



پژوهشگاه پلیمر و پرتوشیمی ایران

گروه کامپوزیت و چسب

# مبانی طراحی کامپوزیتها

Principles of Composites Design

دکتر حمید رحیمی

عنوانین مورد بحث:

- اصول طراحی
- انواع کامپوزیتها
- مکانیک کامپوزیتهای الیاف بلند
- ساختارهای ساندویچی
- اتصالات

## اصول طراحی

انتخاب و طراحی یک ماده کامپوزیت برای یک کاربرد خاص کار ساده‌ای نیست، مواد کامپوزیت ذاتاً دارای خواص غیرهمگن بوده و از این رو بررسی و شناسایی رفتار آنها در برابر شرایط مختلف از اهمیت خاصی برخوردار است. به منظور طراحی اصولی یک محصول کامپوزیتی جنبه‌های مختلفی شامل تحلیل نظری مواد کامپوزیت، فرایندهای تولید، روش‌های مونتاژ و تعمیر و نگهداری آن را بایستی درنظر گرفت.

### مراحل طراحی کامپوزیتها

۱- گردآوری اطلاعات درخصوص کاربرد قطعه (نیروهای استاتیک، دینامیک و شرایط محیطی)

۲- مشخصات اولیه قطعه (مواد، ابعاد و چیدمان لایه‌ها)

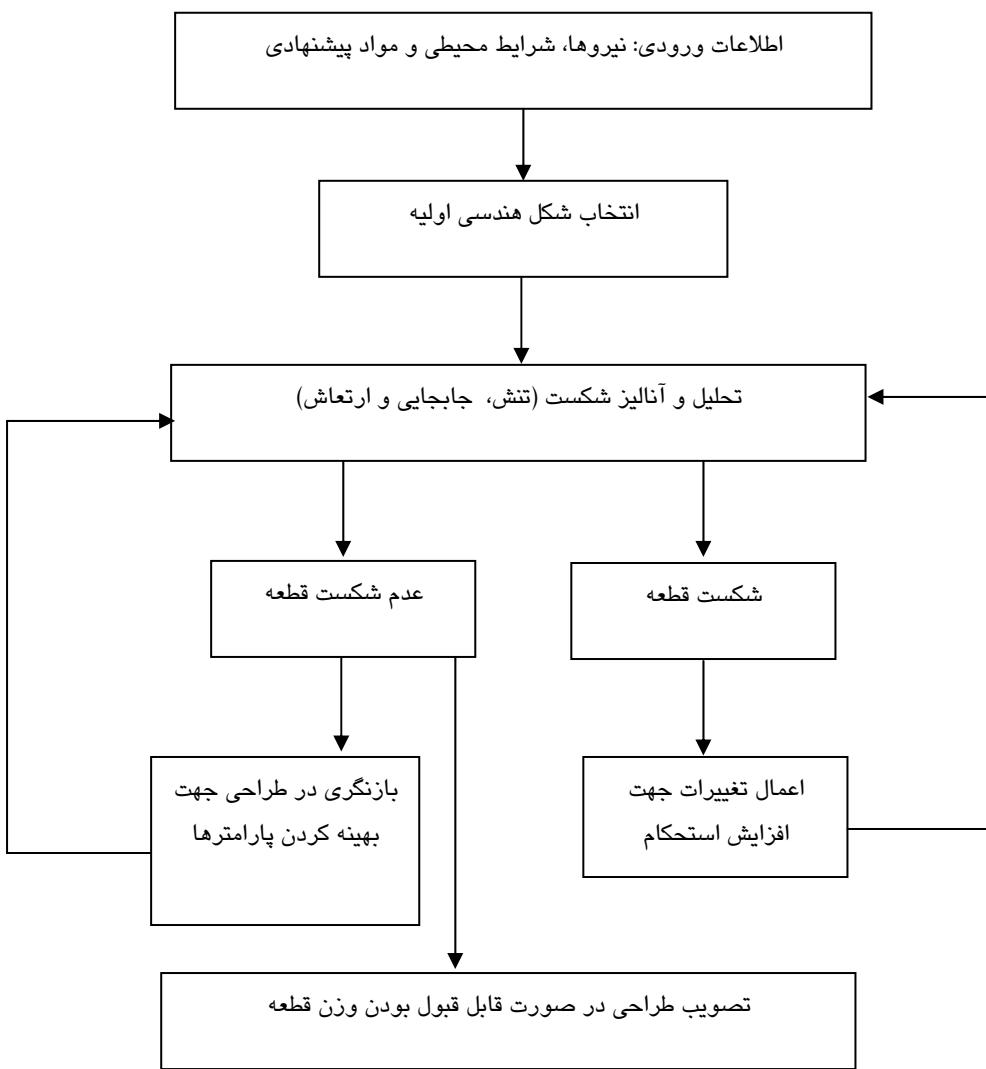
۳- زمان و هزینه

۴- بررسی روش‌های محاسباتی (تحلیل و عددی)

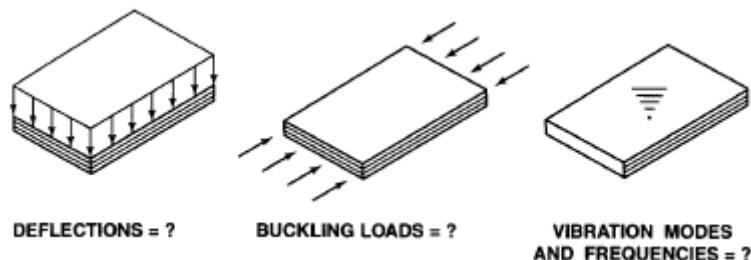
۵- شناسایی روش‌های ساخت

۶- نحوه مونتاژ (روش‌های اتصال قطعات)

