بررسی خواص آکوستیک کامپوزیت‌های لیفی بر پایه رزین اپوکسی

امیر سهیل پیرایش فر

سید یحیی موسوی

امروزه در سراسر جهان استفاده از چوب در ساخت آلات موسیقی کاربرد بسیار دارد؛ چنانکه در ساخت اکثر سازهای ارف و سازهای آکوستیک و حتی در ساخت انواع پیانو از گونه‌های مختلف چوب استفاده می‌شود. گرچه این کاربرد عمومیت دارد، اما استفاده از چوب معایبی را به دنبال دارد، معایبی چون: نداشتن صدای مطلوب در محیط‌های مرطوب، زمان بر بودن فرایند ساخت ساز به دلیل طولانی‌بودن مدت زمان فرآوری چوب، تغییر خواص چوب با گذشت زمان، امکان تغییر شکل ساز با گذشت زمان که غالباً در دسته سازهای زهی قابل رؤیت است، احتمال وجود خطای سازندگان در حین ساخت و یا تراشیدن ساز(۱).

بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری به جای چوب، می‌تواند بسیاری از مشکلات فوق را برطرف کند؛ به طوری که با استفاده از این مواد می‌توانیم، سازی اصلاح شده را تولید نماییم که علاوه بر اینکه دیگر مشکلات فوق‌الذکر سازهای چوبی را ندارد، این امکان را به وجود می‌آورد تا به سازی مستحکم، یک دست و یک‌نواخت و حتی با قیمتی پایین‌تر دست یابیم (۱و ۲و ۳).

یکی از انواع کامپوزیت‌ها که در کاربردهای صوتی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند، کامپوزیت‌های لیفی[1] هستند. اگرچه استفاده از کامپوزیت‌های لیفی در کاربردهای موسیقی مزایای بسیار زیادی دارد (۱و۲و۴)، ولی متأسفانه اقدامی برای بررسی خواص آکوستیک آنها و همچنین تولید سازهای کامپوزیتی در ایران صورت نگرفته است.

در این کامپوزیت‌ها، الیاف به وسیله چسب یا رزین به صورت یکپارچه در کنار هم قرار می‌گیرند. یکی از متداول‌ترین رزین‌ها که کاربرد وسیع‌تری در کاربردهای آکوستیک دارند، رزین‌های اپوکسی هستند و عموماً در غالب مقالات و ثبت اختراعات (پتنت‌ها) از کامپوزیت‌های اپوکسی به همراه الیاف کربن، الیاف کولار و نیز الیاف شیشه به منظور استفاده در ادوات موسیقی نام برده شده است (۲ و ۴ و ۵ و ۶).

به منظور آشنایی بیشتر با این مواد شیمیایی، درباره خواص هر یک به‌طور مختصر در ذیل توضیح داده شده است:

رزین‌های اپوکسی: رزین‌های اپوکسی در کاربردهای مختلفی از قبیل پوشش سطح، چسب، روکش‌دهی[2] و... استفاده می‌شوند. اپوکسی می‌تواند در حضور عوامل پخت و سخت‌کننده‌ها[3]، یک ساختار شبکه‌ای مستحکم را تشکیل دهد (۷ و ۸). عمده ویژگی‌های اپوکسی‌ها عبارتند از:

- مقاومت شیمیایی عالی
- چسبندگی بسیار عالی
- استحکام کششی
- مدول فشاری و خمشی بسیار بالا
- پایین بودن جمع‌شدگی در حین پخت
- پایداری ابعادی مناسب
- عایق عالی الکتریسیته
- دوام بالا در شرایط سخت محیطی
- قابلیت پخت در دماهای مختلف
- مقاومت خستگی ممتاز
- نداشتن بو

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

الیاف کربن[۴]: مشخصه الیاف کربن، سبکی، استحکام و سختی بالای آن است. فیبرهای کربن دارای خواص بسیار خوبی در مقابل کشش و خمش بوده و جلاپذیری آنها نیز مناسب است. همچنین مقاوم در برابر رطوبت و تغییرات دمایی هستند. از جنبه اقتصادی نیز می‌توان گفت قیمت مناسبی دارند. مهم‌ترین شکل الیاف کربن به‌صورت پارچه است که در بافت‌های مختلف وجود دارد (۹).

