NABAK
COMPOSITE

نابک کامپوزیت

TECHNICAL DATA SHEET
برگه اطلاعات فنی

میلگرد آجدار کامپوزیتی FRP

FRP / GRP DEFORMED REBAR



PRODUCT SERIES
FRP/GRP DEFORMED REBAR



کاربردها



مشخصات فنی



انواع قطر و ابعاد



سطح و آج

NBK-TDS-DRB-01 | REV 1.0

میلگرد آجدار کامپوزیتی FRP ناباک کامپوزیت (FRP / GRP Deformed Rebar) یک میلگرد GFRP سازه‌ای برای آرماتوربندی بتن است که با آج مارپیچ یا قالبی و پوشش ماسه، چسبندگی مکانیکی کامل با بتن ایجاد می‌کند؛ میلگردی بدون زنگ‌زدگی، با مقاومت کششی دو برابر میلگرد فولادی، یک‌چهارم وزن، غیرمغناطیسی و عایق که عمر سازه‌های بتنی را در محیط‌های خورنده چند برابر می‌کند.

Ø 6 – 32 mm	≥ 7.6 MPa	≥ 44.8 GPa	ACI 440
قطر میلگرد آجدار FRP	چسبندگی به بتن (ASTM D7957)	مدول الاستیسیته کششی	مبنای طراحی سازه‌ای

میلگرد آجدار کامپوزیتی FRP (میلگرد GFRP آجدار) چیست؟

میلگرد آجدار کامپوزیتی که با نام‌های **میلگرد کامپوزیتی**، **میلگرد FRP**، **میلگرد GFRP**، **میلگرد فایبرگلاس**، **آرماتور کامپوزیتی** و **میلگرد آجدار FRP** شناخته می‌شود، با پالتروژن روونیگ‌های پیوسته الیاف شیشه آغشته به رزین وینیل‌استر یا اپوکسی تولید می‌شود. پیش از پخت کامل، روی هسته میلگرد کامپوزیتی آج مارپیچ پیچیده یا آج قالبی شکل داده می‌شود و در صورت نیاز سطح با ماسه سیلیسی پوشانده می‌شود؛ سپس میلگرد GFRP در تونل حرارتی پخت می‌شود.

FRP نام عمومی پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف است و GFRP (یا GRP) کامپوزیت FRP با الیاف شیشه است. آج سطحی، تفاوت اصلی میلگرد آجدار FRP با میلگرد ساده است: آج‌ها با درگیری مکانیکی و اصطکاکی، نیروی کششی را از بتن به هسته الیاف منتقل می‌کنند و میلگرد کامپوزیتی را برای آرماتور اصلی تیر، دال، دیوار و ستون مطابق ASTM D7957، CSA S807 و ACI 440 مناسب می‌سازند.

انواع سطح و آج میلگرد کامپوزیتی

آج مارپیچ (Helical Wrap)	آج قالبی (Molded Rib)	پوشش ماسه (Sand-Coated)	آج + ماسه
رشته الیاف پیچیده‌شده به دور هسته که آج مارپیچ پیوسته ایجاد می‌کند؛ رایج‌ترین میلگرد آجدار GFRP.	آج‌های عرضی شکل‌گرفته در قالب، مشابه ظاهر میلگرد آجدار فولادی.	دانه‌های سیلیس چسبیده به سطح؛ افزایش زبری و چسبندگی شیمیایی و اصطکاکی.	ترکیب آج مارپیچ و ماسه‌پاشی برای بیشترین چسبندگی میلگرد FRP به بتن.

مزایای میلگرد آجدار FRP در بتن

- **حذف خوردگی میلگرد:** میلگرد کامپوزیتی در کلرید، سولفات، کربناسیون و آب دریا زنگ نمی‌زند؛ پوسته شدن و ترک بتن ناشی از زنگ‌زدگی حذف می‌شود.
- **کاهش پوشش و مواد افزودنی:** نیاز به پوشش بتن ضخیم، میکروسیلیس و بازدارنده خوردگی کمتر می‌شود.
- **سبک:** میلگرد GFRP حدود ۷۰ درصد سبک‌تر از فولاد؛ حمل، جابه‌جایی و آرماتوربندی سریع‌تر و ایمن‌تر.
- **مقاومت کششی بالا:** ۷۰۰ تا ۱۱۰۰ MPa؛ دو تا سه برابر تنش تسلیم میلگرد فولادی.
- **غیرمغناطیسی و عایق:** مناسب پست برق، ریل، اتاق MRI، فرودگاه و سازه‌های حساس به میدان.
- **قابل برش توسط TBM:** آرماتور کامپوزیتی در دیواره ورود و خروج تونل (Soft-Eye) با ماشین حفاری بریده می‌شود.

