

بررسی مشکلات تحلیلی دال‌های پس‌کشیده‌ی بتنی به کمک تحلیل اجزای محدود

علیرضا خاوی* (استاد)

محمدرضا جوانمردی (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی عمران: شریف
دوره‌ی ۲، شماره‌ی ۳، ص. ۱۰۹-۱۱۸

طراحی ایمن و اقتصادی همواره مورد توجه محققان قرار گرفته است و به تبع آن آیین‌نامه‌های مختلف در زمینه‌های گوناگون ایجاد شده‌اند. در این میان، آیین‌نامه‌ی ACI 318-2005 تأکید بر قرارگیری دال‌های بتنی پس‌کشیده در ناحیه‌ی ترک‌نخورده دارد (بند ۱۸.۳.۳ آیین‌نامه ACI 318-2005)، به‌گونه‌یی که مقطع کاملاً در حالت انتقال و بهره‌برداری بدون ترک باشد. همچنین دال پس‌کشیده‌ی دوطرفه باید در هر دو راستا، برای 100% بار پس‌کشیده شود و این به معنای یک طرفه در نظر گرفتن رفتار این‌گونه دال‌هاست. در این نوشتار، برای بررسی موارد مذکور، دال‌های پس‌کشیده با دهانه‌های مختلف تحت شدت بارهای گوناگون قرار گرفته و طراحی شده‌اند. سپس دال طراحی‌شده با استفاده از مدل آسیب خمیری همسان‌گرد لی و فنونیز برای بتن و روش اجزای محدود شبیه‌سازی عددی می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی حاکی از عدم برآورده شدن بندهایی از آیین‌نامه‌ی ACI 318-2005 از جمله ترک خوردن دال در حالت انتقال و بهره‌برداری است. همچنین پس‌تنیده‌کردن زیاد سبب ایجاد خیز منفی می‌شود که باعث غیراقتصادی شدن طرح می‌شود.

واژگان کلیدی: دال پس‌کشیده، مدل آسیب خمیری همسان‌گرد، شبیه‌سازی عددی، و روش اجزای محدود.

khaloo@sharif.edu
javanmardi@alum.sharif.edu

۱. مقدمه

استفاده از دال‌های بتن پس‌کشیده‌ی یک‌سره در ساختمان‌ها در کشور، رو به افزایش است و اغلب به دلیل یکسره‌بودن همانند دیگر سازه‌های یکسره باعث کمتر شدن خیز می‌شود. بنابراین، در اعضای یکسره نه فقط از نظر مقاومت بلکه به لحاظ سختی نیز احتیاج به عمق کمتری است. علی‌رغم مزایای ذکر شده، اعضای یکسره دارای معایبی نیز هستند و در بعضی موارد امکان طرح مقرون به صرفه و اقتصادی بتن پس‌کشیده وجود ندارد.^[۱] در نوشتار حاضر، سقف‌هایی با دو دهانه به صورت پس‌کشیده در نظر گرفته شده است و در حین طراحی به کمک آیین‌نامه‌ی ACI 318-2005^[۲] و با هدف اقتصادی‌کردن طرح، دال‌های پس‌کشیده در شرایط انتقال بهره‌برداری و نهایی بررسی شدند.

طبق ضوابط آیین‌نامه‌های موجود، دال‌های بتنی باید برای سه حالت انتقال، بهره‌برداری، و نهایی طراحی شوند. آیین‌نامه‌ی ACI 318-2005 تأکید می‌کند که دال‌های پس‌کشیده‌ی بتنی باید در کلاس U (بدون ترک) آیین‌نامه قرار بگیرند (بند ۱۸.۳.۳) یعنی مقطع کاملاً باید بدون ترک باشد. به علاوه، دال پس‌کشیده باید در هر دو راستا برای 100% بار پس‌کشیده شود و این به معنای این است که رفتار این‌گونه

البته در طراحی دال باید برش سوراخ‌کننده‌ی دال و حالت نهایی دال نیز بررسی شود و در صورت برآورده نشدن ضوابط آیین‌نامه، میلگردهای طولی و برشی لازم تعبیه شود. با توجه به اینکه تغییرمکان دال را می‌توان با نتایج دقیق‌تر تحلیل اجزای محدود بررسی کرد، در اینجا فقط به بررسی ضوابط آیین‌نامه در کنترل تنش‌های کششی و فشاری در دو حالت انتقال و بهره‌برداری می‌پردازیم. در تحلیل مقطع پس‌کشیده از فرضیه‌ی بار معادل استفاده می‌شود. نیروی موجود در تاندون‌ها باعث به‌وجود آمدن یک ممان در کل تیر می‌شود. در روش بار معادل می‌توان به جای این ممان از بار معادلی استفاده کرد که این ممان را در عضو به‌وجود آورده است. براساس این فرضیه نیروی موجود در تاندون‌ها با یک بار به سمت بالا جایگزین می‌شود. با توجه به اینکه

بررسی شدند.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۸۹/۳/۵، اصلاحیه ۱۳۸۹/۷/۲۴، پذیرش ۱۳۸۹/۹/۲

در دال‌ها پروفیل تاندون همانند اعضای یکسره است، مقدار کل نیروی پس‌کشیدگی مؤثر لازم (F_e) برای متعادل کردن بار W برابر است با (رابطه‌های ۱ تا ۳):^[۲]

$$F_e = Wl^2 / 8y \quad (۱)$$

$$N = F_e / F_{se} \quad (۲)$$

$$W_{bal} = 8F_{se}Ny / l^2 \quad (۳)$$

در رابطه‌های ۱ تا ۳، F_{se} نیروی پس‌کشیدگی مؤثر یک تاندون، W بار کل، y بیشینه خیز تاندون، F_e کل نیروی پس‌کشیدگی مؤثر لازم، W_{bal} بار بالانس شده توسط کل تاندون‌ها که معمولاً برابر کل بار مرده در نظر گرفته می‌شود، l طول دهانه و N تعداد تاندون‌هاست. در دال‌های پس‌کشیده معمولاً کل وزن مرده‌ی دال و درصدی از بار زنده به‌وسیله‌ی فولادهای پس‌کشیده متعادل می‌شود (در کلیه‌ی رابطه‌ها، نیروی موجود در تاندون‌ها و میله‌گردها با حروف بزرگ و تنش معادل آن با حروف کوچک نشان داده شده است).

طبق آیین‌نامه تنها روش مجاز برای تحلیل دال‌های پس‌کشیده و پیش‌کشیده، روش قاب معادل است (بند ۱۸.۱۲.۱). پس در ابتدا باید با استفاده از این روش ممان‌های دال در حالت‌های بهره‌برداری، انتقال، و نهایی تعیین شوند و پس از آن به مقایسه‌ی تنش‌های به‌وجودآمده در مقطع در حالت‌های مختلف با مقادیر مجاز آیین‌نامه‌ی برداریم. در نهایت، با استفاده از یک مدل آسیب خمیری همسان‌گرد برای بتن، به شبیه‌سازی عددی دال‌های طراحی شده با استفاده از روش اجزای محدود می‌پردازیم. مدل آسیب خمیری می‌تواند تأثیر رشد و گسترش ریز عیوب و خرابی را در کنار رفتار خمیری ماده در نظر گیرد و استفاده از این‌گونه مدل‌ها در شبیه‌سازی عددی رفتار موادی نظیر بتن که ترک‌خوردگی و خرابی در آن‌ها نقش مهمی را ایفا می‌کند، می‌تواند به شبیه‌سازی بهتر ماده بیانجامد.

