

یادداشت فنی

بررسی رفتار غیرخطی عرشه پلهای بتن آرمه به کمک روش اجزای محدود*

علی خیرالدین، دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

علیرضا مرتضایی، دانشجوی دکتری سازه، عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان، سمنان، ایران

E-mail: kheyroddin@semnan.ac.ir

چکیده

در بسیاری از موارد ضرورت توسعه ایجاب می‌کند که از یک مسیر برای بارهای سنگین‌تر و سرعت بیشتر استفاده شود. در بررسی قابلیت مسیر برای عبور بارهای جدید، پلهای یکی از بخشهای مهم‌اند که برای تعیین مقاومت باقیمانده آنها علاوه بر مشخصات اسمی باید مسائلی مانند گذشت زمان، توزیع طولی و عرضی بار را در نظر گرفت. همچنین به دلیل تغییر در استانداردهای طراحی و افزایش حجم ترافیک و بارها، درصد زیادی از پلهای قدیمی به بهسازی نیاز دارند. اغلب گزینه انتخاب بین ساخت یک پل جدید و بهسازی نمونه‌های جدید اغلب مشکل است. بنابراین یک عامل اساسی در تصمیم‌گیری، داشتن اطلاعات کافی درباره رفتار عرشه و مقاومت پل است. در این مقاله به بررسی رفتار غیرخطی عرشه پلهای بتن آرمه پرداخته شده و اثرات افزایش مقاومت خمشی و شکل‌پذیری این گونه پلهای که ناشی از عمل قوسی (اثر غشایی فشار) است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این راستا، از روش اجزای محدود غیرخطی استفاده شده و نتایج تحلیل نشان می‌دهند که تیرهای T شکل با بال تحت فشار مقاومت و شکل‌پذیری بیشتری نسبت به تیرهای مستطیل دارند. همچنین به دلیل شرایط انتهایی تیرها که سبب ایجاد نیروی فشاری در دال می‌شود (اثر غشایی فشار)، مقاومت و سختی سازه افزایش می‌یابند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل غیرخطی، عرشه پلهای بتن آرمه، شکل‌پذیری، بال‌فشاری، اثر غشایی فشار

۱. مقدمه

مشخص شود. همچنین به دلیل تغییر استانداردهای طراحی، افزایش حجم ترافیک و بارها، درصد زیادی از پلهای قدیمی نیاز به بهسازی دارند. در این راستا، اغلب انتخاب گزینه‌ای بین ساخت یک پل جدید و مقاوم‌سازی نمونه‌های موجود وابسته به بررسی رفتار دقیق غیرخطی پل، مقاومت و شکل‌پذیری عناصر متشکله آن است. متأسفانه پاسخ غیرخطی و غیرالاستیک، مشخصه‌های باز توزیع بار و مقاومت نهایی پلهای چند دهانه را نمی‌توان به طور واقعی و با استفاده از روندهای معمول و ساده موجود در طراحی ارزیابی کرد. پیش‌بینی این رفتار، نهایتاً نیازمند آزمایش‌های گسترده

پل‌ها از سازه‌های بسیار مهم و شریانی در زیر ساختار آبادانی هر کشورند. این سازه‌ها به دلیل اهمیت ارتباطات در راهها بسیار مورد توجه بوده و همانند سایر سازه‌ها سابقه تحقیقاتی بسیاری دارند. توسعه حمل و نقل ریلی در بسیاری از موارد ایجاب می‌کند که بهره‌برداری از یک مسیر موجود برای بارهای سنگین‌تر و نیز سرعت بیشتر صورت گیرد.

در این میان بررسی قابلیت مسیر برای عبور بارهای جدید ضروری است. در بررسی یک مسیر، پلهای یکی از بخشهایی هستند که باید با دقت مورد مطالعه قرار گیرند و ظرفیت باقیمانده آنها

آزمایشگاه مورد آزمون قرار گرفته بود، مجدداً به کمک روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت.

