

Effect of Rigid Polyurethane Foam Core Density on Flexural and Compressive Properties of Sandwich Panels with Glass/Epoxy Faces

S. Nemati¹, J.E. Jam*², and M.H. Beheshty³

1. Composite Materials and Technology Center, Malek Ashtar University of Technology,
P.O. Box: 15875-1774, Tehran, Iran

2. Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14965-115, Tehran, Iran

Received 13 May 2009, accepted 20 April 2010

ABSTRACT

Sandwich panels as composite materials have two external walls of either metallic or polymer type. The space between these walls is filled by hard foam or other materials and the thickness of different layers is based on the final application of the panel. In the present work, the extent of variation in core density of polyether urethane foam and subsequent flexural and compressive changes in sandwich panels with glass or epoxy face sheets are tested and investigated. A number of hard polyether urethane foams with different middle panel layers density 80-295 kg/m³ are designed to study the effect of foam density on mechanical properties including flexural and compressive properties. Flexural and compressive test results show that increased core density leads to improved mechanical properties. The slope of the curve decreases beyond density of 235 kg/m³. The reason may be explained on the limitation of shear intensity in increasing the mechanical properties. In this respect an optimum density of 235 kg/m³ is obtained for the system under examinations and for reaching higher strength panels, foams of different core materials should be selected.

Key Words:

sandwich panels,
core, face,
rigid polyether urethane
foam, failure

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jejam@gmail.com

اثر چگالی لایه میانی اسفنج پلی یورتان سخت بر خواص خمشی و فشاری دیواره‌های ساندویچی با جدارهای اپوکسی - شیشه

سعید نعمتی^۱، جعفر اسکندری جم^{۱*}، محمد حسین بهشتی^۲

۱- تهران، دانشگاه مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، مرکز آموزشی تحقیقاتی مواد مرکب،

صندوق پستی ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵

۲- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۱۵-۱۴۹۶۵

دریافت: ۸۸۲/۲۳، پذیرش: ۸۹/۳۱

چکیده

دیواره‌های ساندویچی از کاربردهای مواد کامپوزیتی اند. این دیواره‌ها دارای دو جداره خارجی (فلزی یا پلیمری) هستند که حد فاصل دو جداره، از یک اسفنج سخت (یا ماده دیگر) پر شده است و بنابر کاربری قطعه، در ضخامت‌های مناسب تهیه می‌شوند. در این پژوهش، دیواره‌های ساندویچی دارای جدارهای شیشه - اپوکسی و لایه میانی اسفنج پلی اتر یورتان سخت، از نظر تغییر چگالی اسفنج لایه میانی و تغییراتی که بدین وسیله در خواص خمشی و فشاری آنها ظاهر می‌شوند، بررسی شده‌اند. قالب‌گیری‌های متعدد از اسفنج پلی اتر یورتان سخت به عمل آمده تا با ثابت نگه داشتن آمیخته و تغییر مقدار چگالی اسفنج، لایه‌های میانی دیواره با چگالی‌هایی در گستره ۸۰ تا 295 kg/m^3 تهیه شوند. سپس، نقش چگالی بر تغییرات خواص مکانیکی در دو حوزه خواص خمشی و فشاری بررسی شده است. مطالعه نتایج آزمون‌های خمشی و فشاری نشان می‌دهد، خواص مکانیکی با زیاد شدن چگالی لایه میانی تا حدی معین، ارتقا می‌یابند. ولی، پس از رسیدن به چگالی 225 kg/m^3 منحنی تغییر شیب داده و از شدت وابستگی دیواره به چگالی اسفنج لایه میانی کاسته می‌شود. دلیل این پدیده را می‌توان در شدت یافتن نیروی برش و عدم قابلیت اسفنج در بروز خواص مکانیکی بهتر، حتی در چگالی بیشتر بیان کرد. به عبارت دیگر، چگالی 225 kg/m^3 حد بالای منطقی استفاده از لایه میانی از جنس اسفنج سخت پلی اتر یورتان است و در حالت نیاز به استحکام بیشتر استفاده از سایر مواد جای‌گزین دیگر با خواص بهتر توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی

دیواره‌های (صفحات) ساندویچی،
لایه میانی، جداره،
اسفنج پلی اتر یورتان سخت،
شکست

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

پس از جنگ جهانی دوم، سازه‌های ساندویچی از نظر سیر مطالعاتی و ساخت، در راستای پیش‌رفت طرح‌های هوافضا، دریایی و ساختمان‌سازی از آهنگ رشد بسیار مطلوبی برخوردار بوده‌اند. به نظر می‌رسد، شروع به کار و طراحی سازه‌های ساندویچی برای تولید قطعات سبک به ویژه در امر حمل و نقل از سال ۱۸۲۰ آغاز شده باشد، اما تجارت عادی این مواد به یک صد و ده سال پس از آن موکول شد [۱]. در سال‌های اخیر، صنایع هوافضا این فناوری را برای ساخت بسیاری از قطعات خود انتخاب کرده‌اند. تقریباً در همه هواپیماها، هلیکوپترها، وسایل حمل و نقل نظامی، ساختمان، حمل و نقل دریایی، شناورهای دریایی، بخش‌های داخلی ناوهای جنگی، بدنه قایق‌های کوچک، کرجی‌ها، کانتینرها، سقف‌های جابه‌جا شونده، برخی از قطعات پارک‌های کودک، وسایل اسکی، دیوارهای جداکننده سالن‌ها (پارتیشن)، درها، کارگاه‌ها، سردخانه‌ها و کابینت‌ها به طور بسیار گسترده از سازه‌های ساندویچی استفاده می‌شود. صاحبان صنایع خودروسازی با استفاده از این فناوری در صدد سبک کردن محصولات خود به منظور کاهش مصرف سوخت و آلودگی هستند [۲].

ساختارهای ساندویچی متجاوز از چهل سال است که به دلیل سبکی وزن، سفتی خمشی زیاد و خواص خستگی مطلوب، در ساخت قطعات و بخش‌های مختلف هواپیما مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳]. سه نوع اسفنج پلی‌اتر یورتان که دارای رفتارهای مکانیکی الاستومری، کشسان - پلاستیک و شکننده بودند، توسط Gibson و Ashby از نظر بررسی خواص فشاری مطالعه شدند و مناطق مختلف هر یک از منحنی‌ها (کشسان، سطح و افزایش) را مشخص کردند. آنها به این نتیجه رسیدند، افزایش چگالی اسفنج لایه میانی موجب ازدیاد مدول یانگ، افزایش استحکام فشاری و تنش ناحیه مسطح و کاهش کرنش در ناحیه تراکم بخش پایانی منحنی می‌شود [۴].

صادقی و همکاران، ضمن مقایسه چند مدل نظری پیش‌بینی خواص خمشی و فشاری با نتایج تجربی اعلام کردند، در آزمون خمشی سه نقطه‌ای دیواره‌های ساندویچی دارای جداره‌های شیشه - اپوکسی و لایه میانی اسفنج پلی‌یورتان، نظریه پیش‌بینی (Abaqus) در ناحیه کشسان با منحنی نتایج عملی کاملاً منطبق است و در سایر نواحی نیز بسیار نزدیک به نتایج عملی رفتار می‌کند. ضمن آن که تغییر سرعت بارگذاری (شبه ایستا) اثر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار خمشی دیواره‌های ساندویچی ایجاد نمی‌کند. افزایش مدول لایه میانی اسفنجی و جداره‌های کامپوزیتی موجب افزایش استحکام در برابر بارهای خمشی وارد بر دیواره ساندویچی می‌شوند. اما، افزایش ضخامت لایه میانی باعث شکست ساختار دیواره در مقدار خمش کمتر می‌شود [۵].

میرزاپور و همکاران، دیواره‌های ساندویچی با مشخصات لایه میانی اسفنج پلی‌اتر یورتان سخت و جداره‌های شیشه - اپوکسی را زیر بار خمشی سه نقطه‌ای قرار دادند و چسبندگی لایه میانی به جداره‌ها را در چهار شرایط مختلف، جداره‌ها در دو حالت خیس و خشک در دو دمای قالب‌گیری (دمای محیط و 70°C) بررسی کردند. تحلیل نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، با افزایش چسبندگی بین لایه میانی و جداره‌ها می‌توان ساختار ساندویچی دارای خواص خمشی بسیار بهتر به دست آورد. ضمن آن که با بهبود خواص خمشی دیواره، شیوه شکست نمونه‌ها نیز تغییر می‌کند [۶]. سه نوع دیواره ساندویچی دارای لایه میانی اسفنجی با سرعت کرنش شبه پویا (1000 s^{-1}) در جهت ضخامت توسط Mahfuz و همکاران زیر آزمون فشاری قرار گرفتند. مشاهده شد، شکست فشاری به طور مستقیم با چگالی اسفنج لایه میانی متناسب است [۷]. امروزه، پژوهش‌های متنوع و گسترده‌ای در زمینه سازه‌های ساندویچی انجام می‌گیرد. دلیل تداوم این امر مشکلات اساسی است که در هنگام استفاده از آنها بروز می‌کند. از جمله این معضلات می‌توان به اتصال جداره و لایه میانی، تهیه لایه میانی، مدول، استحکام و پایداری کافی اجزای تشکیل‌دهنده دیواره، پیدا کردن روش‌های مناسب برای بررسی و رفع نقایص این سازه‌ها و بالاخره تلاش برای ارتقای خواص و کاهش هزینه‌ها اشاره کرد [۶].

