راهنمای مقدماتی استفاده از ETABS برای مدلسازی دال‌های PT (پس کشیده)

عبدالمهدی عباسی

تابستان ۱۴۰۳

فصل یازدهم

۱۱. کاربرد ETABS در طراحی دال‌های پس‌کشیده

۱-۱۱- مقدمه و نگاه کلی به روند رایج

برنامه‌های ETABS و SAFE امکانات مناسبی برای طراحی دال‌های پس‌کشیده دارند. در این فصل نگاهی به این امکانات و روند رایج دفاتر فنی در استفاده از این برنامه‌ها در طراحی دال‌های پیش‌تنیده می‌پردازیم. گرچه از نگرش کاربردی، برنامه‌های دیگری که به این منظور استفاده می‌شوند از امکانات بیشتری در فرایند طراحی پیش‌تنیدگی برخوردارند ولی به دلیل سهولت استفاده و نیز در دسترس بودن برنامه ETABS و SAFE در این فصل مطالب براساس این برنامه‌ها تنظیم شده است. از جمله برنامه‌های خوب دیگر می‌توان به نرم افزار Adapt Builder اشاره کرد[۱].

گام‌های اصلی طراحی یک سیستم سازه ساختمانی که برای بهبود رفتار سرویس دال‌های کف آن از پس‌کشیدگی استفاده شده به قرار زیر است:

۱. انتخاب ضخامت اولیه برای دال‌پس‌کشیده.

۲. طراحی کامل سیستم باربر لرزه‌ای با مدلسازی سازه با ضخامت اولیه انتخاب شده در بند ۱ بدون در نظر گرفتن پس‌کشیدگی.

۳. طراحی کامل دال پس‌کشیده برای بارهای ثقلی وارده و تامین الزامات مربوط به پس‌کشیدگی و سایر الزامات عمومی دال‌ها

۴. بازنگری مرحله ۲ در صورت تغییر در ضخامت دال پس‌کشیده.

۵. کنترل اعضای اصلی سیستم باربرجانبی برای اثرات پس‌کشیدگی و در صورت لزوم بازنگری در بخش ۲ یا ۳

۶. تهیه جزییات

در شکل ۱-۱۱ فلوچارت مراحل فوق ترسیم شده است.

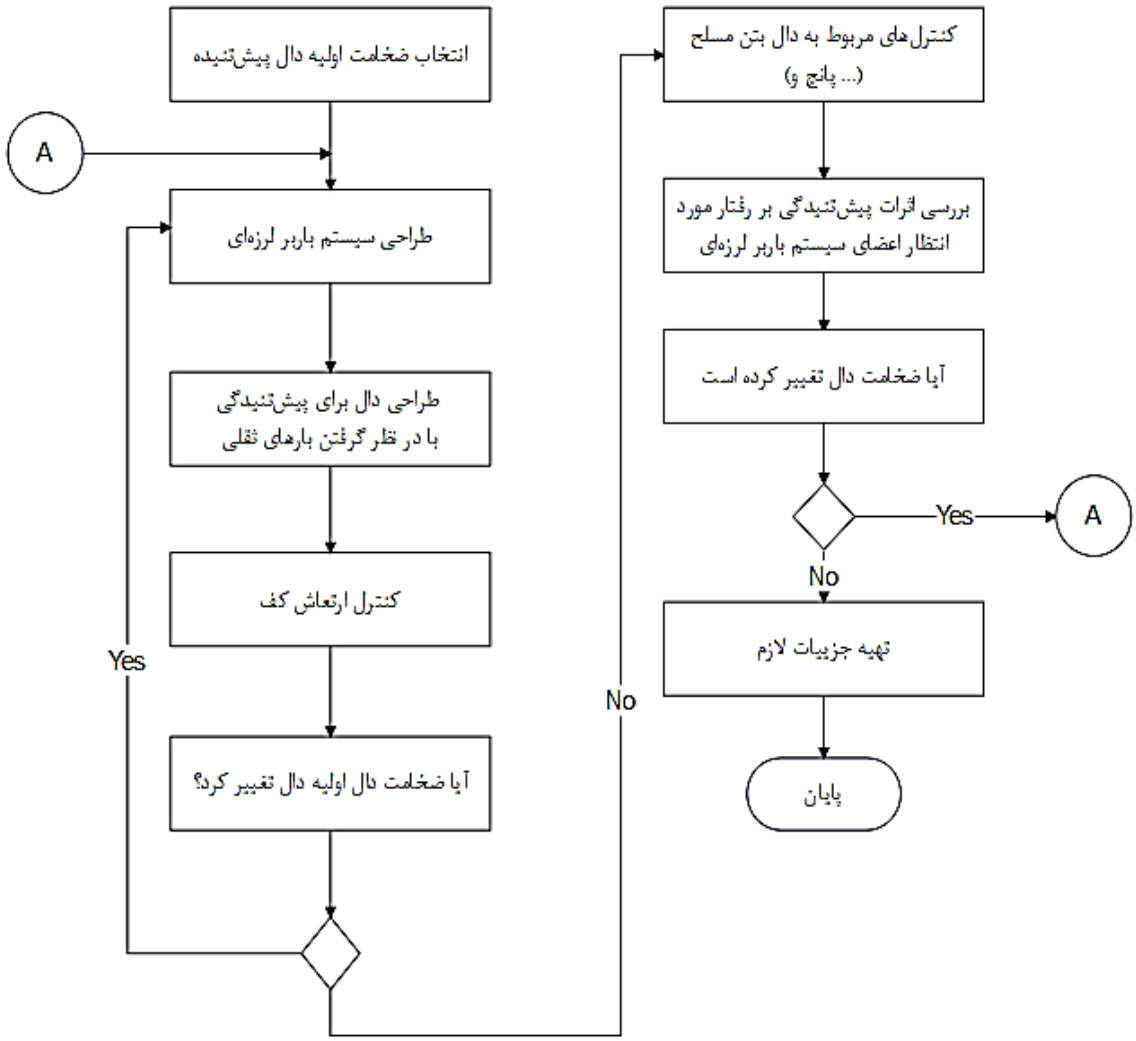
توجه شود که مرحله دو با ضرایب ترک خوردگی مناسب برای دال‌ها با توجه به نوع بررسی انجام شده صورت می‌گیرد (جدول ۱-۱۱ را ببینید). در مورد انتخاب ضریب ترک‌خوردگی مناسب برای طرح دال پس‌کشیده در ادامه توضیح داده خواهد شد.

[۱] https://risa.com/products/adapt-builder

جدول ۱-۱۱ ضرایب ترک‌خوردگی خمشی دال برای طراحی سیستم باربر لرزه‌ای*

مدل ریاضی مورد بررسی	ضریب ترک‌خوردگی	توضیح
طراحی اعضای اصلی سیستم باربر لرزه ای	m11=m22=m12 =0.001	سیستم دیوار باربر سیستم قاب ساختمانی یا قاب خمشی با $\alpha_f < 1$
طراحی اعضای اصلی سیستم باربر لرزه ای برای پیچش	m11=m22=m12 =0.25	

* در صورتی که در سیستم قاب خمشی یا قاب ساختمانی $\alpha_f \geq 1$ باشد می توان m11=m22=m12 =0.25 گرفت.



شکل ۱-۱۱ فلوچارت مراحل طراحی سیستم باربر لرزه‌ای دارای دال پس‌کشیده

لازم به ذکر است که بعضی از استانداردهای بین المللی ضرایب ترک خوردگی دیگری برای دالهای پس‌کشیده به کار رفته در یک سیستم باربر لرزه‌ای پیشنهاد کرده اند. یکی از استانداردهای معتبر در این زمینه گایدلاین LATBSDC است. مطابق این

سند ضرایب ترک خوردگی دال پس‌کشیده‌ای که به عنوان دیافراگم در یک سیستم باربر لرزه‌ای استفاده می‌شود را می‌توان طبق شکل ۲-۱۱ انتخاب کرد. در هر حال آنچه بیشتر در دفاتر مهندسی ایران رایج است همان مفاد جدول ۱-۱۱ است. قضاوت مهندسی در این مهم با توجه به سطح ترک خوردگی کمتر دال‌های پیش‌تنیده ضرورت دارد.

Table 3. Reinforced Concrete Stiffness Properties*

Component	*Service-Level Linear Models*			*MCE_R-Level Nonlinear Models*		
	Axial	**Flexural**	**Shear**	**Axial**	**Flexural**	**Shear**
PT diaphragms [3]	$0.8E_cA_g$	$0.8E_cI_g$	$0.4E_cA_g$	$0.5E_cA_g$	$0.5E_cI_g$	$0.2E_cA_g$

شکل ۲-۱۱ ضرایب ترک خوردگی دال‌های پس‌کشیده برای زلزله‌های سطح سرویس و نهایی

لازم به ذکر است که جزییات کامل طراحی موفق یک سیستم پس‌کشیده نیازمند تسلط مناسب بر مبانی و نیز روشهای اجرایی دارد و این راهنما صرفا به عنوان یک نقطه شروع در این موضوع به شمار می‌رود و باید جزییات مهم دیگر مدلسازی یا دیتایلینگ ضرورتا توسط طراح بررسی و اعمال گردد.

مقدار اولیه ضخامت دال‌های پس‌کشیده متکی به ستون را می‌توان بین ۱/۴۰ تا ۱/۴۵ دهانه در نظر گرفت. بسته به وضعیت ارتعاش، تغییرشکل و سایر ملاحظات موجود در مراحل مختلف طراحی ممکن است این مقدار کاهش داده شود. توجه شود که با توجه نسبت طول به ضخامت زیادتر دال‌های پس‌کشیده کنترل ارتعاش ضرورت بیشتری نسبت به دال‌های بتن مسلح معمول داشته باشد. این مهم خصوصا هنگامی که دستگاه‌های حساس به لرزش یا ایجاد کننده لرزش در محیط هستند اهمیت بیشتری دارد.

