

لانه زنبوری

Honeycombs

دکتر مهدی باریکانی

مهندس حسین امیدیان

مرکز تحقیقات و توسعه علوم و تکنولوژی مواد پلیمری

واژه‌های کلیدی:

کامپوزیت، صفحات ساندویچ شده، لانه زنبوری

چکیده

در این مقاله ضمن معرفی صفحات ساندویچ شده، درباره بارامترهای مؤثر در طراحی این سازه بحث می‌شود. سپس با توجه به اهمیت و نقش لانه زنبوری در یک سازه ساندویچی، خواص، انواع، کاربردهای ساختاری و غیرساختاری و خصوصیات مکانیکی لانه زنبوری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مقدمه

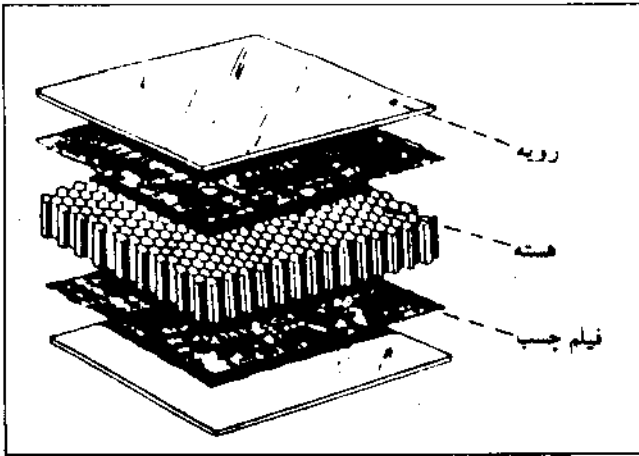
صفحات ساندویچی (*sandwich panels*) یکی از اولین شکل‌های سازه‌های کامپوزیتی هستند که در مقیاس وسیعی مصرف دارند. در واقع تمامی وسایل حمل و نقل هوایی از هواپیماهای مسافربری و هلیکوپترها گرفته تا هواپیماها و فضاپیماهای نظامی از این سازه‌ها بهره‌مندند. معمولاً در ساخت کشتیها، قطعات داخلی ناوهای دریایی، کشتیهای کوچک، مدل قالب، قطعات اتومبیل، وسایل ورزشی، مصالح ساختمانی، در، کابینت و بسیاری موارد دیگر نیز این سازه‌ها مصرف دارند.

گرچه استفاده از طرح ساندویچ در تولید قطعات سبک حامل بار از سال ۱۸۲۰ میلادی شروع شده ولی استفاده تجاری از آن، از ۱۱۰ سال بعد یعنی در سال ۱۹۳۰ به عمل آمده است. سرآغاز این حرکت، موفقیت در تولید تجاری چسبهای ساختاری (*structural adhesive*) بود که در این سال همزمان در انگلستان و ایالات متحده وارد بازار شدند [1].

ویژگیهای صفحات ساندویچی

یک صفحه ساندویچی از سه بخش تشکیل یافته است (شکل ۱):

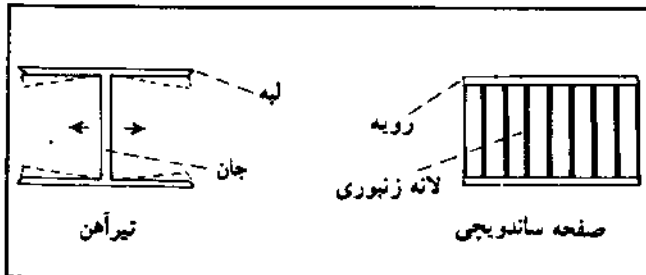
- دو رویه (*facing*) محکم و نازک.
- یک مغزه (*core*) سبک و ضخیم که مابین دورویه قرار گرفته و بار اعمال شده را از یک رویه به دیگری انتقال می‌دهد.
- فیلم چسب (*adhesive*) که قابلیت انتقال بارهای محوری و



شکل ۱ - اجزای یک صفحه ساندویچی [2]

برشی را از مغزه و به مغزه داراست.

در اثر اعمال بار خمشی یک رویه صفحه ساندویچی تحت فشار و رویه دیگر تحت کشش واقع می‌شود. بدین ترتیب رویه‌های یک صفحه ساندویچی همانند لبه‌های یک تیر آهن I شکل در مقابل بارهای خمشی مقاومت می‌کنند. مغزه ساندویچ هم، مانند جان تیر آهن در مقابل بارهای برشی مقاومت می‌کند و ضمن افزایش مقاومت خمشی سازه، تقویت مداوم و پیوسته رویه‌ها را باعث می‌شود (شکل ۲) [1, 6]. برای انجام این منظور، مغزه باید ضمن سخت بودن، سبک نیز باشد و در محیط کاربرد خواص یکسان و قابل پیش‌بینی از خود ارائه دهد. مسوادی که در سازه‌های ساندویچی مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارت‌اند از: چوب بالزا (*balsa*), اسفنج و شبکه‌های لانه زنبوری.