در این مقاله، نقش تغییر چگالی لایه اسفنجی بر خواص فشاری و خمشی دیواره‌های دارای لایه میانی اسفنج سلول بسته پلی‌اتر یورتان سخت مطالعه شده است. محدوده نیروهای مجاز وارد بر دیواره‌ها متناسب با چگالی آنها معین شده و شیوه‌های شکست آنها نیز مشخص شده است. اسفنج پلی‌اتر یورتان سخت سلول بسته متناسب با چگالی آن قابلیت تحمل خواص فشاری و خمشی معینی را دارد. بر اساس آزمون‌های انجام شده حد بالایی آن چگالی 235 kg/m^3 است، در حالت لزوم استفاده از اسفنج لایه میانی با خواص مکانیکی بیشتر یا چگالی بیشتر از 235 kg/m^3 اسفنج پلی‌اتر یورتان سخت پیشنهاد نمی‌شود و لازم است از مواد جای‌گزین لایه میانی دیگر با خواص مکانیکی بهتر از جنس اسفنج PVC یا پلی‌متاکریل‌ایمید (PMI) استفاده شود که از خواص مکانیکی بهتری برخوردارند.

دیواره ساندویچی

هر دیواره ساندویچی از سه بخش اصلی تشکیل شده است که عبارتند از: جداره یا پوسته خارجی قطعه، لایه میانی یا هسته و چسب بین جداره و لایه میانی. اجزای تشکیل‌دهنده این ماده کامپوزیتی به تنهایی ضعیف و انعطاف‌پذیرند، اما هنگامی که در ترکیب این ساختار قرار می‌گیرند، محصولی محکم، سخت و سبک به دست می‌آید [۸].

می‌گیرد، سفتی خمشی کل کامپوزیت به علت تقسیم سفتی به دو جداره و لایه میانی پرکننده بین دو جداره که باعث تشکیل ساختار ساندویچی می‌شود، افزایش می‌یابد [۱۲]. نظریه‌های مهندسی نشان می‌دهند، سفتی خمشی هر نوع دیواره ساندویچی با توان دوم ضخامت آن متناسب است [۱۳]. طراحی و پیش رفت دیواره‌های ساندویچی معمولاً از دو مسیر اصلی پی‌گیری و تداوم می‌یابد.

اولین محور طراحی، کاربری‌های نظامی و هوافضا هستند که در این عرصه اولویت با دیواره‌های ساندویچی دارای لایه میانی لانه زنبوری است. دومین محور اصلی طراحی و کاربردی، ساختارهای ساندویچی مورد استفاده در صنایع دریایی هستند که در ساخت این نوع مواد کامپوزیتی، لایه میانی از جنس اسفنج یا چوب بالسا انتخاب می‌شود. با وجود آن که نسبت استحکام به وزن این نوع ساختارها از ساندویچ‌های لانه زنبوری کمتر است، دلیل اول عدم انتخاب لایه میانی لانه زنبوری، وجود حفره‌های خالی و امکان جمع شدن آب در محیط‌های دریایی است که ویژگی نامطلوبی به شمار می‌آید. علت دوم، تفاوت قیمت تمام شده آنهاست، زیرا لانه زنبوری‌ها گران‌ترند [۱۴]. لایه میانی دیواره‌های ساندویچی که به طور گسترده به عنوان سقف کارگاه‌ها، کارخانه‌ها و سایر مراکز تجاری و صنعتی به کار می‌روند، معمولاً از جنس اسفنج پلی اتر یورتان است. این دیواره‌ها دارای جداره‌های فلزی از جنس آلومینیم یا ورقه‌های فولاد زنگ نزن هستند که باید قابلیت نگه‌داری بار ناشی از بارش برف را در حد متعارف داشته باشند. از آنها به عنوان دیوار نیز استفاده می‌شود [۱۵]. شایان ذکر است، اسفنج لایه میانی از جنس PU در مقایسه با اسفنج PVC یا PMI از خواص مکانیکی ضعیف‌تری برخوردار است. ولی، از نظر قیمت تمام شده، ارزان‌تر از موارد دیگر است [۱۶].

تجربی

مواد

جداره‌های دیواره ساندویچی با استفاده از مواد اولیه رزین اپوکسی، Araldite LY 5052، همراه با سخت‌کننده HY 5052 تولیدی شرکت Huntsman Europe، ساخته شدند [۱۷]. عامل تقویت‌کننده، پارچه شیشه‌ای ساخت شرکت SP System انگلستان، از نوع E با بافت ساده (Plain Weave)، آرایش تار و پود (۰/۹۰)، ضخامت ۰/۳۵ mm و وزن واحد سطح ۲۹۲ g/m^۲ است.

جداره‌های کامپوزیتی از رزین اپوکسی و یک لایه پارچه شیشه با نسبت تقریبی وزنی ۴۲:۵۸ و چگالی ۷۷۵ g/cm^۳ تشکیل شده‌اند.

۱- بر اساس تعریف ASTM، ساختار ساندویچی نوع خاصی از مواد کامپوزیتی لایه‌ای است که طی آن ترکیبی از چند لایه از مواد مختلف به یک دیگر چسبانده می‌شوند، به نحوی که خواص و ویژگی‌های هر یک از اجزا در خواص کلی قطعه ظاهر و به فعلیت در می‌آید [۹].

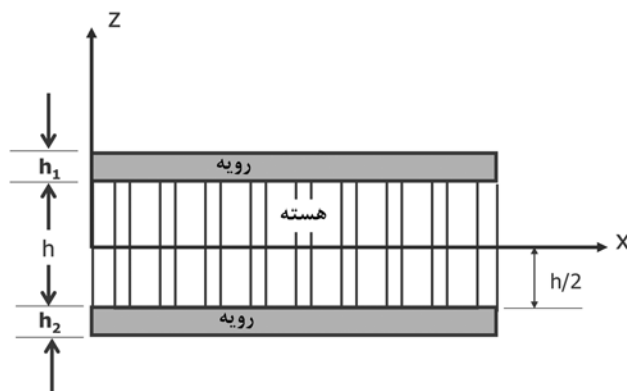
۲- دیواره ساندویچی از دو لایه کامپوزیتی که جداره‌های آن هستند و یک لایه اسفنج سخت تشکیل شده است، که ارائه‌دهنده خواص مناسب برای سفتی خمشی و جذب انرژی آن است بدون آن که افزایش وزن چندانی را در کل قطعه به وجود آورد [۵].

جداره‌ها به لایه میانی متصل می‌شوند تا امکان انتقال نیرو و بین اجزای سازه ساندویچی پدید آید. عملکرد این سازه‌ها و قابل قبول بودن رفتار مکانیکی آنها به استحکام چسبندگی جداره‌ها به لایه میانی بستگی دارد [۶]. هدف اصلی چنین آرایشی افزایش استحکام و سفتی یک صفحه نازک با کمترین ازدیاد در وزن آن است. از این دیواره‌ها بیشتر در مواردی استفاده می‌شود که نیروی اصلی وارد شونده به سازه نیروی خمشی باشد. ضخامت جداره‌ها اکثراً در گستره‌ای بین ۰/۲۵ تا ۱۲/۷ mm انتخاب می‌شود [۱۰].

در شکل ۱ نحوه قرار گرفتن جداره‌ها و لایه میانی در کنار یک دیگر نشان داده شده است. شایان ذکر است، ویژگی‌های دو جداره در این دیواره یکسان هستند.

دیواره‌های ساندویچی امکان ساخت قطعاتی با مدول خمشی زیاد به همراه سبکی وزن را فراهم آورده‌اند. از ویژگی‌های برجسته دیواره‌های ساندویچی نسبت بسیار زیاد استحکام و مدول خمشی به وزن آنها و خواص بسیار عالی عایق صوتی و گرمایی است. هم‌چنین، قابلیت چشم‌گیر کاهش وزن سازه‌ها را می‌توان نام برد [۲].

ساختارهای ساندویچی مقاومت بسیار زیادی در برابر خمش، پیچش و فشار از خود نشان می‌دهند. ضمن آن که از قابلیت کشسانی زیادی نیز برخوردارند [۱۱]. هنگامی که یک تیر یا صفحه زیر نیروی خمشی قرار



شکل ۱- سطح مقطع یک دیواره ساندویچی [۲].