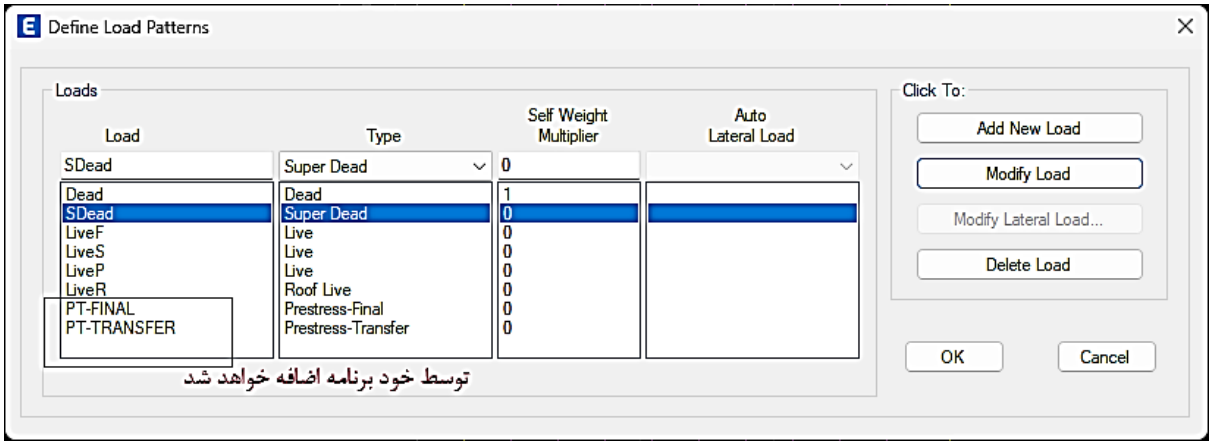
۲-۱۱- مدلسازی اولیه و تعریف هندسی

با توجه به اینکه در گام نخست کابل‌های پیش‌تنیدگی برای تامین لوازم حالت حدی سرویس استفاده می‌شوند، مراحل طراحی پس‌کشیدگی با در نظر گرفتن بارهای ثقلی انجام می‌شود. به این منظور مراحل زیر پیگیری می‌شود:

- الگوها و حالات بارگذاری
- تعریف استراند، تعریف تاندون‌ها روش اتوماتیک و دستی
- ضرایب ترک خوردگی، مش بندی و تنظیمات اولیه
- تحلیل اولیه و کنترل پیش فشار
- تنظیمات اولیه طراحی

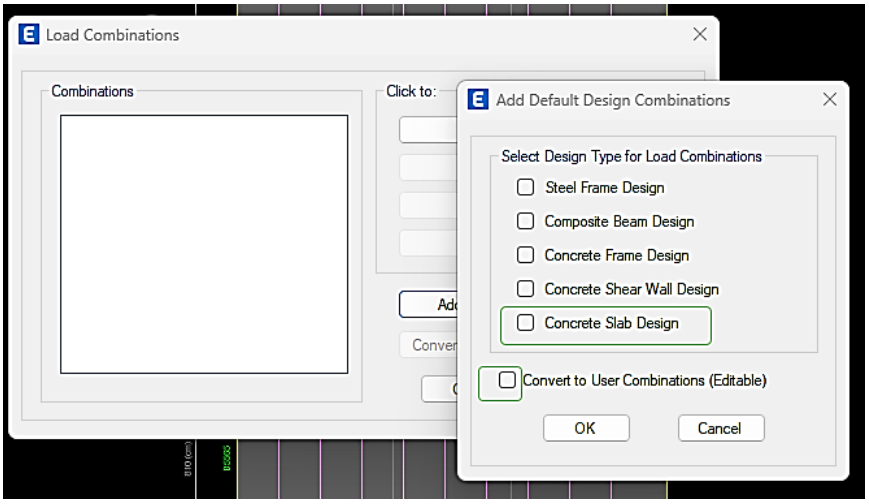
۱-۲-۱۱ الگوها و حالات بارگذاری

به عنوان یک نقطه شروع یک کپی از فایل اصلی نهایی مربوط به طراحی سیستم جانبی تهیه می‌شود. به جز حالات بارگذاری ثقلی باقی، الگوها و حالات بارگذاری حذف می‌شود. علاوه بر این کلیه ترکیبات بارگذاری حذف شده است. برنامه ETABS الگوهای بارگذاری مرتبط با پس‌کشیدگی (PT) را به صورت اتوماتیک بعد از اضافه کردن تاندون‌ها ایجاد می‌کند. بنابراین در این مرحله نیازی به تعریف این الگوها نیست.



شکل ۳-۱۱ الگوهای بارگذاری مرتبط طرح PT برای بارهای ثقلی

ترکیبات بارگذاری مورد نیاز بعد از اینکه تاندون‌ها تعریف شده از طریق دکمه Add Default Design Combo در پنجره Load Combinations ایجاد خواهد شد.



شکل ۴-۱۱ تعریف ترکیبات بارگذاری

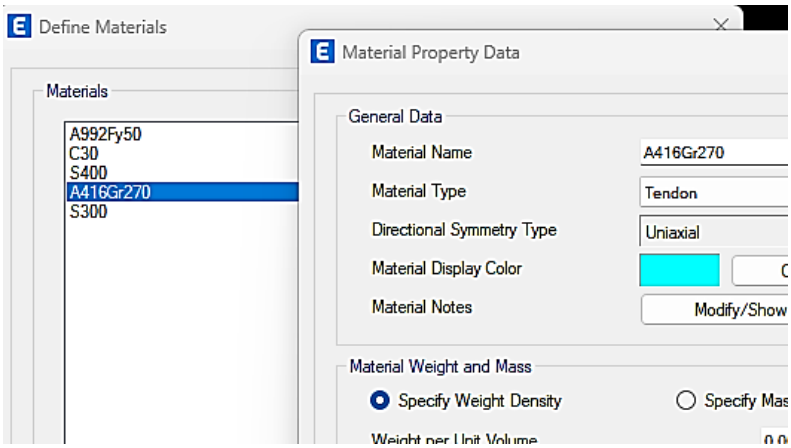
۱-۲-۱۱ تعریف تاندون پایه، تعریف تاندون‌ها: روش اتوماتیک و دستی

تاندون پایه به صورت پیش‌فرض در صفحه تعریف مصالح با گزینه A416Gr270 تعریف می‌شود. این تاندون معمول در صنعت ساختمان است. استاندارد ASTM مرتبط با این استراند ASTM A416M می‌باشد. قطر این استراند نیم اینچ یا ۱۲.۷ میلی‌متر و هفت رشته‌ای می‌باشد. مشخصات پیش‌فرض برنامه مطابق با این استاندارد است و نیاز به اصلاح خاصی ندارد.

در برنامه ETABS امکان تعریف تاندون‌ها به صورت اتوماتیک یا دستی وجود دارد. در *روش اتوماتیک* ابتدا نوارهای طراحی ترسیم می‌شوند و سپس برای هر نوار طراحی بسته به درصدی از وزن مرده دال که با پس‌کشیدگی متعادل می‌شود

الف. روش اتوماتیک

تاندون‌های مورد نیاز توسط برنامه محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که این روش معمولا نیاز به اصلاحات زیادی توسط کاربر دارد مگر آنکه هندسه دال سقف بسیار منظم باشد. مراحل مختلف این روش به شرح زیر است:



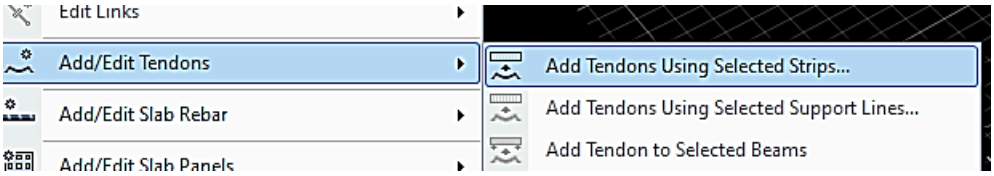
شکل ۵-۱۱ تعریف مصالح پایه تاندون

۱. نوارهای طراحی در هر دو راستا را ترسیم کنید (هر کدام در لایه خود) . به صورت سنتی در دال‌های پس‌کشیده مفهوم نوار ستونی و میانی وجود ندارد و نوارهای طراحی مجاور هم ترسیم می‌شوند. تاندون‌ها برای این نوارهای طراحی توسط برنامه محاسبه می‌شود. فاصله نوارهای طراحی تابع فاصله تاندون‌ها است. معمولا آرایش اولیه، دسته کردن تاندون‌ها در یک راستا و توزیع یکنواخت در راستای دیگر است. آیین‌نامه aci برای فاصله بین تاندون‌ها اعم از دسته شده یا توزیع شده مقرر داشته است:

8.7.2.3 For prestressed slabs with uniformly distributed loads, maximum spacing s of tendons or groups of tendons in at least one direction shall be the lesser of $8h$ and 1.5 m.

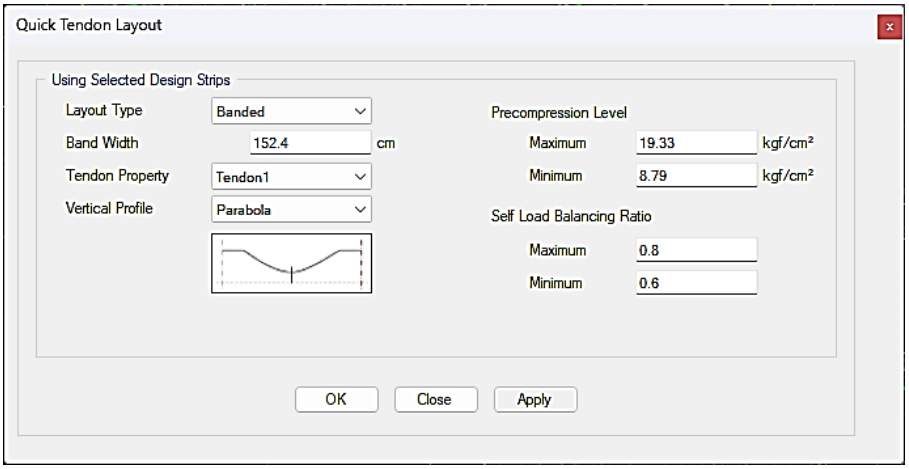
بنابراین حداکثر فاصله بین تاندون‌ها ۱.۵ متر یا ۸ برابر ضخامت دال منظور شود. دقت شود که این موضوع حداقل باید در یک راستا رعایت شود. این محدودیت فاصله حداقل در یک راستا باید رعایت شود.

۲. نوارهای طراحی ترسیم شده انتخاب و به آنها از طریق منوی Edit تاندون اختصاص داده می‌شود.



شکل ۶-۱۱ اختصاص تاندون به نوارهای طراحی

۳. تنظیمات مربوط به تاندون را انجام دهید.



