

## بررسی نقش مقاومت برشی سیمان در ظرفیت باربری میل مهار های تزریق شده

مهدی موسوی

استادیار گروه مهندسی معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

پرویز معارف وند

استادیار گروه مهندسی معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

مصطفی پاشانجاتی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد گروه مهندسی معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۰/۷/۱۴، تاریخ تصویب ۸۱/۳/۴)

### چکیده

در این تحقیق سعی شده است تا با انجام تعدادی آزمایش در سلول فشار سه محوری (موسوم به سلول تغییر یافته هوک) که بدین منظور طراحی و ساخته شده است ظرفیت چسبندگی بولت به سیمان را برای انواع بولت آج دار تحت شرایط مختلف فشار جانبی بدست آورد. بدین منظور نمونه هایی از آرماتورهای نوع A3 (که به وفور برای نگهداری سازه های سنگی مورد استفاده قرار می گیرند) و همچنین میل گردهای تمام رزوه موسوم به Dywidag توسط سیمان پرتلند تزریق و آماده می شوند. بعلاوه برای ارزیابی شکل آج در میزان باربری بولت تعدادی بولت با شکل آج طراحی شده جدید نیز ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند. این نمونه ها پس از قرار گرفتن در سلول فشار بکمک روغن هیدرولیک تحت فشار ثابت جانبی قرار گرفته و همزمان توسط جک مخصوصی از داخل سیمان کشیده می شوند. رابطه جابجایی محوری - بار محوری بولت و همچنین اتساع جانبی نمونه در هنگام آزمایش با استفاده از یک سیستم اتوماتیک جمع آوری داده<sup>۱</sup> ترسیم می شود. در این گزارش سیستم استفاده شده و نحوه انجام آزمایش بیان و نتایج بدست آمده تفسیر و نتیجه گیری می شوند. با توجه به اطلاعات بدست آمده از انواع بولت های متداول و نیز بولت های جدید ساخته شده میتوان گفت که شکل آج تاثیر قابل ملاحظه ای بر روی میزان چسبندگی ندارد مشروط بر آنکه سطح سیمان تحت برش و اتساع در بولتهای گوناگون مساوی باقی بماند. به عبارت دیگر عامل کنترل کننده در میزان چسبندگی بدست آمده در یک آزمایش کشش محوری، سطحی از سیمان است که تحت برش قرار می گیرد نه شکل آج.

واژه های کلیدی: ظرفیت چسبندگی، بولت، سیمان، تست کشش

### مقدمه

مطالعات زیادی در زمینه استفاده از بولت به عنوان تقویت کننده فعال در سازه های سنگی و روشهای افزایش ظرفیت باربری آنها صورت گرفته است. در این میان عوامل زیادی مستقیماً بر روی ظرفیت باربری تاثیر می گذارند از جمله مهمترین این عوامل مقدار فشار جانبی است که بطور شعاعی پیرامون بولت تزریق شده اعمال می گردد. ظرفیت باربری بولت با تغییر این فشار می تواند تغییرات فاحشی از خود نشان دهد. همچنین نوع آج که تعیین کننده سطح برش سیمان است نقش بسیار عمده ای در ظرفیت باربری ایفا می کند.

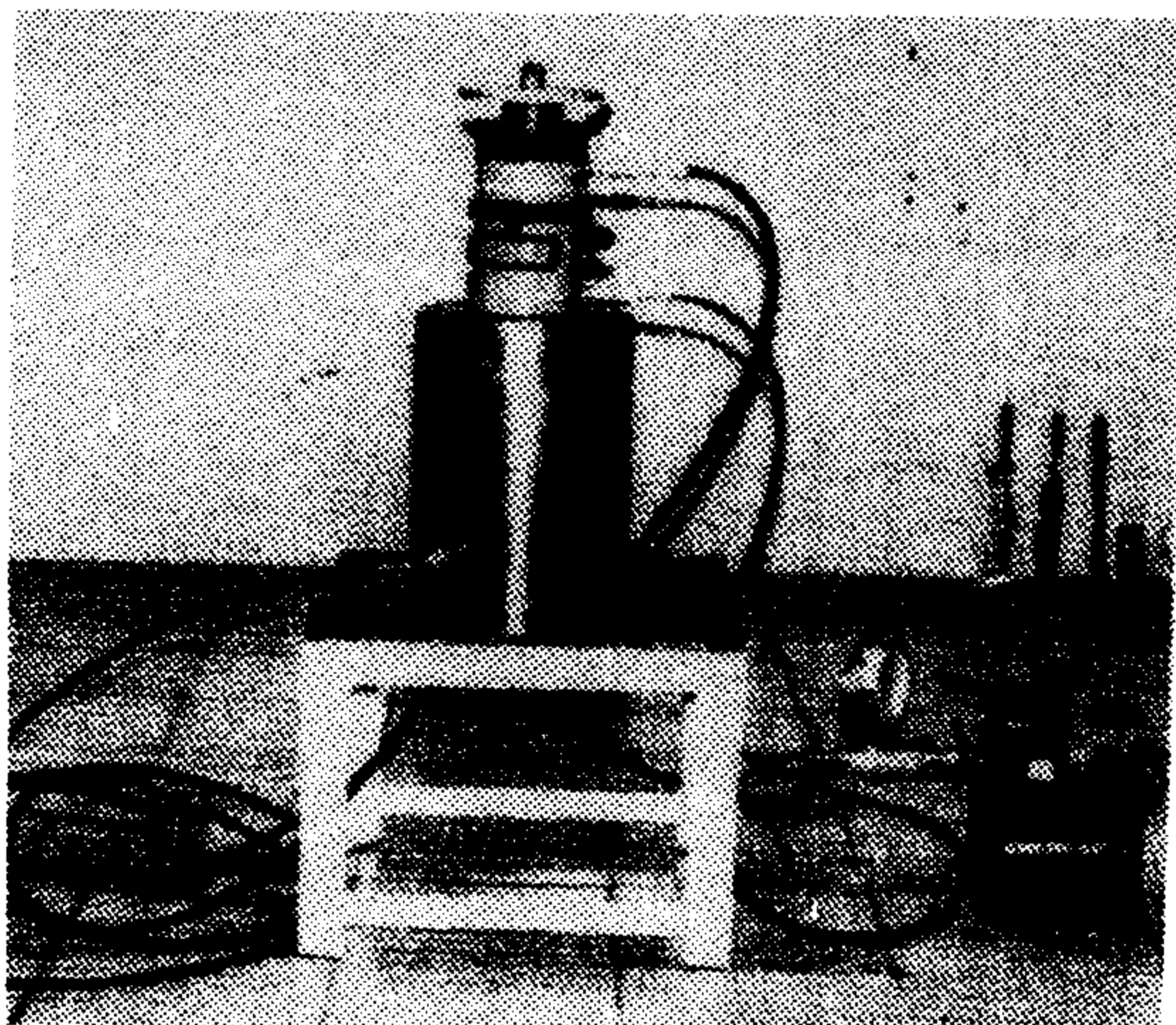
### مطالعات آزمایشگاهی بر روی ظرفیت

#### چسبندگی بولت به سیمان

هدف از انجام این آزمایشها شبیه سازی رفتار بولت تزریق شده و تحت کشش قرار دادن آن در آزمایشگاه در شرایط فشار ثابت جانبی می باشد. در این مجموعه آزمایش، از آرماتورهای مختلف با شکل آجهای گوناگون استفاده شده است تا صحت این تئوری بررسی گردد که آیا شکل آج در مقدار ظرفیت باربری بولت بیشتر موثر است یا مقدار سیمان بریده شده و مقاومت برشی آن. در انجام آزمایش مذکور از سلول هوک اصلاح شده استفاده گردید تا بتوان بکمک آن فشار جانبی اعمالی به نمونه را در حین