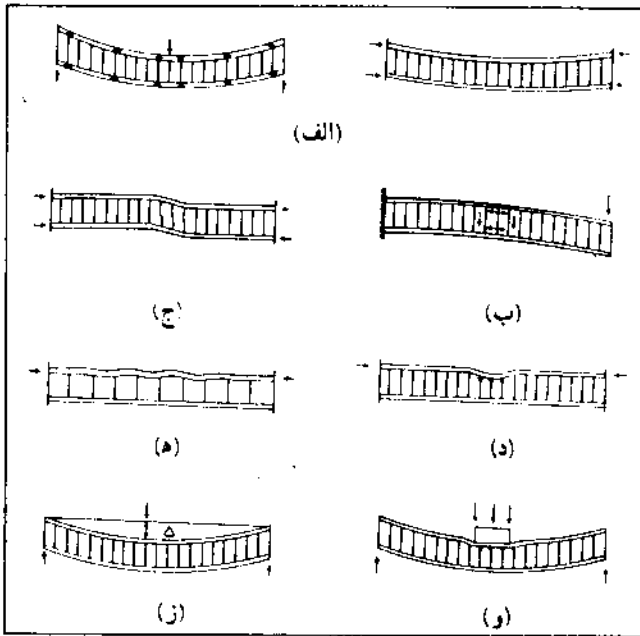
شکل ۲ - مقایسه صفحه ساندویچی و تیر آهن [2]

از چوب بالزا به طور گسترده‌ای در ساخت بدنه قایقهای بزرگ و کف هواپیما استفاده می‌شود. ویژگی این نوع مغزه سهولت کاربرد و دوام عالی محصول نهایی ساخته شده از آن می‌باشد. محصول تهیه شده از این نوع مغزه در مقایسه با دیگر مغزه‌ها از استحکام و مدول فشاری مطلوبی برخوردار است. استفاده از اسفنج نیز از گذشته معمول بوده و اکنون نیز

Key Words:

Composite, Sandwich panels, Honeycombs

تا از وقوع خمشهای بیش از حد جلوگیری شود (شکل ۳ ز).



شکل ۳- نیازهای اساسی صفحات ساندویچی در مقابل بار اعمال شده [2]
 - سهولت تراشکاری، شکل دهی و ساخت نیز باید در نظر گرفته شود.
 - در نظر گرفتن نوع و وزن چسب مصرفی نیز الزامی است. در سازه‌های بسیار سبک یک عامل بسیار مهم وزن چسب است.
 - از آنجا که در دماهای بالا تمایل به خزش در چسب زیادتیر می‌شود، دمای کاربرد نیز یک پارامتر کنترل کننده است و باید به آن توجه داشت.
 - رطوبت و ارتعاش هم از پارامترهای محیط کاربردی که باید در نظر گرفته شوند.

علاوه بر عوامل پیش گفته راههای اعمال بار نیز در طراحی از اهمیت خاصی برخوردار است که مسائل مهم در این زمینه عبارتند از:
 - خزش: مقاومت در مقابل خزش اساساً به میزان چسبندگی چسب بستگی دارد. خزش در این مورد میزان جابجایی، تغییر شکل یا کرنش بیش از حد چسب است که از کیفیت کشسان سازه یا سیستم چسب ناشی می‌شود. محیط کاربرد بسیاری از سازه‌ها، مقدار معینی از خزش را مجاز می‌کند در حالی که در برخی موارد خاص، خزش یک مشکل عمده محسوب می‌شود و باید از وقوع آن جلوگیری کرد. به عنوان مثال در بال هواپیما تغییر شکل ناشی از خزش، کارایی آئرو دینامیکی آن را تغییر می‌دهد. به طور کلی این تغییر شکل به عواملی نظیر دمای محیط، ضخامت و اندازه صفحه، جنس رویه، نوع چسب و در ضمن جرم مخصوص، اندازه سلول، آرایش (شکل سلول) و جنس مغزه وابسته است.
 - خستگی: خستگی مکانیکی یا صوتی مشکل عمده‌ای در سازه‌های ساندویچی محسوب نمی‌شود، چون چسب مصرفی این نوع بارها را جذب می‌کند. شکست ناشی از بارگذاری دینامیکی و استاتیکی مکرر به طور عمده در رویه یک صفحه ساندویچ شده اتفاق می‌افتد.

در حال گسترش است. معمولترین نوع اسفنج مورد استفاده اسفنج پی وی سی است که در صنعت هواپیماسازی از آن به عنوان کفی استفاده می‌شود. مشکل دستیابی به خواص یکنواخت در استفاده از یک آمیزه تا آمیزه دیگر و همچنین عدم دستیابی به استحکام بالا و یکنواخت مغزه و اتصال محکم رویه‌های فلزی یا پلاستیکی به مغزه از نقصهای این مورد است [1].
 موادی نظیر آلومینیم، فولاد زنگ نزن، الیاف آغشته به رزینهای گرماسخت، مثل گرافیت - اپوکسی، شیشه - اپوکسی، کولار - اپوکسی، شیشه - فنولی و همچنین چوب از پر مصرفترین مواد در ساخت رویه هستند.

چسبهای مصرفی در ساخت صفحات ساندویچی به دو دسته گرماسخت و تماسی (contact) تقسیم می‌شوند. از چسبهای نوع گرماسخت می‌توان به چسبهای آلیازی لاستیک - فنولی اشاره کرد که به شکل مایع یا قیلم در دسترس اند. چسبهای مایع حاوی مواد فرارند و تحت دمای بالا و فشار بخت می‌شوند. چسبهای گرماسخت ابتدا به صورت مایعی با گر انرژی کم، سطح مورد نظر را خیس می‌کنند و بعد در اثر بخت سخت می‌شوند. مهمترین چسبهای تماسی نیز، چسبهای لاستیکی اصلاح شده‌اند که سریع و آسان می‌چسبند و در ضمن ارزانند. چسبهای نوع گرماسخت زیر عنوان چسبهای ساختاری و چسبهای نوع تماسی تحت عنوان چسبهای غیر ساختاری دسته‌بندی می‌شوند. هرگاه جنس مغزه یا کاربرد نهایی سازه ساندویچی از نوع ساختاری نباشد استفاده از چسبهای ساختاری بی‌مورد خواهد بود [3, 4].

پارامترهای مؤثر در طراحی سازه‌های ساندویچی

در یک سازه ساندویچی، حالت تنشی که صفحه متحمل می‌شود به شکل سازه، اندازه و جهت اعمال بار بستگی دارد. موارد زیر از نیازهای اساسی در طراحی ساندویچها محسوب می‌شوند [1, 2, 5]:
 - انتخاب ضخامت مناسب رویه‌ها به منظور تحمل تنشهای کششی، فشاری و برشی القا شده از بار محیط الزامی است (شکل ۳ الف).