شکل ۷-۱۱ تنظیمات مربوط به تعریف تاندون‌ها

با توجه به راستای مورد نظر نوع آرایش تاندون‌ها را انتخاب کنید (از قسمت Layout Type). در صورتی که عرض نوارهای طراحی را طوری تعیین کرده اید که حداقل های ایین نامه را تامین کرده است عرض نوارها را اصلاح کنید (Band Width). در صورتی که تمام دارید عرض دسته را برنامه به صورت اتوماتیک محاسبه کند این عدد را می توان ۰ وارد کرد.

پروفایل تاندون را انتخاب نمایید (قسمت Vertical Profile). بسته به مورد و با توجه به مطالب بیان شده در کتاب نوع پروفایل تاندون انتخاب می‌شود. هندسه پروفایل در ادامه توسط کاربر قابل اصلاح است.

میزان بار مرده دال که توسط پس‌کشیدگی متعادل می شود در قسمت Self Load Balancing Ratio تنظیم می‌شود. مقادیر پیش فرض در طراحی‌های معمول رایج است.

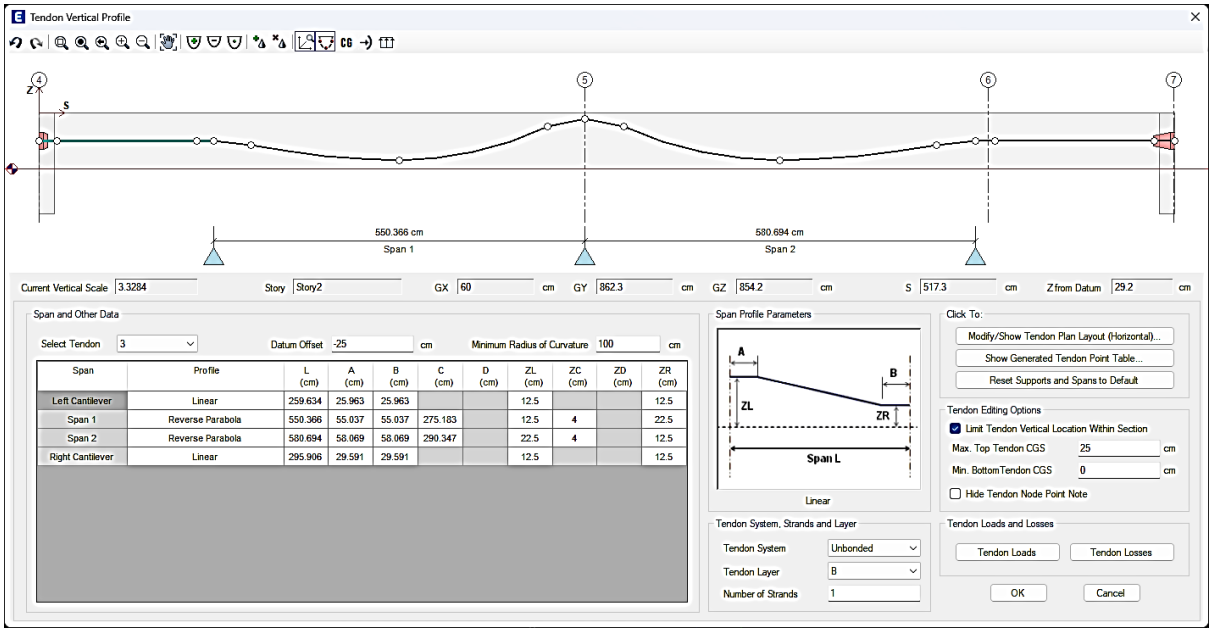
در قسمت Precompression Level مقدار حداقل و حداکثر پیش فشار تعریف می‌شود. مقدار حداقل پیش فشار مطابق آیین نامه:

8.6.2.1 For prestressed slabs, the effective prestress force $A_{ps}f_{se}$ shall provide a minimum average compressive stress of 0.9 MPa on the slab section tributary to the tendon or tendon group. For slabs with varying cross section along the slab span, either parallel or perpendicular to the tendon or tendon group, the minimum average effective prestress of 0.9 MPa is required at every cross section tributary to the tendon or tendon group along the span.

مقدار حداقل ۰.۹ مگاپاسکال پیش فرض برنامه مناسب است.

پس از این مرحله تاندون ها به دال اضافه خواهند شد. در صورتی که نمایش تاندون‌ها در Set Display Option (Ctrl + W) فعال باشد می‌توان تاندون ها را مشاهده کرد.

برای ملاحظه تاندون‌های تعریف شده توسط برنامه و اصلاح مشخصات آنها (که اغلب نیاز است) روی تاندون کلیک راست کرده تا صفحه Tendon Vertical Profile نمایش داده شود.



شکل ۷-۱۱ اصلاح مشخصات تاندون‌ها

برنامه به صورت پیش فرض در محل خطوط راهنما یا سایر اجزای سازه‌ای تکیه‌گاه منظور کرده و آرایش تاندون را بر این اساس تغییر می‌دهد. برای حذف این تکیه گاه‌ها و اصلاح هندسه تاندون از ابزار استفاده نمایید.

میزان بار متعادل کننده تاندون هم پس از کلیک روی قابل مشاهده است. تعداد استراندها از قسمت Tendon System, Strands and Layer قابل ملاحظه است.

در نهایت هندسه تاندون ترسیمی را می‌توان از قسمت Span and Other Data ملاحظه و ویرایش کرد.

پس از اطمینان از مناسب بودن هندسه تاندون این مرحله خاتمه می‌یابد.

ب. روش دستی

در این روش پروفایل تاندون و تعداد استراندها تماما توسط طراح محاسبه و تعریف خواهد شد. این روش اصولی طراحی این دسته دال‌ها است. توجه شود که اصولا طراحی سقف‌های پس‌کشیده به سعی و خطا و توجه بیشتری نیازمند است.

۱. مشابه روش اتوماتیک نوارهای طراحی را ترسیم نمایید.
۲. بحراتی ترین نوار طراحی را هر راستا را انتخاب نمایید (با توجه به طول دهانه یا بار وارده)
۳. برای پروفایل تاندون مورد نظر و با توجه به نیازهای بار مرده که با توجه به نیروهای داخلی نوار طراحی قابل ملاحظه است. هندسه تاندون را نهایی کنید (به مثال دستی این کتاب مراجعه کنید)
۴. با استفاده از ابزار تاندون را روی نوار طراحی ترسیم کنید. کلیک راست کنید.
۵. در این صفحه هندسه تاندون و تعداد استراندها با استفاده از محاسبات بند ۳ تکمیل نمایید.
۶. این تاندون را به موازات خود برای تکثیر کنید (با استفاده از دستور Replicate)

تعداد استراندها را طوری تعیین نمایید که حداقل فاصله مورد نظر آیین نامه در انتهای عضو تامین شود:

Table 25.2.4—Minimum center-to-center spacing of pretensioned strands at ends of members

f_{ci}', MPa	Nominal strand diameter, mm	Minimum s
< 28	All	$4d_b$
≥ 28	< 12.7 mm	$4d_b$
	12.7 mm	45 mm
	15.2 mm	50 mm

در صورتی که در ادامه نیاز به تغییر تعداد استراندهای تاندون ایجاد شد می‌توان پس از انتخاب تاندون از منوی Assign>Tendon>Tendon Properties نوع سیستم پس‌کشیدگی یا تعداد استراندها را اصلاح کرد.

ج. روش سعی و خطا

در این روش نوارهای طراحی با توجه به تجربه طراح یا ملاحظه طراحی‌های گذشته ترسیم می‌شوند. تاندون‌ها از نظر تعداد و پروفایل به صورت اولیه ترسیم می‌شوند و بعد از انجام کنترل‌های مختلف بهره‌برداری یا نهایی مقادیر یا پروفایل‌ها برای رسیدن به پاسخ مورد نیاز اصلاح خواهند شد.

نکته دیگری که در زمان ترسیم دستی تاندون‌ها به آن توجه شود این است حتی الامکان از ترسیم تاندون در تیرها خودداری شود زیرا به خصوص در طرح لرزه‌ای لازم است کنترل‌های دستی برای اطمینان از رفتار مورد انتظار تیر انجام شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود اولین تاندون با فاصله حداکثر آیین نامه از محور تیر ترسیم شود.

د. الگو، حالات و ترکیبات بارگذاری

لازم به یادآوری است که همانطور که در بخش ۱-۲-۱۱ بیان شده است با تعریف تاندون برنامه به صورت اتوماتیک الگوها، حالات و ترکیبات بارگذاری لازم را اضافه خواهد کرد.

الگوهای بارگذاری مورد نیاز در طراحی دال پس‌کشیده عبارتست از:

PT-FINAL :نیروی نهایی تاندون‌ها بعد از وقوع تمام افت‌های درازمدت.

PT-TRANSFER: نیروی تاندون‌ها در مرحله جک‌زنی. مقدار پیش‌فرض نیروی جک برنامه ۸۵ درصد f_{pu} است. که می‌توان با انتخاب تاندون یا تاندون‌ها مقدار آن از طریق Assign >Tendon >Tendon Loads... اصلاح کرد.

پس از یک مرحله طراحی برنامه ترکیبات بارگذاری مورد نیاز را تولید می‌کند و حالات بارگذاری زیر را نیز تولید خواهد کرد:

PT-FINAL :نیروی نهایی تاندون‌ها بعد از وقوع تمام افت‌های درازمدت.

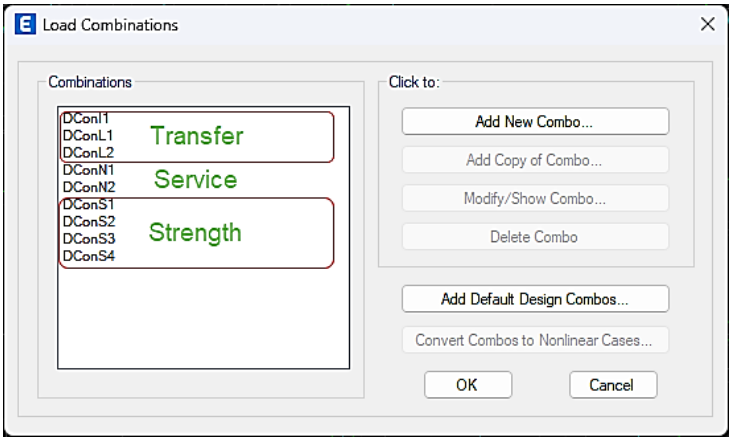
PT-TRANSFER: نیروی تاندون‌ها در مرحله جک‌زنی.