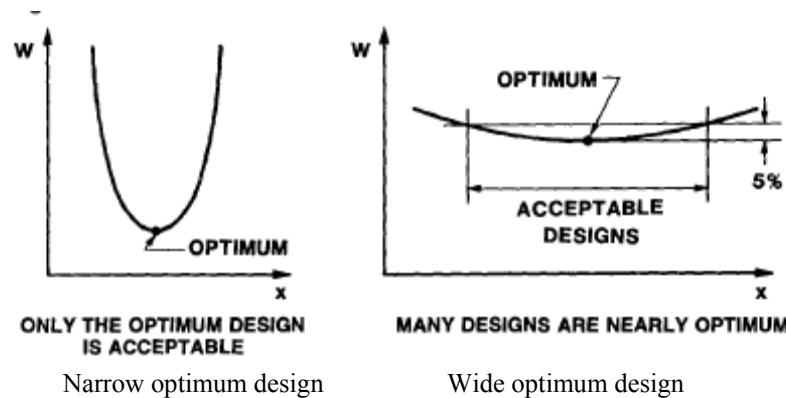
۷- بهینه‌سازی (وزن کم، استحکام بالا و هزینه پایین)



شكل ۱ - فرایند طراحی کامپوزیتها

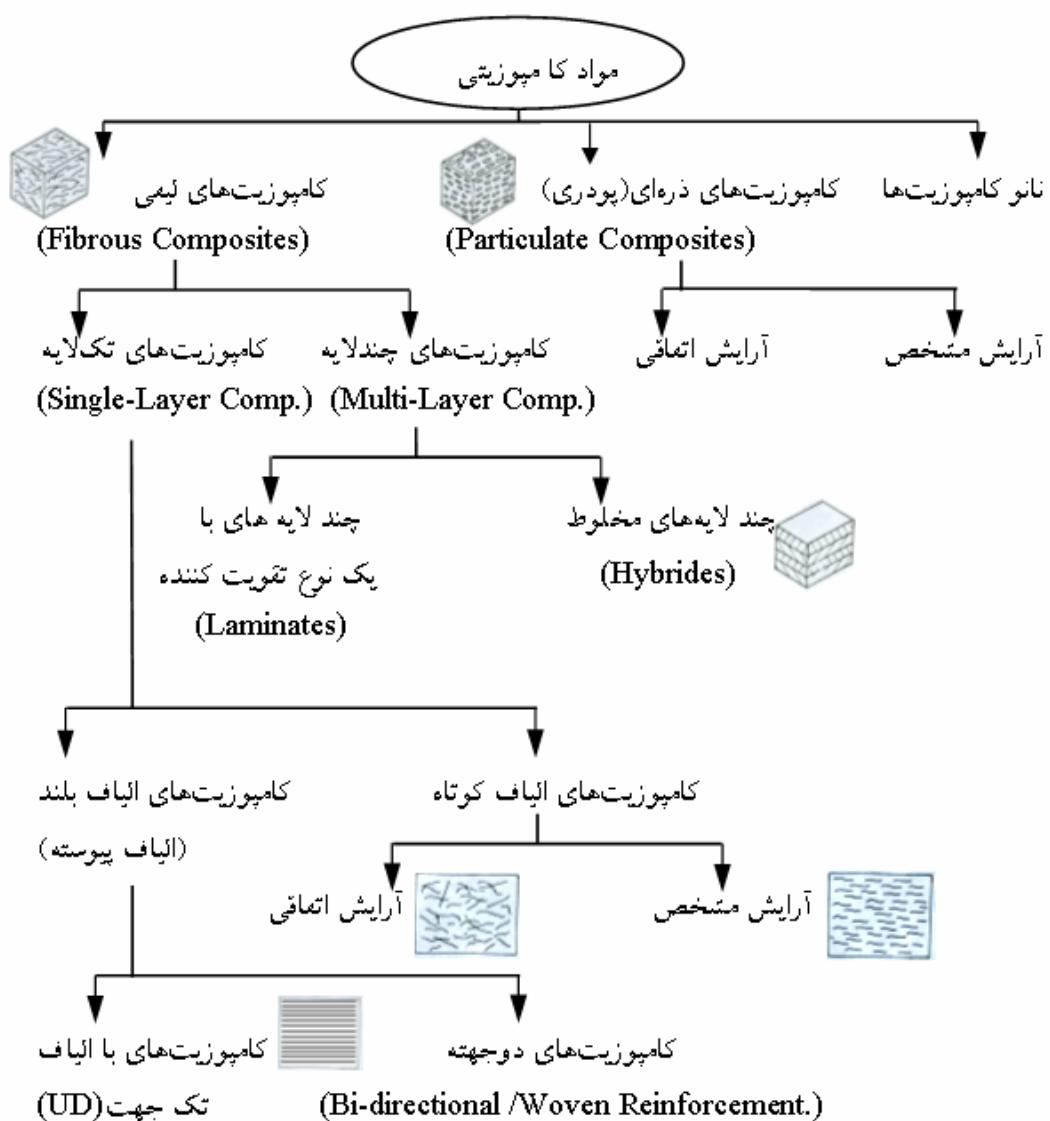


شکل ۲ - سؤالهای اساسی در تحلیل صفحه های کامپوزیتی



شکل ۳ - روشهای طراحی بهینه

## انواع کامپوزیتها



شکل ۴ – طبقه بندی انواع مختلف کامپوزیتها

## مکانیک کامپوزیتهای الیاف بلند

شناخت رفتاری مواد

(۱) مواد همگن (isotropic):- خواص این مواد در همه جهات یکسان است. خصوصیات تنش-کرنش

آنها بوسیله ۲ ثابت الاستیک مستقل تعریف می‌شود ( $E, v$ ).

(۲) مواد ارتوتروپیک (orthotropic):- خواص این مواد در سه محور اصلی عمود بر هم متفاوت است.