- مقابله با تنشهای برشی اعمال شده از بار محیط مستلزم استحکام کافی مغزه و چسب مصرفی است (شکل ۳ ب).
 - ضخامت و مدول برشی مغزه برای ممانعت از کمناش (buckling) ساندویچ باید کافی باشد (شکل ۳ ج).
 - مدول فشاری مغزه و رویه نیز باید برای ممانعت از چین خوردگی (wrinkling) رویه‌های تحت بار کافی باشد (شکل ۳ د).
 - مناسب بودن اندازه سلول مغزه برای جلوگیری از تا خوردن رویه‌ها الزامی است (شکل ۳ ه).
 - مغزه باید از استحکام فشاری کافی برخوردار باشد تا سازه در مقابل تنشهای فشاری القا شده از خمش مقاومت کند (شکل ۳ و).
 - سازه ساندویچی باید دارای سختی برشی و خمشی کافی باشد

— ضربه: افزایش ضخامت رویه و توزیع بار در سطح وسیعتر، بهترین راه حل افزایش مقاومت سازه در مقابل بار ضربه می باشد. بار ضربه، نیروی وارد شده به سازه در اثر ضربه است. در دماهای پایین این نوع بارگذاری یک مشکل عمده محسوب می شود و چسب مصرفی باید به گونه ای انتخاب گردد تا در دماهای پایین خاصیت انعطاف پذیری خود را حفظ کند.

— فشار: صفحه تحت بار فشاری، معمولاً مستعد کماتش به سمت داخل یا بیرون است. در صورتی که کماتش در جهت بیرون اتفاق افتد، استحکام کششی چسب مهمترین عامل است حال آنکه در کماتش به سمت داخل، استحکام مغزه عامل اصلی محسوب می شود.

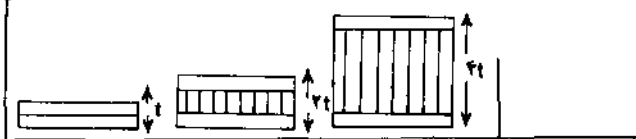
یکی از مهمترین عوامل مؤثر در ساخت سازه های ساندویچی، میزان چسبندگی رویه به مغزه است. خطوط اتصال چسب بین رویه و مغزه باید مشابه با مغزه متحمل بار گردد، به همین جهت باید استحکام برشی و کششی آن مشابه با مغزه باشد. اندازه سلول نیز یک متغیر مهم در انتخاب مغزه است. سلولهای کوچکتر استحکام خطوط اتصال رویه و مغزه را افزایش می دهند و از چین خوردگی رویه تحت بار فشاری به میزان قابل ملاحظه ای می کاهند.

آخرین پارامتر مورد توجه در طراحی سازه های ساندویچی وزن صفحه است که در این مورد وزن اجزاء توأمأ در نظر گرفته می شود [1, 3, 5]. با توجه به موارد پیش گفته و قیمت، لانه زنبوری شایسته ترین انتخاب برای مغزه در سازه های ساندویچی است. شکل ۴ به وضوح اهمیت استفاده از آن را در ساخت این سازه ها نشان می دهد [1, 2].

همان طور که در شکل نشان داده شده است، با افزایش ضخامت مغزه لانه زنبوری، بین دو رویه میزان سختی و استحکام به شکل تصاعدی افزایش می یابد، در صورتی که وزن سازه افزایش چندانی ندارد.

شبکه های لانه زنبوری از دیدگاه مهندسی

از دیدگاه یک طراح، لانه زنبوری ساده ای است ساختاری که از خواص بی نظیر آن در خلق محصولات جدید، اصلاح محصولات موجود و حل مشکلات طراحی می توان استفاده کرد. لانه زنبوری مجموعه ای از سلولهای شش ضلعی به هم چسبیده است و شکل ظاهری آن به یک برش



۱۰۰	۷۰۰	۳۷۰۰	سختی
۱۰۰	۳۵۰	۹۲۵	استحکام
۱۰۰	۱۰۲	۱۰۶	وزن

شکل ۴ - رابطه تغییر خواص و ضخامت [2].

عرضی از لانه زنبور عسل، کاملاً شباهت دارد. شکل هندسی خاص لانه زنبوری، از شش ویژگی اصلی برخوردار است که هر یک از آنها را می توان با خواص ذاتی موادی که در ساخت آن انتخاب می شوند تلفیق کرد. این ویژگیها عبارتند از [6]:

— وقتی از آن به عنوان مغزه در یک صفحه ساندویچی استفاده شود، سازه حاصل از بالاترین نسبت استحکام به وزن برخوردار خواهد بود. — به طور مشابه استفاده از لانه زنبوری به عنوان مغزه، بالاترین نسبت سختی به وزن را به سازه می دهد.

— مقاومت آن در برابر نیروهای فشاری یکنواخت و قابل پیش بینی است.

— بسته به نیاز محیط کاربرد از نظر خواص گرمایی، صوتی و هدایت سیال در مسیرهای خاص، قابل طراحی است.

— ساندویچ ساخته شده از آن تحت تنشهای دینامیکی از مقاومت عالی خستگی برخوردار است.

— نسبت سطح به حجم در این سازه بسیار بالاست.