قرار دارند. مهم ترین ویژگی های فشاری لایه میانی دیواره ساندویچی نظیر تنش تسلیم، استحکام و مدول فشاری معین شدند [۲۱].
آزمون خمش بر اساس روش آزمون خمشی سه نقطه‌ای (ASTM C 393-00) انجام شد [۲۲]. برای آزمون خمش حداقل چهار نمونه از هر مجموعه با ابعاد $12 \times 20 \times 110$ mm تهیه شد. سرعت آزمون 1 mm/mm و فاصله بین دو تکیه گاه 65 mm انتخاب شد. طی آزمون مدول و استحکام خمشی حداکثر دیواره‌های ساخته شده اندازه گیری شدند.

ساخت دیواره‌ها

ساخت دیواره‌ها در دو مرحله انجام گرفت. ابتدا جداره‌های کامپوزیتی به روش لایه گذاری دستی تهیه شدند. در مرحله توزین و اختلاط مواد، رزین اپوکسی با سخت کننده، مطابق نسبت وزنی جدول ۱ پیشنهادی شرکت سازنده، Ciba، به نسبت $100:38$ به طور جداگانه توزین و پس از اختلاط کامل، آمیخته برای عملیات لایه گذاری آماده شد.

در مرحله بعد، یک لایه پارچه شیشه با مشخصات ابعادی 5 mm کمتر از ابعاد سطح قالب را با قیچی مناسب بریده و در نهایت عملیات شکل دهی یک لایه روی سطوح داخلی دو نیم قالب به اجرا درآمد. درصد وزنی این لایه کامپوزیت $42:58$ و چگالی تقریبی آن 1.75 g/cm^3 محاسبه شد. پس از اتمام عملیات لایه گذاری جداره‌های بالا و پایین در سطوح بالایی و پایینی دو نیم قالب، فرایند پخت آنها انجام شد. بدین ترتیب، دو نیم قالب در حالت باز ابتدا به مدت تقریبی 24 h در دمای محیط و داخل فضای بسته گرم خانه (به منظور جلوگیری از جذب هر نوع آلودگی) قرار داده شدند تا پس از انجام ژل شدن، چگالی اتصالات عرضی جداره‌ها افزایش یابد. گرانیروی رزین اپوکسی افزایش یافته و جداره‌ها تا حدی خشک شدند. در جدول ۲ زمان آغاز و انجام پدیده ژل شدن آمیخته در دمای محیط ارائه شده است.

پس از گذشت حدود 24 h ، به منظور افزایش درجه پخت جداره‌ها، دو نیم قالب به حالت باز، به مدت 4 h در درون گرم خانه 70°C قرار داده شدند تا شبکه‌ای شدن آنها سرعت یابد. در پایان این مرحله با یک لایه نازک چسب اپوکسی از جنس آمیخته زمینه جداره‌ها، سطوح داغ

جدول ۱ - نسبت اختلاط رزین اپوکسی و سخت کننده فاز پیوسته جداره‌ها [۱۷].

ترکیب	قسمت وزنی	نسبت حجمی
رزین Araldite LY 5052	۱۰۰	۱۰۰
سخت کننده Hardener HY 5052	۳۸	۷۴

جداره‌ها به همراه لایه نازک چسب اپوکسی در مجموع ضخامتی برابر با $745 \pm 0.5 \text{ mm}$ را به وجود می آورند.

از عامل جداساز ویژه رزین اپوکسی با نام تجاری QZ 13 release Vantico modular به عنوان عامل جدا کننده استفاده شد. ویژگی مهم دیگر این عامل جداکننده تحمل گرمایی آن بود که دمای 70°C پخت جداره‌ها را طی زمان اعلام شده در همین گزارش تحمل می کرد و از محیط عمل خارج نمی شد.

برای ساخت لایه میانی، دو ماده اولیه بسیار مهم سازنده اسفنج پلی یورتان سخت (پلی ال و دی ایزوسیانات) از شرکت یورتان سیستم خریداری شدند. این مواد در حقیقت ساخت شرکت Bayer آلمان بودند. مشخصات مواد اولیه اسفنج در کاتالوگ شرکت سازنده Urethane Systems آمده است [۱۸].

نتایج به دست آمده از تجزیه و شناسایی کمی و کیفی پلی ال تهیه شده نشان می دهد، این ماده از نوع اتری با فرمول شیمیایی گلیسرول تری (پلی اکسی پروپیلن) است که با طیف شماره 5224 از مرجع ۱۹ انطباق کامل دارد. ایزوسیانات به کار رفته دارای ترکیب شیمیایی اولیگو متیلن فنیل ایزوسیانات است که دو عامل ایزوسیانات آن در وضعیت استخلاف ($2,4'$) مطابق با طیف شماره 4267 از مرجع ۱۹ قرار داشتند. هم چنین، عامل پف زای متعارف و پرمصرف موجود در بازار که به گروه عامل های دهنده HCFC تعلق داشت، در تهیه اسفنج لایه میانی مورد استفاده قرار گرفت. شناسایی کیفی دقیق هر سه ماده اولیه اصلی سازنده اسفنج انجام گرفت و اطلاعات کیفی ارائه شده با استناد به طیف زیرقرمز (FTIR) هر یک از آنها به دست آمد [۱۹].

دستگاه‌ها

در این پژوهش از دستگاه UTM (Universal Testing Machine) ساخت شرکت Zwick آلمان، مدل 144501 ، دارای ظرفیت نهایی 10 kN ، برای انجام آزمون های خمشی و فشاری استفاده شد.

طیف سنج زیرقرمز مدل Spectrum One ساخت شرکت Perkin-Elmer کشور انگلیس، به منظور شناسایی کیفی و تعیین مقدار خلوص مواد اولیه به کار رفته در اسفنج لایه میانی، شامل پلی ال، عامل پف زا و دی ایزوسیانات مورد استفاده قرار گرفت.

روش‌ها

آزمون تعیین چگالی اسفنج لایه میانی دیواره ساندویچی بر اساس استاندارد ASTM C 271-99 به عمل آمد [۲۰]. آزمون فشاری در حالت تخت (flat wise)، بر اساس روش آزمون ASTM C 365-00 در حالتی اعمال شد که نیروی فشاری عمود بر جداره‌های در تماس با لایه میانی

جدول ۲- زمان آغاز و انجام ژل شدن آمیخته در دمای ثابت [۱۷].

ویژگی	زمان (h)	حالت
ژل شدن در 23°C	۵-۶/۵	آغاز
در لایه نازک، $0/4-0/7\text{mm}$	۷-۸	پایان

نشان داده شده است. ضخامت جداره‌ها به همراه لایه نازک چسب اپوکسی در مجموع برابر با $1/45 \pm 0/05\text{mm}$ و چگالی نسبی $1/75 \pm 0/05\text{g/cm}^3$ است. با در نظر گرفتن لایه چسب، معادل $58 \pm 0/5$ درصد وزنی ماده کامپوزیت از رزین اپوکسی و $42 \pm 0/5$ درصد وزنی ماده کامپوزیت از تقویت کننده شیشه‌ای تشکیل یافته است.

داخلی جداره‌ها با چسب پوشانده شدند. سپس با بستن قالب و قرار دادن آن در زیر پرس، قالب آماده پذیرش اسفنج لایه میانی شد. بین دو نیم قالب بالا و پایین محفظه‌ای فولادی به ارتفاع $10/5\text{mm}$ قرار گرفت تا در آن جا لایه میانی اسفنجی ایجاد و به این دو جداره متصل شود. مشخصات و نکات فنی مواد اولیه اسفنج پلی یورتان سخت مندرج در کاتالوگ شرکت سازنده، در جدول ۳ ارائه شده است.

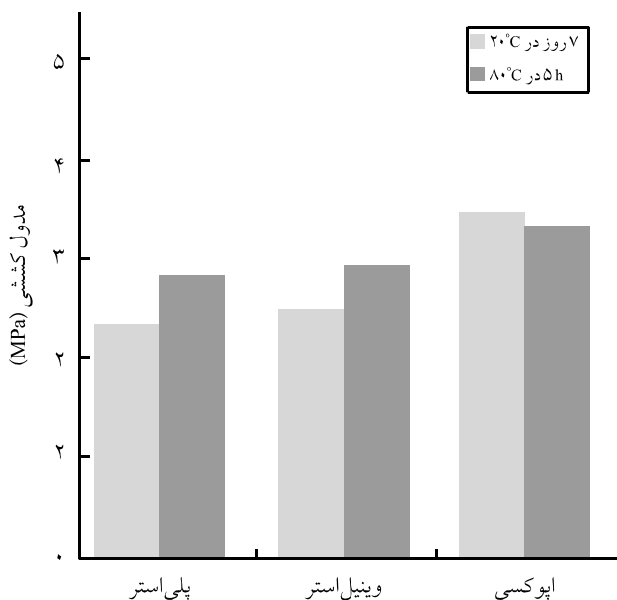
اجزای آمیخته اسفنج به وسیله یک مخلوط کن مناسب به مدت حداکثر ۳۵ کاملاً مخلوط شد. سپس، اسفنج آماده شده پس از انتقال به داخل سرنگ، با حداکثر سرعت ممکن به قالب تزریق شد. قالب گیری در دمای $65 \pm 2/5^{\circ}\text{C}$ انجام شد. سطوح آزاد قالب با عایق نمدی پوشانده شد تا سرد شدن قالب به آرامی انجام گیرد. پس از 14h ، دیواره از قالب بیرون آورده شد. برای گذراندن مرحله پس از پخت، دیواره ساندویچی ساخته شده تا پانزده روز در دمای محیط بدون تحمل هیچ نوع تنش قرار داده شد. این کار موجب می شود تا ساختار سه بعدی دیواره تکمیل و استحکام مکانیکی نهایی آن حاصل شود.