جهت انجام آزمایش کشش بولت<sup>۲</sup> تحت تنش جانبی ثابت که در آن یک بولت در داخل سیمان قالب ریزی شده این سلول تغییراتی همچون بزرگتر شدن ابعاد و تعداد قطعات یافت. از این رو سلول جدید تحت عنوان سلول تغییر یافته هوک (M.H.C)<sup>۳</sup> نام گذاری گردید و بصورت خلاصه M.H.C نامیده شد که نمایی از آن در شکل (۲) آورده شده است.

در سلول اولیه هوک، نیرو و جابجایی عمودی بولت و فشار جانبی اندازه گیری می‌گردد ولی در M.H.C علاوه بر سه پارامتر مذکور، جابجایی شعاعی نمونه نیز قابل اندازه‌گیری است. با توجه به استفاده از وسایل الکتریکی در داخل سلول (سنسورهای الکتریکی و گیج‌های کرنش) نمی‌توان از آب به عنوان سیال محصور کننده استفاده کرد و روغن هیدرولیک سیال متداول مورد استفاده می‌باشد.



شکل ۲: سلول سه محوره هوک تغییر یافته برای این طرح.

سلول M.H.C قابلیت تبدیل به سلول اولیه هوک را نیز دارد و با تعویض قطعه درپوش بالایی می‌توان آزمایش سه محوره را نیز انجام داد. بدلیل ابعاد بزرگ نمونه‌ها در M.H.C (بویژه طول نمونه)، ابعاد سلول نیز بزرگ‌تر است.

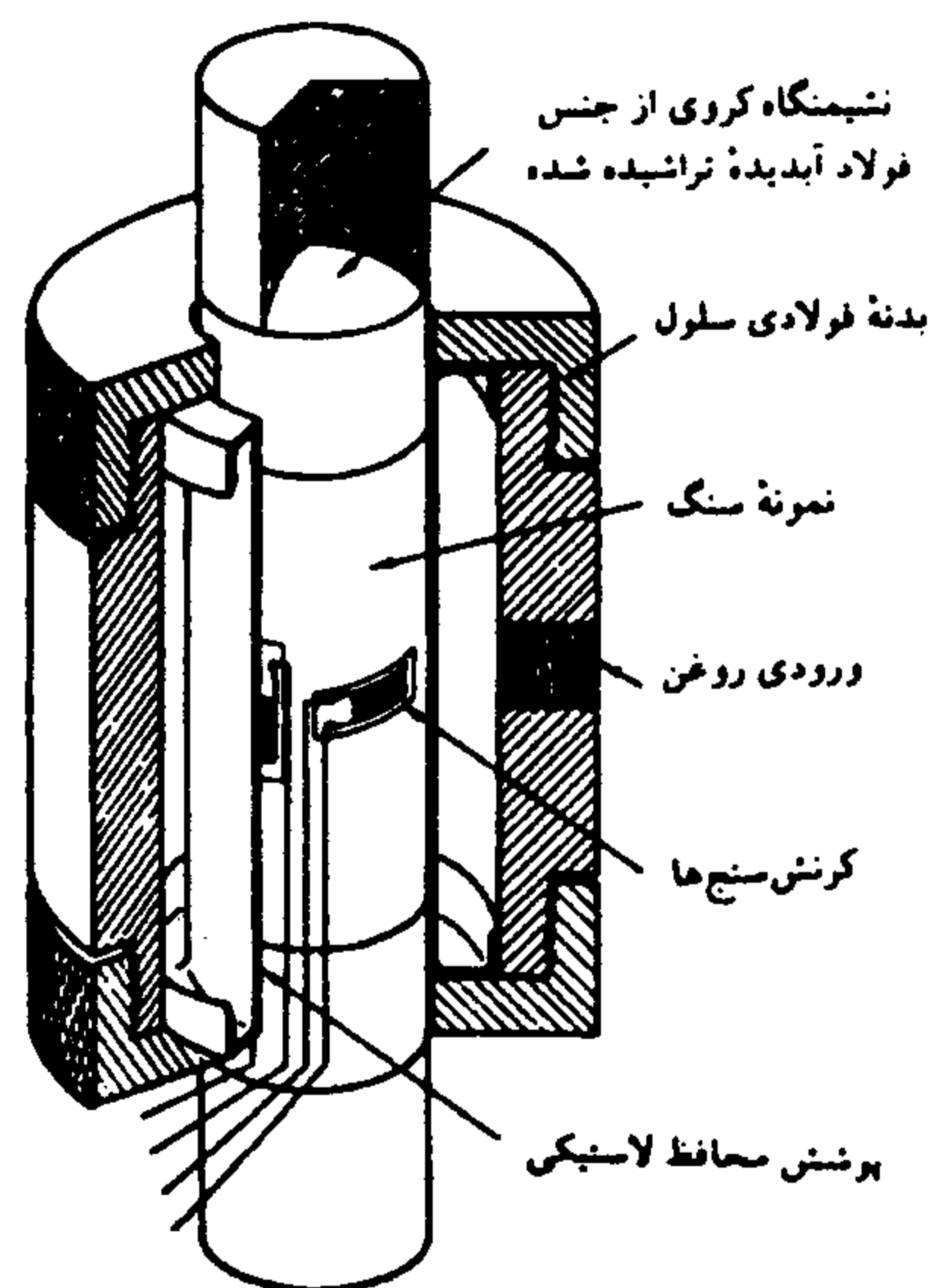
### آماده سازی نمونه

بولت‌های مورد استفاده در این تحقیق علاوه بر نمونه‌های آج دار معمولی مورد استفاده در صنایع ساختمانی تعدادی بولت با آجهای خاص، طراحی شده توسط محققین را نیز تشکیل می‌دهد. در شکل (۳) نمونه‌هایی از این نوع بولتها مشاهده می‌گردند. شکل و

آزمایش ثابت نگاه داشت. اعمال فشار توسط روغن هیدرولیک در داخل سلول و پیرامون نمونه انجام پذیرفت. بمنظور بررسی صحت تئوری بالا سه نوع بولت با اشکال آج جدید ساخته شد بنحوی که ضمن متفاوت بودن شکل آجها، سطح سیمانی که در اثنای کشش بولت بریده می‌شود ثابت باقی بماند. پارامترهای ثبت شده در این آزمایش عبارتند از فشار جانبی، جابجایی محوری و نیروی کشش محوری بولت و همچنین جابجایی شعاعی سیمان که سه پارامتر اخیر در توجیه رفتار چسبندگی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

