

خطوط چسبی نودها می توانند به دو صورت نشان داده شده در شکل ( ۲-۱۶ ) چاپ شوند. در روش Cross-line در بلوک هانی کمب جهت L هسته تولید شده نامحدود خواهد بود، در حالی که در روش In-line جهت T هسته نامحدود خواهد بود. این مطلب در کاربرد هانی کمب با جهت L طولانی یا جهت T طولانی می تواند مهم باشد.



شکل ۲-۱۶- جهت خطوط چاپ شده

اولین هانی کمب فایبرگلاس با استفاده از الیافهایی که به صورت پارچه  $90^{\circ} - 0^{\circ}$  بافته شده بودند، ساخته شد.

به مرور این نتیجه حاصل شد که اگر الیاف در جهت  $45^{\circ} \pm$  (مایل) مورد استفاده قرار بگیرند، مدول برشی هانی کمب فایبرگلاس خیلی بیشتر (بعضی وقتها سه برابر) می شود. ساخت هسته با این روش بسیار گران است. یک امتیاز اضافی که برای هسته های مایل می توان برشمرد این است که سفت تر و در مقابل صدمه مقاوم تر است. [ ۱ ]

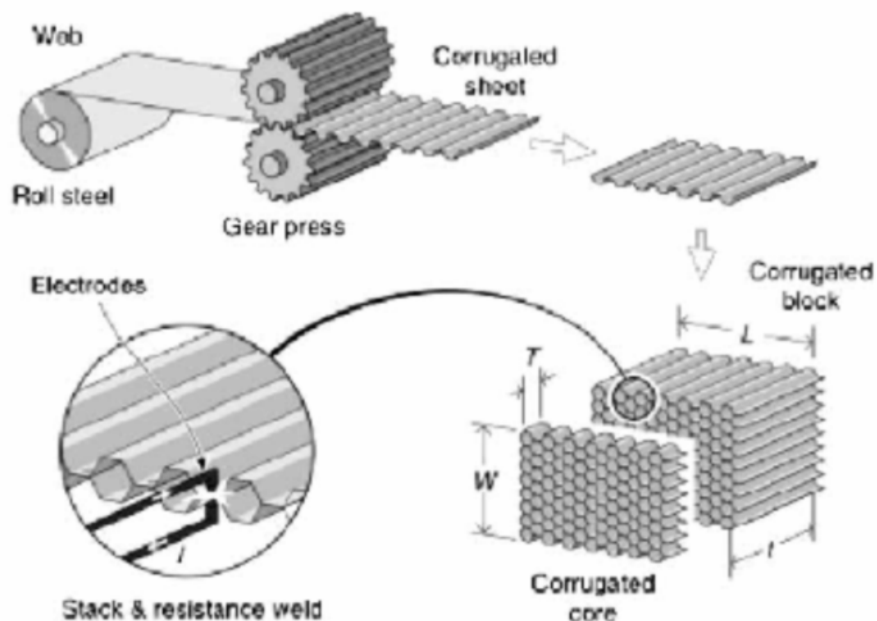
### ۲-۲-۲- روش کرکره ای

روش کرکره ای، که در شکل ( ۲-۱۷ ) نشان داده شده است، تکنیک اصلی مورد استفاده برای ساختن هسته های هانی کمب است. اگر چه این روش بسیار پرزحمت است، در حال حاضر برای درست کردن هسته های فلزی با چگالی بالا و بعضی از هسته های غیرفلزی مورد استفاده قرار می گیرد.

در فرآیند کرکره ای ابتدا ورقه ها با غلتکهایی به ورقه های موجدار تبدیل می شوند. سپس به نودهای آنها چسب زده و روی هم گذاشته می شوند و در کوره تحت حرارت قرار می گیرند تا چسب

پخته شود. از آنجایی که در این روش فقط فشار پایین می تواند به بلوکها اعمال شود بنابراین در مقایسه با هسته های روش انبساطی، ضخامت چسب در نودها خیلی بیشتر است. در روش کرکره ای چسب مورد استفاده در نودها ۱۰ درصد از وزن کل سازه را تشکیل می دهد در حالی که این نسبت برای هسته های منبسط شده حدود ۱ درصد و یا حتی کمتر است. در بعضی از بلوکهای کرکره ای غیرفلزی برای رساندن بلوک به چگالی مورد نظر و نسبت رزین به استحکام مناسب باید در رزین غوطه ور شوند.

در این روش برای اتصال نودها در بعضی از هسته های هانی کمب فلزی می توان به جای چسب از لحیم کاری، اتصال نفوذی، یا جوش نقطه ای استفاده کرد (شکل ۲-۱۷) (ملاحظه شود).



شکل ۲-۱۷- روش تولید کرکره ای هانی کمب. [ ۲ ]

این نوع اتصالها اجازه می دهد که بعضی از هسته ها مانند استیل زنگ نزن در دمای بالا حدود  $704^{\circ}\text{C}$  مورد استفاده قرار بگیرد.

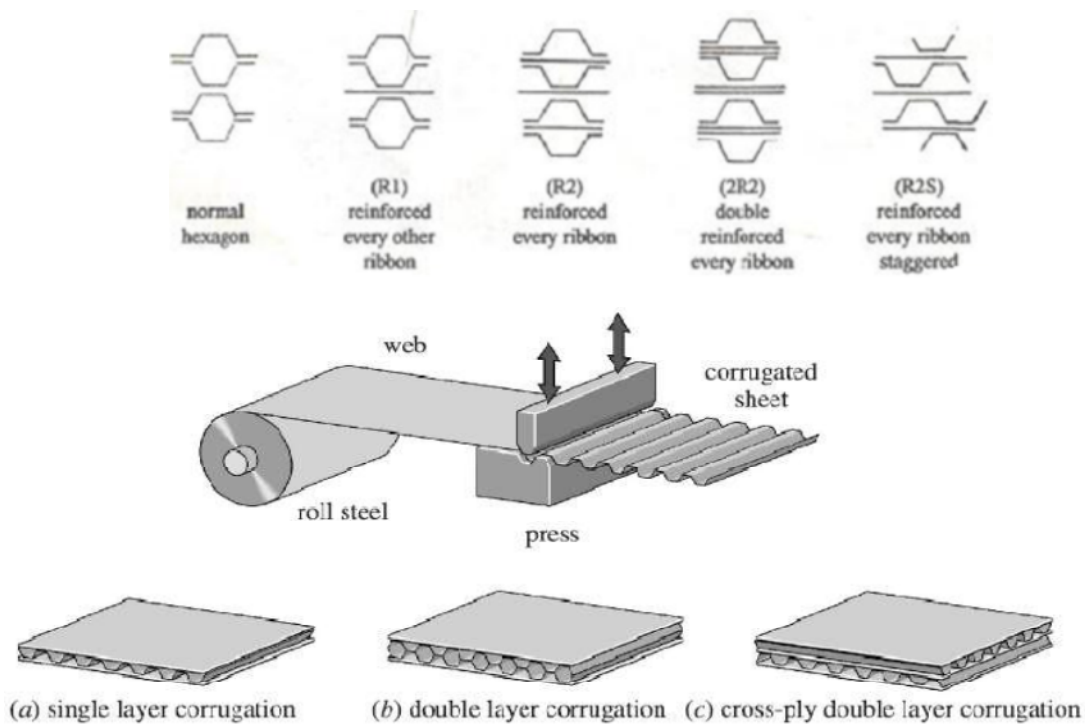
فرآیند تولید کرکره ای هسته هانی کمب آلومینیومی بسیار وقت گیرتر از روش انبساطی است؛ و تولید هسته از این روش معمولاً بسیار گرانتر است. [ ۱ ]

### ۲-۲-۳- مقایسه محصولات ساخته شده از روشهای مختلف

متداولترین هسته های هانی کمبی که با اتصال چسبی ساخته می شوند عبارتند از: آلومینیوم ، نومکت ، فایبرگلاس و کارتن. هسته هایی از جنس استیل زنگ نزن، گسترده ترین هسته هایی هستند که از روش کرکره ای درست می شوند.

هسته های غیرفلزی در رزین غوطه ور می شوند. این کار در رزین فنولیک معمولتر است ولی برای دماهای بالا این کار در رزین پلی آمید و برای سفتی بیشتر در رزین اپوکسی و ترموپلاستیک انجام می شود.

در آرایش سلولهای نشان داده شده در شکل ( ۲- ۱۸ )، اگر چگالی هانی کمب بیشتر از ۱۹۲ کیلوگرم بر متر مکعب شود انبساط HOBE غیر ممکن است بنابراین باید هانی کمب آلومینیومی را از روش کرکره ای ساخت. در هانی کمب هایی که چگالی آنها زیاد است نیروی لازم برای منبسط کردن بلوک یا لایه های انباشته شده خیلی زیاد است و اتصال چسبی بین نودها نمی تواند این نیرو را تحمل کند بنابراین باید از روش کرکره ای استفاده شود.



شکل ۲ - ۱۸ - ترکیب سلولهای هسته کرکره ای

آرایش تقویت شده سلولها، مدول و استحکام برشی هسته را در جهت L (Ribbon) به شدت افزایش می دهد و مقدار آن می تواند به ۳۴ مگا پاسگال برسد. نوع R2R برای محصولاتی که چگالی هسته آنها ۸۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب است به کار می رود. که اساساً برای نقاط سخت در پانل هانی کمب مورد استفاده قرار می گیرد.

لوله کردن هسته های کرکره ای نسبت به محصولات انبساطی به خاطر چگالی زیاد و استحکام کمتر گر ه ها، مشکل تر است. چون در روش انبساطی چسب گر ه ها در دمای بالا و تحت فشار حدود ۲۱ مگاپاسگال پخته می شوند ولی در روش کرکره ای اگر چه چسب گر ه ها گرما می بینند ولی فشار بسیار کمتری به آنها اعمال می شود.

وقتی که یک بلوک هانی کمب، ساخته شده به روش کرکره ای لوله می شود ممکن است نودها در جهت W از هم جدا شوند. این مشکل با اتصال متناوبی نودها به یکدیگر آرایش هسته (R2S) قابل پوشش است.

این نوع اتصال، لوله کردن هانی کمب را راحت تر می کند. در آرایش هسته R2S، در هر ریون به جای اینکه هر نود در مقابل نود متناظر خود قرار بگیرد کمی نسبت به هم جابجا می شوند. هانی کمب های کرکره ای به سادگی محصولات انبساطی دچار لهیدگی نمی شوند زیرا در چگالی های بالاتر هسته بسیار قویتر بوده و دیواره های سلول به سادگی کمانش پیدا نمی کنند و فضای کافی برای چین خوردن دیواره های سلول (بدون برخورد به دیوار ههای دیگر) وجود ندارد. کورس چین خوردگی برای محصولات هانی کمب انبساطی بین ۷۰ تا ۸۰ درصد و برای محصولات کرکره ای بین ۶۰ تا ۷۰ درصد ارتفاع اولیه است. به طور کلی هر چه چگالی بیشتر باشد مقدار کورس لهیدگی کمتر می شود.

در خصوص اتصال رویه ها به هانی کمب هم، باید دقت لازم مبذول گردد. چسبها روی لبه سلولهای هانی کمب گذاشته شده آنگاه روکش ها چسبانده می شود. همچنین باید در هنگام پخت توجه کرد چرا که چسبهای مایع به سمت بیرون پس داده می شوند، بنابراین سلولهای هانی کمب آلومینیومی باید سوراخ شوند (قبل از اینکه سلولها ساخته شوند سوراخ های کوچکی روی فویل قرار داده می شود) تا اجازه دفع گازهای هنگام پخت، داده شود. اگر هسته ها سوراخ نشوند جمع شدن فشار داخل سلولها، از اتصال خوب هسته به رویه جلوگیری می کند و حتی ممکن است هسته بیرون بزند. در حال حاضر اغلب چسبهای مدرن ۱۰۰ درصد جامد هستند و مواد فرار خارج شدنی ندارند و نیازی به سوراخ کردن هانی کمب نیست. بطور رایج برای بعضی از کاربردهای فضایی در جاهایی که وجود هوا در سلولها مطلوب نیست سلولها سوراخ می شوند.



## ۲-۳- انواع هانی کمب

از آنجایی که هانی کمب غالباً از هر ماده ای که به صورت ورقه ای و نازک باشد می تواند درست شود؛ بیش از ۵۰۰ نوع هانی کمب با مواد مختلف درست شده است.

## ۲-۳-۱- انواع هانی کمب از نظر جنس

هانی کمب را می توان از مواد فلزی و غیرفلزی ساخت. مهمترین انواع آن به شرح ذیل می باشند:

۱. هانی کمب کاغذی: اولین و قدیمی ترین نوع هانی کمب است که قدمت آن به ۲۰۰۰ سال می رسد و اولین کاربرد آن در تزئین دیوارها بوده است.

۲. هانی کمب آلومینیومی: از سال ۱۹۴۵ استفاده این نوع هسته رایج شد و امروزه چهار نوع آلیاژ و حداقل پنج شکل مختلف سلول برای این نوع هانی کمب در ضخامتهای مختلف تیغه، برای تامین چگالی های مختلف، وجود دارد. هسته های هانی کمب آلومینیومی دارای بیشترین کاربرد و مطلوب ترین نسبت کارائی بر قیمت هستند. عمده ترین آلیاژهای مورد استفاده در این زمینه عبارتند از:

H19-۳۰۰۳: دارای کمترین استحکام بوده و عمدتاً کاربرد غیر هوایی دارد.

H39-۵۰۵۲: بیشترین کاربرد آن در اجزاء هواپیمایی است.

H39-T30RT81-۲۰۲۴: دارای بیشترین مقاومت حرارتی بوده و در بعضی خواص از نوع H39 -

۵۰۵۶ هم قوی تر است.

H39 - ۵۰۵۶: قوی ترین نوع هانی کمب با عملیات حرارتی ضد خوردگی برای استفاده

در هواپیماها است.

۳. هانی کمب پلاستیکی تقویت شده با کارتن: این نوع هانی کمب بیشتر در قطعات حساس الکتریکی (مثل آنتن) یا در جاهائی که رزین مقاوم در برابر حرارت و هدایت حرارتی کم مورد نظر باشد استفاده می شود.

۴. هانی کمب کاغذی آرامیدی: این نوع هانی کمب دارای چقرمگی و مقاومت زیادی است. خواص مکانیکی آن کمی ضعیفتر از هانی کمب آلومینیومی است اما توانائی بی همتایی در مستهلک کردن نیروهای اضافی بدون ایجاد خسارات دائمی دارد. به دلیل قیمت بالا، کاربردهای آن به صنایع هوافضا و برخی قایقها محدود شده است.

۵. هانی کمب های با رشته کربن: در سال های اخیر از رشته کولار و کربن به عنوان تقویت کننده در هانی کمب ها استفاده شده است. کاربرد عمده این نوع هانی کمب نیز در صنایع فضایی است.

۶. هانی کمب های با رشته کولار: از این نوع هانی کمب ها در آنتن سفینه های فضایی استفاده می شود زیرا انتقال سیگنالهای رادیویی از پانل ساده شده و همچنین رویه های کولار انعکاس دهنده سیگنالهای با طول موج متفاوت هستند.

۷. هانی کمب ترموپلاستیک: روشی جدید برای تولید هسته های ترموپلاستیک توسعه یافته است. در این روش نودها از طریق نفوذ حرارتی به یکدیگر متصل می شوند و نیازی به چسب نیست. تولید این هسته ها می تواند کاملاً اقتصادی باشد. این هانی کمبها می توانند از هر دو روش انبساطی و کرکره ای تولید شوند. در فرآیند انبساطی ناحیه ای از هر صفحه تخت که باید اتصال بین نودها را تأمین کند گداخت حرارتی شده و بعد HOBه منبسط می شود. سپس در شکل منبسط شده نگه داشته شده و حرارت می بیند تا اینکه هسته به شکل قبلی، برنگردد. یا اینکه صفحاتی به صورت رویه به هانی کمب گداخته می شود تا شکل آن به صورت منبسط شده حفظ شود. در فرآیند کرکره ای

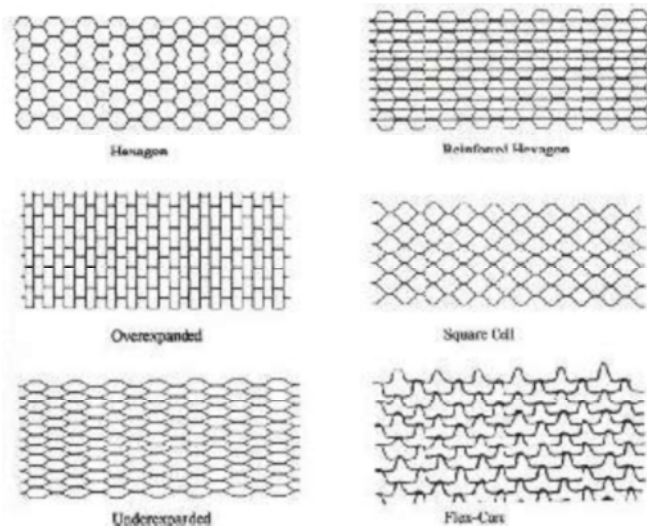
ریبو نها ، مو جدار می شوند و سپس زبانه حرارت دهنده دو ریبون را در محل نودها گرم و گداخته و به هم پیوند می دهد. همه این کارها به طور پیوسته و در یک دستگاه انجام می شود.

در حالت کلی هسته های هانی کمب ترموپلاستیک دارای چقرمگی زیادی هستند ولی در مقایسه با هسته های هانی کمبی که تحت حرارت قرار می گیرند دارای استحکام بالا یا نسبت سختی به وزن خوبی نیست.

۸. هانی کمبهای PAA : در سال ۱۹۷۷ شرکت بوئینگ فرآیند Phosphoric acid anodizing فویل آلومینیوم را برای تولید هسته هانی کمب اختراع نمود . این هسته ها به هانی کمبهای PAA شهرت یافتند. [۱]

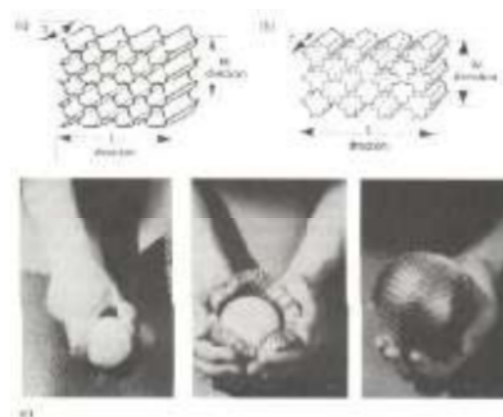
## ۲-۳-۲- طبقه بندی هانی کمب ها از نظر شکل سلولها

شکل های اصلی سلولها عبارتند از: ۶ ضلعی، ۴ ضلعی و هسته منعطف. بعضی از این شکلها بیش از حد منبسط شده اند (در شکل ( ۲ - ۱۹ ) نشان داده شده است). سلول شش ضلعی از دیر زمان معمولترین نوع سلول در اتصال های چسبی بوده است در حالی که بیشتر هانی کمب هایی که به روش جوشکاری یا لحیم کاری ساخته می شوند دارای سلولهایی به شکل چهار ضلعی هستند. اگر سلول شش ضلعی استاندارد بیش از حد منبسط شود به شکل سلولهای مستطیلی تبدیل می شود. این هندسه به هسته امکان می دهد که به راحتی در جهت L به صورت یک استوانه تغییر شکل دهد. هسته شش ضلعی استاندارد به راحتی به صورت اشکال انحناء دار تغییر شکل نمی دهد و باید تغییر شکل آن به صورت غلتکی یا حرارتی انجام شود. از ساختار هسته منعطف وقتی استفاده می شود که قرار باشد هانی کمب به اجزاء انحناء دار تغییر شکل دهد. بطوریکه در شکل ( ۲ - ۲۰ ) نشان داده شده است این ساختار می تواند دور یک شکل کروی به کوچکی یک توپ بیسبال واپیچش کند. (هسته آلومینیومی با چگالی سبک است)



شکل ۲-۱۹- اشکال مختلف سلولهای هانی کمب [۲]

هانی کمب تقویت شده دارای صفحه ای بسیار صاف است که روی نودها قرار گرفته است بنابراین چگالی و متقابلاً خواص مکانیکی آن را افزایش می دهد. هسته های آلومینیومی که چگالی آنها به اندازه ۸۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب باشد با این روش ساخته می شود.



شکل ۲-۲۰- هسته منعطف آلومینیوم (a) هسته منعطف شدن (b) هسته منعطف دوگانه (c) پیچاندن دور یک توپ

بیسبال

## ۲-۴- خواص هانی کمب

بعضی از اشکال سلولها، قابلیت شکل پذیری خوبی به سازه هانی کمب می دهند. باید توجه داشت که انبساط یا کشیدگی هانی کمب باعث تغییر چگالی و شکل سلولهای آن می شود. اندازه سلولها در اکثر خصوصیت‌های مکانیکی هسته و نیز در تعیین سطح تنش لازم برای کمانش بین سلولی یا خیز رویه، نقش مهمی دارد. ضخامت هانی کمب نیز در خواص برشی و فشاری آن تأثیر دارد. به طور کلی خواص مکانیکی که برای هانی کمبها برشمرده می شود عبارت است از: استحکام فشاری، مدول فشاری، مدول و استحکام برشی صفحه در جهات  $W$  و  $L$ . برای مواردی که هانی کمب به عنوان جاذب انرژی مورد استفاده قرار می گیرد، ذکر استحکام برشی نیز لازم است که تقریباً ۵۰ درصد استحکام فشاری است.

تمام تولید کنند ه های هانی کمب بروشورهایی دارند که خواص هسته تولید شده آنها در آن ذکر شده است.

خواص مکانیکی تعدادی از هانی کمب های معمول در دمای اتاق در جدول ( ۲- ۱) آورده شده است.

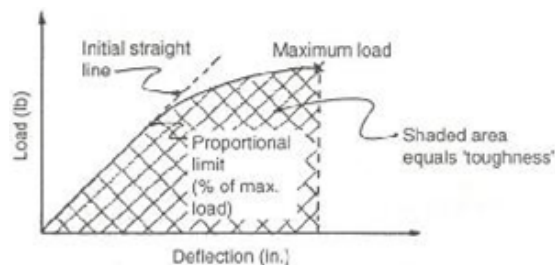
در حالت عملی هانی کمب فلزی در ضخامت ۱۵/۹ میلیمتر و هسته غیرفلزی در ضخامت ۱۲/۷ تست می شود. بجز برای کارتن نوع تجاری که با ضخامت ۲۵/۴ میلیمتر تست می شود. خواص نشان داده شده در جدول ( ۲- ۱) با این ضخامت ها تست شده اند. خواص فشاری و مدول برشی با تغییرات ضخامت، خیلی تغییر نمی کند در حالی که استحکام برشی با افزایش ضخامت مقدار آنها کاهش پیدا می کند.

جدول ۱-۲ خواص مکانیکی برای هانی کمب در دمای اتاق

Core	Compression			L shear		W shear	
	Density (pcf)	Strength (psi)	Modulus (ksi)	Strength (psi)	Modulus (ksi)	Strength (psi)	Modulus (ksi)
5052 Aluminum	1.0	55	10	45	12	30	7
5056 Aluminum	12.0	2900	900	1940	210	1430	75
2024 Aluminum	1.0	60	15	55	15	35	7
3003 Aluminum	8.1	1900	435	945	143	560	51
3003 Aluminum	2.8	320	40	200	42	120	19
3003 Aluminum	9.5	2500	480	1150	170	650	64
3003 Aluminum	1.3	70	16	55	14	40	7
3003 Aluminum	4.8	620	148	335	63	215	31
0°-90° fiberglass Phenolic	2.7	180	13	120	6	60	3
0°-90° fiberglass Phenolic	12.0	2520	260	985	48	625	28
±45° fiberglass Phenolic	2.0	170	17	115	15	60	5
±45° fiberglass Phenolic	8.0	1750	129	580	49	340	24
±45° fiberglass Polyimide	3.2	310	27	195	19	95	8
±45° fiberglass Polyimide	8.0	1210	126	700	55	420	22
Nomex Phenolic	1.5	100	6	75	3	40	2
Nomex Phenolic	9.0	2100	90	515	18	300	11
±45° Graphite Phenolic	5.0	950	85	590	94	350	40
±45° Graphite Phenolic	10.0	3060	170	1060	215	760	90

۱-۴-۲ سختی و محدوده خطی هانی کمب

در بروشور محصولات غالباً استحکام هانی کمب همان تخریب نهایی است. بطور معمول در آزمایشگاه تست، تست هسته را تا رسیدن به نیروی ماکزیمم ادامه می دهند و بخشی از خط مستقیم ابتدایی منحنی نیرو-جابجایی، تعیین کننده مدول آن است. این خصوصیات، محدوده تناسب و سختی هانی کمب (محدوده زیر منحنی نیرو-جابجایی) در شکل (۲-۲۱) نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۱- منحنی نیرو- تغییر مکان هانی کمب

محدوده تناسبی هسته هانی کمب برای دمای اتاق و  $54^{\circ}\text{C}$  - در جدول (۲-۲) نشان داده شده است.

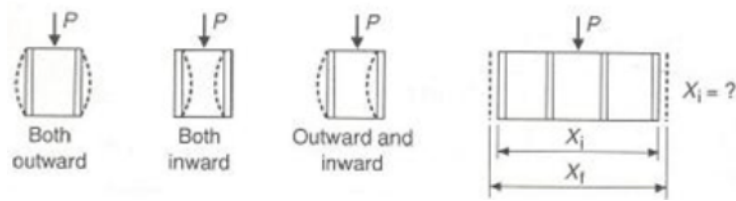
جدول ۲-۲ - محدوده تناسبی هسته هانی کمب

نوع هسته	اندازه سلول (cm)	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	R.T. %	F % -65°
Aluminum	۰.۳۱۷۵	۶۴.۰۷۴	۷۸	۷۲
carbon	۰.۶۳۵	۸۰.۰۹۲۵	۷۵	۶۶
Nomex	۰.۳۱۷۵	۶۴.۰۷۴	۶۱	۵۹
Fiberglass	۰.۳۱۷۵	۶۴.۰۷۴	۵۴	۵۷

#### ۲-۴-۲- ضریب پواسون

ضریب پواسون مواد ( $\mu$ ) نسبت کرنش جانبی به کرنش محوری است برای وقتی که جسم تنها تحت تنش غیر محوری قرار گرفته باشد. مقدار  $\mu$  برای مواد مختلف در بازه محدودی نوسان می کند، عموماً در محدوده ۰.۱۵ تا ۰.۳۵ است. در حالت اغراق آمیز در حد پایین مقدار ۰.۱ (برای بعضی از بتن ها) و در حد بالا ۰.۵ (برای لاستیک) اتفاق می افتد. مقدار دومی حداکثر مقداری است که می توان داشت.

ضریب پواسون هانی کمب چیست؟ برای مواد معمولی با تست کشش و فشار میزان تغییر فرم جانبی و محوری را می توان بدست آورد بنابراین ضریب پواسون قابل محاسبه است. ولی این کار برای هسته های هانی کمب انجام نمی شود. اگر هسته هانی کمب تحت فشار قرار بگیرد دیوار ه های سلول آن تحت کمانش به سمت داخل و بیرون قرار می گیرد. یا اینکه یکی از دیوار ه ها به سمت داخل و دیواره دیگر به سمت بیرون کمانش می کند (شکل (۲-۲)).



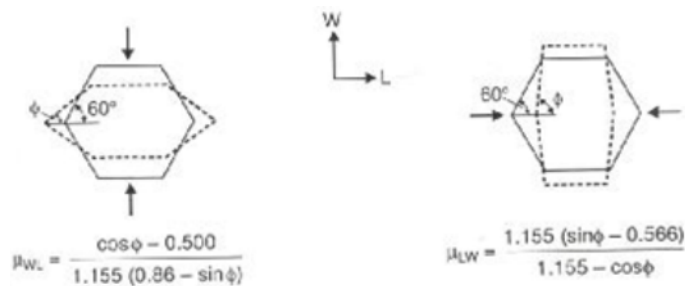
شکل ۲-۲۲- کمانش دیواره های سلول تحت بار فشاری

حال اگر بخواهیم در جهت L و W بارگذاری انجام شود. اگر هسته هانی کمب در جهت W تحت نیرو قرار بگیرد طبق همان هندسه تغییر فرم خواهد داد. اگر در جهت L نیرو وارد شود اتفاق مشابهی رخ خواهد داد.

توجه شود که هر دو انبساط جانبی با سینوس و کسینوس زاویه هانی کمب تغییر می کنند (شکل ۲-۲۳) (ملاحظه شود). این انبساط با نرخهای متفاوت به طور پیوسته افزایش پیدا می کند. این امر باعث می شود که دو ضریب پواسون در این جهات تغییر کند. بنابراین هانی کمب ضریب پواسون ثابت ندارد و وابسته به این است که هسته چه قدر تحت تراکم قرار گرفته باشد.

اگر ماده ایزوتروپ و همگن باشد مدول برشی با مدول تراکمی طبق رابطه  $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$  وابسته

است. اگر برای بدست آوردن ضریب پواسون حل شود، ضریب پواسون طبق فرمول  $\mu = \frac{E-2G}{2G}$  بدست خواهد آمد.



شکل ۲-۲۳- رابطه بین  $\mu$  و E و G

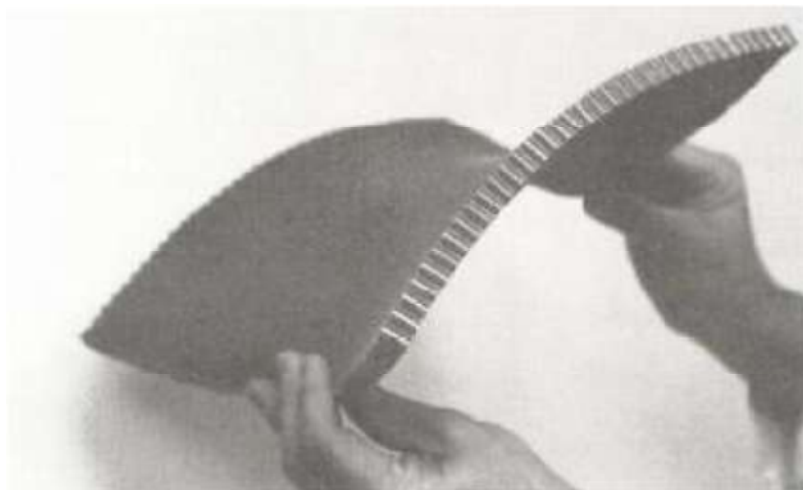


هانی کمب قطعاً نه همگن است نه ایزوتروپ. این روابط به عنوان تقریب برای بدست آوردن ضریب پواسون استفاده می شود که یک عدد تقریبی برای ضریب پواسون پیدا شود. برای بدست آوردن ضریب پواسون از مدول تراکمی و برشی در جهات L و W استفاده می شود که در جدول (۲-۳) برای چند ماده آورده شده است.