الیاف کولار[۵]: دانسیته کم و استحکام کششی بسیار بالای این الیاف، موجب تشکیل یک ساختار چقرمه و مقاوم به ضربه گردیده است. به‌گونه ای که جلیقه ضد گلوله از موفقیت‌آمیزترین کاربردهای آن است (۱۰ و ۱۱).

الیاف شیشه[۶]: الیاف شیشه استحکام و سختی مناسبی دارد و خواص مکانیکی خود را در دماهای بالا حفظ می‌کند. همچنین این الیاف در برابر رطوبت و خوردگی از مقاومت مناسبی برخوردار است (۱۰).

جدول۱: خواص فیزیکی- مکانیکی رزین‌های اپوکسی و الیاف‌های کربن، کولار و شیشه

	رزین اپوکسی	الیاف کربن	الیاف کولار	الیاف شیشه
مدول کششی [GPa]	3-6	300-800	110-150	70-90
استحکام کششی [MPa]	35-100	2740-6370	3400-4150	3500-4500
درصد ازدیاد طول تا پارگی	5-6.5	0.8-2.4	1.7-4	4.5-5.5
چگالی [gr/ml]	1-1.3	1.7-1.9	1.2-1.5	2.4-2.8

جدول۲: خواص فیزیکی- مکانیکی الیاف انتخاب شده در این بررسی علمی

	الیاف کربن	الیاف کولار	الیاف شیشه
نام گرید مورد آنالیز قرار گرفته	T1000G	Kevlar49	YC-G420 E-glass
مدول کششی [GPa]	۳۰۰	۱۴۰	۸۰
استحکام کششی [MPa]	۶۳۷۰	۳۸۵۰	۳۸۰۰
درصد ازدیاد طول تا پارگی	۲.۲	۲.۸	۴.۸
چگالی [gr/ml]	۱.۸	۱.۴	۲.۶

یکی از پارامترهایی که در آکوستیک بسیار اهمیت دارد مدول کشسی[۷] نمونه‌های مورد آزمایش است. برای اندازه‌گیری این پارامتر، از دستگاه Tensometer استفاده می‌شود؛ به‌طوری که دو سر نمونه توسط فک‌های دستگاه گرفته شده و با سرعت ثابت کشیده می‌شود، این عمل تا شکسته شدن نمونه ادامه پیدا می‌کند. در پایان دستگاه نمودار تنش و کرنش را از ابتدا تا نقطه شکست نمونه رسم می‌نماید، که شیب این نمودار در کرنش‌های اولیه برابر مدول یانگ[۸] می‌باشد.

گرفتن آزمون‌های متعدد از نمونه‌های کامپوزیتی گوناگون، نشان داده است که در نمونه‌هایی که الیاف آنها تک جهته هستند، مدول کشسی در جهت طولی (E_L) و عرضی (E_T) الیاف به ترتیب از روابط زیر پیروی می‌کند (۱۱ و ۱۲):

معادله (۱)
$$E_L = V_f E_f + (1 - V_f) E_m$$

معامله (۲)
$$E_T = \frac{(V_f + \eta_T V_m) E_f E_m}{(V_f E_m + \eta_T V_m E_f)}$$

که در این روابط V_f و V_m به ترتیب ترکیب درصد حجمی الیاف و رزین، E_f و E_m نیز به ترتیب مدول کشسی الیاف و رزین می‌باشند. n_T نیز ثابتی است که بسته به نوع الیاف و ماتریس متفاوت است.