دال بتن آرمه مورد آزمایش ۲/۳۱ متر طول، ۱/۳۸ متر عرض و ۱۹۱ میلی‌متر ضخامت داشت. این دال در قسمت فوقانی و تحتانی مسلح شده بود. بار به صورت گسترده در مساحتی به اندازه 610×406 میلی‌متر در مرکز دال وارد می‌شد و به منظور تعیین تغییرشکل دال، کرنش سنجهایی در دو راستای طولی و عرضی به آرماتورهای فوقانی و تحتانی و همچنین به سطوح فوقانی و تحتانی بتن متصل شده بودند. به دلیل آن که دال در دو راستا متقارن بود، فقط امکان مدل کردن ۱/۴ فایل موجود داشت. تغییرشکل دال، توزیع تنش، ترک‌خوردگی و شروع آن، سه نتیجه مهم بودند که از مدل به دست آمدند و با مقادیر حاصل از نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند.

نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که ترکهای خمشی، ابتدا در بار ۷۷ کیلونیوتن شکل گرفتند. این ترکها به طور جانبی همراه با افزایش بار در دو جهت X, Y تشکیل شدند (عرض ترکهای راستای X بزرگتر بودند) در حالی که مدل اجزای محدود شروع ترک خوردگی را در بار ۸۰ کیلونیوتن نشان داد که میزان خطای آن نسبت به نتایج آزمایشگاهی در حدود ۴ درصد بود.

شکل ۱، پیش‌بینی تحلیلی تنش بتن را در سطوح فوقانی و تحتانی دال در دو جهت طولی و عرضی در مرکز دال نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج، بیشینه تنش فشاری طولی در سمت فوقانی دال برابر ۲۷/۶ مگاپاسکال پیش‌بینی شد. بیشینه تنش اندازه‌گیری شده برابر ۲۸/۹ مگاپاسکال گزارش شد. با وجود این، بیشینه تنش فشاری عرضی پیش‌بینی شده توسط مدل تقریباً ۱۳/۸ مگاپاسکال و بیشینه تنش فشاری عرضی اندازه‌گیری شده تقریباً ۲۰/۳ مگاپاسکال بود.

شکل ۲، تنش محوری در فولادهای طولی را به کمک مدل المان محدود پیش‌بینی شده نمایش می‌دهد. تنش کششی در لایه تحتانی به سرعت افزایش یافته و به حدود ۲۰۰ کیلونیوتن می‌رسد که نشان می‌دهد زمانی که بتن ترک می‌خورد، فولاد درصد بیشتری از تنش را تحمل می‌کند. همزمان با افزایش بار، محور خنثی از فولاد تحتانی دور شده و تنش محوری به طور فزاینده‌ای افزایش می‌یابد.

یا روشهای تحلیلی پیشرفته است. در بیشتر حالات، روشهای تحلیلی نسبت به آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی اقتصادی‌ترند و به زمان کمتری نیاز دارند. علاوه بر مطالعاتی که درباره رفتار مواد صورت گرفته، مطالعات زیادی در مورد ارزیابی ظرفیت باربری و دیگر مشخصه‌های پلها نیز صورت گرفته است. این بررسی‌ها و مطالعات نشان دادند که بسیاری از سازه‌ها، ظرفیت باربری بیشتری نسبت به ظرفیتی که آئین نامه تعیین می‌کند، دارند.

۲. اهداف

این تحقیق شامل مدلهای اجزاء محدود غیرخطی است که به منظور بررسی رفتار غیرخطی عرشه پلهای بتن‌آرمه از برنامه غیرخطی لایه‌ای اجزای محدود NONLACS2 استفاده شده و برنامه‌های آزمایشگاهی موجود نیز به منظور بررسی صحت عملکرد مدلهای اجزای محدود بکار رفته‌اند. هدف اولیه این مقاله، تعیین یک روش آسان، مطمئن و دقیق برای تحلیل عرشه پلهای بتن‌آرمه است. هدف دوم، تعیین توزیع تنش و کرنش در طول عرشه پلهای بتن‌آرمه و بررسی رفتار غیرخطی اعم از مقاومت و شکل‌پذیری و عواملی است که سبب افزایش باربری و اضافه مقاومت این گونه عرشه‌ها می‌شوند.

