مدول الاســتیســیته بتن، تاثیر آن بر رفتار ســازه و نحوه وارد کردن آن در ETABS بر اساس مبحث نهم

در تحلیل و طراحی سازه‌های بتنی، یکی از مهم‌ترین مشخصات مکانیکی بتن، مدول الاستیسیته بتن یا همان E_c است. این پارامتر نشان می‌دهد که بتن در برابر تغییر شکل‌های الاستیک چه میزان سختی از خود نشان می‌دهد. به بیان ساده‌تر، هرچه مدول الاستیسیته بتن بزرگ‌تر باشد، بتن در برابر تغییر شکل‌های اولیه سخت‌تر عمل می‌کند و برای یک تنش مشخص، کرنش کمتری خواهد داشت.

در نرم‌افزارهایی مانند **ETABS**، مدول الاستیسیته بتن فقط یک عدد ساده در تعریف مصالح نیست؛ بلکه مستقیماً در تشکیل سختی اعضا، تحلیل سازه، کنترل دریفت، دوره تناوب، توزیع نیروها و حتی نتایج طراحی اثر می‌گذارد. به همین دلیل، وارد کردن مقدار صــحیح E_c در ایتبس اهمیت زیادی دارد و نباید بدون کنترل آیین‌نامه‌ای به مقادیر پیش‌فرض نرم‌افزار اکتفا کرد.

در این مقاله، ابتدا مفهوم و کاربرد مدول الاستیسیته بتن را توضیح می‌دهیم، سپس روابط مبحث نهم برای محاســبه آن را بررســی می‌کنیم و در ادامه، نحوه وارد کردن آن در **ETABS** را شــرح می‌دهیم. در انتها نیز برای بتن با چگالی‌های **2400** و **2500** کیلوگرم بر مترمکعب، محاســبات عددی انجام می‌شود.

۹-۳-۶- مدول الاستیسیته، E_c

۹-۳-۶-۱ مدول الاستیسیته بتن را می توان از یکی از دو رابطه (۹-۳-۲—الف) و یا (۹-۳-۲-ب) محاسبه نمود:

- ضریب الاستیسیته بتنهای با چگالی بتن w_c بین ۱۴۴۰ و ۲۵۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب:

$$E_c = 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f_c'}$$

- رابطه فوق برای بتن های معمولی با چگالی ۲۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، به صورت زیر نوشته می شود:

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c'} \qquad (۹-۳-۲-ب)$$

مدول الاستیسیته بتن چیست؟

مدول الاستیسیته بتن، نسبت تنش به کرنش در محدوده رفتار تقریباً الاستیک بتن است. این پارامتر معمولاً با نماد $\mathbf{E_c}$ نمایش داده می‌شود و واحد آن در سیستم متداول مهندسی، مگاپاسکال (**MPa**) است.

به طور کلی داریم:

$$\mathbf{E_c} = \frac{\boldsymbol{\sigma}}{\boldsymbol{\varepsilon}}$$

مدول الاستیسیته : $\mathbf{E_c}$

تنش: $\boldsymbol{\sigma}$

مدول الاستیسیته : $\boldsymbol{\varepsilon}$

البته بتن برخلاف فولاد، رفتار کاملاً خطی و الاستیک ندارد. نمودار تنش-کرنش بتن از همان ابتدا تا حدی غیرخطی است. با این حال، برای تحلیل‌های خطی سازه‌ای، لازم است یک مقدار معادل برای سختی بتن در نظر گرفته شود. این مقدار معادل همان مدول الاستیسیته بتن است که در آیین‌نامه‌ها با روابط تجربی ارائه می‌شود.