همان‌طور که ملاحظه می‌کنید ترکیب درصد الیاف تأثیر بسیار زیادی بر روی مدول‌های طولی و عرضی نمونه‌ها دارد، که در این میان هر چه ترکیب درصد الیاف بیشتر باشد، به همان نسبت میزان مدول نیز افزایش می‌یابد. یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین کننده ترکیب درصد الیاف، روش استفاده شده برای ساخت کامپوزیت است، به طوری که با استفاده از روش پالتروژن[۱۰] می‌توان نمونه‌ای با ترکیب درصد بالاتر از ۸۰٪ الیاف تهیه کرد، این در حالی است که در روش لایه گذاری دستی[۱۱] بسته به مهارت کارگر این رقم بین ۷۰-۵۰ درصد متغیر خواهد بود (۱۲). در این بررسی ترکیب درصد حجمی الیاف به صورت ثابت برابر ۷۰٪ در نظر گرفته شده است.

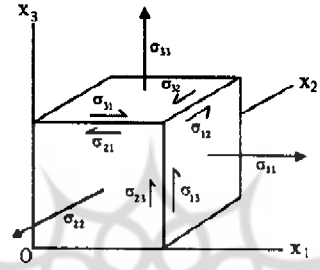
پارامتر دیگری که بر روی خواص آکوستیک تأثیر به‌سزایی دارد، مدول برشی[۱۲] نمونه‌های کامپوزیتی است، که برای اندازه‌گیری این پارامتر از دستگاهی که بسیار شبیه به دستگاه Tensometer است، استفاده می‌شود، با این تفاوت که در اینجا به جای نیروی کشسی به نمونه‌ها نیروی برشی وارد

می‌گردد. در این مورد نیز آزمایش‌های متعدد منجر به معرفی فرمول زیر شد (۱۱ و ۱۲):

$$G_S = \frac{(V_f+\eta_s V_m)G_f G_m}{(V_f G_m+\eta_s V_m G_f)}$$ معادله (۳)

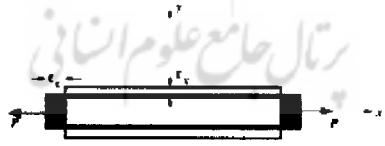
در رابطه بالا V_f و V_m به ترتیب ترکیب درصد الیاف و ماتریس، G_f و G_m نیز به ترتیب مدول برشی الیاف و ماتریس است. ر د نیز ثابتی وابسته به نوع لیف و ماتریس است.

در این میان برای درک بهتر این پدیده‌ها، در شکل (۱) انواع نیروهای کششی و برشی وارد شده بر سه صفحه جلویی مکعب زیر نشان داده شده است:



شکل ۱: شمایی از نیروهای کششی و برشی وارد شده بر سه صفحه جلویی مکعب

پارامتر صوتی بسیار مهم دیگر ضریب پوآسون[۱۳] است، ضریب پوآسون در اصل یک نسبت است که بر روی خواص آکوستیک تأثیر قابل توجهی دارد. فرض کنید که نمونه مورد نظر در جهت طولی تحت کشش قرار گیرد، با توجه به ثابت بودن حجم نمونه، در جهت عرضی کاهش ضخامت رخ خواهد داد، که این پدیده در شکل (۲) نشان داده شده است:



شکل ۲: تغییر ابعاد طولی و عرضی نمونه تحت کشش

بررسی‌ها نشان داده است که در نمونه‌های کامپوزیتی لیفی تک‌جهته به علت اورتوتروپیک[۱۴] بودن

آنها، میزان کاهش ضخامت در دو جهت دیگر کاملا برابر است. همچنین نسبت کاهش عرضی به افزایش طولی برای هر ماده مقداری ثابت است که به آن ضریب پوآسون می‌گویند، که با استفاده از معادله (۴) به‌دست می‌آید (۱۲):

$$\gamma = \frac{\text{کاهش عرض}}{\text{طول افزایش}} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}$$

معادله (۴)

بررسی‌ها همچنین ثابت کرده است که نسبت مدول طولی (E_L) به مدول برشی (G_s) نیز با ضریب پوآسون نسبت مستقیم دارد، که معادله (۵) گویای این موضوع است:

$$E_L = 2G_S(1 + \gamma)$$ معامله (۵)

پارامتر دیگری که تأثیر بسیار زیادی بر روی خواص آکوستیک دارد، چگالی نمونه‌هاست (۱۳). در این مورد نیز بررسی‌های گوناگون صحت فرمول زیر را به اثبات رسانده است:

$$\rho = V_f\rho_f + (1 - V_f)\rho_m$$ معادله (۶)

که در این فرمول V_F ترکیب درصد حجمی الیف می‌باشد، همچنین ρ_M و ρ_F نیز به ترتیب چگالی رزین و الیاف است.