PT-FINAL-HP: نیروی هایپراستاتیک

در طراحی دال پس‌کشیده براساس aci ترکیبات بارگذاری رایج به قرار زیر است که می‌توان ترکیبات بارگذاری تولید شده توسط برنامه را بر این اساس اصلاح کرد:

ردیف	حالت حدی مورد بررسی	ترکیب بارگذاری
۱	سرویس (ماندگار)	$1.0\ (DL + SD) + 0.30\ LL + 1.0\ (PT - Final)$
۲	سرویس (کلی)	$1.0(\ DL + SD) + 1.0\ LL + 1.0\ (PT - Final)$
۳	انتقال تنش	$1.0\ DL + 1.15(\ PT - Transfer)$
۴	نهایی	$1.4\ (DL + SD) + 1.0(\ PT - HP)$
۵	نهایی	$1.4\ (DL + SD) + 1.6\ LL + 1.0(\ PT - HP)$

ضریب بار زنده بر اساس قضاوت مهندسی یا EC2 می‌توان انتخاب کرد. در اینجا از ضریب ۰.۳ استفاده شده است (پیش فرض برنامه ۰.۵ می‌باشد که از قسمت پیش‌تنیده صفحه Concrete Slab Design Preferences قابل اصلاح است).



شکل ۸-۱۱ ترکیبات بارگذاری تولید شده توسط برنامه

۲-۲-۱ ضرایب ترک خوردگی، مش بندی و تنظیمات اولیه

پس از ترسیم اولیه تاندون‌ها تنظیمات اولیه آنها قبل از شروع فرایند تحلیل و طراحی انجام می‌شود. در ادامه توضیحات لازم در این مورد ارایه خواهد شد:

الف. ضرایب ترک‌خوردگی

طبق آیین نامه دال‌های پیش‌تنیده در سه کلاس طراحی قرار دارند:

24.5.2.1 Prestressed flexural members shall be classified as Class U, T, or C in accordance with Table 24.5.2.1, based on the extreme fiber stress in tension f_t in the precompressed tension zone calculated at service loads assuming an uncracked section.

Table 24.5.2.1—Classification of prestressed flexural members based on f_t

Assumed behavior	Class	Limits of f_t
Uncracked	U[1]	$f_t \le 0.62\sqrt{f'_c}$
Transition between uncracked and cracked	T	$0.62\sqrt{f'_c} < f_t \le 1.0\sqrt{f'_c}$
Cracked	C	$f_t > 1.0\sqrt{f'_c}$

[1]Prestressed two-way slabs shall be designed as Class U with $f_t \le 0.5\sqrt{f'_c}$.

دال‌های پس‌کشیده دو طرفه در کلاس U طراحی می‌شود. در این کلاس حداکثر تنش کششی دال به $0.6\sqrt{f'_c}$ محدود می‌شود. در این کلاس طراحی در مرحله بهره‌برداری دال به صورت ترک نخورده در نظر گرفته می‌شود. بنابراین در طراحی و کنترل بهره‌برداری دال‌های پس‌کشیده ضریب ترک خوردگی دال برابر ۱ منظور می‌شود.

آیین‌نامه در مورد ضریب ترک خوردگی دال در مورد کنترل تنش‌ها در حالت حدی نهایی ساکت است. در اینجا پیشنهاد می‌شود ضرایب ترک خوردگی دال در حالت نهایی و برای بارهای ثقلی حداقل ۰.۷ منظور شود.

در طرح لرزه‌ای و تعیین تناسبات سیستم باربر لرزه‌ای گرچه معمولا از حضور تاندون چشم پوشی می‌شود لیکن با توجه به حضور پیش‌فشار ناشی از پس‌کشیدگی برای ضرایب ترک خوردگی دال می‌توان از توصیه LATBSDC استفاده کرد:

Table 3. Reinforced Concrete Stiffness Properties*

Component	*Service-Level Linear Models*			*MCE$_R$-Level Nonlinear Models*		
	Axial	Flexural	Shear	Axial	Flexural	Shear
PT diaphragms[3]	$0.8E_cA_g$	$0.8E_cI_g$	$0.4E_cA_g$	$0.5E_cA_g$	$0.5E_cI_g$	$0.2E_cA_g$

به طور خلاصه برای طراحی دال پس‌کشیده به تنهایی برای بارهای ثقلی انجام می‌شود می‌توان مطابق جدول زیر عمل کرد:

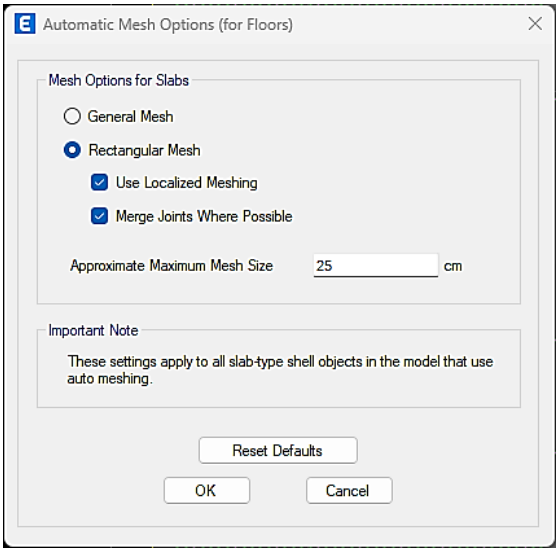
کنترل‌های بهره‌برداری	
دال	m11=m22=m12=1.0
تیر	I33=0.5
ستون	I22=I33=1
کنترل‌های نهایی	
دال	m11=m22=m12=0.7
تیر	I33=0.35
ستون	I22=I33=0.7

- در شرایط بهره برداری و برای دیوارهای برشی F22 برابر ۱.۴ برابر ضریب ترک خوردگی بسته به رفتار دیوار اعمال می شود (دیوار ترک خورده یا نخورده)

به این ترتیب دقت شود که برای بررسی دال در حالات بهره‌برداری و نهایی به تنظیمات ضرایب ترک خوردگی جداگانه نیاز است.

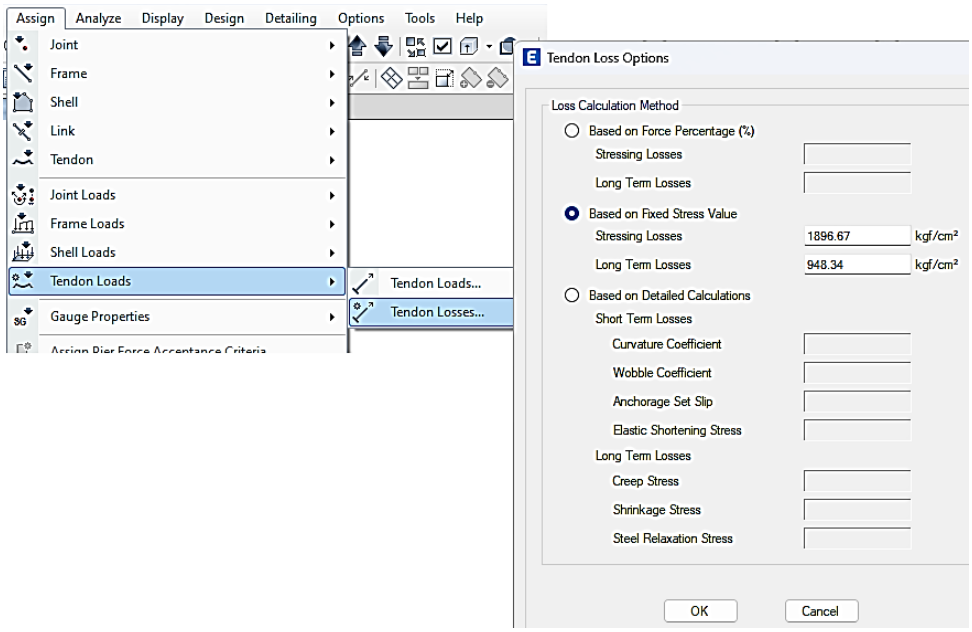
ب. مش بندی

به طور کلی در تحلیل اجزا محدود، پاسخ‌های موضعی (Local) به اندازه مش‌بندی حساس می‌باشند. با توجه به اینکه در تحلیل و طراحی پیش‌تنیده نیز بیشتر بررسی‌ها به صورت موضعی انجام می‌شود انتخاب درست اندازه مش‌بندی مهم است. بدیهی است هرچه اندازه مش‌ها کمتر باشد، دقت محاسبات افزایش خواهد یافت. انتخاب بهینه اندازه مش نیازمند تحلیل حساسیت است. لیکن به عنوان یک معیار کلی می‌توان حداکثر اندازه مش‌ها را به اندازه حداقل بعد دال مورد بررسی انتخاب کرد. به این منظور می‌توان در پنجره Automatics Mesh Option For Floor از منوی Analysis اندازه Approximate Maximum Mesh Size را به اندازه ضخامت دال تنظیم کرد. به هر حال توصیه شده است که اندازه مش از ۱۰ درصد اندازه حداقل پانل مورد بررسی بیشتر انتخاب نشود.



شکل ۹-۱۱ تنظیم اندازه مش‌های دال کف

ج. تنظیم میزان افت‌ها

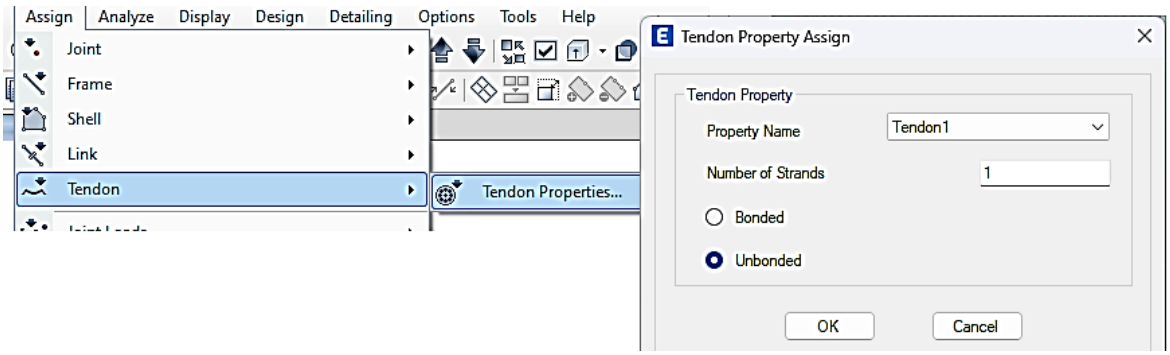


شکل ۱۰-۱۱ اعمال میزان افت‌ها

میزان افت‌ها را می‌توان به صورت یکسان به تمام تاندون‌ها یا هر کدام از تاندون‌ها به صورت جداگانه اعمال کرد. برنامه به صورت پیش فرض ۱۰ درصد افت برای مرحله اعمال تنش (جک زنی) و ۵ درصد افت دراز مدت محاسبه می‌کند. با این حال می‌توان به صورت دقیق نیز با توجه به مطالب کتاب افت‌ها را محاسبه و اعمال کرد.