مواد مورد استفاده در ساخت لانه زنبوری

برای ساخت لانه زنبوری از هر ماده ای به شکل ورقه نازک می توان استفاده کرد. لانه زنبوری از فلزات یا مواد غیر فلزی ساخته می شود. برای نوع فلزی از آلومینیم، فولاد زنگ نزن و نیکل و برای نوع غیر فلزی عموماً از پلاستیکهای تقویت شده با الیاف شیشه، کاغذ آرامید و کاغذ کرافت استفاده می گردد. از سایر مواد مصرفی در ساخت شبکه های لانه زنبوری می توان از سرب، مس، گرافیک و سرامیک نام برد [3, 4]. در حال حاضر بالغ بر ۵۰۰ نوع ماده اصلی در ساخت این شبکه ها مورد استفاده قرار می گیرد که از میان آنها می توان به موارد عمده کاغذ، آلومینیم، پلاستیکهای تقویت شده و کاغذ آرامید اشاره کرد.

— کاغذ: لانه زنبوری کاغذی ابتدایی ترین نوع لانه زنبوری است. از شکلهای اولیه آن در موارد تریبی استفاده می شده و در حال حاضر هم مورد مصرف است. مهمترین نوع کاغذ، کرافت است که برای اصلاح خواص مکانیکی و مقاومت آن در برابر رطوبت و قارچ به ۱۱ تا ۳۵ درصد رزین فنولی آغشته می شود. از این نوع مغزه در کاربردهای غیر هوایی و هنگامی که قیمت، عامل تعیین کننده باشد استفاده می گردد. کاربرد وسیع آن در ساخت وسایل تفریحی، در، دیوار، تیغه، کابینت و مشابه آنهاست [1].

— آلومینیم: در ساخت لانه زنبوری آلومینیمی از چهار نوع آلیاژ استفاده می شود. این آلیاژها عبارتند از [1]:

۳۰۰۳ — از کمترین استحکام در مقایسه با دیگر آلیاژها برخوردار است و به طور عمده از آن در کاربردهای غیر هوایی استفاده می شود. ۵۰۵۲ — متداولترین آلیاژ مصرفی در کاربردهای هوایی است که سطح آن با روکش ضد خوردگی پوشانده شده است.

۵۰۵۶ — محکمترین آلیاژ مصرفی در موارد هوایی است که همانند

۵۰۵۲ به روکش ضد خوردگی آغشته شده است.

T_p - ۲۰۲۴ - این آلیاژ هم ضمن همراه داشتن روکش ضد خوردگی، از بالاترین مقاومت گرمایی برخوردار است. ترکیب درصد آلیاژهای پیش گفته در جدول ۱ داده شده است.

جدول ۱ - ترکیب درصد آلیاژهای آلومینیم [7]

	۹۳/۳	۹۲/۶	۹۱/۹	۹۰/۸	Al
	۲/۵	-	-	-	Cu
	۱/۵	۵/۲	۲/۵	-	Mg
	۰/۶	۰/۱	-	۱/۲	Mn
	-	۰/۱	۰/۹	-	Cr

انجام فرایندهای لازم، کاغذ حاصل می‌شود. کاغذی که بدین ترتیب به دست می‌آید به شکل توده بوده و از خواص میانه الکتریکی و مکانیکی برخوردار است. با عبور از کلندر (calender) در دمای بالا، کاغذ حاصل از نظر مکانیکی قوی و انعطاف پذیر و از خواص بسیار مطلوب الکتریکی برخوردار می‌شود. در طول فرایند ساخت کاغذ، فلوک که از فیبرید بلندتر است خود را در جهت خروج کاغذ از ماشین آرایش می‌دهد، به همین علت تفاوت فاحشی در خواص مکانیکی نومکس در دو جهت یعنی جهت خروج کاغذ و جهت عمود بر آن حاصل می‌شود [8]. مقایسه انواع لانه زنبوری در جدول ۲ ارائه شده است.

خصوصیات مستقل لانه زنبوری

با وجود آنکه مواد مصرفی در ساخت لانه زنبوری متنوع اند و خواص فیزیکی و مکانیکی لانه زنبوری به شدت تحت تأثیر مواد مصرفی است، با این حال چند خاصیت مهم لانه زنبوری مربوط به شکل هندسی خاص آن است و ارتباطی به مواد سازنده ندارد. این موارد عبارتند از:

- جرم مخصوص: خواص مکانیکی لانه زنبوری با افزایش جرم مخصوص آن افزایش می‌یابد.

- شکل سلول: انواع لانه زنبوری ناهمسانگردند و به همین علت خواص به دست آمده در هر جهت باید با سایر اعمال شده در آن جهت سازگار باشد. معمولترین شکلهای لانه زنبوری عبارتند از:

الف - شش ضلعی (hexagonal): شبکه لانه زنبوری با ساختار شش ضلعی معمولترین شکل لانه زنبوری است که در مورد انواع فلزی و غیرفلزی قابل اجراست. ساختار شش ضلعی این نوع شبکه در شکل ۵ الف نشان داده شده است.

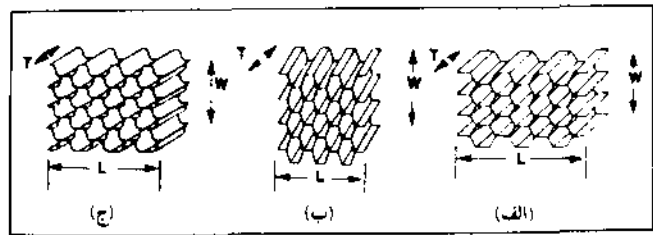
ب - فراگسترده (overexpanded): حالت بیش از حد کشیده شده شبکه شش ضلعی در جهت W است (شکل ۵ ب). در خصوص شکل

- پلاستیکهای تقویت شده: از این نوع مغزه در مواردی که مقاومت بالای گرمایی و رسانایی ناچیز مطرح باشد استفاده می‌شود. شبکههای پلاستیکی تقویت شده با شیشه و شبکههای آلومینیمی، با جرم مخصوص مسای، از استحکام برشی و مقاومت فشاری قابل مقایسه‌ای برخوردارند. با وجود این، چون منول برشی محصولات آلومینیمی بیش از محصولات تقویت شده با الیاف شیشه است، از شبکههای آلومینیمی به‌طور عمده در کاربردهای صرفاً ساختاری استفاده می‌شود. وقتی دمای محیط کاربرد عامل تعیین کننده در انتخاب ماده است، این نوع مغزه جایگزین آلومینیم می‌گردد. دوام و پایداری شبکههای پلاستیکی تقویت شده در دماهای بالاتر از 204°C به مراتب بالاتر از آلومینیم است. رزینهای پلی استر، فنولی و پلی ایمید پرمصرفترین رزینهای مصرفی در ساخت این نوع شبکهها هستند.