مراحل تولید میلگرد آجدار GFRP

۱ تغذیه روونیگ: ده‌ها رشته روونیگ الیاف شیشه ECR مقاوم در برابر قلیا از قفسه وارد خط تولید میلگرد کامپوزیتی می‌شوند.

۲ آغشته‌سازی: الیاف در حمام رزین وینیل‌استر یا اپوکسی کاملاً خیس شده و رزین اضافه گرفته می‌شود.

۳ شکل‌دهی هسته: الیاف از قالب گرد عبور کرده و هسته میلگرد FRP با قطر دقیق شکل می‌گیرد.

۴ ایجاد آج: رشته آج به‌صورت مارپیچ دور هسته پیچیده یا آج در قالب شکل داده می‌شود.

۵ ماسه‌پاشی و پخت: در صورت نیاز ماسه سیلیسی روی سطح پاشیده و میلگرد GFRP در تونل حرارتی پخت می‌شود.

۶ برش و کنترل: میلگرد آجدار به طول سفارش بریده و قطر، وزن، Tg و مقاومت کششی آن کنترل می‌شود.

جدول قطر و مشخصات میلگرد آجدار کامپوزیتی

جدول ۱ — مشخصات میلگرد آجدار GFRP (ρ ≈ 2.1 g/cm³، E ≥ 50 GPa)

قطر اسمی (mm)	معادل اینچی	سطح اسمی (mm²)	وزن تقریبی با آج (g/m)	مقاومت کششی تضمینی f_{fu}^* (MPa)	نیروی کششی تضمینی (kN)	ارتفاع آج (mm)
۶	#2	۲۸٫۳	۷۰ – ۶۵	۱۱۰۰	۳۱	۰٫۶ – ۰٫۴
۸	—	۵۰٫۳	۱۲۵ – ۱۱۵	۱۰۵۰	۵۳	۰٫۸ – ۰٫۵
۱۰	#3	۷۸٫۵	۱۹۵ – ۱۸۰	۱۰۰۰	۷۹	۰٫۹ – ۰٫۶
۱۲	#4	۱۱۳٫۱	۲۶۰ – ۲۴۰	۹۵۰	۱۰۷	۱٫۰ – ۰٫۷
۱۴	—	۱۵۳٫۹	۳۵۵ – ۳۳۰	۹۲۰	۱۴۲	۱٫۱ – ۰٫۸
۱۶	#5	۲۰۱٫۱	۴۵۰ – ۴۳۰	۹۰۰	۱۸۱	۱٫۲ – ۰٫۹
۱۸	—	۲۵۴٫۵	۵۸۰ – ۵۴۵	۸۸۰	۲۲۴	۱٫۳ – ۱٫۰
۲۰	#6	۳۱۴٫۲	۷۱۰ – ۶۷۵	۸۵۰	۲۶۷	۱٫۴ – ۱٫۰
۲۲	#7	۳۸۰٫۱	۸۶۰ – ۸۱۵	۸۳۰	۳۱۵	۱٫۵ – ۱٫۱
۲۵	#8	۴۹۰٫۹	۱۱۱۰ – ۱۰۵۰	۸۰۰	۳۹۳	۱٫۶ – ۱٫۲
۲۸	#9	۶۱۵٫۸	۱۳۹۰ – ۱۳۲۰	۷۵۰	۴۶۲	۱٫۷ – ۱٫۳
۳۲	#10	۸۰۴٫۲	۱۸۱۰ – ۱۷۲۰	۷۰۰	۵۶۳	۱٫۸ – ۱٫۴

طبق ASTM D7957، سطح مقطع واقعی میلگرد آجدار کامپوزیتی با روش غوطه‌وری اندازه‌گیری و باید در محدوده مجاز سطح اسمی باشد؛ وزن بیشتر از میلگرد ساده به دلیل آج و ماسه است. معادل اینچی تقریبی است. مقاومت تضمینی هر سفارش با آزمون ASTM D7205 تعیین می‌شود.