د. تعیین سیستم پس‌کشیدگی

سیستم پیش فرض پس کشیدگی برنامه غیرچسپنده (unbonding) است. این سیستم در ساخت و ساز ساختمانی ایران نیز رایج است. در صورتی که نیاز به تغییر سیستم باشد، پس از انتخاب تاندون‌ها از منوی Assign می‌توان نوع سیستم را به چسپنده تغییر داد.



شکل ۱۱-۱۱ تعریف نوع سیستم پس‌کشیدگی و تعداد استرانداها در تاندون

ه. تحلیل اولیه و کنترل پیش‌فشار

پس از انجام تنظمیات فوق و پس از تحلیل، لازم است مقدار حداقل پیش‌فشار کنترل شود و در صورت نیاز نسبت به اضافه کردن کابل برای رسیدن به این حداقل اقدام نمود.

مطابق آیین‌نامه aci:

> **8.6.2.1** For prestressed slabs, the effective prestress force $A_{ps}f_{se}$ shall provide a minimum average compressive stress of 0.9 MPa on the slab section tributary to the tendon or tendon group. For slabs with varying cross section along the slab span, either parallel or perpendicular to the tendon or tendon group, the minimum average effective prestress of 0.9 MPa is required at every cross section tributary to the tendon or tendon group along the span.

مطابق این بند از آیین‌نامه، در هر مقطع از دال باید حداقل ۰.۹ مگاپاسکال تنش فشاری به صورت میانگین وجود داشته باشد. این پیش‌فشار مربوط به نیروی PT-FINAL که نیروی تاندون‌ها بعد از وقوع تمام افت‌ها است. به این منظور می‌توان نیروی فشاری موجود در نوارهای طراحی را بررسی کرد:

$$PC_{min} = 9 \times (b_{strip,min} \times t_{slab})$$

$$PC_{max} = 9 \times (b_{strip,max} \times t_{slab})$$

که در این روابط:

$b_{strip,min}$: عرض حداقل نوارهای طراحی (سانتی متر)

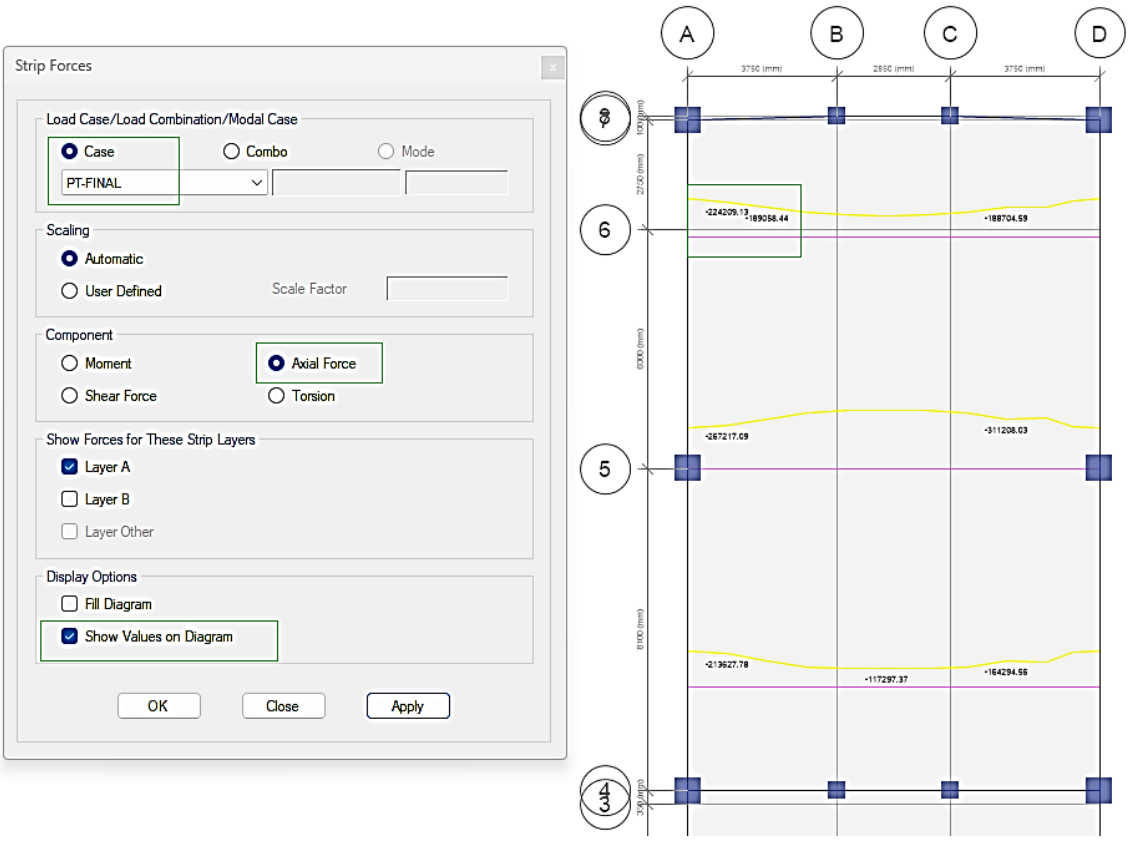
$b_{strip,max}$: عرض حداکثر نوارهای طراحی (سانتی متر)

t_{slab} : ضخامت دال (سانتی متر)

PC_{min} : حداکثر نیروی پیش‌فشار (کیلوگرم)

PC_{max} : حداقل نیروی پیش‌فشار (کیلوگرم)

حال پس از تغییر واحد برنامه به kgf-cm می‌توان نیروی داخلی نوارهای طراحی را برای حالت بارگذاری PT-FINAL بررسی کرد. باید در تمام نوارهای طراحی نیروی محوری موجود بین مقادیر PC_{min} و PC_{max} قرار داشته باشد. در صورتی که این شرایط تامین نشود باید پروفایل یا تعداد کابل‌ها مورد بازبینی قرار گیرد.

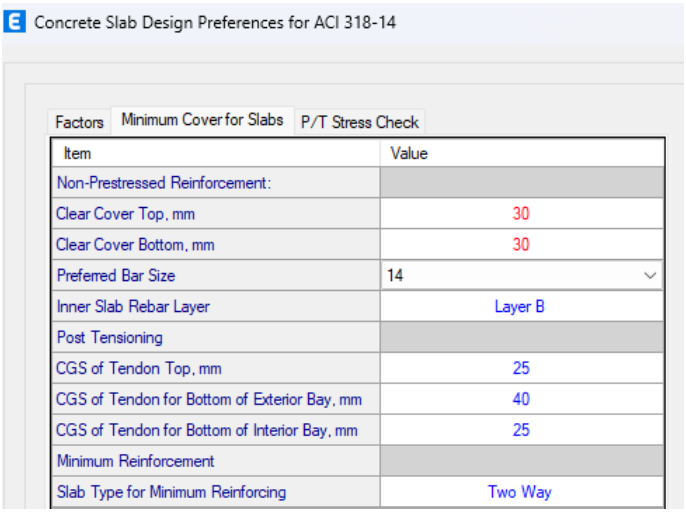


شکل ۱۲-۱۱ بررسی وضعیت پیش‌فشار در نوارهای طراحی

و. تنظیمات اولیه طراحی

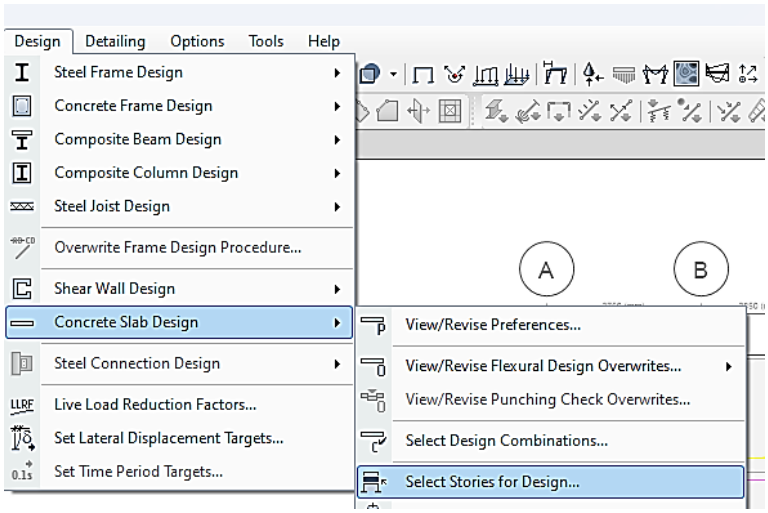
پس از اطمینان از مناسب بودن مقدار پیش‌فشار لازم است تنظیمات اولیه طراحی انجام شود. به این منظور:

- مقدار کاور دال و کابل‌ها را با توجه شرایط دوام و الزامات حریق تنظیم نمایید.



شکل ۱۳-۱۱ تنظیم میزان پوشش روی میلگردها و کابل‌ها

- صحت ترکیبات بارگذاری را در صفحه طراحی دال یکبار دیگر کنترل نمایید.
- طبقه یا طبقات مورد نظر برای طراحی را انتخاب نمایید.



شکل ۱۴-۱۱ انتخاب طبقه یا طبقات مورد نظر برای طراحی

پس از انجام تنظیمات اولیه فوق سازه آماده طراحی و بررسی وضعیت تنش‌هاست.