پارامترهای تعریف شده در فوق (یعنی مدول‌های طولی، عرضی و برشی، ضریب پوآسون و چگالی کامپوزیت) برای کامپوزیت اپوکسی حاوی ۷۰ درصد حجمی از الیاف کربن، کولار و شیشه که مشخصات آنها در جدول ۲ آورده شده است، محاسبه گردید و مقادیر به‌دست آمده برای کامپوزیت‌های لیفی حاصله در جدول ۳ درج شد (۱۱ و ۱۲).

جدول۳: خواص فیزیکی- مکانیکی کامپوزیت‌های لیفی بر پایه رزین اپوکسی

مدول طولی [GPa]	۲۱۱.۲	۹۹.۲	۵۷.۲
مدول عرضی [GPa]	۲۱.۳۴	۱۹.۵۶	۱۸.۰۱
مدول برشی [GPa]	۷.۵	۲.۱	٤.٦
ضریب پوآسون	۱۳.۰۸	۲۲.٦۲	۵.۲۲
چگالی [gr/ml]	۱.۵۹	۱.۳۱	۲.۱۵

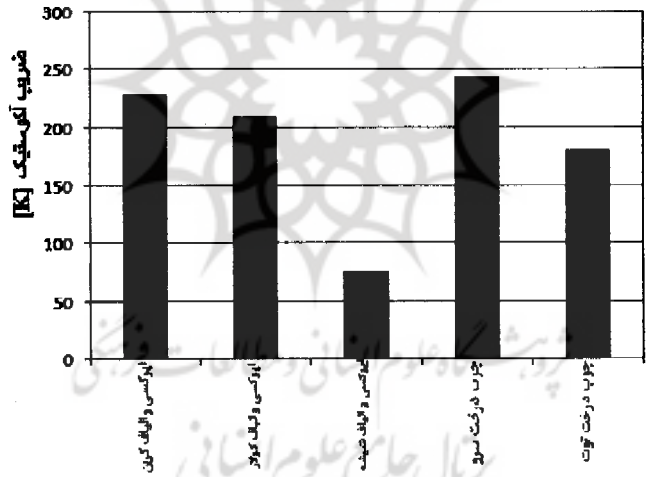
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

داده‌های جدول (۳) مدول‌های بسیار بالایی را برای کامپوزیت‌های مربوطه نشان می‌دهند. بایستی توجه داشت که یکی از مشکلات ذاتی چوب در سازهای موسیقی، تغییر شکل و خم شدن آن تحت فشار وارده از سیم‌ها در درازمدت است. و علت آن نیز کم بودن مدول گونه‌های چوبی می‌باشد[۱۵]. حال با انتخاب کامپوزیت‌های معرفی شده و با توجه به مدول بسیار بالای آنها، می‌توان احتمال این تغییرات را به حداقل رساند.

یکی از پارامترهای صوتی بسیار با اهمیت، ضریب آکوستیک[۱۶] می‌باشد که با بهره‌گیری از داده‌های جدول (۳) و با استفاده از فرمول زیر به‌دست می‌آید (۱۳):

$$K^2 = \frac{E_L}{\rho^3} \qquad \text{معادله (۷)}$$

که در این فرمول k ضریب آکوستیک، E_L و ρ نیز به‌ترتیب مدول طولی و چگالی نمونه‌های مورد بررسی می‌باشند، مقادیر ضریب آکوستیک برای نمونه‌های مورد بررسی قرار گرفته، به همراه مقدار این پارامتر برای دو نمونه شاهد از چوب درخت توت و سرو در نمودار (۱) نشان داده شده است:



نمودار ۱: میزان ضریب آکوستیک در نمونه‌های اپوکسی الیاف کربن، اپوکسی الیاف کولار، اپوکسی الیاف شیشه، چوب درخت سرو و چوب درخت توت سفید (۱۳)

ضریب آکوستیک یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین کننده در صدادهی سازها می‌باشد و همان‌طور که ملاحظه شد، مقادیر به‌دست آمده برای نمونه‌های کامپوزیتی بسیار نزدیک به نمونه‌های چوبی است.