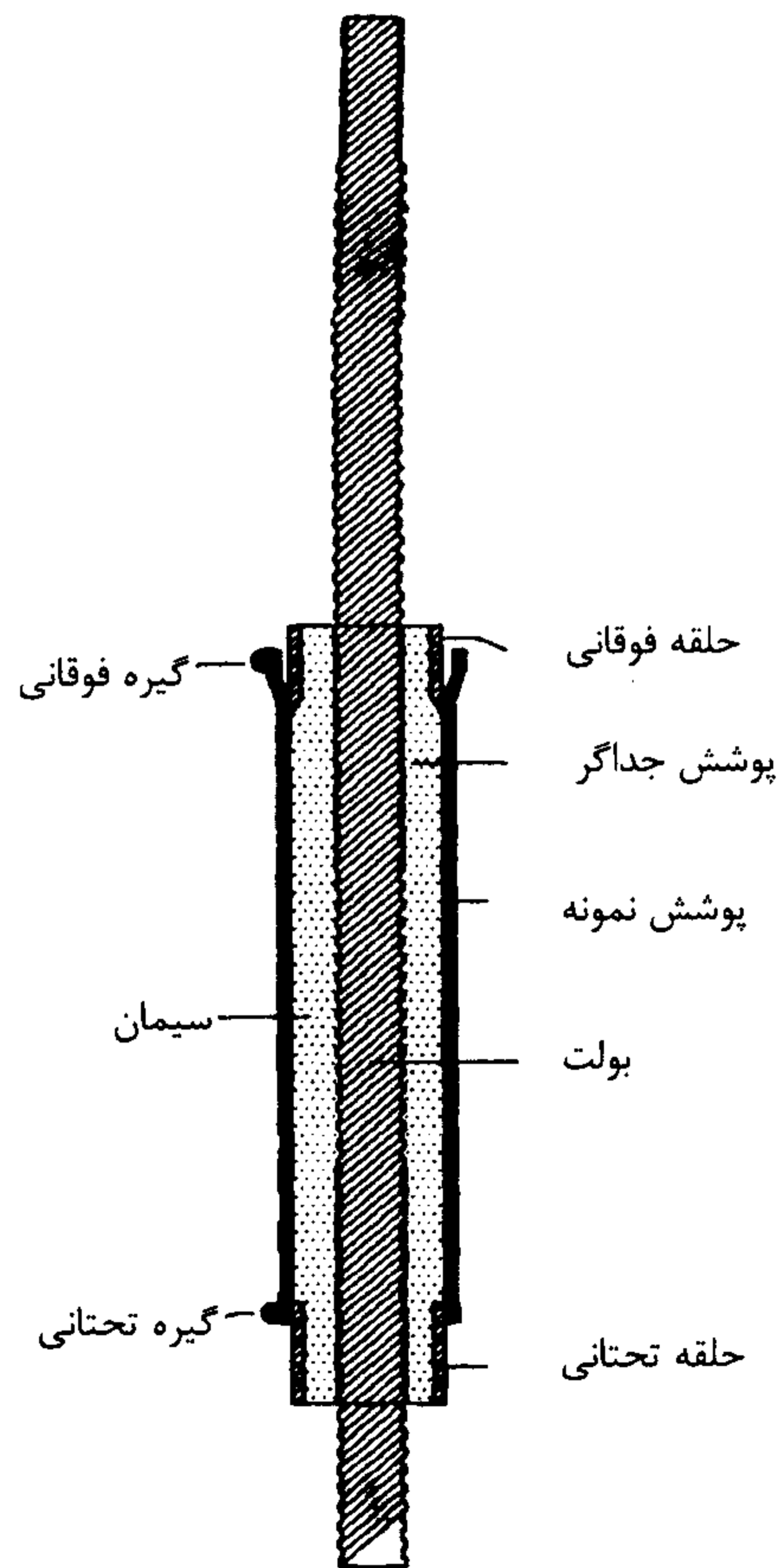
### سلول اصلاح شده هوک

جهت شبیه سازی رفتار سنگ بصورت برجا و نیز تنشهای پیرامونی که در محیط سنگی فعال هستند می‌توان از سلول هوک استفاده کرد. این وسیله در سال ۱۹۶۸ توسط هوک و فرانکلین ساخته شد که در آن تنشهای  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  با هم برابر بوده و به عنوان فشار جانبی به نمونه اعمال می‌شوند. این دستگاه جهت انجام آزمایشهای سه محوره فشاری سنگ استفاده می‌شود. نمایی از سلول هوک و فرانکلین در شکل (۱) آمده است. فشار جانبی توسط یک سیال (معمولاً روغن هیدرولیک) اعمال می‌گردد.



شکل ۱: سلول سه محوره هوک اصلی.

آزمایش ۲۸ روز پس از زمان قالب ریزی می‌باشد. مقاومت نمونه های سیمان مورد استفاده ۳۰ مگاپاسکال اندازه گرفته شد.



