



An experimental study on post-punching behavior of flat slabs to prevent progressive collapse

S. Sarvari¹, M. R. Esfahani^{2*}

¹ Ph.D. Student, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

² Professor, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

ABSTRACT: If unpredictable loads are applied to the flat slab-column connections, punching shear failure occurs with almost no warning signs. According to the brittle manner of this failure, the load carried by the slab-column connection redistributes to adjacent supports and causes overloading to these supports. Due to this overloading and brittle nature of punching shear failure, progressive collapse may happen both horizontally or vertically. In order to prevent the progressive collapse of flat slab-column connections, it is necessary to provide a secondary load carrying mechanism after punching shear. In this Paper, Suggestions for establishing a supporting mechanism in the flat slab connections after punching failure are proposed. For this purpose, an experimental study was performed to investigate the post-punching behavior of 9 slab specimens with various reinforcement layouts and concrete covers. The effects of integrity, compressive and bent-up reinforcements, diameter of tensile reinforcements, and concrete cover of tensile reinforcements on the post-punching behavior of slab-column connections were studied. The results of the experiments show that the integrity reinforcements significantly improve the post-punching strength. The compressive reinforcements may not increase post-punching strength. The increase of the concrete cover of the tensile reinforcements and decrease of the diameter of the tensile reinforcement result in an increase of the post-punching strength. The bent-up reinforcement increases the punching and post-punching strengths, simultaneously.

Review History:

Received: 2019-06-02

Revised: 2019-07-21

Accepted: 2019-07-24

Available Online: 2019-07-30

Keywords:

Post-Punching strength

Flat slab

Progressive collapse

Integrity reinforcement

Punching shear failure

1. INTRODUCTION

After a punching shear strength failure, the load carried by the slab-column connection redistributes the load to adjacent connections, and hence, the load increases rapidly in these connections. Consequently, they fail in punching shear due to overloading. This would result in the fall of the slab onto the slab below, thereby propagating the collapse both horizontally and vertically throughout the structure and could lead to progressive collapse of the structure [1]. The key to avoiding these failures is to provide a secondary load carrying mechanism after a slab-column connection has failed in punching shear [1,2]. After formation of the shear punching crack and in the absence of shear reinforcement, aggregate interlocking reduces quickly. Therefore, dowel action plays a significant role in transferring shear, because the only connection between the slab and the cone is the tensile and integrity reinforcement [1,2].

Hawkins and Mitchell [3] proposed possible defenced strategies that influence progressive collapse in flat slab structures. Finally, they recommended the provision of effectively continuous bottom reinforcement passing through the columns, later termed structural integrity reinforcement. Mitchell and Cook [2] stated that "Resisting mechanisms which develop after the occurrence of initial failures are described along with simple design and detailing

*Corresponding author's email: esfahani@ferdowsi.um.ac.ir

recommendations necessary to enable the damaged slab to hang from its supports. These design and detailing requirements result in effectively continuous bottom bars along column lines that are well anchored into the column or support regions". Melo and Regan [4] shows that bottom bars passing through a column and anchored in the slab to either side of it can be highly effective in increasing the post-punching resistance of a slab-column connection. The final resistance provided by the bottom bars appears to be governed either by the destruction of the concrete in the zone where they are anchored in the slab or by the fracture of the bars themselves. They reported that the angle of inclination of the integrity reinforcements at failure in the vicinity of the column face varied from 22° to 26°. Mirzai and Muttoni [5] tested various reinforcement layouts tensile reinforcement, integrity reinforcement and bent-up integrity bars. They concluded that tensile reinforcement provides a limited post-punching capacity when it is not suitably anchored on the soffit of the slab and the integrity reinforcement can increase the residual strength of flat slabs. They state that "Bent-up bars generally perform better than straight bars". They advised to Use high-ductility reinforcement for the integrity bars [5]. Habibi et al. [1] showed that increase of the slab thickness increases the post-punching resistance of slab-column connections.

In this paper, an extensive experimental campaign was performed to investigate the post-punching behaviour of 9



Table 1. Summary of test results

Series No.	Spec. No.	Punching strength	Punching Displacement	Maximum post-punching strength	Maximum post-punching displacement	Ratio post-punching to punching strength	Ratio post-punching to ACI punching
		V_P [kN]	w_P [mm]	$(V_{PP})_{max}$ [kN]	$(w_{PP})_{ma.}$ [mm]	$\frac{(V_{PP})_{max}}{V_P}$	$\frac{(V_{PP})_{max}}{V_{ACI}}$
Series 1	SP-1	246	30	101	111	41%	59%
	SP-2	271	27	232	138	86%	136%
	SP-3	261	31	261	120	100%	153%
Series 2	SC-1	297	28	270	132	91%	158%
	SC-2	310	37	305	147	98%	179%
Series 3	SR-1	272	36	283	135	104%	166%
	SR-2	250	36	195	135	78%	114%
Series 4	SB-1	375	28	265	66	71%	155%
	SB-2	292	25	235	120	80%	138%

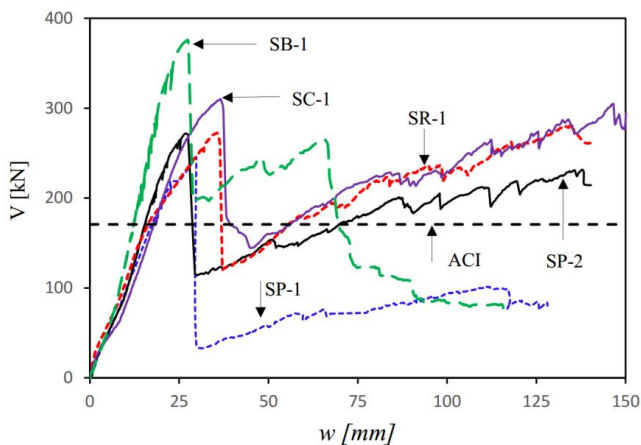


Fig. 1. Shear-displacement behavior of some specimens (One specimen of each Series)

slabs with various reinforcement layouts and cover concrete. The purpose of the current study is research on the effects of integrity, compressive, bent-up integrity, and bent-up additional reinforcements, diameter of tensile reinforcements, and concrete cover of tensile reinforcements on the post-punching behaviour of slab-column connections.

2. METHODOLOGY

In this experimental study, half-scale specimens were constructed in four series. In all specimens, the ratio of the tensile reinforcements and the concrete cover of the compressive and integrity reinforcements are 0.62% and 15 mm, respectively. Series 1 consisted of three specimens. The SP-1, SP-2 and SP-3 included tensile reinforcements, tensile and integrity reinforcements, and tensile, integrity and compressive reinforcements, respectively. The series 2, 3, and 4 were used to the effects of concrete cover of the tensile reinforcements, diameter of the tensile reinforcements, and the bent-up reinforcements on the post-punching strength, respectively. Series 2 consisted of two specimens. The reinforcements of these specimens are similar to the SP-2 specimen. In SC-1 and SC-2 specimens, the top clear

covers (cover of tensile reinforcement) are 25 and 35 mm, respectively. Series 3 consisted of two specimens. The ratio of the tensile reinforcement is equal to SP-2 specimen (0.62%). In the SR-1 and SR-2, distance and diameter of the tensile reinforcement decrease and increase, respectively. The other details of these specimens are similar to those of the SP-2 specimen. Series 4 consisted of 2 specimens. In the SB-1 specimen, bent-up bars were used as integrity reinforcement with an angle of inclination of 45° and bent from the column face. In the SB-2 specimen, additional bent-up bars were placed in crossover arrangement around the column. Table 1 shows the summarized results of these experiments. Shear-displacement behavior of some specimens is shown in Fig. 1.

3. CONCLUSION

Based on the result of the present study, Integrity reinforcements significantly increased post-punching strength. These reinforcements can develop tensile membrane action and prevent progressive collapse by alternative load paths to transfer the load. These reinforcements did not have much influence on the punching strength. In the column strip, compressive bars (except integrity reinforcements) did not have much influence on the punching and post-punching strength. Increase of the concrete cover (in tensile region) can enhance punching and post-punching strength. Concrete shear strength increases with increase concrete thickness. Hence, punching shear strength enhances with increase of the cover concrete (concrete thickness). Increase of the cover concrete enhances dowel action and delays concrete spalling. Hence, post-punching strength increases. Decrease of the diameter reinforcements (tensile reinforcement) increase post-punching strength. Bent-up integrity reinforcements significantly increase punching and post-punching strength. Additional bent-up reinforcements were not effective on the post-punching strength. These reinforcements slightly increased punching strength.

REFERENCES

- [1] F. Habibi, E. Redl, M. Egberts, W. Cook, D. Mitchell, Assessment

of CSA A23.3 Structural integrity requirements for two-way slabs, *Canadian Journal Civil Engineering*, 39(4) (2012) 351-361.