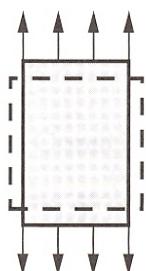
خصوصیات تنش-کرنش آنها بوسیله ۹ ثابت الاستیک مستقل تعریف می‌شود.

$(E_{11}, E_{22}, E_{33}, G_{12}, G_{13}, G_{23}, v_{12}, v_{13}, v_{23})$

(۳) مواد غیر همگن (anisotropic):- رفتار این مواد کاملاً غیر همگن بوده و تعداد ثابت‌های الاستیک مستقل آنها ۱۳ می‌باشد. رفتار این مواد به شکلی است که اگر تنش مستقیم به آنها اعمال شود علاوه

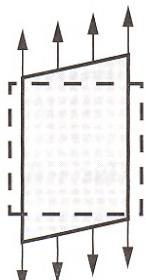
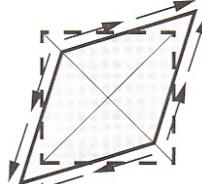
برازدیاد طول موجب تغییر شکل برشی (shear deformation) نیز می‌گردد.

Normal Stress

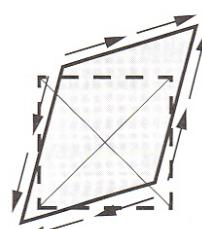


Shear Stress

Isotropic  
and  
Orthotropic

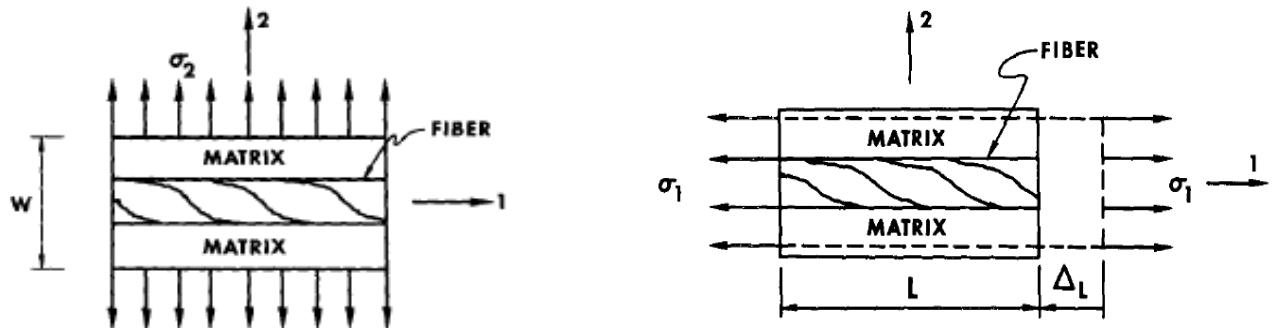


Anisotropic



شکل ۵ - رفتار مکانیکی مواد مختلف

## خصوصیات کامپوزیت‌های تک لایه-تک جهت ( Unidirectional Lamina )



شکل ۶ - شماتیک کامپوزیت تک لایه و اعمال نیرو در جهات طول و عمود بر الیاف

تحت بار کششی طولی، با فرض کرنش یکسان برای الیاف، ماتریس و مواد مرکب

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_c$$

با توجه به الاستیک بودن الیاف و ماتریس

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f = E_f \varepsilon_c$$

$$E_f \gg E_m \Rightarrow \sigma_f \gg \sigma_m \quad \sigma_m = E_m \varepsilon_m = E_m \varepsilon_c$$

مجموعه نیروی روی مواد مرکب

$$P_c = P_f + P_m$$

$$\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m$$

$$\sigma_c = \sigma_f \frac{A_f}{A_c} + \sigma_m \frac{A_m}{A_c}$$

با فرض اینکه حباب در نمونه نیست  $\leftarrow$

$$V_m = A_m / A_c \quad V_f = A_f / A_c$$

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m$$

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f)$$

$$E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m$$

معادله فوق در مواد مرکب قانون مخلوطها نامیده می‌شود.

مدول کامپوزیت در جهت عمود بر الیاف

$$E_2 = \frac{E_m E_f}{E_f V_m + E_m V_f}$$

مدول برشی

$$G_{12} = \frac{G_m G_f}{G_f V_m + G_m V_f}$$

خواص کامپوزیتهای حاوی پارچه الیاف نمدی ، سوزنی ( Chopped Strand Mat ) یا الیاف کوتاه