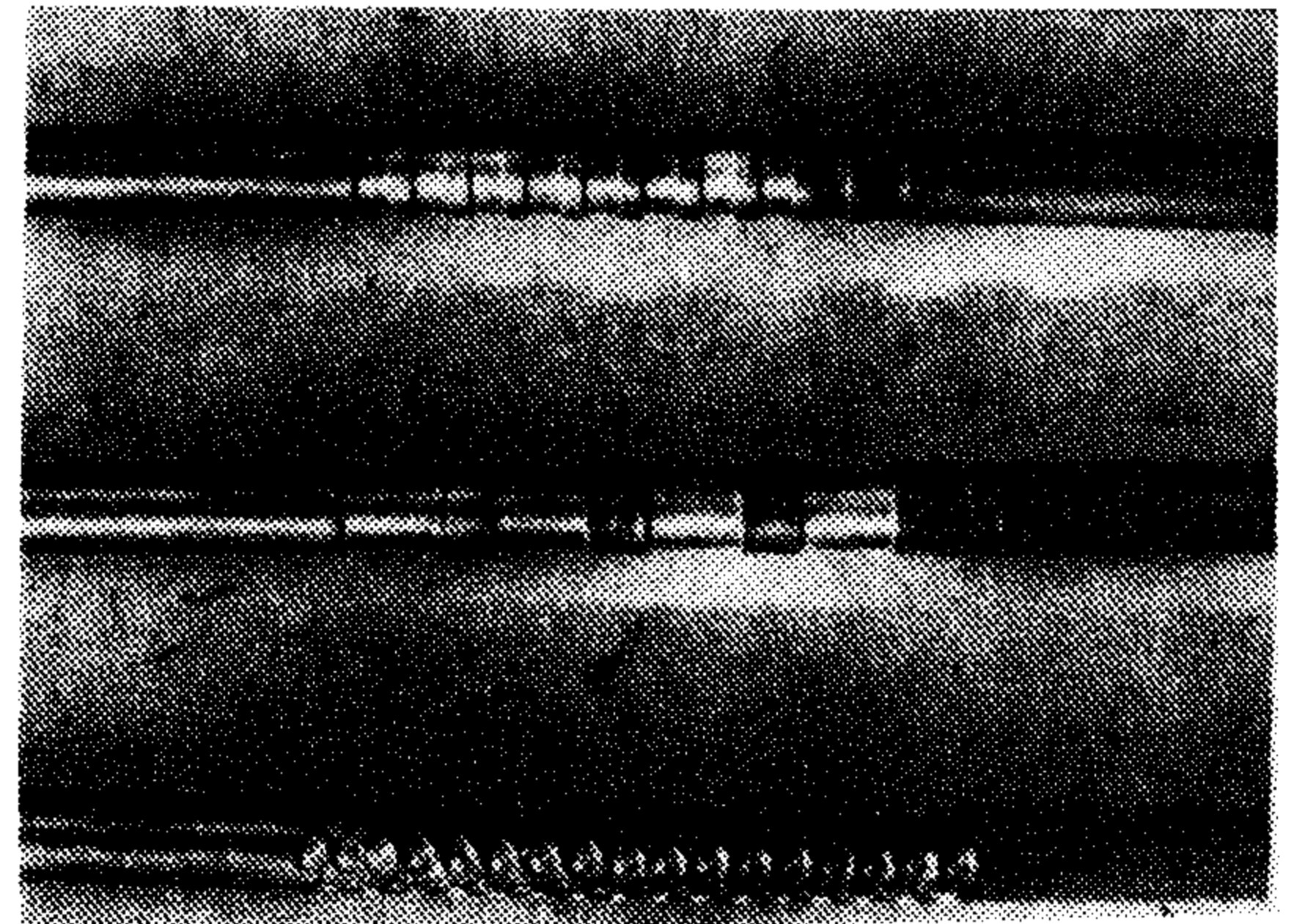
شکل ۴: جزئیات یک نمونه در داخل سیمان.

#### دستگاههای اندازه گیری

در آزمایش کشش بولت ثبت چندین پارامتر از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد: فشار جانبی وارد بر نمونه‌ها، نیروی کشش بولت، جابجایی محوری بولت و جابجایی شعاعی نمونه، که هر یک از این پارامترها توسط سنسور خاصی اندازه‌گیری می‌شوند.

قرائت‌های انجام شده تماماً توسط وسایل الکتریکی صورت پذیرفته است. لازمه ثبت چنین اطلاعاتی در اختیار داشتن دستگاه ثبت اتوماتیک داده‌ها<sup>۴</sup> است. دستگاه مذکور شامل هشت کانال جدا از هم با قابلیت دریافت ولتاژ و آمپر است. داده‌ها با جمع آوری و پردازش و فرایند نرم افزاری بصورت اطلاعات خام در اختیار قرار می‌گیرند. اندازه‌گیری فشار داخل سلول و بارسنج توسط مبدل فشار<sup>۵</sup> انجام می‌گیرد. در واقع فشار داخل سلول معرف محصوریت

تعداد آجها در این نمونه‌ها بنحوی است که سطح سیمان تحت برش در اثنای تست کشش ثابت باقی می‌ماند. از بالا به پائین به ترتیب بولتهای Pm10 (با ۱۰ آج)، Pm4 (با ۴ آج) و Pmz (لانه زنبوری) نمونه‌های ساخته شده را تشکیل می‌دهند.



شکل ۳: نمونه‌هایی از بولتهای با آج طراحی شده

از آنجائیکه قطر چالهایی که جهت نصب میل مهار تزریقی حفر می‌گردند در حالت استاندارد ۲/۵in یا ۶۳/۵mm می‌باشد نمونه‌های آزمایش نیز با قطر ۲/۵in آماده گردید. نمونه‌ها میل مهارهای AIII آجدار با قطرهای ۲۸ و ۲۲ میلیمتر و Dywidag با قطر ۲۰mm و AIII با آج‌های تغییر یافته با قطر ۲۲mm می‌باشند که در اطراف آنها دوغاب سیمانی به قطر ۶۳/۵mm با طول ۳۸۷mm قرار گرفته است که ۹۵mm از آنرا حلقه‌های فولادی بالا و پائین نمونه در بر گرفته است. ساختار نمونه در قالبی از جنس PVC ریخته شده است که تزریق از جهت انتهایی نمونه صورت می‌گیرد. در واقع نمونه از چند جزء تشکیل شده است: سیمان، بولت، حلقه‌های فولادی بالا و پائین و پلاستیک یا شیلنگ جهت جدا کردن قسمتی از بولت از تماس با سیمان<sup>۴</sup>. در شکل (۴) نمایی کامل از یک نمونه آورده شده است.

از کل طول این نمونه فقط مقدار مشخصی در تماس مستقیم با سیمان است که در سری آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش طول درگیری<sup>۵</sup> ۱۵۰mm انتخاب گردید و نوع سیمان مصرفی، پرتلند نوع I می‌باشد که نسبت آب به سیمان (W:C) در آن ۰/۴. در نظر گرفته شده. از آنجا که گیرش سیمان ۲۸ روزه می‌باشد انجام

گردد. در برخی موارد بدلیل ناکافی بودن تعداد نمونه ها تنها یک آزمایش انجام پذیرفت و نتیجه بر اساس همان یک آزمایش تفسیر گردید. آزمایشها در فشارهای جانبی  $1\text{MPa}$ ،  $1/5\text{MPa}$ ،  $2\text{MPa}$ ،  $3/5\text{MPa}$  و  $5\text{MPa}$  و  $7/5\text{MPa}$  انجام پذیرفت و منحنی چسبندگی و اتساع (جابجایی شعاعی) برای هر آزمایش در شرایط مورد نظر رسم گردید. میانگین چسبندگی و اتساع نیز برای بولت های یکسان و نیز شرایط یکسان بطور جداگانه در شکل‌های (۵) تا (۱۴) آورده شده اند.

جدول ۱: مجموعه تست‌های موفق انجام شده.