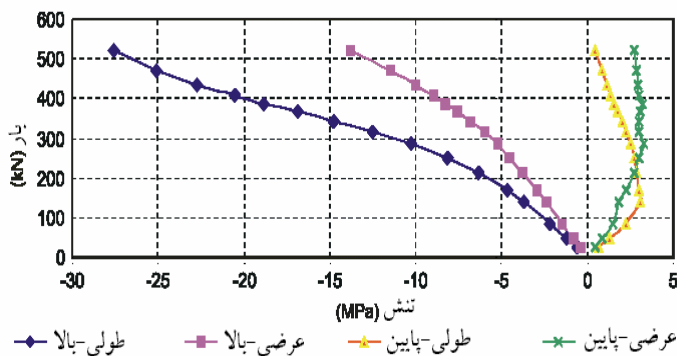
۳. بررسی صحت برنامه

بررسی توانایی برنامه NONLACS2 در پیش‌بینی رفتار مواد در حالت الاستیک با مقایسه نتایج تحلیل دستی یک تیر با نتایج رایانه‌ای و در حالت غیرکشان به کمک مقایسه نتایج تحلیلی و پاسخهای اندازه‌گیری شده دو آزمایش انجام شد. در هر حالت، اشکال مختلفی از خروجی‌ها اعم از تغییرشکل، تنشها، کرنشها، مقاومت نهایی، مقاومت حد ترک‌خوردگی، الگوی ترک‌خوردگی و غیره استخراج و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. اگر چه پراکندگی‌هایی مشاهده شد، اما در حالت کلی انطباق خوبی بین مدلهای تحلیلی و تستهای آزمایشگاهی برقرار بود.

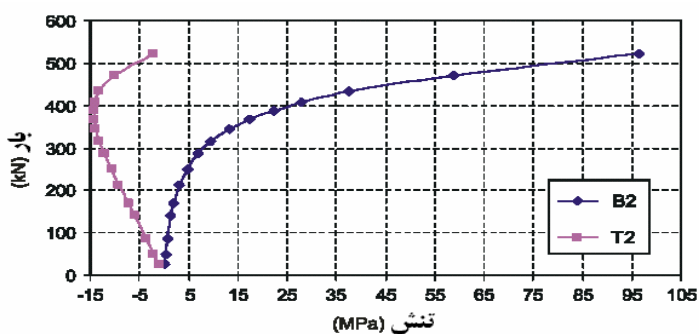
۳-۱ دال دوطرفه با تکیه‌گاههای ساده [گرادی (Graddy)

و همکاران ۱۹۹۵]

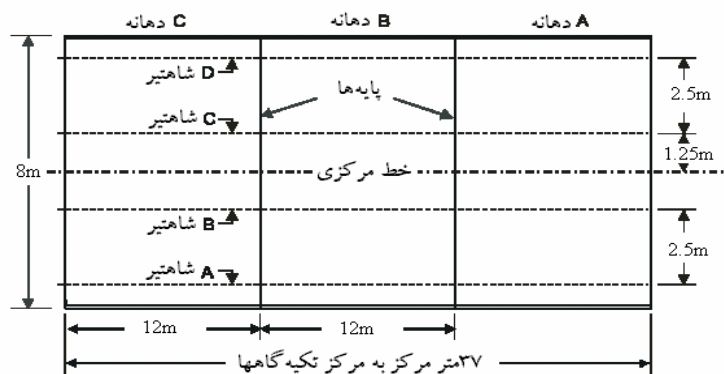
یک دال دوطرفه با تکیه‌گاههای ساده که تحت اثر بارهای ثقلی قرار داشت و توسط گرادی و همکاران [۱] در سال ۱۹۹۵ در