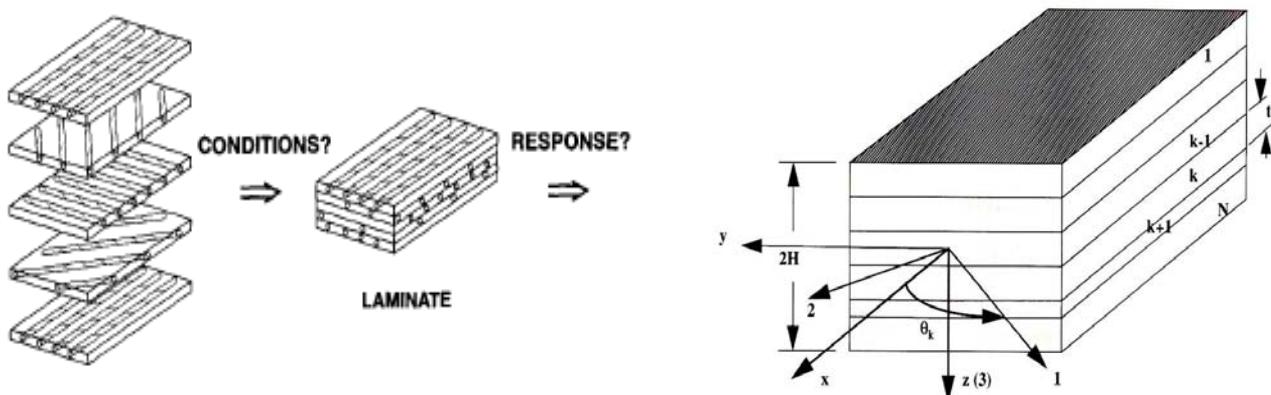
مدول کششی در هر جهت

$$E \text{ (random)} = \frac{3}{8} E_{11} + \frac{5}{8} E_{22}$$

مدول برشی در هر جهت

$$G \text{ (random)} = \frac{1}{8} E_{11} + \frac{1}{4} E_{22}$$

## تئوری لایه‌ها (Laminate Theory)



شکل ۷ - ساختار کامپوزیت چند لایه

مراحل محاسبه شامل: محاسبه  $[Q]$  ماتریس سختی تک لایه

محاسبه ماتریس سختی لایه‌ها  $[Q]$

محاسبه کرنش سطح میانی و انحنای براثر نیروها و ممانهای اعمال شده

محاسبه کرنشهای صفحه‌ای  $\epsilon_{xy}$ ,  $\epsilon_{yy}$  و  $\epsilon_{xx}$  برای هر لایه

محاسبه تنש‌های صفحه‌ای  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{xy}$  و  $\sigma_{xx}$  در هر لایه

$$\{\sigma\} = [\bar{Q}]_k \{\varepsilon\}$$

تنش در لایه:  $K_{th}$

$$\{\sigma\} = [\bar{Q}]_k (\{\varepsilon^{\circ}\} + z\{\kappa\})$$

برایند نیروها و ممانها در صفحات چندلایه

$$N = \int_{-H}^H \sigma \cdot dz$$

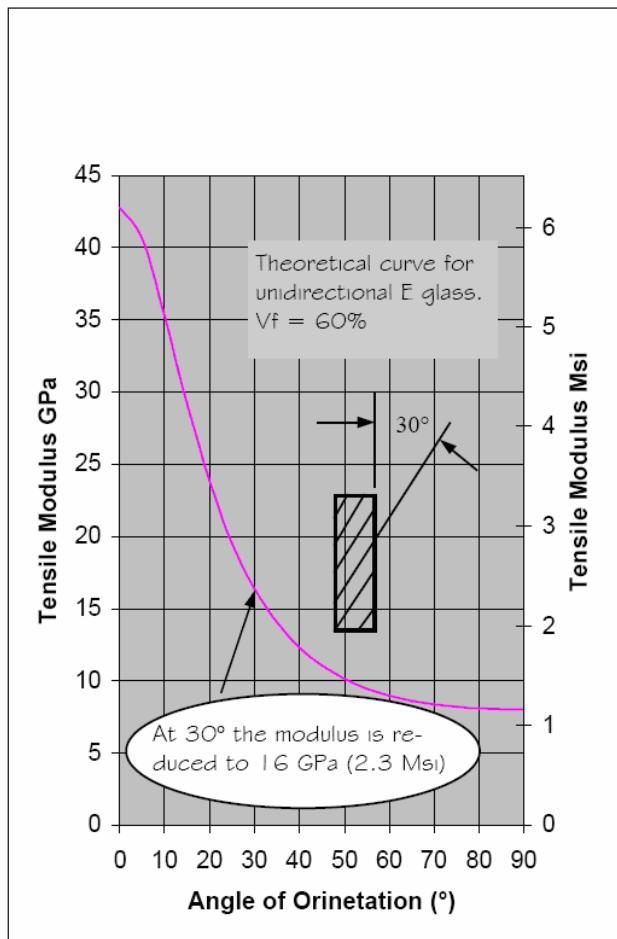
$$M = \int_{-H}^H \sigma \cdot z dz$$

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix}$$

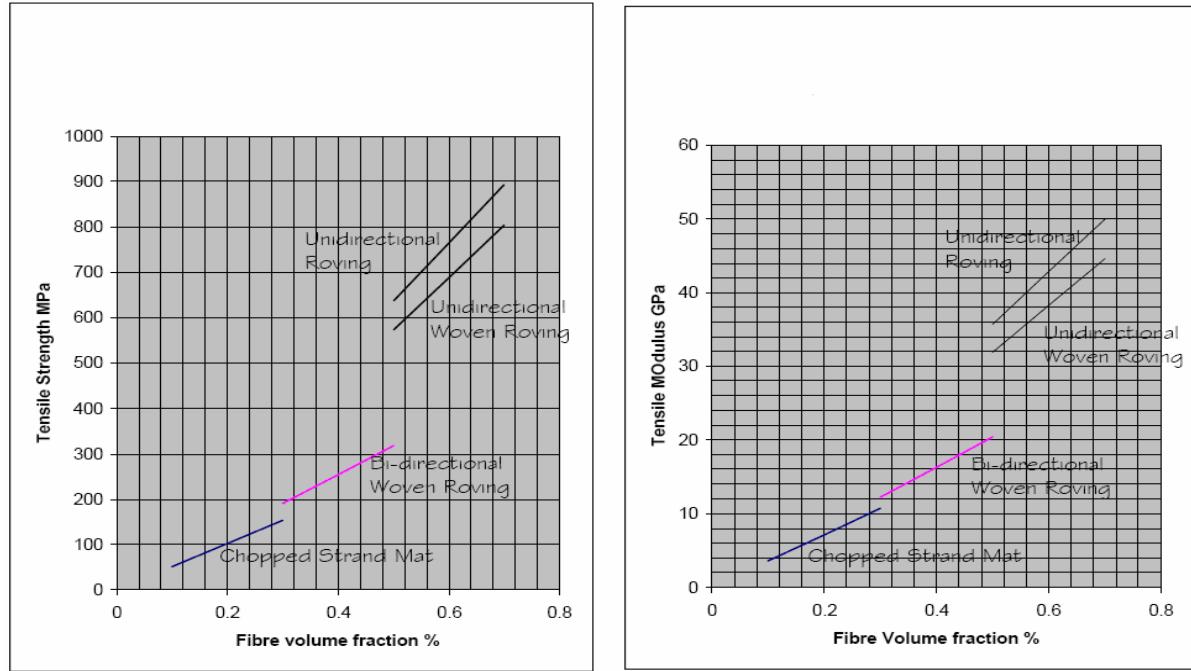
$$[A] = \sum_{k=1}^N [\bar{Q}]_k (h_k - h_{k-1}) \quad \text{ماتریس سختی کششی}$$

$$[B] = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N [\bar{Q}]_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad \text{ماتریس جفت کننده سختی کششی-خمشی}$$