جدول ۲-۳- ضریب پواسون محاسبه شده با فرض رفتار ایزوتروپیک

Core type	$E_c(\text{ksi})$	$G_L(\text{ksi})$	$G_W(\text{ksi})$	$\mu_L$	$\mu_W$
Aluminum $\frac{1}{8}$ -5052-3.1	۷۵	۴۵	۲۲	-۰.۱۷	+۰.۷۰
Fiberglass HFT- $\frac{1}{8}$ -3.0	۲۳	۱۹	۷.۵	-۰.۳۹	+۰.۵۳
Nomex HRH 10- $\frac{1}{8}$ -3.0	۲۰	۶.۵	۳.۵	+۰.۵۴	+۱.۸۶

راه دیگری که برای تعیین ضریب پواسون وجود دارد این است که هسته به شعاع مشخص در یک جهت ، خم شود و شعاع در جهت دیگر اندازه گیری شود. ضریب پواسون برابر است با  $\mu = R_1/R_2$  . این حالت برای سلولهای شش ضلعی در شکل ( ۲ - ۲۴) دیده می شود.



شکل ۲-۲۴ - منحنی غیر کلاسیک برای سلولهای شش ضلعی

## ۲-۴-۳ خستگی

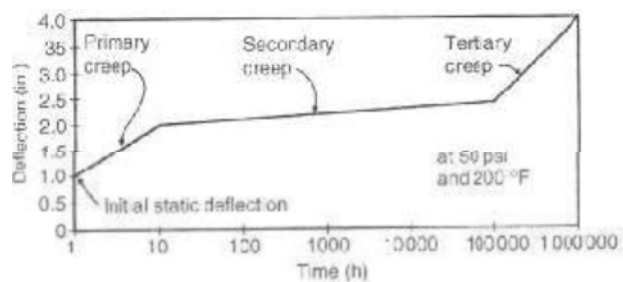
این مطلب واضح بوده و هست که توانایی تحمل مواد تحت نیروهای متناوب در مقایسه با نیروهای ثابت کم می باشد. این پدیده که توانایی مواد در مقابل بارهای تناوبی کاهش می یابد را خستگی می گویند. افزایش تنش در اثر مواردی مانند تغییرات ناگهانی در سطح مقطع، سوراخها و شکافها تأثیر بیشتری در توانایی تحمل خستگی نسبت به توانایی تحمل بار استاتیکی می گذارد. شکست در خستگی از یک ترک کوچک شروع می شود. ترک اولیه آنقدر کوچک است که با چشم غیر مسلح قابل شناسایی نیست. ترک اولیه در جهت تمرکز تنش یا در جهت ناخالصی موضعی ماده گسترش پیدا می کند. وقتی که این ترک رشد می کند اثر تمرکز تنش بیشتر شده و ترک سریعتر رشد می کند.

به دلیل نسبت استحکام به وزن و سختی به وزن بالا در سازه های ساندویچی هانی کمب مقاومت در برابر شکست خستگی آن را به شدت بهبود می بخشد، به وفور در صنعت هواپیمایی و فضایی این نوع سازه مورد استفاده قرار می گیرد. این مسئله به خاطر طبیعت پیوسته صفحه چسبیده به آن است. به این معنی که هیچ افزایش تنشی مانند نقاطی که پرچ شده باشند، وجود ندارد. از نظر خستگی بحران یتترین نقطه سازه ساندویچی نقاط اتصال آن است. وقتی که پانل تحت تست خستگی قرار می گیرد معمولاً در این نقاط بیشتر تمایل به شکست دارد تا نقاط دیگر سازه.

سوراخها باعث گسترش ترکهای ناشی از خستگی شده و منجر به شکست می شوند. هسته های غیرفلزی ممکن است با ورقه شدن رزینها از تیغه های هانی کمب، دچار خستگی شده و بشکنند یا در اثر تنش برشی عمودی ناشی از حالت کمانش بشکنند.

## ۲-۴-۴-خزش

خزش در تعریف عبارت است از: یک تغییر شکل اولیه الاستیک وقتی که ماده تحت یک تنش ثابت در بیش از پرپود زمانی آن قرار بگیرد. این پدیده معمولاً به سطح تنش، دما، طول زمانی که بار اعمال می شود و خواص ماده بستگی دارد.



شکل ۲-۲۵- مراحل زمانی مختلف در منحنی خزش. در ۵۰ Psi تنش و ۲۰۰ درجه فارنهایت

شکل (۲-۲۵) خزش را برای یک ماده خاص به صورت تغییر شکل نسبت به زمان در یک دما و تنش مشخص، نشان می دهد. همانطور که نشان داده شده است شروع خزش تا شکست قطعه می تواند به سه مرحله تقسیم شود.

مرحله اول: خزش اولیه که با نرخ سریعی آغاز شده و با زمان کند می شود.

مرحله دوم یا خزش ثانویه: نرخ یکنواختی دارد تا مرحله سوم شروع شود.

مرحله سوم: نرخ رو به افزایش (شتاب گیرنده) را نشان می دهد و با شکست ماده به اتمام میرسد.

با توجه به اینکه هواپیماهای جدید با سرعت و پرپود زمانی زیادی پرواز می کنند در نتیجه دمای سازه بیشتر خواهد شد. به عنوان مثال دمای پوسته هواپیمای Lockheed حدود ۳۷۰ درجه سانتیگراد است و دمای داخل کابین آن حدود ۹۳ درجه سانتیگراد است. در اینجا خزش دو مشکل ایجاد می کند اولاً باعث کاهش استحکام معمولی در دمای بالا می شود و از طرف دیگر تغییر شکل بیش از حد، باعث مشکل آیرودینامیکی سازه می شود. تغییر فرم ساندویچهای هانی کمب در اثر خزش به فاکتورهای زیادی وابسته است از جمله: دمای سازه، خواص هسته ساندویچ، چسب و رویه

آن، ابعاد ساندویچ، توزیع تنش اولیه روی ساندویچ، اندازه سلولهای هسته، جهت گیری ریبون هسته، خواص بعد از پخت چسبی که پوسته را به هسته می چسباند.

تستهای زیادی برای تشخیص رفتار خزش ساندویچ های هانی کمب موجود است. علاوه بر آن به خاطر وابستگی به فاکتورهایی که در بالا بیان شد بسیاری از آزمایشهایی که در دسترس است ویژه می باشد. اغلب پدیده خزش پانلها در چسب بکار گرفته شده آن رخ می دهد و معمولاً در هسته خزش رخ نمی دهد. بنابراین اگر از چسب مناسبی استفاده شود پدیده خزش در هانی کمبها مشکل حادی نیست.

می توان از نتیجه گیر یهایی که از آزمایشها بدست آمده به موارد زیر اشاره کرد: [ ۱ ]

- ۱- نرخ خزش با تنش هسته یا تنش رویه افزایش پیدا می کند.
- ۲- با افزایش اندازه سلول نرخ خزش افزایش می یابد.
- ۳- خزش در جهت L کمتر از جهت W است.
- ۴- با افزایش دما و زمان پخت چسب بین هسته و رویه، نرخ خزش کم می شود.

## ۲-۵- انواع شکست سازه های پانل هانی کمب

با توجه به حالت بارگذاری سازه های پانل هانی کمب ممکن است به صورت زیر (شکل ۲-۲۶)

شکست نمایند: [ ۳ ]

۱. شکست وجه
۲. تغییر شکل بیش از حد
۳. کمانش پانل
۴. برش موجدار
۵. چین خوردگی پوسته

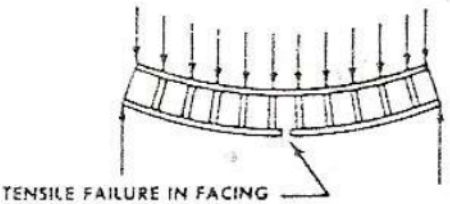
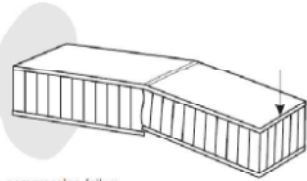
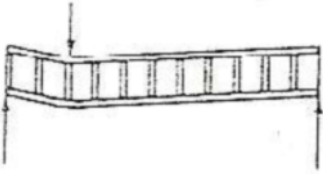
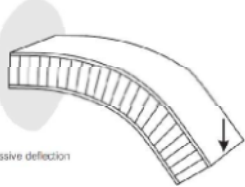
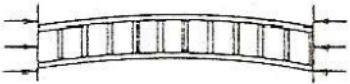

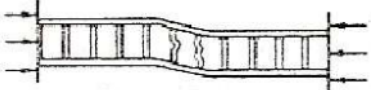
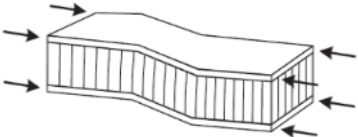
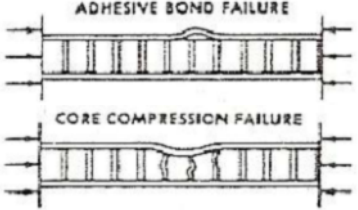

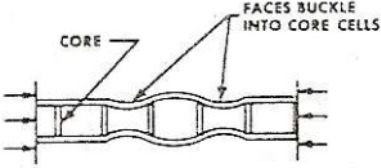
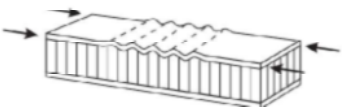
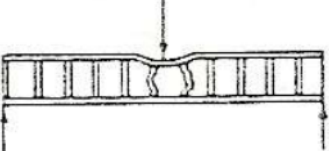
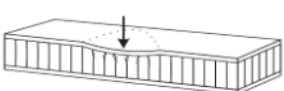
۶. کمانش درون سلولی

۷. بار موضعی

## ۲-۶- انتخاب هانی کمب

انتخاب هانی کمب مناسب برای کاربرد مورد نظر کار بسیار مشکلی است. در انتخاب هانی کمب مورد نظر فقط مشخصات استحکام مکانیکی و مقادیر مربوط به مدول ملاک نیست بلکه باید ملاحظات محیطی از جمله دمای کارکرد، رطوبت، رطوبت نسبی، مقاومت در برابر مکش سیال، تلورانس خرابی، مقاومت در برابر خرابی و غیره مد نظر گرفته شود. معمولاً قیمت هم مد نظر قرار می گیرد.

بطور کلی هانی کمب آلومینیومی کمترین قیمت و وزن را دارد. هسته نومکث ترموپلاستیک سفتی و تلورانس خرابی بیشتری دارد و هسته های کارتن نوع تجاری معمولاً قیمت پایینی دارند.

<p>Facing failure شکست وجه</p>	 <p>TENSILE FAILURE IN FACING</p>	 <p>Skin compression failure</p>
<p>excessive deflection تغییر شکل بیش از حد</p>		 <p>Excessive deflection</p>
<p>Panel buckling کمانش پانل</p>		
<p>Shear crimping برش موجدار</p>		
<p>Skin wrinkling چین خوردگی پوسته</p>	 <p>ADHESIVE BOND FAILURE</p> <p>CORE COMPRESSION FAILURE</p>	
<p>Intra cell buckling کمانش درون سلولی</p>	 <p>CORE</p> <p>FACES BUCKLE INTO CORE CELLS</p>	
<p>Local compression بار موضعی</p>		

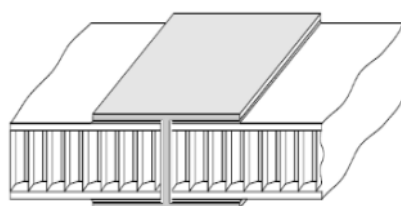
شکل ۲-۲۶- انواع شکست سازه های پانل هانی کمب [۳]

## ۷-۲- روشهای اتصال پانلهای لانه زنبوری

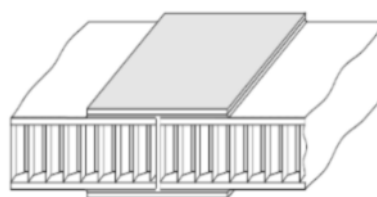
پانلهای ساندویچ لانه زنبوری در اقسام گوناگونی متصل می شوند که در ذیل به آنها اشاره

می شود:

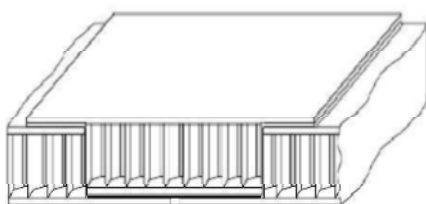
- روشهای اتصال مسطح:



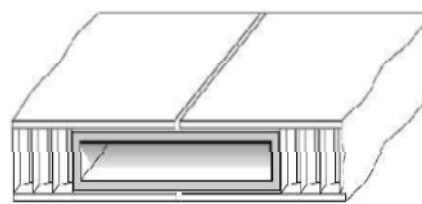
اتصال H



اتصال وجوه



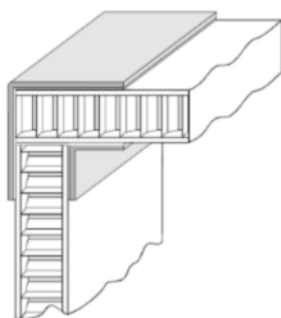
اتصال هممنوع



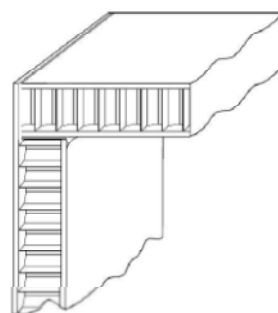
اتصال مستطیل

شکل ۲-۲۷- انواع روشهای اتصال مسطح پانل لانه زنبوری [۳]

- روشهای اتصال گوشه:

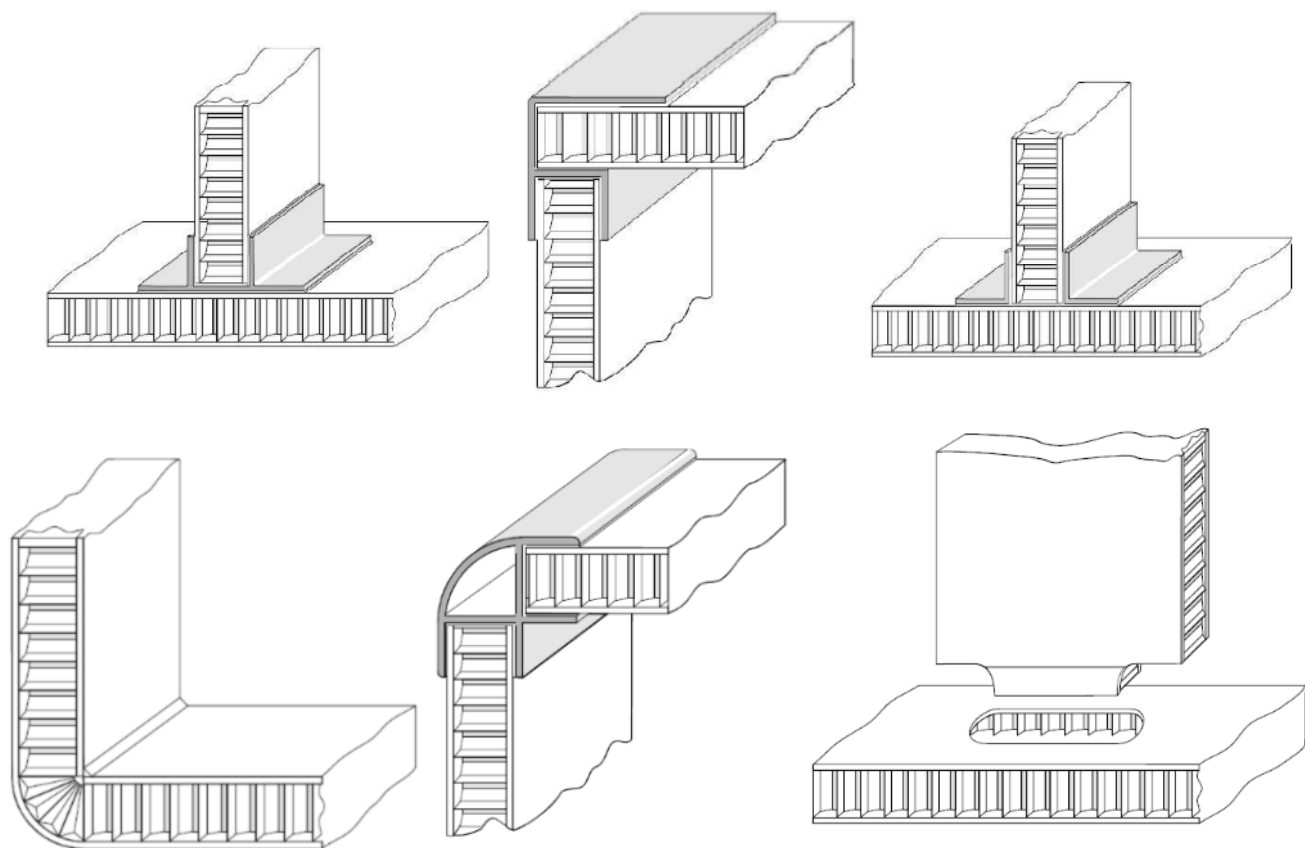


اتصال L



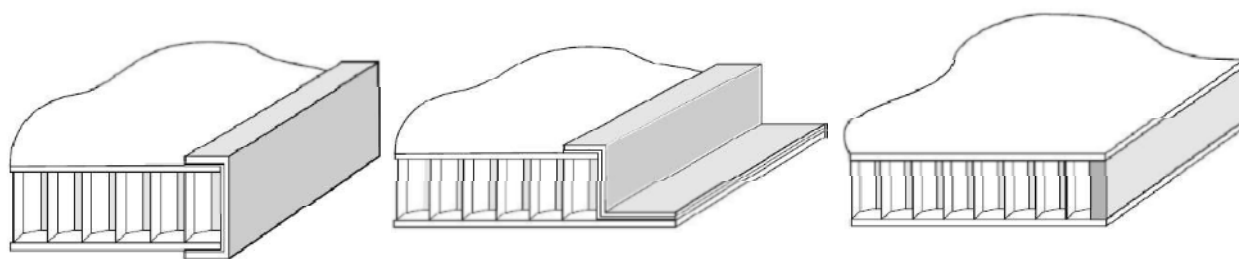
اتصال چسب

شکل ۲-۲۸- انواع روشهای اتصال گوشه پانل لانه زنبوری [۳]



شکل ۲-۲۹- انواع روشهای اتصال ویژه پانل لانه زنبوری [۳]

• روشهای بستن انتهای پانل:



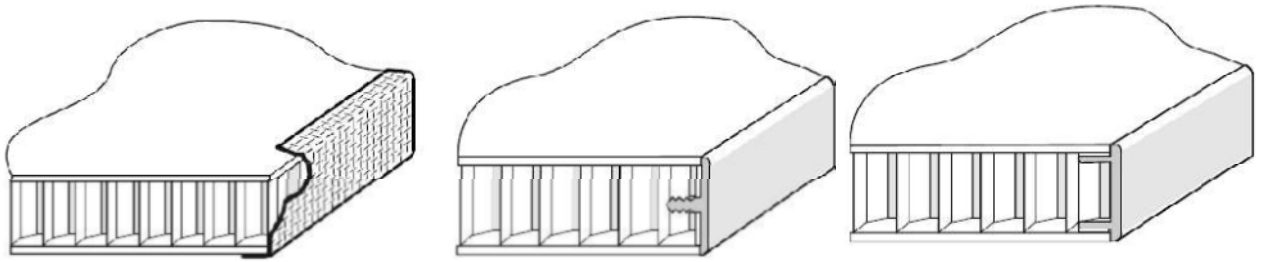
اتصال U

اتصال Z

پروکننده

شکل ۲-۳۰- انواع روشهای بستن انتهای پانل لانه زنبوری [۳]



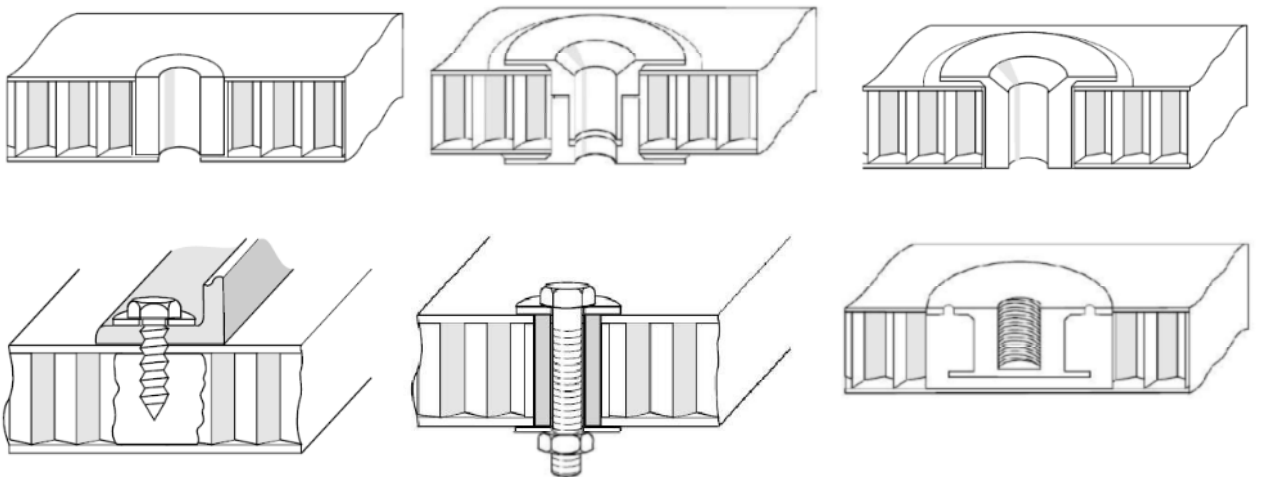


نوار چسب

اتصال مناسب مقاطع ضخیم

اتصال مناسب مقاطع نازک

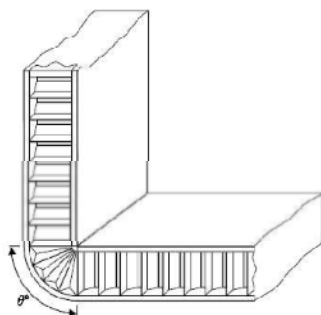
شکل ۲-۳۰- انواع روشهای بستن انتهای پانل لانه زنبوری [۳]



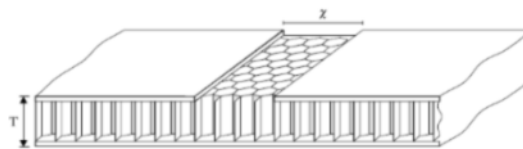
شکل ۲-۳۱- انواع روشهای مهار پانل لانه زنبوری [۳]

باتوجه به ساده و اقتصادی بودن و استفاده حداقل ابزار و اتصالات این روش بسیار مناسب می

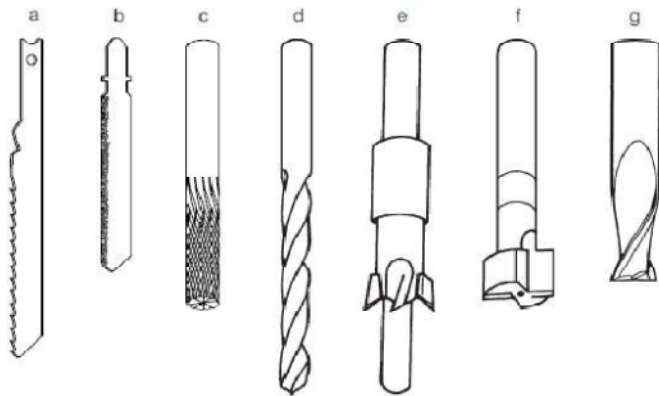
باشد.



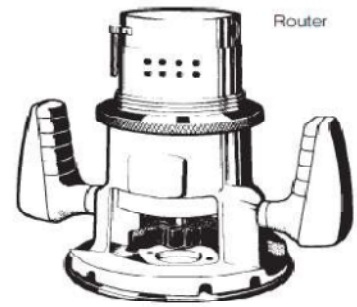
$$x = \frac{2\pi \times T \times \theta}{360}$$



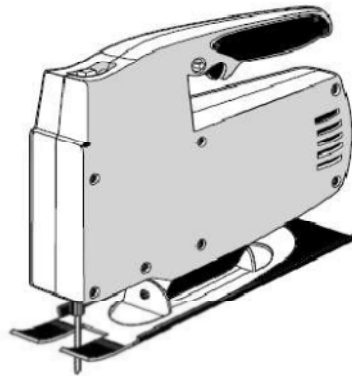
شکل ۲-۳۲- روش بریدن و خم نمودن پانل لانه زنبوری [۳]



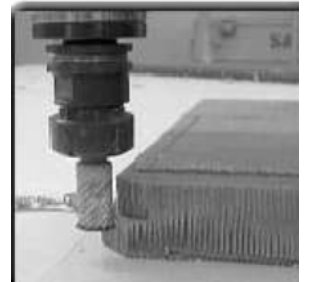
- a Standard jig saw blade
- b Grit edged jig saw blade
- c Diamond cut pattern tungsten carbide router cutter - burr end
- d High speed twist drill
- e Piloted counter bore cutter
- f Edge rebating router cutter
- g 2 flute tungsten carbide router cutter



Band Saw



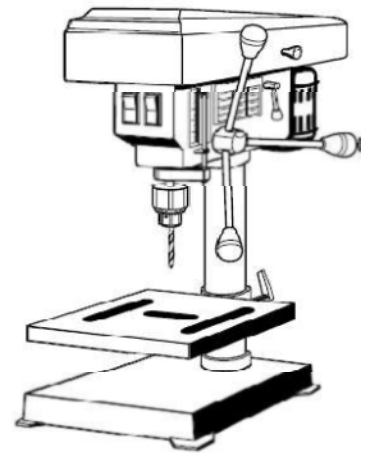
Jig Saw



Circular Saw



Oscillating Saw



Drill

شکل ۲-۳۳- ابزار مورد نیاز جهت اتصالات پانل لانه زنبوری [۳]

## ۲-۸- آزمایشها

انواع مختلفی از آزمایشات بر روی پانل های ساندویچی انجام می پذیرد. در جدول ۲ - ۴ آزمایشهای پانل ساندویچی و در جدول ۲ - ۵ آزمایشهای اتصال پانل ساندویچی مشاهده می گردد.

جدول ۲-۴ - آزمایشهای پانل ساندویچی [۴]

شماره استاندارد	موضوع استاندارد
ASTM C 271	Test Method for Density of Core Materials for Structural Sandwich Constructions.
ASTM C 272	Test Method for Water Absorption of Core Materials for Structural Sandwich Constructions
ASTM C 297	Method for Tension Test of Flat Sandwich Constructions in Flatwise Plane.
ASTM C 365	Test Methods for Flatwise Compressive Strength of Sandwich Cores.
ASTM C 393	Method for Flexural Test of Flat Sandwich Constructions
ASTM C 481	Test Method for Laboratory Aging of Sandwich Constructions
ASTM D 1037	Method for Evaluating the Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials.
ASTM D 2559	Specification for Adhesives for Structural Laminated Wood Products for Use Under Exterior (Wet Use) Exposure Conditions.
ASTM E 72	Method of Conducting Strength Tests of Panels for Building Construction.
ASTM E 84	Test Method for Surface Burning Characteristics of Building Materials.
ASTM E 661	Test Method for Performance of Wood and Wood-Based Floor and Roof Sheathing Under Concentrated Static and Impact Loads.