در نمودارهای شکل ۲ اثر دو شرایط متفاوت پخت بر مدول و استحکام کششی سه نمونه رزین پر مصرف در ساخت مواد کامپوزیت

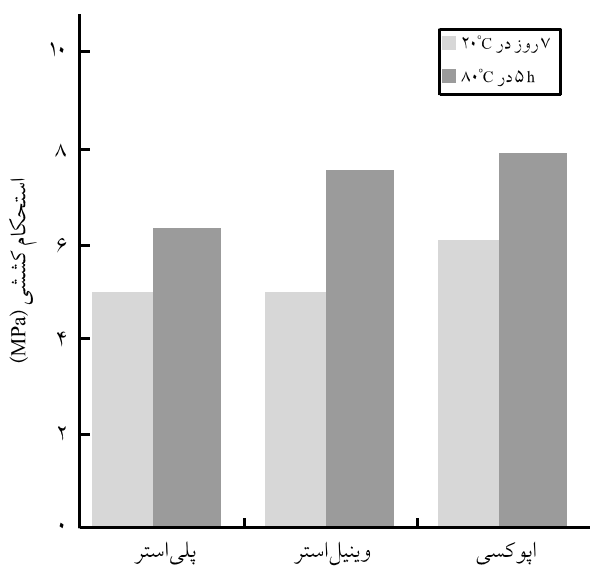
جدول ۳- مشخصات اسفنج پلی یورتان سخت لایه میانی [۱۸].

مقدار (g)	نام جزء
۴۰	پلی ال
۶۰	ایزوسیانات
مشخصات آزمایشگاهی	
۱۰۰:۱۵۵	نسبت پلی ال: ایزوسیانات
*۶۲۰ W	نوع پلی ال
۴۵	زمان اختلاط (s)
۶۰-۷۰	زمان گرمی شدن (s)
۱۳۰-۱۵۰	زمان ژل شدن (s)
۶۵-۷۵	چگالی بالا آمدن آزاد اسفنج (kg/m^3)

* نام تجاری.



(الف)



(ب)

شکل ۲- اثر دو شرایط متفاوت پخت بر (الف) مدول و (ب) استحکام کششی سه نوع رزین مهم و پر مصرف [۲۳].

نمونه مشخص نشده، اما برای محاسبات مربوط به کرنش ضخامت 12 mm پیشنهاد شده است.

نمونه‌های تهیه شده با سرعت 1 mm/min زیر آزمون قرار گرفتند. افزون بر پارامترهای اصلی آزمون، تنش‌های فشاری وارد شده، در کرنش‌های 10 ، 20 و 30% نیز معین شدند. ضمن آن که استحکام فشاری حداکثر آنها نیز در کرنش 50% محاسبه شد. کلیه نمونه‌ها در پایان آزمون فشاری بدون شکستگی و خرد شدن بودند و تنها پدیده جمع شدگی در ضخامت و افزایش ابعاد (پهن شدن) اسفنج در دو جهت X و Y در آنها مشاهده شد. برخی دیگر افزون بر کماتش، دچار پیچش در ارتفاع نیز شدند.

نتایج و بحث

خواص مکانیکی

در مجموعه آزمون‌های بررسی خواص مکانیکی دیواره‌های ساندویچی، دو آزمایش تعیین خواص خمشی و فشاری همواره از اهمیت بسیار زیادی برخوردارند. در این پژوهش، دو آزمون مزبور محور آزمون‌های عملی و تحلیل نتایج قرار گرفتند.

اثر چگالی اسفنج لایه میانی بر خواص فشاری دیواره‌های ساندویچی

هدف از انجام این آزمون، در زمینه اثر چگالی لایه میانی بر خواص تنش تسلیم، مدول، استحکام و کرنش فشاری دیواره‌های تهیه شده با چگالی‌های مختلف لایه میانی بوده است.

برای این منظور هفت دیواره با چگالی‌هایی در گستره 275 تا 80 kg/m^3 تهیه شدند و آزمون تعیین خواص فشاری روی این نمونه‌ها انجام شد. نتایج به دست آمده در جدول ۴ ارائه شده است.

آنچه که در نگاه اول از اطلاعات مندرج در جدول ۱ استنباط می‌شود، این حقیقت است که با ازدیاد چگالی، خواص فشاری بهبود می‌یابند.

حال باید چگونگی ارتباط خواص با چگالی را مورد بررسی قرار داد. تنش تسلیم فشاری در اسفنج‌های سلول بسته، به منزله حد بالای تنش مجاز وارد شده بر آنها تلقی می‌شود. زیرا، عبور از این حد موجب انهدام سلول‌ها و از بین رفتن خواص اسفنج می‌شود، مگر این که مطالعه خاصیت یا رفتار ویژه دیگری از اسفنج مورد نظر پژوهش‌گر باشد. هنگامی که خواص فشاری چند اسفنج با هم مقایسه می‌شود، معمولاً در یک کرنش معین، استحکام فشاری آنها را با هم مقایسه می‌کنند. هر قدر نمونه قابلیت جمع شدن بیشتری داشته باشد و زیر تنش فشاری کمتری

با ثابت نگه داشتن مشخصات جداره‌ها در تمام نمونه‌ها، چگالی اسفنج لایه میانی بنا بر ضرورت تهیه هر دیواره در گستره $275 \text{ kg/m}^3 - 80$ تغییر داده می‌شدند.

مشخصات و روش ساخت دیواره‌های تهیه شده

قالب فولادی که به کمک آن دیواره‌های ساندویچی تهیه شدند، دارای یک حفره با ابعاد $12 \times 20 \times 30 \text{ mm}$ بود. قالب دیواره ساندویچی سه تکه‌ای طراحی شده بود. بدین ترتیب که در سطح داخلی دو نیم قالب بالا و پایین، محل ساخت جداره‌های ساندویچ نهایی در نظر گرفته شده بودند.

محفظه فولادی تزریق به ارتفاع $10/5 \text{ mm}$ ، بین دو نیم قالب قرار می‌گرفت و در آن جا لایه میانی شکل داده می‌شد.

در شکل ۳ قالب استفاده شده برای ساخت دیواره‌ها نشان داده شده است. در وسط طول قالب و در نقطه میانی ارتفاع، راه‌گاه انتقال سیال اسفنج به حفره قرار گرفته است که عمل تزریق اسفنج، به حالت عمود بر عرض انجام می‌شد.

جداره‌های کامپوزیتی از رزین اپوکسی و یک لایه پارچه شیشه، به نسبت تقریبی $42:58$ درصد وزنی و چگالی $1/75 \pm 0/05 \text{ g/cm}^3$ ، ضخامت جداره‌ها به همراه لایه نازک چسب اپوکسی جمعاً ضخامت برابر با $42 \pm 0/5 \text{ mm}$ به وجود می‌آورند.

در ادامه به وسیله دو لایه نازک چسب اپوکسی از جنس آمیخته زمینه جداره‌ها، سطوح داغ داخلی جداره‌ها با لایه نازکی از چسب اپوکسی از جنس و ترکیب آمیخته فاز پیوسته جداره‌های بالایی و پایینی دیواره ساندویچی پوشانده شد. سپس با بستن قالب و قرار دادن آن در زیر پرس، مرحله تزریق اسفنج انجام شد. پس از 14 h ، دیواره از قالب بیرون آورده شد.

آزمون فشاری و ویژگی‌های نمونه‌ها

این آزمون مطابق با دستور کار استاندارد ASTM C365-00 انجام شده است. بنابر توصیه ASTM نمونه‌ها باید مربع شکل و دارای ابعاد حداکثر $20 \times 20 \text{ mm}$ باشند. نمونه‌هایی به ابعاد $12 \times 20 \times 20 \text{ mm}$ در جهت عمود بر بالا آمدن اسفنج تهیه شدند. در استاندارد ارتفاع معینی برای



شکل ۳ - قالب استفاده شده برای ساخت دیواره‌های ساندویچی.

جدول ۴ - نتایج آزمون تعیین خواص فشاری هفت دیواره با چگالی متفاوت لایه های میانی.