[2] D. Mitchell, W.D. Cook, Preventing Progressive Collapse of Slab Structures, *Journal of Structural Engineering*, 110(7) (1984) 1513-1532.

[3] N.M. Hawkins, D. Mitchell, Progressive collapse of flat plate

structures, *ACI Journal*, 76(10) (1979) 775-808.

[4] G.S. Melo, P.E. Regan, Post-punching resistance of connections between flat slabs and interior columns, *Magazine of Concrete Research*, 50(4) (1998) 319-327.

[5] R.M. Fernández, Y. Mirzaei, A. Muttoni, Post-Punching Behavior of Flat Slabs, *ACI Structural Journal*, 110 (2013) 801-812.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. Sarvari, M.R. Esfahani, *An experimental study on post-punching behavior of flat slabs to prevent progressive collapse*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(11) (2021) 707-710.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16471.6245](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16471.6245)





بررسی رفتار دال های تخت پس از برش پانچینگ برای جلوگیری از تخریب پیشرونده

سعید سروری^۱، محمدرضا اصفهانی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۲ استاد دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۳-۱۲
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۴-۳۰
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۵-۰۲
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۵-۰۸

کلمات کلیدی:

مقاومت پس پانچینگ
دال تخت
تخریب پیشرونده
آرماتور یکپارچگی
گسیختگی پانچینگ

خلاصه: چنانچه در اتصال دال تخت به ستون تحت اثر بارهای غیرقابل پیش بینی، گسیختگی پانچینگ رخ دهد، بنا به ماهیت ترد این گسیختگی پس از باز توزیع نیروها در اتصالات مجاور، ممکن است تخریب پیشرونده به صورت افقی یا قائم رخ دهد. جهت پیشگیری از تخریب پیشرونده و گسیختگی ترد و بدون اختلال اتصال دال به ستون، ایجاد یک سازوکار پشتیبان پس از گسیختگی پانچینگ و باز توزیع در اتصال یادشده، ضروری به نظر می رسد. در این تحقیق راهکارهای برقراری یک سازوکار پشتیبان در اتصال دال تخت به ستون پس از برش پانچینگ از طریق پیشنهاد تغییراتی در آرماتور و بتن بررسی می گردد. ۹ نمونه دال مربعی با ابعاد ۱۶۰۰ میلی متر و ضخامت های ۱۲۵ (۷ نمونه)، ۱۳۵ (۱ نمونه) و ۱۴۵ (۱ نمونه) میلی متر با جزئیات متفاوت در آرماتور گذاری بر روی تکیه گاه های ساده مورد آزمایش قرار گرفت. در این پژوهش اثرات آرماتورهای یکپارچگی (آرماتورهای عبوری از ستون در بخش فشاری)، آرماتورهای فشاری، قطر آرماتور کششی، پوشش بتن آرماتورهای کششی و آرماتورهای یکپارچگی خم شده به بالا بر روی مقاومت پس پانچینگ بررسی گردیده است. نتایج آزمایش ها نشانگر آن است که با افزودن آرماتور یکپارچگی مقاومت پس پانچینگ افزایش یافته و با افزودن آرماتورهای فشاری در ناحیه ستونی دال تخت افزایش چشمگیری در مقاومت های یادشده اتفاق نمی افتد. افزایش پوشش بتن در ناحیه کششی باعث افزایش مقاومت پانچینگ و پس پانچینگ به طور هم زمان می گردد. با کاهش قطر آرماتور کششی، مقاومت پس پانچینگ افزایش می یابد. خم کردن آرماتور یکپارچگی به سمت ناحیه کششی دال، باعث افزایش مقاومت پانچینگ و پس پانچینگ اولیه خواهد شد.

۱- مقدمه

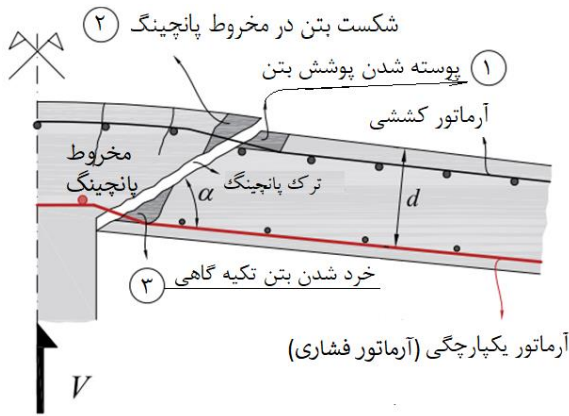
به نام «تخریب پیشرونده^۱» می شود. به سخن دیگر در تخریب پیشرونده با رشد گسیختگی بخشی از سازه، بخش زیادی از سازه دچار فروریزش می شود. اگر اتصال دال تخت به ستون دارای ساختار پشتیبان نباشد، پس از گسیختگی یک اتصال در اثر برش پانچینگ، کل بار به تکیه گاه های مجاور منتقل می گردد و این موضوع سبب باز توزیع لنگرها و برش ها شده و ممکن است منجر به گسیختگی اتصال دال تخت به ستون مجاور نیز گردد [۳ و ۲]. در حالت کلی تخریب پیشرونده، گسترش گسیختگی در جهت افقی و فروریختن عمودی به طور سراسری است. در طول دهه های گذشته چندین

دال های تخت سامانه های سازه ای رایج و اقتصادی می باشند. بزرگ ترین مشکل دال های تخت، خطر گسیختگی ترد برشی پانچینگ در محدوده ی اتصال به ستون به دلیل خطا در طراحی، اجرا و بارهای پیش بینی نشده است. از جمله خطاهای یادشده می توان به بارگذاری بیش از حد در هنگام ساخت، بهره برداری و زلزله های شدید، خوردگی آرماتورها، طراحی نامناسب و حذف یک ستون در اثر حوادث پیش بینی نشده، اشاره نمود [۱]. ماهیت ترد این گسیختگی باعث فروریزش ناگهانی بر روی طبقات پایینی و ایجاد یک فاجعه

1 Progressive Collapse

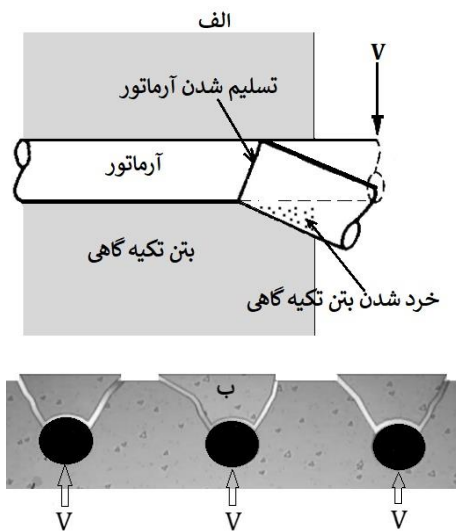
* نویسنده عهده دار مکاتبات: esfahani@ferdowsi.um.ac.ir





شکل ۱: رفتار آرماتورهای یکپارچگی و خمشی و بتن پس از گسیختگی برشی پانچینگ [۲۰]

Fig. 1. Behavior of flexural and integrity reinforcements and concrete after punching shear failure [20].



شکل ۲: حالت‌های گسیختگی عملکرد شاخه‌ای، الف) جاری شدن آرماتور ب) پوسته شدن بتن

Fig. 2. Failure modes of dowel action: a) Reinforcement yielding, b) Concrete splitting

پس پانچینگ بسیار کمی در بازتوزیع نیروها به ستون مجاور دارند [۱۱ و ۱۰]. در سازوکار عملکرد شاخه‌ای مطابق با شکل ۲، دو حالت اساسی گسیختگی بر اساس پاسخ آرماتور و بتن تکیه‌گاهی وجود دارد. حالت اول جاری شدن آرماتور و خرد شدن بتن هم‌زمان بتن تکیه‌گاهی آرماتور (شکل ۲-الف) و حالت دوم شکاف خوردن بتن یا پوسته شدن بتن است (شکل ۲-ب) [۱۲-۱۴]. ضخامت بتن بالای آرماتور، مؤثرترین پارامتر تعیین‌کننده حالت گسیختگی است [۱۳]. نتایج آزمایشگاهی بیانگر آن است که اگر ضخامت پوشش بتن بالای آرماتور بزرگ‌تر از ۶