- کاغذ آرامید: این نوع لانه زنبوری بسیار چقرمه و مقاوم در برابر انواع تخریبهاست که بر پایه کاغذ کاملاً سنتزی نومکس (Nomex) ساخت کمپانی دوپان تولید می‌شود. خواص مکانیکی این ماده به‌عنوان یک مغزه ساختاری قدری کمتر از آلومینیم است. این محصول بعد از آلومینیم بیشترین میزان مصرف در صنایع هواپیماسازی را به خود اختصاص می‌دهد. به علت قیمت بالای این نوع مغزه، کاربرد آن به‌طور عمده به صنایع هوایی محدود می‌گردد [1]. از نظر شیمیایی، کاغذ نومکس یک پلی آمید آروماتیک است که عموماً به‌عنوان آرامید شناخته می‌شود. ساختار مولکولی این ماده از پایداری خاصی برخوردار بوده و خواص بی نظیر آن نیز به همین علت است. این کاغذ از دو شکل مختلف پلیمر تولید می‌شود. ذرات کوچک بستر لینی یعنی فیبریدها، به‌طور مستقیم از پلیمر و تحت شرایط برش بدست می‌آیند. این ذرات با الیاف کوتاهی به نام فلوک، که از الیاف یکسره تهیه شده در فرایند ریسندگی بسریده می‌شوند، مخلوط می‌گردند. پس از اختلاط دو جزء در یک محلول آبی و

جدول ۲ - مقایسه انواع لانه زنبوری [1, 9, 10, 11, 12, 13]

نوع لانه زنبوری	خواص مکانیکی	خواص الکتریکی	خواص حرارتی	خواص شیمیایی	خواص فیزیکی
شش ضلعی	عالی	عالی	عالی	عالی	عالی
فراگسترده	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
شش ضلعی	عالی	عالی	عالی	عالی	عالی
فراگسترده	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
شش ضلعی	عالی	عالی	عالی	عالی	عالی
فراگسترده	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
شش ضلعی	عالی	عالی	عالی	عالی	عالی
فراگسترده	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
شش ضلعی	عالی	عالی	عالی	عالی	عالی
فراگسترده	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط



شکل ۵ - ساختارهای معمول لانه زنبوری: (الف) شش ضلعی، (ب) فراگسترده، (ج) انعطاف پذیر [9]

فراگسترده لانه زنبوری، ایجاد انحنا یا شکل دهی در جهت L تسهیل می‌گردد. در نتیجه این فرایند، خواص برشی در مقایسه با شبکه شش ضلعی معمولی در جهت W تقویت و در جهت L تضعیف می‌شود.

ج - انعطاف پذیر (*flexible*): این نوع شبکه برای ساختن شکل‌های پیچیده مناسب است (شکل ۵ ج). در مقایسه با نوع شش ضلعی، ساختار انعطاف‌پذیر در یک جرم مخصوص مساوی، از استحکام برشی بالاتری برخوردار است. برای ساخت این نوع شبکه از کلیه مواد مصرفی در ساخت شبکه‌های شش ضلعی می‌توان استفاده کرد.

با وجود آنکه در پاسخ به نیازهای ویژه، شکل‌های هندسی خاصی از شبکه قابل ساخت و طراحی است ولی شکل‌های پیش گفته و نوع لوله‌ای (مختص شبکه‌های آلومینیومی) تقریباً تمامی نیازهای لازم در طراحی را برآورده می‌سازند.

— اندازه سلول: گرچه اندازه سلول در ارتباط با مواد مصرفی به عنوان مغزه برای عمده خواص مکانیکی یک متغیر فرعی محسوب می‌شود ولی در تثبیت درجه چسبندگی مغزه به رویه و در تعیین مقادیری از تنش که طی آن کمانش و چین‌خوردگی اتفاق می‌افتد، عامل اصلی است.

— ضخامت: اطلاعات درباره خواص برشی و فشاری یک نمونه خاص لانه زنبوری را تنها هنگامی می‌توان به دست آورد که ابتدا روش‌های آزمون به دقت مشخص و کنترل شوند و آن‌گاه ضخامت واقعی مغزه مورد آزمون واقع شود. استحکام برشی لانه زنبوری با ضخامت مغزه تغییر می‌کند. طی آزمون‌های برشی، لانه زنبوری تنها در معرض نیروهای برشی نبوده و ترکیبی از بارهای برشی و فشاری را تحمل می‌کند. در مقایسه با مغزه‌های با ضخامت کمتر مغزه‌های ضخیمتر از استحکام برشی کمتری برخوردارند [10].

لانه زنبوری به جهت مصارف ساختاری یک محصول شناخته شده است. اما آن را می‌توان در کاربردهای غیر ساختاری هم به‌طور گسترده مورد استفاده قرار داد. بنابراین کاربردهای لانه زنبوری را می‌توان تحت دو عنوان کلی ساختاری و غیرساختاری دسته‌بندی کرد.