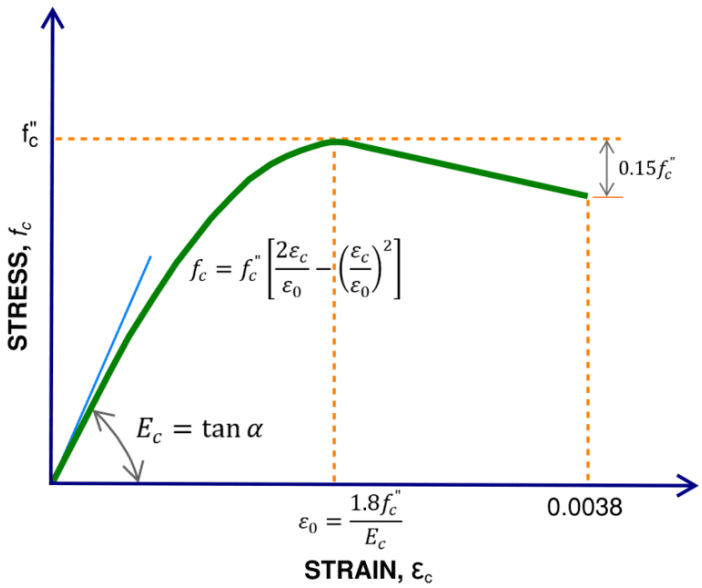


Figure 1- نمودار تنش کرنش

دلیل استفاده از مدول الاستیسیته بتن در طراحی سازه

مدول الاستیسیته بتن در مدل‌سازی و تحلیل سازه نقش بسیار مهمی دارد. وقتی یک سازه بتنی را در **ETABS** مدل می‌کنیم، نرم‌افزار برای محاسبه سختی تیرها، ستون‌ها، دیوارهای برشی و دال‌ها به مشخصات مصالح نیاز دارد. یکی از اصلی‌ترین این مشخصات، E_c است.

کاربردهای اصلی مدول الاستیسیته بتن عبارت‌اند از:

1. تعیین سختی اعضای بتنی

سختی خمشی اعضا به صورت کلی به عبارت **EI** وابسته است.

در این رابطه:

- **E**: مدول الاستیسیته مصالح
- **I**: ممان اینرسی مقطع

بنابراین اگر مقدار E_c تغییر کند، سختی عضو نیز تغییر می‌کند. این موضوع در تیرها، ستون‌ها و دیوارهای برشی بسیار مهم است.

2. اثر بر تغییرمکان و دریفت سازه

هرچه مدول الاستیسیته بتن بیشتر باشد، سختی سازه افزایش می‌یابد و معمولاً تغییرمکان جانبی و دریفت طبقات کمتر می‌شود. برعکس، اگر E_c کمتر در نظر گرفته شود، سازه نرم‌تر تحلیل می‌شود و تغییرمکان‌ها افزایش پیدا می‌کنند.

به همین دلیل، وارد کردن اشتباه مدول الاستیسیته می‌تواند باعث شود کنترل دریفت سازه غیرواقعی شود.

3. اثر بر دوره تناوب سازه

دوره تناوب سازه به جرم و سختی آن وابسته است. با افزایش سختی، دوره تناوب کاهش می‌یابد و با کاهش سختی، دوره تناوب افزایش پیدا می‌کند. چون E_c در سختی اعضای بتنی اثر مستقیم دارد، مقدار آن می‌تواند روی پریود سازه نیز اثرگذار باشد.

4. اثر بر توزیع نیروها بین اعضا

در سازه‌های بتنی، نیروها بین تیرها، ستون‌ها، دیوارهای برشی و سایر اعضا بر اساس سختی نسبی آن‌ها توزیع می‌شود. اگر مدول الاستیسیته یک مصالح اشتباه وارد شود، سختی نسبی اعضا نیز اشتباه محاسبه می‌شود و در نتیجه توزیع نیروها غیرواقعی خواهد بود.

5. اثر بر تحلیل خطی سازه

در تحلیل خطی **ETABS**، نرم‌افزار فرض می‌کند مصالح رفتار خطی دارند. بنابراین **E_c** یکی از ورودی‌های اصلی برای تشکیل ماتریس سختی سازه است. اگر مقدار آن درست نباشد، نتایج تحلیل نیز قابل اعتماد نخواهد بود.