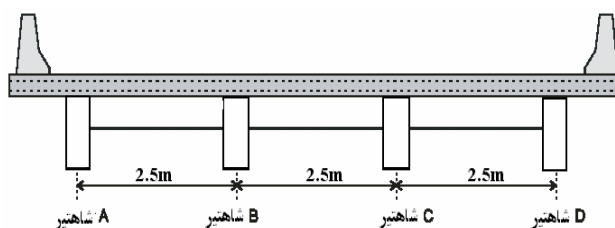
شکل ۱. تنشهای تحلیلی برای سطوح فوقانی و تحتانی بتن



شکل ۲. نتایج تحلیلی برای تنشهای فولاد



شکل ۳. نمایی از پلان پل



شکل ۴. سطح مقطع پل

۴. مدل اجزای محدود پل واقعی

۴-۱ توصیف پل

سازه انتخاب شده برای تحلیل غیرخطی یک پل سه دهانه پیوسته است. هر دهانه دارای ۱۲ متر طول و ۸ متر عرض است. عرشه بتن آرمه به کمک ۴ شاه تیر با فواصل ۲٫۵ متر نگه داشته می‌شود. برای راحتی کار، تیرها از A تا D نامگذاری شدند. شکل ۳ نمایی از پلان عرشه را نمایش می‌دهد که در آن ابعاد و فاصله شاه تیرها آورده شده است. دهانه‌ها از راست به چپ با A الی C نامگذاری شده‌اند. عرشه پل با بتن درجا دارای فولاد طولی و عرضی در قسمت فوقانی و تحتانی است. از آنجا که بتن ریزی شاه تیرها و دال پل به طور همزمان انجام می‌شود. بنابراین شاه تیرهای مزبور تحت اثر خمش به صورت مقطع T شکل عمل می‌کنند. شکل ۴، سطح مقطع پل شامل شاه تیرها، دیافراگم‌ها و جان پناه‌ها را نشان می‌دهد. شاه تیرها به ارتفاع ۸۰۰ میلی‌متر و عرض ۵۰۰ میلی‌متر می‌باشند. دیافراگم‌ها درگیرنده مقاطع با ابعاد ۳۵۰×۳۵۰ میلی‌مترند که در دهانه بین شاه تیرها متصل شده‌اند و دیافراگم‌ها در وسط دهانه و در نزدیکی هر تکیه گاه قرار گرفته‌اند. جان پناه‌ها در هر طرف مسیر واقع شده و از بتن درجا ساخته شده‌اند.

۴-۲ مشخصات مدل

برای ساده کردن مدل و راحتی کار، فرضیاتی پذیرفته شدند. از شیب ۱/۴ درصدی عرشه پل چشم پوشی شد و موازی صفحه X-Y در نظر گرفته شد. ضخامت متوسط عرشه برابر ۲۵۰ میلی‌متر فرض شد و محل فولاد در طول عرشه ثابت در نظر گرفته شد. مدل شامل ۵۲۱۱ المان بود که از المانهای ایزوپارامتریک ۴ نقطه ای نوع RQUAD4 برای مدل کردن اجزا استفاده شد. هندسه عرشه به گونه‌ای بود که اندازه‌های المان در راستای عرضی تقریباً ۲۹۰ میلی‌متر و در راستای طولی تقریباً ۲۵۰ میلی‌متر بودند. بعد عرضی به منظور اطمینان از این که گره‌ها در مش‌بندی عرشه در راستای گره‌های شاه تیر قرار گیرند، متغیر بود. با طول ۳۷ متر و عرض کل ۸ متر، مشهای عرشه شامل ۲۸ ردیف و ۱۴۴ آلمان بودند.