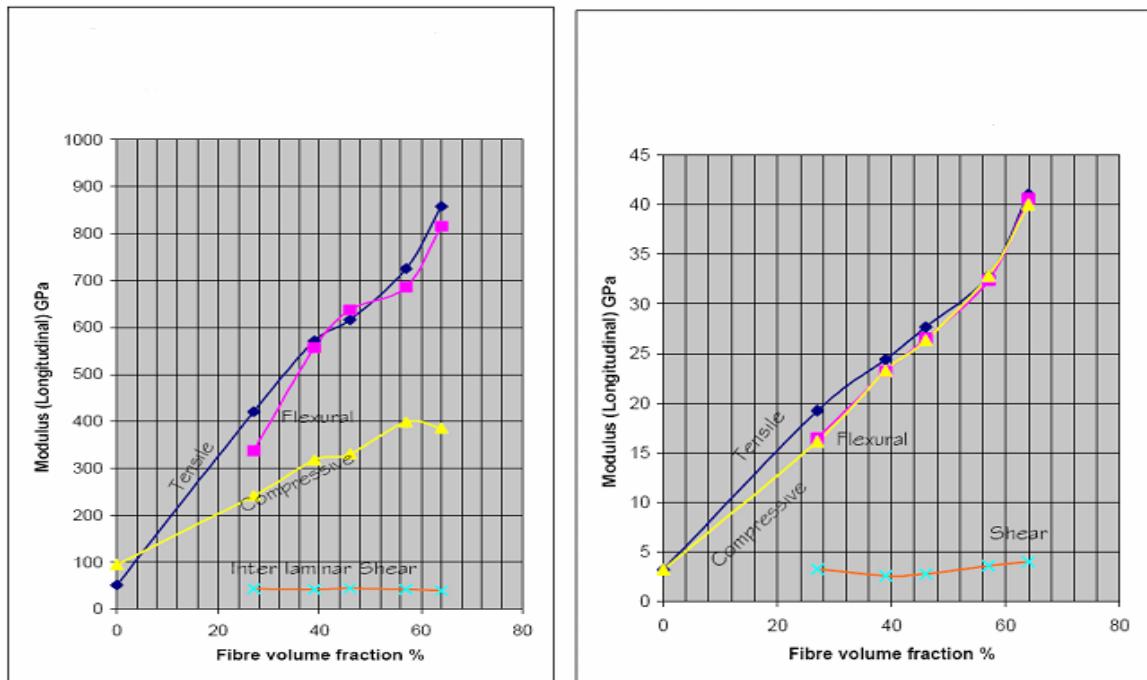
$$[D] = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N [\bar{Q}]_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad \text{ماتریس سختی خمشی}$$



شكل ۸ - تاثیر جهت الیاف بر مدول کششی کامپوزیت تک جهت



شکل ۹ - تاثیرگسربنیتی حجمی الیاف بر استحکام و مدول کششی کامپوزیتهای پلی استر-الیاف شیشه