۳-۱۱- بررسی و کنترل نتایج پس‌کشیدگی (PT)

در این مرحله و پس از انجام تنظیمات اولیه نسبت به بررسی وضعیت تنش‌ها در حالات رفتاری مختلف اقدام خواهیم کرد. علاوه بر این سایر موارد مهم در طراحی این دال‌ها با توجه به امکانات برنامه ETABS مورد بررسی قرار خواهیم داد. موارد مهم در این گام عبارتند از:

- کنترل تنش های مرحله انتقال تنش (PT-Transfer)

- کنترل تنش‌های حالت حدی بهره‌برداری(PT-Service)

- کنترل خیز

- سایر کنترل‌ها

الف. کنترل تنش های مرحله انتقال تنش (PT-Transfer)

در مرحله انتقال تنش (اعمال نیروی جک)، آیین‌نامه aci مقرر داشته است که مقدار تنش‌های فشاری و کششی دال از مقادیر بندهای ۲۴.۵.۳.۱ و ۲۴.۵.۳.۲ تجاوز ننماید:

24.5.3.1 Calculated extreme concrete fiber stress in compression immediately after transfer of prestress, but before time-dependent prestress losses, shall not exceed the limits in Table 24.5.3.1.

Table 24.5.3.1—Concrete compressive stress limits immediately after transfer of prestress

Location	Concrete compressive stress limits
End of simply-supported members	$0.70f_{ci}'$
All other locations	$0.60f_{ci}'$

24.5.3.2 Calculated extreme concrete fiber stress in tension immediately after transfer of prestress, but before time-dependent prestress losses, shall not exceed the limits in Table 24.5.3.2, unless permitted by 24.5.3.2.1.

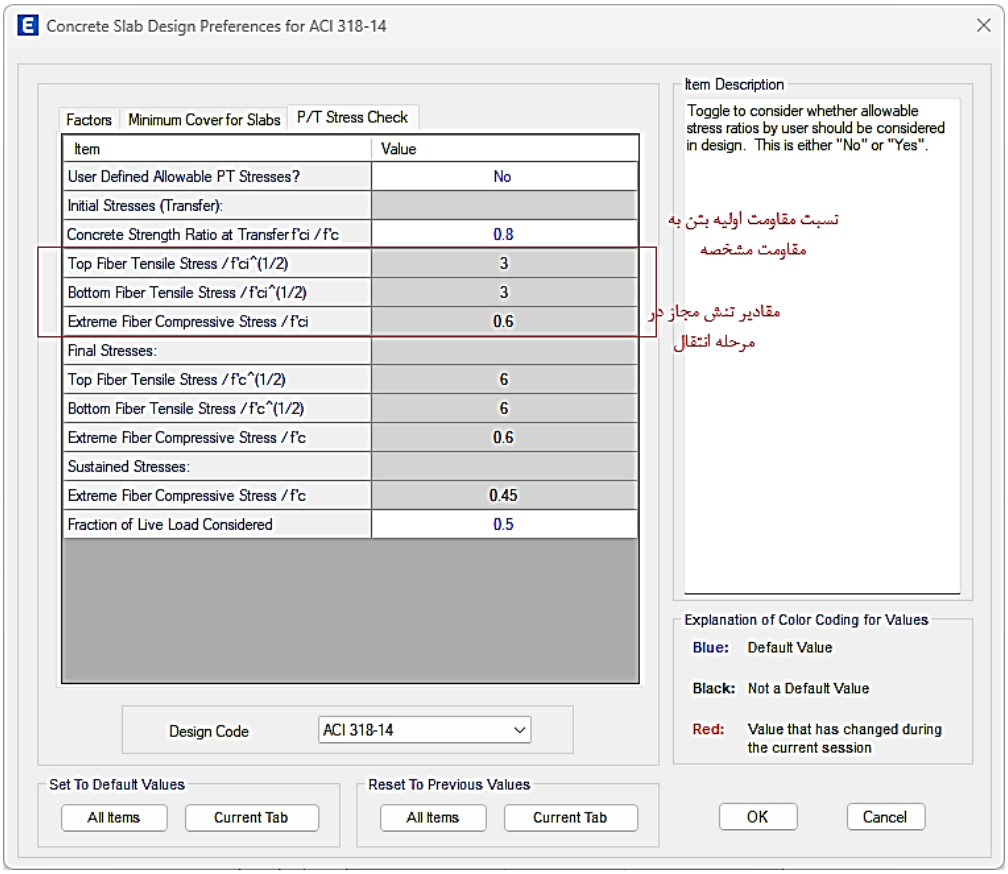
Table 24.5.3.2—Concrete tensile stress limits immediately after transfer of prestress, without additional bonded reinforcement in tension zone

Location	Concrete tensile stress limits
Ends of simply-supported members	$0.5\sqrt{f_{ci}'}$
All other locations	$0.25\sqrt{f_{ci}'}$

بنابراین، برای ترکیب‌بارهای مربوط به مرحله انتقال تنش پس‌کشیدگی باید مقدار مجاز تنش کششی به $0.25\sqrt{f_{ci}'}$ محدود شود. حداکثر مقدار تنش فشاری نیز $0.6f_{ci}'$ می‌باشد. f_{ci}' مقدار مقاومت مشخصه بتن به هنگام اعمال نیروی پیش‌تنیدگی است. معمولا اعمال نیروی پس‌کشیدگی زمانی انجام می‌شود که مقاومت بتن حداقل به ۷۰ درصد مقاومت مشخصه رسیده باشد (پیش فرض برنامه ۸۰ درصد می‌باشد) بنابراین:

$$f_{ci}' = 0.7f_c'$$

در صفحه Concrete Slab Design Preferences می‌توان تنظیمات مربوط به نسبت‌های تنشی مختلف را ملاحظه و اصلاح کرد. در بیشتر موارد مقادیر پیش فرض مناسب است. لازم به ذکر است که در این صفحه نسبت به صورت ثابت در واحد lb-in بیان شده است. به جز احتمالا در مورد درصد بار زنده در نظر گرفته شده یا نسبت مقاومت فشاری بتن در مرحله جک زنی به مقاومت مشخصه بتن بقیه موارد نیازی به اصلاح ندارد.

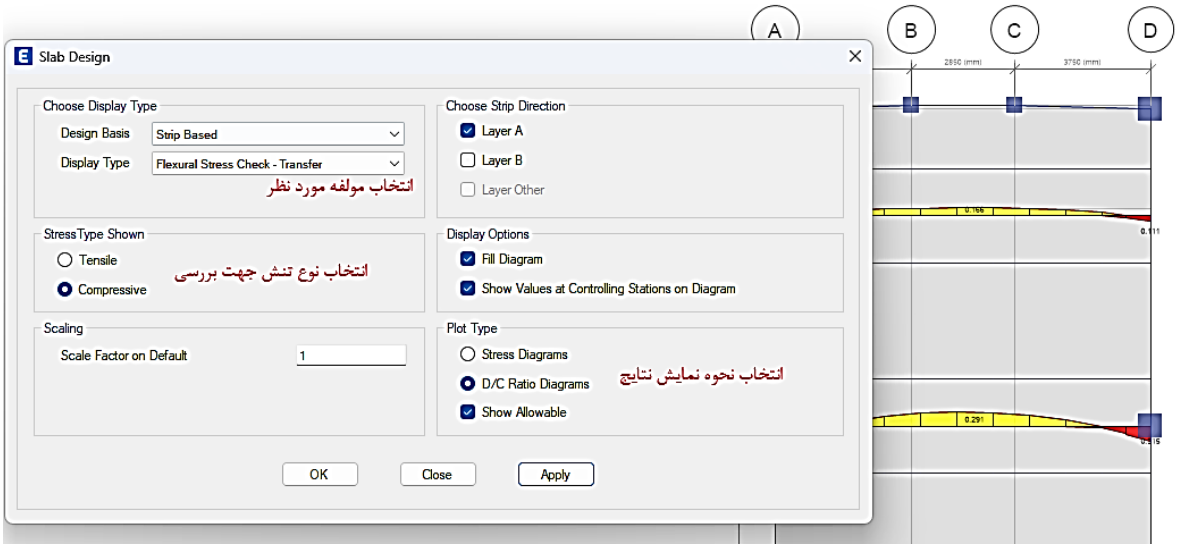


شکل ۱۵-۱۱ صفحه تنظیمات مربوط به تنش‌ها مراحل مختلف رفتاری دال پس‌کشیده

- ترکیبات بارگذاری مربوط به حالت انتقال تنش در قسمت تنظیمات ترکیبات بارگذاری طراحی دال نگه دارید یا اضافه نمایید. باقی ترکیبات بارگذاری از این فهرست خارج کنید.

Design > Concrete Slab Design> Select Design Combination

- دال را طراحی نمایید.
- از صفحه ملاحظه نتایج طراحی دال برای نوارهای طراحی هر لایه وضعیت تنش‌های کششی و فشاری مربوط به مرحله انتقال تنش را کنترل نمایید. در این ص ۰
- فحه هم می‌توان مقادیر مجاز را به صورت دیاگرام نسبت و هم به صورت دیاگرام مقدار ملاحظه کرد. معمولا با توجه به طراحی سهم بارگیر هر تاندون از طریق نوار طراحی، ملاحظه نتایج براساس نوارهای طراحی رایج است؛ لیکن می‌توان نتایج را براساس خروجی اجزا محدود نیز ملاحظه کرد.



شکل ۱۶-۱۱ نمایش تنش‌های مجاز مربوط به هر مرحله رفتاری

ب. کنترل تنش‌های حالت حدی بهره‌برداری(PT-Service)

با توجه به این مطابق aci دال‌های پس‌کشیده در کلاس U طراحی می‌شوند باید مطابق بند ۲۵.۴.۲.۱ آیین‌نامه تنش کششی آنها به $0.5\sqrt{f_c'}$ محدود شود.

24.5.2.1 Prestressed flexural members shall be classified as Class U, T, or C in accordance with Table 24.5.2.1, based on the extreme fiber stress in tension f_t in the precompressed tension zone calculated at service loads assuming an uncracked section.

Table 24.5.2.1—Classification of prestressed flexural members based on f_t

Assumed behavior	Class	Limits of f_t
Uncracked	U[1]	$f_t \le 0.62\sqrt{f_c'}$
Transition between uncracked and cracked	T	$0.62\sqrt{f_c'} < f_t \le 1.0\sqrt{f_c'}$
Cracked	C	$f_t > 1.0\sqrt{f_c'}$

[1]Prestressed two-way slabs shall be designed as Class U with $f_t \le 0.5\sqrt{f_c'}$.

علاوه بر این در بند ۲۵.۵.۴.۱ و در دال‌های دو طرفه مربوط به این کلاس تنش فشاری به $0.45f_c'$ محدود شده است.