۴-۳ بارگذاری

بارگذاری شامل بارهای فشاری وارد به المانهای عرشه بود. مقادیر بارها، منطبق بر باری بود که توسط یک کامیون چند محور

طبق آیین نامه بارگذاری پلها (نشریه شماره ۱۳۹ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور) [۲] به پل وارد می‌شد. وزن کلی کامیون ۴۰۰ کیلو نیوتن در نظر گرفته شد و بارها به گونه‌ای توزیع شدند که محور جلوی کامیون ۲۰ درصد کل بار را تحمل کند و بقیه وزن توسط دو محور انتهایی تحمل شود.

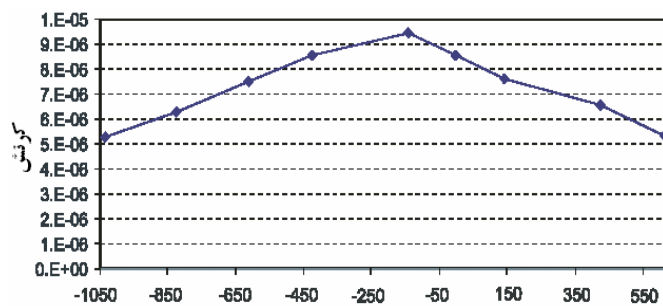
۴-۴ نتایج تحلیل غیرخطی

۴-۴-۱ تحلیل تنش و کرنش در تیرها

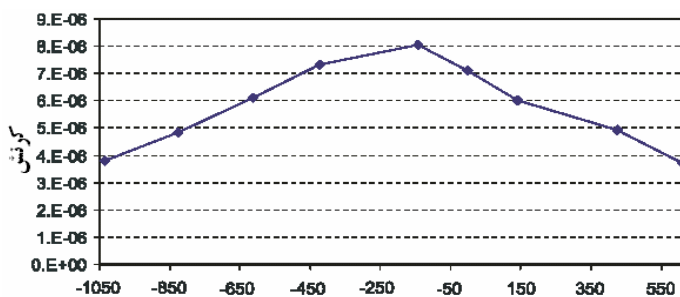
تنشهای قائم و افقی در شاه تیرها و عرشه پل که در طول نوار عرضی، در وسط دهانه و در ۱/۴ طول دهانه ارایه شده، رفتار کلی مدل پل به ویژه توزیع تنشهای فشاری و کششی در عرشه را نمایش می‌دهند. همان گونه که انتظار می‌رفت ناحیه‌ای از پل که در زیر محورهای انتهایی کامیون قرار داشت، بیشترین تغییر شکل را تحمل کرد. با توجه به شکل ۴، این ناحیه تقریباً به فاصله ۱/۴ طول دهانه از تکیه‌گاه A و بر روی شاه تیر C اتفاق افتاد و نوار عرضی نیز در این فاصله انتخاب شد. شکلهای ۵ و ۶ به ترتیب توزیع کرنش کششی و فشاری را در طول نوار عرضی نشان می‌دهند. همان‌گونه که از شکل مشخص است، بخشی از شاه تیر C که دقیقاً در زیر محور انتهایی کامیون قرار دارد، دارای بیشترین کرنش کششی است. سطح کرنش سپس کاهش یافته تا در محل تکیه‌گاه (پایه‌های پل) فشاری شده و سپس در دهانه‌های B, C قابل چشم پوشی است. این مشاهده‌ها، پاسخ مورد انتظار شاه تیر را در نزدیکی بار تأیید می‌کنند.