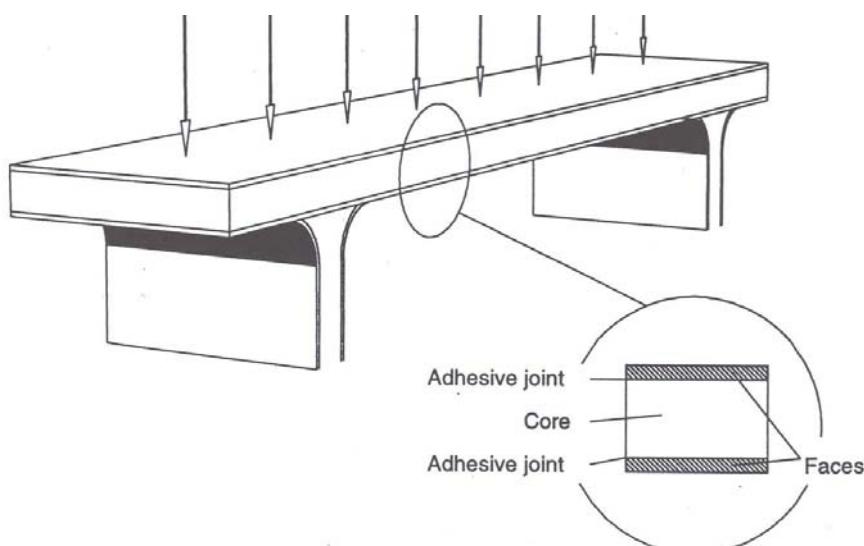


شکل ۱۰ - تاثیرگسربنیتی حجمی الیاف بر استحکام و مدول کششی کامپوزیتهای تک جهت

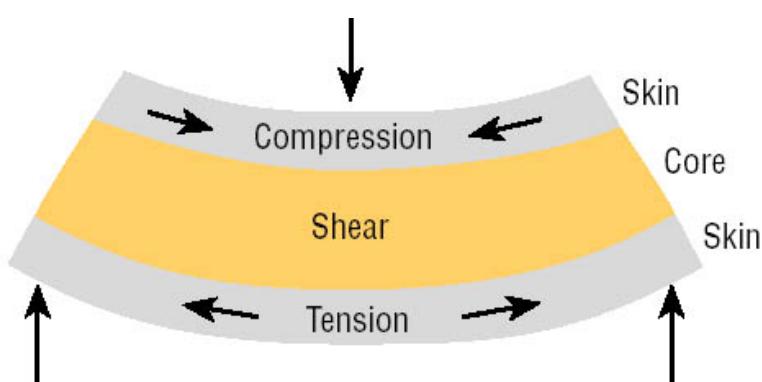
پلی استر-الیاف شیشه

## ساختارهای ساندویچی

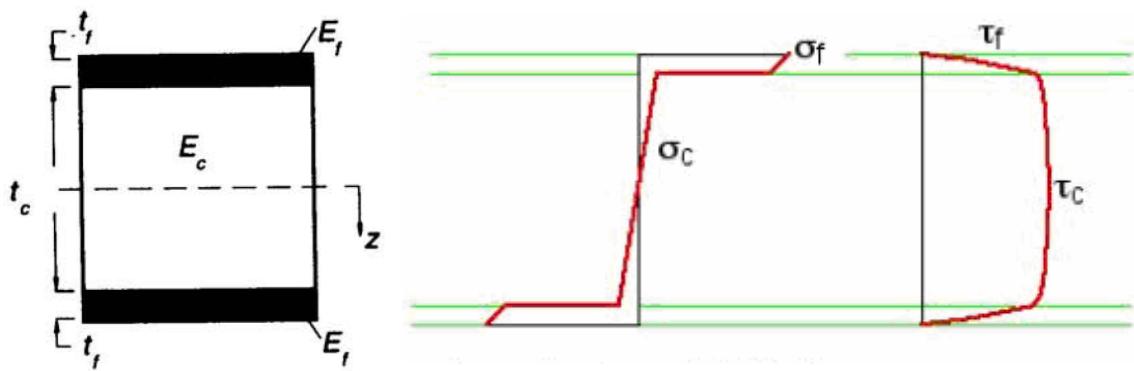
یک ساختار ساندویچی اصولاً از دو ورق نازک با استحکام کششی و فشاری مناسب و یک لایه میانی نسبتاً ضخیم و مقاوم در برابر تنש‌های برشی تشکیل می‌شود. در این نوع ساختارها، ورقها معمولاً با استفاده از چسب یا فرایند جوشکاری به لایه میانی متصل می‌شوند.



شکل ۱۱- شماتیک ساختار ساندویچی



شکل ۱۲ - رفتار ساختار ساندویچی تحت نیروی خمشی



شکل ۱۳- توزیع تنش در ساختارهای ساندویچی

### مدول خمشی ساختارهای ساندویچی متقارن

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

$$= \frac{E_f t_f^3}{6} + \frac{E_f t_f d^2}{2} + \frac{E_c t_c^3}{12}$$

$$= 2D_f + D_0 + D_c$$

$\leftarrow$  مدول خمشی صفحات نسبت به محور خنثی هر یک صفحه  $2D_f$

$\leftarrow$  مدول خمشی صفحات نسبت به محور وسط ساختار ساندویچی  $D_0$

$\leftarrow$  مدول خمشی هسته  $D_c$

$d \leftarrow$  فاصله بین مراکز ثقل صفحات  $(d = t_f + t_c)$

## تنش مستقیم در پوسته

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

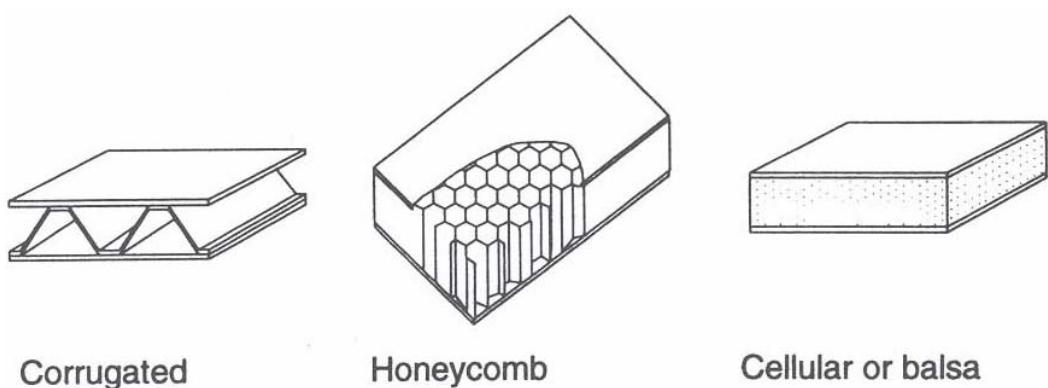
$$\sigma_f = \frac{M_x z(d-e)Ef}{D_0} = \frac{M_x}{td}$$

## تنش برشی در پوسته و هسته

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

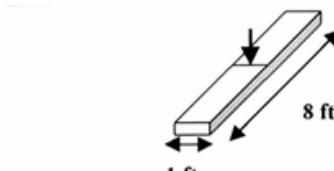
$$\tau_c = \frac{T_x}{D} \left[ \frac{E_f t_f d}{2} + \frac{E_c}{2} \left( \frac{t^2 c}{4} - z^2 \right) \right]$$

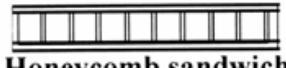
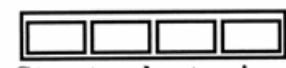
در صنعت از چوب چند لایه، کامپوزیت‌ها (پلاستیک‌های تقویت شده)، آلمینیوم، تیتانیوم و فولاد جهت ورقها استفاده می‌شود. لایه میانی عمدتاً از فوم‌های پلاستیکی، چوب بالسا، لانه زنبوری (کاغذ کرافت، نومکس (Nomex))، کامپوزیت‌ها و آلمینیوم استفاده می‌شود.