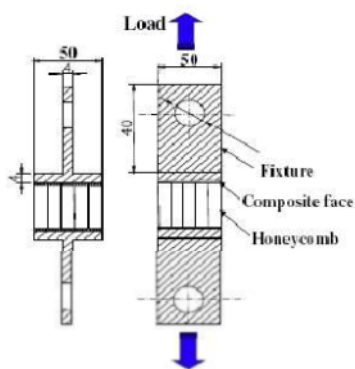
جدول ۲-۵ - آزمایشهای اتصال پانل ساندویچی : [۵]

شماره استاندارد	موضوع استاندارد
ASTM D 905-49(1989)	Test Methods for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading
ASTM C 273-94	Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials
ASTM C 297-61(1988)	Test Method for Tensile Strength of Flat Sandwich Constructions in Flatwise Plane
ASTM D 1623-78(1995)	Test Method for Tensile and Tensile Adhesion Properties of Rigid Cellular Plastics
ASTM D 2559-92	Specification for Adhesives for Structural Laminated Wood Products for Use Under Exterior (Wet Use) Exposure Conditions
ASTM D 1002-72 (1983)	Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear Tension Loading (Metal-to-Metal)
ASTM D 2294-69 (1980)	Test Method for Creep Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading (Metal-to-Metal)
ASTM D 1212-91	Test Methods for Measurement of Wet Film Thickness of Organic Coatings
ASTM D 1183-70 (1987)	Test Methods for Resistance of Adhesive to Cyclic Laboratory Aging Conditions
ASTM D 572-88	Test Method for Rubber Deterioration by Heat and Oxygen
ASTM D 1149-91	Test Method for Rubber Deterioration Surface Ozone Cracking in a Chamber
ASTM D 896-90	Test Method for Resistance of Adhesive Bonds to Chemical Reagents
ASTM D 1622-93	Test Method for Apparent Density of Rigid Cellular Plastics
ASTM C 393-62(1988)	Method for Flexure Test of Flat Sandwich Constructions

اهم آزمایشهای پانل لانه زنبوری به شرح ذیل می باشد:

### ۲-۸-۱- آزمایش کشش (flatwise tensile test):

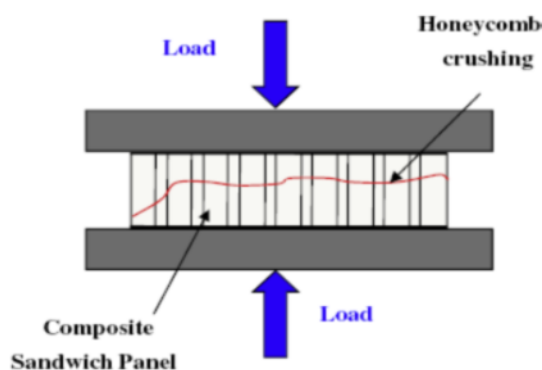
آزمایش کشش تحت استاندارد ASTM D297 انجام می پذیرد تا استحکام پیوند بین ورقه ها و هسته هانی کمب اندازه گیری شود. نیرو توسط یک اتصال T شکل به پانل منتقل می شود (شکل ۲-۳۴). مساحت مورد نیاز به ابعاد سلول بستگی دارد. تعداد تقریبی ۶۰ سلول مناسب می باشد. مقدار کشش جهت پانل آلومینیومی از ۰/۱ Mpa تا ۰/۶ Mpa متفاوت می باشد. [۶]



شکل ۲-۳۴- آزمایش ساندویچ مرکب تحت کشش [۷]

### ۲-۸-۲- آزمایش فشار (flatwise compressive test):

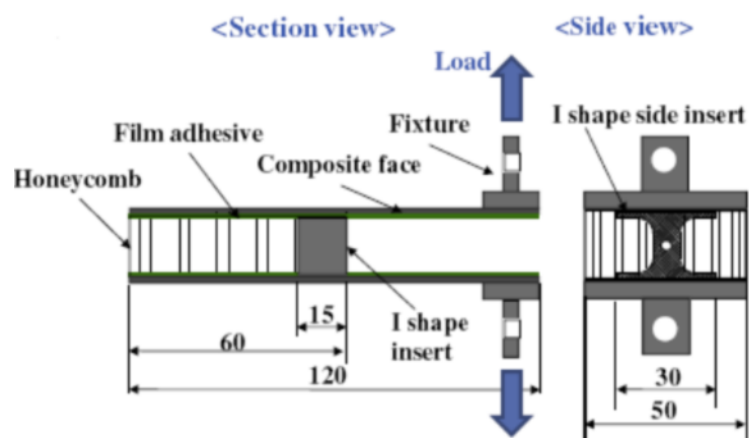
آزمایش فشار تحت استاندارد ASTM C396 انجام می پذیرد تا استحکام فشاری ساندویچ پانل بررسی شود. این آزمایش مقاومت فشاری و مدول هانی کمب را مشخص می نماید. (شکل ۲-۳۵) [۶]



شکل ۲-۳۵- آزمایش ساندویچ مرکب تحت فشار [۸]

## ۲-۸-۳-آزمایش جدا شدگی پوسته (Cleavage peel test):

یک ابزار I شکل به اندازه ضخامت هسته در ساندویچ پانل قرار داده می شود (شکل ۲-۳۶). سپس یک نیروی محوری با شتاب زیاد به آن وارد می شود. بنابراین یک نیروی خمشی وارد می شود. و این نیروی خمشی به محل اتصال ابزار I شکل و پوسته منتقل می شود. این آزمایش تحت استاندارد ASTM D3807 انجام می پذیرد. [۶]

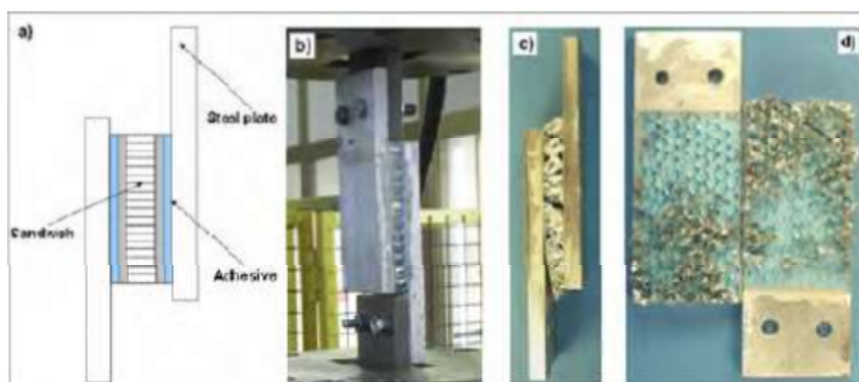


شکل ۲-۳۶-آزمایش جدا شدگی پوسته [۹]

## ۲-۸-۴-برش در جهت LT, WT (Shear in LT- and WT- plane):

ساندویچ پانل با قرار گرفتن در میان دو جسم صلب و چسباندن پوسته با جسم صلب در جهت LT, WT تحت نیروی برشی قرار داده می شود. (شکل ۲-۳۷). جریان تغییر شکل برشی بطور تقریبی بر پایه خواص رفتار بار-تغییر مکان به ۴ مرحله طبقه بندی می شود. در مرحله ۱ تغییر شکل الاستیک برشی در دیواره سلول مشاهده می شود و بار بطور خطی تا حداکثر افزایش تغییر شکل افقی تیر، افزایش می یابد. بعد از اینکه بار به حداکثر رسید، با سرعت زیادی شروع به کاهش یافتن می کند و تغییر شکل وارد مرحله دوم می شود که تغییر شکل

پلاستیک دیواره سلول نامیده میشود. در این مرحله چروک خوردگی دیواره سلول ها مشاهده میشود و شکست مورب دیوار رخ می دهد. در مرحله سوم یک منحنی یکنواخت بار- تغییر مکان وجود دارد که بار تقریباً ثابت باقی می ماند. در این مرحله شکست مایل دیواره ها غالب می شود و ممکن است جدا شدگی سلول ها رخ دهد. بعد از بار یکنواخت، به سرعت کاهش بار آغاز می شود و در مرحله چهارم به آرامی به صفر می رسد. [۱۰]

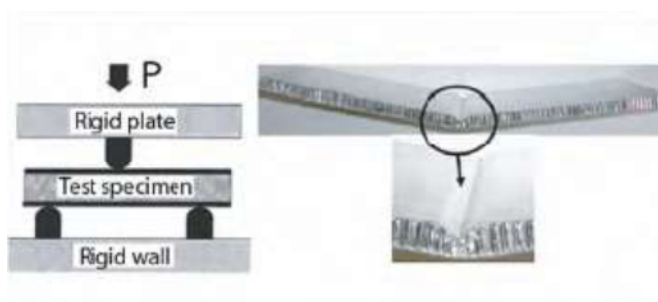


شکل ۲-۳۷- آزمایش برش (a) نمای شماتیک (b) قبل (c) بعد از برش درجهت LT (d) بعد از برش درجهت WT [۱۱]

## ۲-۸-۵- آزمایش خمش سه نقطه ای (Three point bending tests):

آزمایش خمش سه نقطه ای تحت استاندارد ASTM D790-96a انجام می پذیرد تا

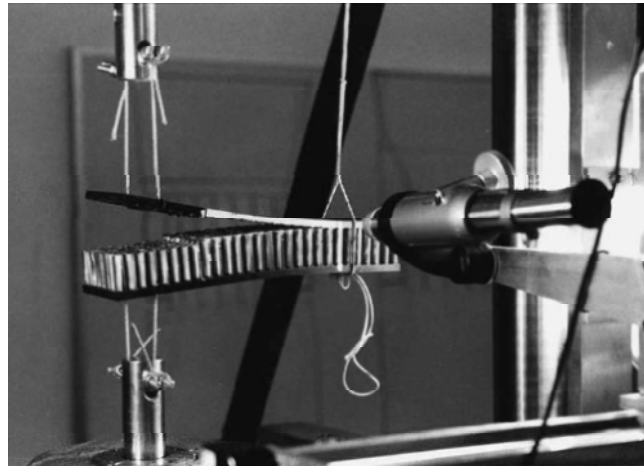
استحکام خمشی ساندویچ پانل بررسی شود. (شکل ۲-۳۸)



شکل ۲-۳۸- آزمایش خمش سه نقطه ای [۱۲]

## ۲-۸-۶-آزمایش تیر طره مضاعف (Double cantilever beam):

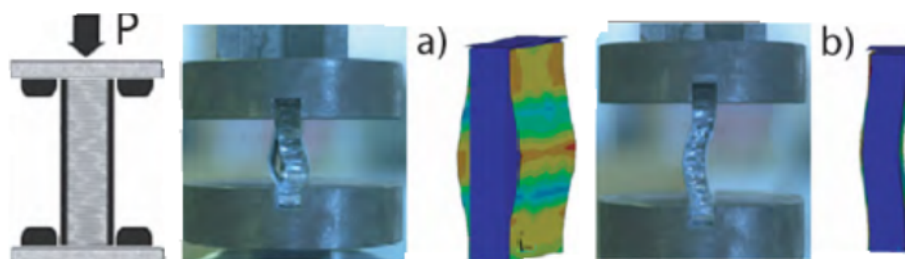
آزمایش تیر طره مضاعف تحت استاندارد ASTM D5528-94a انجام می پذیرد تا استحکام ساندویچ پانل و چسبندگی ورقه ها با هسته ساندویچ بررسی شود. (شکل ۲-۳۹) [۱۳]



شکل ۲-۳۹-آزمایش تیر طره مضاعف [۱۴]

## ۲-۸-۷-آزمایش کمانش و خرابی نهایی تحت نیروی محوری:

در شکل ۲-۴۰ نمایی از کمانش و خرابی نشان داده شده است که نمونه در دو جهت  $W$  و  $L$  تحت آزمایش قرار گرفته است. اما تفاوت زیادی در مقاومت دو حالت دیده نشده است.



شکل ۲-۴۰-آزمایش نیروی محوری (a) شکست چین خوردگی وجه (b) شکست موجداربرشی [۱۶]

در فصل بعد پیرامون پیشینه تحقیقات انجام شده بحث خواهد گردید.



فصل سوم

پیشینه تحقیقات انجام شده

نتایج حاصل از بررسی مقالات مطالعه شده را به صورت زیر می توان تقسیم بندی کرد: [ ۱۷ ]

- تحقیقات به روش تحلیلی
- تحقیقات به روش تجربی شبه استاتیکی
- تحقیقات به روش تجربی دینامیکی

ابریت مدل های اخیر را برای بارگذاری متمرکز برای صفحه های ساندویچی با صفحات کامپوزیتی جمع آوری کرده است که شامل قانون تماس، تئوری تیر ها و صفحات ساندویچی کامپوزیتی، مدل های دینامیکی جرم و فنر میباشد. این گونه مدلها برای نشان دادن و تعمیر آسیب وارد شده ضربه ای قطعات لازم می باشند. حل های تحلیلی که توصیف کننده آسیب و تغییر شکل ها هستند می توانند ما را قادر به شناسایی پارامترهای موثر در ضربه کند. می توان با فرض یک چند لایه کامپوزیتی بر روی یک تکیه گاه پلاستیک کامل (هسته) تغییر شکل را پیدا کرد. وی برای محاسبه یک حل بسته برای پاسخ ضربه صفحات ساندویچی کامپوزیتی، آنها را به صورت یک مدل غیر پیوسته دینامیکی شامل جرم ها و فنرها و دمپرهای معادل در نظر گرفت. [ ۱۸ ]

ابریت نشان داد که صفحه پشتی ساندویچ پانل به طور معمول به صورت سالم و تخریب نشده باقی می ماند. البته این در حالتی است که تنش های خمشی کششی زیاد نباشند و یا نفوذ در صفحه بالایی همراه تخریب گسترده هسته که منجر به سفت شدن آن می شود، رخ ندهد. همچنین اگر خمش کلی زیادی در پانل رخ دهد، مثلا اگر ابعاد پانل مانند یک تیر باشد، آنگاه تسلیم هسته به دلیل برش در جهت ضخامت در طول قابل توجهی رخ می دهد.

یکی دیگر از کار های اولیه در بازه هانی کمب ها و کامپوزیت های ساندویچی با هسته هانی کمب متعلق به وبر [ ۱۹ ] است که معادلات حاکم بر پوسته های ساندویچی ضخیم با هسته هانی کمب و رویه های لمینت را استخراج نمود. این معادلات ارتجاعی ساندویچ هائی با دو شعاع انحنا را تعریف می کنند . در این روابط محدودیتی روی ضخامت هسته وجود ندارد . همچنین نتایج حل

عددی برای حالتی که یک استوانه مدور تحت بار داخلی یکنواخت در جهت شعاعی باشد ارائه شده اند که اهمیت رفتار هسته به صورت یک پوسته ضخیم و نیز آثار خمش را در رویه های لمینت نشان می دهد. این معادلات نه چندان ساده تنها حالت ارتجاعی و استاتیکی سازه را در نظر می گیرد. و بر و هالت [ ۲۰ ] با در نظر گرفتن لایه های ساندویچ به طور مستقل از یکدیگر، معادلات دیفرانسیلی حاکم بر رفتار پوسته های ساندویچی با هسته هانی کمب را در اثر بارهای دینامیکی استخراج نمودند. حل دقیق این معادلات برای حالتی که هسته دارای ضخامت ثابت باشد، برای تیرهایی که ضخامت آنها بطور خطی تغییر نماید، برای ورق های تخت و نیز برای استوانه ها تحت شرایط ساده بارگذاری بدست آورده شده است. این معادلات برای حالت های ارتجاعی رفتار مواد معتبر هستند.

دینگ [ ۲۱ ] طراحی بهینه سازه های ساندویچی با هسته هانی کمب با قید های کمانش را مورد بررسی قرار داد . او چهار مود ناپایداری را برای چنین سازه ای در نظر گرفت که شامل کمانش کلی سازه، ناپایداری برشی هسته، تاب خوردگی رویه و کمانش سلول می باشد . متغیرهای طراحی در این تحلیل عبارت از ضخامت رویه، ضخامت هسته، ضخامت دیواره سلول و قطر دایره محاطی سلول هانی کمب بودند .

این تحلیل به روش اجزاء محدود و با استفاده از المان های پوسته ایزوپارامتریک هشت گرهی انجام شد و نتایج عددی برای ۴ مثال ارائه گردید . مسئله بهینه سازی سازه با قیدهای تنش، خیز، کمانش و اندازه حداقل شود مدل گردید. تابع وزن سازه  $(W(t))$  بطوری که تابع وزن سازه  $t$  سلول به صورت تعیین بردار به صورت ذیل در نظر گرفته شد:

$$W(t) = \sum_{i=1}^{NIE} \left( \sum_{j=1}^2 \rho_f t_f + \frac{8}{3} t_c t_h \rho_c / t_d \right) t \left( \sum_{e=1}^{NE} A_e \right) t \quad (۱-۳)$$

در این رابطه  $\rho_c, \rho_f$  به ترتیب چگالی های رویه و هسته ،  $NE$  تعداد المان های موجود در یک المان طراحی مستقل ،  $A_e$  سطح یک المان و  $NIE$  تعداد المانهای مستقل طراحی می باشد .

همچنین  $t_f, t_r$  ضخامت رویه و هسته،  $t_c$  ضخامت دیواره سلول و  $t_d$  قطر دایره محاطی سلول (سایز سلول) است.

در این تحلیل فقط بار گذاری استاتیکی مطرح بوده و حل مسئله از طریق روش اجزاء محدود انجام شده است. در ضمن هسته هانی کمب به صورت یک ماده همگن در نظر گرفته شده است.

این محقق نتایج اصلی این بررسی را در موارد ذیل خلاصه نمود:

- با افزایش تعداد متغیرهای طراحی، وزن بهینه سازه کاهش می یابد.
- قید کمانش تأثیر قابل توجهی در بهینه سازی دارد.
- حداقل وزن تئوری وقتی بدست می آید که تنشهای بحرانی هر یک از مودهای ناپایداری برابر باشند.
- گاهی افزایش قید کمانش، موجب کمی نوسان در نتیجه بهینه سازی می شود بطوریکه سرعت همگرایی کاهش می یابد.

گلد اسمیت و ساکن [ ۲۲ ] خواص جذب انرژی هانی کمب ها و ساندویچ های با هسته هانی کمب را در اثر برخورد پرتابه های نوک پهن به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آزمایش ها به صورت های استاتیکی و دینامیکی و بارگذاری در امتداد محور سلول هانی کمب بوده و در حالت استاتیکی سطح بارگذاری بزرگتر از سطح سلول بوده است. شرایط مرزی برای هدف ها به صورت تکیه از پشت بر یک پایه صلب بوده ولی برای ساندویچ ها حالت تکیه گاه ساده نیز در نظر گرفته شده است. جنس هانی کمب های مورد استفاده آلومینیوم و نومکث، سرعت های برخورد بین ۳۶ تا ۱۶۵ فوت بر ثانیه و پرتابه ها از جنس آلومینیوم و جرم آنها ۱/۸۵ پوند بوده است. نمونه ها به دو صورت مربعی با ضلع ۷/۵ دایره ای با قطر ۱۱ اینچ و اندازه های سلول ها ۰ / ۲۵ و ۰ / ۱۲۵ اینچ و ضخامت دیواره آنها به ترتیب ۰ / ۰۰۱ و ۰ / ۰۰۲ اینچ در نظر گرفته شده بود.

در حالت بارگذاری استاتیکی درصد کاهش ضخامت ورق و انرژی جذب شده اندازه گیری شدند. این آزمایش ها نشان داد که فشار لازم برای چین خوردگی و انرژی جذب شده بطور غیر خطی با چگالی ورق رابطه دارند و برای دو هسته با اندازه های مختلف سلول و دیواره ولی با چگالی یکسان، کمیت های اندازه گیری شده تقریباً با هم برابرند. همچنین هسته های چگالتر در خارج از ناحیه تماس، کمترین تغییر فرم را نشان می دهند و انرژی جذب شده برای سلول های کوچکتر با افزایش ضخامت رویه فقط به مقدار کمی زیاد می شود.

در حالت بارگذاری دینامیکی نتایج حاصل از تحقیق آنها نشان داد که فشار چین خوردگی برای هانی کمب آلومینیومی بین ۳۰٪ تا ۵۰٪ از حالت استاتیکی بیشتر است در حالی که این تفاوت برای هانی کمب نومکث حدود ۱۰٪ است. با افزایش چگالی، میزان جذب انرژی افزایش می یابد و مقدار این افزایش در حالت دینامیکی بیش از حالت استاتیکی است. برخی دیگر از نتایج مورد اشاره آنها عبارتند از:

- شکل منحنی های تغییرات فشار بر حسب خیز برای ساندویچ ها و هانی کمب ها با یکدیگر متفاوت است.
- هانی کمب ها و ساندویچ ها خاصیت ارتجاعی کمی از خود نشان می دهند.
- وقتی ساندویچ روی تکیه گاه صلب قرار داشته باشد مکانیزم های جذب انرژی آن شامل چین خوردگی هسته، خمش و کشش رویه مقابل ضربه همراه با چروکیدگی و سوراخ شدن رویه است ولی رویه زیرین تغییر شکل زیادی نمی دهد.
- بهترین الگوی خرابی برای این سازه ها به صورتی که بیشترین جذب انرژی را داشته باشند شامل یک تغییر فرم خمیری کلی سازه همراه با سوراخ شدن رویه و چین خوردگی همزمان هسته با آن است.

- نمودار فشار استاتیکی -جابجائی برای ساندویچ ها و هانی کمب ها متفاوت از یکدیگر است بطوری که در مورد ساندویچ ها نمودار قسمت افقی واضحی ندارد و فشار دارای روند صعودی می باشد.

- نسبت انرژی جذب شده به انرژی برخورد، برای نمونه های با تکیه گاه ساده و با تکیه گاه صلب تقریباً یکسان هستند اما فشار حداکثر برای نمونه با تکیه گاه پشته تقریباً دو برابر حالت تکیه گاه ساده است. میزان جابجائی در حالت دوم نیز حدود دو برابر حالت اول است.

گلداسمیت و همکارش [ ۲۳ ] ویژگی های جذب انرژی دینامیکی پوسته های ساندویچی استوانه ای با هسته هانی کمب آلومینیومی و نومکت و رویه های ضخیم از جنس آلومینیوم و پلاستیک ABS را در اثر برخورد وزنه های سنگین مورد آزمایش قرار دادند. وزنه استوانه ای آلومینیومی دارای قطر ۱۰۸ میلیمتر و وزن ۷۰۴۵ / ۰ کیلوگرم بوده که توسط یک سلاح بادی با سرعت های ۱۶/۵ تا ۱۹/۵ متر بر ثانیه به سمت هدف رها شده است. آنها برای هر آزمایش نمودارهای نیرو- جابجائی را رسم و مشاهده نمودند که در بین ترکیبات مختلف رویه و هسته آزمایش شده، مؤثرترین ترکیب برای جذب انرژی، نمونه هانی هستند که دارای هسته آلومینیومی و رویه های نازک باشند در حالی که رویه های ضخیمتر از جنس HRH-۱۰ کمترین مقدار انرژی را جذب نموده اند. بعلاوه مقدار نیروی منتقل شده شدیداً به نوع شرایط مرزی (تکیه گاه) بستگی دارد.

گلداسمیت و لویی [ ۲۳ ] ویژگی های تغییر شکل و جذب انرژی هانی کمب های آلومینیومی را هم در اثر بارگذاری استاتیکی و هم در اثر برخورد پرتابه های استوانه ای و کروی به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند.

در حالت استاتیکی با استفاده از نمودار نیرو - جابجائی، کار انجام شده روی نمونه ها را که معادل سطح زیر این منحنی است برآورد نمودند. نمونه ها به شکل مربع به ضلع ۱۵۲ و ضخامت ۶/۳۵ میلیمتر و هر چهار لبه آنها گیردار بوده است. مکانیزم های خرابی در این حالت شامل چین

خوردگی صفحه ای، چین خوردگی محوری، خمش خمیری، جدا شدن لایه ها و پارگی آنها و تشکیل پلاگ بوده است. همچنین در این حالت که قطر پرتابه و سلول برابر هستند مکانیزم تغییر شکل شدیداً به محل تماس اولیه پرتابه و دیواره سلول بستگی دارد، بنابراین انرژی جذب شده نیز که تابع نوع و میزان تغییر فرم است شدیداً متغیر می باشد.

در حالت دینامیکی با استفاده از سلاح بادی پرتابه ها که قطر آنها بین یک تا دو برابر اندازه سلول است با سرعتی بین ۳۰ تا ۱۸۳ متر بر ثانیه به سمت هدف که در بعضی از حالت ها دولبه مقابل آن و درحالت های دیگر هر چهار لبه اش گیردار بوده است شلیک شده اند. الگوی خرابی در حالت دینامیکی برای پرتابه های کروی مشابه حالت استاتیکی بوده اما برای پرتابه های استوانه ای همیشه چین خوردگی محوری رخ داده و پلاگ هم تشکیل شده است. آنها برای ۱۰ ترکیب مختلف پرتابه - هدف سرعت حد بالستیک را بدست آوردند. این آزمایشها نشان داد که با وجود شرایط اولیه یکسان، به خاطر تغییر محل تماس اولیه پرتابه با هدف مقادیر سرعت حد بالستیک متفاوتی بدست می آید.

نتایج حاصل از بررسی های این محققان نشان داد که:

فرآیندهای خرابی در هانی کمب منحصر بفرد است و خصوصیات تغییر شکل آن تا به حال بطور کامل شناخته نشده اند؛ در نتیجه مدل سازی دقیق آن ممکن نمی باشد.

الگوی خرابی هانی کمب در حالت های استاتیکی و دینامیکی بسیار شبیه یکدیگر می باشند؛ این الگو در بارگذاری استاتیکی شامل چین خوردگی صفحه ای، چین خوردگی محوری، خمش خمیری دیواره ها به صورت چین خوردگی، جدا شدن لایه ها و پارگی دیواره های سلول ها و گاهی تشکیل پلاگ بوده است ولی در حالت برخورد پرتابه های استوانه ای چین خوردگی محوری و تولید پلاگ رخ می دهد.

پیش بینی دقیق سرعت حد بالستیک هانی کمب به خاطر اغماض از پارگی و جدایش دیواره ها میسر نمی باشد.

برای یک پرتابه خاص، هانی کمب های دارای دیواره های سلول ضخیم تر و اندازه سلول کوچکتر دارای سرعت حد بالستیک بالاتری می باشند.

ویرزبیککی و همکارانش [ ۲۴ ] جذب انرژی ضربه ای در ورق های ساندویچی با هسته های هانی کمب را به صورت تحلیلی بررسی نمودند . این تحقیق در واقع توسعه روش ارائه شده توسط یکی از همین محققان برای پیش بینی مقاومت چین خوردگی هانی کمب بر حسب هندسه سلول و خواص فیزیکی آن است . آنها از مقاومت خمشی رویه صرف نظر نموده و تنها مقاومت غشائی آن را در نظر گرفتند . براساس این تحلیل مقاومت ورق ساندویچی ناشی از سه منبع مشخص است که چین خوردگی هانی کمب در ناحیه زیر پرتابه، چین خوردگی هانی کمب در خارج از ناحیه تماس پرتابه و هدف به خاطر وجود رویه و مقاومت غشائی خود رویه می باشند. در این بررسی برای محاسبه مقاومت چین خوردگی هانی کمب از همان رابطه ویرزبیککی به صورت ذیل استفاده شده است:

$$P_m = 8.61 \sigma_0 \sqrt[3]{h^3 c} \quad (۲-۳)$$

در این رابطه فرض شده است که تنش سیلان  $\sigma_0$  از رابطه ذیل پیروی کند .  $h$  ارتفاع هانی کمب و  $c$  اندازه سلول می باشد.

$$0.7\sigma_u < \sigma_0 < \sigma_u \quad (۳-۳)$$

آزمایشها نشان داده اند که برای ماده AL ۵۰۵۲ و بهترین انطباق به صورت  $\sigma_0 = \sigma_u$  و برای AL ۵۰۵۶ و AL ۲۰۲۴ این رابطه به شکل  $\sigma_0 = 0.7 \sigma_u$  می باشد. تصحیحی که در این تحقیق نسبت به کار قبلی وجود دارد، این است که مقاومت هانی کمب در مقابل چین خوردگی به صورت مجموع مقاومت چین خوردگی محوری(رابطه بالا) و یک جمله اضافی به نام مقاومت برشی به دلیل



وجود مناطق برشی در بر اطراف محیط پرتابه است. آنها این جمله جدید را به صورت نسبت نیروی برشی  $F_{sh}$  بر سطح مقطع پرتابه در نظر گرفته و مقاومت برشی کل را به صورت ذیل تعریف نمودند:

$$q_{ov} = q + \frac{F_{sh}}{\pi r^2} \quad (4-3)$$

که  $q$  مقاومت چین خوردگی و  $r$  شعاع پرتابه است. سپس نیروی برشی را به صورت مضربی از نیروی چین خوردگی فرض کردند، یعنی:

$$F_{sh} = P_m \cdot n \quad (5-3)$$

که  $n$  تعداد المانهای درگیر در ناحیه برش و  $s$  اندازه سلول است و با توجه به هندسه سلول ها برای آن رابطه ای به این صورت منظور شد:

$$n = 4\pi r_p / s \quad (6-3)$$

با تلفیق این روابط مقاومت چین خوردگی کل از رابطه ذیل به دست می آید:

$$q_{ov} = [1 + \sqrt[3]{3s/r_p}] \quad (7-3)$$

این محققان سپس با نوشتن معادله حرکت پرتابه و حل آن خیز ورق رویه را بدست می آورند. این تحلیل نشان می دهد که برای بهینه نمودن سازه ساندویچی از نظر جذب انرژی باید استحکام چین خوردگی هسته هانی کم باشد تا حدی که واماندگی رویه مهمترین عامل محدود کننده جذب انرژی ساندویچ در مقایسه با مچالگی کامل هسته و گسترش ناحیه کراش به مرزهای آزاد یا مقید ورق است.

گلداسمیت و همکارانش [۲۳] عبور از ورق های ساندویچی مشبک را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی نمونه های مربعی و دایره ای از ورق به ضلع (یا قطر) ۱۴۰ میلیمتر با محیط کاملا گیردار مورد اصابت پرتابه هایی به قطر ۶,۳۵ و ۱۲,۷ میلیمتر و سرعت های ۱۶ تا ۴۰۰ متر بر ثانیه قرار گرفتند. اندازه سلول در ورق های هدف ۳,۱۷۵ و ۶,۳۵ میلی متر بوده است و پرتابه ها به شکل های کروی و استوانه- مخروطی و استوانه ای بوده اند. در این آزمایش ها سرعت حد

بالستیک اندازه گیری شده و سرعت خروجی به صورت تابعی از سرعت برخورد و سرعت حد بالستیک نیز بر حسب چگالی سطحی ورق ثبت می شود.

نتایج این بررسی نشان داد که:

- حد بالستیک با بزرگ شدن پرتابه کاهش می یابد.
  - حد بالستیک متناسب با ضخامت ورق نمی باشد، اما با دو برابر نمودن ضخامت رویه های ساندویچ این سرعت تقریباً دو برابر می شود.
  - برای سازه های ساندویچی با هسته هانی کمب که مورد برخورد پرتابه های استوانه مخروطی قرار می گیرند چگالی هسته تاثیری بر روی حد بالستیک ندارد.
  - حد بالستیک به ماده پرتابه و شکل و اندازه آن وابسته است و برای هر شکل و اندازه پرتابه، رفتار تقریباً خطی با چگالی سطحی هدف دارد.
  - وقتی قطر پرتابه در حدود اندازه سلول باشد، محل اولین تماس پرتابه با هدف در نوع خرابی حاصل از برخورد اثر بحرانی دارد.
  - خرابی خارج از صفحه نسبت به تغییر شکل جانبی انرژی بیشتری تلف می کند.
  - در برخورد پرتابه های استوانه-مخروطی مقدار سرعت حد بالستیک عمدتاً توسط ورق های رویه کنترل می شود و ضخامت دیواره هسته عامل مهمی در تعیین آن نمی باشد.
- فت و پارک [ ۲۶و۲۵ ] شروع آسیب در صفحات ساندویچی کامپوزیتی را بررسی و نتایج تحلیلی خود را با نتایج ون و همکارانش [ ۲۷ ] مقایسه کردند. مدهای شکستی که آنها در نظر گرفتند شامل شکست برشی هسته، شکست برشی و کششی صفحه کامپوزیتی بالایی و شکست کششی صفحه پایینی می باشد
- فت و پارک [ ۲۸ ] عبور پرتابه های استوانه ای و کروی از ورق های ساندویچی با هسته هانی کمب آلومینیومی را به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار دادند. مدل ارائه شده توسط آنها بر اساس

نتایج تجربی و مخصوصاً آزمایش های گلداسمیت استوار است. در این مدل فرایند عبور به سه مرحله متوالی تقسیم می شود. در مرحله اول هسته هانی کمب و رویه زیرین به عنوان تکیه گاه رویه بالایی فرض شده و رویه بالایی به صورت پوسته ای واقع بر روی پایه ای صلب -خمیری در نظر گرفته می شود. پیوند بین رویه بالایی و هسته موجب انتقال تنش های برشی در ناحیه تغییر فرم یافته اطراف پرتابه می شود. مرحله دوم وقتی شروع می شود که پرتابه رویه بالایی را کاملاً سوراخ نموده است. در این مرحله یک پلاگ جداشده از رویه بالایی در جلو پرتابه قرار گرفته است. به جای مدل کردن مکانیزم های واقعی و اماندگی هانی کمب، از سرعت حد بالستیک هانی کمب که بطور تجربی توسط گلداسمیت بدست آمده استفاده شده است. در مرحله سوم فرض می شود که جدا شدن پیوند بین لایه ها رخ داده و پرتابه و پلاگ جلوی آن از هدف خارج می شوند. آنها اصل بقای انرژی را برای هر مرحله بطور مستقل مورد استفاده قرار داده و سرعت پرتابه در انتهای هر مرحله را سرعت ورودی مرحله بطور مستقل مورد استفاده قرار داده و سرعت پرتابه در انتهای هر مرحله را سرعت ورودی مرحله بعد قرار دادند. در حالت دینامیکی استحکام چین خوردگی  $1/3$  برابر مقدار آن در حالت استاتیکی و شعاع پلاگ نیز بر اساس مشاهدات تجربی برای پرتابه های استوانه ای  $1/5$  برابر و در حالت پرتابه های کروی  $0.6$  شعاع پرتابه در نظر گرفته شد. در نهایت معادلات حاصل به روش تکرار عددی حل و مقدار سرعت حد بالستیک محاسبه شده است. نتایج عمده این تحلیل را می توان در موارد ذیل خلاصه نمود:

- نتایج حاصل از این تحلیل با مقادیر تجربی در حدود  $5\%$  تفاوت دارد.
- پیش بینی وسعت تغییر فرم جانبی رویه های صدمه دیده با این روش بین  $34\%$  تا  $51\%$  با مقادیر تجربی اختلاف دارد.