کاربردهای ساختاری

وقتی لانه زنبوری بین دو رویه یک صفحه ساندویچی قرار

می‌گیرد سازه حاصل از دو مشخصه عمده، یعنی نسبت بالای استحکام و سختی به وزن، برخوردار می‌شود. در ساخت بدنه بسیاری از متحرک‌های هوایی، دریایی و زمینی مثل موشک، فضاپیما، هواپیما، کشتی، قطار و اتومبیل به میزان قابل ملاحظه‌ای از خواص ساختاری بی‌نظیر شبکه‌های لانه زنبوری استفاده می‌شود. این شبکه‌ها بیش از آنکه به‌عنوان یک ماده جدید ساختاری محسوب شوند، از دید طراح محصول به‌عنوان ابزاری جدید در طراحی مورد توجه قرار دارند.

سازه‌های ساندویچی به علت انعطاف‌پذیری و تنوع زیاد، توانایی حل بسیاری از مشکلات در طراحی را دارند. نیازهای خاص طراحی را می‌توان با انتخاب ضخامت مناسب، جرم مخصوص و نوع آرایش مغزه برآورده کرد. در چنین کاربردهایی باید لانه زنبوری از خواص مشخصی برخوردار باشد که این خواص عبارت‌اند از:

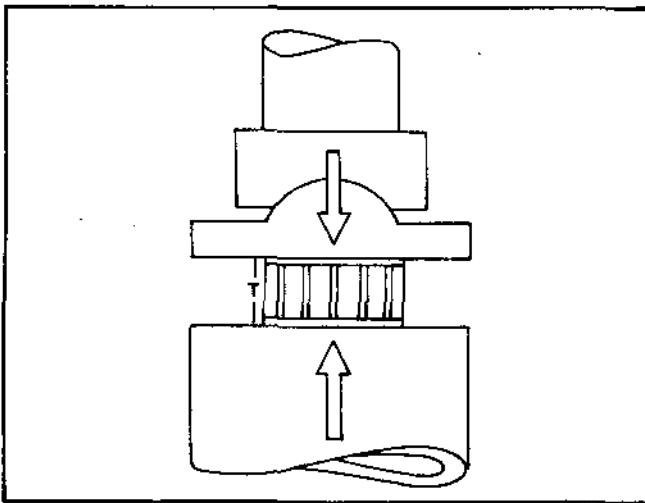
— گرمایی: شبکه‌های لانه زنبوری برای دامنه وسیعی از دمای کاربرد طراحی و تولید می‌شوند. انواع آلومینیومی ساخته شده از آلیاژ ۲۰۲۴ برای دمای کاربرد 215°C قابل استفاده است. برای دماهای بالاتر، از آلیاژهای نیکل و فولاد زنگ‌نزن می‌توان استفاده کرد. لانه زنبورهای ساخته شده از رزین‌های فتولی تقویت شده با الیاف شیشه از پایداری گرمایی عالی برخوردارند و در طیف وسیعی از دماهای زیر صفر تا 204°C قابل استفاده‌اند. رزین‌های تقویت‌شده پلی‌ایمید نیز دمای 260°C را در کاربردهای بلندمدت و 315°C را در کاربردهای کوتاه‌مدت به خوبی تحمل می‌کنند. خواص مکانیکی خوب لانه زنبورهای غیر فلزی، استفاده گسترده از آنها را در قسمتهایی از ساختمان موشک و هواپیما که در این دماها عمل می‌کنند موجب شده است. برای دماهای بسیار بالاتر می‌توان از لانه زنبوری سرامیکی استفاده کرد.

— الکتریکی: خواص الکتریکی و مکانیکی لانه زنبورهای ساخته شده از پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف شیشه، کاربرد این مواد را در ساخت رادوم (*radome*)، پوشش محافظ رادار هواپیما، ممکن کرده است. در این مورد سازه ساندویچی باید از مغزه‌ای ساخته شود که ضمن داشتن استحکام بالا در مقابل عبور امواج شفاف باشد. ثابت دی‌الکتریک این مواد بسیار پایین و در حدود $1/04$ تا $1/28$ است. با افزایش جرم مخصوص لانه زنبوری، ثابت دی‌الکتریک نیز افزایش می‌یابد.

— خستگی: در حال حاضر در هواپیماهای جت که در معرض ارتعاشات پرانرژی هستند، صفحات ساندویچ شده از لانه زنبوری جانشین سازه‌های پرچ شده گردیده‌اند. با توزیع یکسان بار در سطح این سازه‌ها، تمرکز تنش به حداقل مقدار خود می‌رسد و عمر مفید کاری به چندین برابر افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه مقاومت خستگی یکی از شاخص‌های حساس به طراحی یک سازه می‌باشد، مطالعات انجام شده حاکی از مقاومت بالای سازه‌های ساندویچی در مقابل این تنش بوده است.

— سختی: سختی نیز همانند مقاومت خستگی یکی از ویژگی‌های

استحکام فشاری حالت پایدار، مقدار استحکام فشاری نهایی لانه زنبوری برحسب psi بوده و این در حالی است که بارگذاری در جهت T اجرا شود. لانه زنبوری در شکل ساندویچ شده و در حالی که لبه سلولهای آن توسط یک ماده پلاستیکی یا اسفنج پایدار می شود مورد آزمون قرار می گیرد. مقدار مدول برای این حالت از شیب قسمت خطی منحنی تنش - کرنش به دست می آید. در حالت دوم، استحکام فشاری لانه زنبوری از همین تعریف برخوردار بوده ولی آزمون در حالی اجرا می شود که لبه سلولهای لانه زنبوری تثبیت نشده اند. روش آزمون مطابق شکل ۶ است. ابعاد نمونه استاندارد و برای آزمایش در هر دو حالت پایدار و ناپایدار یکسان است و تنها برحسب نوع مواد لانه زنبوری متفاوت می باشد. ابعاد L و T برای نوع آلومینیومی به ترتیب 7.162cm ، 7.162cm و 1.58cm و برای نوع غیر فلزی به ترتیب 7.162cm ، 7.162cm و 1.27cm می باشد. سرعت بارگذاری معمولاً 0.05 سانتی متر بر دقیقه است و ثبت نتایج به شکل منحنی بار برحسب خمش خواهد بود.