گسیختگی در دال‌های تخت رخ داده که منجر به تخریب پیشرونده گردیده است [۱-۵]. در شکل ۱ اتصال دال تخت به ستون به همراه آرماتورهای کششی و یکپارچگی (آرماتورهای تحتانی عبوری از ستون که ممکن است قبل از گسیختگی پانچینگ تحت تنش فشاری باشد، در آئین‌نامه‌ها آرماتورهای یکپارچگی نامیده می‌شوند) مشخص است. با افزایش بارگذاری ترک‌های خمشی در اطراف ستون تشکیل می‌شوند و با گسترش ترک‌های خمشی دال و ترکیب این ترک‌ها با ریزترک‌های برشی، یک ترک قطری به نام ترک پانچینگ شکل می‌گیرد [۷ و ۶]. یادآوری می‌شود، چنانچه در طراحی دال به‌اندازه کافی آرماتور کششی لحاظ نگردد، گسیختگی حاکم در اتصال دال تخت، گسیختگی خمشی بوده و ترک پانچینگ رخ نخواهد داد زیرا در این حالت قبل از وقوع ترک پانچینگ، آرماتورهای کششی جاری می‌شوند. در حالت گسیختگی خمشی منحنی برش-تغییر مکان، پس از رسیدن به بار حداکثر (بار برش بیشینه)، کاهش باربری با نرخ کمتری صورت می‌پذیرد (اتصال شکل‌پذیرتر است) و این در حالی است که در گسیختگی پانچینگ پس از رسیدن به نقطه اوج باربری (برش پانچینگ)، اتصال بشدت کاهش باربری خواهد داشت و این به معنای افت شدید مقاومت پس از برش پانچینگ است. به سخن دیگر بار برش پانچینگ، بیشینه برش قبل از گسیختگی ترد پانچینگ است [۸]. ورق‌های CFRP (الیاف مسلح پلیمری کربن) چسبیده به وجه خارجی دال با الگوهای متفاوت است. با استفاده از این ورق‌ها مقاومت برش پانچینگ و ظرفیت تغییر شکل دال به‌گونه‌ای مؤثر افزایش می‌یابد ولیکن بعد از برش نهایی بازهم گسیختگی ترد پانچینگ رخ خواهد داد [۹]. پس از شکل‌گیری ریزترک برشی و قبل از گسیختگی برش پانچینگ، قفل و بست سنگ‌دانه‌ها و عملکرد شاخه‌ای عمده‌ترین مکانیسم‌های انتقال برش از دال به ستون می‌باشند [۶]. پس از وقوع ترک پانچینگ، آرماتورهای یکپارچگی و کششی ترک پانچینگ را قطع می‌کند و این آرماتورها در سازوکار انتقال برش به‌وسیله عملکرد شاخه‌ای مشارکت می‌کنند. چنان‌چه در اتصال دال تخت به ستون آرماتور یکپارچگی نباشد، پس از شکل‌گیری مخروط پانچینگ در اطراف ستون، گسیختگی پانچینگ با یک اخطار کوچک اتفاق می‌افتد. از این‌رو دال‌هایی که فقط آرماتور کششی دارند، ظرفیت

- 2 Crushing
- 3 Splitting
- 4 Breakout

خواهد یافت. مطالعات آزمایشگاهی ملو و رگان^۳ [۱۷] نشان می‌دهد که آرماتورهای یکپارچگی در مرحله قبل از برش پانچینگ تأثیری بر ظرفیت باربری دال نخواهند داشت ولی این آرماتورها در مرحله پس از گسیختگی پانچینگ ظرفیت باربری بیشتری به همراه خواهند داشت. ملو و رگان [۱۷] در آزمایش‌ها سری دوم، طول کمینه ی آرماتورهای یکپارچگی را پیشنهاد کردند. همچنین آن‌ها گزارش نمودند که زاویه‌ی انحراف آرماتورها در زمان گسیختگی، در مجاورت ستون از ۲۴ درجه تا ۲۶ درجه متغیر است [۱۵]. مطابق با تحقیقات آزمایشگاهی برومز^۴ [۲۲]، ترکیب آرماتور برشی همراه با آرماتورهای یکپارچگی خم‌شده به سمت بالا (ناحیه کششی) می‌تواند مقاومت پس پانچینگ را بهبود بخشد. مطابق با مطالعات آزمایشگاهی فرناندز^۵ و همکاران [۵]، افزایش مقاومت پس پانچینگ ناشی از افزایش میزان آرماتور کششی کم است و با افزایش میزان آرماتور کششی بیش از یک حد معین، نسبت مقاومت پس پانچینگ به مقاومت پانچینگ تغییر فراوانی نخواهد یافت. آن‌ها همچنین نتیجه‌گیری نمودند، آرماتور یکپارچگی با فولاد گرم نورد شده رفتار پس پانچینگ بهتری نسبت به آرماتورهای سرد نورد شده خواهد داشت. همچنین خم نمودن آرماتورهای یکپارچگی به سمت بالا، اندکی مقاومت پس پانچینگ را کاهش می‌دهد [۵]. مطالعات آزمایشگاهی حبیبی^۶ [۱۰] نشان داد که افزودن کتیبه^۷ به اتصال (افزایش ارتفاع در بتن پائین آرماتورهای یکپارچگی)، منجر به رسیدن فولاد به کرنش‌های بالاتر خواهد شد. مطابق با این پژوهش، با افزایش طول آرماتور یکپارچگی، تغییرات اندکی در مقاومت پس پانچینگ مشاهده گردیده است. همچنین برای مشخص شدن اثر هندسه ستون، دو نمونه با ستون‌های مستطیلی و مربعی مورد آزمایش قرار گرفت و تغییر محسوسی مشاهده نشد [۱۰].

در پژوهش‌های پیشین در مورد رفتار پس پانچینگ، مطالعات با هدف تحقیق بر روی آرماتورهای یکپارچگی صورت پذیرفته است. بر پایه ی پژوهش برومز [۲۲] آرماتورهای یکپارچگی خم‌شده به بالا موجب بهبود در مقاومت پس پانچینگ می‌شود و این در حالی است که در پژوهش فرناندز و همکاران [۵]، این آرماتورها کاهش مقاومت

تا ۷ برابر قطر آرماتور باشد، حالت اول رخ می‌دهد. از این رو حالت دوم در صورت ضخامت‌های کمتر بتن اتفاق می‌افتد [۱۳ و ۱۵]. حالت‌های اول و دوم به ترتیب در آرماتورهای یکپارچگی و کششی اتصال دال تخت به ستون مشاهده می‌شود. در زمان حرکت دال به سمت پائین، آرماتورهای کششی، تمایل به پوسته نمودن پوشش بتنی دارند و بنابراین سهم آرماتورهای کششی از مقاومت پس پانچینگ، اندک است [۱۶ و ۱۷]. مطابق با 11-ACI318 بخش 13.3.8.5 حداقل دو آرماتور یکپارچگی (در پائین) که در به‌طور پیوسته از میان ستون گذشته و به‌طور مناسب در تکیه‌گاه مقید گردیده است، الزامی است. در این آئین‌نامه جزئیات بیشتری در این خصوص ارائه نشده است. آرماتورهای یکپارچگی به‌صورت یک بستر تکیه‌گاهی جهت جلوگیری از رویداد تخریب پیش‌رونده عمل خواهند نمود [۱۸]. چنان چه در اتصال دال تخت به ستون به‌اندازه کافی آرماتورهای یکپارچگی تعبیه گردد، پس از گسیختگی پانچینگ، اتصال توانایی بهبود در مقاومت پس پانچینگ به صورت عملکرد غشایی کششی را دارد [۱۹]. سه منطقه گسیختگی در طول گسیختگی پانچینگ دال با آرماتور یکپارچگی همانند شکل ۱ به وجود می‌آید. با افزایش برش پس از گسیختگی پانچینگ، آرماتورهای کششی بتن دال را در منطقه ۱ متورق کرده و با گسترش زیپ وار به سمت وسط دهانه دال، باعث پوسته‌شدن بتن می‌گردد. بتن در ناحیه ۲ و ۳ به‌واسطه نیروهای اعمالی آرماتورهای یکپارچگی و کششی دچار شکست می‌شود. زمانی که ضخامت بتن جهت جلوگیری از شکست منطقه ۲ و ۳ کافی باشد، گسیختگی بتن در حد معینی متوقف می‌گردد [۵].