مدول فشاری ویژه* ($10^2 \times \text{mm}$)	مدول فشاری (MPa)	استحکام فشاری در کرنش ۵۰٪ (MPa)	تنش تسلیم فشاری (MPa)	چگالی (kg/m^3)		نمونه
				دیواره	اسفنج	
۱۱۴/۳	۱۶/۰(۰/۵۸)**	۱/۴	۰/۲۵	۱۴۰	۸۰	۱
۲۸۸/۴	۵۴/۸(۰/۸۶)	۲/۱	۰/۷/۱	۱۹۰	۱۳۰	۲
۳۳۱/۸	۷۴/۰(۰/۷۴۰)	۳/۴	۳۰/۱	۲۲۳	۱۵۵	۳
۳۶۶/۱	۸۰/۹(۰/۷۰۴)	۳/۹	۱/۴۲	۲۲۱	۱۶۲	۴
۴۲۹/۲	۱۰۰(۰/۳۳۰)	۵/۷	۱/۷۰	۲۳۳	۱۷۴	۵
۴۷۴/۰	۱۵۵(۰/۳۵۰)	۱۰/۸	۲/۸۱	۳۲۷	۲۳۶	۶
۵۱۷/۴	۱۷۹(۰/۳۰۰)	۱۷/۹	۳/۳۰	۳۵۰	۲۷۵	۷

* مدول فشاری ویژه از تقسیم مدول فشاری به چگالی دیواره حاصل شده است.

** اعداد داخل پرانتز انحراف از استاندارد را نشان می دهند.

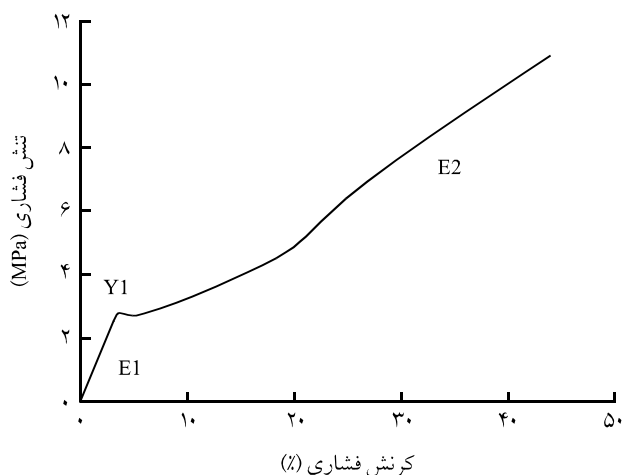
سریع) سلول ها یا مقاومت و تخریب آنها پس از تنش تسلیم Y_1 قرار گیرد که به اصطلاح ناحیه مسطح نامیده می شود. E_2 مدولی است که پس از انهدام سلول های اسفنج ظاهر می شود و نشان دهنده تمایل تغییر شکل فشاری بقایای اسفنج در برابر تنش فشاری وارد بر آن است که به نام منطقه تراکم از آن یاد می شود. نقطه شروع E_2 به وسیله رسم مماس در ناحیه خطی E_2 و تقاطع آن با مماس ناحیه مسطح مشخص می شود. شکل ۵ تغییرات مدول فشاری در برابر افزایش چگالی اسفنج های لایه میانی شش دیواره ساندویچی را نشان می دهد. نتایج به دست آمده از نمونه هایی که در آنها چگالی لایه میانی افزوده شده دلالت بر آن دارد که ابتدا با افزایش چگالی، مدول فشاری دیواره به شکل خطی افزایش

به حد مورد نظر برسد، دارای استحکام فشاری کمتری است. برعکس، هر قدر برای جمع شدن آن تنش بیشتری صرف شود، آن نمونه، دارای استحکام فشاری بیشتری است. در این پژوهش سعی شده است، تنش فشاری در کرنش ۵۰٪ ثبت شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شوند. هرچند، نمونه ها تا حدود 175 MPa زیر فشار قرار داده شده و رفتار نمونه ها تا این محدوده بررسی شده اند. جدول ۴ نشان می دهد، نمونه ۶ از استحکام فشاری و مدول زیاد و مقدار جمع شدگی کمتر در آزمون فشاری نسبت به سایر موارد مشابه برخوردار است. تنش تسلیم زیاد امکان این را فراهم می آورد تا نمونه مزبور در حین کاربری نسبت به اکثر نمونه های مورد بررسی کارآمدتر باشد. برای مثال، نسبت به نمونه ۲ تنش تسلیم آن در حدود ۲۸۰ درصد بیشتر است.

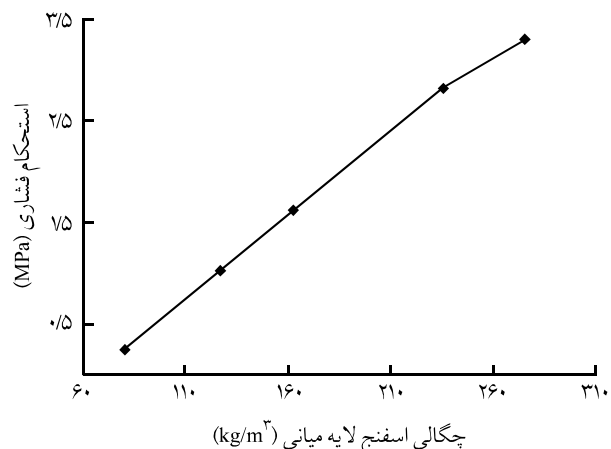
در شکل ۴ رفتار تنش - کرنش فشاری دیواره ساندویچی نمونه ۶ همراه با چند ویژگی مهم از خواص کششی آن دیده می شود. اغلب دیواره ها مشابه همین رفتار مکانیکی را نشان می دهند. اما، اختلاف اصلی در مدول، ناحیه مسطح و نقطه تسلیم آنهاست.

E_1 مدولی است که در طول تغییر شکل کشسان نمونه پدیدار می شود، همین مدول ملاک بررسی مدول فشاری نمونه زیر آزمون در برابر تنش های فشاری طی سرویس دهی آن محسوب می شود.

Y_1 تنش تسلیم فشاری است و نمایان گر حداکثر مقاومتی است که اسفنج در برابر تنش فشاری نشان می دهد. عبور از این حد به منزله ورود به مرحله ترکیدن و انهدام سلول های اسفنج سلول بسته است. رفتار ناحیه گذار، حد فاصل Y_1 و شروع E_2 در شکل ۳ است که می تواند ملاک تعیین سرعت تخریب مکانیکی اسفنج، سرعت انهدام (تدریجی یا



شکل ۴ - نمودار رفتار تنش - کرنش آزمون فشاری نمونه ۶.



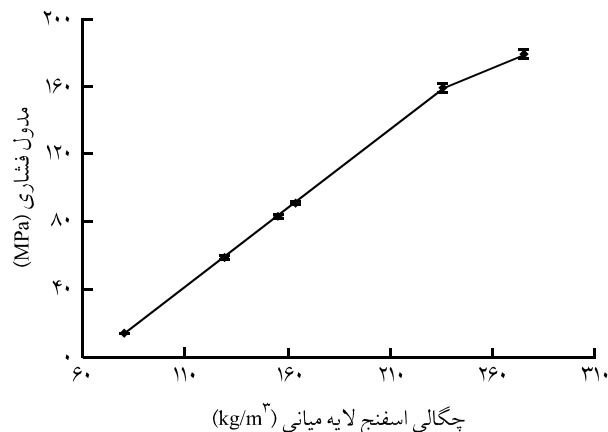
شکل ۶- وابستگی استحکام فشاری به چگالی اسفنج لایه میانی.

لایه میانی موجب ازدیاد مقاومت دیواره در برابر آسیب های ناشی از ضربات وارد بر آن می شود [۱۴].

اثر تغییرات چگالی اسفنج لایه میانی بر خواص خمشی دیواره های ساندویچی

در جدول ۵ خواص خمشی شش دیواره که تفاوت اصلی تنها در چگالی لایه میانی آنهاست، با یک دیگر مقایسه شده اند. در این جا نیز با ازدیاد چگالی خواص خمشی بهبود می یابد.

جدول ۵ نشان می دهد، با افزایش چگالی لایه میانی پارامترهای مدول و استحکام خمشی دیواره تا حد معینی به شکل خطی افزایش می یابد.



شکل ۵- تغییرات مدول فشاری شش دیواره در مقابل ازدیاد چگالی لایه میانی.

پیدا می کند. ولی، هنگامی که چگالی اسفنج لایه میانی از ۲۳۵ kg/m³ بیشتر می شود، وابستگی مدول و استحکام فشاری به چگالی اسفنج لایه میانی کمتر می شود. از این حد بالاتر، از اثر چگالی در افزایش مدول فشاری کاسته می شود.

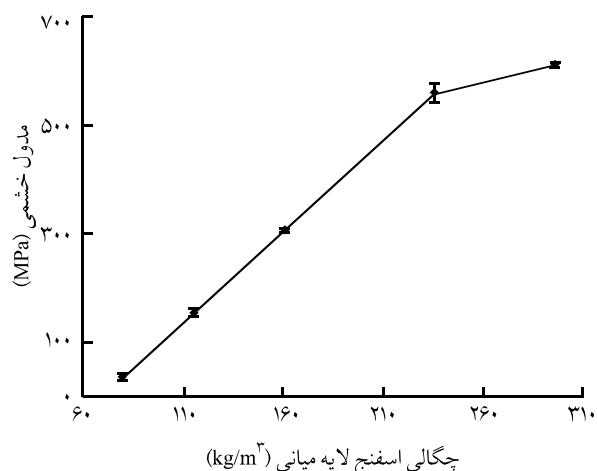
اثر چگالی لایه میانی بر استحکام فشاری دیواره ساندویچی در شکل ۶ نشان داده شده است. این شکل نیز نشان می دهد، تغییرات استحکام فشاری همانند تغییرات مدول فشاری است. بدین ترتیب تا چگالی ۲۳۵ kg/m³ رفتار خطی است و پس از آن از سرعت افزایش آن کاسته می شود و تابعیت خطی خود را از دست می دهد. افزایش چگالی اسفنج

جدول ۵- مقایسه خواص خمشی شش دیواره با لایه های میانی متفاوت از نظر چگالی.