یک پارامتر صوتی بسیار مهم دیگر، سرعت فراصوت[17] در نمونه‌هاست، که بر مبنای سرعت انتقال پالس‌های صوتی به‌دست می‌آید، به‌طوری که نمونه‌ای که ابعاد آن دقیقاً اندازه‌گیری شده است، در دستگاه قرار داده می‌شود، و زمان انتقال موج‌های صوتی از فرستنده تاگیرنده دستگاه اندازه‌گیری می‌شود، حال با توجه به ابعاد اندازه‌گیری شده و همچنین زمان انتقال موج‌های صوتی در نمونه، سرعت فراصوت محاسبه می‌شود (۱۳ و ۱۴). آزمایش‌های متعدد نشان از تطابق داده‌های تجربی با داده‌های به‌دست آمده از فرمول‌های زیر دارد:

$$E_L = \rho V_L^2$$ معادله (۸)

$$E_T = \rho V_T^2$$ معادله (۹)

که در این فرمول V_L سرعت فراصوت در جهت طولی، V_T سرعت فراصوت در جهت عرضی، E_L و E_T نیز به ترتیب مدول طولی و عرضی نمونه‌ها می‌باشند(۱۵). تحقیقات نشان داده است که نسبت سرعت فراصوت در جهت طولی به سرعت فراصوت در جهت عرضی از اهمیت بسیار بالایی در صدادهی آلات موسیقی برخوردار است، به طوری که در تخته صدای جلویی سازهای زهی مانند ویولون ترجیح داده می‌شود که این نسبت بزرگ‌ترین مقدار ممکن انتخاب شود. این در حالی است که نمونه‌های با مقدار کمتر این نسبت، برای قسمت‌های پشت و کنار ساز استفاده می‌شوند(۱۳).

جدول۴: سرعت فراصوت در جهت‌های طولی، عرضی و عمودی، و همچنین نسبت این سرعت‌ها برای نمونه‌های اپوکسی- الیاف کربن، اپوکسی- الیاف کولار، اپوکسی- الیاف شیشه، چوب درخت سرو و چوب درخت توت (۱۳).

سرعت در جهت طولی [V_X] [m/s]	11525.198	8702.022	5157.969	3769.2	4669.66
سرعت در جهت عرضی[V_Y] [m/s]	3663.427	3864.166	2894.642	2041.47	1819.16
سرعت در جهت عمود [V_Z] [m/s]	3663.427	3864.166	2894.642	2597.8	2497.58
نسبت سرعت در جهت طولی به عرضی [V_X]/[V_Y]	3.146	2.252	1.782	1.846	2.567
نسبت سرعت در جهت طولی به عمودی [V_X]/[V_Z]	3.146	2.252	1.782	1.451	1.869

همان‌طور که ملاحظه شد، در این مورد نیز کامپوزیت‌های پلیمری شباهت بسیار زیادی به چوب دارند، به‌طوری که بالا بودن بسیار مطلوب نسبت این سرعت‌ها، نمونه الیاف کربن را به نمونه‌ای ایده‌آل برای تولید صفحه صدای رویی برای سازهای موسیقی تبدیل کرده است.

یکی از مشکلات دیگر سازهای چوبی، جذب رطوبت بسیار بالای چوب است، به‌طوری که در محیط‌های مرطوب چوب رطوبت را جذب می‌کند و همین سبب صدادهی بسیار بد سازهای چوبی در این محیط‌ها می‌شود (۱۶ و ۱۷). حال با تغییر مجدد شرایط، چوبی که رطوبت را به خود گرفته، در هنگام خشک شدن مقداری تغییر شکل می‌دهد و باعث بروز مشکلاتی در سازهای چوبی می‌شود. میزان جذب آب و همچنین تغییر ابعاد کامپوزیت‌های پلیمری که برای مدت‌های بسیار طولانی در داخل آب قرار گرفته‌اند، در کنار همین داده‌ها برای نمونه‌های چوب سرو و توت در جدول (۵) آورده شده است.