24.5.4 *Permissible concrete compressive stresses at service loads*

24.5.4.1 For Class U and T members, the calculated extreme concrete fiber stress in compression at service loads, after allowance for all prestress losses, shall not exceed the limits in Table 24.5.4.1.

Table 24.5.4.1—Concrete compressive stress limits at service loads

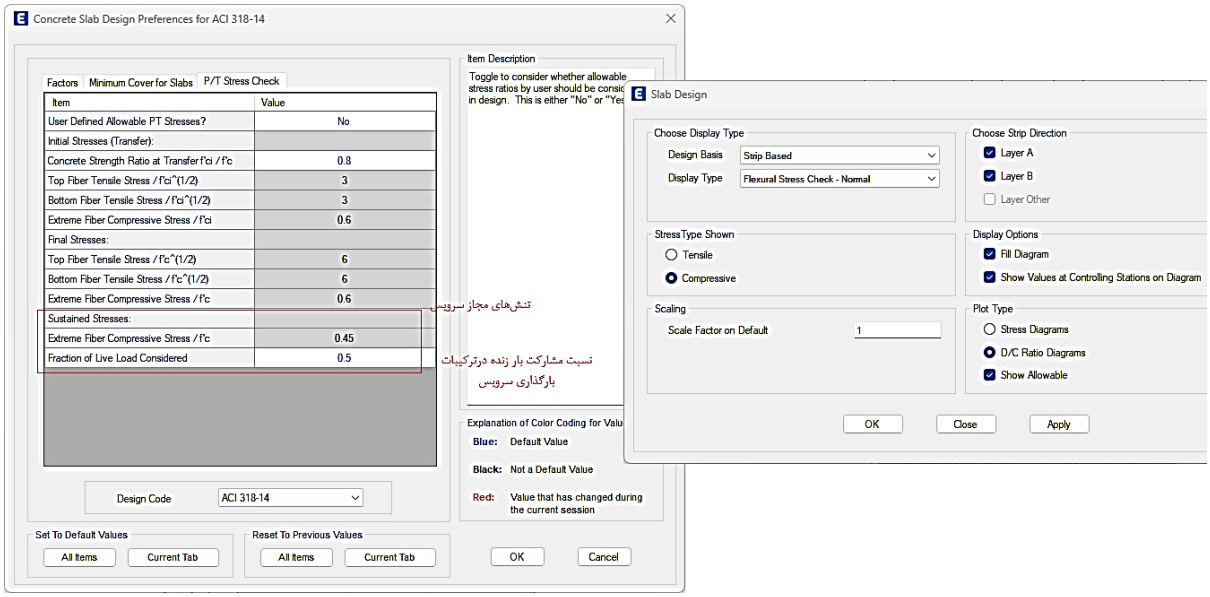
Load condition	Concrete compressive stress limits
Prestress plus sustained load	$0.45f_c'$
Prestress plus total load	$0.60f_c'$

مراحل کنترل تنش‌ها در حالت سرویس به قرار زیر است:

- ترکیبات بارگذاری مربوط به حالت حدی سرویس در قسمت تنظیمات ترکیبات بارگذاری طراحی دال نگه دارید یا اضافه نمایید. باقی ترکیبات بارگذاری از این فهرست خارج کنید.

Design > Concrete Slab Design> Select Design Combination

- دال را طراحی نمایید.
- مشابه حالت حدی انتقال تنش، از صفحه ملاحظه نتایج طراحی دال برای نوارهای طراحی هر لایه وضعیت تنش‌های کششی و فشاری مربوط به مرحله انتقال تنش را کنترل نمایید. در این صفحه هم می‌توان مقادیر مجاز را به صورت دیاگرام نسبت و هم به صورت دیاگرام مقدار ملاحظه کرد. معمولا با توجه به طراحی سهم بارگیر هر تاندون از طریق نوار طراحی، ملاحظه نتایج براساس نوارهای طراحی رایج است؛ لیکن می‌توان نتایج را براساس خروجی اجزا محدود نیز ملاحظه کرد.



شکل ۱۷-۱۱ صفحه تنظیمات تنش در مرحله سرویس و نمایش نتایج

به طور کلی جهت اطمینان از انتخاب درست تنش‌های حدی توسط برنامه پیشنهاد می‌شود به طور کلی کاربر قبل از بررسی صفحه نمایش نتایج طراحی هربار و برای هر مرحله رفتاری مقادیر تنش‌ها را از صفحه **Concrete Slab Design** *در قسمت مربوط به* **Preferences** **Initial Stress (Transfer)** *مطابق الزامات آیین‌نامه کنترل یا اصلاح نماید؛ سپس پس از انتخاب ترکیبات بارگذاری مربوط به هر مرحله (انتقال یا سرویس) و انجام طراحی در صفحه* **Slab Design** *نسبت تنش‌ها را برای* **Display Type** *مربوط به حالت* **Transfer** *بررسی نماید. خلاصه تنش‌های حدی مجاز در هر مرحله جهت سهولت مراجعه مطابق جدول زیر است:*

مرحله انتقال تنش PT-Transfer		
نوع تنش	مقدار مجاز MPa	مقدار مجاز ksi
فشاری	$0.7f'_{ci}$	$0.7f'_{ci}$
کششی	$0.25\sqrt{f'_{ci}}$	$3\sqrt{f'_{ci}}$
مرحله بهره برداری PT-Service		
کششی	$0.5\sqrt{f'_c}$	$6\sqrt{f'_c}$
تنش فشاری روی ترکیب بار کلی	$0.6f'_c$	$0.6f'_c$
تنش فشاری روی ترکیب بار ماندگار	$0.45f'_c$	$0.45f'_c$

ج. کنترل خیز دال پس‌کشیده

آیین‌نامه aci در بند ۲۴.۲.۳.۸ بیان کرده است که

24.2.3.8 For prestressed Class U slabs and beams as defined in 24.5.2, it shall be permitted to calculate deflections based on I_g.

بنابراین محاسبات خیز برای دال‌های دوطرفه پس‌کشیده بدون انجام تحلیل ترک خوردگی و با استفاده از I_g انجام می‌شود.
بررسی اثرات وابسته به زمان در دال‌های پس‌کشیده دارای چالش بوده، آیین‌نامه نیز آن را به مراجع دیگری ارجاع داده است (ازجمله aci 209).
محاسبه تغییر شکل های وابسته به زمان (خزش و انقباض) در اعضای خمشی پیش تنیده بتنی چالش برانگیز است .این محاسبات نه تنها باید افزایش تغییر شکل ناشی از تنش های خمشی را در نظر بگیرند، بلکه باید تغییر شکل های وابسته به زمان ناشی از کوتاه شدن تدریجی عضو خمشی را نیز در نظر بگیرند.

اعضای پیش تنیده بتنی به دلیل پیش فشردگی در دال یا تیر که باعث خزش می شود، نسبت به اعضای غیر پیش تنیده مشابه، با گذشت زمان بیشتر کوتاه می شوند .این خزش، همراه با انقباض بتن، منجر به کوتاه شدن قابل توجه اعضای خمشی می شود که تا چندین سال پس از ساخت نیز ادامه دارد و باید در طراحی در نظر گرفته شود .این کوتاه شدن تمایل دارد تا کشش در آرماتور پیش تنیده را کاهش دهد، پیش فشردگی عضو را کاهش دهد و در نتیجه باعث افزایش تغییر شکل های وابسته به زمان شود.

عامل دیگری که می تواند بر تغییر شکل های وابسته به زمان اعضای خمشی پیش تنیده تأثیر بگذارد، بتن یا مصالح بنایی غیر پیش تنیده قرار گرفته در جهت عضو پیش تنیده است (به عنوان مثال یک دال غیر پیش‌تنیده در مجاورت یک دال یا تیر

پیش‌تنیده). از آنجایی که عضو پیش تنیده تمایل به انقباض و خزش بیشتر از بتن غیر پیش تنیده مجاور دارد، سازه تمایل دارد تا به سازگاری اثرات کوتاه شدگی برسد. این منجر به کاهش پیش فشردگی در عضو پیش تنیده می شود زیرا بتن مجاور فشار را جذب می کند. این کاهش در پیش فشردگی عضو پیش تنیده می تواند در طول سال ها رخ دهد و منجر به تغییر شکل های وابسته به زمان بیشتر و افزایش تنش های کششی در عضو پیش تنیده شود.

به هر حال با توجه به روال این کتاب، از همان رابطه ۲۴.۲.۴.۱.۱ برای در نظر گرفتن اثرات وابسته به زمان تغییرشکل استفاده شده است:

24.2.4.1.1 Unless obtained from a more comprehensive analysis, additional time-dependent deflection resulting from creep and shrinkage of flexural members shall be calculated as the product of the immediate deflection caused by sustained load and the factor λ_Δ

$$\lambda_\Delta = \frac{\xi}{1+50\rho'} \qquad (24.2.4.1.1)$$

به این ترتیب از همان روابط مربوط به دال‌های بتنی غیر پیش‌تنیده برای کنترل تغییرشکل آنی و درازمدت دال‌های پس‌کشیده استفاده می‌شود. کنترل‌ها همگی روی سطح مقطع کل دال انجام خواهد شد. با توجه به حضور پیش‌تنیدگی ترکیبات بارگذاری مربوط به کنترل خیز در دال پس‌کشیده به قرار زیر تغییر می‌کند:

الف. تعریف ترکیبات بارگذاری تغییرفرم: تغییرشکل کوتاه مدت بارزنده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta_{short\ time,L} = \Delta_{D+SD+PT+L} - \Delta_{D+SD+PT}$$

ب. ترکیب بارگذاری مربوط به تغییرفرم دراز مدت کف به شرح زیر می باشد:

$$\Delta_{Long\ Term} = \Delta_{short\ time,L} + \Delta_{longterm\ add}$$

قسمت اول عبارت فوق همات ترکیب بارگذاری کوتاه مدت بار زنده می‌باشد که در قسمت الف تعریف شد.