شکل ۱۴- انواع مختلف ساختارهای ساندویچی

جدول ۱- مقایسه خواص مکانیکی ساختارهای ساندویچی مختلف با وزن معادل



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

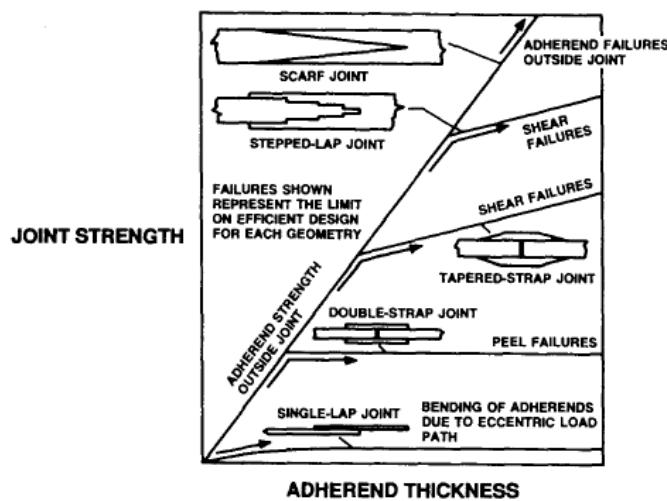
جدول ۲- مقایسه رفتار برخی لانه زنبوریها و فومها

Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Compression		Shear	
		Strength (MPa)	Modulus (MPa)	Strength (MPa)	Modulus (MPa)
Aluminium honeycomb	50	2.1	517	1.4	310
Fiberglass honeycomb	48	2.8	159	1.3	131
Nomex honeycomb	48	2.2	138	1.2	41
Thermoplastic honeycomb	80	2	52	0.4	13.6-50
Rohacell (Polymethacrylimide)	50	0.9	69	0.8	21
Divinycell (polyvinylchloride)	50	0.7	70	0.5	17
Klegecell (polyvinylchloride)	48	0.5	18	0.4	8

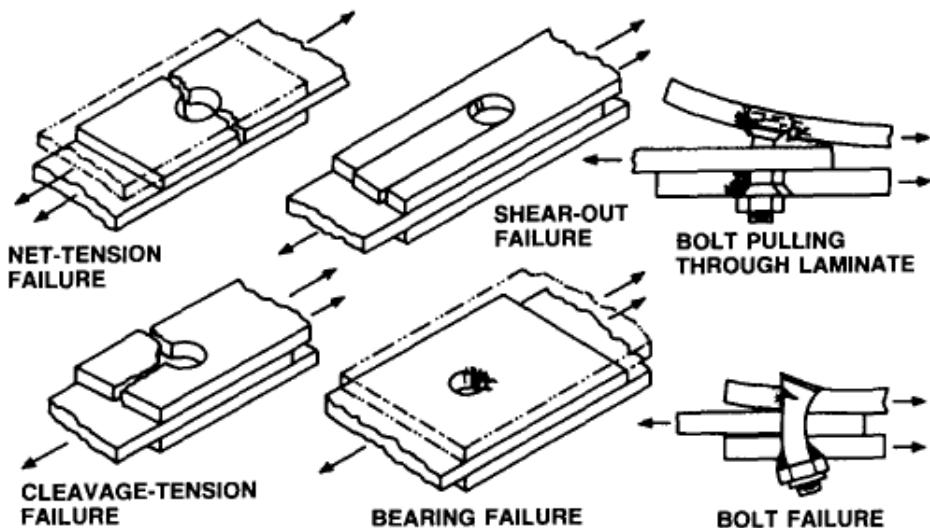
## اتصالات

مواد کامپوزیت با استفاده از چسب، اتصال مکانیکی و جوشکاری به هم متصل می‌شوند. اتصال

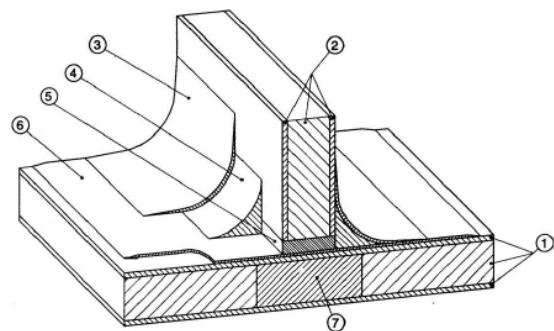
چسبی مزیتهای زیادی از جمله توزیع یکنواختر تنش و قابلیت درز گیری در مقایسه با سایر روشها دارد. روش جوشکاری کامپوزیتها اصولاً به رزینهای گرم نرم محدود می‌شود.



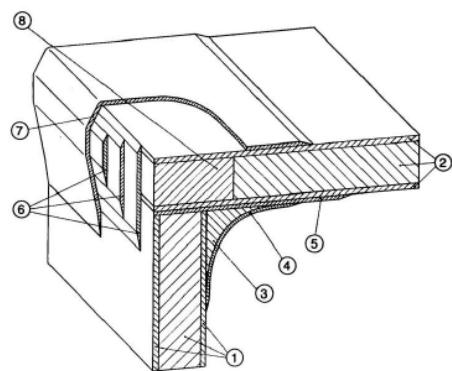
شکل ۱۵ - انواع مختلف اتصالات چسبی و مکانیزم شکست آنها



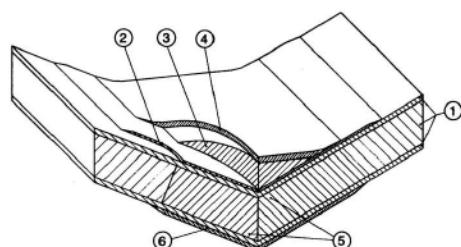
شکل ۱۶ - مکانیزم شکست در اتصالات مکانیکی



(a)