۲. روش قاب معادل

برای تعیین لنگرهای بهره‌برداری، انتقال و نهایی دال پس‌کشیده، آیین‌نامه‌ی ACI 318-20^[۳] توصیه به استفاده از روش قاب معادل دارد. در این روش قاب‌ها به صورت زیرقاب و مجزا در نظر گرفته می‌شوند و طراحی فقط برای بارهای ثقلی و با توجه به سختی اعضای قاب صورت می‌گیرد. بدین منظور باید سختی در اعضای مختلف این قاب (ستون‌ها، اعضای پیچشی، و دال‌ها) تعیین شود و پس از آن با استفاده از روش پخش ممان، ممان‌های موجود در دال محاسبه شود.^[۲]

۳. تحلیل دال‌های پس‌کشیده در حالت انتقال

حالت انتقال در سازه‌های بتنی پیش‌کشیده و پس‌کشیده، حالتی است که در آن نیروی تاندون‌ها (F_t) برابر با $0.9 F_{pj}$ نیروی جک‌زدن (F_{pj}) است (رابطه‌ی ۴)، و همچنین وزن مرده‌ی دال در محاسبه‌ی لنگرهای تکیه‌گاهی در نظر گرفته می‌شود. سایر بارها (بارهای زنده و روسازی) در این مرحله از تحلیل در نظر گرفته نمی‌شوند.^[۲]

$$F_t = 0.9 F_{pj} \quad (۴)$$

نیروی جک‌زدن در سازه‌های پس‌کشیده تقریباً برابر است با:^[۲]

$$F_{pj} = 0.9 F_{pu} \quad (۵)$$

که در رابطه‌ی ۵، F_{pu} مقاومت کششی مشخصه‌ی فولاد پس‌کشیدگی است. بیشینه‌ی تنش‌ها در حالت انتقال از رابطه‌های ۶ و ۷ به دست می‌آیند (بند ۱۸.۴.۱):

$$\text{تنش در دورترین تار فشاری} \quad (۶) \quad 0.6 f'_{ci}$$

$$\text{تنش در دورترین تار کششی} \quad (۷) \quad 0.25 \sqrt{f'_{ci}}$$

که در رابطه‌های ۶ و ۷، f'_{ci} مقاومت اولیه بتن است و تقریباً برابر $0.7 f'_c$ و f'_c مقاومت نهایی بتن در فشار است.^[۵-۳]

۴. تحلیل دال‌های پس‌کشیده در حالت بهره‌برداری

حالت بهره‌برداری حالتی است که در آن کلیه‌ی بارها بدون ضریب (مرده، زنده و روسازی) و نیروی پس‌تندگی با در نظر گرفتن کلیه‌ی افت‌ها در سازه وجود دارد. این نیرو که نیروی پس‌تندگی مؤثر (F_{se}) نامیده می‌شود از رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید:^[۲]

$$F_{se} = 0.75 F_{pj} \quad (۸)$$

بیشینه‌ی تنش‌ها در حالت بهره‌برداری از رابطه‌های ۹ و ۱۰ به دست می‌آیند (بند ۱۸.۳.۳ و ۱۸.۴.۲):

$$\text{تنش در دورترین تار فشاری} \quad (۹) \quad 0.45 f'_c$$

$$\text{تنش در دورترین تار کششی} \quad (۱۰) \quad 0.62 \sqrt{f'_c}$$

۵. طراحی دال‌های پس‌کشیده در حالت نهایی

تحلیل سقف پس‌کشیده در حالت نهایی برای بارهای ضریب‌دار به کمک بلوک معادل مشابه اعضای بتن‌آرمه، و با در نظر داشتن بیشینه‌ی مقادیر لنگرهای منفی در ابتدا و انتهای هر دهانه برای بارهای ضریب‌دار انجام می‌شود. بارهای ضریب‌دار طبق آیین‌نامه از رابطه‌ی ۱۱ محاسبه می‌شوند:^[۲]

$$W_u = 1.2 W_D + 1.6 W_L \quad (۱۱)$$

در تحلیل این دال‌ها با دو نوع ممان روبرو هستیم: ممان‌های اولیه و ثانویه. ممان‌های اولیه (M_1) برابر با نیروی پس‌کشیدگی مؤثر در خروج از مرکزیت تاندون است (رابطه‌ی ۱۲). ممان‌های ثانویه (M_2) از کم‌کردن ممان‌های بالانس شده که از طریق بار W_{bal} به‌وجود آمده‌اند، از ممان اولیه به دست می‌آیند (رابطه‌ی ۱۳):^[۲]

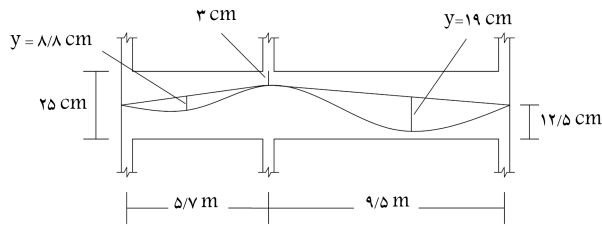
$$M_1 = F_{se} \times e \quad (۱۲)$$

$$M_{bal} = M_1 + M_2 \Rightarrow M_2 = M_{bal} - M_1 \quad (۱۳)$$

پس از تعیین ممان‌های ثانویه، ممان‌های به‌وجودآمده بر اثر بار با ضریب W_u را محاسبه می‌کنیم و آن را M_{tot} می‌نامیم و دال را باید برای ممان M_u (رابطه‌ی ۱۴) طراحی کنیم:^[۲]

$$M_u = M_{tot} - M_2 \quad (۱۴)$$

M_u لنگر ضریب‌دار مقطع است. همچنین مشخص است که در طراحی دال‌ها در تکیه‌گاه‌ها، ممان طراحی در بر ستون در نظر گرفته می‌شود و طبق آیین‌نامه می‌توان سهم نوار ستونی را ۷۵٪ ممان کل در نظر گرفت. پس از محاسبه‌ی نیروی موجود در



شکل ۲. پروفیل تاندون‌ها در راستای محور x در مثال ۱.

۱۸۸/۶	۱۸۸/۶	۱۰۸/۱	۱۰۸/۱
۱۲۱/۳		۲۰۲/۳	۱۲۱/۳

شکل ۳. مقادیر سختی در نوار ستونی دال و ستون‌ها (10^6 N/mm^2).

۰/۵۲	۰/۳۱	۰/۱۸	۰/۳۸
------	------	------	------

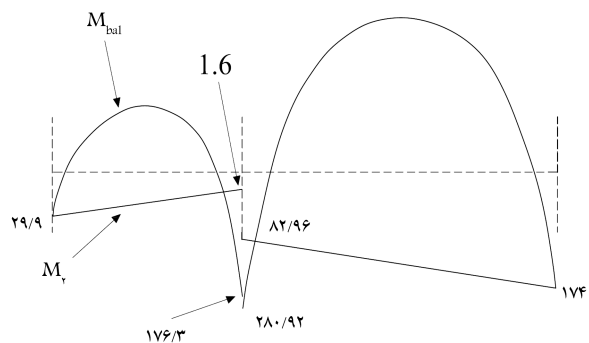
شکل ۴. مقادیر ضرایب پخش.

$W_{bal} = 35/9 \text{ kN/m}$			
۰/۵۲	۰/۳۱	۰/۱۸	۰/۳۸
۲۹/۹۵	۱۷۶/۳	۲۸۰/۹۲	۱۷۴

شکل ۵. لنگرهای منفی تکیه‌گاهی در حالت بهره‌برداری.

$W_1 = 9/45 \text{ kN/m}$			
۰/۵۲	۰/۳۱	۰/۱۸	۰/۳۸
۸/۰۷	۴۷/۵۱	۷۵/۷	۴۶/۹

شکل ۶. لنگرهای مثبت تکیه‌گاهی در حالت انتقال.



شکل ۷. دیاگرام لنگر بار معادل دال پس کشیده (kN.m).

در جدول ۲ نیز مقادیر ممان‌های ضریب‌دار، ممان‌های اولیه و ثانویه و ممان‌های طراحی دال آورده شده است. در جدول ۲، در کاربری مسکونی از ۱۵ تاندون و در کاربری پارکینگ از ۱۹ تاندون استفاده شده است.

خلاصه‌ی نتایج تحلیل و طراحی در جدول ۳ آورده شده است. مقادیر مجاز تنش کششی و فشاری بیشینه نیز برای بتن با مقاومت 50 MPa در جدول ۴ آورده شده است.

کنترل برش سوراخ‌کننده‌ی دال نیز مطابق ضوابط آیین‌نامه چک شده است و دال ضوابط آیین‌نامه را رعایت می‌کند. با توجه به اینکه در جهت دیگر نیز باید به

فولادهای پس کشیدگی به محاسبه‌ی ممان نهایی مقطع می‌پردازیم^[۲] و در نهایت باید نسبت لنگر ضریب‌دار مقطع به لنگر اسمی مقطع، کوچک‌تر از ضریب کاهش مقاومت آیین‌نامه شود.

۶. طراحی دال‌های پس کشیده براساس آیین‌نامه

حال به طراحی چند دال با دهانه‌های مختلف تحت بارگذاری‌های گوناگون (دو کاربری مسکونی و پارکینگ) می‌پردازیم.

۱.۶. مثال ۱

پلان این دال میانی در شکل ۱ نشان داده شده است. ارتفاع ستون‌ها $3/5$ متر و ضخامت دال را با توجه به رابطه‌ی $L/45$ ، 250 میلی‌متر در نظر گرفته‌ایم. مشخصات مصالح مصرفی در جدول ۱ آورده شده است. پروفیل تاندون‌ها در راستای محور x در شکل ۲ نشان داده شده است.