۴-۴-۲ اثر غشایی فشار^۱ (اثر قوسی)

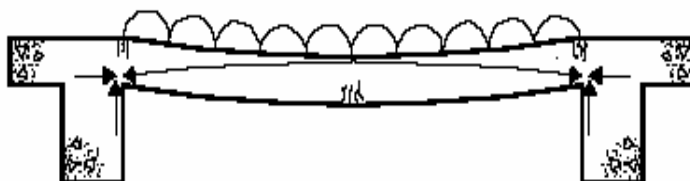
وجود اثر غشایی فشار از نیمه اول قرن بیستم شناخته شد، اما تا قبل از سال ۱۹۵۵ که اوکلتون (Ockleston) [۳] مزایای این اثر را با آزمایش بر روی دالهای داخلی یک ساختمان مشخص کرد، مورد استفاده قرار نگرفت. اوکلتون در آزمایش‌های خود متوجه شد که بارهای نهایی دالها به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از بار طراحی است که در کارهای بعدی خود این افزایش را به عنوان اثر قوسی (یا اثر غشایی فشار) معرفی کرد. شکل ۷، ایجاد



شکل ۵. توزیع کرنش فشاری در طول نوار عرضی شاه تیر



شکل ۶. توزیع کرنش کششی در طول نوار عرضی شاه تیر



شکل ۷. نحوه ایجاد اثر غشایی فشار

پل به صورت افقی می‌شود، در ایجاد اثر غشایی فشار، تعیین کننده و حساس است. از آنجا که در شرایط واقعی ممکن است یک پل تحت اثر شرایط مختلف انتهایی قرار گیرد که بستگی به نحوه ساخت پل و شرایط اطراف آن دارد، بنابراین در این بخش از مقاله، با مدل کردن شرایط مختلف انتهایی، تأثیر اثر غشایی فشار بر روی رفتار عرشه پلهای مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور برای تحلیل تیرها در شرایط مختلف انتهایی گزینه‌های زیر مورد بررسی قرار گرفتند. (۱) تیر دو سر گیردار، (۲) تیر دوانتهای آزاد، (۳) تیر دو سر مفصل با قرارگیری تکیه‌گاه در $\frac{1}{4}$ ارتفاع، (۴) تیر دو سر مفصل با قرارگیری تکیه‌گاه در $\frac{1}{2}$ ارتفاع، (۵) تیر دو سر مفصل با قرارگیری تکیه‌گاه در $\frac{1}{4}$ ارتفاع. نتایج حاصل از تحلیل تیر برای حالات مختلف شرایط تکیه‌گاهی به قرار زیرند:

اثر غشایی فشار را در یک سطح مقطع تیر از عرشه پل نشان می‌دهد. هنگامی که یک دال به طور عمودی تغییر شکل می‌دهد، تغییر مکان افقی انتهای دال توسط سختی تیرها و پانلهای اطراف محدود و مقید می‌شود. این عامل سبب تولید نیروی فشاری در دال شده که به تبع آن سختی و مقاومت افزایش می‌یابد. در حال حاضر، با توجه به آن که این اثر تقریباً شناخته شده است، اما بیشتر آیین‌نامه‌ها اثرات مفید آن را در معیارهای طراحی در نظر نگرفته یا این که به صورت بسیار تجربی از آن استفاده می‌کنند.

یکی از دلایلی که که رفتار غشایی در کارها در نظر گرفته نمی‌شود، نداشتن اطلاعات کافی در خصوص سختی عرشه پل است. این سختی پیرامونی که باعث مقید کردن عرشه

۶) سختی تیرهای T شکل تأثیر فراوانی در مد خرابی این تیرها و نتیجتاً در سازه پل دارد.

۶. مراجع

1. Graddy, J. C., Burns, N. H., and Klingner, R. E. (1995) "Factors affecting the design thickness of bridge slabs", Report No. FHWA/TX-95+1305-3F), Center for Transportation Research, University of Texas at Austin.

۲. آیین نامه بارگذاری پلها، تجدید نظر اول، نشریه شماره ۱۳۹، معاونت امور فنی دفتر امور فنی و تدوین معیارها، سازمان برنامه و بودجه، ۱۳۷۹.