جدول ۵: میزان جذب آب و درصد تغییر ابعاد پس از مدت‌های طولانی قرارگیری در داخل آب برای کامپوزیت‌های الیاف کربن و رزین اپوکسی، الیاف کولار و رزین اپوکسی، الیاف شیشه و رزین اپوکسی

درصد وزنی جذب آب	0.5-1.2	1.2-1.7	1.0-1.5
درصد انبساط رطوبتی طولی	≃۰	≃۰	≃۰
درصد انبساط رطوبتی عرضی	۰.۳۹۷ -۰.۹۴۹	۰.۷۸ -۱.۱۰۷	۱.۰۶۹ -۱.۵۹۹
درصد انبساط رطوبتی عمودی	۰.۳۹۷ -۰.۹۴۹	۰.۷۸ -۱.۱۰۷	۱.۰۶۹ -۱.۵۹۹

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

همان‌طور که در جدول (۵) نشان داده شده است، میزان جذب آب و تغییر ابعاد کامپوزیت‌های پلیمری، حتی پس از مدت‌های طولانی قرارگیری در آب، بسیار ناچیز و غیر قابل مقایسه با چوب است. مطالعات نشان داده است که بین میزان جذب آب و افت خواص مکانیکی ارتباط مستقیمی وجود دارد، به‌طوری که با افزایش میزان جذب آب در یک نمونه، به همان میزان افت خواص مکانیکی و به پیرو آن افت خواص آکوستیک مشاهده می‌شود. حال با بررسی شرایط کارکرد سازهای موسیقی که بسته به آب و هوای هر منطقه ممکن است برای مدت‌های طولانی در شرایط مرطوب قرار بگیرند و با توجه به نتایج ذکر شده در جدول (۵) می‌توان

مطمئن بود که رطوبت موجود در هوا بر روی صدادهی سازهای کامپوزیتی هیچ تأثیری نخواهد داشت.

یکی از مشکلات دیگر در ساخت سازهای چوبی، خواص متفاوت چوب‌ها در بین درختان متفاوت از یک گونه و حتی در قسمت‌های مختلف یک درخت است، به طوری که با استفاده از چوب نمی‌توان از مناسب بودن صدای ساز در حال ساخته شدن اطمینان حاصل کرد. در حالی که یکی از محاسن بسیار بزرگ استفاده از کامپوزیت‌ها در ساخت آلات موسیقی، ساخت سازهایی مهندسی که صدادهی آنها از قبل پیش بینی شده، می‌باشد. بنابر مطالب بیان شده، با توجه به خواص مواد اولیه مورد استفاده و همچنین ترکیب درصدهای آنها، می‌توان خواص آکوستیک کامپوزیت مربوطه را به‌راحتی پیش‌بینی کرد. یعنی می‌توان با انتخاب مناسب مواد اولیه و همچنین ترکیب درصدهای آنها، ساخت سازی با خواص از پیش تعیین شده را میسر نمود. مطالعات نشان داده است که با بررسی‌های فیزیکی می‌توان تشخیص داد که برای خلق صداهای جدید چه خواص آکوستیکی مورد نیاز است(۱۸)، که در این میان با تغییر میزان ترکیب درصدها و حتی با ساخت کامپوزیت‌هایی که در آنها چندین الیاف مختلف به‌کار رفته است[۱۸]، می‌توان به راحتی به آن مقادیر خاص رسید. در این میان تنوع بسیار وسیع موجود در مواد اولیه کامپوزیت‌ها امکان رسیدن به هر خواصی را برای ما میسر می‌سازد، به طوری که با استفاده از الیاف کربن مدول بالا[۱۹] می‌توان به کامپوزیتی با مدول بسیار بالا و حتی بیشتر از 700GPa دست یافت. این یکی از قابلیت‌های بسیار مهم کامپوزیت‌هاست که می‌تواند سبب ایجاد تحولاتی بسیار بزرگ در موسیقی و حتی به تولید سازهایی جدید منجر شود. این در حالی است که انجام چنین فعالیت‌هایی با استفاده از چوب غیرممکن است.