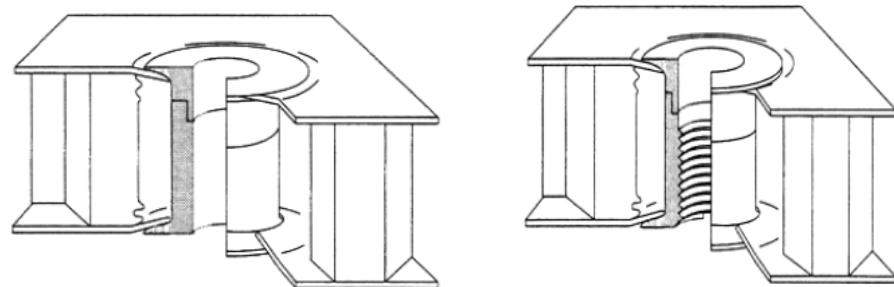
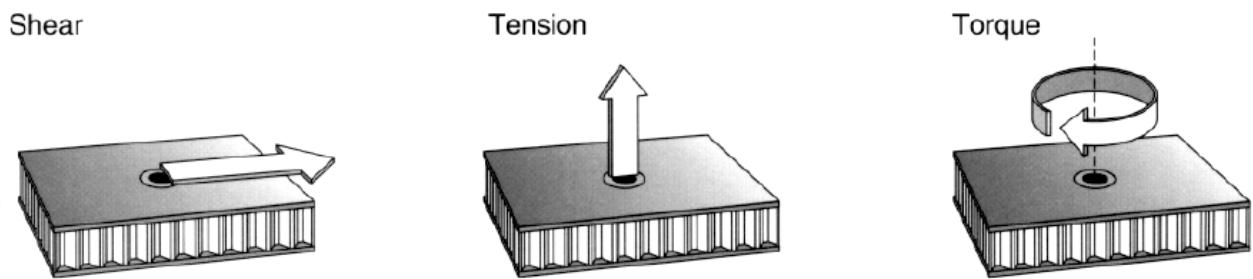


(b)



(c)

شکل ۱۷ - روش‌های مختلف اتصال ساختارهای ساندویچی : (a) اتصال 'T' ، (b) اتصال 'L' و (c) اتصال 'V'



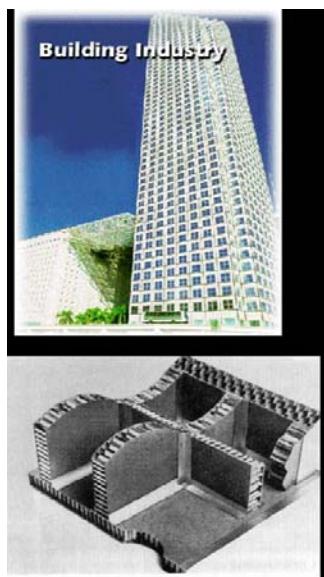
**Sleeve and plug form a telescopic fit**



**Rivet and Through-bolt**

**Threaded**

شکل ۱۸ - اتصالات مکانیکی در ساختارهای ساندویچی



شکل ۱۹- برخی کاربردهای مواد کامپوزیت و ساختارهای ساندویچی

## نرم افزارها

جدول ۳ - نرم آفzارهای تجارتی برای طراحی و آنالیز مواد کامپوزیت

ردیف	نام نرم افزار	آدرس اینترنتی	قابلیت و نحوه محاسبات
۱	Laminate Tools (LT)	<a href="http://fp.anaglyph.fq.co.uk/products.htm">http://fp.anaglyph.fq.co.uk/products.htm</a>	خطی - تحلیلی
۲	ESAComp	<a href="http://www.componeering.com">http://www.componeering.com</a>	خطی - تحلیلی
۳	ABAQUS	<a href="http://www.simulia.com">http://www.simulia.com</a>	خطی و غیرخطی - آنالیز اجزاء محدود
۴	ANSYS	<a href="http://www.ansys.com">http://www.ansys.com</a>	خطی و غیرخطی - آنالیز اجزاء محدود
۵	NISA	<a href="http://www.nisasoftware.com">http://www.nisasoftware.com</a>	خطی و غیرخطی - آنالیز اجزاء محدود
۶	COSMOS	<a href="http://www.cosmosm.com">http://www.cosmosm.com</a>	خطی و غیرخطی - آنالیز اجزاء محدود
۷	LUSAS	<a href="http://www.lusas.com">http://www.lusas.com</a>	خطی و غیرخطی - آنالیز اجزاء محدود

## مراجع

- [1] Hull D and Clyne TW, “ An Introduction to Composite Materials ”  
Cambridge University Press, 1996.
- [2] Halpin JC, “ Primer on Composite Materials Analysis ”  
Technomic Pub. Co. Inc., 1984.
- [3] Tsai SW, “ Composites Design ”  
Think Composites, 1988.
- [4] Barbero EJ, “ Introduction to Composite Materials Design ”  
Taylor and Francis, 1999.
- [5] Quin JA, “ Composites – Design Manual ”  
James Quinn Associates Ltd, 2002
- [6] Jones RM, “ Mechanics of Composite Materials ”  
Taylor and Francis, 1999.
- [7] Agarwal BD, Broutman LJ and Chandrashekara K, “ Analysis and Performance of Fiber Composites ”  
J. Wiley and Sons, Inc., 2006.

[8] محسنی شکیب، محسن

آنالیز و طراحی سازه های مرکب چند لایه

مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه امام حسین (ع) ، ۱۳۷۳

- [9] Zenkert D (Editor), “ The Handbook of Sandwich Construction ”,  
Engineering Materials Advisory Services Ltd, 1997.
- [10] Gibson LJ and Ashby MF, “ Cellular Solids ”,  
Cambridge University Press, 1997.
- [11] Bitzer T, “ Honeycomb Technology ”,  
Chapman and Hall, 1997.
- [12] Matthews FL, “ Joining Fibre-Reinforced Plastics ”  
Elsevier, 1987.