میلگرد خم‌شده، خاموت و دورپیچ کامپوزیتی

جدول ۲ — اشکال پیش‌ساخته میلگرد GFRP (خم در کارخانه، پیش از پخت)

شکل	کاربرد	حداقل شعاع خم داخلی	مقاومت در محل خم
میلگرد L شکل (قلاب ۹۰°)	مهار انتهایی، اتصال دال به دیوار	d_b ۳	≈ f_{fu} ۰٫۴۵ (فرمول ۱۳)
میلگرد U شکل	لبه دال، سرستون، مهار عرضی	d_b ۳	≈ f_{fu} ۰٫۴۵
خاموت بسته و رکابی	آرماتور برشی تیر و ستون	d_b ۳	≈ f_{fu} ۰٫۴۵
دورپیچ (Spiral)	ستون گرد و شمع	به سفارش	بر اساس آزمون

میلگرد کامپوزیتی پخت‌شده در کارگاه قابل خم کردن نیست؛ نقشه خم و برش (Bar Bending Schedule) باید پیش از تولید ارسال شود. طول استاندارد شاخه مستقیم ۶ و ۱۲ متر است.

کاربردهای میلگرد آجدار کامپوزیتی

سازه‌های ساحلی و دریایی
اسکله، موج‌شکن، دیوار ساحلی و سازه‌های در تماس با آب دریا

پل و عرشه پل
دال عرشه، جان‌پناه و دال‌های در معرض نمک یخ‌زدایی با میلگرد GFRP

پارکینگ و کف صنعتی
دال پارکینگ طبقاتی و کف‌های در معرض کلرید و مواد شیمیایی

تصفیه‌خانه و مخازن
استخر، مخزن فاضلاب و کانال‌های بتنی با آرماتور کامپوزیتی

تونل و مترو
دیواره Soft-Eye، قطعات سگمنت و سازه‌های قابل برش با TBM

سازه‌های غیرمغناطیسی
پست برق، فونداسیون ترانسفورماتور، MRI و سکوهای ناوبری

خواص میلگرد آجدار GFRP و الزامات ASTM D7957

جدول ۳ — خواص مرجع میلگرد آجدار کامپوزیتی در مقایسه با حداقل‌های ASTM D7957

خاصیت	روش آزمون	مقدار رایج میلگرد آجدار FRP	الزام ASTM D7957
درصد وزنی الیاف شیشه	ASTM D2584 / D3171	۷۵ – ۸۲٪	≤ ۷۰٪
مدول الاستیسیته کششی	ASTM D7205	۵۰ – ۶۰ GPa	≤ ۴۴٫۸ GPa
کرنش گسیختگی	ASTM D7205	۱٫۴ – ۲٫۲٪	—
مقاومت چسبندگی به بتن	ASTM D7913	۱۰ – ۱۶ MPa	≤ ۷٫۶ MPa
مقاومت برشی عرضی	ASTM D7617	۱۵۰ – ۲۰۰ MPa	≤ ۱۳۱ MPa
جذب رطوبت	ASTM D570	≥ ۰٫۲٪	≥ ۰٫۲۵٪ (و ≥ ۱٪ اشباع)
دمای انتقال شیشه‌ای Tg	ASTM E1356 / E1640	۱۰۵ – ۱۳۰ °C	≤ ۱۰۰ °C
درجه پخت رزین	ASTM E2160	≤ ۹۵٪	≤ ۹۵٪
ضریب انبساط طولی / عرضی	ASTM E831	۶ – ۱۰ / ۲۱ – ۳۰ ×۱۰⁻⁶/°C	—
دوام قلیایی (حفظ مقاومت)	ASTM D7705	≤ ۸۰٪	طبق ضوابط پروژه

مقادیر محدوده‌های رایج صنعت کامپوزیت FRP و GFRP هستند و نتایج آزمایشگاهی اختصاصی ناباک کامپوزیت نیستند. سایر استانداردهای مرتبط: CSA S807 (مشخصات میلگرد FRP)، ACI 440.1R-15 (راهنمای طراحی)، ACI CODE-440.11 (آیین‌نامه بتن مسلح با میلگرد GFRP) و ACI 440.3R (روش‌های آزمون).