مشخصات نمونه	فشار جانبی (مگاپاسکال)					
	1	1.5	2	3.5	5	7.5
P28 W:C=0.4 EL=150 mm			2	1	1	1
P22 W:C=0.4 EL=150 mm	2	3	3	2	3	1
Pm10 W:C=0.4 EL=150 mm			2	2	2	1
Pm4 W:C=0.4 EL=150 mm			2	2	2	1
Dywidag 20 W:C=0.4 EL=150 mm	1		1		1	1
Pmz W:C=0.4 EL=150 mm			3		1	

متذکر می گردد که به دلیل قطر ۲۰ میلیمتری بولتهای تمام رزوه Dywidag منحنی های چسبندگی بر اساس (Bond) نیز ارائه شده تا بتوان نتایج بولتهای غیر هم قطر را با یکدیگر مقایسه نمود. همچنین منظور از بولت

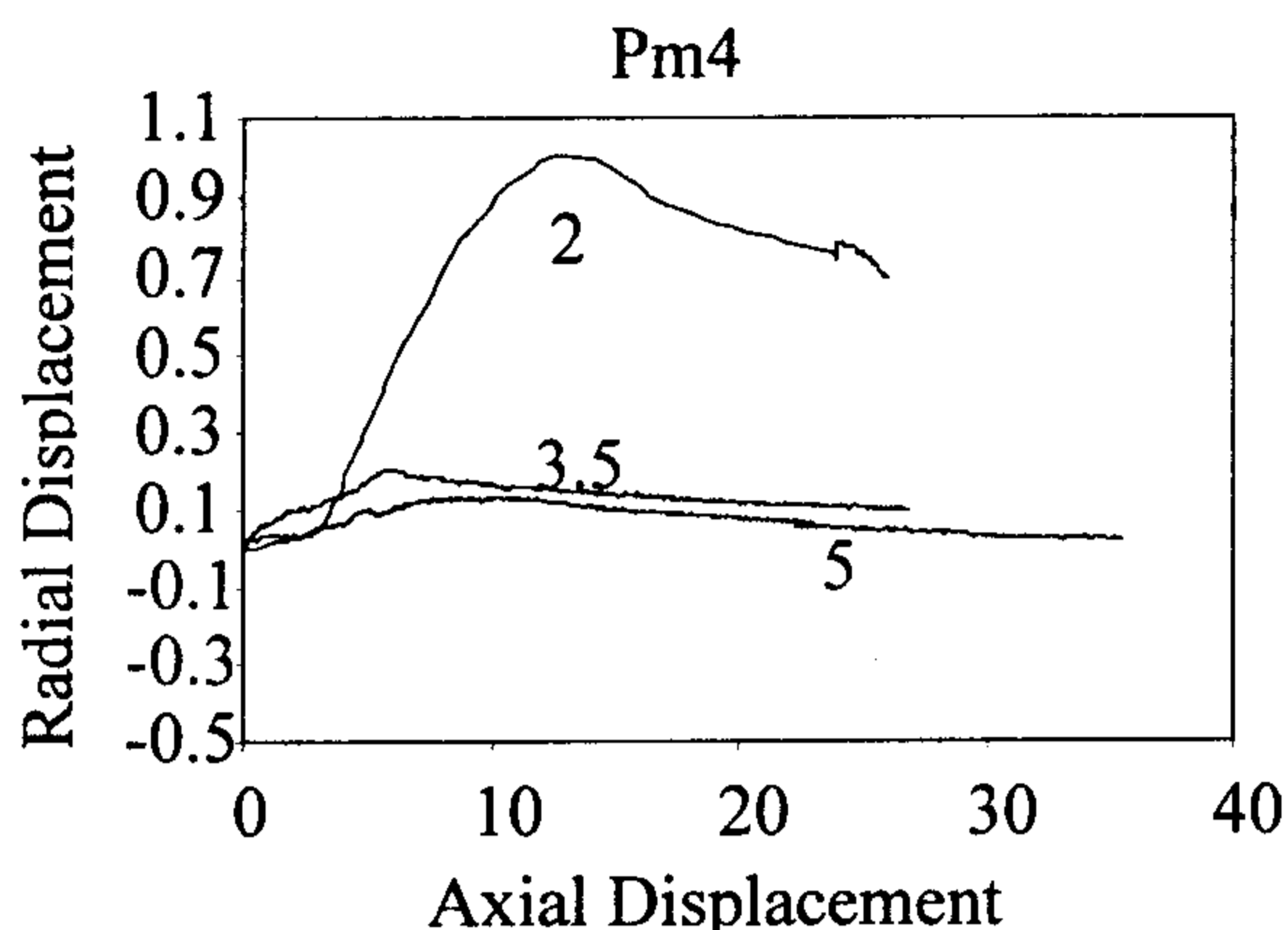
شعاعی و نیروی بارسنج معرف نیرویی است که بولت با آن از داخل سیمان کشیده می شود. این ترانسدیوسرها قابلیت سنجش فشار در دامنه  $0 - 250\text{ bar}$  را داشته و خروجی آنها در محدوده  $20 - 4$  میلی آمپر است. بازوهایی که وظیفه ثبت اتساع جانبی نمونه را بر عهده دارند دارای دو کرنش سنج در دو طرف خود هستند. این دو کرنش سنج در بیرون سلول همراه با یک پتانسیومتر تشکیل پل وتسون داده و بدین طریق حساسیت بازوها به تغییر شکل بسیار بالا می رود و قرائت‌ها را ساده می کند. چهار بازوی مصرفی دو به دو روبروی هم قرار دارند. جابجایی شعاعی کل، متوسط اندازه گیری این چهار بازو است. با وجود این چهار بازو ورود و خروج نمونه ها از داخل سلول باید با دقت زیادی انجام گیرد. جهت اندازه گیری جابجایی قائم معمولاً از LVDT یا پتانسیومتر استفاده می گردد. در این آزمایشها با استفاده از یک سیستم ساده جابجایی خطی تبدیل به جابجایی چرخشی شده و از یک پتانسیومتر چرخشی برای اندازه گیری جابجایی قائم بولت استفاده شده است. این وسیله، جابجایی بولت را به عنوان تابعی خطی از ولتاژ نمایش می دهد.