مدول خمشی ویژه** (۱۰ ^۲ ×mm)	مدول خمشی (MPa)	استحکام خمشی ویژه (۱۰ ^۲ ×mm)	تنش تسلیم خمشی (MPa)	چگالی (kg/m ³)		نمونه
				دیواره	اسفنج	
۲۵۰	۳۵ (۰/۳)*	۱۲/۸۵	۷/۸ (۰/۰۴)*	۱۴۰	۸۰	۱
۹۰۰	۱۷۱ (۷/۰)	۳۷۶	۶/۰ (۰/۱۲)	۱۹۰	۱۳۰	۲
۱۳۸۵	۳۰۹ (۰/۹)	۳۹/۴۶	۸/۸ (۰/۰۶)	۲۲۳	۱۵۵	۳
۱۷۰۶	۵۵۸ (۱۹)	۴۷/۴	۱۵/۵ (۰/۳۰)	۳۲۷	۲۳۶	۶
۱۶۲۹	۵۷۰ (۴/۰)	۴۶/۳	۱۶/۲ (۰/۲۰)	۳۵۰	۲۷۵	۷
۱۷۰۹	۶۰۵ (۰/۳)	۴۶/۶	۱۶/۵ (۰/۳۰)	۳۵۴	۲۹۶	۸

* اعداد داخل پرانتز انحراف از استاندارد را نشان می دهند.

** مدول خمشی ویژه از تقسیم مدول خمشی به چگالی دیواره حاصل شده است.



شکل ۸- نمودار تغییرات مدول خمشی با افزایش چگالی لایه میانی.

انجام شد:

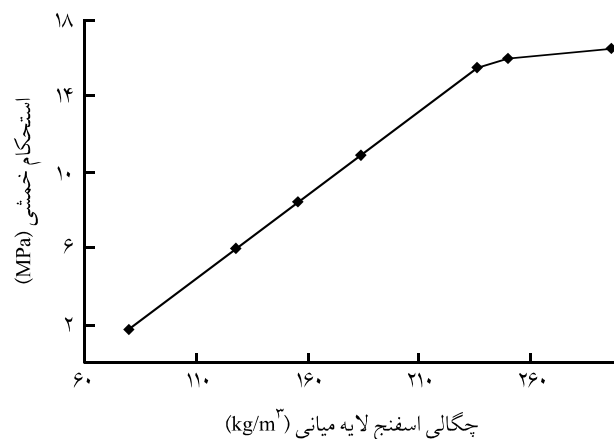
معرفی مشخصات ساختار لایه‌ای ماده برای تشخیص نرم‌افزار بین جداره و لایه میانی، انتخاب مقیاس SI، معرفی ابعاد و مشخصات مکانیکی هر لایه نظیر مدول کشسانی (متناسب با نوع آزمون)، مدول برشی و ضریب پواسون در سه بعد و چگالی وارد کردن خواص مکانیکی هر کدام از لایه‌ها (اعم از جداره‌ها و لایه میانی) در جدول‌های مخصوص درخواست شده به وسیله نرم‌افزار، مدل‌سازی قطعه مورد نظر از نظر ابعادی و ایجاد شکل هندسی آن، مش زدن نمونه، معرفی تکیه‌گاه‌ها و نقاطی که در حین اعمال تنش در آنها عدم چرخش یا تغییر مکان میسر است، تعیین محل، جهت و نوع نیروی وارد شونده بر دیواره، دستور حل و پردازش اطلاعات مسئله پس از حل آن برای کسب پارامترهای مورد نظر و ثبت و تحلیل نتایج [۲۴].

در جدول ۶ مقایسه‌ای بین نتایج تجربی و محاسبات نرم‌افزاری ANSYS به منظور تعیین کرنش فشاری نمونه‌های دیواره ساندویچی ارائه شده است.

علت خارج شدن رفتار منحنی از حالت اولیه خطی را می‌توان متناسب با آزمون‌های انجام شده در دو محور تشریح کرد.

علل ایجاد شکستگی از دیدگاه رفتار فشاری

در شکل ۶ نمودار استحکام فشاری دیواره در برابر تغییر چگالی و تغییر شیب منحنی آن که به زحمت دیده می‌شود، ارائه شده است. تجارب حاصل آمده نشان می‌دهد، در حین اعمال فشار، به لحاظ این که مدول فشاری جداره‌ها حدود صد برابر بیشتر از اسفنج است، جداره‌ها وارد عمل نمی‌شوند (جمع نمی‌شوند). در این حالت، نمودار ثبت شده تنها به



شکل ۷- نمودار تغییرات استحکام خمشی هفت مجموعه دیواره با افزایش چگالی لایه میانی.

اما، از چگالی 235 kg/m^3 به بالاتر از شدت وابستگی مدول خمشی به ویژگی چگالی به شدت کاسته می‌شود. برای نمایش ساده‌تر و بهتر این موضوع، اطلاعات به دست آمده از مقادیر استحکام و مدول خمشی هفت مجموعه آزمون در برابر تغییر چگالی لایه میانی آنها در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده است. این شکل‌ها نشان می‌دهند، با افزایش چگالی افزون بر مدول، استحکام خمشی دیواره آن نیز به شکل خطی افزایش می‌یابد یا به عبارتی بهبود پیدا می‌کند. ولی، از مقدار 235 kg/m^3 به بالاتر، از شدت وابستگی استحکام و مدول خمشی به پارامتر چگالی به مقدار بسیار زیادی کاسته می‌شود. از این حد بیشتر از دیاد چگالی اسفنج، نقش مهمی در خواص خمشی دیواره‌های ساندویچی ندارد.

مقایسه نتایج تجربی و نظری

در این مرحله، اطلاعات حاصل از کرنش فشاری تعدادی دیواره‌های ساخته شده که مورد آزمایش‌های عملی قرار گرفته‌اند، با اطلاعات حاصل از نرم‌افزار ANSYS نسخه ۵/۴ مقایسه شده‌اند. از نرم‌افزار ANSYS برای انجام محاسبات خمشی و فشاری کمک گرفته شد و نتایج به دست آمده با اطلاعات آزمایشگاهی مقایسه شدند. از امکانات این نرم‌افزار برای تعیین مقدار کرنش فشاری و فیلم برداری از چگونگی نحوه رفتار نمونه‌ها در حین آزمون‌های فشاری و خمشی استفاده شد. برای مدل‌سازی نمونه‌ها مراحل اصلی زیر طی شدند:

ابتدا یک مدل دوبعدی با انتخاب جزء لایه‌ای چهارضلعی هشت‌گانه به کمک Solid 46 استفاده شد که در کامپوزیت‌های لایه‌ای و به ویژه برای دیواره‌های ساندویچی مناسب است. در مراحل بعد، کارهای زیر

جدول ۶ - مقایسه نتایج تجربی و نرم افزاری تعیین کرنش فشاری.

نمونه	چگالی اسفنج (kg/m ³)	استحکام فشاری در کرنش ۵۰٪ (MPa)		کرنش فشاری (%)
		تجربی	نرم افزار	
۳	۱۵۵	۳/۴	۵۰	۵۴/۰
۴	۱۶۲	۳/۹	۵۰	۵۷/۵
۶	۲۳۶	۱۰/۸	۵۰	۴۷/۶
۷	۲۷۲	۱۷/۹	۵۰	۴۷/۰

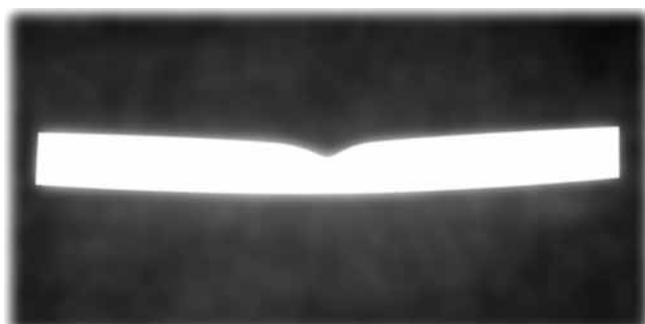
بررسی شد:

۱- در شکل ۷ با ازدیاد چگالی نمونه‌ها، برای اسفنج نمونه ۶ در مقایسه با سه نمونه سبک‌تر قبل، رفتار منحنی استحکام خمشی از حالت خطی خارج شده و شکستگی آغاز می‌شود.