- طی بارگذاری ضربه ای بیشتر انرژی در رویه زیرین تلف می شود (برای پرتابه استوانه ای این انرژی بین ۶۳٪ تا ۸۵٪ و برای پرتابه کروی ۵۵٪ انرژی جنبشی اولیه پرتابه است. یعنی مقاومت به نفوذ رویه زیرین در ساندویچ ها اهمیت بسیار دارد).

پالازوتو و همکارانش [ ۲۹ ] نتایج تخریب حاصل از ضربه را برای هسته و صفحه های متفاوتی مورد آزمایش قرار دادند. آنها مراحل مختلف آسیب را با نمودار نیرو- زمان ربط دادند و به رابطه ای بین نیروی تماسی بیشینه و شروع آسیب قابل مشاهده در صفحه بالایی رسیدند. اگر انرژی ضربه کم باشد، و نیروی ایجاد شده برای پارگی صفحه رویی کم باشد فقط تخریب هسته در نمودار نیرو- زمان تاثیر می گذارد.

مقایسه بین تست های ضربه و تست های شبه استاتیک همخوانی خوبی در آنها در تخریب و پیشرفت نیروی تماسی نشان داده است.

اولسون [ ۳۰ ] نتایج ضربه را برای جرم های کوچک و بزرگ مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که اگر جرم ضربه زننده در مقایسه با جرم هدف بزرگتر باشد، تاثیرات نرخ کرنش وجود ندارد. بنابراین در ضربه های با سرعت کم اثرات نرخ کرنش کم و در شبیه سازی قابل صرف نظر کردن است.

خلیلی، ملک زاده و میتال [ ۳۱ ] یک روش محاسباتی جدید بر پایه تئوری پیشرفته ساندویچ پاتل های مرتبه بالاتر (IHSAPT) و دو مدل که رفتار تماسی بین ضربه زننده و پاتل را بیان می کردند را برای مطالعه مسئله ضربه با سرعت کم را در ساندویچ پاتل های دارای یک هسته انعطاف پذیر و رویه از جنس صفحات کامپوزیتی مورد استفاده قرار دادند. برای در نظر گرفتن همه ترم های خیز، تنش ها و کرنش ها در صفحات و هسته آنها از یک روش محاسباتی بر اساس تئوری پیشرفته ساندویچ پاتل های مرتبه بالاتر (IHSAPT) و روش گالرکین برای مدلسازی ساندویچ پاتل استفاده

کردند. شرایط مرزی مختلفی در نظر گرفته شد و در نهایت نتایج عددی تحلیل با نتایج تجربی و بعضی نتایج تحلیلی دیگران مقایسه شد.

در محدوده تحلیل اجزاء محدود تا به حال کارهای زیادی صورت گرفته که در زیر خلاصه ای از تعدادی از این تحقیقات مورد بررسی قرار گرفته است:

اسکات و همکاران [ ۳۲ ] یک نرم افزار شبیه سازی تحلیل اجزاء محدود برای پیش بینی آسیب در ساندویچ پانل ها در حین ضربه با سرعت کم را طراحی کردند. نرم افزار مورد نظر با نام Sandmesh توانایی تولید اتوماتیک هسته های هانی کمی و فولدد به صورت پوسته سه بعدی را دارا می باشد. خروجی این نرم افزار سایز و عمق حفره ایجاد شده در حین ضربه و همچنین نمودار نیرو-زمان می باشد. این افراد نتایج تحلیلی خود را با نتایج تجربی مقایسه کردند.

بسانت و دیویس [ ۳۳ ] نیز از یک کد نرم افزاری که قبلا برای تحلیل کامپوزیت های تک لایه طراحی شده بود برای شبیه سازی ضربه با سرعت کم بر روی ساندویچ پانل ها استفاده نمودند. یک معیار تسلیم مناسب با توجه به مشاهدات تجربی برای ساندویچ پانل ارائه شد . مقایسه نتایج تحلیل اجزاء محدود با نتایج تجربی در سه محدوده انرژی J 40 و J 80 و J 120 برای ساندویچ پانل با هسته آلومینیومی و صفحه کامپوزیتی از جنس الیاف کربن در تحقیقات آنها آورده شده است.

میو و همکارانش [ ۳۴ ] نتایج تست تجربی و شبیه سازی عددی ضربه و تخریب حاصل از نفوذ یک ساندویچ پانل مورد استفاده در یک هواپیما را در اثر اصابت یک ضربه زننده کروی مورد مطالعه قرار دادند.

هدف از این کار نشان دادن این مطلب بود که یک مدل ریاضی درست می تواند اطلاعات لازم برای درک مکانیزم را به طراح بدهد بدون اینکه نیاز به انجام تست تجربی باشد. تحلیل در نرم افزار LS-DYNA3D انجام شده و در نهایت نیز همخوانی خوبی بین نتایج عددی و تجربی وجود داشت.

کارگر و همکارانش [ ۳۵ ] یک کد نرم افزاری برای شبیه سازی ضربه با سرعت کم بر روی ساندویچ پانل ها با نام CODAC معرفی کردند. در مقایسه نتایج با نتایج تجربی نمودار نیرو-زمان و ابعاد ناحیه آسیب مورد بررسی قرار گرفت. آنها تاثیرات تخریب آشکار و همچنین ساییدگی در حین ضربه را در مدل خود وارد کردند. نتایج آنها دقت خوبی در مدلسازی رفتار شکست هسته و همچنین ایجاد تخریب قابل مشاهده داشت.

فصل چهارم

# نحوه مدل سازی پائل لانه زنبوری در

نرم افزار ANSYS

روش اجزای محدود، روشی عددی است که می‌توان آن را برای حل مسائل متعدّد و متنوّع مهندسی در حالات مختلف پایدار، خطّی یا غیرخطّی مانند تحلیل تنش، انتقال حرارت و جریان سیال به کار برد. این روش که ریشه‌های آن به سال‌های اولیهٔ ۱۹۰۰ میلادی بر می‌گردد، عملاً در دههٔ ۶۰ میلادی به صورت نظام یافته و مدوّن، وارد مباحث مهندسی به خصوص مهندسی مکانیک و عمران شد و در دههٔ پایانی هزارهٔ دوم به طور شگفت‌آوری در مراکز علمی و صنعتی جهان رسوخ نمود.

به طور کلی برای حل مسائل فیزیکی سه روش موجود است [۳۶]:

۱- روش تحلیلی دقیق (Exact Solution)

۲- روش عددی (Numerical Solution)

۳- روش تجربی (Experimental Method)

روش حل عددی که اجزای محدود زیر مجموعه آن می‌باشد، جزء یکی از پرکاربردترین روش‌های مورد استفاده در حل مسائل مهندسی است. در روش اجزای محدود غالباً مسائل فیزیکی به کمک معادلات دیفرانسیل یا کمینه نمودن انرژی پتانسیل حاکم بر سیستم حل می‌شوند. بدون شک روش اجزای محدود، انقلابی در صنعت جهان و نحوهٔ نگرش به تحلیل و طراحی به وجود آورد. حل مسائلی که توسط روش معمول تحلیلی غیرممکن می‌نمود، قابلیت مدل‌سازی فرآیندهای واقعی صنعتی با کم‌ترین ساده‌سازی‌ها، توانمندی روش در ارائهٔ نتایج قابل اطمینان، کاهش هزینه‌های سنگین تست‌های عملی در فرآیندهای طراحی، سرعت بالای روش در حل مسائل و بالاخره افزایش قابلیت اطمینان و ایمنی در طراحی باعث گردید تا این روش به عنوان جزء جدانشدنی پیشرفت صنعتی درآید. نرم‌افزارهای تجاری اجزای محدود با هدف پاسخ به نیازمندی‌های علمی و صنعتی، طراحی و به بازار ارائه گردیدند. تعداد و تنوّع این نرم‌افزارها امروزه به حدی رسیده که کاربر نمی‌تواند به راحتی یکی را انتخاب کند. گرچه قابلیت‌ها و توانمندی‌های این نرم‌افزارها متفاوت است،



اما در بسیاری از تحلیل‌ها مشابه و یکسان می‌باشند که می‌توان به نرم‌افزارهایی همچون ANSYS، MARC، ABAQUS، ADINA، DIANA، COSMOS، NASTRAN و ASKA ... اشاره کرد.

اولین نسخهٔ نرم‌افزار ANSYS در سال ۱۹۷۱ توسط محققین دانشگاهی شرکت Swanson پایه‌گذاری شد که اکنون با بیش از یک میلیون خط کد رایانه‌ای، جزء برترین نرم‌افزارهایی است که قادر به انجام تحلیل‌های غیرخطی و مکانیک شکست می‌باشد. ویرایش‌های گوناگونی از این نرم‌افزار موجود است که در این پایان‌نامه از ویرایش ۱۱ آن استفاده شده است. کار کردن با نرم‌افزار همیشه با فراگیری آن آغاز می‌شود. این عمل شاید ساده‌ترین بخش هر مدل‌سازی به حساب آید؛ آنچه بیش از همه اهمیت دارد، رسیدن به جواب‌های درست و قابل اطمینان در نتایج به دست‌آمده است. لذا در این فصل پس از آشنایی با مفهوم تحلیل غیرخطی و بیان اهمیت و لزوم کالیبراسیون، نحوهٔ مدل‌سازی پانل لانه زنبوری، آموزش داده شده و نکات حائز اهمیت در مدل‌سازی بیان می‌گردد. در ادامه با بررسی نتایج آن، نحوهٔ حصول اطمینان به نتایج یک تحلیل غیرخطی به روش اجزای محدود، توضیح داده می‌شود.

#### ۴-۲- مروری بر مفهوم تحلیل غیرخطی در نرم افزار

به طور کلی غیرخطی شدن یک مسئله می‌تواند در دو شکل ظاهر شود [۳۶]:

الف - غیرخطی هندسی: این نوع غیرخطی بودن در برگیرندهٔ تغییرات هندسه سازه بوده که

در این نوع مسائل ماتریس سختی سازه  $[K]$  تابعی از بردار تغییرمکان‌ها  $[U]$  و مشتقات آن است.

ب - غیرخطی بودن ماده: این نوع مسائل ممکن است در اثر وجود یک رابطهٔ غیرخطی بین

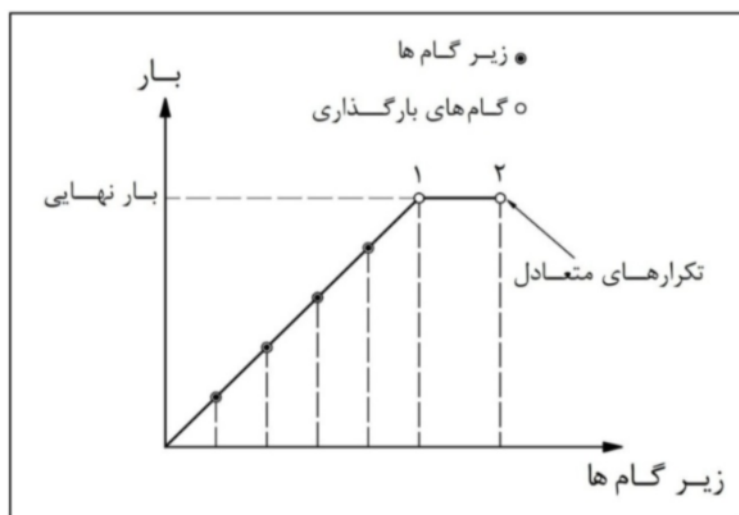
تنش و کرنش مواد به وجود آید. در این مواد تنش تابعی غیرخطی از کرنش است.

در حل یک مسألهٔ غیرخطی عوامل بسیار مهمی دخالت دارند به طوری که عدم دقت در وارد

کردن و معرفی آنها باعث می‌شود که نتایج کاملاً غلطی ارائه شود. از جمله این عوامل می‌توان به

بارگذاری اشاره کرد؛ به طوری که تغییر در نحوه اعمال بار منجر به تغییر در روند حل و نتایج خواهد شد. در یک تحلیل غیر خطی می‌بایست بار به صورت تدریجی به سازه اعمال گردد. این کار در نرم‌افزار ANSYS طی دو روند کاملاً متمایز صورت می‌پذیرد. اول آن که بار در مراحل مختلف تحت عنوان گام بارگذاری به سازه اعمال شود.

در هر گام بارگذاری، زمان، یک پارامتر نمادین برای نشان دادن زمان انتهای بارگذاری است. روند دومی که در اعمال بار طی می‌کنیم، قطعه‌قطعه کردن هر گام بارگذاری است؛ که به هر یک از این قطعه‌های اعمال بار، زیرگام می‌گوییم. به مجموعه این بارگذاری‌های قطعه‌قطعه و متوالی تاریخچه بارگذاری گفته می‌شود. مفهوم گام بارگذاری و زیرگام در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. در هر گام بارگذاری تعداد زیرگام می‌تواند بر حسب ضرورت زیاد یا کم گردد. این بدان معنا است که در مراحل اولیه بارگذاری می‌توان هر گام را با تعداد کم‌تری زیرگام حل کرد ولی، در بارهایی نزدیک به بار شکست، هم گام‌ها و هم چنین زیرگام‌های آن‌ها را می‌بایست ریزتر در نظر گرفت. باید به این نکته توجه کرد که میزان یا نحوه اعمال برخی از پارامترها برای هر مسئله متفاوت است.



شکل ۴-۲- مفهوم گام بارگذاری و زیرگام در تحلیل غیرخطی

#### ۴-۳- جایگاه و اهمیت کالیبراسیون نمونه‌ها

زمانی که نمونه‌هایی را در آزمایشگاه ساخته و مورد آزمایش قرار می‌گیرد، دسته‌ای از نتایج بدست می‌آید. گرچه ممکن است بعضی از آن نتایج همراه با خطا باشد؛ لیکن کلیت این نتایج به عنوان مبنایی برای استخراج‌های بعدی مورد توجه و استفاده قرار می‌گیرد. در مقابل، در یک تحلیل کامپیوتری اولین سؤال اساسی در مواجهه با هر نتیجه‌ای آن است که چگونه و تا چه حد به صحت این نتیجه می‌توان اطمینان کرد. در هر تحقیق برای آن که بتوان نتایج تحلیل‌های رایانه‌ای را مبنایی برای نتیجه‌گیری‌ها و مقایسه‌های بعدی قرار داد، لازم است ابتدا درستی مدل‌سازی به اثبات برسد. بهترین روند برای نیل به این هدف آن است که نمونه‌هایی از تحقیقات آزمایشگاهی (یا احیاناً تحلیلی) انجام شده توسط سایر محققین را انتخاب کرده و با نتایج تحلیل کامپیوتری مقایسه شود.

#### ۴-۴- معرفی گزینه‌های المان‌ها، مدل‌های رفتاری و ثابت‌های حقیقی

اولین گام در مدل‌سازی اجزای محدود هر سازه‌ای، شناسایی مشخصات آن اعم از، رفتار مصالح به کار رفته در سازه، ابعاد، شرایط تکیه‌گاهی و ... می‌باشد.

مدل‌سازی قابلیت‌ها، رفتار و خواص مصالح، توسط سه گزینه زیر صورت می‌گیرد.

۱- المان (ELEMENT): در نرم‌افزار ANSYS، المان‌ها به منظور شبیه‌سازی قابلیت‌هایی نظیر خزش، تغییرشکل‌های بزرگ، تغییرشکل‌های پلاستیک، ترک‌خوردگی و خردشدگی و ... به کار می‌روند. به عنوان مثال با توجه به کارکرد، در شبیه‌سازی رفتار پوسته و هسته، می‌بایست از المانی که دارای این قابلیت‌ها است استفاده نمود. بنابر ویژگی‌های مورد نیاز در رفتار واقعی عضو، قابلیت‌های المان‌ها، قابل تنظیم در گزینه OPTION مربوط به آن المان هستند و به عنوان KEYOPT(n) شناخته می‌شوند، که n یک شماره مشخص می‌باشد. المان‌ها به دو گروه اصلی دو بعدی و سه بعدی تقسیم‌بندی می‌شوند.

۲- مصالح (MATERIAL): به منظور تعیین و اعمال رفتار مکانیکی مناسب و در برخی

موارد، تنظیم برخی پارامترهای قابلیت‌های المان‌ها، به کار می‌روند.

به عنوان مثال مدول الاستیسیته، مدول برشی، ضریب پواسون، منحنی تنش- کرنش مصالح و

مقاومت‌های کششی و فشاری، مربوط به تنظیمات این گزینه هستند.

۳- ثابت حقیقی (REAL CONSTANT): ثابت‌های اعضای سازه‌ای در این قسمت

مشخص می‌شوند. به عنوان مثال ضخامت پوسته و هسته مربوط به تنظیمات این گزینه هستند.

سه گزینه مذکور، در مدل‌سازی هر سازه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ به گونه‌ای که

ممکن است با کوچک‌ترین اشتباه و بی‌دقتی در تعریف پارامترهای مربوط به این گزینه، نتایج حاصل

از تحلیل با خطای قابل ملاحظه‌ای همراه باشد.

#### ۴-۵- المان مدل‌سازی پانل لانه زنبوری در نرم‌افزار ANSYS

##### ۴-۵-۱- المان shell 63

المان مورد استفاده در مدل کردن قابلیت‌های پوسته، المان shell 63 است. با توجه به

شکل ۴-۳ المان مذکور، المانی چهار گره‌ای بوده که هر گره آن، دارای شش درجه آزادی جابجایی و

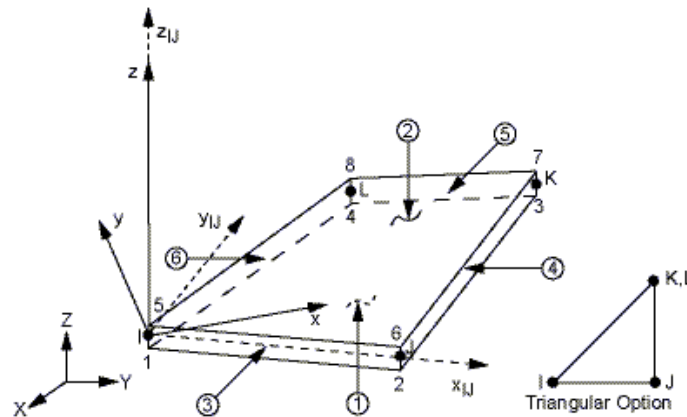
چرخشی در جهات و حول  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  می‌باشد. این المان دارای قابلیت‌های ویژه جهت مدل‌سازی

پوسته‌ها مانند پانل لانه زنبوری می‌باشد که دارای توانایی عملکرد هم به صورت غشایی و هم به

صورت خمشی را داراست و می‌توان در آن هم نیروهای درون صفحه‌ای و هم نیروهای برون صفحه

ای را وارد کرد این المان توانایی مدل‌سازی تغییرشکل‌های پلاستیک، خزش و تغییرشکل‌ها و

کرنش‌های بزرگ را دارا می‌باشد [۳۷].



شکل ۴-۳- المان shell 63 به همراه دستگاه مختصات محلی [۳۷]

برای المان shell 63 چهار خصوصیت کلی در نظر گرفته شده عبارتند از:

KEYOPT(3)، که قابلیت تغییر شکل های بزرگ المان را به کاربر می دهد؛ KEYOPT(5)

به منظور تعیین گزینه های خروجی قابل چاپ برای المان به کار می رود. هم چنین KEYOPT(11)

که قابلیت ذخیره نمودن اطلاعات در بالا، وسط و پایین المان را دارد. [۳۷].

#### ۴-۶- مصالح (مدل رفتاری) مورد استفاده در شبیه سازی پانل لانه زنبوری

در این تحقیق، به منظور شبیه سازی رفتار پانل از ۱ مصالح یا مدل رفتاری استفاده شده است.

**ایزوتروپیک خطی (Linear Isotropic):** این مدل رفتاری دارای دو پارامتر مدول

الاستیسیته و ضریب پواسون است که برای شبیه سازی رفتار پانل در ابتدای بارگذاری به کار می رود.

در این مدل رفتاری می بایست، مدول الاستیسیته مماسی اولیه و ضریب پواسون وارد شود.

#### ۴-۷- نحوه مدل سازی یک پانل لانه زنبوری در ANSYS

مدل سازی یک عضو یعنی تعیین و تطبیق مشخصات عضو، اعم از رفتار مادی، مشخصات

هندسی، شرایط مرزی و نحوه بارگذاری، به گونه ای که عکس العمل رفتاری و خروجی هایی متناسب و

نزدیک به نتایج واقعی از آن حاصل شود. اطمینان از نزدیک شدن نتایج خروجی با نتایج آزمایشگاهی که با تعدیل پارامترهای قابل تنظیم در نرم‌افزار صورت می‌گیرد، تعیین صحت عملکرد یا همان کالیبراسیون نامیده می‌شود. آنچه که نقشی اساسی در این مدل‌سازی دارد، معادل‌سازی رفتار خطی عضو مورد نظر در نرم‌افزار با مدل‌های ریاضی موجود در شرایط تحلیل خطی می‌باشد.

به طور کلی برای مدل‌سازی هر عضوی در نرم‌افزار ANSYS، مراحل زیر باید مد نظر قرار گرفته و به طور مشخص تعریف گردد:

۱- ترسیم شکل هندسی عضو با توجه به ابعاد نمونه و در نظرگیری سیستم واحدی یکسان و استفاده از دستگاه مختصات محلی و کلی مناسب با توجه به هندسه عضو.

در نرم‌افزار ANSYS برای تعیین دستگاه مختصات محلی، از دستگاه مختصات کلی (اصلی) که دارای مبدا ثابتی بوده و همه چیز در یک مدل‌سازی نسبت به آن سنجیده می‌شود، استفاده می‌گردد. به طور کلی این نرم‌افزار شامل سه نوع دستگاه مختصات کلی دکارتی، استوانه‌ای و کروی می‌باشد.

۲- در نظرگیری المان‌های متناسب با رفتار عضو سازه‌ای مورد نظر و تنظیم مشخصات اصلی، در گزینه OPTION مربوط به آن المان.

۳- بیان خصوصیات و رفتار مکانیکی مواد و مصالح استفاده شده در عضو در گزینه MATERIAL PROPERTIES، که این قسمت متشکل از دو بخش می‌باشد.

الف - تعریف خصوصیات خطی المان‌ها که بر دو نوع مواد همسان‌گرد<sup>۱</sup> و غیرهمسان‌گرد<sup>۲</sup> می‌باشد. در این بخش سختی و ضرایب پواسون اولیه مواد مورد استفاده با در نظرگیری شماره‌ای منحصر به فرد برای هر ماده تعریف می‌شود. چنانچه رفتار یک ماده در تمام جهات یکسان باشد، آن

---

۱ - Isotropic

۲ - Non-Isotropic

ماده همسان‌گرد و چنان‌چه در هر جهتی دارای رفتار مادی متفاوتی باشد آن ماده غیرهمسان‌گرد نامیده می‌شود. باید دقت نمود که لغت همسان‌گرد با لغت همگن که به معنی یکسان بودن خصوصیات مادی در تمام نقاط یک ماده می‌باشد، اشتباه نشود.

ب - با در نظرگیری شماره‌ای که خصوصیات خطی آن ماده در قسمت قبل، تعیین شده است، خصوصیات رفتار خطی مادی در قسمت ELEMENT TABLE تعیین می‌گردد.

۴- با توجه به نوع المان و رفتار مادی تعریف شده قبلی، خصوصیات ویژه، برای المان‌های گوناگون، قابل تعریف می‌باشد؛ که تحت عنوان ثابت‌های حقیقی در قسمت REAL CONSTANTS مربوط به آن المان تعریف می‌گردد.

۵- تخصیص مشخصات تعریف شده قبلی، اعم از نوع المان، خصوصیات ویژه برای هر المان، نوع ماده مورد استفاده و دستگاه مختصات محلی که خصوصیات آن المان با توجه به آن در نظر گرفته شده، برای هر قسمت حجمی، سطحی یا خطی از عضو ترسیم شده. این مرحله با استفاده از قسمت DEFINE ATTRIBUTE انجام می‌گیرد.

۶- المان‌بندی اشکال ترسیم شده.

۷- اعمال بارگذاری مورد نظر بر روی عضو؛ این بارگذاری شامل تخصیص شرایط مرزی، اعم از قیود گیرداری و مفصلی گره‌ها، شرایط تقارن و پادتقارن و یا اعمال نیروهای متمرکز گره‌ای، سطحی و یا حجمی و یا تغییرمکان‌های مربوط به هر گره، می‌باشد.

۸- تعیین پارامترهای مربوط به معیار همگرایی تحلیل غیرخطی، که بیش‌تر با استفاده از معیارهای کنترل نیرو، خیز، لنگر و دوران، و با توجه به نوع بارگذاری، اعمال می‌گردند. پس از آن حداکثر تعداد تکرار تا دستیابی به معیار همگرایی تعیین شده، مشخص می‌گردد.

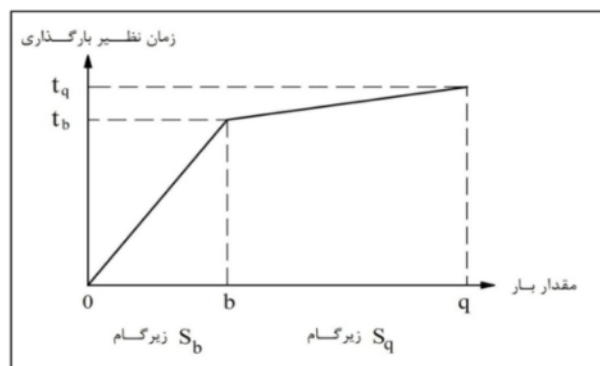
۹- به منظور در نظر گرفتن بارگذاری تدریجی یا نموی، تعداد گام‌های اعمال بار برای رسیدن به

بار حداکثر اعمال شده بر عضو، تعریف می‌گردد. به طور کلی در تحلیل غیرخطی اجزای محدود یک

مدل، قابلیت در نظرگیری روند تدریجی بارگذاری وجود دارد و در هر مرحله، روند محاسبات به صورت محدود (یکی از دلایل این محدودیت، تعیین حداکثر تعداد تکرار در مرحله قبلی می‌باشد) تا آن جایی که معیار همگرایی تعریف شده برای نرم‌افزار تأمین گردد، تکرار می‌شود.

برای این منظور در نرم‌افزار ANSYS گزینه‌ای تحت عنوان LOAD STEP به مفهوم گام بارگذاری وجود دارد که با توجه به آن می‌توان مراحل متفاوتی از روند تدریجی بارگذاری و یا باربرداری را بر یک سازه اعمال نمود. از آنجا که حل مسائل پلاستیسیته و غیرخطی تابعی از مسیر و تاریخچه بارگذاری می‌باشد، لذا قابلیت تنظیم روند تدریجی بارگذاری به مقدار مورد نیاز با توجه به زیرگام‌های هر مرحله بارگذاری تحت عنوان SUB STEP در نرم‌افزار وجود دارد.

مطابق با شکل ۴-۳ اگر مقدار کل بار مورد نظر برابر با  $q$  بوده و نیاز به تعریف دو گام بارگذاری تا مقادیر  $b$  و  $q$  با پارامتر نمادین زمان برابر با  $t_b$  و  $t_q$  به عنوان مراحل پایان بار باشد و تعداد زیرگام‌های هر مرحله از بارگذاری، برابر با  $S_b$  و  $S_q$  در نظر گرفته شده باشد، به شرط همگرا شدن روند تکراری حل در هر مرحله، ابتدا باری تدریجی از صفر تا  $b$  با گام  $b/S_b$  به مدل اعمال می‌گردد و سپس در مرحله دوم، بارگذاری با افزایش تدریجی به مقدار  $(q-b/S_q)$  تا پایان نماد زمان  $t_q$ ، به مقدار بار  $b$  قبلی اضافه می‌گردد، تا بار نهایی به  $q$  برسد. لازم به توضیح است که زمان به عنوان یک پارامتر قابل شمارش و نمادین بوده و دارای مفهوم واقعی زمان نمی‌باشد [۳۷].