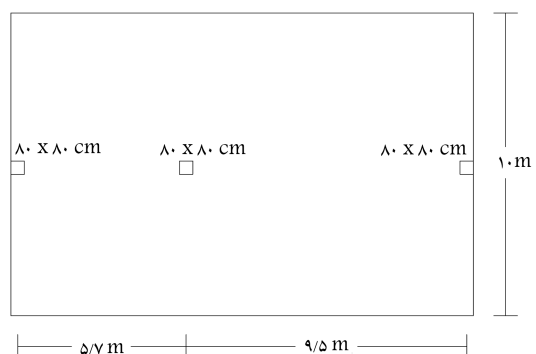
برای پس کشیده کردن از فولادهای پس کشیدگی رتبه‌ی 270 با سطح مقطع 140 mm^2 استفاده می‌کنیم.

حال به محاسبه‌ی سختی اعضای قاب معادل می‌پردازیم. مقادیر سختی در نوار ستونی دال و ستون‌ها در شکل ۳ و مقادیر ضرایب پخش دال‌های قاب معادل نیز در شکل ۴ آورده شده‌اند. برای تحلیل از روش پخش ممان استفاده می‌کنیم و مقادیر لنگرهای منفی تکیه‌گاهی بهره‌برداری با استفاده از ۱۵ تاندون در حالتی که کاربری مسکونی باشد در شکل ۵ و مقادیر لنگرهای مثبت تکیه‌گاهی با استفاده از همین مقدار تاندون در حالت انتقال در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. مشخص است که در حالت انتقال به دلیل عدم وجود بارهای زنده و قسمتی از بار مرده، در تکیه‌گاه لنگر مثبت به وجود می‌آید.

ممان متعادل شده در کنار ممان‌های ثانویه با استفاده از ۱۵ تاندون در حالتی که کاربری مسکونی باشد، در شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح مصرفی در مثال ۱.

عضو	f'_c Mpa	f_y Mpa	f_{pu} Mpa	F_{pu} kN	F_{pz} kN	F_{se} kN
دال	50	400	1890	26476	1852	139
ستون	70	400	-	-	-	-



شکل ۱. پلان مثال ۱.

جدول ۲. مقادیر ممان‌های ضریب‌دار، ممان‌های اولیه و ثانویه و ممان‌های طراحی دال در مثال ۱.

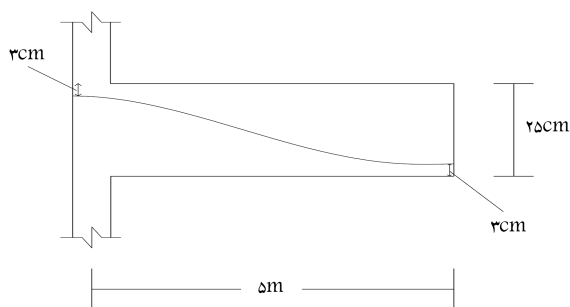
کاربری	نوع لنگر	تکیه‌گاه سمت راست	تکیه‌گاه میانی	تکیه‌گاه میانی	تکیه‌گاه سمت چپ
پارکینگ	ممان ضریب‌دار	۷۰,۶۴۶۸	۴۱۵,۹۴۸۷	۶۶۲,۶۴۲۷	۴۱۰,۵۸۳۲
	ممان اولیه	۰,۰	۲۵۰,۷۴	۲۵۰,۷۴	۰,۰
	ممان ثانویه	۳۷,۹۳۶۹۵	-۲۷,۳۷۹۴	۱۰۵,۰۹۴	۲۲۰,۴۸۰۹
	ممان طراحی در مرکز ستون	۳۲,۷۰۹۸۵	۴۴۳,۳۲۸۱	۵۵۷,۵۴۸۷	۱۹۰,۱۰۲۲
	ممان طراحی در بر ستون	۱۵,۷۰۰۷۳	۴۲۵,۵۹۴۹	۵۳۵,۲۴۶۸	۱۶۴,۲۴۸۳
	سهم نوار ستونی ٪۷۵	۱۱,۷۷۵۵۵	۳۱۹,۱۹۶۲	۴۰۱,۴۳۵۱	۱۲۳,۱۸۶۲
مسکونی	ممان ضریب‌دار	۴۹,۲۴۳	۲۸۹,۹۲۹۱	۶۴۱,۸۸۲۴	۲۸۶,۱۸۹۱
	ممان اولیه	۰,۰	۱۹۷,۹۵	۱۹۷,۹۵	۰,۰
	ممان ثانویه	۲۹,۹۵۰۲۲	۱,۶۱۵۳	۸۲,۹۶۸۹۲	۱۷۴,۰۶۳۹
	ممان طراحی در مرکز ستون	۱۹,۲۹۲۷۸	۲۸۸,۳۰۹۱	۳۷۸,۹۱۳۵	۱۱۲,۱۲۵۲
	ممان طراحی در بر ستون	۹۶,۸۷۶۲۱	۲۷۶,۷۷۶۷	۲۹۹,۰۸۲۶	۹,۲۶۰۵۳۴
	سهم نوار ستونی ٪۷۵	۷۲,۶۵۷۱۶	۲۰۷,۵۸۲۶	۲۲۴,۳۱۲	۶,۹۴۵۴

جدول ۳. خلاصه‌ی نتایج تحلیل و طراحی در راستای محور X در مثال ۱.

بارگذاری	تعداد تاندون‌ها	بار مرده kN/m^2	بار زنده kN/m^2	بیشترین تنش کششی در انتقال (MPa)	بیشترین تنش فشاری در انتقال (MPa)	بیشترین تنش کششی در بهره‌برداری (MPa)	بیشترین تنش فشاری در بهره‌برداری (MPa)	میلگرد معمولی در حالت نهایی
مسکونی	۱۵	۷,۴	۲,۰	۰,۰	۶,۱۱	۲,۲	۸,۰۲	۱۲Φ۱۲
	۱۸	۷,۴	۲,۰	۰,۵	۷,۳	۰,۰	۵,۳	۱۲Φ۱۲
پارکینگ	۱۸	۷,۴	۵,۰	۰,۵	۷,۳	۳,۰	۸,۷	۱۲Φ۱۲
	۱۹	۷,۴	۵,۰	۰,۹۲	۸,۲	۲,۳۴	۸,۴	۱۲Φ۱۲

جدول ۴. مقادیر مجاز تنش کششی و فشاری (MPa).

تنش مجاز	انتقال	بهره‌برداری
کششی	۱,۵	۴,۴
فشاری	۲۱	۲۲,۵



شکل ۸. پروفیل تاندون در نصف دهانه در راستای محور Y.

۲.۶. مثال ۲

پلان این دال میانی در شکل ۹ نشان داده شده است. ارتفاع ستون‌ها ۳/۵ متر و ضخامت دال را با توجه به اینکه دال در هر دو جهت دهانه‌ی بلندی دارد و تنش‌ها قطعاً بیش از حالت قبل می‌شود، ۳۲۰ میلی‌متر در نظر می‌گیریم. مشخصات مصالح مصرفی در جدول ۱ آورده شده است. پروفیل تاندون‌ها در هر دو راستا

همین‌گونه طراحی شود و اینکه آیین‌نامه و راهنمای آن هیچ اشاره‌ی به دو طرفه در نظر گرفتن رفتار این دال‌ها ندارد، دال را در جهت دیگر نیز به همین صورت طراحی می‌کنیم. از بیان خلاصه‌ی محاسبات صرف‌نظر و فقط نتایج طراحی را بیان می‌کنیم که این نتایج در جدول ۵ آورده شده است. نتایج مربوط به عرض مؤثر دال در طراحی ستون وسط (۷/۳ متر از دال) است. پروفیل تاندون در نصف دهانه در راستای محور Y در شکل ۸ نشان داده شده است. با داشتن این جزئیات در بخش‌های بعدی به مدل‌سازی رایانه‌ی این ماده می‌پردازیم و مناسب بودن ضوابط آیین‌نامه را بررسی می‌کنیم.

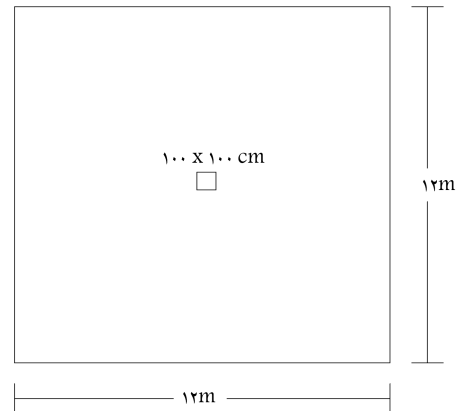
جدول ۵. خلاصه‌ی نتایج تحلیل و طراحی در راستای محور Y در مثال ۱.