مقایسه میلگرد آجدار FRP با میلگرد فولادی

جدول ۴ — میلگرد آجدار کامپوزیتی در برابر فولاد S400، فولاد اپوکسی و میلگرد ساده FRP

ویژگی	میلگرد آجدار GFRP	فولاد S400	فولاد با پوشش اپوکسی	میلگرد ساده FRP
مقاومت کششی (MPa)	۷۰۰ – ۱۱۰۰	تسلیم ۴۰۰	تسلیم ۴۰۰	۷۰۰ – ۱۱۰۰
مدول (GPa)	۵۰ – ۶۰	۲۰۰	۲۰۰	۵۰ – ۵۵
چسبندگی به بتن	بالا (آج + ماسه)	بالا	کاهش ۱۰ تا ۲۰٪	کم
آرماتور سازه‌ای بتن	مناسب (ACI 440)	مناسب	مناسب	نامناسب
خوردگی	ندارد	شدید در کلرید	در محل آسیب پوشش	ندارد
رفتار تا گسیختگی	الاستیک، بدون تسلیم	شکل‌پذیر	شکل‌پذیر	الاستیک
خم در کارگاه	ممکن نیست	آسان	با احتیاط	ممکن نیست

طراحی متفاوت، نه جایگزینی تک‌به‌تک: میلگرد آجدار کامپوزیتی تسلیم نمی‌شود و مدول آن حدود یک‌چهارم فولاد است؛ بنابراین طراحی بتن مسلح با میلگرد FRP معمولاً با کنترل ترک، خیز و گسیختگی خزشی (حالت بهره‌برداری) تعیین می‌شود و مقطع را عمداً «بیش‌مسلح» طراحی می‌کنند تا گسیختگی با خردشدن بتن رخ دهد. فرمول‌های صفحات ۴ و ۵ بر پایه ACI 440.1R-15 هستند.

پوشش بتن و حفاظت آتش میلگرد کامپوزیتی

جدول ۵ — راهنمای پوشش بتن روی میلگرد آجدار FRP

شرایط عضو	پوشش پیشنهادی	توضیح
دال و دیوار داخلی	≥ ۲۰ mm و ≥ d_b	جلوگیری از ترک طولی ناشی از انبساط عرضی میلگرد GFRP
تیر و ستون داخلی	۳۰ – ۴۰ mm ≤	انتقال کامل نیروی چسبندگی و جای اسپیسر
در تماس با خاک یا هوای آزاد	۴۰ – ۵۰ mm ≤	مزیت: نیاز به پوشش ضخیم ضد خوردگی فولاد حذف می‌شود
الزام مقاومت در برابر آتش	طبق رده آتش پروژه، معمولاً ۵۰ – ۶۰ mm ≤	دمای میلگرد کامپوزیتی در محل مهار باید زیر Tg بماند

فرمول‌های مقاومت خمشی بتن مسلح با میلگرد FRP

۱. مقاومت طراحی میلگرد

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^*$$

$C_E = 0.8$ برای بتن داخلی و 0.7 برای بتن در تماس با خاک یا هوای آزاد. f_{fu}^* = 800 → f_{fu} = 560 MPa

۲. نسبت آرماتور متعادل

$$\rho_{fb} = 0.85\,\beta_1\,\frac{f'_c}{f_{fu}}\cdot\frac{E_f\,\varepsilon_{cu}}{E_f\,\varepsilon_{cu}+f_{fu}}$$

f'c = 30، β_1 = 0.85، E_f = 50 GPa، ε_{cu} = 0.003 → $\rho_{fb} \approx 0.0082$

۳. تنش میلگرد در مقطع بیش‌مسلح ($\rho_f > \rho_{fb}$)

$$f_f = \sqrt{\left(\frac{(E_f\,\varepsilon_{cu})^2}{4}+\frac{0.85\,\beta_1\,f'_c}{\rho_f}\,E_f\,\varepsilon_{cu}\right)} - 0.5\,E_f$$

$$\varepsilon_{cu} \le f_{fu}$$

گسیختگی با خردشدن بتن؛ میلگرد کامپوزیتی زیر مقاومت نهایی باقی می‌ماند.