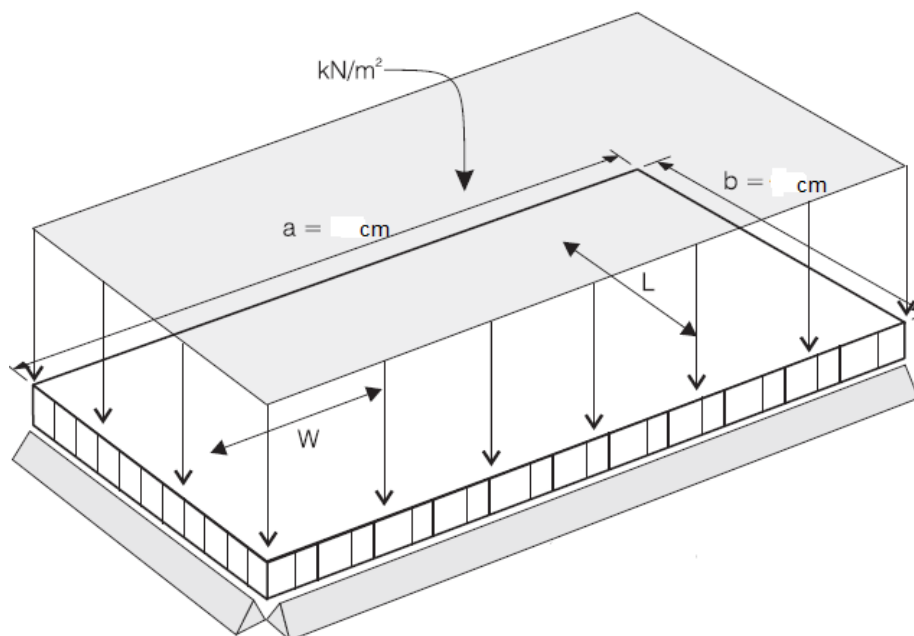
شکل ۴-۳- مراحل اعمال گام‌های بارگذاری



- ۱۰- تخصیص نوع تحلیل مورد نیاز که شامل استاتیکی، دینامیکی، گذرا و ... بوده و تنظیم پارامترهای قابل تعریف برای تحلیل اجزای محدود و اجرای تحلیل.
- ۱۱- کنترل نتایج خروجی حاصل از تحلیل در پردازشگرهای POST1 و POST26 و کالیبره نمودن نرم افزار با توجه به نتایج آزمایشگاهی موجود.

#### ۴-۸- کالیبراسیون یک پانل لانه زنبوری

- در این قسمت به مدل سازی یک پانل لانه زنبوری اقدام نموده و اعتبار آن با نتایج آزمایشگاهی شرکت hexel [۳] مقایسه می شود. مشخصات نمونه آزمایشگاهی در شکل ۴-۴ آورده شده است. پانل مورد نظر در آزمایشگاه تحت بار گسترده فشاری قرار گرفته و تغییر مکان و حداکثر تنش آن در اختیار می باشد.



شکل ۴-۴- جزئیات ابعاد و بارگذاری پانل لانه زنبوری [۳]

#### ۴-۸-۱- مشخصات مصالح پانل لانه زنبوری

آلومینیوم از نوع ۳۰۰۳ با مقاومت تسلیم ۱۱۷ مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳۳ می باشد.

این پانل دارای هسته با ارتفاع ۲۵.۴ میلیمتر و ضخامت ۰.۸ میلیمتر و اندازه سلول ۰.۶۳۵

سانتیمتر و پوسته به ضخامت ۰.۵ میلیمتر و ابعاد ۵۰ در ۵۰ سانتیمتر است.

#### ۴-۸-۲- نتایج به دست آمده از تحلیل اجزای محدود و مقایسه آن‌ها با نتایج

##### آزمایشگاهی

در جدول ۴-۱ حداکثر تنش و خیز به همراه اختلاف آن‌ها آورده شده است.

جدول ۴-۱- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و اجزای محدود

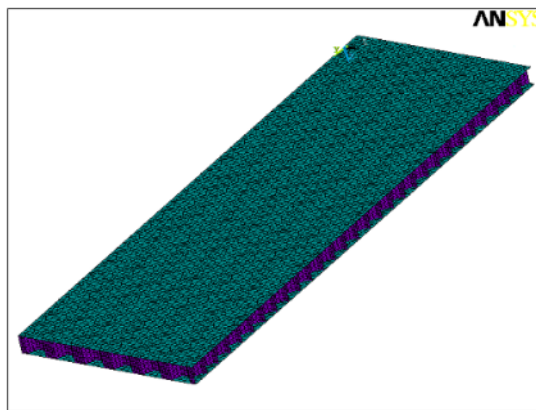
اختلاف	نتایج اجزای محدود	نتایج آزمایشگاهی	پارامترهای مورد استفاده در اعتبارسنجی
٪۲.۹۵	$۲.۴۴ \times ۱۰^{-۵}$	$۲.۳۷ \times ۱۰^{-۵}$	حداکثر خیز (متر)
٪۵.۶	$۱۰.۱۹ \times ۱۰^{+۵}$	$۹.۶۵ \times ۱۰^{+۵}$	حداکثر تنش (پاسکال)

#### ۴-۹- نکات کلی مدل سازی اجزای محدود پانل لانه زنبوری

اولین گام در مدل سازی اجزای محدود انجام ۷ مرحله اول بخش ۰ است. در شکل ۴۴-۵ مدل شبکه بندی شده پانل مشاهده می شود. ذکر نکته ذیل در رابطه با مدل سازی این پانل حائز اهمیت است.

با توجه به تقارن مسئله نسبت به دو صفحه، یک چهارم از پانل مدل سازی شده است. لازم به ذکر است که استفاده از خاصیت تقارن و مدل سازی یک چهارم مدل، در سرعت انجام تحلیل نقش به سزایی دارد؛ تا حدی که در نمونه مورد بحث، مدل سازی یک چهارم از مدل، مدت زمان انجام تحلیل را به یک ششم مدت زمان انجام تحلیل مدل کامل تقلیل داد.

همان طور که در شکل ۴-۵ مشاهده می‌شود با توجه به تقارن مدل، نسبت به دو صفحه Y-Z و X-Z یک چهارم پانل مدل سازی شده است. به این منظور قسمت سمت چپ مدل (صفحه Y-Z) در جهت افقی (در جهت محور X) و قسمت پایین مدل (صفحه X-Z) در جهت قائم (در جهت محور Y) مقید شده‌اند.



شکل ۴-۵- مدل شبکه‌بندی شده پانل با در نظرگیری تقارن نسبت به دو صفحه

#### ۴-۱۰- داده‌های ورودی اجزای محدود

##### ۴-۱۰-۱- داده‌های ورودی آلومینیوم:

مشخصات زیر برای مدل‌های رفتاری آلومینیوم در نظر گرفته شده است.

##### ۱- ایزوتروپیک خطی (Linear Isotropic):

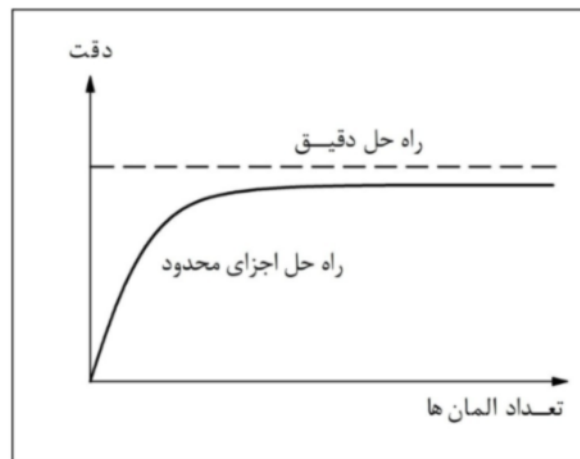
در جدول ۴-۲ مشخصات ورودی این مدل رفتاری برای آلومینیوم آورده شده است.

جدول ۴-۲- مدول الاستیسیته و ضریب پواسون آلومینیوم

مشخصات مصالح	$E_s$ (GPa)	$\nu_s$
آلومینیوم	۷۰	۰/۳۳

#### ۴-۱۱- شبکه‌بندی مدل

انتخاب تراکم شبکه، یکی از مهم‌ترین مسائل در مبحث مدل‌سازی با نرم‌افزارهای مختلف المان محدود است. زیرا یکی از پارامترهای مهم در همگرایی نتایج، انتخاب تعداد مناسب المان‌های مورد استفاده است. شکل ۴-۶ دقت نتایج با توجه به تعداد المان‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل بر می‌آید با افزایش تعداد المان‌ها، دقت تقریب در مدل اجزای محدود افزایش می‌یابد؛ اما با توجه به میل کردن شیب نمودار به سمت صفر، ریز کردن شبکه‌بندی از یک مقدار مشخص به بعد منطقی نبوده و ابعاد شبکه‌بندی می‌بایست با توجه به مسئله همگرایی و میزان دقت مورد نظر صورت گیرد.



شکل ۴-۶- تأثیر تعداد المان‌ها در دقت نتایج حاصل از اجزای محدود

توجه به این نکته حائز اهمیت است که شبکه‌بندی اجزای محدود می‌بایست تا حدی ممکن، متقارن باشد.

#### ۴-۱۲- بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی

۴-۱۲-۱- بارهای اعمال شده بدین شرح می‌باشند:

- بار گسترده برابر ۷۲۰ پاسکال

- بار متمرکز برابر ۲۷۰۰ نیوتن

- تغییر شکل مجاز نیز ۱/۱۲۰ دهانه می باشد. [۳۸].

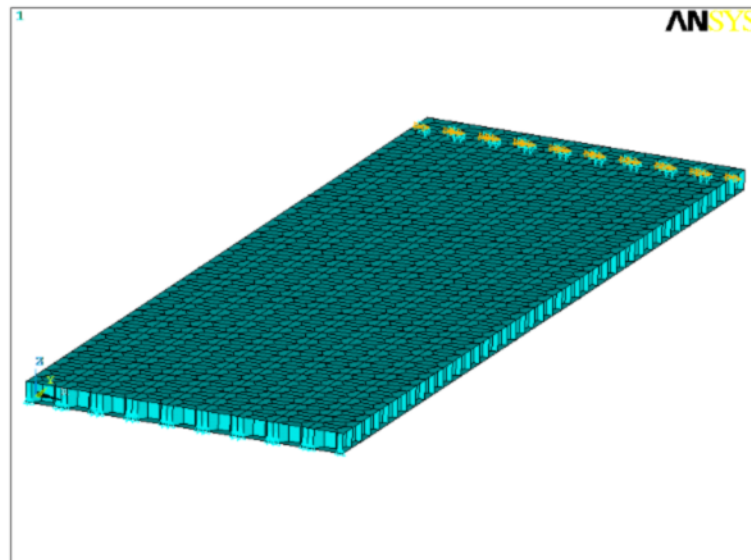
شرایط تکیه گاهی در نظر گرفته شده بصورت دو سر مفصلی می باشد.

لازم به ذکر است که در نمونه مدل شده در نرم افزار (یک چهارم پانل) از بار های ذیل استفاده

گردیده است.

- بار گسترده برابر ۷۲۰ پاسکال

- بار متمرکز برابر ۶۷۰ نیوتن



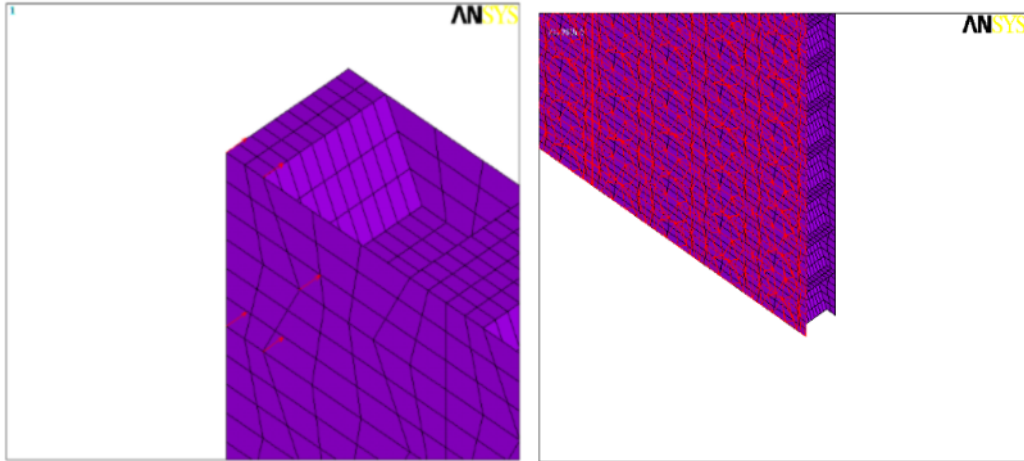
شکل ۴-۷- شرایط تکیه گاهی

با توجه به شکل ۴ - ۷ ، قسمت بالای مدل، تمامی گره های این ناحیه در درجات آزادی

(UY,ROTX,ROTY,ROTZ,UX) مقید شده اند. همچنین قسمت پایین مدل تمامی گره های

این ناحیه در درجات آزادی (UZ,UY,UX) مقید شده اند.

همچنین در شکل ۴-۸ نحوه اعمال بار متمرکز و گسترده به نمایش در آمده است.

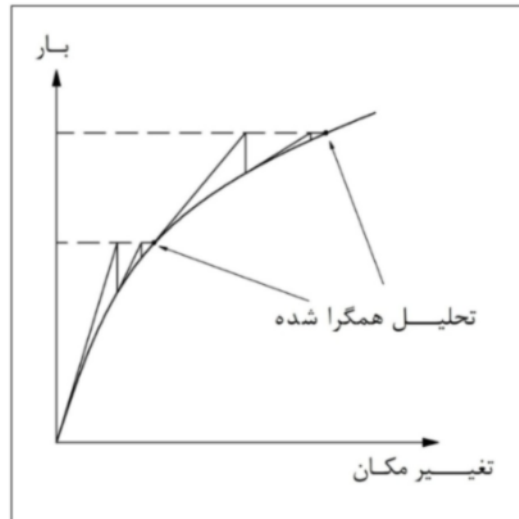


شکل ۴-۸- نحوه بارگذاری

#### ۴-۱۳- روش تحلیل

در تحلیل‌های غیرخطی، کل بار خارجی در چند قسمت کوچک تحت عنوان گام‌های بارگذاری بر سازه وارد می‌شود و اعمال هر یک از این گام‌های بارگذاری به سازه توسط زیرگام، به صورت تدریجی می‌باشد. روش‌های گوناگونی برای حل دستگاه معادلات غیرخطی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش تکراری نیوتن-رافسون اشاره کرد (شکل ۴-۹). نرم‌افزار ANSYS نیز در تحلیل‌های غیرخطی از این روش استفاده می‌نماید. در روش مذکور، تحلیل غیرخطی با مجموعه‌ای از تحلیل‌های خطی صورت می‌گیرد. نخستین تحلیل، زیر اثر بار خارجی وارد به سازه انجام می‌پذیرد. در تحلیل‌های بعدی، نیروی نامتعادل (اختلاف نیروی خارجی نخستین و نیروی داخلی کنونی) وارد تحلیل می‌گردد. هر گام تحلیل، یک گام تکراری خواهد بود. لازم است توجه شود که تغییرمکان به دست آمده در هر تکرار، با مجموع تغییرمکان تحلیل‌های پیشین جمع می‌گردد. تکرارها تا زمانی ادامه می‌یابند که نیروی نامیزان از مقدار مشخصی کمتر شود. به این میزان، مقدار خطا گویند.

تحلیل مدل مورد نظر نیز به روش تحلیل غیرخطی استاتیکی انجام شده است. در این روش نرم افزار بار را به تدریج افزایش می دهد تا جایی که سازه به مرز ناپایداری (واگرایی مسئله) می رسد.

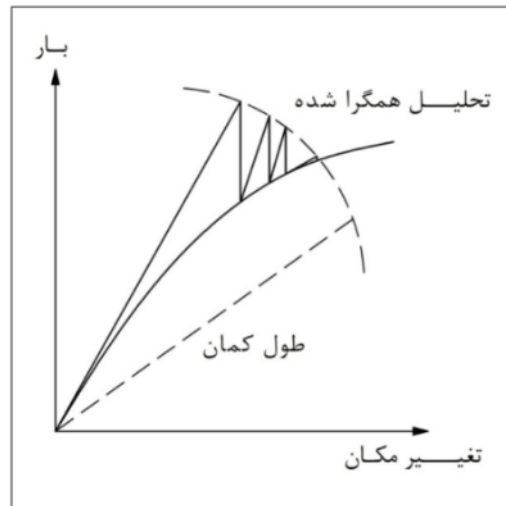


شکل ۴ - ۹ - روش تکرار نیوتن-رافسون [۳۷]

در این حالت فعال کردن الگوریتم گام زمانی خودکار (Automatic Time Stepping) و دو نیمه سازی در حل، توصیه می شود. الگوریتم گام اتوماتیک زمانی به طور خودکار به دنبال بار می گردد، در صورتی که بار خطی در تحلیل استاتیکی غیرخطی اعمال شده باشد، و این الگوریتم نیز فعال باشد، هنگام حل مسئله در صورتی که همگرایی در نقطه ای از بارگذاری ارضاء نشود، الگوریتم به طور خودکار نمو بارگذاری تعیین شده را نصف کرده و حل را دوباره ادامه می دهد؛ تا جایی که با اعمال کوچک ترین نمو در بار، همگرایی ایجاد نشود. هم چنین استفاده از قابلیت " جستجوی خط " (Line Search) در همگرایی تحلیل غیرخطی نقش به سزایی دارد.

توجه به این نکته حائز اهمیت است که اگر شیب منحنی بار-تغییر مکان صفر و در حالت بحرانی منفی شود، ادامه فرایند تحلیل سخت و یا در بعضی مواقع غیرممکن می شود و با افزایش

انحراف (تلرانس) معیارهای همگرایی و یا حتی حذف معیار همگرایی نیرو، ادامه تحلیل غیرممکن می‌شود. در این مواقع استفاده از گزینه " طول منحنی " (Arc Length) بسیار کارآمد است. [۳۹].



شکل ۴-۱۰- رفتار همگرایی طول کمان [۳۷]

در حل عددی مسائل غیرخطی باید به موارد زیر توجه شود.

۱- المان‌بندی مدل با دقت انجام شود، المان‌های با اخطارهای مربوط به شکل (دقت) المان، می‌تواند منجر به واگرایی در یک مسئله غیرخطی شود. اخطارهای مربوط به شکل المان می‌تواند مربوط به شکل آن و یا زوایای آن باشد. به عنوان مثال دقت بعضی از المان‌ها در شبکه‌بندی ۵ وجهی و بعضی دیگر نسبت به وجود زوایای تیز گوشه کاهش می‌یابد.

۲- تعداد نمونه‌های بار متناسب با شرایط مسئله، به اندازه کافی انتخاب شود.

۳- انحرافها (تلرانسها)، نوع المان انتخاب شده، و مبنای همگرایی نیز در برخی موارد می‌تواند عاملی در همگرا شدن یا نشدن یک مسئله غیرخطی باشد.



برای تحلیل، دو معیار همگرایی نیرو و تغییرمکان مورد استفاده قرار گرفت. حدود انحراف (تلرانس) همگرایی، همان مقادیر پیش‌فرض ANSYS یعنی، برای تغییرمکان، ۰/۰۵ و برای نیرو، ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شد. باید به این نکته توجه شود که همگرایی معیار نیرو به مراتب مشکل‌تر از همگرایی معیار تغییرمکان است.

#### ۴-۱۴- زبان پارامتری ANSYS و ساخت ماکرو

زبان طراحی پارامتری نرم‌افزار یا همان APDL<sup>۱</sup> به خصوص در ساخت ماکرو<sup>۲</sup> در حل مسائلی نظیر مسائل بهینه‌سازی طراحی، بهینه‌سازی مش، بهینه‌سازی توپولوژی و کارکرد با پارامترها در طول یک مسئله کاربرد دارد. این قابلیت با کاربرد آن در ساخت ماکرو به نوعی محیط نیمه فعالی از یک محیط برنامه‌نویسی را می‌تواند ایجاد کند. [۳۶]

از جمله قابلیت‌های این زبان می‌توان به محاسبات ریاضی به کمک دستورات موجود، تولید دستورات شرطی و حلقه‌های تکرار اشاره کرد.

استفاده از رابط گرافیکی کاربر یا GUI<sup>۳</sup> اگر چه در مدل‌سازی راحت‌تر از برنامه‌نویسی به زبان APDL به نظر می‌رسد، اما با توجه به موارد زیر، استفاده از آن گریز ناپذیر به نظر می‌رسد.

۱- در بسیاری موارد کاربر نیاز به ایجاد مدل‌های متعددی از یک نمونه را دارد. به عنوان مثال در تحقیق حاضر مدل‌های شبیه‌سازی شده ممکن است در ضخامت پوسته و هسته، اندازه سلول و ضخامت پانل متفاوت باشند؛ در این حالت با استفاده از زبان برنامه‌نویسی به راحتی می‌توان با تغییر چند عدد تغییرات لازم را در مدل ایجاد کرد. حتی می‌توان برنامه نوشته شده را پارامتری نموده، تا در هنگام اجرای برنامه مقدار هر متغیر را وارد نمود. با پارامتری نمودن برنامه و استفاده از متغیرهای

---

۱ – ANSYS Parametric Design Language

۲ – Macro

۳ – Graphical User Interface

ماتریسی می‌توان گام‌های بارگذاری را وارد کرده و به اجرای تحلیل هر گام بارگذاری به طور خودکار اقدام کرد.

۲- روند ایجاد، خواص و شرایط مدل، در مدل‌های حاصل از رابط گرافیکی مشکل بوده و حتی پیگیری بعضی از مراحل ایجاد مدل غیرممکن است؛ در حالی که تمامی مراحل ایجاد مدل در زبان برنامه‌نویسی خط‌به‌خط قابل پیگیری است.

۳- با استفاده از زبان برنامه‌نویسی ANSYS یا همان APDL، به راحتی می‌توان تغییرات دلخواه را در مدل ایجاد کرد؛ در حالی که در مدل‌های ایجاد شده توسط رابط گرافیکی این کار مشکل و حتی ممکن است با خطا ممکن باشد.

۴- حجم فایل‌های ایجاد شده توسط برنامه‌نویسی بسیار کمتر از رابط گرافیکی است؛ از این رو انتقال فایل‌های آن به راحتی امکان‌پذیر است.

فصل پنجم

# تحلیل اجزای محدود پانل لانه زنبوری

(توسط نرم افزار ANSYS)

## ۵-۱- بررسی پانل لانه زنبوری

### ۵-۱-۱- مقدمه

در این فصل با مقایسه پانل های مختلف در ابعاد هسته ، ضخامت هسته و پوسته و بارگذاری گسترده و متمرکز نسبت به حداکثر خیز ، حداکثر تنش و کرنش فون میسر رفتار پانل لانه زنبوری مورد بررسی قرار می گیرد.

همانطور که در فصل قبل نیز ذکر گردید ابعاد سازه ۱ متر در ۳ متر است که در هنگام مدل نمودن در نرم افزار با توجه به تقارن شکل و بار و صرفه جویی در وقت ۰.۵ متر در ۱.۵ متر نمونه مدل گردید ، بار گسترده برابر ۷۲۰ پاسکال و بار متمرکز برابر ۶۷۰ نیوتن در نظر گرفته شد.

### ۵-۱-۲- نمونه ها

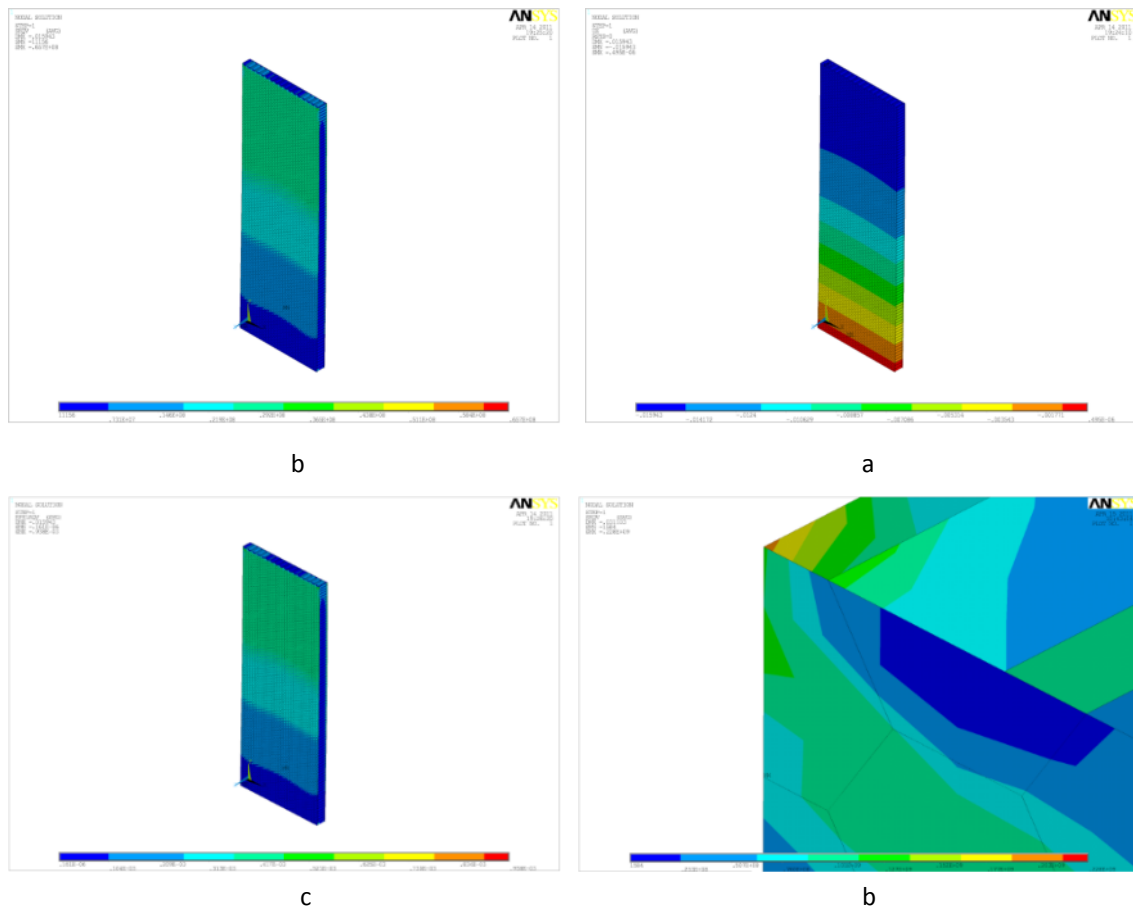
در این تحقیق ۲۰ نمونه بررسی شده است که شناسه مدل های اجزای محدود جدول ۵ - ۱ آمده است. سیستم واحد مورد استفاده در این بررسی، نیوتن- میلی متر است.

جدول ۵-۲- شناسه مدل های اجزای محدود نمونه ها (ابعاد بر حسب میلی متر)

ارتفاع پانل	ضخامت هسته	ضخامت پوسته	شعاع سلول هسته	شناسه نمونه ها
متغیر	۰.۲۵	۰.۵	۳۰	P-1
متغیر	۰.۲۵	۰.۵	۲۰	P-2
متغیر	۰.۲۵	۰.۵	۱۰	P-3
۲۵	۰.۲۵	متغیر	۳۰	P-4
۲۵	متغیر	۰.۵	۳۰	P-5

### ۵-۱-۳- مکانیزم خرابی نمونه ها

در شکل ۵ - ۱ مدل اجزای محدود پانل آورده شده است. همانگونه که مشاهده می شود حداکثر خیز در وسط پانل و حداکثر تنش و کرنش فون میسر در وسط پانل در محل اتصال هسته و رویه رخ داده است.

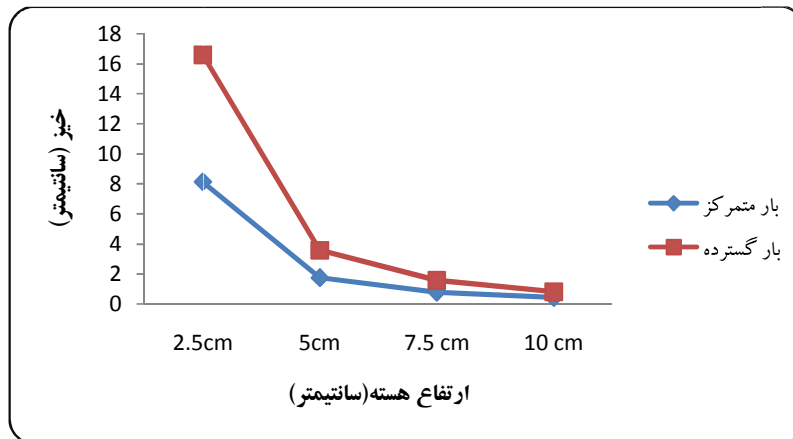


شکل ۵-۱- کانتور اجزای محدود (a خیز در جهت عمود (b تنش فون میسز (c کرنش فون میسز

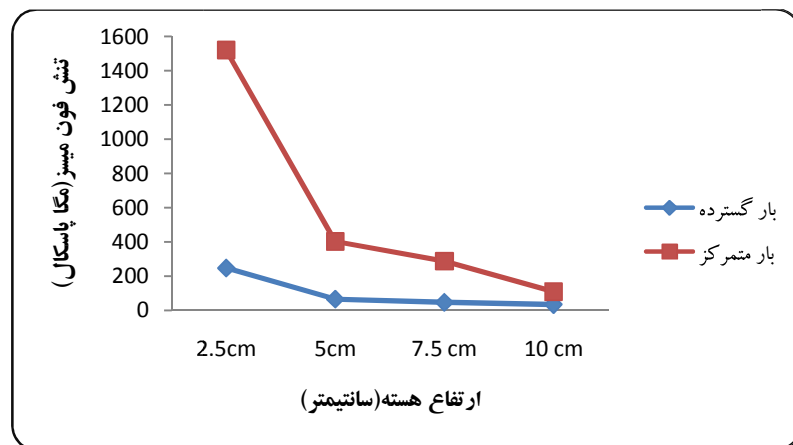
#### ۵-۱-۴- نتایج تحلیل اجزای محدود و بررسی آن

در ابتدا پانل با شعاع های هسته ۳ ، ۲ و ۱ سانتیمتری تحت بارهای گسترده و متمرکز مورد تحلیل قرار گرفت همانگونه که در شکل‌های ۵-۲ الی ۵-۱۳ مشاهده می گردد در پانل به شعاع‌های فوق و ضخامت پوسته ۰.۵ و ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر و ارتفاع هسته با ابعاد ۲.۵ ، ۵ و ۷.۵ و ۱۰ سانتیمتر با افزایش ارتفاع هسته ، حداکثر خیز ، حداکثر تنش و کرنش فون میسز کاهش می یابند که علت این امر نیز افزایش سختی سازه با توجه به افزایش ارتفاع سازه می باشد که در نتیجه این افزایش سختی سبب کاهش در حداکثر خیز ، حداکثر تنش و کرنش فون میسز می گردد.