قسمت دوم عبارت مربوط تغییر مکان درازمدتی است که بعد از اتصال اجزای غیرسازه ای (مثل پارتیشن و کف سازی) ایجاد می‌شود. این تغییرفرم دراز مدت بر اثر پدیده‌های خزش و افت در بتن ایجاد می‌گردد. مطابق بند ۹-۱۹-۲-۲-۵ مبحث نهم:

۹-۱۹-۲-۵ تغییر مکان اضافی ناشی از وارفتگی (خزش) و جمع شدگی (افت یا انقباض) بتن در اعضای خمشی در طول زمان را که تغییر مکان دراز مدت نامیده میشود، در صورت عدم استفاده از روش های تحلیلی دقیق‌تر، می‌توان از حاصل ضرب تغییر مکان آنی ناشی از بارهای دائمی در ضریب λ_Δ، که از رابطه‌ی (۹-۱۹-۳) تعیین می‌شود، به دست آورد.

$$\lambda_\Delta = \frac{\xi}{1+50\rho'} \qquad (۹-۱۹-۳)$$

در این رابطه ρ' نسبت فولاد فشاری در مقطع وسط دهانه در اعضای با تکیه‌گاه های ساده یا سراسری، و در مقطع تکیه‌گاه در اعضای طره‌ای است. مقدار ضریب وابسته به زمان بارهای دائمی، ξ ، باید برابر با مقادیر جدول ۹-۱۹-۲ در نظر گرفته شود:

جدول ۹-۱۹-۲ ضریب وابسته به زمان بارهای دائمی

زمان	ضریب ξ
۳ ماه	۱/۰
۶ ماه	۱/۲
۱۲ ماه	۱/۴
۶۰ ماه و بیش‌تر	۲/۰

بنابراین:

$$\Delta_{longterm\ add} = (\lambda_{60} - \lambda_{t0})(\Delta_{D+PT}) + \lambda_{60}\Delta_{Sustained}$$

قسمت اول عبارت فوق بخشی از تغییرشکل اسکلت را که بعد از اجرای نازک کاری (پارتیشن و کفسازی) اتفاق افتاده است منظور می‌کند و بخش دوم تغییرشکل دراز مدت مربوط به بارهای ماندگار است که:

$$\Delta_{Sustained} = \Delta_{D+PT+SD+0.3L} - \Delta_{D+PT}$$

می‌باشد. برای محاسبه λ_{60} و λ_{t0} به میزان آرماتور فشاری مقطع نیاز است. در صورتی که فرض کنیم که نسبت آرماتور فشاری مقطع همان ۰.۰۰۱۸ است و نیز زمان شروع اجرای نازک کاری را سه ماه بعد از اتمام سازه در نظر بگیریم خواهیم داشت:

$$\lambda_{t0} = \frac{1}{1+50(0.0018)} = 0.92$$

$$\lambda_{60} = \frac{2}{1+50(0.0018)} = 1.84$$

در صورتی که از عملکرد میلگردهای فشاری در مدت خدمت پذیری سازه مطمئن نباشیم (خصوصا در مواقعی که میزان کاور میلگردها قابل توجه باشد یا دهانه‌ها نسبتا کوتاه باشد) مقادیر فوق به ۱ و ۲ افزایش می‌یابد. در نهایت:

$$\Delta_{Long\ Term} = \Delta_{short\ time,L} + \Delta_{longterm\ add}$$
$$= \Delta_{short\ time,L} + (1.84 - 0.92)\Delta_{D+PT} + 1.84\Delta_{Sustained}$$

دقت شود که تفاوت اصلی این روابط با روابط مشابه دال بتن مسلح اضافه شدن تغییرشکل ناشی از PT به تغییرشکل‌های بار مرده اسکلت است. زیرا هدف اصلی اعمال پس‌کشیدگی خنثی کردن بخشی از بار مرده بوسیله نیروی پس‌کشیدگی است.
منظور از نیروی پس‌کشیدگی مورد نظر به هنگام تعریف ترکیب بارهای سرویس PT-Final است.

د. سایر کنترل‌ها

پس از اطمینان از وضعیت مناسب تنش‌های گام‌های انتقال و بهره‌برداری و نیز مناسب بودن خیز می‌توان با تنظیم مجدد ضرایب ترک خوردگی نسبت به طراحی نهایی دال اقدام کرد. طرح خمشی، برشی و کنترل برش منگنه‌ای مطابق معمول در این مرحله انجام می‌شود.

یکی از نکات مهم در طراحی دال‌های پس‌کشیده توجه به جزییات مناسب ناحیه مهار است (anchorage zone). نکات لازم در مورد جزییات این بخش در کتاب آمده است. علاوه بر این در صورتی که سازنده ادوات پس‌کشیدگی مورد استفاده توصیه‌هایی در این زمینه داشته باشند توجه به آنها ضروری است. تهیه نمونه‌های بتن شاهد برای اطمینان کافی در مورد دستیابی به مقاومت مورد انتظار اهمیت فراوانی دارد. علاوه بر این، به عمل آوری مناسب در این مرحله نیز تاکید می‌گردد. هرگونه کم توجهی نسبت به کیفیت بتن در این گام رفتاری، منجر به بروز حوادث و آسیب‌هایی می‌شود که تعمیر یا جبران آن دشوار خواهد بود.

۴-۱۱- نگاهی به ملاحظات مربوط به طرح لرزه‌ای سیستم جانبی در حضور پس‌کشیدگی

به هنگام استفاده از پس‌کشیدگی در دال‌ها لازم است به اثرات آن روی شکل‌پذیری سیستم سازه‌ای انتخابی توجه شود. بررسی اثرات نیروی محوری ناشی از پیش‌تنیدگی حائز اهمیت است. با توجه به اینکه برنامه به صورت اتوماتیک در طراحی برشی و خمشی تیرها یا ستون‌های قاب‌های خمشی اثرات ناشی از پیش‌تنیدگی را در نظر نمی‌گیرد لازم طراح به صورت دستی با بررسی اثر نیروی محوری روی لنگر خمشی محتمل (M_{pr}) یا اسمی (M_n) اثرات آن را روی رفتار عضو بررسی نماید. علاوه بر این و با توجه به اینکه مطابق آیین‌نامه در محل ستون‌ها باید حداقل تعدادی از تاندون‌ها از چشمه اتصال عبور کنند بررسی اثرات حضور آنها روی مقاومت چشمه اتصال ضروری است.

جز اینکه ملاحظات دقیق رفتاری بررسی شده باشد، حتی الامکان باید از عبور کابل از تیرهای قاب‌های خمشی لرزه‌ای خودداری کرد با این حال، آیین‌نامه نکاتی در مورد استفاده از پس‌کشیدگی در تیرهای قاب خمشی ویژه بیان کرده است:

18.6.3.5 Unless used in a special moment frame as permitted by 18.9.2.3, prestressing shall satisfy (a) through (d):

(a) The average prestress f_{pc} calculated for an area equal to the least cross-sectional dimension of the beam multiplied by the perpendicular cross-sectional dimension shall not exceed the lesser of 3.5 MPa and $f'_c/10$.

(b) Prestressed reinforcement shall be unbonded in potential plastic hinge regions, and the calculated strains in prestressed reinforcement under the design displacement shall be less than 0.01.

(c) Prestressed reinforcement shall not contribute more than one-fourth of the positive or negative flexural strength at the critical section in a plastic hinge region and shall be anchored at or beyond the exterior face of the joint.

(d) Anchorages of post-tensioning tendons resisting earthquake-induced forces shall be capable of allowing tendons to withstand 50 cycles of loading, with prestressed reinforcement forces bounded by 40 and 85 percent of the specified tensile strength of the prestressing reinforcement.

مطابق این بند:

۱. مقدار متوسط پیش‌فشار در تیرهای قاب خمشی ویژه نباید از ۳.۵ مگاپاسکال یا ۱۰ درصد مقاومت مشخصه بتن بیشتر باشد.
۲. کابل‌های پیش‌تنیده‌ای که در نواحی محتمل تشکیل مفصل پلاستیک عبور می‌کنند باید از نوع نچسپنده باشند. علاوه بر این کرنش‌های متناظر با جابجایی طرح در این کابل‌ها باید از ۰.۰۱ کمتر شود.
۳. مشارکت کابل‌های پیش‌تنیده در مقاومت خمشی مثبت با منفی در مقاطع بحرانی مربوط به نواحی محتمل تشکیل مفصل پلاستیک نباید از ۲۵ درصد بیشتر باشد. این کابل‌ها باید در وجه دور اتصال مهار شوند.
۴. ادوات مهاری کابل‌های پیش‌تنیده‌ای که نیروی زلزله را تجربه می‌کنند باید حداقل قادر به تحمل ۵۰ سیکل بارگذاری باشند به نحوی که نیروهای ایجاد شده در کابل‌ها در محدوده ۴۰ تا ۸۵ درصد تنش کششی اسمی کابل‌ها باقی بماند.

این الزامات تا حدودی بر اساس مشاهدات عملکرد سازه در زلزله ها تدوین شده است. برای محاسبه پیش فشار متوسط، کمترین بعد مقطع عرضی در تیر، معمولا جان آن است و نباید بال در این محاسبه مشارکت داده شود. در ناحیه بالقوه تشکیل مفصل پلاستیک، محدودیت کرنش و الزام برای تاندون های نچسپنده برای جلوگیری از پارگی تاندون ها تحت تغییر شکل غیر الاستیک زلزله در نظر گرفته شده است. محاسبه کرنش در آرماتور پیش تنیده با در نظر گرفتن مکانیزم غیر الاستیک پیش بینی شده در سازه ضروری است. برای آرماتور پیش تنیده نچسپنده در کل طول تیر، کرنش ها معمولا بسیار پایین‌تر از حد مجاز هستند. برای آرماتور پیش تنیده نچسپنده با طول کوتاه که از داخل یا مجاور چشمه اتصال عبور می‌کند، کرنش اضافی ناشی از تغییر شکل زلزله به صورت حاصلضرب فاصله محور کابل تا محور خنثی و مجموع چرخش های مفصل پلاستیک در چشمه اتصال تقسیم بر طول تاندون نچسپنده محاسبه می شود.

محدودیت های اعمال شده بر مقاومت خمشی ناشی از تاندون ها بر اساس نتایج مطالعات تحلیلی و تجربی صورت گرفته است. گرچه عملکرد مناسب لرزه‌ای ممکن است با مقادیر بیشتر کابل پیش‌تنیده نیز حاصل شود ولی محدودیت‌های اشاره شده برای دستیابی به همان ضریب رفتار و بزرگنمایی تغییرشکلی بیان شده در آیین‌نامه‌ها برای قاب‌های بدون میلگردگذاری پیش‌تنیده، در نظر گرفته شده است. رجوع به نشریات ACI 423.3 و ACI 423.7 پیشنهاد می‌شود.