بارگذاری	تعداد تاندون‌ها	بار مرده kN/m^2	بار زنده kN/m^2	بیشترین تنش کششی در انتقال (MPa)	بیشترین تنش فشاری در انتقال (MPa)	بیشترین تنش کششی در بهره‌برداری (MPa)	بیشترین تنش فشاری در بهره‌برداری (MPa)	میلگرد معمولی در حالت نهایی
مسکونی	۲۳	۷٫۴	۲٫۰	۰٫۰	۶٫۰	۲٫۵	۷٫۸۸	۱۶Φ۱۲
پارکینگ	۲۸	۷٫۴	۵٫۰	۱٫۴	۹٫۳۸	۴٫۳۲	۱۰٫۸	۲۸Φ۱۲

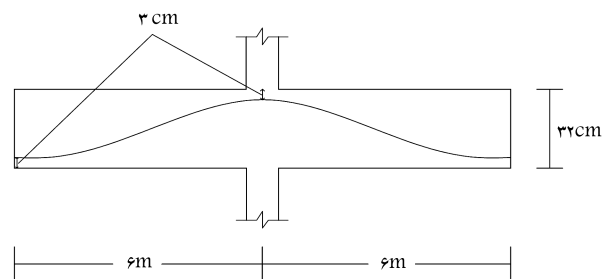
۷. شبیه‌سازی عددی دال پس‌کشیده‌ی بتنی

در شبیه‌سازی عددی مقاطع بتنی علاوه بر مشکلات ذاتی بتن مثل خزش، پیچیده بودن رفتار و... با مسئله‌ی تماس بین میلگرد و فولاد نیز روبرو هستیم. این مسئله در مورد فولادهای پس‌کشیده بسیار مهم است و باید شبیه‌سازی خوبی از این تماس صورت گیرد تا بتوان در شبیه‌سازی کامپیوتری رفتار واقعی‌تری از این اعضا را مشاهده کرد.

لذا با توجه به حجم بالای محاسبات و اینکه در نمونه‌های بتنی لازم است تعداد المان به مراتب بیشتری نسبت به نمونه‌های فولادی استفاده شود، این شبیه‌سازی‌ها را با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS انجام می‌دهیم. ایده‌ی استفاده‌ی هم‌زمان از مدل‌های خمیری و خرابی در قالب تعریف سطوحی مجزا برای هر کدام، در گذشته تحقیق و بررسی شده است،^[۴-۶] و بسیاری تلاش شده تا کاربرد این توابع در بررسی رفتار بتن گسترش یابد.^[۷-۹] توابع خمیری به‌تنهایی قادر به نشان دادن ضعف ایجاد شده در مصالح ناشی از ترک‌خوردگی نیستند و در مقابل توابع خرابی نیز قادر به نشان دادن کرنش‌های برگشت‌ناپذیر در مصالح نیستند، بنابراین مدلی مناسب برای رفتار بتن که بتواند به‌طور هم‌زمان تغییرات سختی کشسانی مصالح و کرنش‌های برگشت‌ناپذیر را در مصالح مدل‌سازی کند، باید از ترکیب مدل‌های خرابی و خمیری تشکیل شده باشد که این مدل‌ها به مدل‌های آسیب خمیری معروف‌اند. در این نوشتار، برای شبیه‌سازی بتن از مدل آسیب خمیری همسان‌گرد لی و فنوینیز استفاده می‌شود. در این مدل از دو پیکربندی مختلف استفاده می‌کنیم. پیکربندی با خرابی که مشخصات واقعی ماده مانند تنش و کرنش و مدول کشسانی و ضریب پواسون... واقعی ماده را نشان می‌دهد و در اینجا بدون (-) نشان داده می‌شود. پیکربندی دیگر، پیکربندی فرضی است که در آن مشخصات ماده مانند: تنش و کرنش و مدول کشسانی و ضریب پواسون و... با صرف‌نظر کردن از تأثیر عیوب ذاتی و یا رشدیافته‌ی حین بارگذاری ماده تعریف می‌شوند که به آن پیکربندی بدون خرابی می‌گوییم و در اینجا با علامت (-) نشان داده می‌شود.



شکل ۹. مثال ۲.



شکل ۱۰. پروفیل تاندون‌ها در هر دو راستا در مثال ۲.

مشابه و در شکل ۱۰ نشان داده شده است. برای پس‌کشیده کردن از رشته فولادهای پس‌کشیدگی رتبه‌ی ۲۷۰ با سطح مقطع 140 mm^2 استفاده می‌کنیم. خلاصه‌ی نتایج تحلیل و طراحی در جدول ۶ آورده شده است. مقادیر مجاز تنش کششی و فشاری بیشینه نیز برای بتن با مقاومت ۵۰ مگاپاسکال در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به اینکه دال در هر دو طرف متقارن است، در هر دو راستا از نتایج طراحی جدول ۶ استفاده می‌کنیم.

جدول ۶. خلاصه‌ی نتایج تحلیل و طراحی در مثال ۲.

بارگذاری	تعداد تاندون‌ها	بار مرده kN/m^2	بار زنده kN/m^2	بیشترین تنش کششی در انتقال (MPa)	بیشترین تنش فشاری در انتقال (MPa)	بیشترین تنش کششی در بهره‌برداری (MPa)	بیشترین تنش فشاری در بهره‌برداری (MPa)	میلگرد معمولی در حالت نهایی
مسکونی	۴۸	۹٫۰۸	۲٫۰	۰٫۰	۵٫۴۲	۲٫۸۸	۸٫۰۹	۳۴Φ۱۲
پارکینگ	۵۸	۹٫۰۸	۵٫۰	۱٫۳۴	۸٫۹	۴٫۲	۱۰٫۵	۴۲Φ۱۲

۱.۷. مدل خمیری لی و فنونینز

این مدل که ابتدا در سال ۱۹۸۹ ارائه [۱۳] و در سال ۱۹۹۸ تکمیل شد؛ [۱۴] در برنامه‌ی اجزای محدود ABAQUS استفاده می‌شود و دارای سطح تسلیمی به صورت زیر است:

$$F = \frac{1}{1-\alpha} (\alpha \bar{I}_1 + \sqrt{3} \bar{J}_2 + \beta H(\bar{\sigma}_{\max})) - \bar{c}_k = 0 \quad (15)$$

در رابطه‌ی ۱۵، α و β ضرایب ثابت بی‌بعد، H معرف تابع هوپساید، $\bar{\sigma}_{\max}$ تنش اصلی بیشینه و \bar{c}_k چسبندگی است که در دو حالت کششی و فشاری متفاوت است. \bar{I}_1 نامتغیر اول تنش و \bar{J}_2 نامتغیر دوم تنش انحرافی است و با رابطه‌های ۱۶ و ۱۷ تعریف می‌شوند:

$$\bar{I}_1 = \bar{\sigma}_{11} + \bar{\sigma}_{22} + \bar{\sigma}_{33} \quad (16)$$

$$\bar{J}_2 = \frac{1}{6} [(\bar{\sigma}_{11} - \bar{\sigma}_{22})^2 + (\bar{\sigma}_{11} - \bar{\sigma}_{33})^2 + (\bar{\sigma}_{22} - \bar{\sigma}_{33})^2] + \sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2 \quad (17)$$

شکل این سطح تسلیم در فضای تنش‌های اصلی در شکل ۱۱ آورده شده است. تابع پتانسیل خمیری (F^P) در مدل‌های بتنی برخلاف فلزات باید حتماً غیروابسته باشد تا بتواند رفتار بتن و مواد دانه‌ی را به خوبی نشان دهد. در این مدل از تابع پتانسیل خمیری دراکر پراگر استفاده می‌شود.

$$F^P = \sqrt{3} \bar{J}_2 + \alpha_p \bar{I}_1 \quad (18)$$

و کرنش خمیری به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial F^P}{\partial \bar{\sigma}} = \frac{\bar{S}_{ij}}{\sqrt{3} \bar{J}_2} + \alpha_p \delta_{ij} \quad (19)$$

$$\dot{\varepsilon}^P = \dot{\lambda} \frac{\partial F^P}{\partial \bar{\sigma}} \quad (20)$$

در رابطه‌های ۱۸ الی ۲۰، α_p ضریب انبساط ماده است. پارامتر α_p به‌گونه‌ی انتخاب می‌شود که انبساط مصالح بتنی بین ۰٫۲ تا ۰٫۳ به دست آید. \bar{S}_{ij} تنش انحرافی، $\dot{\lambda}$ از شرط سازگاری به دست می‌آید و نرخ تغییرات جزئی کرنش خمیری است.