روابط مبحث نهم برای محاسبه مدول الاستیسیته بتن

۹-۳-۶- مدول الاستیسیته، E_c

۹-۳-۶-۱ مدول الاستیسیته بتن را می توان از یکی از دو رابطه (۹-۳-۲—الف) و یا (۹-۳-۲-ب) محاسبه نمود:

- ضریب الاستیسیته بتنهای با چگالی بتن w_c بین ۱۴۴۰ و ۲۵۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب:

$$E_c = 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f_c'}$$

- رابطه فوق برای بتن های معمولی با چگالی ۲۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، به صورت زیر نوشته می شود:

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c'} \qquad (۹-۳-۲-ب)$$

مطابق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، بند **9-3-6-1**، مدول الاستیسیته بتن را می‌توان از یکی از روابط ارائه‌شده در این بند محاسبه کرد.

برای بتن‌هایی با چگالی **W_c** بین **1440** تا **2560** کیلوگرم بر مترمکعب، رابطه زیر ارائه شده است:

$$\boldsymbol{E_c = 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f_c'}}$$

در این رابطه:

- E_c: مدول الاستیسیته بتن بر حسب مگاپاسکال
- W_c: چگالی بتن بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب
- f'_c: مقاومت فشاری مشخصه بتن بر حسب مگاپاسکال

همچنین طبق همین بند، برای بتن‌های معمولی با چگالی حدود **2300** کیلوگرم بر مترمکعب، رابطه ساده‌شده زیر نیز قابل استفاده است:

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c}$$

بنابراین اگر وزن مخصوص یا چگالی بتن پروژه به‌صورت دقیق مشخص باشد، استفاده از رابطه وابسته به W_c می‌تواند مقدار دقیق‌تری نسبت به رابطه ساده‌شده ارائه کند. در واقع رابطه دوم از رابطه اول استخراج شده است.

۹-۳-۶- مدول الاستیسیته، E_c

۹-۳-۶-۲ مدول الاستیسیته بتن را می‌توان بر مبنای آزمایش بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه‌ی بتن تعیین نمود؛ به شرط آن که این پارامتر نیز در طرح مخلوط بتن منظور شده و نتایج آزمایش‌های تعیین E_c در مدارک ساخت ارائه شوند.

همچنین مطابق بند **9-3-6-2** مبحث نهم، مدول الاستیسیته بتن را می‌توان بر مبنای آزمایش روی نمونه‌های **28** روزه بتن تعیین کرد، به شرط آنکه این پارامتر در طرح اختلاط بتن در نظر گرفته شده و نتایج آزمایش‌های تعیین E_c در مدارک ساخت ارائه شود.

محاسبه مدول الاستیسیته برای بتن با چگالی 2400 و 2500 کیلوگرم بر مترمکعب

معمولا مهندسان بر اساس بتن با چگالی **2400** یا **2500** مدول الاستیسته را محاسبه می کنند. محاسبات هر دو را برایتان در نظر گرفته ایم.

$$E_c = 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f_c'}$$

$$\begin{cases} w_c = 2400\ kg/m3 \\ f_c' = 25\ Mpa \end{cases}$$

$$E_c = 0.043.(2400)^{1.5}\sqrt{25} \longrightarrow E_c = 25278\ Mpa$$

$$\begin{cases} w_c = 2500\ kg/m3 \\ f_c' = 25\ Mpa \end{cases}$$

$$E_c = 0.043.(2500)^{1.5}\sqrt{25} \longrightarrow E_c = 26875\ Mpa$$

نحوه وارد کردن مدول الاستیسیته بتن در ETABS

برای وارد کردن مدول الاستیسیته بتن در نرم‌افزار **ETABS**، باید مشخصات مصالح بتن را تعریف یا ویرایش کنیم.