هاو کینگز و میچل^۱ [۱۶] ساختارهای حمایتی پس از گسیختگی پانچینگ شامل، در نظر گرفتن ضریب بارهای بیشتر در طراحی، استفاده از آرماتور برشی در اطراف اتصال دال تخت به ستون و الزاماتی برای آرماتورهای یکپارچگی ارائه نمودند. در نهایت الزامات آرماتورهای یکپارچگی به‌عنوان یک راهکار کاربردی پیشنهاد گردید. میچل و کوک^۲ [۲۱] امکان ایجاد یک سازوکار پشتیبان در حالت‌های مختلف دال‌های بتنی تحت یک گسیختگی موضعی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که این سازوکار از طریق آرماتورهای فشاری به‌طور مناسب مقید شده در ستون، گسترش

3 Melo and Regan

4 Broms

5 Fernández

6 Habibi

7 Drop panael

1 Hawkins and Mitchell

2 Mitchel and Cook

جدول ۱: وزن مصالح مصرفی در یک مترمکعب بتن (وزن به کیلوگرم)
Table 1. Weight of the materials used in 1 m³ of concrete mixture (kg)

فوق روان کننده	آب	سیمان	ریزدانه	درشت دانه	مصالح مصرفی
۰/۷	۱۸۰	۴۰۰	۱۰۸۰	۷۲۰	بتن C۳۰

جدول ۲: خواص آرماتورهای مصرفی
Table 2. Properties of reinforcement

شماره نمونه	قطر آرماتور (mm)	سطح مقطع (mm ²)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	کرنش نهایی (%)
۱	۸	۴۲۰	۴۵۶	۶۹۶	۲۹/۵۸
۲	۱۰	۷۸۵	۴۵۶	۶۸۸	۳۰/۹۴
۳	۱۲	۱۱۴۰	۴۴۵	۶۸۷	۳۰/۰۶

جدول ۳: خواص بتن نمونه‌ها
Table 3. Properties of concrete in different specimens

نمونه‌ها	مقاومت مشخصه (MPa)	میانگین وزن مخصوص (kN/m ³)	مشخصات دال‌های مورد استفاده
بتن سری اول	۳۳	۲۴/۶	SP-1,SP-2,SP-3,SC-1,SC-2,SR-1,SR-2
بتن سری دوم	۳۳	۲۴/۱	SB-1,SB-2

۲-۲- برپایی آزمایش‌ها

جهت طراحی آرماتور کششی و آرماتور یکپارچگی، ابتدا یک دال با دهانه ۶/۸ متر و بار مرده و زنده به ترتیب ۱/۵ و ۲/۵ کیلو پاسکال با استفاده آئین‌نامه 11-318-ACI طراحی گردید. در فرضیات این طراحی ابعاد ستون مربعی ۴۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. تکیه‌گاه‌ها در نقطه عطف خمش قرار دارند. نقطه عطف خمش در این پژوهش مطابق با پژوهش موتونی [۶] در فاصله ۰/۲۲ طول دهانه فرض شده است. باید افزود در آئین‌نامه 11-318-ACI، مقدار برش پانچینگ، بر اساس مقاومت برشی محیط میانگین قاعده‌های هرم ناقص شکست متأثر از برش پانچ (مربعی به ابعاد بعد ستون بعلاوه ارتفاع مؤثر دال) و ارتفاع مؤثر دال تخمین زده می‌شود و چنانچه در اطراف ستون کتیبه قرار گیرد، در محاسبه مقطع بحرانی برش پانچینگ، ابعاد کتیبه جایگزین ابعاد ستون خواهد شد. به سخن ساده‌تر با توجه به محیط بزرگ‌تر ابعاد کتیبه برش پانچینگ افزایش

پس پانچینگ را نشان می‌دهد. در این پژوهش اثر آرماتورهای یکپارچگی خم‌شده به بالا و آرماتورهای خم شده به بالا (علاوه بر آرماتورهای یکپارچگی) بررسی می‌گردد. همچنین در بخشی از این پژوهش اثر قطر آرماتورهای کششی و پوشش بتن آرماتورهای کششی بررسی گردیده است.

۲- طراحی و ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مصالح

در این مطالعه آزمایشگاهی بتن با رده مقاومتی C30 (بتن معمولی) استفاده شده است. سیمان مصرفی تیپ ۱، بزرگ‌ترین اندازه سنگدانه ۲۵ میلی‌متر، نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و عیار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. در ساخت نمونه‌ها از آرماتور نوع AIII (تنش تسلیم و تنش نهایی به ترتیب ۴۰۰ و ۶۰۰ مگا پاسکال) استفاده شده است. طرح اختلاط بتن و مشخصات مصالح بر طبق آزمایش‌های صورت پذیرفته در جدول ۱ تا ۳ آورده شده است.

می‌گیرند. به بیان ساده‌تر در حین آزمایش‌ها، آرماتورهای کششی در پائین دال می‌باشند. تغییر مکان وسط دال توسط تغییر مکان سنج خطی (LVDT^۱) اندازه‌گیری می‌گردد (این تغییر مکان سنج به‌طور مستقیم تغییر مکان صفحه صلب را اندازه‌گیری می‌کند) و نیرو توسط برداشت نیروسنج^۲ اندازه‌گیری می‌گردد. نیروسنج و تغییر مکان سنج به دستگاه ثبت داده‌ها^۳ متصل هستند. نمونه‌ها بر روی تکیه‌گاه ساده فولادی (180 IPE) قرار می‌گیرد.

۳- مشخصات نمونه‌ها

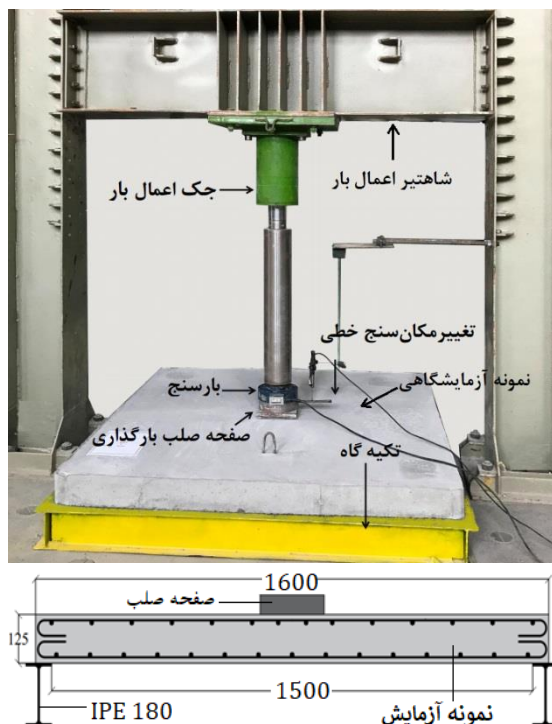
۹ نمونه دال تخت در چهار گروه ساخته شد. ویژگی‌های کلی این نمونه‌ها در جدول ۴ آمده است. گروه ۱ نمونه‌ها، نمونه‌های مرجع (نمونه‌های SP) هستند و جهت مقایسه نتایج با گروه‌های بعدی و اثر آرماتور یکپارچگی و آرماتورهای فشاری ساخته شده‌اند. گروه ۲ جهت اثر پوشش بتن (SC)، گروه ۳ جهت بررسی اثر قطر آرماتورهای کششی (SR) و گروه ۴ آرماتورهای خم شده به بالا (SB) هستند. خلاصه مشخصات این نمونه‌ها در جدول ۴ آمده است. باید افزود در کلیه نمونه‌ها نسبت آرماتور کششی در مقطع ۰/۶۲٪ و در نمونه‌های شامل آرماتور یکپارچگی، ۲ آرماتور با قطر ۱۰ میلی‌متر در هر جهت موجود است. در همه نمونه‌ها، پوشش خالص بتن در ناحیه فشاری ۱۵ میلی‌متر است.

۳-۱- نمونه‌های مرجع (گروه ۱)

نمونه 1-SP شامل آرماتور کششی، نمونه 2-SP شامل آرماتور کششی و آرماتور یکپارچگی و در نمونه 3-SP علاوه بر آرماتور کششی و یکپارچگی، آرماتور فشاری اضافی نیز وجود دارد (شکل ۴). باید افزود نمونه‌های گروه‌های بعدی با تغییراتی نسبت به نمونه 2-SP ساخته شده‌اند و با نمونه یادشده نیز مقایسه می‌شوند.

۳-۲- نمونه‌ها با تغییر پوشش بتن (گروه ۲)

آرماتورهای این گروه همانند نمونه 2-SP بوده با این تفاوت که در این گروه پوشش بتن آرماتورهای کششی بجای ۱۵ میلی‌متر، ۲۵ میلی‌متر در 1-SC و ۳۵ میلی‌متر در 2-SC است. باید افزود ارتفاع



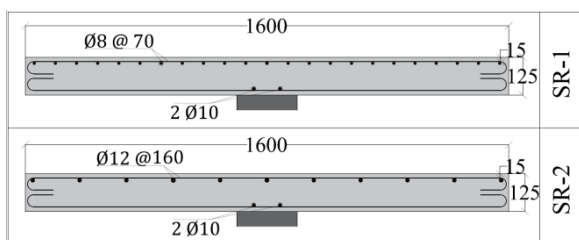
شکل ۳: دستگاه آزمایش بکار گرفته شده در این پژوهش
Fig. 3. Test setup