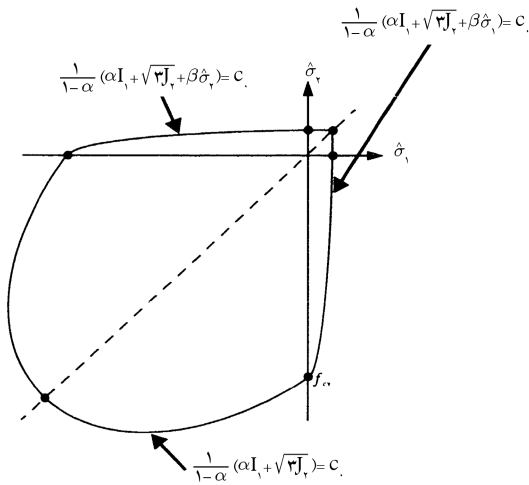
۲.۷. مدل خرابی لی و فنونینز

برای نشان دادن خرابی رابطه‌های زیر بین تنش در دو پیکربندی ارائه شده‌اند:

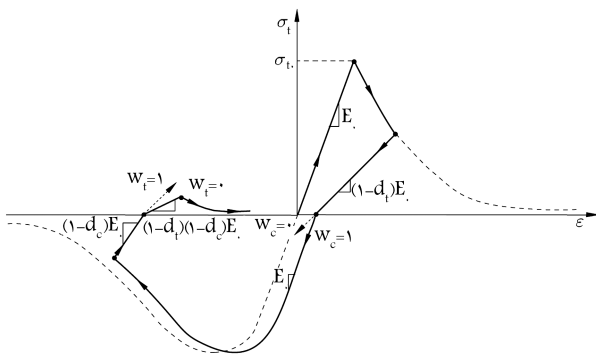
$$\sigma = [1 - D_k] \bar{\sigma} \quad (21)$$

$$D_k = 1 - (1 - d_c)(1 - (1 - w_k)d_t) \quad (22)$$

در این رابطه‌ها، D_k پارامتر خرابی معادل، d_c و d_t به ترتیب پارامتر خرابی فشاری و کششی و w_k پارامتر سخت‌شوندگی مجدد است که در حالتی که ماده از تنش فشاری به تنش کششی وارد شود برابر ۰٫۷ ($w_t = 0$) ماده ترک می‌خورد و نمی‌تواند تنش کششی تحمل کند) و در حالتی که ماده از تنش کششی به تنش فشاری وارد شود برابر ۱٫۰ ($w_c = 1$) ترک‌ها بسته می‌شود و ماده می‌تواند تنش فشاری تحمل کند) است. شکل ۱۲ حالات مختلف پارامتر w_k را در تست تک‌محوره نشان می‌دهد. از نتایج آزمایشگاهی مشخص می‌شود که با افزایش کرنش، پارامتر خرابی در ماده افزایش پیدا می‌کند. در بارگذاری‌های متناوب، به دلیل باز و بسته شدن مکرر ترک‌ها، مکانیزم افزایش پارامتر خرابی سریع‌تر می‌شود.



شکل ۱۱. سطح تسلیم در فضای تنش‌های اصلی. [۱۴]



شکل ۱۲. حالات مختلف پارامتر w_k در تست تک‌محوره.

محاسبه‌ی پارامترهای خرابی فشاری و کششی (d_c و d_t) در حالت کلی مشکل است. محققانی از جمله لی و فنونینز معادلاتی را برای به دست آوردن این پارامترها در کرنش‌های مختلف بیان کرده‌اند. همچنین در سال ۲۰۰۸ نشان داده شد که از رابطه‌های ۲۳ و ۲۴ می‌توان این پارامترها را به دست آورد: [۱۵]

$$d_c = 1 - \exp(-a_c \varepsilon^P) \quad (23)$$

$$d_t = 1 - \exp(-a_t \varepsilon^P) \quad (24)$$

که در این رابطه‌ها، a_c و a_t با کالیبره کردن پارامتر خرابی کششی و فشاری در تست تک‌محوره‌ی کششی و فشاری و با توجه به کرنش خمیری بیشینه به دست می‌آیند.

$$d_c |_{\varepsilon^P = \varepsilon_{c, \max}^P} = 1 \quad (25)$$

$$d_t |_{\varepsilon^P = \varepsilon_{t, \max}^P} = 1 \quad (26)$$

این مدل آسیب خمیری دارای توانایی بالایی در شبیه‌سازی عددی رفتار بتن تحت بارگذاری‌های سه محوره و متناوب است. فولادها و تاندون‌ها به صورت تک محوره و با توجه به مقاومت نهایی‌شان مدل می‌شوند. با استفاده از توانایی نرم‌افزار ABAQUS در ثابت نگه داشتن تنش اولیه در تاندون‌ها (PRESTRESS HOLD) می‌توان پس‌کشیدگی در تاندون‌ها را به خوبی شبیه‌سازی کرد. [۱۶، ۱۷]

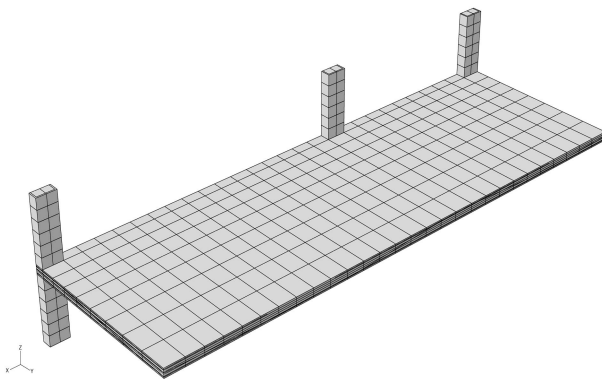
۸. شبیه‌سازی عددی مثال ۱

پلان این دال در شکل ۱ نشان داده شده است. مقاومت نهایی مصالح مصرفی در جدول ۱ آورده شده است و ضرایب ثابت بتن برای شبیه‌سازی عددی در جدول ۷ آورده شده است. همچنین تعداد تاندون‌ها و میلگردها در هر دو راستا در جدول ۳ و ۵ آورده شده‌اند.

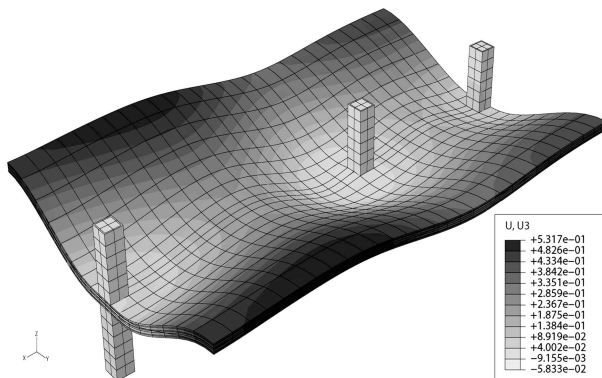
شبیه‌سازی برای کاربری پارکینگ و با استفاده از ۱۹ تاندون که در راستای محور x انجام شده است، را به صورت المان‌های محوری ۳ گره‌یی در نظر می‌گیریم. با توجه به اینکه دال به صورت پس‌کشیده اجرا می‌شود، ابتدا نیرو در درون تاندون‌ها را ثابت در نظر می‌گیریم تا تاندون‌ها با بتن به تعادل برسند. در این حالت مقدار نیرو در تاندون‌ها را برابر حالت انتقال در نظر می‌گیریم. پس از آن افت‌های به‌وجودآمده در درازمدت را در نظر می‌گیریم و نیروی موجود در تاندون‌ها را برابر حالت بهره‌برداری در نظر می‌گیریم و در انتها بار را به صورت تدریجی وارد می‌کنیم. این بار شامل بار زنده و روسازی سازه است. در شکل ۱۳ مش‌بندی دال و نمایی کلی از آن نشان داده شده است. در شکل ۱۴، تغییرمکان در حالت انتقال نشان داده شده و مشخص است که خیز مثبت (رو به بالا) در این دال در حالت انتقال حدود ۰٫۵۳ سانتی‌متر است. خرابی در زیر دال که در شکل ۱۵ نمایش داده شده است، مشخص می‌سازد که خرابی در قسمت زیرین تکیه‌گاه‌ها به‌وجود می‌آید. البته مقدار خرابی بسیار ناچیز است و بیشینه در حدود ۰٫۲ است، ولی فرض آیین‌نامه در مورد بدون ترک بودن مقطع در این حالت برآورده نمی‌شود. در شکل ۱۶، نیز تغییرمکان این دال در حالت بهره‌برداری آورده شده است. در قسمت‌های بسیاری از دال خیز هنوز مثبت است و این نشان می‌دهد که مقدار پس‌کشیدگی بیش از مقدار لازم است، چون با وجود وارد شدن تمام بار زنده‌ی پارکینگ (۵ مگاپاسکال) و تمام بار مرده و وزن خود دال هنوز تغییرمکان منفی (رو به پایین) به ۰٫۴۷ سانتی‌متر می‌رسد که بسیار کمتر از مقدار مجاز آیین‌نامه است. و این نشان‌دهنده‌ی پس‌کشیدگی زیاد در هر دو راستاست. در نهایت، در شکل ۱۷ خرابی در حالت بهره‌برداری آورده شده است که باز هم فرض آیین‌نامه در مورد بدون ترک بودن این دال‌ها در حالت بهره‌برداری رعایت نمی‌شود و خرابی در این حالت به حدود ۰٫۹ می‌رسد. البته این خرابی در قسمت بسیار کوچکی اتفاق می‌افتد و تأثیر زیادی بر روی سازه ندارد، ولی فرض آیین‌نامه مبنی بر بدون ترک ماندن دال در هیچ‌کدام از دو حالت انتقال و بهره‌برداری رعایت نمی‌شود.