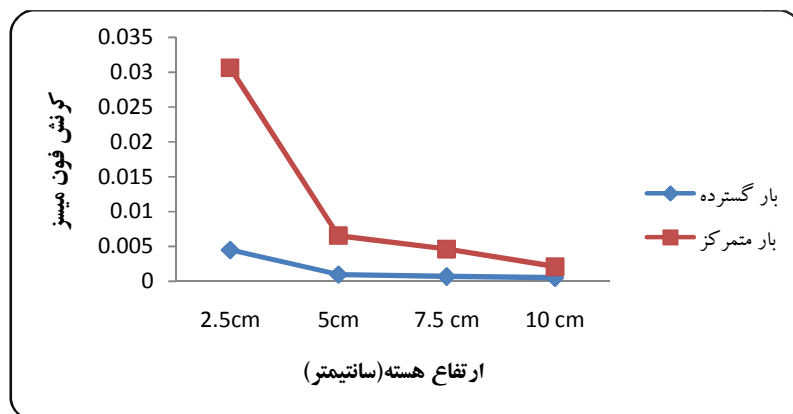
پیرامون شرایط تکیه گاهی و بارگذاری در فصل ۴ بخش ۱۲ بررسی صورت پذیرفته است.



شکل ۲-۵- منحنی‌های حداکثر خیز نمونه P-1



شکل ۳-۵- منحنی‌های حداکثر تنش فون میسر نمونه P-1



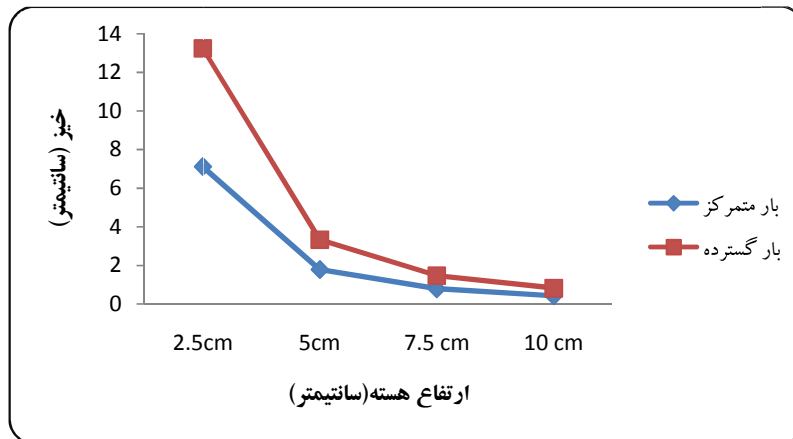
شکل ۴-۵- منحنی‌های حداکثر کرنش فون میسر نمونه P-1

همانگونه که در شکل ۵-۲ مشاهده می شود در پانل لانه زنبوری با شعاع هسته ۳ سانتیمتر ، ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر با افزایش ارتفاع هسته لانه زنبوری مقدار خیز کاهش می یابد. مطابق شکل ۵-۱ حداکثر خیز در وسط پانل رخ میدهد. از آنجا که خیز عمود بر پانل رابطه معکوس با ارتفاع هسته لانه زنبوری و در نهایت ارتفاع پانل دارد در ارتفاع ۲.۵ سانتیمتر ، بیشترین خیز و در ارتفاع ۱۰ سانتیمتری حداقل خیز مشاهده می گردد.

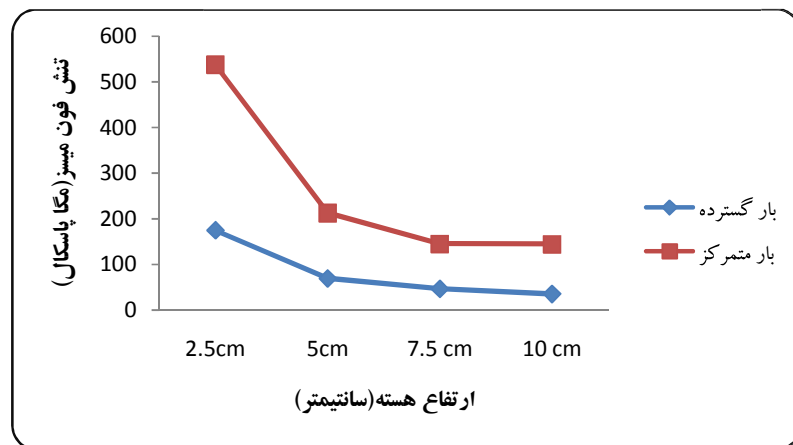
با توجه به شکل ۵-۳ در پانل با شعاع هسته ۳ سانتیمتر ، ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر با افزایش ارتفاع هسته لانه زنبوری مقدار حداکثر تنش فون میسر کاهش می یابد. از آنجا که حداکثر تنش فون میسر پانل رابطه معکوس با ارتفاع هسته لانه زنبوری و در نهایت ارتفاع پانل دارد در ارتفاع ۲.۵ سانتیمتر، بیشترین تنش و در ارتفاع ۱۰ سانتیمتری حداقل تنش مشاهده می گردد. مطابق شکل ۵-۱ حداکثر تنش فون میسر در وسط پانل در محل اتصال پوسته به هسته اتفاق می افتد .

در شکل ۵-۴ در پانل با شعاع هسته ۳ سانتیمتر ، ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر با افزایش ارتفاع هسته لانه زنبوری مقدار حداکثر کرنش فون میسر کاهش می یابد. از آنجا که حداکثر کرنش فون میسر پانل رابطه معکوس با ارتفاع هسته لانه زنبوری و در نهایت ارتفاع پانل دارد در ارتفاع ۲.۵ سانتیمتر، بیشترین کرنش و در ارتفاع ۱۰ سانتیمتری حداقل کرنش مشاهده می گردد. مطابق شکل ۵-۱ حداکثر کرنش فون میسر در وسط پانل رخ می دهد.

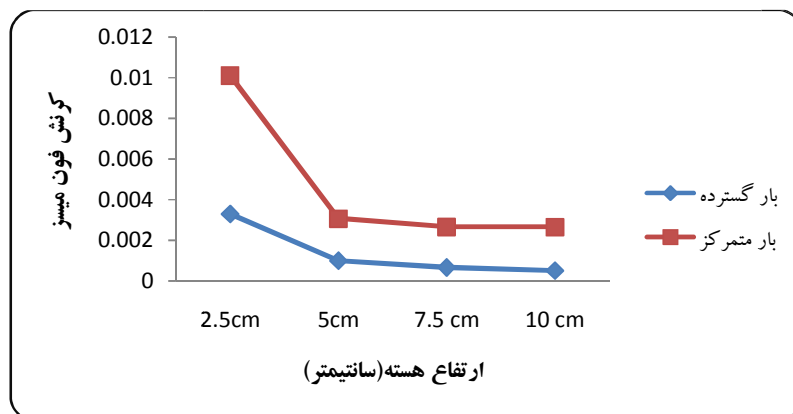
در نهایت میتوان نتیجه گرفت با افزایش ارتفاع هسته و ارتفاع پانل که افزایش سختی را در پی دارد می بایست شاهد کاهش در حداکثر خیز ، حداکثر تنش و کرنش فون میسر بود.



شکل ۵-۵- منحنی‌های حداکثر خیز نمونه P-2



شکل ۶-۵- منحنی‌های حداکثر تنش فون میسر نمونه P-2



شکل ۷-۵- منحنی‌های حداکثر کرنش فون میسر نمونه P-2

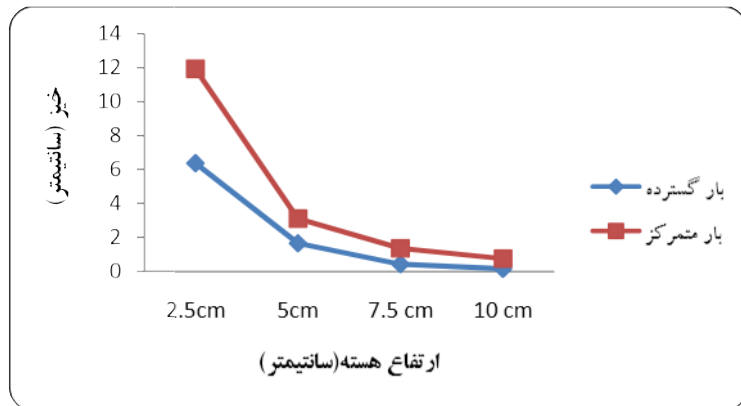


همانگونه که در شکل ۵-۵ مشاهده می شود در پانل لانه زنبوری با شعاع هسته ۲ سانتیمتر ، ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر با افزایش ارتفاع هسته لانه زنبوری مقدار خیز کاهش می یابد. مطابق شکل ۵-۱ حداکثر خیز در وسط پانل رخ میدهد. از آنجا که خیز عمود بر پانل رابطه معکوس با ارتفاع هسته لانه زنبوری و در نهایت ارتفاع پانل دارد در ارتفاع ۲.۵ سانتیمتر ، بیشترین خیز و در ارتفاع ۱۰ سانتیمتری حداقل خیز مشاهده می گردد.

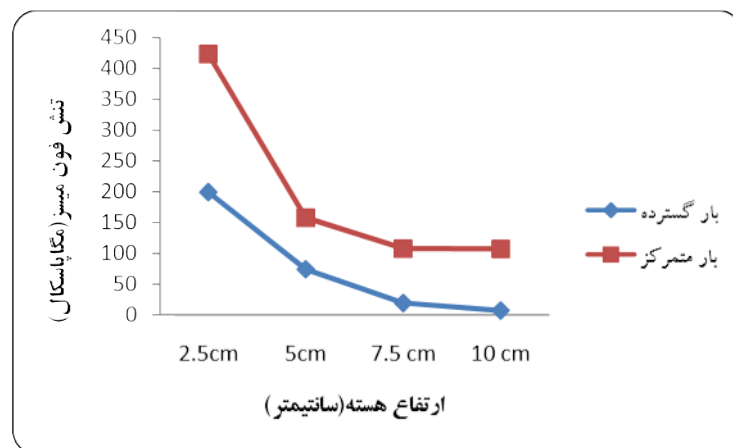
با توجه به شکل ۵-۶ در پانل با شعاع هسته ۲ سانتیمتر ، ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر با افزایش ارتفاع هسته لانه زنبوری مقدار حداکثر تنش فون میسر کاهش می یابد. از آنجا که حداکثر تنش فون میسر پانل رابطه معکوس با ارتفاع هسته لانه زنبوری و در نهایت ارتفاع پانل دارد در ارتفاع ۲.۵ سانتیمتر، بیشترین تنش و در ارتفاع ۱۰ سانتیمتری حداقل تنش مشاهده می گردد. مطابق شکل ۵-۱ حداکثر تنش فون میسر در وسط پانل در محل اتصال پوسته به هسته اتفاق می افتد .

در شکل ۵-۷ در پانل با شعاع هسته ۲ سانتیمتر ، ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر با افزایش ارتفاع هسته لانه زنبوری مقدار حداکثر کرنش فون میسر کاهش می یابد. از آنجا که حداکثر کرنش فون میسر پانل رابطه معکوس با ارتفاع هسته لانه زنبوری و در نهایت ارتفاع پانل دارد در ارتفاع ۲.۵ سانتیمتر، بیشترین کرنش و در ارتفاع ۱۰ سانتیمتری حداقل کرنش مشاهده می گردد. مطابق شکل ۵-۱ حداکثر کرنش فون میسر در وسط پانل رخ می دهد.

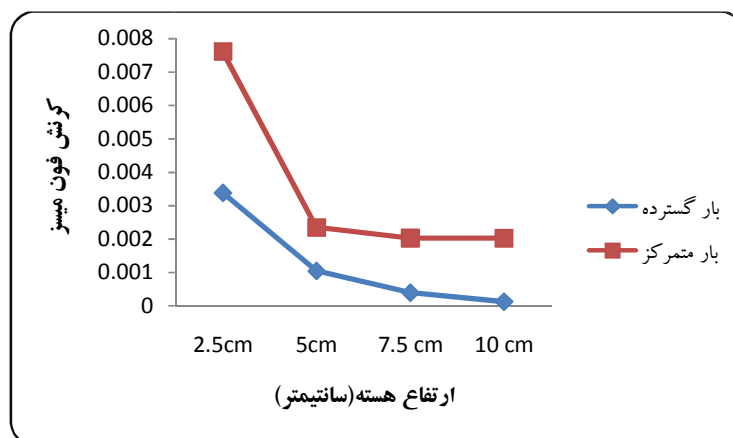
در نهایت میتوان نتیجه گرفت با افزایش ارتفاع هسته و ارتفاع پانل که افزایش سختی را در پی دارد می بایست شاهد کاهش در حداکثر خیز ، حداکثر تنش و کرنش فون میسر بود.



شکل ۵-۸- منحنی‌های حداکثر خیز نمونه P-3



شکل ۵-۹- منحنی‌های حداکثر تنش فون میسز نمونه P-3



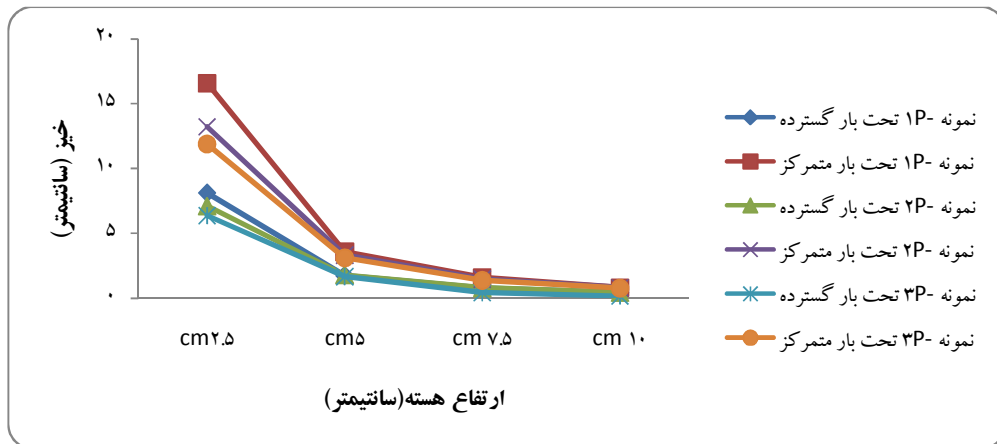
شکل ۵-۱۰- منحنی‌های حداکثر کرنش فون میسز نمونه P-3

همانگونه که در شکل ۵-۸ مشاهده می شود در پانل لانه زنبوری با شعاع هسته ۱ سانتیمتر ، ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر با افزایش ارتفاع هسته لانه زنبوری مقدار خیز کاهش می یابد. مطابق شکل ۵-۱ حداکثر خیز در وسط پانل رخ میدهد. از آنجا که خیز عمود بر پانل رابطه معکوس با ارتفاع هسته لانه زنبوری و در نهایت ارتفاع پانل دارد در ارتفاع ۲.۵ سانتیمتر ، بیشترین خیز و در ارتفاع ۱۰ سانتیمتری حداقل خیز مشاهده می گردد.

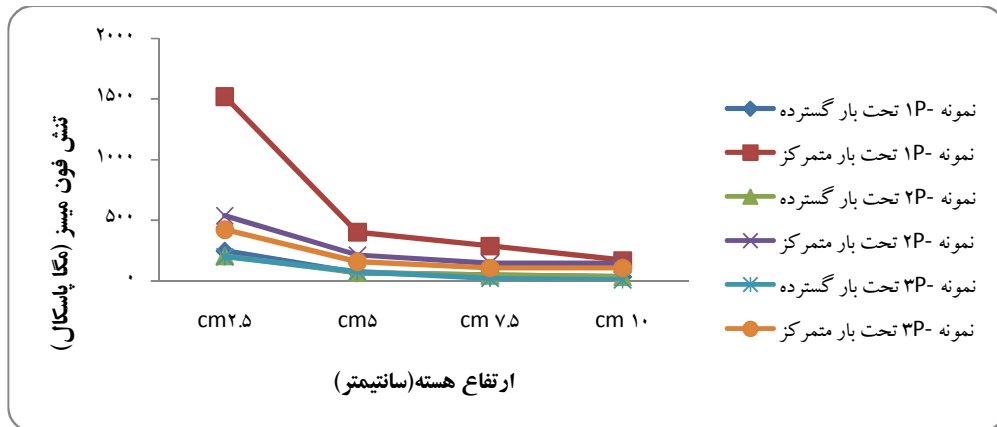
با توجه به شکل ۵-۹ در پانل با شعاع هسته ۱ سانتیمتر ، ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر با افزایش ارتفاع هسته لانه زنبوری مقدار حداکثر تنش فون میسر کاهش می یابد. از آنجا که حداکثر تنش فون میسر پانل رابطه معکوس با ارتفاع هسته لانه زنبوری و در نهایت ارتفاع پانل دارد در ارتفاع ۲.۵ سانتیمتر، بیشترین تنش و در ارتفاع ۱۰ سانتیمتری حداقل تنش مشاهده می گردد. مطابق شکل ۵-۱ حداکثر تنش فون میسر در وسط پانل در محل اتصال پوسته به هسته اتفاق می افتد .

در شکل ۵-۱۰ در پانل با شعاع هسته ۱ سانتیمتر ، ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر با افزایش ارتفاع هسته لانه زنبوری مقدار حداکثر کرنش فون میسر کاهش می یابد. از آنجا که حداکثر کرنش فون میسر پانل رابطه معکوس با ارتفاع هسته لانه زنبوری و در نهایت ارتفاع پانل دارد در ارتفاع ۲.۵ سانتیمتر، بیشترین کرنش و در ارتفاع ۱۰ سانتیمتری حداقل کرنش مشاهده می گردد. مطابق شکل ۵-۱ حداکثر کرنش فون میسر در وسط پانل رخ می دهد.

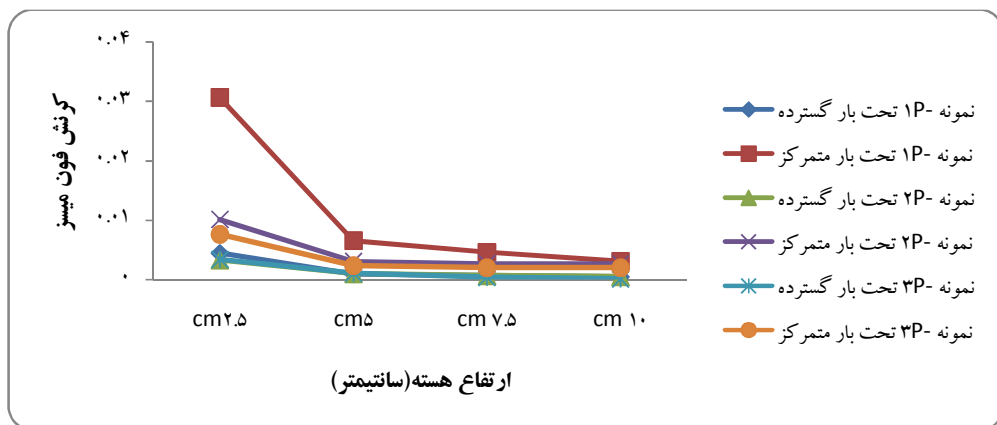
در نهایت میتوان نتیجه گرفت با افزایش ارتفاع هسته و ارتفاع پانل که افزایش سختی را در پی دارد می بایست شاهد کاهش در حداکثر خیز ، حداکثر تنش و کرنش فون میسر بود.



شکل ۱۱-۵- منحنی‌های حداکثر خیز نمونه های P-1, P-2, P-3



شکل ۱۲-۵- منحنی‌های حداکثر تنش فون میسر نمونه های P-1, P-2, P-3



شکل ۱۳-۵- منحنی‌های حداکثر گرنش فون میسر نمونه های P-1, P-2, P-3

همانگونه که در شکل ۵-۱۱ مشاهده می شود در پانل لانه زنبوری با شعاع های هسته ۳، ۲ و ۱ سانتیمتر ، ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر با افزایش ارتفاع هسته لانه زنبوری مقدار خیز کاهش می یابد. از آنجا که خیز عمود بر پانل رابطه معکوس با ارتفاع هسته لانه زنبوری و در نهایت ارتفاع پانل دارد در ارتفاع ۲.۵ سانتیمتر ، بیشترین خیز و در ارتفاع ۱۰ سانتیمتری حداقل خیز مشاهده می گردد و با افزایش شعاع هسته مقدار خیز افزایش خواهد یافت. بصورتیکه در شعاع ۳ سانتیمتر ، بیشترین خیز و در شعاع ۱ سانتیمتری حداقل خیز مشاهده می گردد.

با توجه به شکل ۵-۱۲ در پانل با شعاع های هسته ۳، ۲ و ۱ سانتیمتر ، ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر با افزایش ارتفاع هسته لانه زنبوری مقدار حداکثر تنش فون میسر کاهش می یابد. از آنجا که حداکثر تنش فون میسر پانل رابطه معکوس با ارتفاع هسته لانه زنبوری و در نهایت ارتفاع پانل دارد در ارتفاع ۲.۵ سانتیمتر، بیشترین تنش و در ارتفاع ۱۰ سانتیمتری حداقل تنش مشاهده می گردد و با افزایش شعاع هسته مقدار تنش فون میسر افزایش خواهد یافت. بصورتیکه در شعاع ۳ سانتیمتر ، بیشترین تنش فون میسر و در شعاع ۱ سانتیمتری حداقل تنش فون میسر مشاهده می گردد.

در شکل ۵-۱۳ در پانل با شعاع های هسته ۳، ۲ و ۱ سانتیمتر ، ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر با افزایش ارتفاع هسته لانه زنبوری مقدار حداکثر کرنش فون میسر کاهش می یابد. از آنجا که حداکثر کرنش فون میسر پانل رابطه معکوس با ارتفاع هسته لانه زنبوری و در نهایت ارتفاع پانل دارد در ارتفاع ۲.۵ سانتیمتر، بیشترین کرنش و در ارتفاع ۱۰ سانتیمتری حداقل کرنش مشاهده می گردد و با افزایش شعاع هسته مقدار کرنش فون میسر افزایش خواهد یافت. بصورتیکه در شعاع ۳ سانتیمتر ، بیشترین کرنش فون میسر و در شعاع ۱ سانتیمتری حداقل کرنش فون میسر مشاهده می گردد.

همانگونه از شکل‌های ۲-۵ الی ۵-۱۳ مشاهده می‌گردد نمودار های ارائه شده از نوع توانی

$y = a x^b$  می‌باشند و متغیرهای  $a$  و  $b$  بشرح ذیل محدود می‌گردند:

$$74.08 < a < 118.2$$

حداکثر خیز : (تحت بار متمرکز)

$$-2.15 < b < -1.98$$

$$45.57 < a < 83.89$$

حداکثر خیز : (تحت بار گسترده)

$$-2.63 < b < -2.01$$

$$986.7 < a < 580.9$$

حداکثر تنش فون میسز : (تحت بار متمرکز)

$$-1.54 < b < -0.99$$

$$617.1 < a < 2191$$

حداکثر تنش فون میسز : (تحت بار گسترده)

$$-2.37 < b < -1.42$$

$$0.015 < a < 0.121$$

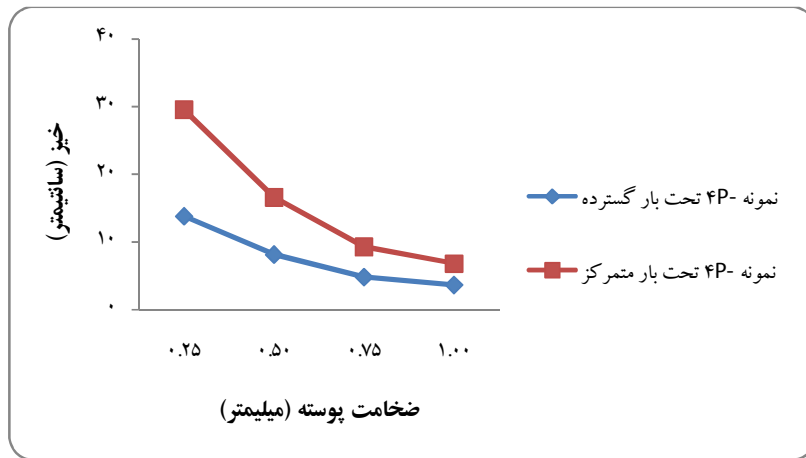
حداکثر کرنش فون میسز : (تحت بار متمرکز)

$$-1.64 < b < -0.98$$

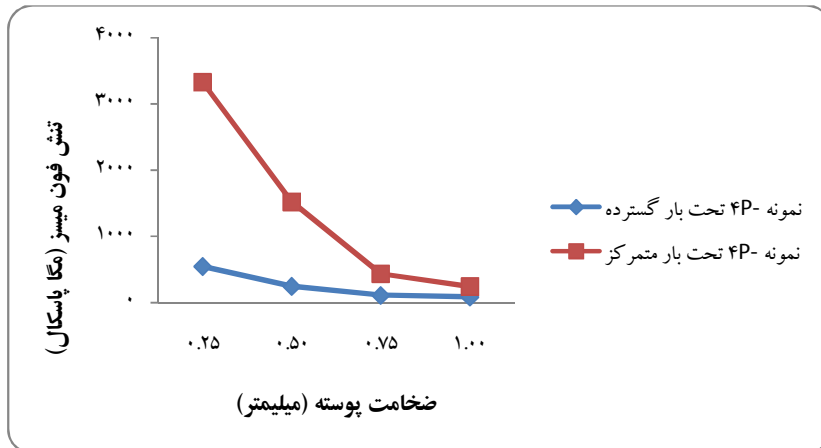
$$0.010 < a < 0.033$$

حداکثر کرنش فون میسز : (تحت بار گسترده)

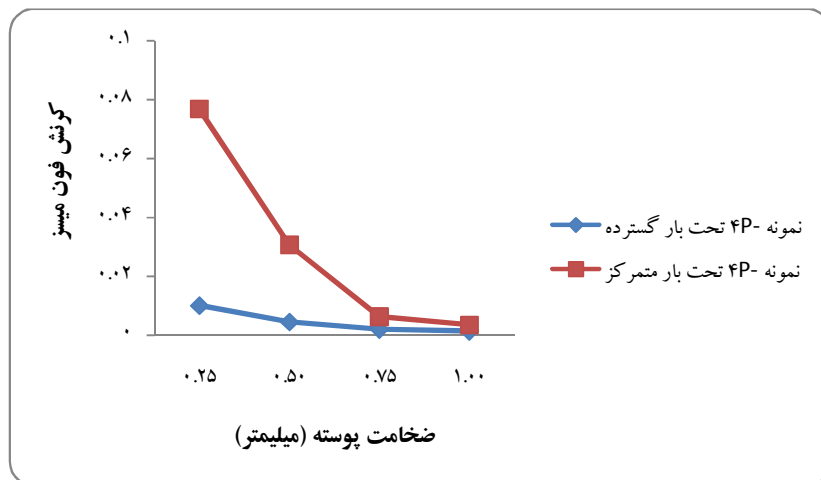
$$-2.32 < b < -1.36$$



شکل ۵-۱۴ - منحنی‌های حداکثر خیز نمونه P-4



شکل ۵-۱۵ - منحنی‌های حداکثر تنش فون میسر نمونه P-4



شکل ۵-۱۶ - منحنی‌های حداکثر کرنش فون میسر نمونه P-4

همانگونه که در شکل ۵-۱۴ مشاهده می شود در پانل لانه زنبوری با شعاع هسته ۳ سانتیمتر ، ارتفاع هسته ۲.۵ سانتیمتر و ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر ، با افزایش ضخامت پوسته مقدار خیز کاهش می یابد. از آنجا که خیز رابطه معکوس با ضخامت پوسته دارد ، در ضخامت ۰.۲۵ میلیمتر ، بیشترین خیز و در ضخامت ۱ میلیمتری حداقل خیز مشاهده می گردد.

با توجه به شکل ۵-۱۵ و ۵-۱۶ در پانل لانه زنبوری مشابه شرایط فوق، با افزایش ضخامت پوسته مقدار حداکثر تنش و کرنش فون میسر کاهش می یابد. از آنجا که حداکثر و کرنش فون میسر پانل رابطه معکوس با ضخامت پوسته دارد در ضخامت ۰.۲۵ میلیمتر ، بیشترین کرنش و تنش فون میسر و در ضخامت ۱ میلیمتری حداقل کرنش و تنش فون میسر مشاهده می گردد.

در نهایت میتوان نتیجه گرفت با افزایش ضخامت پوسته و در نهایت ارتفاع پانل که افزایش سختی پانل لانه زنبوری را در پی دارد، می بایست شاهد کاهش در حداکثر خیز ، حداکثر تنش و کرنش فون میسر بود.