### شرح نتایج آزمایش

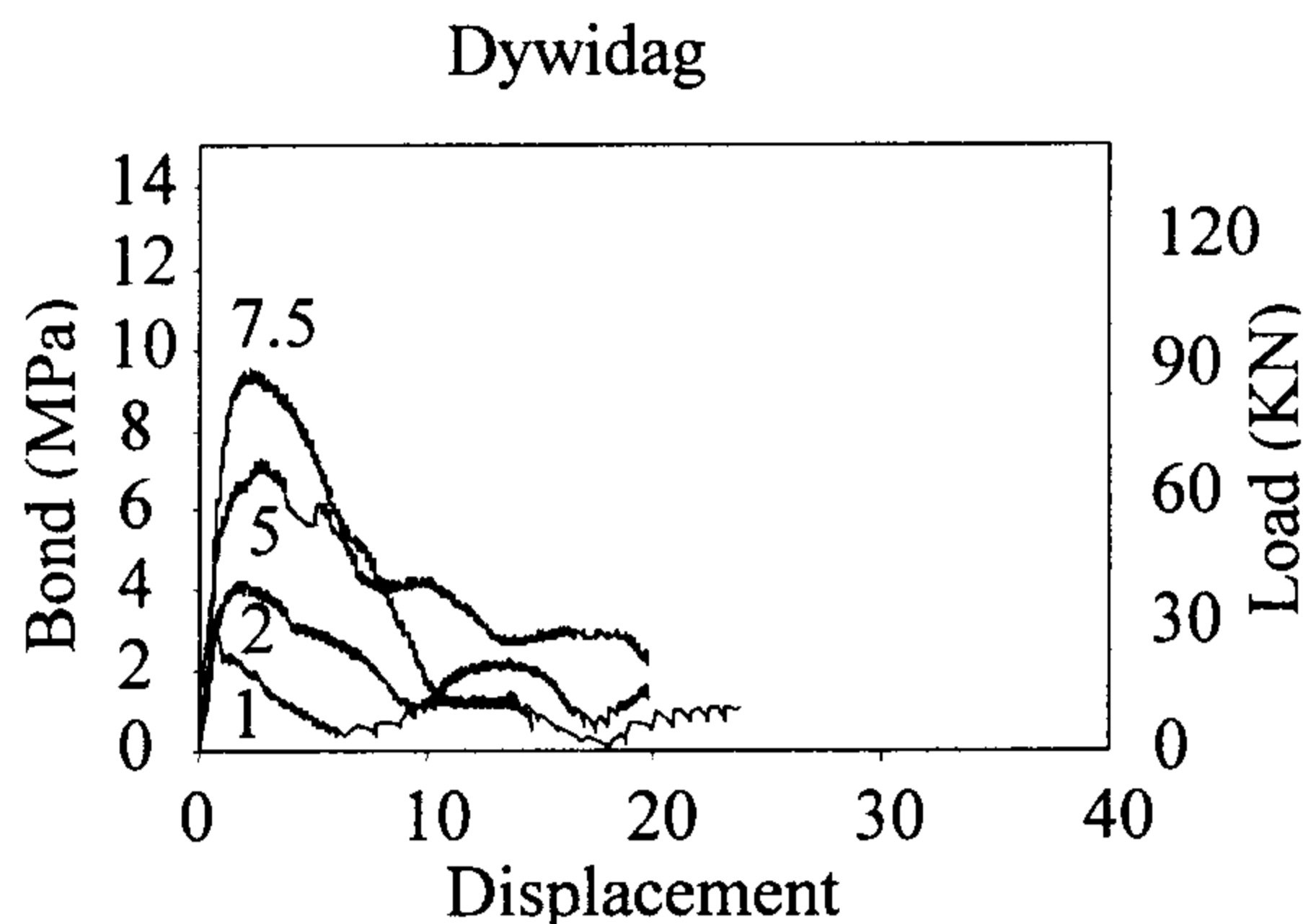
در این تحقیق، تعداد ۶۶ نمونه آزمایش شد که نتایج تعدادی از آزمایشها بدلائل مختلف قابل استفاده نمی باشد. آن تعداد از نمونه هایی که در آزمایشها جوابهای قابل قبول دارند در جدول (۱) آورده شده اند. تعداد هفت پارامتر توسط دستگاههای اندازه گیری الکتریکی ثبت می شوند که عبارتند از چهار قرائت مربوط به جابجایی شعاعی و دو قرائت مربوط به فشار بارسنج و سلول. برای هر آزمایش دو منحنی ظرفیت چسبندگی - لغزش و اتساع - لغزش ارائه شده است که نشان دهنده رفتار چسبندگی بولت به سیمان می باشد. در منحنی اتساع، میانگین قرائت‌های چهار کرنش سنج در نظر گرفته شده است و در پایان منحنی متوسطی برای بولت‌های مختلف رسم شده است.

سعی گردید تا هر آزمایش بر روی حد اقل دو نمونه انجام گیرد تا جوابهای نهایی با توجه به دو سری آزمایش، متوسط گیری و بیان گردند و تکرار پذیری نتایج نیز کنترل

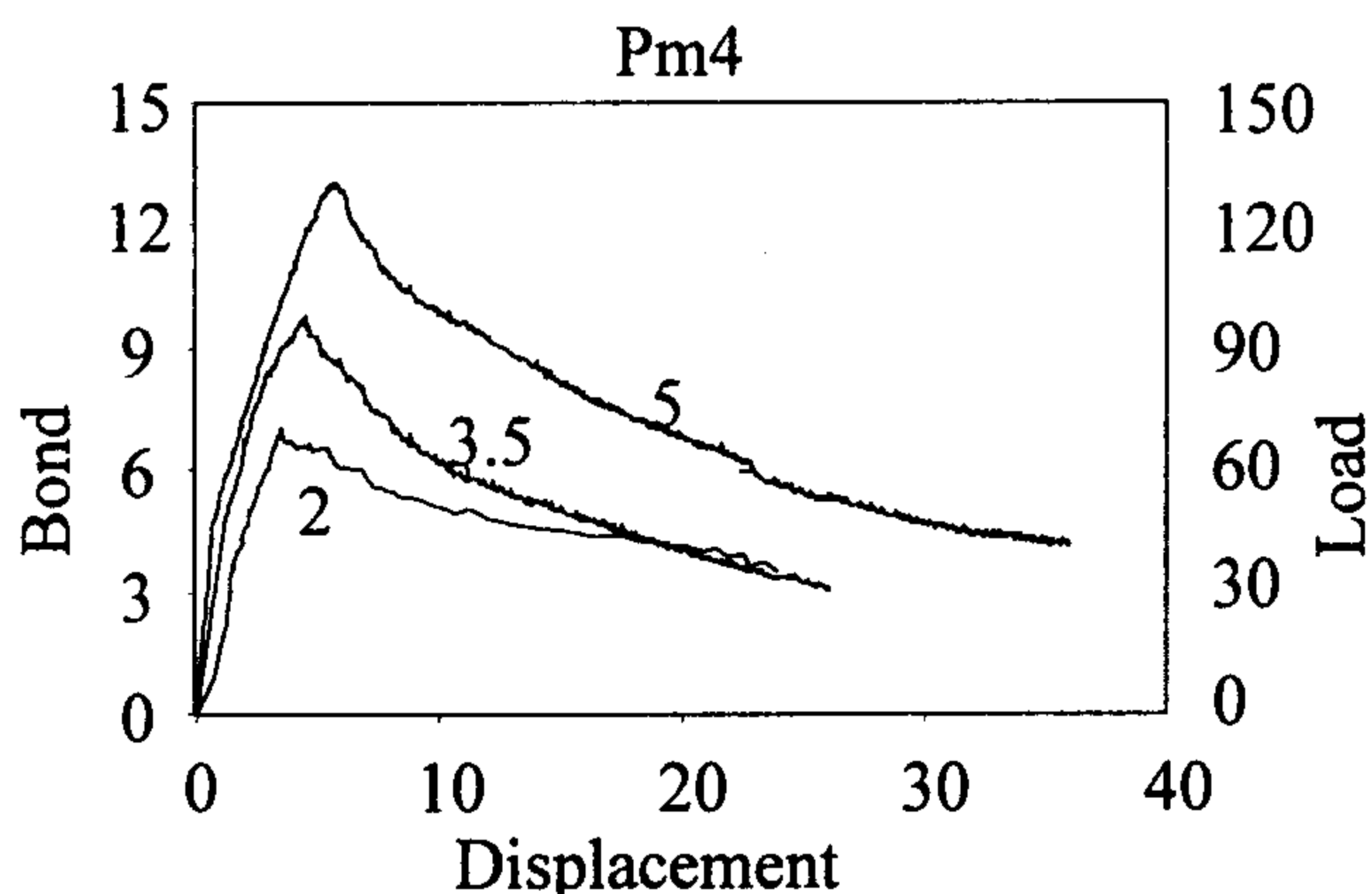
Dywidag در اینجا هر گونه بولت تمام رزوه است و اختصاص به شرکت DSI ندارد.