جدول ۷. ضرایب ثابت بتن برای شبیه‌سازی عددی.

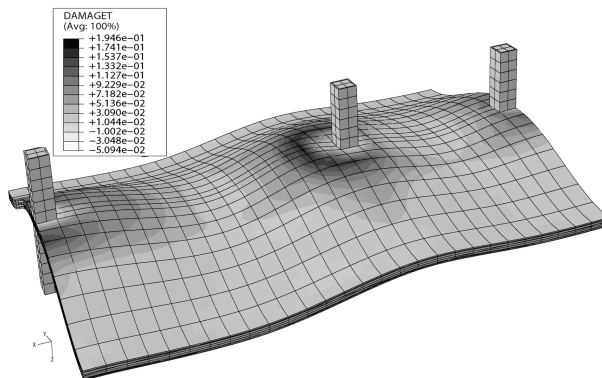
مقدار	مشخصات بتن
۳۸٫۸	E مدول یانگ اولیه (GPa)
۰٫۲	ν ضریب پواسون
۵۰	f'_c مقاومت نهایی فشاری (MPa)
۴٫۹	f'_t مقاومت نهایی کششی (MPa)
۰٫۲	α_p ضریب اتساع
۰٫۱۲	α ثابت ماده در سطح تسلیم
۷٫۷	β ثابت ماده در سطح تسلیم
۰٫۰۰۷۶	$\epsilon_{c,max}^p$ کرنش گسیختگی فشاری بتن
۰٫۰۰۰۹	$\epsilon_{t,max}^p$ کرنش گسیختگی کششی بتن



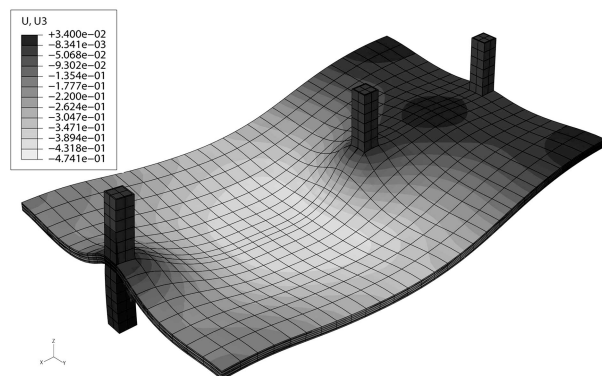
شکل ۱۳. مش‌بندی و نمای کلی از دال مثال ۱.



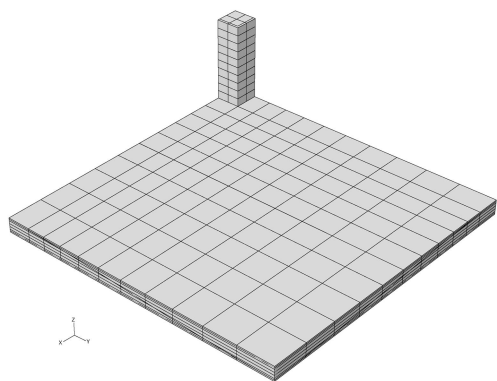
شکل ۱۴. تغییرمکان در حالت انتقال.



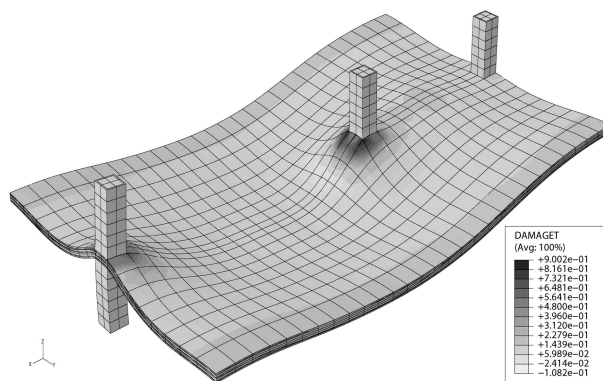
شکل ۱۵. خرابی در زیر دال در حالت انتقال.



شکل ۱۶. تغییرمکان در حالت بهره‌برداری.



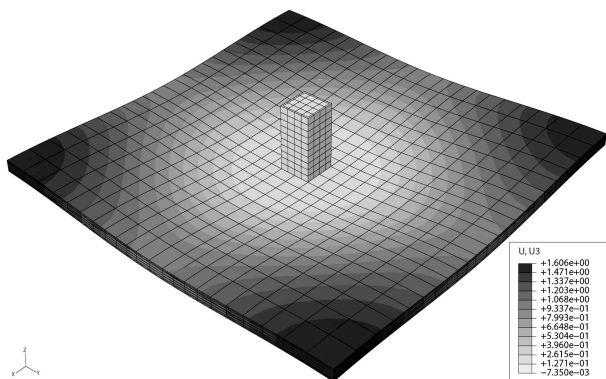
شکل ۱۸. نمای کلی از دال و مش‌بندی مثال ۲.



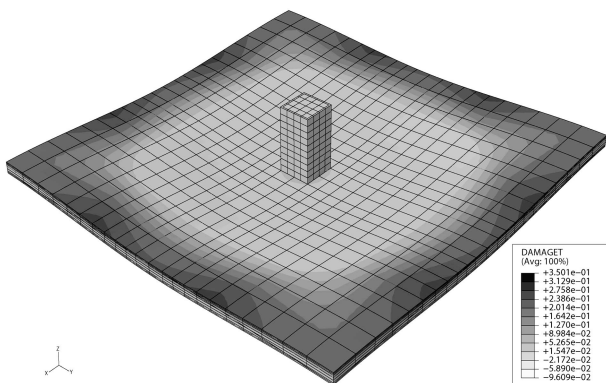
شکل ۱۷. خرابی در حالت بهره‌برداری.

۹. شبیه‌سازی عددی مثال ۲

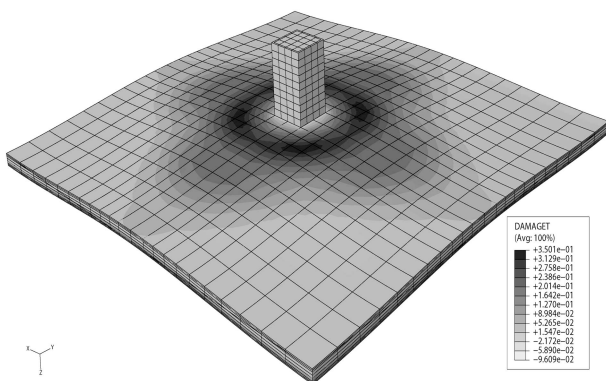
پلان این دال میانی در شکل ۹ نشان داده شده است. مشخصات مصالح مصرفی در جدول و ضرایب ثابت بتن برای شبیه‌سازی عددی در جدول ۷ و همچنین تعداد تاندون‌ها و میلگردها در هر دو راستا در جدول ۶ آورده شده و شبیه‌سازی برای کاربری پارکینگ انجام شده است. نحوه‌ی بارگذاری این مسئله مشابه مثال قبل است. با توجه به تقارن دال در هر دو جهت یک چهارم این دال تجزیه و تحلیل عددی می‌شود. در آنالیز عددی این دال برای بتن از المان‌های درجه بالای ۲۰ گره‌ی سرزندیست استفاده می‌کنیم و فولادها را به صورت المان‌های محوری ۳ گره‌ی در نظر می‌گیریم. شکل ۱۸ نمای کلی از دال و مش‌بندی نمونه را نشان می‌دهد. در شکل ۱۹ تغییرمکان در این حالت انتقال نشان داده شده است. مشخص است که خیز مثبت (رو به بالا) در این دال در حالت انتقال حدود ۱/۶ سانتی‌متر است که بسیار زیاد می‌باشد. مقداری خرابی در قسمت زیرین در مجاورت تکیه‌گاه‌ها و قسمت بالای دال در وسط دهانه به وجود می‌آید، خرابی در روی دال در شکل ۲۰ و در زیر دال در شکل ۲۱ نمایش داده شده است (در حالت انتقال). البته مقدار بیشینه‌ی خرابی در حدود ۰/۳۵ است که بسیار ناچیز است، ولی فرض آیین‌نامه در مورد بدون ترک بودن مقطع در این حالت و در این دال نیز برآورده نمی‌شود. در شکل ۲۲ نیز تغییرمکان این دال در حالت بهره‌برداری آورده شده است. در تمام قسمت‌های دال خیز هنوز مثبت است و این نشان می‌دهد که مقدار پس‌کشیدگی بیش از مقدار لازم است، چون با وجود وارد شدن تمام بار زنده‌ی پارکینگ (۵ مگا پاسکال) و تمام بار مرده و وزن خود دال هنوز تغییرمکان در دال مثبت (رو به بالا) است و مقدار آن به ۰/۶۰۷ سانتی‌متر می‌رسد. در این مثال بیشترین نکته مشخص می‌شود که پس‌کشیده‌کردن این دال‌ها در هر دو جهت غیراقتصادی است. در نهایت، در شکل ۲۳ خرابی در زیر دال در حالت بهره‌برداری آورده شده است که باز هم فرض آیین‌نامه در مورد بدون ترک بودن این دال‌ها در حالت بهره‌برداری رعایت نمی‌شود و خرابی در این حالت به حدود ۰/۴۸ می‌رسد. البته این خرابی در قسمت بسیار کوچکی اتفاق می‌افتد و تأثیر زیادی بر روی سازه ندارد، ولی فرض آیین‌نامه مبنی بر بدون ترک ماندن دال همانند مثال قبل در هیچ‌کدام از دو حالت انتقال و بهره‌برداری رعایت نمی‌شود (بند ۱۸.۳.۳). با توجه به اینکه مقدار پس‌کشیدگی در دال فوق بیش از مقدار مورد نیاز است حال به تجزیه و تحلیل همین دال با همین مشخصات با استفاده از تاندون‌های ضعیف‌تر می‌پردازیم. سطح مقطع تاندون‌ها و فاصله‌ی آن‌ها را به گونه‌ی انتخاب می‌کنیم که معادل درصدی از پس‌کشیدگی کل شود. در جدول ۸، مقایسه‌ی بین طراحی برای پس‌کشیدگی با تاندون‌هایی با سطح مقطع‌های مختلف انجام شده است.