مراحل کلی به صورت زیر است:

مرحله **1**: ورود به بخش **Define Materials**

از منوی بالای نرم‌افزار مسیر زیر را انتخاب می‌کنیم:

Define→Materials

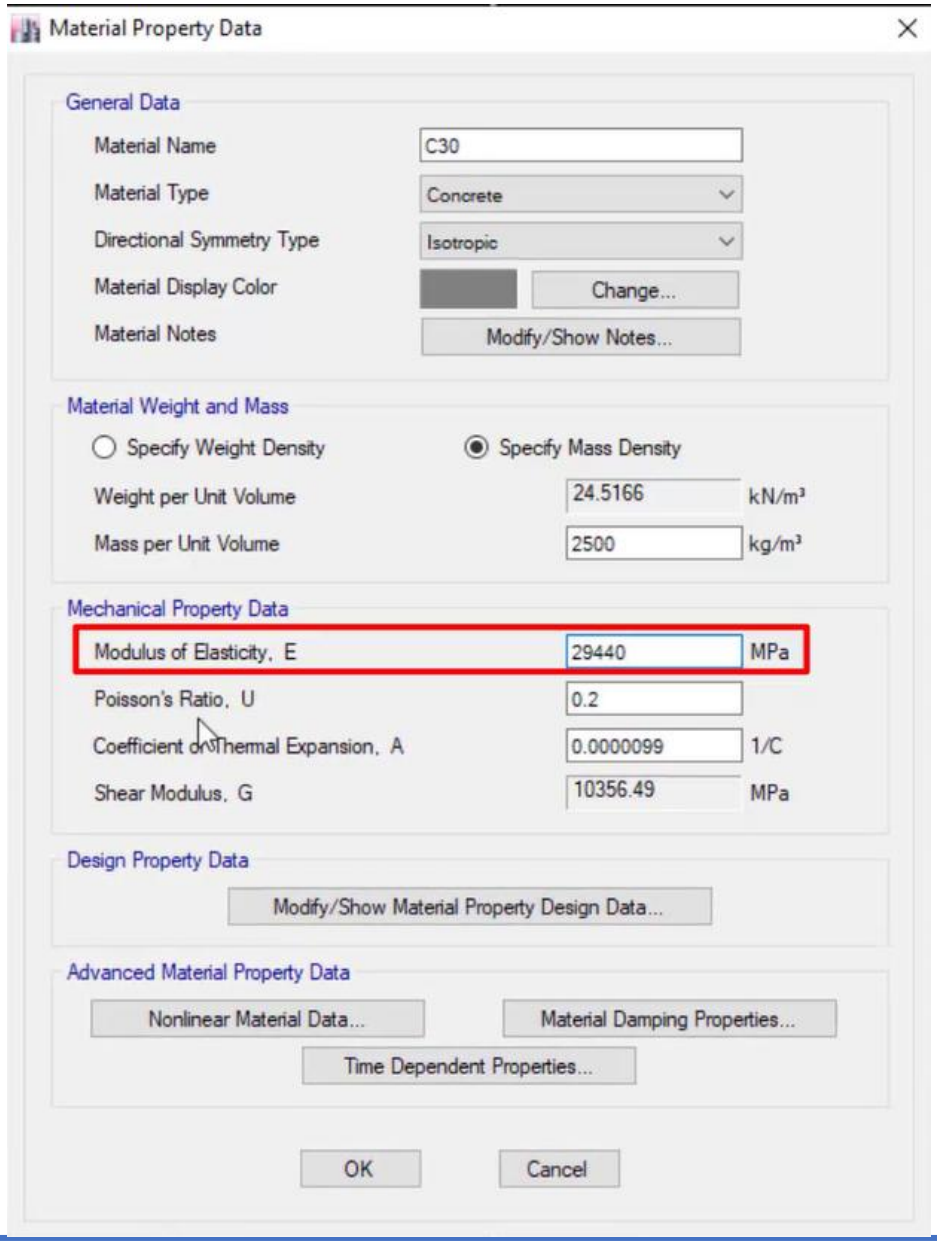
در این قسمت، مصالح موجود در پروژه نمایش داده می‌شوند.