خواهد یافت. باید دانست، در مواردی که برای کاهش مقدار آرماتور منفی روی ستون‌های دال‌های تخت اقدام به ایجاد کتیبه در روی ستون می‌شود، می‌بایست ضخامت حداقل کتیبه به اندازه یک چهارم ضخامت دال و ابعاد دال در هر دهانه حداقل به اندازه یک ششم طول دهانه باشد. کنترل افتادگی دال‌های دوطرفه از طریق محدودیت برای حداقل ضخامت کنترل می‌گردد که بر اساس آیین‌نامه یادشده در اتصالات داخلی دال‌های تخت، با فولاد AIII، حداقل ضخامت به اندازه طول آزاد تقسیم بر ۳۳ هست. با توجه به طراحی انجام شده و مقیاس نیم برابر ابعاد واقعی، فاصله تکیه‌گاه‌ها ۱۵۰۰ میلی‌متر و ضخامت دال ۱۲۵ میلی‌متر است (شکل ۳). پوشش خالص بتن ۱۵ میلی‌متر است. در این آزمایش از صفحه صلب مربعی با ابعاد ۲۰۰ میلی‌متر جهت بارگذاری (ستون) استفاده گردید. بارگذاری با جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن که از طریق شاهتیر قاب دروازه‌ای متصل به زمین به دال نیرو وارد می‌کند. اعمال بار به صورت استاتیکی (با نرخ حدود ۵۰۰ نیوتن در ثانیه) انجام گرفته است. لازم به توضیح است جهت بارگذاری روی نمونه‌ها از بالا است و با توجه به بارهای واقعی وارده به دال (ستون از پائین به دال نیرو اعمال می‌کند) نمونه‌ها به‌طور معکوس نسبت به حالت واقعی قرار

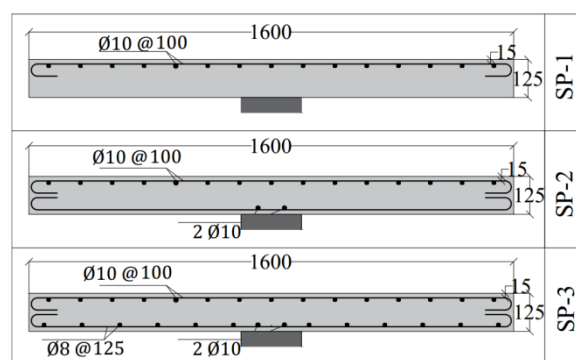
1 Linear Variable Displacement Transducer
2 Load Cell
3 Logger-Data

جدول ۴: جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی
Table 4. Details of experimental specimens

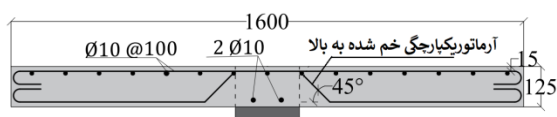
گروه نمونه	شماره نمونه	آرماتور کششی [mm]	آرماتور یکپارچگی [mm]	آرماتور فشاری اضافی [mm]	پوشش بتن ناحیه کششی [mm]
گروه ۱	SP-1	Ø۱۰@۱۰۰	-	-	۱۵
	SP-2	Ø۱۰@۱۰۰	۴Ø۱۰	-	۱۵
	SP-3	Ø۱۰@۱۰۰	۴Ø۱۰	Ø۸@۱۲۵	۱۵
گروه ۲	SC-1	Ø۱۰@۱۰۰	۴Ø۱۰	-	۲۵
	SC-2	Ø۱۰@۱۰۰	۴Ø۱۰	-	۳۵
گروه ۳	SR-1	Ø۸@۷۰	۴Ø۱۰	-	۱۵
	SR-2	Ø۱۲@۱۶۰	۴Ø۱۰	-	۱۵
گروه ۴	SB-1	Ø۱۰@۱۰۰	۴Ø۱۰ (خم شده به بالا)	-	۱۵
	SB-2	Ø۱۰@۱۰۰	۴Ø۱۰ (اضافی خم شده به بالا) + ۴Ø۸	-	۱۵



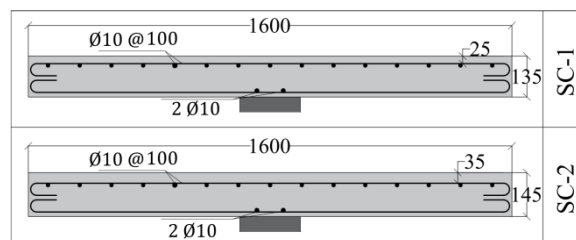
شکل ۶: جزئیات نمونه‌ها با تفاوت در قطر آرماتور کششی (گروه ۳)
Fig. 6. Details of specimens with different tensile reinforcement diameters (Third group)



شکل ۴: جزئیات نمونه‌های مرجع (گروه ۱)
Fig. 4. Details of basic specimens (First group)

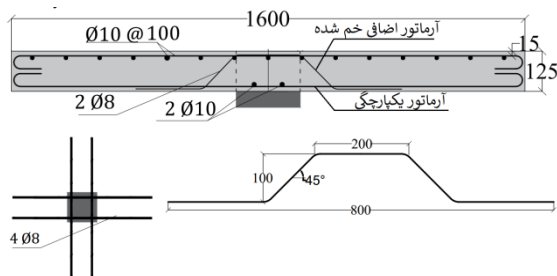


شکل ۷: جزئیات نمونه SB-1 (آرماتور یکپارچگی خم شده به بالا)
Fig. 7. Details of SB-1 specimen (Integrity bent-up reinforcements)



شکل ۵: جزئیات نمونه‌ها با تغییر پوشش بتن (گروه ۲)
Fig. 5. Details of specimens with different concrete cover (Second group)

این دال‌ها به ترتیب ۱۳۵ و ۱۴۵ میلی‌متر است. جزئیات این گروه نمونه‌ها در شکل ۵ آمده است.



شکل ۸: جزئیات نمونه SB-2 (آرماتورهای یکپارچگی و آرماتورهای اضافی خم شده به بالا)

Fig. 8. Details of SB-2 specimen (Additional bent-up and integrity reinforcements)

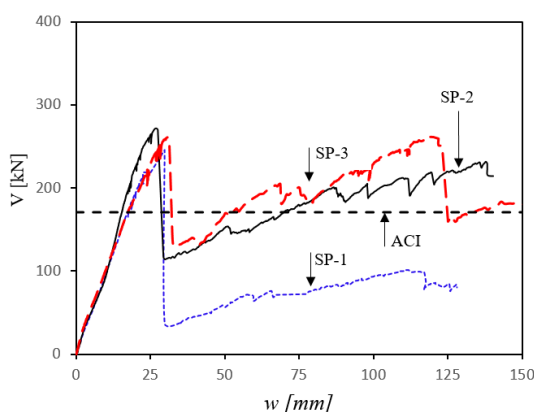
تفاوت این گروه در قطر و فاصله آرماتورهای کششی است. مطابق

۳-۳ نمونه‌ها با تفاوت در قطر آرماتور کششی (گروه ۳)

این نمونه‌ها مشابه با نمونه 2-SP هستند و نسبت آرماتور کششی نیز در مقاطع این گروه همانند نمونه یادشده است، تنها

جدول ۵: خلاصه ویژگی‌های نمونه‌ها و نتایج پژوهش
Table 5. Summary of specimens and test results

گروه نمونه	شماره نمونه	ظرفیت پانچینگ V_p [kN]	تغییرمکان پانچینگ w_p [mm]	ظرفیت پس پانچینگ بیشینه $(V_{PP})_{max}$ [kN]	تغییرمکان پس پانچینگ بیشینه $(w_{PP})_{max}$ [mm]	ظرفیت پس پانچینگ به پانچینگ $\frac{(V_{PP})_{max}}{V_p}$	ظرفیت پس پانچینگ به آئین‌نامه ACI $\frac{(V_{PP})_{max}}{V_{ACI}}$
گروه ۱	SP-1	۲۴۶	۳۰	۱۰۱	۱۱۱	۴۱٪	۵۹٪
	SP-2	۲۷۱	۲۷	۲۳۲	۱۳۸	۸۶٪	۱۲۶٪
	SP-3	۲۶۱	۲۱	۲۶۱	۱۲۰	۱۰۰٪	۱۵۲٪
گروه ۲	SC-1	۲۹۷	۲۸	۲۷۰	۱۳۲	۹۱٪	۱۵۸٪
	SC-2	۳۱۰	۲۷	۳۰۵	۱۴۷	۹۸٪	۱۷۹٪
گروه ۳	SR-1	۲۷۲	۲۶	۲۸۲	۱۳۵	۱۰۴٪	۱۶۶٪
	SR-2	۲۵۰	۲۶	۱۹۵	۱۴۷	۷۸٪	۱۱۴٪
گروه ۴	SB-1	۳۷۵	۲۸	۲۶۵	۶۶	۷۱٪	۱۵۵٪
	SB-2	۲۹۲	۲۵	۲۳۵	۱۲۰	۸۰٪	۱۳۸٪



شکل ۹: رفتار برش-تغییر مکان نمونه‌های مرجع (گروه ۱)
Fig. 9. Shear-displacement behavior of basic specimens (First group)

نمونه 2-SP این نسبت به ۸۵٪ افزایش یافته است. از سوی دیگر مقاومت پس پانچینگ بیشینه در نمونه 1-SP و 2-SP به ترتیب ۱۰۱ و ۲۳۲ کیلو نیوتن است و این موضوع نشان‌دهنده افزایش ۲۲۹ درصدی مقاومت پس پانچینگ به علت وجود آرماتور یکپارچگی است. مقاومت پس پانچینگ بیشینه در نمونه 2-SP و 3-SP به ترتیب ۲۶۱ و ۲۳۲ کیلو نیوتن است (افزایش ۱۳ درصدی در نمونه 3-SP) ولیکن در نمونه 3-SP پس از مقاومت پس پانچینگ بیشینه یک پله افت 2-SP دارد. از این موضوع می‌توان دریافت که آرماتورهای فشاری تأثیر چندانی در مقاومت پس پانچینگ ندارد.