شکل ۱۹. تغییرمکان در حالت انتقال.



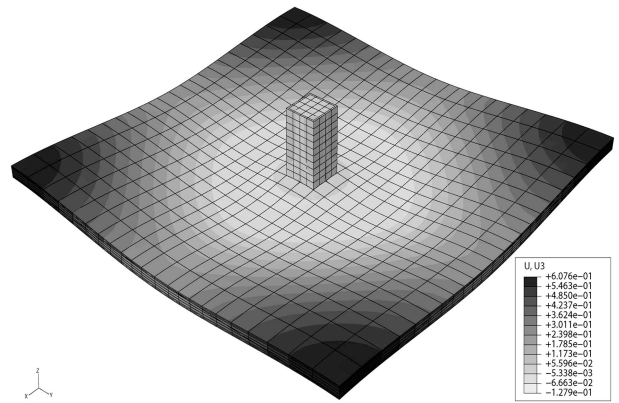
شکل ۲۰. خرابی در روی دال در حالت انتقال.



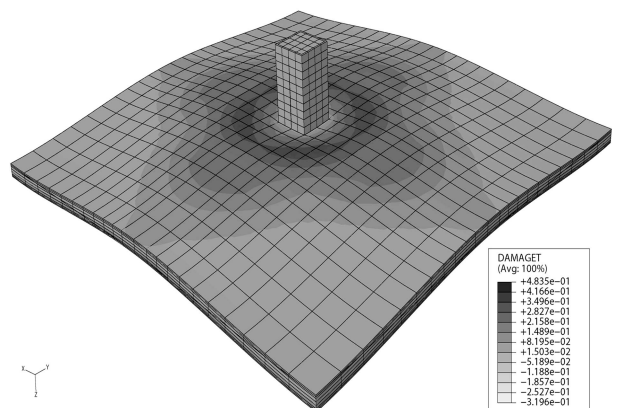
شکل ۲۱. خرابی در زیر دال در حالت انتقال.

چنان‌که مشاهده می‌شود، بهترین حالت برای پس‌کشیدگی ۷۰٪ اتفاق می‌افتد، چون خیز دال مناسب و بیشینه‌ی خرابی نیز ۶۲٪ است. نتایج این حالت را در اشکال ۲۴ الی ۲۶ بررسی و با پس‌کشیدگی برای ۱۰۰٪ بار در هر جهت مقایسه می‌کنیم. در شکل ۲۴، تغییرمکان در حالت انتقال نشان داده شده است. مشخص است که خیز مثبت (رو به بالا) در این دال در حالت انتقال حدود ۵۹٪ سانتی‌متر است که مناسب‌تر از حالت قبل است. خرابی در زیر دال در شکل ۲۵ نمایش داده شده است. البته مقدار خرابی کمتر از حالت قبل است و بیشینه در حدود ۱۴٪ است. تغییرمکان این دال در حالت بهره‌برداری در تمام قسمت‌های دال خیز منفی است و این نشان می‌دهد که مقدار پس‌کشیدگی مناسب است، چون با وجود وارد شدن تمام بار زنده‌ی پارکینگ (۵ مگاپاسکال) و تمام بار مرده و وزن خود دال تغییرمکان در دال منفی (رو به پایین) است و مقدار آن به ۵۱۶٪ سانتی‌متر می‌رسد که مقدار مناسبی است و کمتر از مقادیر مجاز آیین‌نامه است. در این مثال نیز این نکته مشخص می‌شود که پس‌کشیده‌کردن این دال‌ها در هر دو جهت برای ۱۰۰٪ بار غیراقتصادی است و می‌توان با پس‌کشیده‌کردن مقدار کمتری از بار (در این مثال ۷۰٪) نتایج خوبی به دست آورد.

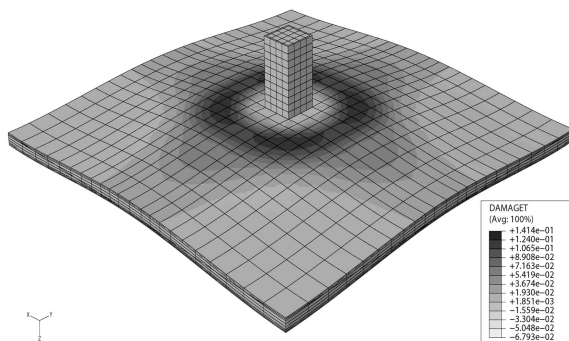
در نهایت، در شکل ۲۶ خرابی در روی دال در حالت بهره‌برداری آورده شده است که باز هم فرض آیین‌نامه در مورد بدون ترک بودن این دال‌ها در حالت بهره‌برداری رعایت نمی‌شود و خرابی در این حالت به حدود ۶۲٪ می‌رسد. البته این خرابی در قسمت بسیار کوچکی اتفاق می‌افتد و تأثیر زیادی بر روی سازه ندارد، ولی فرض آیین‌نامه مبنی بر بدون ترک ماندن دال همانند مثال‌های قبلی در هیچ‌کدام از دو حالت انتقال و بهره‌برداری رعایت نمی‌شود (بند ۱۸.۳.۳). خرابی در زیر دال بسیار ناچیز است و از نمایش آن صرف‌نظر کرده‌ایم. مشاهدات عینی اجرای چندین ساختمان در تهران که در آن‌ها از دال‌های پس‌کشیده استفاده شده است، نیز حاکی از اجرای دال‌های دوطرفه‌ی پس‌کشیده است و معمولاً در پس‌کشیده‌کردن دال‌ها برای کاهش



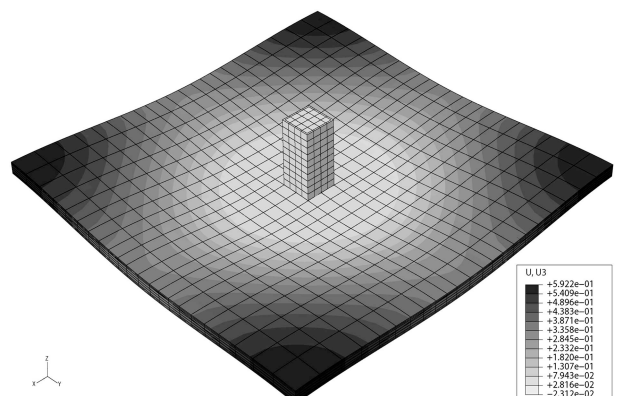
شکل ۲۲. تغییرمکان در حالت بهره‌برداری.