شکل ۶ - چگونگی اعمال بار در آزمون فشاری [9]

ب - خواص برشی در دو جهت L و W : استحکام برشی لانه زنبوری، تنش نهایی برحسب psi و در شرایطی است که بار برشی موازی با صفحه $W-L$ اعمال شود. مدول برشی لانه زنبوری، شیب قسمت خطی اولیه منحنی تنش - کرنش می باشد. مقادیر به دست آمده بستگی به جهت بارگذاری دارند. برای لانه زنبوری شش ضلعی، این مقادیر در جهت L بیشترین و در جهت W کمترین خواهند بود. روش آزمون برش (شکل ۷) برش صفحه ای ($plate\ shear$) است که در دو حالت فشاری و کششی قابل اجرا می باشد. ابعاد نمونه استاندارد برای لانه زنبوری آلومینیومی معمولاً $1.58\text{cm} \times 0.1\text{cm} \times 17.78\text{cm}$ و برای لانه زنبوری غیر فلزی $1.27\text{cm} \times 0.1\text{cm} \times 15.24\text{cm}$ می باشد. برای اجرای آزمون، نمونه را به دو صفحه با ضخامت 1.27cm می چسبانند. سرعت بارگذاری معمولاً 0.05 سانتی متر بر دقیقه است. از آنجا که برای برخی مواد غیر فلزی،

حساس به طراحی است و صفحات ساندویچ شده از لانه زنبوری، امکان طراحی سبکترین سازه ها را با کمترین مقدار خمش در حین کاربرد فراهم می سازند. در صورتی که سطوح باز تابش بسیار صاف و یکنواخت با کمترین مقدار خمش و بیشترین حساسیت مورد نیاز باشند، استفاده از این سازه ها در طراحی بهترین و مطلوبترین روش خواهد بود. از این خاصیت می توان در کاربردهای نظیر ساخت پوشش محافظ رادارهای زمینی و صفحات خورشیدی بهره جست.

- پایداری محیطی: از آنجا که لانه زنبوری تمامی خواص فیزیکی ماده سازنده خود را نشان می دهد، بنابراین در مصارف ساختاری و غیر ساختاری انتخاب ماده مناسب براساس نوع کاربرد صورت می گیرد. مثلاً برای ایجاد مقاومت عالی در برابر خوردگی، در سازه های لانه زنبوری آلومینیومی از آلومینیم آغشته شده به روکش ضد خوردگی استفاده می شود. در حال حاضر انواع کاغذ و فیلم که در برابر طیف وسیعی از مواد نظیر اسیدها و بازها مقاومت می کنند در دسترس قرار دارند [6].

کاربردهای غیر ساختاری

- جذب انرژی مکانیکی: برای این منظور معمولاً از اسفنج جامد استفاده می شود ولی این دسته از مواد به علت انعطاف پذیری، داشتن خواص فتری و تولید رزونانس مانع از جذب انرژی مکانیکی می شوند. این مشکل در لانه زنبوریهای ساخته شده از آلومینیم، آرامید و فولاد زنگ نزن وجود ندارد. علت جذب انرژی مکانیکی توسط لانه زنبوری، خرد شدن تحت تنش ثابت است. به همین سبب لانه زنبوری به عنوان یک جاذب فوق العاده مؤثر انرژی مکانیکی مصرف می شود [6, 14].

- یکسورانی: آرایش موازی سلولهای لانه زنبوری راندن جریان سیال به یک جهت خاص را ممکن می سازد. به همین جهت با در نظر گیری یک آرایش هندسی خاص لانه زنبوری، ضمن دستیابی به حداقل افت فشار و کاهش اغتشاش جریان می توان به سرعتهای بالاتری از جریان سیال نیز دست یافت [6].

- سپر امواج رادیویی: از لانه زنبوری فلزی به شکل گسترده در ساخت دستگاههایی استفاده می شود که با امواج رادیویی ارتباط دارند. اندازه سلول و ضخامت لانه زنبوری بستگی به نوع کاربرد دارد.

- مبدل گرمایی: نسبت بسیار بالای سطح به حجم در لانه زنبوریها که امکان تبادل گرما را به خوبی فراهم می آورد، کاربرد آنها را در ساخت مبدلهای گرمایی نیز گسترش داده است. مواد مصرفی برای این منظور عموماً آلیاژهای فولاد زنگ نزن و آلومینیم می باشند که به طور عمده در ساخت میردهای بزرگ صنعتی به کار برده می شوند.

خواص مکانیکی انواع لانه زنبوری

الف - فشاری: اطلاعات مربوط به خواص فشاری لانه زنبوری معمولاً در دو حالت پایدار ($stabilized$) و ناپایدار ($bare$) گزارش می شود.

نتیجه گیری

صفحات ساندویچی از سه بخش مختلف رویه، مغزه و چسب تشکیل شده اند که هر یک از ویژگیهای خاصی برخوردار بوده و خواص پیش بینی شده ای را به محصول نهایی می دهند. طراحی یک سازه ساندویچی به پارامترهای چندی بستگی دارد که در نظر گرفتن آنها از نیازهای اساسی است. اهم این پارامترها عبارت اند از: ضخامت رویه، استحکام مغزه و چسب، ضخامت و مدول برشی مغزه، مدول فشاری مغزه و رویه، اندازه سلول مغزه، نوع و وزن چسب مصرفی و نهایتاً مقاومت در مقابل خزش، خستگی، ضربه و فشار.