همانگونه که از شکلهای ۵-۱۴ الی ۵-۱۶ مشاهده می گردد نمودار های ارائه شده از نوع چند جمله ای بوده و بشرح ذیل می باشند:

$$y=41.83 x^2-82.45 x + 47.47 \quad \text{حداکثر خیز : (تحت بار متمرکز)}$$

$$y=18.02 x^2-36.08 x + 21.68 \quad \text{حداکثر خیز : (تحت بار گسترده)}$$

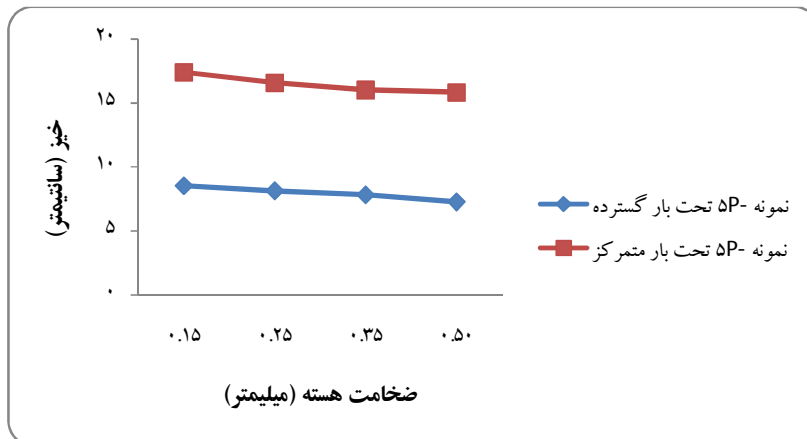
$$y=6465 x^2-12223 x + 5989 \quad \text{حداکثر تنش فون میسر : (تحت بار متمرکز)}$$

$$y=1097 x^2-1977 x + 969.2 \quad \text{حداکثر تنش فون میسر : (تحت بار گسترده)}$$

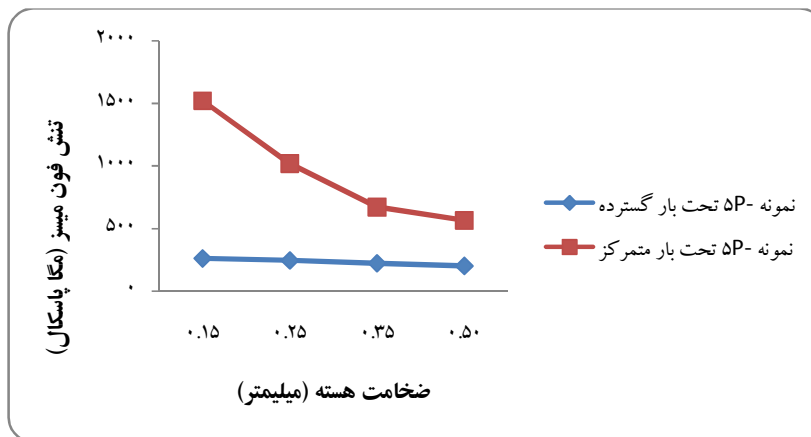
$$y=0.173 x^2-0.314 x + 0.144 \quad \text{حداکثر کرنش فون میسر : (تحت بار متمرکز)}$$

$$y=0.019 x^2-0.036 x + 0.017 \quad \text{حداکثر کرنش فون میسر : (تحت بار گسترده)}$$

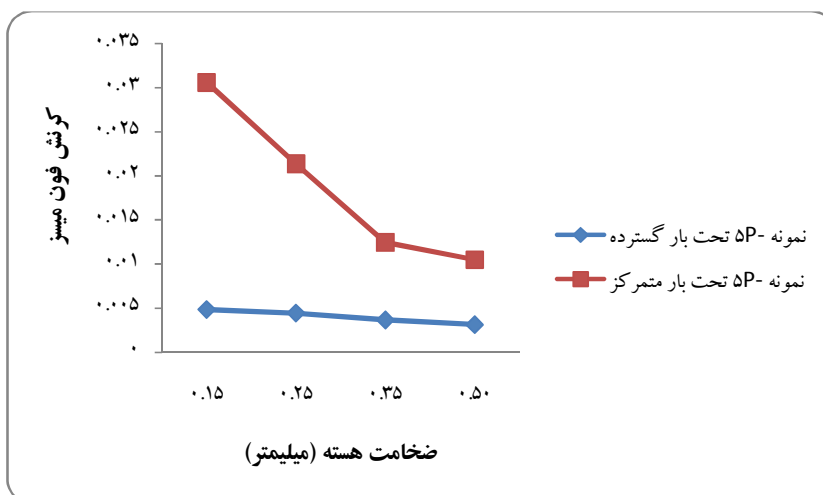




شکل ۵-۱۷- منحنی‌های حداکثر خیز نمونه P-5



شکل ۵-۱۸- منحنی‌های حداکثر تنش فون میسر نمونه P-5



شکل ۵-۱۹- منحنی‌های حداکثر کرنش فون میسر نمونه P-5

همانگونه که در شکل ۵-۱۷ مشاهده می شود در پانل لانه زنبوری با شعاع هسته ۳ سانتیمتر ، ارتفاع هسته ۲.۵ سانتیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر ، با افزایش ضخامت هسته ، مقدار خیز کاهش می یابد. از آنجا که خیز عمود بر پانل رابطه معکوس با ضخامت هسته دارد ، در ضخامت ۰.۱۵ میلیمتر ، بیشترین خیز و در ضخامت ۰.۵ میلیمتری حداقل خیز مشاهده می گردد.

با توجه به شکل ۵-۱۸ و ۵-۱۹ در پانل لانه زنبوری مشابه شرایط فوق ، با افزایش ضخامت هسته ، مقدار حداکثر تنش و کرنش فون میسر کاهش می یابد. از آنجا که حداکثر و کرنش تنش فون میسر پانل رابطه معکوس با ضخامت هسته دارد در ضخامت ۰.۱۵ میلیمتر ، بیشترین تنش و کرنش فون میسر و در ضخامت ۰.۵ میلیمتری حداقل تنش و کرنش فون میسر مشاهده می گردد.

در نهایت میتوان نتیجه گرفت با افزایش ضخامت هسته که افزایش سختی پانل لانه زنبوری را در پی دارد، می بایست شاهد کاهش در حداکثر خیز ، حداکثر تنش و کرنش فون میسر بود.

همانگونه که از شکلهای ۵-۱۴ الی ۵-۱۶ مشاهده می گردد نمودار های ارائه شده از نوع چند

جمله ای بوده و بشرح ذیل می باشند:

$$y=15.56 x^2-16.41 x + 19.24 \quad \text{حداکثر خیز : (تحت بار متمرکز)}$$

$$y=0.535 x^2-3.93 x + 91 \quad \text{حداکثر خیز : (تحت بار گسترده)}$$

$$y=-98.68 x^2-814.5 x + 2241 \quad \text{حداکثر تنش فون میسر : (تحت بار متمرکز)}$$

$$y=-1.56 x^2-12.72 x + 276.9 \quad \text{حداکثر تنش فون میسر : (تحت بار گسترده)}$$

$$y=0.001 x^2-0.016 x + 0.045 \quad \text{حداکثر کرنش فون میسر : (تحت بار متمرکز)}$$

$$y=-3*10^{-5} x^2- 0.005 \quad \text{حداکثر کرنش فون میسر : (تحت بار گسترده)}$$

جدول ۵-۲- مقایسه پانل P-1 و P-2 و P-3 تحت بار گسترده

نمونه	ارتفاع هسته (سانتیمتر)	۲.۵	۵	۷.۵	۱۰
P-1	نسبت حداکثر خیز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۵۰.۸۰	۱۱	۴.۸۸	۲.۷۳
	نسبت حداکثر تنش میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۳۴.۳۲	۹.۰۷	۶.۴۷	۴.۷۱
	نسبت حداکثر کرنش فون میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۳۷.۵۰	۷.۹۹	۵.۶۳	۴.۱۰
	نسبت وزن به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۰.۵۲	۰.۵۷	۰.۶۱	۰.۶۶
P-2	نسبت حداکثر خیز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۴۴.۴۲	۱۱.۱۹	۴.۹۳	۲.۶۹
	نسبت حداکثر تنش میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۲۸.۴۲	۹.۶۰	۶.۴۳	۴.۸۵
	نسبت حداکثر کرنش فون میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۲۷.۵۹	۸.۳۶	۵.۶۰	۴.۲۲
	نسبت وزن به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۰.۵۴	۰.۶۲	۰.۶۹	۰.۷۶
P-3	نسبت حداکثر خیز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۳۹.۷۶	۱۰.۳۸	۲.۶۹	۱
	نسبت حداکثر تنش میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۲۷.۶۵	۱۰.۲۹	۲.۶۹	۱
	نسبت حداکثر کرنش فون میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۲۸.۳۹	۸.۷۴	۳.۲۵	۱
	نسبت وزن به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۰.۶۱	۰.۷۴	۰.۸۷	۱

جدول ۵-۳- مقایسه پانل P-1 و P-2 و P-3 تحت بار متمرکز

نمونه	ارتفاع هسته (سانتیمتر)	۲.۵	۵	۷.۵	۱۰
P-1	نسبت حداکثر خیز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۲۱.۸۱	۴.۷۲	۲.۰۸	۱.۰۸
	نسبت حداکثر تنش میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۱۴.۲۰	۳.۷۵	۲.۶۸	۱.۵۸
	نسبت حداکثر کرنش فون میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۱۵.۱۴	۳.۲۳	۲.۲۷	۱.۵۲
	نسبت وزن به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۰.۵۲	۰.۵۷	۰.۶۱	۰.۶۶
P-2	نسبت حداکثر خیز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۱۷.۴۰	۴.۳۸	۱.۹۳	۱.۰۸
	نسبت حداکثر تنش میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۵.۰۱	۱.۹۸	۱.۳۳	۱.۳۵
	نسبت حداکثر کرنش فون میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۴.۹۹	۱.۵۱	۱.۳۹	۱.۳۱
	نسبت وزن به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۰.۵۴	۰.۶۲	۰.۶۹	۰.۷۶
P-3	نسبت حداکثر خیز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۱۶.۶۵	۴.۰۹	۱.۷۹	۱
	نسبت حداکثر تنش میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۳.۹۵	۱.۴۷	۱	۱
	نسبت حداکثر کرنش فون میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۳.۷۷	۱.۱۶	۱	۱
	نسبت وزن به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۰.۶۱	۰.۷۴	۰.۸۷	۱

جدول ۵-۴- مقایسه پانل P-4 تحت بار گسترده

نمونه	ضخامت پوسته (میلیمتر)	۰.۲۵	۰.۵	۰.۷۵	۱
P-4	نسبت حداکثر خیز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۸۶.۲۵	۵۰.۸۰	۲۹.۹۲	۲۲.۶۳
	نسبت حداکثر تنش میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۷۵.۹۶	۳۴.۳۲	۱۵.۵۰	۱۲.۰۲
	نسبت حداکثر کرنش فون میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۸۴.۴۵	۳۷.۵۰	۱۶.۶۴	۱۱.۳۷
	نسبت وزن به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۰.۲۸	۰.۵۲	۰.۷۶	۰.۹۹

جدول ۵-۵- مقایسه پانل P-4 تحت بار متمرکز

نمونه	ضخامت پوسته (میلیمتر)	۰.۲۵	۰.۵	۰.۷۵	۱
P-4	نسبت حداکثر خیز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۳۸.۸۱	۲۱.۸۱	۱۲.۲۰	۸.۹۵
	نسبت حداکثر تنش میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۳۱.۰۹	۱۴.۲	۴.۰۵	۲.۲۵
	نسبت حداکثر کرنش فون میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۳۷.۹۸	۱۵.۱۴	۳.۰۹	۱.۷۱
	نسبت وزن به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۰.۲۸	۰.۵۲	۰.۷۶	۰.۹۹

جدول ۵-۶- مقایسه پانل P-5 تحت بار گسترده

نمونه	ضخامت هسته (میلیمتر)	۰.۱۵	۰.۲۵	۰.۳۵	۰.۵
P-5	نسبت حداکثر خیز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۵۲.۳۲	۵۰.۸۰	۴۸.۸۱	۴۵.۴۰
	نسبت حداکثر تنش میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۳۶.۴۷	۳۴.۳۲	۳۱.۰۵	۲۸.۰۳
	نسبت حداکثر کرنش فون میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۴۰.۷۹	۳۷.۵۰	۳۰.۹۴	۲۶.۵۳
	نسبت وزن به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۰.۵۰	۰.۵۲	۰.۵۴	۰.۵۷

جدول ۵-۷- مقایسه پانل P-5 تحت بار متمرکز

نمونه	ضخامت هسته (میلیمتر)	۰.۱۵	۰.۲۵	۰.۳۵	۰.۵
P-5	نسبت حداکثر خیز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۲۲.۸۹	۲۱.۸۱	۲۱.۰۸	۲۰.۸۲
	نسبت حداکثر تنش میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۱۴.۲۰	۹.۵۲	۶.۲۸	۵.۲۹
	نسبت حداکثر کرنش فون میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۱۵.۱۳	۱۰.۵۸	۶.۱۷	۵.۲۰
	نسبت وزن به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۰.۵۰	۰.۵۲	۰.۵۴	۰.۵۷

همانگونه که در جدول ۲-۵ الی ۷-۵ مشاهده میگردد، پانل P-3 با ضخامت ۱۰ سانتیمتر که بعنوان سنگین ترین مدل می باشد بعنوان پایه در نظر گرفته شده و حداکثر خیز، تنش و کرنش فون میسز این پانل بعنوان مرجع جهت مقایسه رفتار پانلها تحت بار متمرکز و گسترده در نظر گرفته می شود.

جدول ۵-۸- مقایسه پانل P-1، P-2 و P-4 و P-5 تحت بار گسترده

نمونه	مشخصات			مقدار افزایش		مقدار کاهش	
P-1	ارتفاع هسته (سانتیمتر)	۲.۵	۵	-----			
	نسبت حداکثر خیز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۵۰.۸	۱۱	۰.۷۸	۰		
	نسبت حداکثر تنش میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۳۴.۳۲	۹.۰۷	۰.۷۴	۰		
	نسبت حداکثر کرنش فون میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۳۷.۵	۷.۹۹	۰.۷۹	۰		
	نسبت وزن به پانل P-3	۰.۵۲	۰.۵۷	۰	۰.۰۹		
P-2	ارتفاع هسته (سانتیمتر)	۲.۵	۵	-----			
	نسبت حداکثر خیز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۴۴.۴۲	۱۱.۱۹	۰.۷۵	۰		
	نسبت حداکثر تنش میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۲۸.۴۲	۹.۶	۰.۶۶	۰		
	نسبت حداکثر کرنش فون میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۲۷.۵۹	۸.۳۶	۰.۷۰	۰		
	نسبت وزن به پانل P-3	۰.۵۴	۰.۶۲	۰	۰.۱۳		
P-4	ضخامت پوسته (میلیمتر)	۰.۷۵	۱	-----			
	نسبت حداکثر خیز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۲۹.۹۲	۲۲.۶۳	۰.۲۴	۰		
	نسبت حداکثر تنش میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۱۵.۵	۱۲.۰۲	۰.۲۲	۰		
	نسبت حداکثر کرنش فون میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۱۶.۶۴	۱۱.۳۷	۰.۳۲	۰		
	نسبت وزن به پانل P-3	۰.۷۶	۰.۹۹	۰	۰.۲۳		
P-5	ضخامت هسته (میلیمتر)	۰.۱۵	۰.۵	-----			
	نسبت حداکثر خیز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۵۳.۳۲	۴۵.۴	۰.۱۵	۰		
	نسبت حداکثر تنش میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۳۶.۴۷	۲۸.۰۳	۰.۲۳	۰		
	نسبت حداکثر کرنش فون میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)	۴۰.۷۹	۲۶.۵۳	۰.۳۵	۰		
	نسبت وزن به پانل P-3	۰.۵	۰.۵۷	۰	۰.۱۲		

در جداول ۵-۸ و ۵-۹ پانلهای P-1 و P-2 جهت تاثیر ارتفاع و شعاع هسته ، پانل P-4 جهت تاثیر ضخامت پوسته و P-5 جهت تاثیر ضخامت هسته بر رفتار پانل لانه زنبوری تحت بار گسترده و متمرکز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته اند.

جدول ۵-۹- مقایسه پانل P-1 ، P-2 و P-4 و P-5 تحت بار متمرکز

نمونه	مشخصات		مقدار کاهش		مقدار افزایش	
P-1	ارتفاع هسته (سانتیمتر)		۲.۵	۵	-----	
	نسبت حداکثر خیز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)		۲۱.۸۱	۴.۷۲	۰.۷۹	۰
	نسبت حداکثر تنش میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)		۱۴.۲	۳.۷۵	۰.۷۳	۰
	نسبت حداکثر کرنش فون میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)		۱۵.۱۴	۳.۲۳	۰.۷۶	۰
	نسبت وزن به پانل P-3		۰.۵۲	۰.۵۷	۰	۰.۰۹
P-2	ارتفاع هسته (سانتیمتر)		۲.۵	۵	-----	
	نسبت حداکثر خیز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)		۱۷.۴	۴.۳۸	۰.۷۵	۰
	نسبت حداکثر تنش میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)		۵.۰۱	۱.۹۸	۰.۶۰	۰
	نسبت حداکثر کرنش فون میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)		۴.۹۹	۱.۵۱	۰.۷۰	۰
	نسبت وزن به پانل P-3		۰.۵۴	۰.۶۲	۰	۰.۱۳
P-4	ضخامت پوسته (میلیمتر)		۰.۷۵	۱	-----	
	نسبت حداکثر خیز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)		۱۲.۲	۸.۹۵	۰.۲۷	۰
	نسبت حداکثر تنش میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)		۴.۰۵	۲.۲۵	۰.۴۴	۰
	نسبت حداکثر کرنش فون میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)		۳.۰۹	۱.۷۱	۰.۴۵	۰
	نسبت وزن به پانل P-3		۰.۷۶	۰.۹۹	۰	۰.۲۳
P-5	ضخامت هسته (میلیمتر)		۰.۱۵	۰.۵	-----	
	نسبت حداکثر خیز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)		۲۲.۸۹	۲۰.۸۲	۰.۰۹	۰
	نسبت حداکثر تنش میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)		۱۴.۲	۵.۲۹	۰.۶۳	۰
	نسبت حداکثر کرنش فون میسز به پانل P-3 (ضخامت ۱۰ سانتیمتر)		۱۵.۱۳	۵.۲	۰.۶۶	۰
	نسبت وزن به پانل P-3		۰.۵	۰.۵۷	۰	۰.۱۲

همانگونه که در جدول ۵-۸ مشاهده می گردد تحت بار گسترده پانل P-1 با افزایش ۹ درصدی وزن پانل ، کاهش ۷۸ درصدی حداکثر خیز ، ۷۴ درصدی تنش فون میسز و ۷۹ درصدی

کرنش فون میسز رخ میدهد و این درحالی است که در پانل P-2 با افزایش ۱۳ درصدی وزن پانل ، کاهش ۷۵ درصدی حداکثر خیز ، ۶۶ درصدی تنش فون میسز و ۷۰ درصدی کرنش فون میسز رخ میدهد ، بنابراین نتیجه می گیریم افزایش ارتفاع هسته و در نهایت پانل با افزایش وزن کمتری نسبت به کاهش شعاع هسته باعث کاهش بیشتر در خیز ، تنش و کرنش فون میسز می گردد.

همچنین تحت بار گسترده پانل P-5 با افزایش ۱۲ درصدی وزن پانل ، کاهش ۱۵ درصدی حداکثر خیز ، ۲۳ درصدی تنش فون میسز و ۳۵ درصدی کرنش فون میسز رخ میدهد و این درحالی است که در پانل P-2 با افزایش ۱۳ درصدی وزن پانل ، کاهش ۷۵ درصدی حداکثر خیز ، ۶۶ درصدی تنش فون میسز و ۷۰ درصدی کرنش فون میسز رخ میدهد ، بنابراین نتیجه می گیریم کاهش شعاع و افزایش ارتفاع هسته و در نهایت پانل با افزایش وزن کمتری نسبت به افزایش ضخامت هسته باعث کاهش بیشتر در خیز ، تنش و کرنش فون میسز می گردد.

همچنین تحت بار گسترده پانل P-4 با افزایش ۲۳ درصدی وزن پانل ، کاهش ۲۴ درصدی حداکثر خیز ، ۲۲ درصدی تنش فون میسز و ۳۲ درصدی کرنش فون میسز رخ میدهد و این درحالی است که در پانل P-5 با افزایش ۱۲ درصدی وزن پانل ، کاهش ۱۵ درصدی حداکثر خیز ، ۲۳ درصدی تنش فون میسز و ۳۵ درصدی کرنش فون میسز رخ میدهد ، بنابراین نتیجه می گیریم افزایش ضخامت هسته ، کاهش شعاع و افزایش ارتفاع هسته پانل با افزایش وزن کمتری نسبت به افزایش ضخامت پوسته باعث کاهش بیشتر در خیز ، تنش و کرنش فون میسز می گردد.

همانگونه که در جدول ۵-۹ مشاهده می گردد تحت بار متمرکز پانل P-1 با افزایش ۹ درصدی وزن پانل ، کاهش ۷۹ درصدی حداکثر خیز ، ۷۳ درصدی تنش فون میسز و ۷۶ درصدی کرنش فون میسز رخ میدهد و این درحالی است که در پانل P-2 با افزایش ۱۳ درصدی وزن پانل ، کاهش ۷۵ درصدی حداکثر خیز ، ۶۰ درصدی تنش فون میسز و ۷۰ درصدی کرنش فون میسز رخ میدهد ،

بنابراین نتیجه می گیریم افزایش ارتفاع هسته با افزایش وزن کمتری نسبت به کاهش شعاع هسته باعث کاهش بیشتر در خیز ، تنش و کرنش فون میسز می گردد.

همچنین تحت بار متمرکز، پانل P-5 با افزایش ۱۲ درصدی وزن پانل ، کاهش ۹ درصدی حداکثر خیز ، ۶۳ درصدی تنش فون میسز و ۶۶ درصدی کرنش فون میسز رخ میدهد و این درحالی است که در پانل P-2 با افزایش ۱۳ درصدی وزن پانل ، کاهش ۷۵ درصدی حداکثر خیز ، ۶۰ درصدی تنش فون میسز و ۷۰ درصدی کرنش فون میسز رخ میدهد ، بنابراین نتیجه می گیریم کاهش شعاع و افزایش ارتفاع هسته با افزایش وزن کمتری نسبت به افزایش ضخامت هسته باعث کاهش بیشتر در خیز ، تنش و کرنش فون میسز می گردد.

همچنین تحت بار متمرکز ، پانل P-4 با افزایش ۲۳ درصدی وزن پانل ، کاهش ۲۷ درصدی حداکثر خیز ، ۴۴ درصدی تنش فون میسز و ۴۵ درصدی کرنش فون میسز رخ میدهد و این درحالی است که در پانل P-5 با افزایش ۱۲ درصدی وزن پانل ، کاهش ۹ درصدی حداکثر خیز ، ۶۳ درصدی تنش فون میسز و ۶۶ درصدی کرنش فون میسز رخ میدهد ، بنابراین نتیجه می گیریم افزایش ضخامت هسته ، کاهش شعاع و افزایش ارتفاع هسته پانل با افزایش وزن کمتری نسبت به افزایش ضخامت پوسته باعث کاهش بیشتر در خیز ، تنش و کرنش فون میسز می گردد.



## ۵-۲- بررسی تاثیر عبور لوله از پانل لانه زنبوری

### ۵-۲-۱- مقدمه

در این قسمت سعی بر آن است تا با مقایسه پانل های مختلف در ابعاد هسته و بارگذاری گسترده و متمرکز نسبت به حداکثر خیز ، حداکثر تنش و کرنش فون میسر رفتار پانل لانه زنبوری با عبور لوله مورد بررسی قرار گیرد.

همانطور که در فصل قبل نیز ذکر گردید ابعاد سازه ۱ متر در ۳ متر است که در هنگام مدل نمودن در نرم افزار با توجه به تقارن و صرفه جویی در وقت ۰.۵ متر در ۱.۵ متر نمونه مدل گردید ، بار گسترده برابر ۷۲۰ پاسکال و بار متمرکز برابر ۶۷۰ نیوتن در مرکز پانل در نظر گرفته شد. قابل ذکر است در پانلهای با ارتفاع ۷.۵ سانتیمتر لوله به ضخامت ۲.۵ سانتیمتر و در پانلهای با ارتفاع ۱۰ سانتیمتر لوله به ضخامت ۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده و لوله از ارتفاع ۷۰ سانتیمتری پانل عبور داده شده است.

### ۵-۲-۲- نمونه ها

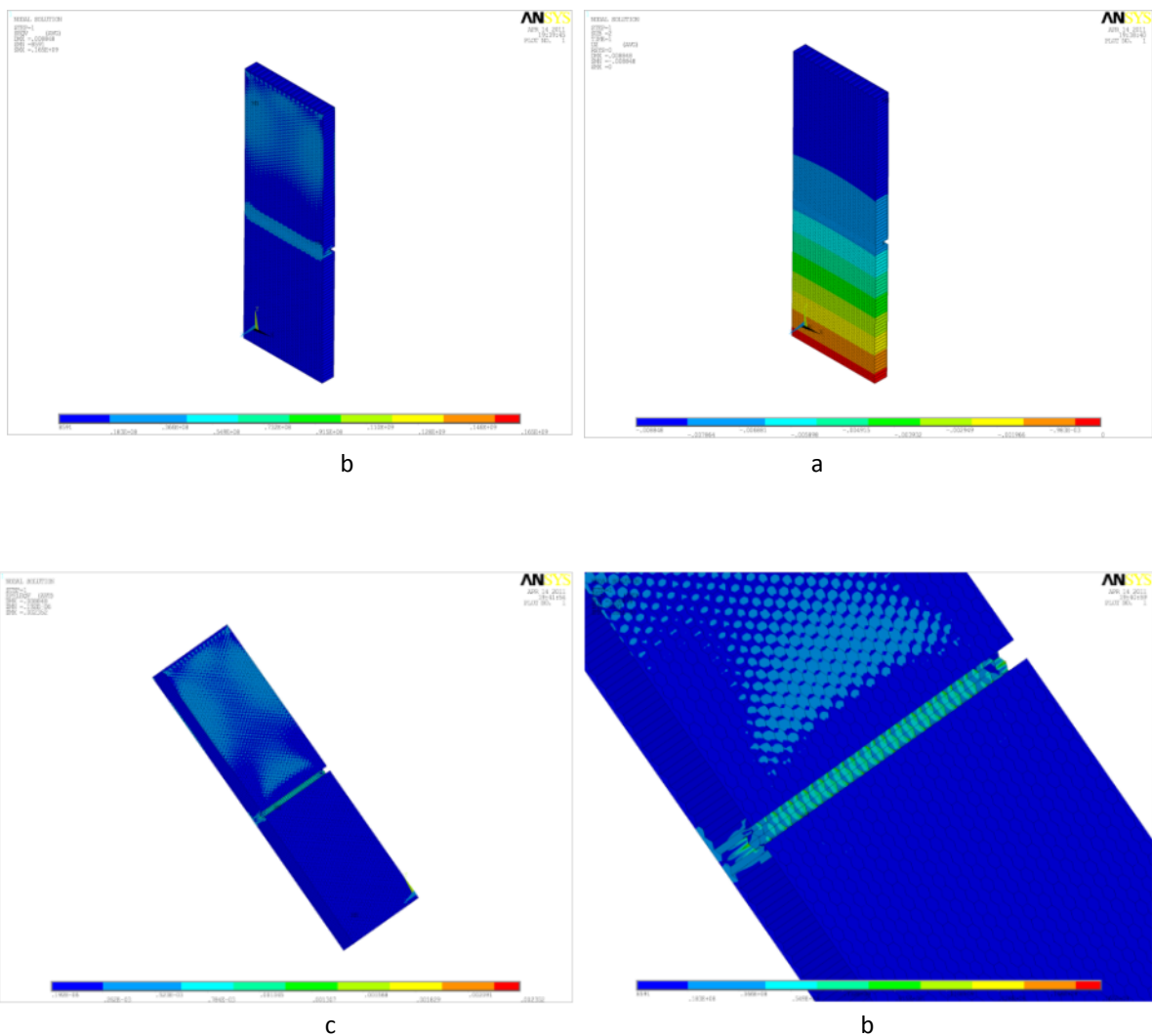
در این تحقیق ۶ نمونه بررسی شده است که مشخصات آنها در جدول ۵ - ۱۰ آمده است. سیستم واحد مورد استفاده در این بررسی، نیوتن- میلی متر است.

جدول ۵-۱۰- شناسه مدل های اجزای محدود نمونه ها (ابعاد بر حسب میلی متر)

شناسه نمونه ها	شعاع سلول هسته	ضخامت رویه	ضخامت هسته
P-6	۳۰	۰.۵	۰.۲۵
P-7	۲۰	۰.۵	۰.۲۵
P-8	۱۰	۰.۵	۰.۲۵

### ۵-۲-۳- مکانیزم خرابی نمونه ها

در شکل ۵ - ۲۰ مدل اجزای محدود پانل آورده شده است. همانگونه که مشاهده می شود حداکثر خیز در وسط پانل و حداکثر تنش و کرنش فون میسز در محل عبور لوله در پانل رخ داده است.



شکل ۵-۲۰- کانتور اجزای محدود (a) خیز در جهت عمود (b) تنش فون میسز (c) کرنش فون میسز

## ۴-۲-۵- نتایج تحلیل اجزای محدود و بررسی آن

در ابتدا پانل با شعاع های هسته ۳، ۲ و ۱ سانتیمتری تحت بارهای گسترده و متمرکز مورد تحلیل قرار گرفت همانگونه که در جدولهای ۵-۱۱ الی ۵-۱۶ مشاهده می گردد در پانل به شعاعهای فوق، ضخامت رویه ۰.۵ و ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر و ارتفاع هسته با ابعاد ۷.۵ و ۱۰ سانتیمتر با افزایش ارتفاع هسته، حداکثر خیز، حداکثر تنش و کرنش فون میسر کاهش می یابند که علت این امر نیز افزایش سختی سازه با توجه به افزایش ارتفاع سازه می باشد که در نتیجه این افزایش سختی سبب کاهش در حداکثر خیز، حداکثر تنش و کرنش فون میسر می باشد.

همچنین با عبور لوله از پانل که باعث کاهش مقاومت در محل عبور لوله می گردد مقادیر خیز، تنش و کرنش فون میسر نسبت به پانل معمولی افزایش می یابند و محل خرابی پانل از وسط به محل عبور لوله منتقل می گردد.

جدول ۵-۱۱- مقایسه پانل P-1 و P-6 تحت بار گسترده

نمونه	ضخامت(سانتیمتر)	حداکثر خیز(سانتیمتر)	حداکثر تنش(مگاپاسکال)	کرنش فون میسر
P-6	۷.۵	۱.۳۰	۸۴.۳۴	$۴.۲۹ \times ۱۰^{-۴}$
	۱۰	۱.۰۲	۷۱.۸۹	$۴.۱۲ \times ۱۰^{-۴}$
P-1	۷.۵	۰.۷۸	۴۶.۵۰	$۶.۷۰ \times ۱۰^{-۳}$
	۱۰	۰.۴۴	۳۳.۸۴	$۴.۸۸ \times ۱۰^{-۳}$
نسبت افزایش	۷.۵	۱.۶۷	۱.۸۱	۶.۴۰
	۱۰	۲.۳۲	۲.۱۲	۸.۴۰

جدول ۵-۱۲- مقایسه پانل P-1 و P-6 تحت بار متمرکز

نمونه	ضخامت(سانتیمتر)	حداکثر خیز(سانتیمتر)	حداکثر تنش(مگاپاسکال)	کرنش فون میسر
P-6	۷.۵	۱.۶۱	۲۷۵.۴۳	$۴.۱۸ \times ۱۰^{-۳}$
	۱۰	۱.۱۸	۲۶۳.۳۷	$۴.۰۱ \times ۱۰^{-۳}$
P-1	۷.۵	۱.۵۹	۲۰۶.۶۰	$۳.۶۰ \times ۱۰^{-۳}$
	۱۰	۱.۱۲	۱۶۸.۹۷	$۲.۰۷ \times ۱۰^{-۳}$
نسبت افزایش	۷.۵	۱.۰۱	۱.۳۳	۱.۱۶
	۱۰	۱.۰۵	۱.۵۶	۱.۹۴

طبق جدولهای ۵-۱۱ و ۵-۱۲ پانلهای لانه زنبوری با شعاع هسته ۳ سانتیمتر ، ارتفاع هسته ۲.۵ سانتیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر و ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر ، با یک پانل با همین مشخصات ولی با عبور لوله ۲.۵ سانتیمتری در پانل به ضخامت ۷.۵ سانتیمتر و لوله ۵ سانتیمتری از پانل با ضخامت ۱۰ سانتیمتر، تحت بارهای متمرکز و گسترده مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت و نتایج ذیل حاصل گردید.