شکل ۶ در 1-SR قطر و فاصله آرماتورهای کششی کاهش می‌یابد و در 2-SR قطر و فاصله افزایش می‌یابد.

۴-۳- نمونه‌ها با آرماتورهای خم شده به بالا (گروه ۴)

همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، در نمونه 1-SB آرماتورهای یکپارچگی از مجاورت ستون با زاویه ۴۵ درجه به سمت بالا (ناحیه کششی) خم می‌شود. نمونه 2-SB مشابه با نمونه 2-SP است. تنها تفاوت آن، اضافه شدن چهار آرماتور خم شده به بالا (علاوه بر آرماتورهای یکپارچگی) مطابق با جزئیات شکل ۸ است.

۴-۴- نتایج آزمایشگاهی

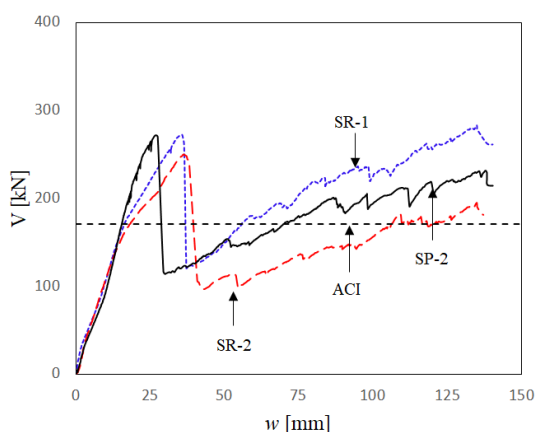
در این بخش نتایج آزمایش‌های ۹ نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرد. خلاصه نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۵ آمده است. خاطرنشان می‌سازد، تغییر مکان‌های یادشده در جدول ۵ تغییر مکان وسط دهانه دال است.

۴-۱- نمونه‌های مرجع (گروه ۱)

در شکل ۹ رفتار برش-تغییر مکان نمونه‌های گروه ۱ آمده است. همان‌طور که در شکل ۹ و جدول ۵ ملاحظه می‌شود، در نمونه 1-SP نسبت مقاومت پس پانچینگ به پانچینگ ۴۱٪ است و در



شکل ۱۰: مقایسه آسیب بتن در مخروط پانچینگ در نمونه‌های SP-۱ و SP-۲ در ناحیه کششی
Fig. 10. Comparison of damaged concrete in punching cone between SP-1 and SP-2 specimens



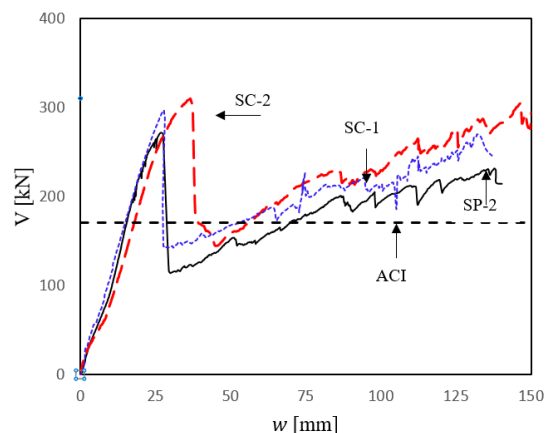
شکل ۱۲: رفتار بار-تغییر مکان نمونه‌ها با تغییر در قطر آرماتور کششی (گروه ۳)

Fig. 12. Shear-displacement behavior of specimens with different tensile reinforcement diameters (Third group)

افزایش مقاومت پانچینگ دال تخت ندارند.

۲-۴- نمونه‌ها با تغییر پوشش بتن (گروه ۲)

تاکنون پژوهش‌های بسیاری در خصوص اثر آرماتورهای یکپارچگی در مقاومت پس پانچینگ انجام شده است ولی پژوهش‌ها با موضوع پارامترهای تأثیرگذار بر روی آرماتورهای کششی اندک است. با عنایت به عملکرد شاخه‌ای آرماتورهای کششی در اتصال دال تخت به ستون، یکی از پارامترهای مؤثر در مقاومت آرماتورهای کششی، می‌تواند پوشش بتن باشد. رفتار برش-تغییر مکان در نمونه‌های 1-SC و 2-SC با پوشش بتن به ترتیب ۲۵ و ۳۵



شکل ۱۱: رفتار برش-تغییر مکان نمونه‌ها با تغییر پوشش بتن (گروه ۲)
Fig. 11. Shear-displacement behavior of specimens with different concrete covers (Second group)

این عدم کارایی می‌تواند به علت قرار نگرفتن آرماتورهای فشاری در مخروط پانچینگ باشد. همان‌گونه که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود، آسیب بتن مخروط پانچینگ نمونه 2-SP نسبت به نمونه 1-SP در ناحیه کششی بیشتر است. همان‌طور که در جدول ۵ مشخص است، نسبت مقاومت پس پانچینگ در نمونه 1-SP، 2-SP و 3-SP نسبت به مقاومت پانچینگ پیش‌بینی شده در 2011-318-ACI (برش پانچینگ محاسبه شده بر اساس ضوابط آئین‌نامه)، به ترتیب ۵۹، ۱۳۶ و ۱۵۳ درصد است و این موضوع نشان از کارایی آرماتور یکپارچگی جهت جلوگیری از تخریب پیشرونده دارد. باید افزود، با عنایت به نتایج، آرماتورهای یکپارچگی و فشاری تأثیر چندانی در



شکل ۱۳: مقایسه آسیب بتن مخروط پانچینگ در نمونه های SR-۱ و SR-۲ (ناحیه کششی دال)

Fig. 13. Comparison of damaged concrete in punching cone between SR-1 and SR-2 specimens with different Concrete covers (Tension region of slab)

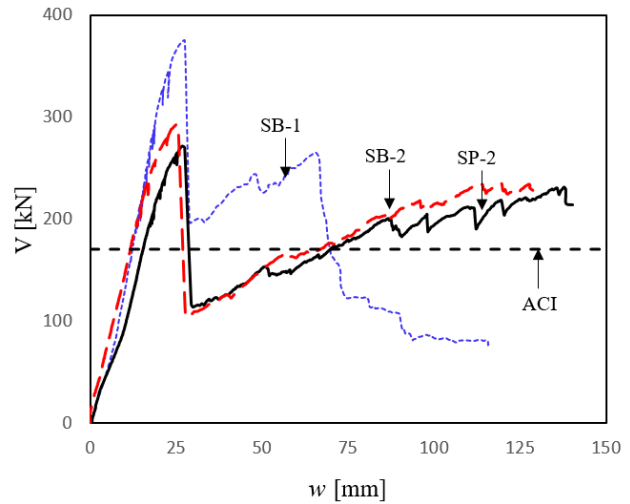
پس پانچینگ به طور همزمان افزایش خواهد یافت. افزایش مقاومت پس پانچینگ به منزله ایجاد یک سازوکار دیگر جهت جلوگیری از تخریب پیشرونده است.