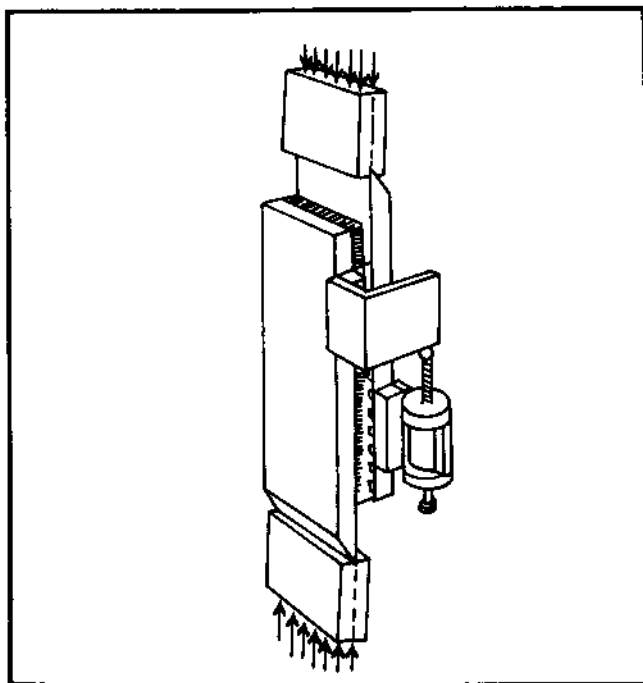
مواد مصرفی عمده در ساخت شبکه های لانه زنبوری جهت مصارف صنایع هوا - فضا، کاغذ آرامید و آلومینیم می باشند. همچنین در مصارف دیگر می توان از کاغذ کرافت، الیاف شیشه و پلاستیکهای تقویت شده نیز بهره جست.

از نکات قابل توجه در ساخت لانه زنبوری، جرم مخصوص، شکل سلول، اندازه سلول و ضخامت آن می باشد که این موارد بر حسب نوع نیاز و کاربرد متغیرند. کساربردهای لانه زنبوری به دو دسته ساختاری و غیرساختاری تقسیم بندی می شوند که در هر مورد، بر حسب نوع خواص مورد نظر از محصول نهایی، مواد اولیه مناسب انتخاب و به کار گرفته می شوند.



REFERENCES

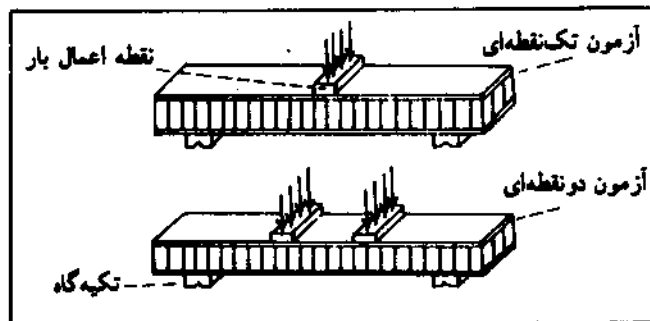
- [1] Lubin G., "Handbook of Composites", Van Nostrand Reinhold, 1981
- [2] "TSB 124", Hexcel Brochure, 1988.
- [3] Encyclopedia of Polymer Science and Engineering," Wiley Interscience, Vol. 71, 1986.
- [4] "Encyclopedia of Polymer Science and Technology", Vol. 7, 1969.
- [5] Cagle C., "Adhesive Bonding", Mc Graw-Hill, 1968.
- [6] "Honeycombs", Hexcel Brochure, 1988.
- [7] Durney, L. J "Handbook of Electroplating", Van Nostrand Reinhold, 1984.
- [8] "Nomex", Dupont Brochure.
- [9] "TSB 120", Hexcel Brochure, 1967.
- [10] "D. S. (3000)", Hexcel Brochure, 1988.
- [11] "D. S. (4000)", Hexcel Brochure, 1988.
- [12] "D. S. (1040)", Hexcel Brochure, 1988.
- [13] "D. S. (3100)", Hexcel Brochure, 1988.
- [14] "TSB 122", Hexcel Brochure, 1986.
- [15] Levy S., Dubois J. H., "Plastics Product Design Engineering Handbook", Chapman and Hall, 1984.
- [16] Cagle C, "Handbook of Adhesive Bonding", Mc Graw-Hill 1973.
- [17] "TSB 113", Hexcel Brochure, 1980.
- [18] "D. S. (2100)", Haxcel Brochure, 1988.



شکل ۷ - نحوه اعمال بار در آزمون برش صفحه ای [9]

منحنی تنش - کرنش کاملاً خطی نیست (به ویژه در دماهای بالا)، بنابراین مدول برشی از طریق اندازه گیری شیب قسمت خطی اولیه منحنی تنش - کرنش به دست می آید.

گرچه برای دستیابی به نتایج واقعی مدول و استحکام برشی لانه زنبوری، آزمون برش صفحه ای ترجیح داده می شود ولی در ارزیابی کارایی کلی صفحات ساندویچی و در مواردی که مغزه ضخیم و سنگین باشد، آزمون خمش (شکل ۸) مورد استفاده قرار می گیرد. مقادیر به دست آمده از این آزمون به ضخامت و جنس رویه و شرایط بارگذاری به شدت وابسته است. ابعاد استاندارد نمونه $20.32\text{cm} \times 7.62\text{cm}$ بوده و فاصله بین دو تکیه گاه در هر دو نوع بارگذاری تک نقطه ای و دو نقطه ای 15.24cm است. فاصله بین نقاط اعمال بار در حالت دو نقطه ای 1.27cm فاصله دو تکیه گاه می باشد. مقادیر به دست آمده از این روش در مقایسه با مقادیر برش صفحه ای بیشتر است [9].



شکل ۸ - نحوه اعمال بار در آزمون خمش [9]