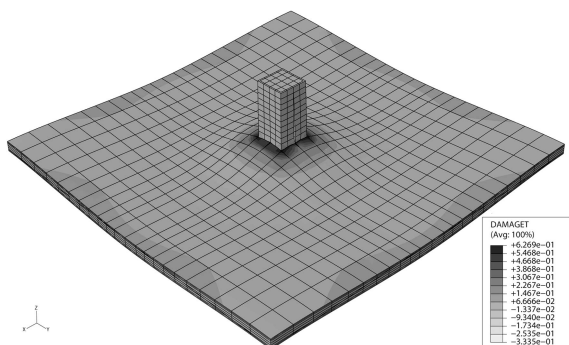
شکل ۲۳. خرابی در زیر دال در حالت بهره‌برداری.



شکل ۲۵. خرابی در زیر دال در حالت انتقال.



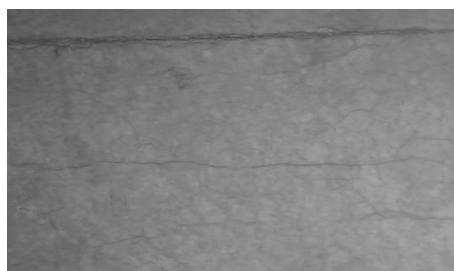
شکل ۲۴. تغییرمکان در حالت انتقال.



شکل ۲۶. خرابی در روی دال در حالت بهره‌برداری.

جدول ۸. مقایسه‌ی بین طراحی برای پس‌کشیدگی با تاندون‌هایی با سطح مقطع‌های مختلف.

پس‌کشیدگی	۱۰۰٪	۹۰٪	۸۰٪	۷۰٪	۶۰٪
خرابی در انتقال	۰٫۳۵	۰٫۳۱	۰٫۲۱	۰٫۱۴	۰٫۰۴
تغییرمکان در انتقال	۱٫۶	۱٫۱۵	۰٫۸۶	۰٫۵۹	۰٫۲
خرابی در بهره‌برداری	۰٫۴۸	۰٫۵۳	۰٫۵۸	۰٫۶۲	۰٫۹۲
تغییرمکان در بهره‌برداری	۰٫۶۱	۰٫۲۴	-۰٫۲۷	-۰٫۵۱	-۱٫۱۲



شکل ۲۷. نمایی از وقوع ترک با عرض زیاد در دال سقف پس‌کشیده‌ی دوطرفه قبل از بهره‌برداری سازه.

در طراحی دال به صورت پس‌کشیده، فرض فوق تا حدودی در خلاف جهت اطمینان است. بدین معنی که طبق تعریف باید دال پس‌کشیده در هر دو جهت برای 100% بار پس‌کشیده شود. در این صورت با پس‌کشیده کردن دال در دو جهت و طراحی آن به روش بار معادل، تاندون‌های پس‌کشیدگی هر کدام یک نیرو به سمت بالا به دال وارد می‌کنند. بدین ترتیب بر اثر پس‌کشیدگی در جهت عرض دال یک بار عمود بر دال و به سمت بالا به وجود می‌آید و به همین ترتیب بر اثر پس‌کشیدگی در جهت طول دال یک بار عمود بر دال و به سمت بالا به وجود می‌آید. در این صورت در حالت انتقال و در موقعی که بار زنده‌ی زیادی برای سازه لحاظ شود، پس‌کشیدگی بیش از حد باعث ترک خوردگی مقطع در حالت انتقال (نبود بار زنده) می‌شود.

در این نوشتار سعی شده است چند دال پس‌کشیده براساس آیین‌نامه طراحی شوند. سپس با استفاده از مدل آسیب خمیری همسان‌گرد برای شبیه‌سازی رفتار مصالح بتنی، دال‌ها با روش اجزای محدود تحلیل شده‌اند و این نتایج مشاهده شده است:

۱. فرض آیین‌نامه مبنی بر بدون ترک ماندن دال (بند ۱۸.۳.۳) در هیچ‌کدام از دو حالت انتقال و بهره‌برداری رعایت نمی‌شود. نتایج شبیه‌سازی عددی و مشاهدات عینی ساختمان‌های در حال اجرا نشان می‌دهد که دال در حالت انتقال و بهره‌برداری ترک می‌خورد.

۲. در آیین‌نامه، دال‌ها در هر جهت به زیرنوارهایی تقسیم می‌شوند و نوارهای طراحی به صورت یک طرفه برای 100% بار طرح می‌شوند و این عمل در دال‌های پس‌کشیده باعث خیز معکوس و در خلاف جهت اطمینان است.

۳. براساس نتایج به دست آمده در شبیه‌سازی اجزای محدود، طراحی برای حالتی که 70% بار در هر راستا پس‌کشیده شود و بقیه‌ی بار با میلگردهای معمولی به تعادل برسد، مناسب‌تر از طراحی برای حالتی است که 100% بار در هر راستا پس‌کشیده شود.

خیز از تاندون‌های زیادی استفاده می‌شود و طبق آیین‌نامه برای 100% بار در هر دو راستا پس‌کشیده می‌شود. این امر منجر به ترک خوردن مقطع در حالت انتقال است. همچنین مشاهدات عینی و بادقت اجرای سقف‌های پس‌کشیده‌ی دو طرفه در کشور، دلالت بر وقوع ترک‌های با عرض بیش از یک میلی‌متر قبل از بهره‌برداری از سازه است که بسیار بیش از حد مجاز آیین‌نامه‌هاست. در شکل ۲۷، نمایی از وقوع ترک با عرض زیاد در دال سقف پس‌کشیده‌ی دوطرفه قبل از بهره‌برداری سازه آورده شده است.

۱۰. نتیجه‌گیری

در آیین‌نامه‌ها برای طراحی دال‌های بتن مسلح (غیر پس‌کشیده)، دال‌ها در هر جهت به زیرنوارهایی تقسیم می‌شوند و نوارهای طراحی به صورت یک طرفه طرح می‌شوند. این خود حاکی از دست‌بالا در نظر گرفتن طراحی دال‌ها در روش‌های مستقیم و قاب معادل است. چون کل بار w بین چهار طرف دال تقسیم می‌شود، نمی‌توان 100% بار را یک بار به نوار جهت طول و بار دیگر به نوار جهت عرض دال تقسیم کرد. حال

منابع (References)

- Maghsoudi, A.R. and Javanmardi, M.R., Analytical Problems of Post-tensioned Concrete slabs in initial and service Condition, 4th National congress on Civil engineering, Tehran University (2008).
- ACI318-2005, *Building Code Requirements for Structural Concrete*, American Concrete Institute (2005).
- NOTES ON ACI318-2002, *Building Code Requirements for Structural Concrete*, American Concrete Institute (2002).
- Nilson, A.H., *Design of Prestressed Concrete*, Second Edition (1987).
- Khaloo, A.R., *Design of Prestressed Concrete Structures*, Sineh Sorkh Publication (2004).
- Kachanov, L.M., "On rupture time under condition of creep", *Izvestia Akademi Nauk USSR, Otd. Techn. Nauk*, Moskwa, **8**, pp. 26-31 (1958).
- Rabotnov, Y.N., *On the Equations of State for Creep*, In: Progress in Appl. Mech.-The Prager Anniversary Volume, MacMillan, New York, pp. 307-315 (1963).
- Lemaitre, J., "A continuous damage mechanics model for ductile fracture", *Journal Engineering Mat. Tech.*, **107**, pp. 83-89 (1985a).
- Lemaitre, J. "Coupled elasto-plasticity and damage constitutive equations", *Comp. Meth. Appl. Mech. Engineering*, **51**, pp.31-49 (1985b).
- Lemaitre, J. and Chaboche, J.L. "Mechanics of solid materials", Cambridge University Press, London (1990).
- Voyiadjis, G.Z.; Taqieddin, Z.N. and Kattan, P.I. "Anisotropic damage-plasticity model for concrete", *International Journal Plasticity*, **24**(10), pp. 1946-1965 (2008).
- Yazdani, S. and Schreyer, H.L. "Combined plasticity and damage mechanics model for plain concrete", *Journal Engineering Mech. ASCE*, **116**(7), pp. 1435-1450 (1990).
- Lublimer, J.; Oliver, J.; Oller, S. and Onate, E. "A plastic damage model for concrete," *International Journal of Solids and Structures*, **25**(3), pp. 299-326 (1989).
- Lee, J. and Fenves, G.L. "A plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures", *Journal Engineering Mech., ASCE*, **124**(8), pp. 892-900 (1998).
- Koh, C.G.; Teng, M.Q. and Wee, T.H. "A plastic-damage model for lightweight concrete and normal weight concrete", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **2**(2), pp. 123-136 (2008).
- ABAQUS Theory Manual, version 6.8.1, SIMULIA (2008).
- Tandler, J. "Collapse analysis of externally prestressed structures", BoD-Books on Demand (2009).