۳-۴- نمونه‌ها با تغییر قطر آرماتور کششی (گروه ۳)

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، در صورت تغییر نسبت پوشش بتن به قطر آرماتور، میزان عملکرد شاخه‌ای تغییر خواهد نمود. در این گروه با کاهش و افزایش قطر آرماتور کششی (با ثابت نگه‌داشتن درصد آرماتور کششی)، تغییرات مقاومت های پانچینگ و پس پانچینگ بررسی می‌شود. خاطرنشان می‌سازد، در نمونه SR-1، SP-2 و SR-2 قطر آرماتور کششی به ترتیب ۸، ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر و فاصله آرماتورها ۷۰، ۱۰۰ و ۱۶۰ میلی‌متر و پوشش آرماتور کششی ۱۵۰ میلی‌متر است. رفتار برش-تغییر مکان این نمونه‌ها همانند شکل ۱۲ است. با توجه به جدول ۵ و شکل ۱۲ مقاومت پس پانچینگ بیشینه در نمونه‌های SR-1، SP-2 و SR-2 به ترتیب ۲۸۳، ۲۳۲ و ۱۹۵ کیلو نیوتن است. بنابراین با افزایش قطر آرماتور کششی از ۸۰ به ۱۰۰ و ۱۲۰ میلی‌متر (با نسبت آرماتور یکسان) مقاومت برش پس پانچینگ به ترتیب به میزان ۲۱ و ۴۳ درصد کاهش یافته است. این در حالی است که با توجه به عدم تغییر در ضخامت نمونه‌ها، در مقاومت برش پانچینگ تغییر محسوسی مشاهده نمی‌شود. از سوی دیگر، همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، به علت تنش

میلی‌متر در مقایسه با نمونه SP-2 (پوشش بتن ۱۵ میلی‌متر) مطابق شکل ۱۱ است. همان‌طور که از شکل ۱۱ و جدول ۵ مشخص است، در نمونه‌های SC-1 و SC-2 مقاومت برش پانچینگ به ترتیب ۲۹۷ و ۳۱۰ کیلو نیوتن می‌باشند. به عبارت دیگر با افزایش پوشش بتن از ۱۵ میلی‌متر در نمونه SP-2، به ۲۵ و ۳۵ میلی‌متر در نمونه‌های SC-1 و SC-2 میزان افزایش مقاومت پانچینگ نسبت به نمونه 2-SP به ترتیب ۹ و ۱۴ درصد و این افزایش در مقاومت پس پانچینگ به ترتیب ۱۲ و ۳۲ درصد است. بنابراین با افزودن پوشش بتن در بالای اتصال دال به ستون (پوشش آرماتورهای کششی) مقاومت های پانچینگ و پس پانچینگ افزایش می‌یابند. از آنجاکه در آئین‌نامه ACI-318 در محاسبه برش پانچینگ، ارتفاع مؤثر دال در نظر گرفته می‌شود، افزایش مقاومت پانچینگ در اثر افزایش پوشش بتن منظور نمی‌شود. با توجه به جدول ۵ نسبت مقاومت پس پانچینگ نمونه‌های SC-1 و SC-2 نسبت به برش پانچینگ پیش‌بینی شده در آئین‌نامه ACI به ترتیب ۱۵۸ و ۱۷۹ درصد است. افزایش مقاومت پس پانچینگ می‌تواند به دلیل به تأخیر افتادن پوسته‌شدن پوشش آرماتورهای کششی باشد. به سخن دیگر، چنانچه افزایش ضخامت دال در بخش ارتفاع مؤثر باشد، مقاومت پانچینگ افزایش خواهد یافت (مطابق با رابطه آئین‌نامه ACI-318) ولی چنانچه افزایش ضخامت در بخش پوشش آرماتورهای کششی صورت پذیرد، مقاومت پانچینگ و

میکرو ترک های برشی بوده و تنش در آرماتور خم شده به بالا تا حد تسلیم افزایش خواهد یافت. پس از رسیدن آرماتور به حد تسلیم به دلیل تغییر مکان قابل توجه در آرماتور، ترک قطری پانچینگ ایجاد می شود. این موضوع می تواند منجر به افزایش مقاومت پانچینگ نمونه SB-1 نسبت به نمونه SP-2 (دارای آرماتور یکپارچگی افقی) می گردد. از سوی دیگر، در نمونه با آرماتورهای خم شده اضافی (SB-2)، طولی مهارای آرماتورهای خم شده به بالا (طول مهار شده در بتن) در بیرون از مخروط پانچینگ در نمونه SB-1 به اندازه کافی نیست (شکل ۱۳-ب)، از این جهت در این نمونه ها آرماتورهای خم شده توانایی انتقال برش تا حد تسلیم این آرماتورها را ندارند. بنابراین آرماتورهای یکپارچگی خم شده (نمونه SB-1) توانایی تحمل برش پانچینگ بیشتری دارند. در نمونه SB-1، با ایجاد ترک برشی پانچینگ، مشارکت مقاومت برشی بتن از مقاومت برشی اتصال حذف می گردد و تنها آرماتور یکپارچگی خم شده از طریق عملکرد کششی و شاخه ای (به آرماتور خم شده نیروی برشی و کششی وارد می شود) و آرماتور کششی از طریق عملکرد شاخه ای در سازوکار انتقال برش مشارکت می کنند (دیگرام نیروها در شکل ۳-ج مشخص است). با توجه به عملکرد دوگانه آرماتور یکپارچگی خم شده به بالا (کششی و شاخه ای) مقاومت پس پانچینگ در نمونه SB-1 بیش از نمونه SP-2 (دارای آرماتور یکپارچگی افقی با عملکرد شاخه ای) است. همان طور که در دیگرام نیروها شکل ۱۵-ج مشخص است، با افزایش نیروی برشی در مرحله پس پانچینگ آرماتور یکپارچگی خم شده به بتن نیروی فشاری وارد می نماید و این موضوع منجر به خرد شدن بتن تکیه گاهی (ناحیه ۲) می شود و با تخریب پیشرونده ناحیه ۲ و پیوستن به ناحیه ۱ و در نتیجه از بین رفتن تکیه گاه این آرماتور، مقاومت پس پانچینگ افت می یابد (منحنی SB-1 در شکل ۱۴). همان طور که در بالا ذکر شد، در نمونه SB-2، آرماتورهای خم شده به بالای اضافی به علت عدم تأمین طول مهارای لازم، در مرحله پانچینگ توانایی تحمل تنش ها تا تنش تسلیم را دارا نمی باشند، از این جهت در مرحله پس پانچینگ مؤثر نخواهد بود (شکل ۱۵-د). باید افزود نسبت مقاومت های پس پانچینگ بیشینه در نمونه SB-1 و SB-2 به مقاومت پانچینگ پیش بینی شده در آئین نامه ACI، به ترتیب ۱۵۵ و ۱۳۸ درصد است.



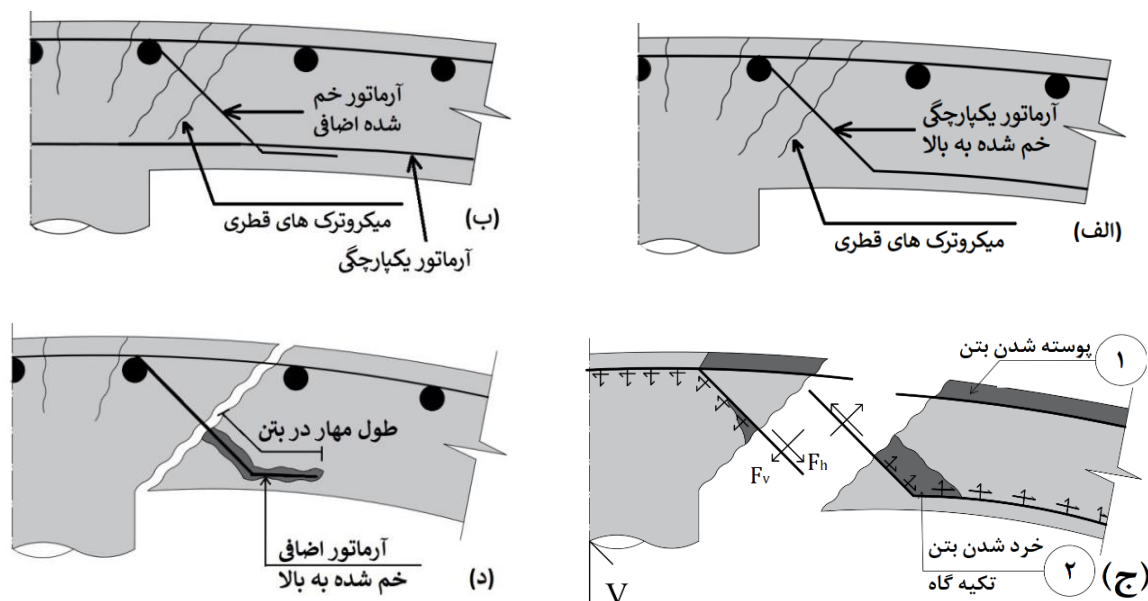
شکل ۱۴: رفتار برش-تغییر مکان نمونه های گروه ۴

Fig. 14. Shear-displacement behavior of group 4 specimens

بیشتر در اطراف آرماتورهای کششی نمونه SR-2، نسبت به نمونه SR-1 بتن بیشتری آسیب دیده است و در انتهای آزمایش مخروط پانچینگ در نمونه SR-2، در کل ارتفاع مقطع، به طور کامل تخریب گردیده است. نسبت مقاومت پس پانچینگ بیشینه در نمونه SR-1، SP-2 و SR-2 به مقاومت پانچینگ پیش بینی شده آئین نامه ACI، به ترتیب ۱۶۳، ۱۳۵ و ۱۱۴ درصد است.