۲- بر اساس شکل ۷، سه نمونه دارای چگالی‌های کمتر، که مشخصات آنها در جدول ۵ ارائه شده است، در برابر استحکام خمشی رفتاری خطی رو به افزایش از نظر بهبود استحکام خمشی نشان داده‌اند. در حالی که اسفنج‌های چگال‌تر با سرعت بسیار کمتر افزایش استحکام خمشی همراه هستند.

۳- آزمایش‌ها و بررسی‌های به عمل آمده در زمینه شیوه شکست آنها نیز دلالت بر آن دارد که سه نمونه دارای چگالی کمتر، به شیوه فرورفتگی جداره در لایه میانی اسفنجی و سه نمونه دیواره با لایه میانی اسفنج چگال‌تر نیز دارای شیوه شکست جداره‌ها هستند. در حقیقت، دو نوع شیوه شکست اصلی در این شش مجموعه دیواره مشاهده می‌شود. سه نمونه سبک‌تر دارای ساز و کار نفوذ جداره در لایه میانی (شکل ۹) هستند که دلیل آن را در استحکام کم لایه میانی و نداشتن مقاومت کافی در برابر تنش خمشی وارد بر جداره دیواره، هم‌چنین عدم مشارکت اجزای تشکیل دهنده ساندویچ در تحمل بار خمشی وارد شده بر آن، می‌توان ارزیابی کرد.

رفتار مکانیکی خمشی نمونه ۳ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود، نمونه مورد آزمون پس از تحمل و رسیدن به سطح معینی از نیروی خمشی، با افزایش نیرو مقاومت خود را از دست داده و در ادامه آزمون بخشی از جداره بالایی به درون لایه زیری اسفنجی منتقل می‌شود. ولی تا پایان آزمون قطعه به شکست نهایی نمی‌رسد و عدم افت شدید نیرو این موضوع را تأیید می‌کند. ضمن آن که شکل ۹ نیز نشان می‌دهد، تنها بخش بالایی دیواره دچار شکست نسبی خمشی شده است.



شکل ۹ - نمونه ۳ در پایان آزمون خمشی و شکست دیواره به شیوه نفوذ جداره در اسفنج لایه میانی.

رفتار فشاری اسفنج تعلق دارد. به همین دلیل استاندارد مورد استناد ASTM، پژوهش‌گران را مخیر می‌کند که دیواره یا تنها اسفنج لایه میانی را مورد آزمون فشاری قرار دهند.

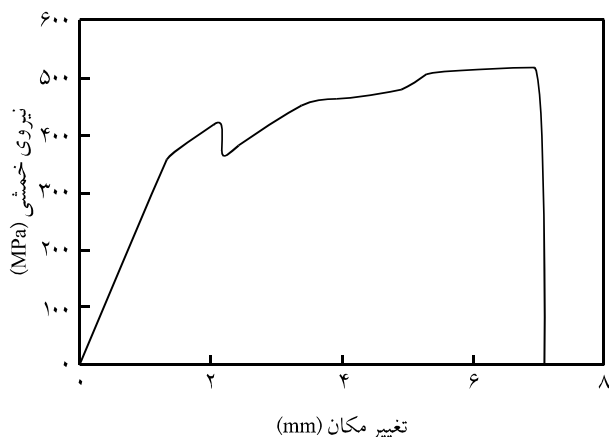
دلیل ایجاد شکستگی در منحنی فشاری

در ابتدای آزمون، اسفنج متناسب با چگالی، درجه اتصالات عرضی و ماهیت ساختار مولکولی خود شروع به جمع شدن و کاهش ارتفاع می‌کند و در جهت عمود بر زمین (Z) کرنش فشاری نشان می‌دهد. هم‌چنین، نمونه کم‌کم از چهار طرف وسط ارتفاع آن (در دو جهت محورهای X و Y) افزایش ابعادی (به شکل کمانش) نشان می‌دهد. هر قدر چگالی کمتر باشد، به علت درشت‌تر بودن حجم سلول‌های اسفنج لایه میانی و ضعف مکانیکی آنها، در نتیجه استحکام فشاری کمتر، رفتار کاهش ارتفاع عمود بر زمین و افزایش ابعادی ناشی از تنش فشاری به موازات سطح زمین، بهتر دیده می‌شود. ولی با ازدیاد چگالی مشاهده می‌شود، کرنش فشاری در نمونه در حین کاهش ارتفاع، با کمانش و پیچش نیز همراه می‌شود.

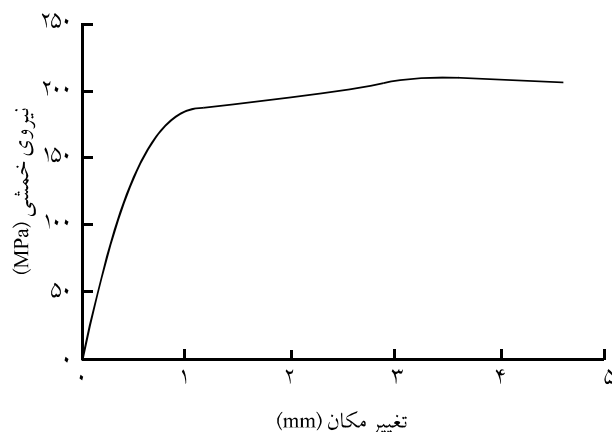
در نمونه‌های دارای چگالی بیشتر، به علت افزایش چگالی و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی، اسفنج لایه میانی در برابر تنش فشاری از خود مقاومت بیشتری نشان می‌دهد. این امر، سبب ایجاد نیروی برشی بین جداره‌ها و اسفنج لایه میانی می‌شود و چون بخشی از نیروی اعمال شده صرف ایجاد نیروی برشی در نمونه مورد آزمون می‌شود، نیروی عمود وارد شده، در عمل به دو مولفه تجزیه می‌شوند و همین امر در چگالی‌های بیشتر باعث ایجاد شکستگی در رفتار مکانیکی اسفنج می‌شود.

علل ایجاد شکستگی از دیدگاه رفتار خمشی

شکستگی پدید آمده در نمودارهای خمشی با استفاده از دو شکل ۷ و ۸



شکل ۱۲- رفتار خمشی نمونه ۶ در مقیاس نیرو در برابر انحنا.



شکل ۱۰- رفتار مکانیکی نیروی خمشی در برابر انحنا نمونه ۳.

۴- بنابر پژوهش‌های انجام شده تنش برشی وارد بر اسفنج لایه میانی تابع مستقیمی از نیروی خمشی وارد بر دیواره است و مقدار تنش برشی لایه میانی از معادله (۱) محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$\tau_c = \frac{P}{(d+c)b} \quad (1)$$

که در آن τ_c تنش برشی لایه میانی (MPa)، P نیروی خمشی حداکثر (N)، d ضخامت کل ساندویچ (mm)، c ضخامت لایه میانی (mm) و b عرض نمونه (mm) است.

چون نمونه‌ها ابعاد ثابتی دارند، پس منجر معادله (۱) عدد ثابتی است. نیروی خمشی وارد بر دیواره نیز نسبت مستقیم با تنش برشی ایجاد شده در نمونه مورد آزمون دارد. بنابراین، متناسب با افزایش چگالی اسفنج، استحکام لایه میانی زیاد می‌شود و برای رسیدن به تنش حداکثر خمشی شکست نیروی بیشتری را می‌طلبد. این نتایج در جدول ۸ نشان داده شده‌اند.

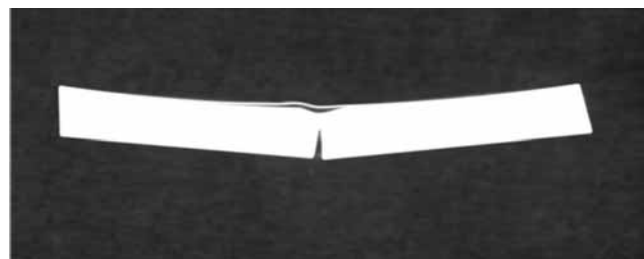
از سطح معینی از نیروی خمشی به بالاتر، تنش برشی به حدی می‌رسد که بخش بیشتری از نیروی خمشی اعمال شده صرف نیروهای برشی می‌شود. از آغاز ظهور چنین پدیده‌ای اسفنج دیگر قابلیت آن را ندارد تا مانند قبل، خواص مکانیکی آن با ازدیاد چگالی با شیب منحنی مستقیم و با سرعت نمونه‌های قبل بهبود این خواص را افزایش دهد.