۴. لنگر اسمی و ضریب کاهش مقاومت

$$M_n = \rho_f\,f_f\left(1 - 0.59\,\frac{\rho_f\,f_f}{f'_c}\right)\,b\,d^2$$

$\varphi = 0.55$ برای $\rho_f \le \rho_{fb}$؛ $\varphi = 0.3 + 0.25\,\rho_f/\rho_{fb}$ در ناحیه گذار؛ $\varphi = 0.65$ برای $\rho_f \ge 1.4\,\rho_{fb}$

مثال طراحی — دال یک‌طرفه ۲۰۰ mm با میلگرد آجدار GFRP Ø16 هر ۱۲۵ mm (عرض ۱ m)

$d = 160$ mm ; $A_f = 201.1 \times 1000/125 \approx 1609$ mm²/m ; $\rho_f = 1609 / (1000 \times 160) \approx 0.0101$

$\rho_f / \rho_{fb} = 0.0101 / 0.0082 \approx 1.23$ → transition zone → $\varphi = 0.3 + 0.25 \times 1.23 \approx 0.61$

$E_f\,\varepsilon_{cu} = 150$ MPa → $f_f = \sqrt{(150^2/4 + 0.85{\times}0.85{\times}30/0.0101 \times 150)} - 75 \approx 499$ MPa ≤ 560 ✓

$M_n = 0.0101 \times 499 \times (1 - 0.59 \times 0.0101 \times 499 / 30) \times 1000 \times 160^2 \approx 115.7$ kN·m/m

$\varphi\,M_n \approx 0.61 \times 115.7 \approx 70.3$ kN·m/m

مقطع بیش‌مسلح است و گسیختگی با خردشدن بتن کنترل می‌شود؛ رفتار مطلوب برای بتن مسلح با میلگرد کامپوزیتی. کنترل بهره‌برداری این دال در صفحه ۵ ادامه دارد.

۵. محدودیت تنش دائمی (گسیختگی خزشی) و مقاومت برشی بتن

$$f_{f,s} \le 0.20\,f_{fu}\,,\quad V_c = 0.4\,\sqrt{f'_c}\cdot b_w\cdot c\,,\quad c = k\,d$$

در مثال: $f_{f,s} \le 0.2 \times 560 = 112$ MPa؛ $k \approx 0.179$ → $c \approx 28.6$ mm → $V_c \approx 0.4 \times 5.48 \times 1000 \times 28.6 \approx 62.8$ kN/m. سهم برشی بتن در مقاطع با میلگرد FRP به دلیل عمق کمتر ناحیه فشاری، کمتر از بتن فولادی است.

۶. حداقل آرماتور خمشی (مقطع کم‌مسلح)

$$A_{f,min} = \frac{0.41\,\sqrt{f'_c}}{f_{fu}}\,b_w\,d \ge \frac{2.26}{f_{fu}}\,b_w\,d$$

فقط وقتی $\rho_f < \rho_{fb}$ لازم است تا گسیختگی میلگرد FRP پس از ترک‌خوردگی رخ ندهد.

۷. آرماتور حرارتی و جمع‌شدگی

$$\rho_{f,ts} = 0.0018 \times \frac{414}{f_{fu}} \times \frac{E_s}{E_f}\,,\quad 0.0014 \le \rho_{f,ts} \le 0.0036$$

f_{fu} = 560، E_f = 50 GPa → 0.0053؛ دال A = ۲۰۰ mm: سقف 0.0036 → 720 mm²/m → GFRP Ø12 هر ۱۵۰ mm

فرمول‌های ترک، خیز و طول مهاری میلگرد FRP

۸. عمق تار خنثی مقطع ترک‌خورده

$$k = \sqrt{(\,2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2\,)} - \rho_f n_f\,, \quad n_f = \frac{E_f}{E_c}$$