- با افزایش ارتفاع هسته در پانل های بریده شده حداکثر خیز ، حداکثر تنش و کرنش فون میسر کاهش می یابند.
- با عبور لوله از پانل در مقایسه با پانل مشابه سالم، حداکثر خیز ، حداکثر تنش و کرنش فون میسر افزایش می یابند.

جدول ۵-۱۳- مقایسه پانل P-2 و P-7 تحت بار گسترده

نمونه	ضخامت(سانتیمتر)	حداکثر خیز(سانتیمتر)	حداکثر تنش(مگاپاسکال)	کرنش فون میسر
P-7	۷.۵	۱.۱۳	۱۸۵.۲۵	$۲.۸۱ * ۱۰^{-۳}$
	۱۰	۰.۸۳	۱۸۰.۶۲	$۲.۷۶ * ۱۰^{-۳}$
P-2	۷.۵	۰.۷۹	۴۶.۲۵	$۶.۶۷ * ۱۰^{-۴}$
	۱۰	۰.۴۳	۳۴.۸۶	$۵.۰۳ * ۱۰^{-۴}$
نسبت افزایش	۷.۵	۱.۴۳	۴.۰۱	۴.۲۱
	۱۰	۱.۹۳	۵.۱۸	۵.۴۹

جدول ۵-۱۴- مقایسه پانل P-2 و P-7 تحت بار متمرکز

نمونه	ضخامت(سانتیمتر)	حداکثر خیز(سانتیمتر)	حداکثر تنش(مگاپاسکال)	کرنش فون میسر
P-7	۷.۵	۱.۴۷	۲۷۱.۳۹	$۴.۱۵ * ۱۰^{-۳}$
	۱۰	۱.۱۵	۲۵۹.۱۲	$۳.۹۱ * ۱۰^{-۳}$
P-2	۷.۵	۱.۳۶	۱۴۴.۸۸	$۲.۴۵ * ۱۰^{-۳}$
	۱۰	۰.۹۲	۱۴۴.۳۰	$۲.۱۵ * ۱۰^{-۳}$
نسبت افزایش	۷.۵	۱.۰۸	۱.۸۷	۱.۶۹
	۱۰	۱.۲۵	۱.۸۰	۱.۸۲

طبق جدولهای ۵-۱۳ و ۵-۱۴ پانلهای لانه زنبوری با شعاع هسته ۲ سانتیمتر ، ارتفاع هسته ۲.۵ سانتیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر و ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر ، با یک پانل با همین مشخصات ولی با عبور لوله ۲.۵ سانتیمتری در پانل به ضخامت ۷.۵ سانتیمتر و لوله ۵ سانتیمتری از پانل با ضخامت ۱۰ سانتیمتر، تحت بارهای متمرکز و گسترده مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت و نتایج ذیل حاصل گردید.

- با افزایش ارتفاع هسته در پانل های بریده شده حداکثر خیز ، حداکثر تنش و کرنش فون میسر کاهش می یابند.
- با عبور لوله از پانل در مقایسه با پانل مشابه سالم، حداکثر خیز ، حداکثر تنش و کرنش فون میسر افزایش می یابند.

جدول ۵-۱۵- مقایسه پانل P-3 و P-8 تحت بار گسترده

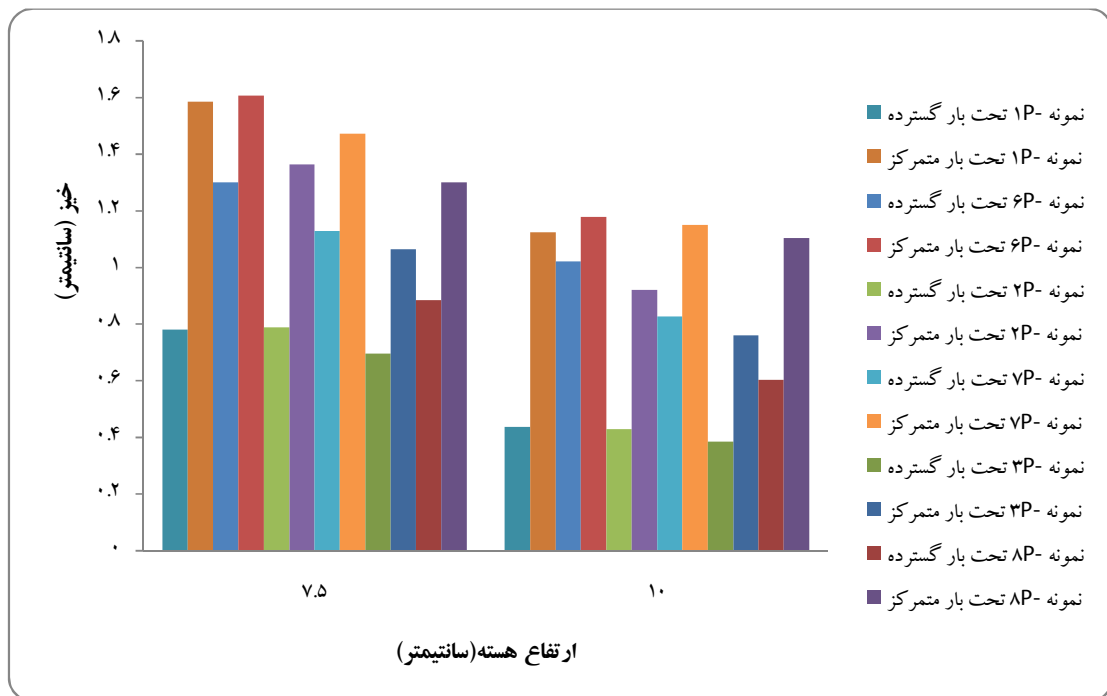
نمونه	ضخامت(سانتیمتر)	حداکثر خیز(سانتیمتر)	حداکثر تنش(مگاپاسکال)	کرنش فون میسر
P-8	۷.۵	۰.۸۸	۹۸.۰۴	$۴.۱۵ \times 10^{-3}$
	۱۰	۰.۶۰	۹۷.۱۳	$۳.۹۱ \times 10^{-3}$
P-3	۷.۵	۰.۷	۳۹.۸۰	$۵.۳۳ \times 10^{-4}$
	۱۰	۰.۳۹	۲۳.۹۲	$۳.۵۱ \times 10^{-4}$
نسبت افزایش	۷.۵	۱.۲۶	۲.۴۶	۷.۸۰
	۱۰	۱.۵۴	۴.۰۶	۱۱.۱۴

جدول ۵-۱۶- مقایسه پانل P-3 و P-8 تحت بار متمرکز

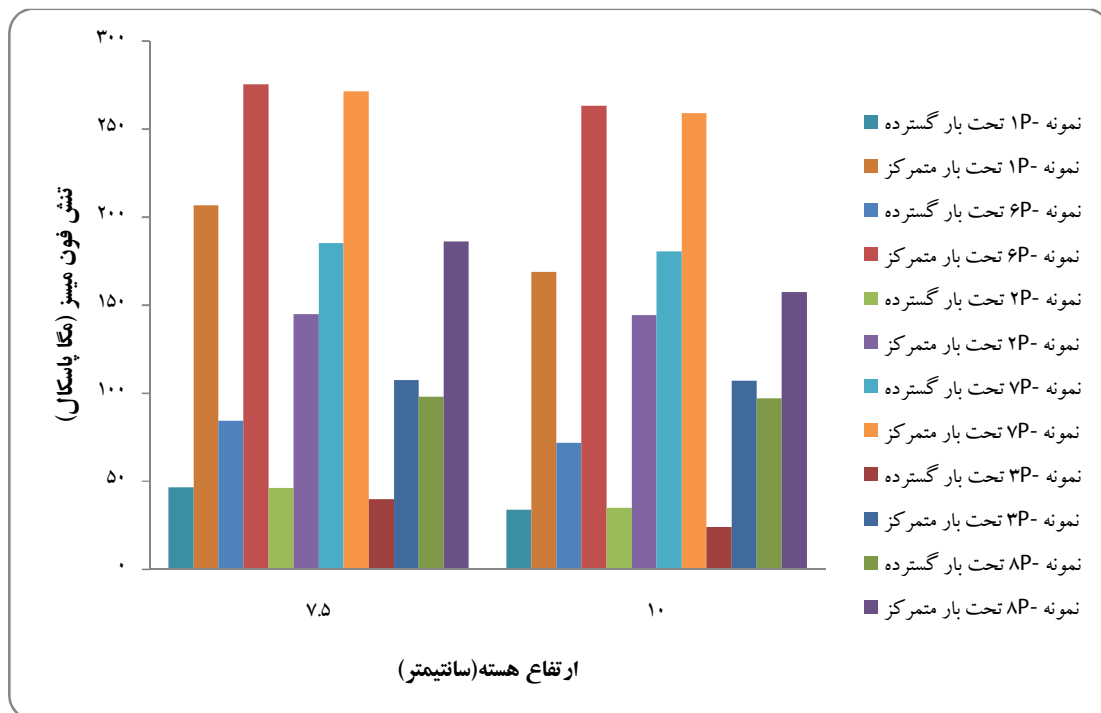
نمونه	ضخامت(سانتیمتر)	حداکثر خیز(سانتیمتر)	حداکثر تنش(مگاپاسکال)	کرنش فون میسر
P-8	۷.۵	۱.۳۰	۱۸۶.۲۱	$۲.۴۱ \times 10^{-3}$
	۱۰	۱.۱۰	۱۵۷.۴۴	$۲.۴۱ \times 10^{-3}$
P-3	۷.۵	۱.۰۶	۱۰۷.۵۴	$۲.۰۳ \times 10^{-3}$
	۱۰	۰.۷۶	۱۰۷.۱۱	$۲.۰۲ \times 10^{-3}$
نسبت افزایش	۷.۵	۱.۲۳	۱.۷۳	۱.۱۹
	۱۰	۱.۴۵	۱.۴۷	۱.۱۹

طبق جدولهای ۵-۱۵ و ۵-۱۶ پانلهای لانه زنبوری با شعاع هسته ۱ سانتیمتر ، ارتفاع هسته ۲.۵ سانتیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر و ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر ، با یک پانل با همین مشخصات ولی با عبور لوله ۲.۵ سانتیمتری در پانل به ضخامت ۷.۵ سانتیمتر و لوله ۵ سانتیمتری از پانل با ضخامت ۱۰ سانتیمتر، تحت بارهای متمرکز و گسترده مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت و نتایج ذیل حاصل گردید.

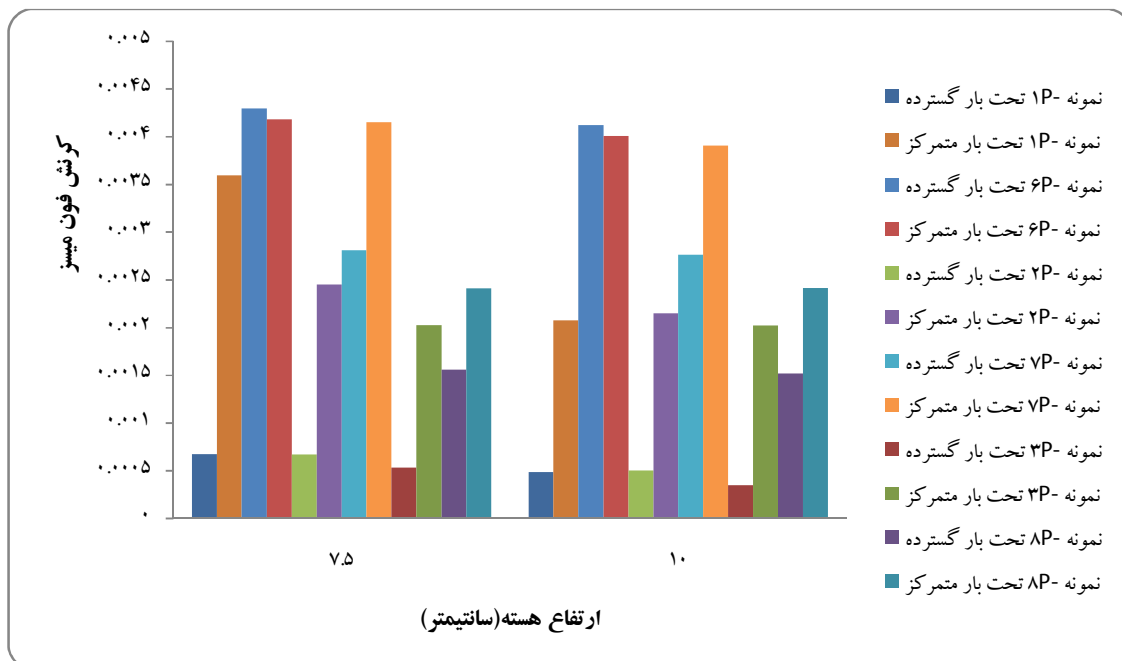
- با افزایش ارتفاع هسته در پانل های بریده شده حداکثر خیز ، حداکثر تنش و کرنش فون میسر کاهش می یابند.
- با عبور لوله از پانل در مقایسه با پانل مشابه سالم، حداکثر خیز ، حداکثر تنش و کرنش فون میسر افزایش می یابند.



شکل ۵-۲۱- نمودار حداکثر خیز نمونه های P-1، P-2، P-3، P-6 و P-7، P-8



شکل ۲۲-۵- نمودار حداکثر تنش فون میسز نمونه های P-1، P-2، P-3، P-6 و P-7، P-8



شکل ۲۳-۵- نمودار حداکثر کرنش فون میسز نمونه های P-1، P-2، P-3، P-6 و P-7، P-8

همانگونه که در شکل ۵-۲۱ مشاهده می شود در پانل لانه زنبوری با شعاع های هسته ۳، ۲ و ۱ سانتیمتر ، ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر با افزایش ارتفاع هسته لانه زنبوری مقدار خیز کاهش می یابد و بطور مشابه در پانلهای لانه زنبوری با شعاع های هسته ۳، ۲ و ۱ سانتیمتر ، ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر و با عبور لوله ۲.۵ سانتیمتری در پانل به ضخامت ۷.۵ سانتیمتر و لوله ۵ سانتیمتری از پانل با ضخامت ۱۰ سانتیمتر، تحت بارهای متمرکز و گسترده با افزایش ارتفاع هسته لانه زنبوری مقدار خیز کاهش می یابد ، از آنجا که خیز عمود بر پانل رابطه معکوس با ارتفاع هسته لانه زنبوری و در نهایت ارتفاع پانل دارد ، در ارتفاع ۷.۵ سانتیمتر ، بیشترین خیز و در ارتفاع ۱۰ سانتیمتری حداقل خیز مشاهده می گردد و با افزایش شعاع هسته مقدار خیز افزایش خواهد یافت. بصورتیکه در شعاع ۳ سانتیمتر ، بیشترین خیز و در شعاع ۱ سانتیمتری حداقل خیز مشاهده می گردد که این امر در مورد پانلهای بریده شده نیز صادق می باشد.

طبق نمودار ارائه شده خیز در پانلهای بریده شده نسبت به پانلهای سالم مشابه افزایش یافته است و این مقدار با افزایش شعاع هسته افزایش می یابد.

با توجه به شکل ۵-۲۲ در پانل با شعاع های هسته ۳، ۲ و ۱ سانتیمتر ، ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر با افزایش ارتفاع هسته لانه زنبوری مقدار حداکثر تنش فون میسر کاهش می یابد و بطور مشابه در پانلهای لانه زنبوری با شعاع های هسته ۳، ۲ و ۱ سانتیمتر ، ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر و با عبور لوله ۲.۵ سانتیمتری در پانل به ضخامت ۷.۵ سانتیمتر و لوله ۵ سانتیمتری از پانل با ضخامت ۱۰ سانتیمتر، تحت بارهای متمرکز و گسترده با افزایش ارتفاع هسته لانه زنبوری مقدار حداکثر تنش فون میسر کاهش می یابد ، از آنجا که حداکثر تنش فون میسر پانل رابطه معکوس با ارتفاع هسته لانه زنبوری و در نهایت ارتفاع پانل دارد در ارتفاع ۷.۵ سانتیمتر، بیشترین تنش و در ارتفاع ۱۰ سانتیمتری حداقل تنش مشاهده می



گردد و با افزایش شعاع هسته مقدار تنش فون میسر افزایش خواهد یافت. بصورتیکه در شعاع ۳ سانتیمتر، بیشترین تنش فون میسر و در شعاع ۱ سانتیمتری حداقل تنش فون میسر مشاهده می گردد. که این امر در مورد پانلهای بریده شده نیز صادق می باشد.

طبق نمودار ارائه شده حداکثر تنش فون میسر در پانلهای بریده شده نسبت به پانلهای سالم مشابه، افزایش یافته است و این مقدار با افزایش شعاع هسته افزایش می یابد.

در شکل ۵-۲۳ در پانل با شعاع های هسته ۳، ۲، و ۱ سانتیمتر، ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر با افزایش ارتفاع هسته لانه زنبوری مقدار حداکثر کرنش فون میسر کاهش می یابد و بطور مشابه در پانلهای لانه زنبوری با شعاع های هسته ۳، ۲، و ۱ سانتیمتر، ضخامت هسته ۰.۲۵ میلیمتر و ضخامت پوسته ۰.۵ میلیمتر و با عبور لوله ۲.۵ سانتیمتری در پانل به ضخامت ۷.۵ سانتیمتر و لوله ۵ سانتیمتری از پانل با ضخامت ۱۰ سانتیمتر، تحت بارهای متمرکز و گسترده با افزایش ارتفاع هسته لانه زنبوری مقدار حداکثر کرنش فون میسر کاهش می یابد، از آنجا که حداکثر کرنش فون میسر پانل رابطه معکوس با ارتفاع هسته لانه زنبوری و در نهایت ارتفاع پانل دارد در ارتفاع ۷.۵ سانتیمتر، بیشترین کرنش و در ارتفاع ۱۰ سانتیمتری حداقل کرنش مشاهده می گردد و با افزایش شعاع هسته مقدار کرنش فون میسر افزایش خواهد یافت. بصورتیکه در شعاع ۳ سانتیمتر، بیشترین کرنش فون میسر و در شعاع ۱ سانتیمتری حداقل کرنش فون میسر مشاهده می گردد که این امر در مورد پانلهای بریده شده نیز صادق می باشد.

طبق نمودار ارائه شده حداکثر کرنش فون میسر در پانلهای بریده شده نسبت به پانلهای سالم مشابه، افزایش یافته است و این مقدار با افزایش شعاع هسته افزایش می یابد.

فصل هشتم

نتیجہ گیری و پیشہ اداوات

## ۱-۶- پیش‌گفتار

پانل لانه زنبوری از دیدگاه‌های گوناگونی می‌تواند مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. در این تحقیق رفتار پانلهای لانه زنبوری با استفاده از مدل‌های اجزای محدود و نرم افزار ANSYS و همچنین به کمک مدل‌های ساده تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت در این بررسی موضوعات ذیل مورد نظر قرار گرفته است :

- ۱- تاثیر ضخامت پوسته ، هسته و ارتفاع پانل و شعاع سلولهای هسته تحت بارهای گسترده و متمرکز با توجه به حداکثر خیز ، تنش و کرنش فون میسر.
- ۲- بررسی عبور لوله از پانل لانه زنبوری تحت بارهای گسترده و متمرکز با توجه به حداکثر خیز ، تنش و کرنش فون میسر.

## ۲-۶- نتیجه گیری:

همانگونه که انتظار می رود :

- در تمامی پانل ها با افزایش ارتفاع هسته ، کاهش شعاع هسته و افزایش ضخامت پوسته و افزایش ضخامت هسته لانه زنبوری ، خیز و تنش و کرنش فون میسر کاهش یافتند .
- بیشترین خیز در وسط پانل و بیشترین تنش فون میسر در وسط پانل و در محل اتصال رویه به هسته رخ داد.
- با عبور لوله از پانل لانه زنبوری حداکثر خیز و تنش و کرنش فون میسر نسبت به پانل سالم افزایش یافت.
- با عبور لوله از پانل بیشترین خیز در وسط پانل و بیشترین تنش فون میسر در محل عبور لوله رخ داد.

و نتایج بدست آمده بشرح زیر می باشد :

- بیشترین تاثیر جهت کاهش خیز ، تنش و کرنش فون میسز پانل لانه زنبوری با توجه به وزن سازه به ترتیب با ارتفاع هسته ، شعاع هسته و ضخامت هسته و ضخامت پوسته مرتبط است.
- نتایج بدست آمده از آنالیز اجزای محدود با آزمایشات انجام شده توسط شرکت HEXCEL در خیز ۳ درصد و در تنش در حدود ۶ درصد اختلاف داشت.
- همانگونه که انتظار می رود خیز در پانل بریده شده از پانل سالم بیشتر است اما نسبت آن با کاهش شعاع هسته ، کاهش می یابد.
- با افزایش ارتفاع هسته ، نسبت خیز در پانل بریده شده به پانل سالم افزایش می یابد.
- با افزایش ارتفاع هسته ، نسبت حداکثر تنش و کرنش فون میسز در پانل بریده شده به پانل سالم افزایش می یابد.
- منحنی خیز ، تنش و کرنش فون میسز با توجه به متغیر ارتفاع هسته بصورت  $y = a h^b$  می باشد.
- منحنی خیز ، تنش و کرنش فون میسز با توجه به متغیر ضخامت هسته بصورت منحنی درجه دو می باشد.
- منحنی خیز ، تنش و کرنش فون میسز با توجه به متغیر ضخامت پوسته بصورت منحنی درجه دو می باشد.
- نسبت خیز در پانل بریده شده به پانل سالم تحت بار گسترده نسبت به بار متمرکز بیشتر می باشد.

### ۶-۳- پیشنهادات

استفاده از پانل های لانه زنبوری جهت کاربردهای هوا و فضا از موضوعاتی هستند که تا کنون به خوبی به آنها پرداخته شده است؛ در حالی که کاربردهای ساختمانی هنوز تحت بررسی بوده و مجهولات فراوانی در مورد آن وجود دارد لذا جهت انجام مطالعات تکمیلی پیشنهادات زیر ارائه می گردد:

- ۱- بررسی خصوصیات پانل های لانه زنبوری ساخته شده از مواد دیگر.
- ۲- بررسی اثر شکل هسته بر خصوصیات پانل های لانه زنبوری .
- ۳- بررسی در شرایط مختلف تکیه گاهی.
- ۴- بررسی تحت بارهای دینامیکی.
- ۵- بررسی روشهای بهینه سازی پانل لانه زنبوری جهت استفاده در تیغه های جدا کننده

## منابع :

- [۱] سرایلو حبیب الله ، دانشگاه تربیت مدرس ، ۱۳۸۵ « طراحی بهینه پانل ساندویچی هانی کمب تحت بارگذاری خارج از صفحه» دانشکده فنی مهندسی، مهندسی هوا فضا
- [۲] HAYDN N. G. WADLEY , Multifunctional periodic cellular metals , Department of Materials Science and Engineering, University of Virginia, Charlottesville, VA 22903, USA, Phil. Trans. R. Soc. A (2006) 364, 31–68
- [۳] [http://www. hexel.com](http://www.hexel.com), Website
- [۴] ACCEPTANCE CRITERIA FOR SANDWICH PANELS, AC04
- [۵] ACCEPTANCE CRITERIA FOR SANDWICH PANEL ADHESIVES, AC05
- [۶] Byoung Jung Kim, Dai Gil Lee Development of a satellite structure with the sandwich T-joint Composite Structures 92 (2010) 460–468
- [۷] Standard test method for flatwise tensile strength of sandwich constructions. Annual Book of ASTM D 297; 1994.
- [۸] Standard test method for flatwise compressive properties of sandwich cores. Annual Book of ASTM C 396; 1994.
- [۹] Standard test method for strength properties of adhesives in cleavage peel by tension loading. Annual Book of ASTM D 3807; 1993.
- [۱۰] Simonetta Boria Department of Mechanical, Nuclear and Production Engineering UNIVERSITY OF PISA , F2006-SC-013
- [۱۱] Boria, Simonetta CRASH ANALYSIS OF AN IMPACT ATTENUATOR FOR RACING CAR IN SANDWICH MATERIAL F2008-SC-016
- [۱۲] ASTM D 790-96a, Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. Philadelphia: American Society for Testing and Materials; 1996.
- [۱۳] Anı Ural, Alan T. Zehnder, Anthony R. Ingraffea, Fracture mechanics approach to facesheet delamination in honeycomb: measurement of energy release rate of the adhesive bond, Engineering Fracture Mechanics 70 (2003) 93-103

- [۱۴] ASTM D 5528-94a, Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites. Philadelphia: American Society for Testing and Materials; 1995.
- [۱۵] TONG-SEOK HAN , Delamination buckling and propagation analysis of honeycomb panels using a cohesive element approach, , International Journal of Fracture 115: 101–123, 2002.
- [۱۶] HAYDN N. G. WADLEY Multifunctional periodic cellular metals Phil. Trans. R. Soc. A (2006) 364, 31–68
- [۱۷] نیاز عبدالرحیم ، دانشگاه تربیت مدرس ، ۱۳۸۵ « بررسی ضربه با سرعت کم با ساندویچ پنل با هسته هانی کمب » دانشکده فنی مهندسی، مهندسی مکانیک
- [۱۸] Abrate S. Localized impact on sandwich structures with laminated facings. Appl Mech Rev 1997;50(2):69-82.
- [۱۹] Webber J.P.H. Governing equations for thick sandwich shells with honeycomb cores and laminated faces. J of Aeronautical-Quarterly 1974:271-286
- [۲۰] Holt P.J. and Webber J.P.H. Exact solution to some honeycomb sandwich beam-plate and shell problems. J of Strain Analysis 1982,17,1:1-8
- [۲۱] Ding , Yunliang. Optimum design of honeycomb sandwich constructions with buckling constraints. Computers and Structures 1989,33,6:1356-1364
- [۲۲] Goldsmith W, Sackman JL, An experimental study of energy absorption in impact on sandwich panels. Int J Impact Eng 1991;12(2):241-62.
- [۲۳] علوی نیا علی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۱ « بررسی تأثیر پارامترهای هانی کمب بر روی مقاومت به نفوذ آن »
- [۲۴] Wierzbicki T. Crushing analysis of metal honeycombs. Int J Impact Eng 1983;1(2):157-174
- [۲۵] Hoo Fatt MS, Park KS. Dynamic models for low-velocity impact damage of composite sandwich panels-Part A, Deformation. Compos. Strut. 2001;52(3-4):335-51.

- [۲۶] Hoo Fatt MS, Park KS. Dynamic models for low-velocity impact damage of composite sandwich panels-Part B, Damage initiation. *Compos. Strut.* 2001;52(3-4):353-64.
- [۲۷] Wen HW, Reddy TY, Reid SR, Soden PD. Indentation, penetration and perforation of composite laminates and sandwich panels under quasi static and projectile loading. *Key Eng Mater* 1998;141-143:501-502.
- [۲۸] Hoo MS, Park KS. Perforation of honeycomb sandwich plates by projectiles. *Compos Part A:Engineering* 2000;31:889-899.
- [۲۹] Herup EJ, Palazotto AN. Low-velocity impact initiation in graphite/epoxy/nomex honeycomb sandwich plates. *Compos Sci Technol* 1997;57:1581-98.
- [۳۰] Olsson R. Mass criterion for wave controlled impact response of composite plates. *Composites Part A* 2000;31:879-87.
- [۳۱] Malekzadeh K, Khalili M.R, Mittal R.K. Response of composite sandwich panels with transversely flexible core to low velocity transverse impact: A new dynamic model. *Int J Impact Eng* 2007;34:522-543
- [۳۲] Nguyen MQ, Jcombs SS, Thomson RS, Hachenberg D, Scott ML. Simulation of impact on sandwich structures. *Compos Struct* 2005;65:217-27.
- [۳۳] Besant T, Davis GAO, Hitchings D. Finite element modeling of composite sandwich panels. *Composites: Part A* 2001(32):1189-96.
- [۳۴] Meo M, Morris AJ, Vignjevic R, Marengo G. Numerical simulations of Low-velocity impact on an aircraft sandwich panel. *Compos Struct* 2003;62:353-60.
- [۳۵] Karger L, Baran J, Tebmer J. Rapid simulation on composite sandwich panels inducing barely visible damage. *Compos Struct* 2006.
- [۳۶] جاهد مطلق، حمیدرضا، نوبان. محمد رضا و اشراقی. محمد امین، ۱۳۸۳، "اجزاء محدود (ANSYS)" چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران.
- [۳۷] ANSYS User's Manual, 11th Version ANSYS, 2009.
- [۳۸] BUILDING COMPONENTS, PANELIZED, PREFABRICATED, READY-CUT, RELOCATABLE, MILITARY SPECIFICATION, 22 April 1998



[၃၅] <http://www.padtinc.com>, Website.

## Abstract

A honeycomb panel consists of an array of open hexagonal cells which their walls are perpendicular to face sheets although other panel sandwiches don't have these perpendicular walls. These structures have high flexibility per stiffness and strength per weight. Panel sandwiches, specially those, which made of Aluminum, considerably used in many engineering branches such as space, navy, overland and currently in building.

Original attempt of this thesis, is modeling behaviour of honeycomb panels by ANSYS software. To validate the proposed FE models, the test results obtained from other researchers were compared with the models results and very good agreement was found.

In this study, at first panel with details including the core dimensions, thickness and height of the core and face's thickness has been studied. Dimensions of panel looking at 1x3 meters was considered under the uniform and concentrated load at the center were analyzed. The constrain's ends of panel modeled hinged support, then the effect of pipe crossing along the panel's length was studied and under identical loading and constrain's compared with the conventional panel.

As the results of finite element was observed, flexural properties with increasing core's height substantially increased without much change in weight. It also increases the thickness of the core and face, flexural properties increased and reduced displacement, von Mises stress and strain in the panel. Models results indicated the maximum von Mises stress and strain of the middle of panel transmitted in cutting place on pipe crossed panel.

**Keywords:** sandwich panel, honeycomb structure, finite element analysis, nonlinear static analysis



**Shahrood University of Technology**

Faculty of Engineering

Civil Engineering Department

**A study on structural behavior of honeycomb  
panels by finite element method**

**Ahmad Ghasemi**

Supervisors:

**Dr. Ali Keihany**

**Dr. Fariborz Fariborzi**

Advisor:

**Dr. Ramin Amini**

July 2011