نتیجه‌گیری

خواص مکانیکی دیواره‌های ساندویچی دارای جداره‌های شیشه -

نمونه‌هایی که در نمودارهای خمشی ۷ و ۸ با چگالی مساوی یا بیشتر از 235 kg/m^3 قرار می‌گیرند، با شیوه شکست جداره و اسفنج لایه میانی وارد مرحله شکست می‌شوند. دلیل این امر را می‌توان در رسیدن استحکام لایه اسفنجی به حدی از استحکام خمشی دانست که تمام اجزای سازنده دیواره مقاومت قابل قبولی از خود در برابر تنش‌های خمشی زیاد نشان می‌دهند. در این شیوه شکست ملاحظه می‌شود، جداره پایین، اسفنج لایه میانی و جداره بالا به طور هم‌زمان به حد شکست می‌رسند و اجزای دیواره تا آخرین لحظه مشارکت کاملی در مقاومت در برابر تنش خمشی دارند. این شیوه شکست که همه اجزا هم‌زمان به حد شکست می‌رسند، از مهم‌ترین ویژگی‌های عملکرد یک دیواره ساندویچی مطلوب و مطمئن است که در دیواره‌های دارای لایه میانی از جنس اسفنج پلی‌پورتان سخت تنها در چگالی‌های بیشتر از 235 kg/m^3 دیده می‌شود (شکل ۱۱). در شکل ۱۲ نیز رفتار خمشی همین نمونه ۶ نشان داده شده است.

در جدول ۷ بین نتایج به دست آمده از خواص خمشی دیواره نمونه ۶ و اسفنج لایه میانی آن (به تنهایی) با هم مقایسه شده‌اند.



شکل ۱۱- نمونه ۶ در پایان آزمون خمشی (ظهور شیوه شکست کششی جداره زیری و اسفنج لایه میانی).

جدول ۷- مقایسه نتایج خواص خمشی دیواره نمونه ۶ و اسفنج لایه میانی آن.

نمونه	چگالی (kg/m^3)		استحکام خمشی (MPa)	استحکام خمشی ویژه ($10^2 \times \text{mm}$)	مدول خمشی (MPa)	مدول خمشی ویژه ($10^2 \times \text{mm}$)
	دیواره	اسفنج				
۶	۳۲۷	۲۳۶	۱۵/۵	۴۷/۴	۵۵۸	۱۷۰۶
۶	---	۲۳۶	۵/۶۴	۲۳/۸۹	۱۲۹	۵۴۰

علت تشدید نقش نیروی برشی و اثر آن روی خواص مکانیکی (خمشی و فشاری)، موجب پدید آمدن نقص های نظیر ازدیاد وزن قطعه و بالا رفتن هزینه های تولید می شود.

شیوه شکست خمشی دیواره می تواند راهنمای بسیار خوبی برای کنترل کیفیت و پیش بینی رفتار دیواره در حین کاربری آن باشد. افزون بر دو شیوه یاد شده در متن مقاله، سایر شیوه های شکست نظیر جدایی جداره از لایه میانی، شکست اسفنج لایه میانی و شکست برشی اسفنج ممکن است در حین آزمون خمشی مشاهده شوند که هر کدام نشان دهنده ضعف فرایندی خاصی است. برای رفع نقص از دیواره و پیدا کردن علت شکست باید بررسی و مطالعه کارشناسانه به عمل آید. اسفنج پلی اتر یورتان سخت سلول بسته متناسب با چگالی آن دارای خواص فشاری و خمشی معینی است. بر اساس آزمون های انجام شده این حد با چگالی 235 kg/m^3 حاصل می شود. در صورتی که استحکام خمشی زیادی از قطعه انتظار نرود (مثلاً 6 MPa)، طراحی قطعه در محدوده ای از چگالی (مثلاً 130 kg/m^3) که برآورنده نیاز دیواره باشد با در نظر گرفتن ضریب اطمینان مناسب انجام می گیرد. اگر در نظر است، دیواره از استحکام زیاد برخوردار باشد (مثلاً 15 MPa) یا در همین محدوده (طراحی قطعه اجباراً باید با چگالی (مثلاً 236 kg/m^3) انجام شود که پاسخ گوی استحکام خمشی باشد تا با توجه به شیوه شکست در این چگالی از ایمنی و استحکام مطلوب بهره مند باشد. در هر حال، چگالی بیشتر از 296 kg/m^3 برای اسفنج پلی اتر یورتان سخت پیشنهاد نمی شود و لازم است از سایر مواد جایگزین لایه میانی با خواص مکانیکی بهتر از جنس اسفنج PVC یا PMI استفاده شود.

جدول ۸- مقایسه بین چگالی لایه میانی و تنش برشی به وجود آمده در آزمون خمشی.

نمونه	چگالی (kg/m^3)	بار خمشی حداکثر (N)	تنش خمشی حداکثر (MPa)	تنش برشی (MPa)
۱	۸۰	۵۰	۷/۸	۰/۱۰۲
۲	۱۳۰	۱۵۲	۵/۷	۰/۳۱۰
۳	۱۵۵	۲۹۰	۸/۸	۰/۵۹۲
۶	۲۳۶	۵۱۳	۱۵/۵	۷/۰۵
۷	۲۷۵	۵۲۴	۱۶	۷/۰۷
۸	۲۹۶	۵۳۰	۱۶/۵	۷/۰۸

اپوکسی و لایه میانی اسفنج پلی اتر یورتان سخت، تابعی از خواص جداره ها، چگالی اسفنج لایه میانی و استحکام چسبندگی اسفنج به جداره ها هستند. آگاهی و شناخت کمی و کیفی تنش های وارد بر ساختار ساندویچی موجب تعیین صحیح و دقیق چگالی اسفنج می شود که به نوبه خود عملکرد مطلوب، ایمنی و افزایش عمر مفید را سبب می شود. مطالعات و بررسی های به عمل آمده نمایان گر آن است که افزایش چگالی لایه میانی خواص مکانیکی دیواره را بهبود می بخشد. ولی، با توجه به شرایط عملکرد دیواره باید طوری لایه میانی را از لحاظ جنس و چگالی انتخاب کرد که عملکرد مطلوب، وزن مناسب و قیمت تمام شده با هم بهینه شوند.

افزایش چگالی اسفنج لایه میانی تا حد معینی موجب ارتقای خواص مکانیکی دیواره ساندویچی می شود. افزایش چگالی بالاتر از آن حد، به

مراجع

- Peters S.T., *Handbook of Composites*, Chapman and Hall, London, 255, 1998.
- Nemati S. and Eskandari Jam J., *Composites with Sanwich Structure, J. Compos., Iran Composite Institute*, **19**, 25-28, 2006.
- Sleight D.W. and Wang J.T., *Buckling Analysis of Debonded Sandwich Panel under Compression*, National Aeronautics and Space Administration (NASA) Technical Memorandum 4701, Langly Research Center, Hempton, Virginia, 1995.

4. Gibson L.J. and Ashby M.F., *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd ed., Cambridge University, UK, 173-179, 1997.
5. Sadighi M., Pourayevali H., and Saadati M., A Study of Indentation Energy in Three Points Bending of Sandwich Beams with Composite Laminated Faces and Foam Core, *Int. J. Mech. Sys. Sci. Eng.*, **37**, 214-220, 2007.
6. Mirzapour A., Beheshty M.H., and Vafayan M., The Response of Sandwich Panels with Rigid Polyurethane Foam Cores under Flexural Loading, *Iran. Polym. J.*, **14**, 1082-1088, 2005.
7. Mahfuz H., Al Mamun W., and Jeelani S., High Strain Rate Response of Sandwich Composites, Effect of Core Density and Core-skin Debond, *J. Adv. Mat.*, **34**, 22-24, 2002.
8. www.tricle corp.com, Design and Versatility, 2005.
9. Zenkert D., *The Handbook of Sandwich Constructions*, EMAS, London, 3-7, 1997.
10. Reinhart T.J., *Engineered Materials Handbook Composites*, **1**, ASM International, Ohio, 726-727, 1998.
11. Khatibi M.A. and Rahimi H., Fabrication Process and an Investigation of Properties of Thermoplastic Honeycomb Sandwich Panels, *Iran. Polym. J.*, **6**, 131-136, 2007.
12. Astrom B.T., *Manufacturing of Polymer Composites*, Chapman and Hall, London, 22-24, 1997.
13. www.spsystem.com, Guide to Composites, UK, 41-42, 2008.
14. Jordan K.M., Energy Absorbing Fiberglass Sandwich Panel with Corrugated Core, *US Pat. 5791118*, 1998.
15. Thomas D., Mantell S.C., and Davidson J.H., Analysis of Sandwich Panels for an Energy Efficient and Self-supporting Residential Roof, Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota, 2005.
16. Summerscales J., Composites Design and Manufacture, MATS 324, Advanced Composites Manufacturing Center, School of Engineering, University of Plymouth, 2008.
17. Ciba Data Sheet, Cold-curing Epoxy System Based on Araldite LY 5052/Hardner HY 5052, Pub. No. 38285/1/e, 1998.
18. www. Huntsman Company, Urethane System Catalog, Cambridge, UK, 2005.
19. Hummel and Scholl, *Atlas of Polymer and Plastics Analysis*, 1981.
20. Standard Test Method for Density of Core Materials for Structural Sandwich Constructions, ASTM C 271-99.
21. Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores, ASTM C 365-00.
22. Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions, ASTM C 393-00.
23. www.spsystem.com, Guide to Composites (GTC-1-1098-17), 2009.
24. Jahed H., Noban M.R., and Eshraghi M.A., ANSYS Finite Element, University of Tehran, Chap. 1-4, 2004.