یکی از برجستگی‌های چوب برای استفاده در سازهای موسیقی، وجود نقش و نگارهای زیبا در آن است که همین سبب تولید سازهایی زیبا می‌شود. این در حالی است که کامپوزیت‌های پلیمری نیز از زیبایی خاص خود برخوردارند، ساز ساخته شده با الیاف شیشه بسیار زیبا و همچون کریستال شفاف می‌باشند. همچنین به‌دلیل خصوصیات بیان شده، در کامپوزیت‌های پلیمری، سازنده ساز از آزادی‌های بسیار زیادی برخوردار است، به طوری که می‌تواند با وارد کردن یک لایه نازک از پارچه ابریشمی در لایه بیرون ساز، سازی با زیبایی‌هایی شگفت‌انگیز را وارد بازار موسیقی نماید. در این مورد باتوجه به مطالب بیان شده می‌توان اثبات نمود که این لایه نازک تأثیر چندانی در صدادهی ساز نخواهد داشت و یا با ایجاد تغییراتی بسیار جزئی در انتخاب مواد و نحوه چیدمان آنها، می‌توان به راحتی آن اثر جزئی را نیز از بین برد.

* با تشکر از جناب آقای دکتر محمدمهدی جلیلی که مقاله، زیر نظر ایشان تهیه شده است.

پی‌نوشت‌ها:

1. Fiber Composites
2. Coating
3. Hardener
4. Carbon fiber
5. Kevlar
6. Fiberglass
7. Tensile Modulus
8. Young's Modulus
9. Unidirectional
10. Pultrusion
11. Hand lay up
12. Shear modulus
13. Poisson's ratio

۱۴. به اجسامی اورتوتروپیک گفته می‌شود که خواص آنها در تمامی جهات به غیر از یک جهت کاملا یکسان است.

۱۵. مدول طولی گونه‌های چوب حداکثر 20GPa است.

16. Acoustic Coefficient
17. Ultrasound velocity
18. Hybrid Composite
19. High modulus carbon fiber

منابع:

۱. سید یحیی موسوی، امیرسهیل پیرایش فر. کامپوزیت‌های پلیمری در خدمت موسیقی. فصلنامه هنر. شماره ۷۵. بهار ۱۳۸۷.

2. Decker Jr.John A.Linda M. Christopher J.Composite- materials acoustic stringed musical instrument. United States Patent 4969381. 1990.

3. Stankey, Middleman. Fundamental of Polymer Processing. McGrew-Hill, Inc 1997.

4. Stephen J. Davis. One Piece Composite Guitar body. United States Patent 6683236B2. 2004.

5. Westheimer, Jack L. Stringed musical instrument body and neck composition and method of making body and neck. United States Patent 5905219.

6. Yamada, Takashi, Matsumoto, Toyosaku. Soundboards for string instruments having plastice foam body with harder Outer layers. United States Patent 3724312.

۱۵. جان الکونیس، ویلیام مک نایت، مایکل شن. ترجمه: پرویز نورپناه، شهرام ارباب. مقدمه‌ای بر ویسکو الاستیسیته پلیمرها، انتشارات دانشگاه امیرکبیر، چاپ دوم، بهار ۱۳۸۶.

۱۶. حسن زندباف. فرم در موسیقی. انتشارات پارت. پاییز ۱۳۷۶.

۱۷. حمید زاهدی، تئوری موسیقی، اصول هارمونی (هوموفونی و پلی فونی و علوم موسیقی)، انتشارات پارت، تابستان ۱۳۷۸.

18. Parry, Williams. A Music Course for Students. Oxford University. 1965.