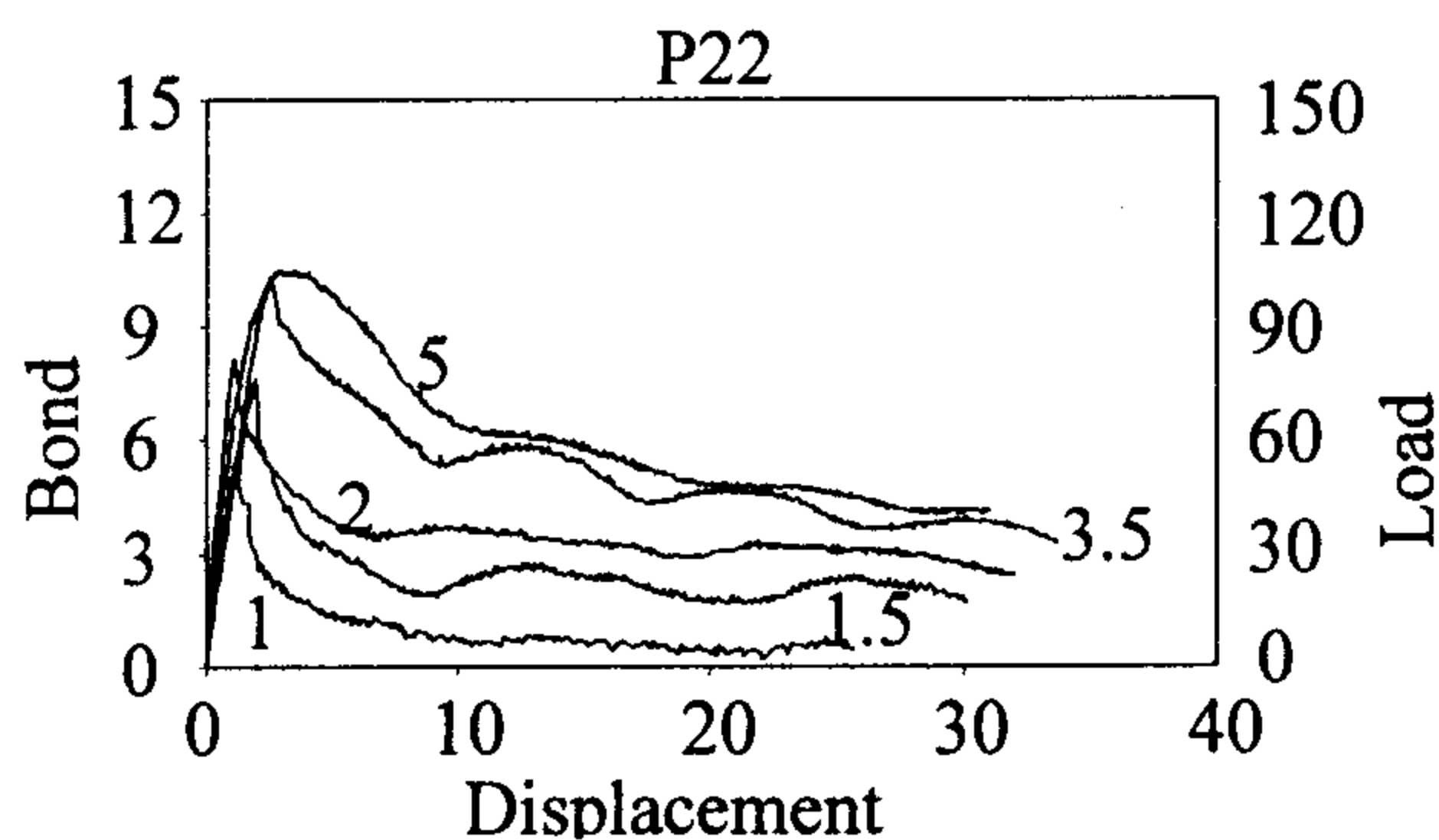
شکل ۸: نمودار چسبندگی در فشارهای جانبی ۲/۵، ۳ و ۵ مگاپاسکال در بولت آجدار ساخته شده با ۴ ردیف آج پهن با قطر بولت ۲۲mm.



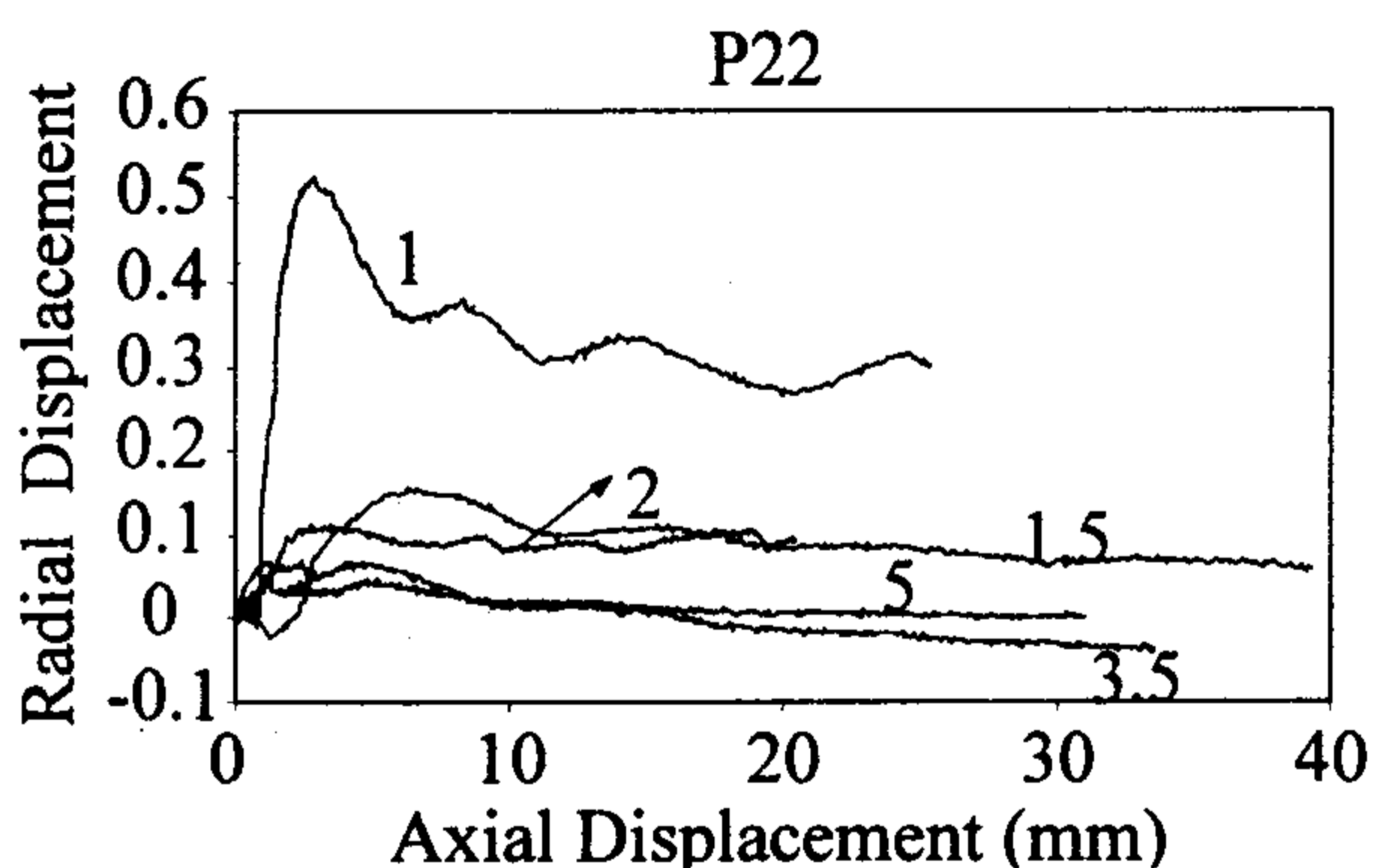
شکل ۵: نمودار چسبندگی در فشارهای جانبی ۱، ۲، ۵ و ۷/۵ مگاپاسکال در بولت Dywidag با قطر ۲۰mm.