مرحله **2**: انتخاب یا تعریف بتن جدید

اگر از قبل مصالح بتن تعریف شده باشد، مثلاً با نام‌هایی مانند:

- **C25**
- **C30**
- **Concrete**
- **CONC**

می‌توان آن را انتخاب و ویرایش کرد.



اگر بخواهیم بتن جدید تعریف کنیم، گزینه افزودن مصالح جدید را انتخاب کرده و نوع مصالح را روی **Concrete** قرار می‌دهیم.

مرحله **3**: تنظیم وزن مخصوص و چگالی بتن

در پنجره **Material Property Data**، بخشـــی با عنوان **Material Weight and Mass** وجود دارد.

در این بخش معمولاً دو گزینه مهم دیده می‌شود:

- **Weight per Unit Volume**
- **Mass per Unit Volume**

اگر چگالی جرمی بتن را وارد کنیم، برای بتن با چگالی **2500** کیلوگرم بر مترمکعب، مقدار زیر وارد می‌شود:

Mass per Unit Volume=2500kg/m3

نرم‌افزار معادل وزن مخصوص را نیز به صورت تقریبی برابر با مقدار زیر در نظر می‌گیرد:

Weight per Unit Volume=24.5166kN/m3

مرحله **4**: وارد کردن **Modulus of Elasticity**

در همان پنجره **Material Property Data**، در بخش **Mechanical Property Data**، گزینه‌ای با عنوان زیر وجود دارد:

Modulus of Elasticity,E

در این قسمت باید مقدار مدول الاستیسیته بتن را بر حسب واحد فعال پروژه وارد کنیم.

اگر واحد نرم‌افزار روی **MPa** باشد، برای مثال:

برای بتن با چگالی **2400** و مقاومت **25** مگاپاسکال:

E=25278MPa

و برای بتن با چگالی **2500** و مقاومت **25** مگاپاسکال:

E=26875MPa

باید وارد شود.

نکته بسیار مهم این است که قبل از وارد کردن عدد، واحدهای نرم‌افزار کنترل شود. اگر واحد روی **m, kN** باشد، واحد تنش به صورت **kN/m^2** خواهد بود و باید تبدیل واحد انجام شود.

اما اگر واحد پایین صفحه **ETABS** روی **N,mm** تنظیم شود، وارد کردن مقدار بر حسب **MPa** ساده‌تر و کم‌خطاتر خواهد بود.

جمع‌بندی

مدول الاستیسیته بتن یکی از پارامترهای کلیدی در تحلیل سازه‌های بتنی است. این پارامتر در تعیین سختی تیرها، ستون‌ها، دیوارهای برشی و دال ها نقش مستقیم دارد و بر تغییرمکان‌ها، دریفت، دوره تناوب، توزیع نیروها و نتایج تحلیل اثرگذار است.

مطابق مبحث نهم، مدول الاستیسیته بتن را می‌توان با استفاده از رابطه های داده شده محاسبه کرد. در نهایت، باید توجه داشت که مدول الاستیسیته بتن یک ورودی ساده و تشریفاتی نیست، بلکه یکی از عوامل اصلی تعیین‌کننده رفتار تحلیلی سازه است. بنابراین کنترل مقدار آن بر اساس مبحث نهم و وارد کردن صحیح آن در**ETABS** ، یکی از گام های مهم در مدل‌سازی حرفه‌ای سازه‌های بتنی محسوب می‌شود.

در دوره حرفه ای آموزش طراحی سازه با نرم افزار ایتبس مفصل به این جزییات پرداختیم.