۴-۴- نمونه ها با آرماتورهای خم شده به بالا (گروه ۴)

نتایج رفتار برش-تغییر مکان این نمونه ها در شکل ۱۴ مشخص است. با توجه به جدول ۵ مقاومت پانچینگ در نمونه های SB-1 (مشابه با SP-2 و دارای آرماتورهای یکپارچگی خم شده به بالا) و SB-2 (مشابه با SP-2 و دارای ۴ آرماتور اضافی به غیر از آرماتور یکپارچگی و خم شده به بالا) نسبت به نمونه SP-2، به ترتیب ۳۸ و ۷ درصد افزایش یافته و مقاومت پس پانچینگ نسبت به نمونه یاد شده به ترتیب ۱۴ و ۱ درصد افزایش یافته اند. بنابراین با خم کردن آرماتورهای یکپارچگی به سمت ناحیه کششی در نزدیک تکیه گاه (مطابق شکل ۷) افزایش مقاومت پانچینگ و پس پانچینگ قابل ملاحظه است. در شکل ۱۵-الف اتصال دال تخت دارای آرماتورهای کششی و آرماتورهای یکپارچگی خم شده به بالا (نمونه SB-1) به همراه ترک های خمشی و ریز ترک های برشی مشخص است. همان طور که در شکل یاد شده مشخص است، با افزایش بارگذاری در این نمونه (بعد از ایجاد ریز ترک ها)، آرماتور یکپارچگی خم شده به بالا تقریباً عمود بر



شکل ۱۵: رفتار آرماتورهای یکپارچگی خم شده به بالا و آرماتورهای اضافی خم شده در SB-۱ و SB-۲
 Fig. 15. Behavior of bent-up integrity reinforcement and concrete in SB-1 and SB-2 specimens

۵- نتیجه گیری

افزایش ضخامت اتصال دال تخت به ستون و علت افزایش مقاومت پس پانچینگ، به تأخیر انداختن پوسته شدن پوشش بتن ناحیه کششی است. باید افزود، آئین نامه 318-ACI اثر افزایش پوشش بتن را در مقاومت پانچینگ در نظر نمی گیرد.

۴- به نظر می رسد افزایش مقاومت مهارى به علت کاهش قطر آرماتور کششی (با ثابت نگه داشتن نسبت آرماتور در مقطع و ثابت نگه داشتن پوشش بتن) می تواند منجر به افزایش مقاومت پس پانچینگ گردد.

۵- خم نمودن آرماتورهای یکپارچگی به سمت بالا (ناحیه کششی) می تواند مقاومت برش پانچینگ و مقاومت برش پس پانچینگ بیشینه را افزایش دهد.

۶- اضافه نمودن آرماتورهای اضافی خم شده به بالا می تواند در افزایش مقاومت پانچینگ تأثیر بسزایی داشته باشد ولیکن این آرماتورها در مقاومت پس پانچینگ تأثیری ندارند.

مراجع

- [1] S. King, N.J. Delatte, Collapse of 2000 Commonwealth Avenue: Punching Shear Case Study, Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, 18(1) (2004) 54-61.
- [2] E.V. Leyendecker, S.G. Fattal, Investigation of the Skyline

در این پژوهش ۹ نمونه دال با مقیاس نیم با هدف بهبود رفتار اتصال دال تخت به ستون پس از گسیختگی پانچینگ جهت جلوگیری از تخریب پیشرونده مورد آزمایش قرار گرفت. در نمونه ها اثرات آرماتورهای یکپارچگی (آرماتورهای عبوری از ستون در بخش فشاری)، آرماتورهای فشاری، قطر آرماتور کششی، پوشش بتن آرماتورهای کششی و آرماتورهای یکپارچگی خم شده به بالا بر روی مقاومت پس پانچینگ بررسی گردید. بر اساس آزمایش ها، نتایج زیر حاصل گردید:

۱- جهت جلوگیری از تخریب پیشرونده وجود دو آرماتور فشاری عبوری از ستون در اتصال دال تخت به ستون (آرماتور یکپارچگی)، می تواند حداقل ۴۰ درصد مقاومت پس از پانچینگ را افزایش دهد.

۲- وجود آرماتورهای فشاری (به غیر از آرماتور یکپارچگی) در محدوده نوار ستونی، در مقاومت پانچینگ و همچنین مقاومت برشی پس از پانچینگ تأثیر چندانی نخواهد داشت.

۳- افزایش پوشش بتن آرماتورهای کششی با فرض ثابت بودن ارتفاع موثر دال (افزایش ضخامت دال به علت افزایش بخش پوشش بتن) می تواند مقاومت پانچینگ و مقاومت پس پانچینگ را به طور قابل ملاحظه ای افزایش دهد و این موضوع به معنای تأثیر در جلوگیری از تخریب پیشرونده است. علت افزایش مقاومت پانچینگ،

- Symposium, American Concrete Institute, (1993) 73-93.
- [12] S.D. Poli, M.D. Prisco, P. Gambarova, Cover and Stirrup Effects on the Shear Response of Dowel Bar Embedded in Concrete, *ACI Structural Journal*, 90(4) (1993) 441-450.
- [13] E. Vintzeleou, T.P. Tassios, Mathematical Models for Dowel Action under Monotonic and Cyclic Conditions, *Magazine of Concrete Research*, 38(134) (1986) 13-22.
- [14] Jelic, M.N. Pavlovic, M.D. Kotsovos, A Study of Dowel Action in Reinforced Concrete Beams, *Magazine of Concrete Research*, 2(2) (1999) 131-141.
- [15] P. Soroushian, K. Obaseki, M. Rojas, S. Jongsung, Analysis of Dowel Bars Acting Against Concrete Core, *ACI Structural Journal*, 83(4) (1986) 642-649.
- [16] N.M. Hawkins, D. Mitchell, Progressive collapse of flat plate structures, *ACI Journal*, 76(10) (1979) 775-808.
- [17] G.S. Melo, P.E. Regan, Post-punching resistance of connections between flat slabs and interior columns, *Magazine of Concrete Research*, 50(4) (1998) 319-327.
- [18] F. Knoll, T. Vogel, Design for Robustness, *Structural Engineering Documents*, 11 (2009) 99-105.
- [19] Y. Mirzaei, A. Muttoni, Tests of the post punching behavior of the reinforced concrete flat slabs, in: *IBETON*, Switzerland, 2008.
- [20] L. Keyvani, M. Sasani, Y. Mirzaei, R.M. Fernández, Compressive membrane action in progressive collapse resistance of RC flat plates, *Engineering Structures*, 59 (2014) 554-564.
- [21] D. Mitchell, W.D. Cook, Preventing Progressive Collapse of Slab Structures, *Journal of Structural Engineering*, 110(7) (1984) 1513-1532.
- [22] C.E. Broms, Elimination of Flat Plate Punching Failure Mode, *ACI Structural Journal*, 97(1) (2000) 94-101.
- Plaza Collapse in Fairfax County, Virginia, Centre for Building Technology Report BSS 94, Institute for Applied Technology, National Bureau of Standards, Washington, D.C, 57 (1973) 36-43.
- [3] H.S. Lew, N.J. Carino, S.G. Fattal, Cause of the Condominium Collapse in Cocoa Beach, Florida, *Concrete International*, American Concrete Institute, 4 (1982) 64-73.
- [4] D. Mitchell, J. Adams, R.H. DeVall, R.C. Lo, D. Weichert, Lessons from the 1985 Mexican Earthquake, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 13(5) (1986) 535-557.
- [5] R.M. Fernández, Y. Mirzaei, A. Muttoni, Post-Punching Behavior of Flat Slabs, *ACI Structural Journal*, 110 (2013) 801-812.
- [6] Muttoni, Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement, *ACI Structural Journal*, 105(4) (2008) 440-450.
- [7] ASCE, Shear strength of reinforced concrete member slabs, in: *ACI-ASCE Committee 426*, 1974, pp. 543-1591.
- [8] P. MeÛtrety, Synthesis of punching failure in reinforced concrete, *Cement & Concrete Composites Journal*, 24 (2002) 497-507.
- [9] M.H. Sharaf, K.A. Soudki, M. VanDusen, CFRP strengthening for punching shear of interior slab-column connections, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 10(5) (2009) 410-418.
- [10] F. Habibi, E. Redl, M. Egberts, W. Cook, D. Mitchell, Assessment of CSA A23.3 Structural integrity requirements for two-way slabs, *Canadian Journal Civil Engineering*, 39(4) (2012) 351-361.
- [11] D. Mitchell, Controversial Issues in the Seismic Design of Reinforced Concrete Frames, *Recent Developments in Lateral Force Transfer in Buildings*, Thomas Paulay

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Sarvari, M.R. Esfahani, An experimental study on post-punching behavior of flat slabs to prevent progressive collapse, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(11) (2021) 2887-2898.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16471.6245](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16471.6245)