3. Ockleston, A. J. (1958) "Arching action in reinforced concrete slabs", The Structural Engineer, 36, pp. 197-201.

4. Kheyroddin, A. (1996) "Nonlinear finite element analysis of flexure-dominant reinforced concrete structures", Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal, Canada, 290p.

5. Nofal, M.E. (1988) "Inelastic load distribution of composite concrete- steel slab on girder bridge", M.Eng. Thesis, Department of Civil Engineering, Carleton University, Canada.

6. Shayanfar, M. A., Kheyroddin, A. and Mirza, M.S. (1997) "Element size effects in nonlinear analysis of R. C. members", Computers & Structures, Vol. 62, No.2, pp. 339-352.

7. Bazant, Z.P. and Oh, B.H. (1983) "Crack band theory for fracture of concrete", Materials and Structures, V. 16, No. 93, pp. 155-177.

8. Wallace, J.W. (1995) "Seismic design of RC structural walls", ASCE Journal of Structural Engineering", Vol.121, No.1, January, pp. 88-101.

9. Mabsout, M. (1997) "Finite element Analysis of steel girder highway bridges", Journal of Bridge Engineering, 2(3): pp.83-87.

پانویس ها

1. Compressive membrane action

۱) نوع شرایط تکیه‌گاهی تأثیر مهمی بر روی رفتار بار- تغییر شکل دال دارد.

۲) ظرفیت باربری یک دال با شرایط تکیه‌گاهی کاملاً گیردار تقریباً ۵ برابر دال با تکیه‌گاههای ساده است.

۳) رفتار دال با شرایط انتهایی مفصلی شدیداً وابسته به ارتفاعی است که تکیه‌گاه افقی وارد می‌شود. در صورتی که تکیه‌گاه افقی نزدیک محور خشی دال باشد ($1/4$ ارتفاع)، رفتار دال نزدیک به تکیه‌گاه ساده است. در صورتی که تکیه‌گاه به سطح پایین نزدیک تر شود، رفتار دال، به دال دو سر گیردار نزدیک‌تر می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

با اطلاعاتی که از طریق تحقیق ارایه شده در این مقاله به دست آمد، شناخت و فهم کامل‌تری در مورد رفتار تیرهای T شکل در پلها حاصل شد. این یافته‌ها سبب ارزیابی واقعی‌تر مقاومت خمشی این گونه پلها می‌شود. تیرهای T شکل بتن‌آرمه تحت اثر بارهای وارده رفتاری را از خود بروز می‌دهند که در آیین‌نامه‌ها در نظر گرفته نشده است، مانند افزایش مقاومت و شکل‌پذیری. مدل‌های تحلیلی که در این مقاله آورده شده قادرند ابعاد مختلف پاسخ غیرخطی تیرهای T شکل بتن‌آرمه را نمایش دهند که مهم‌ترین این نتایج به شرح زیرند:

۱) به کمک روش غیرخطی المان محدود می‌توان تغییرشکلها، کرنشها و تنشها را در حالی که پیچیدگی‌های غیرضروری به حداقل خود می‌رسد، پیش‌بینی کرد.

۲) نوع شرایط تکیه‌گاهی تأثیر مهمی بر روی رفتار بار- تغییر شکل دال دارد.

۳) اثر غشایی فشار به دلیل قیدهای مسطحی که مانع انبساط و تغییر مکان افقی عرشه پل می‌شود، به وجود آمده که این ممانعت از تغییر مکان افقی عرشه، سبب ایجاد نیروی فشاری در دال شده که به تبع آن سختی و مقاومت خمشی سازه افزایش می‌یابد.

۴) ظرفیت باربری یک دال با شرایط تکیه‌گاهی کاملاً گیردار تقریباً ۵ برابر دال با تکیه‌گاههای ساده است.

۵) تیرهای T شکل با بال تحت فشار مقاومت و شکل‌پذیری بیشتری نسبت به تیرهای T شکل با بال کششی و تیرهای مستطیلی دارند.