$E_c = 4700\sqrt{f'c} \approx 25.7$ GPa → $n_f \approx 1.94$ → $k \approx 0.179$

۹. تنش میلگرد در بار بهره‌برداری

$$f_{f,s} = \frac{M_s}{A_f \cdot d\,(1 - k/3)}$$

$M_s = 25$ kN·m/m → $f_{f,s} \approx 103$ MPa ≤ 112 MPa (حد خزشی) ✓

۱۰. عرض ترک (ACI 440.1R)

$$w = 2\,\frac{f_{f,s}}{E_f}\,\beta\,k_b\,\sqrt{(\,d_c^2 + (s/2)^2\,)}$$

$\beta \approx 1.30$، $k_b = 1.4$، $d_c = 40$، $s = 125$ → $w \approx 0.56$ mm ≤ 0.7 mm (حد بتن داخلی) ✓؛ برای محیط بیرونی حد 0.5 mm است: فاصله ۱۰۰ mm → $w \approx 0.39$ mm ✓

۱۱. ممان اینرسی مؤثر (بیشوف)

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma\,(M_{cr}/M_a)^2\,(1 - I_{cr}/I_g)}$$

$\gamma = 1.72 - 0.72\,M_{cr}/M_a$. در مثال: $I_{cr} \approx 6.2\times10^7$، $I_g \approx 6.7\times10^8$ mm⁴، $M_{cr} \approx 22.6$ kN·m → $I_e \approx 3.0\times10^8$ mm⁴

۱۲. طول مهاری میلگرد مستقیم

$$l_d = \frac{\alpha\,(\,\dfrac{f_{fr}}{0.083\,\sqrt{f'_c}} - 340\,)}{13.6 + C/d_b}\,d_b \geq 20\,d_b$$

Ø16، $f_{fr} = 400$ MPa، $f'c = 30$، $C = 2d_b$، $\alpha = 1$ → $l_d \approx 554$ mm (≥ 320 mm)

۱۳. مقاومت میلگرد در محل خم

$$f_{fb} = (\,0.05\,\frac{r_b}{d_b} + 0.3\,)\,f_{fu} \leq f_{fu}$$

$r_b = 3\,d_b$ → $f_{fb} = 0.45\,f_{fu}$؛ در خاموت و قلاب میلگرد کامپوزیتی لحاظ شود.

راهنمای اجرا با میلگرد آجدار کامپوزیتی

۱ نقشه خم و برش: همه خم‌ها، خاموت‌ها و طول‌ها را پیش از تولید تعیین کنید؛ میلگرد GFRP در کارگاه خم نمی‌شود.

۲ حمل و انبار: روی تکیه‌گاه‌های با فاصله ≤ ۲ m، دور از آفتاب و بدون کشیدن روی زمین نگه دارید.

۳ برش: با صفحه الماسه یا ساینده ببرید و از ماسک و عینک استفاده کنید؛ قیچی میلگرد ممنوع است.

۴ بستن: با سیم روکش‌دار، بست پلاستیکی یا سیم نایلونی ببندید؛ اسپیسر پلاستیکی برای تأمین پوشش.

۵ پوشش بتن: پوشش دست‌کم برابر قطر میلگرد و نه کمتر از ۲۰ تا ۲۵ mm؛ مهار شبکه در برابر شناوری هنگام بتن‌ریزی.

۶ وصله: وصله پوششی با طول ≤ ۱٫۳ l_d؛ جوش و وصله مکانیکی فولادی برای میلگرد کامپوزیتی کاربرد ندارد.

استعلام قیمت میلگرد آجدار کامپوزیتی FRP: قطرها و متراژ، نقشه خم و برش، نوع سطح (آج، ماسه یا هر دو)، نوع سازه و محیط بهره‌برداری را اعلام کنید.

نابک سازه گستر | nabakcomposite.com | 021 4881 2124 | موبایل 0912 396 3078 | اینستاگرام @nabak.composite

سلب مسئولیت: اطلاعات این برگه فنی بر پایه داده‌های عمومی و رایج صنعت کامپوزیت FRP و GFRP و استانداردهای ACI 440 و ASTM D7957 تهیه شده و جنبه راهنما دارد. مثال‌های طراحی آموزشی هستند و طراحی سازه با میلگرد کامپوزیتی باید توسط مهندس سازه انجام شود. نابک کامپوزیت حق اصلاح مشخصات فنی را بدون اطلاع قبلی محفوظ می‌دارد.