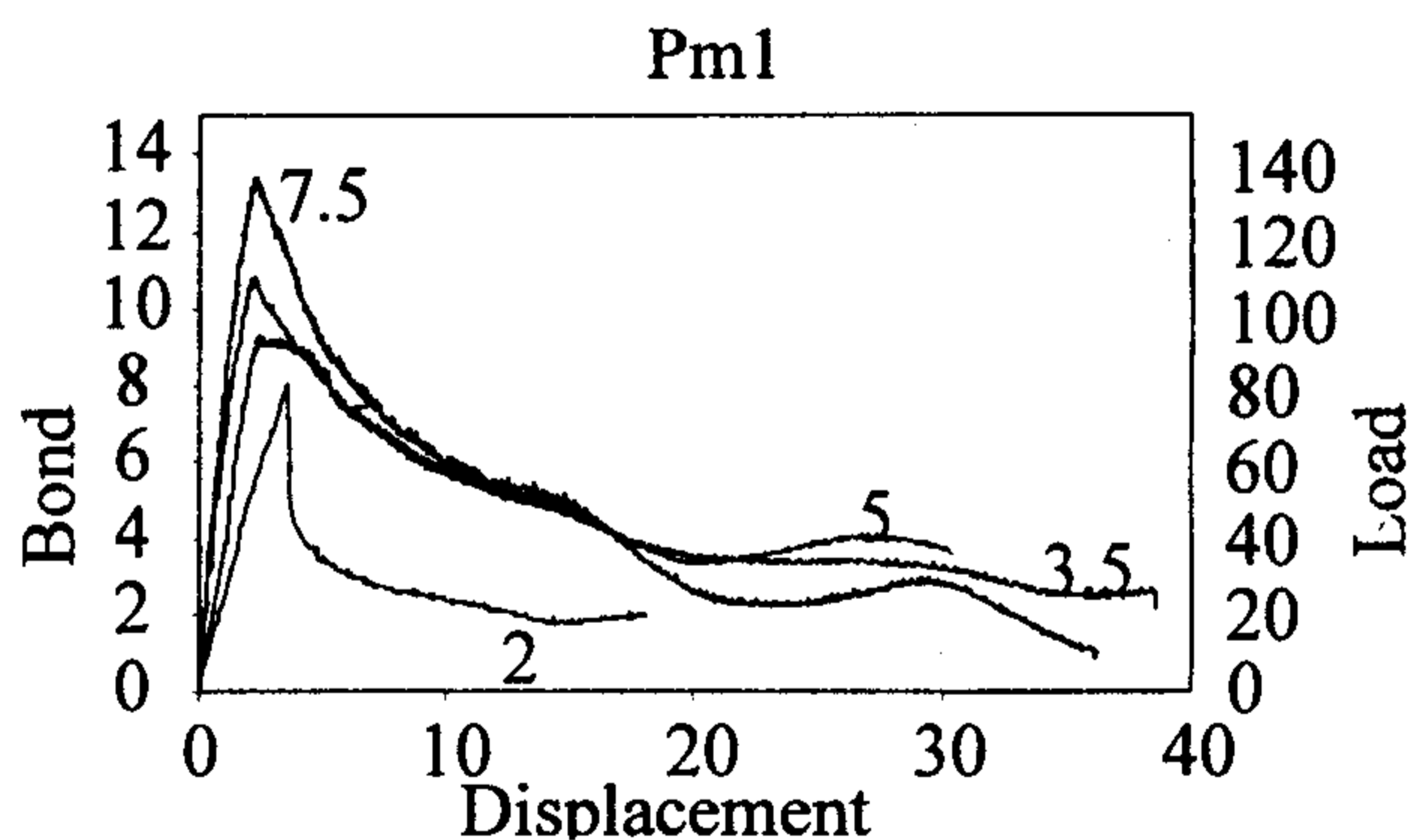
شکل ۹: نمودار اتساع در فشارهای جانبی ۲/۵، ۳ و ۵ مگاپاسکال در بولت آجدار با ۴ ردیف آج پهن با قطر ۲۲mm.



شکل ۶: نمودار چسبندگی در فشارهای جانبی ۱، ۱/۵، ۲، ۳/۵ و ۵ مگاپاسکال در بولت آجدار با قطر ۲۲mm.



شکل ۱۰: نمودار اتساع در فشارهای جانبی ۱، ۱/۵، ۲، ۳/۵ و ۵ مگاپاسکال در بولت آجدار با قطر ۲۲mm.



شکل ۷: نمودار چسبندگی در فشارهای جانبی ۲/۵، ۳/۵، ۵ و ۷/۵ مگاپاسکال در بولت آجدار ساخته شده با ۱۰ ردیف آج باریک با قطر بولت ۲۲mm.

مگاپاسکال می باشد. این مقادیر برای فشار جانبی ۳/۵ مگاپاسکال در حدود ۹-۱۰ و در مقاومت باقیمانده به ۴ مگاپاسکال می رسد. در فشار جانبی ۵ مگاپاسکال نقطه اوج در مقاومت ۱۰-۱۲ مگاپاسکال و مقاومت باقیمانده در حدود ۴ مگاپاسکال اتفاق می افتد.

برای مقایسه بین نتایج بولتهای با آج مختلف تحت شرایط فشار جانبی یکسان مطابق شکل‌های (۱۳ و ۱۴) میتوان مشاهده نمود که تحت شرایط فشار جانبی ثابت (جایی که در آن اتساع نمونه تاثیری در تغییر فشار جانبی کننده ندارد) شکل آج تاثیر بسزایی در مقدار مقاومت نهایی و باقیمانده بولت ندارد بلکه عامل تعیین کننده ظرفیت، سطح بریده شده سیمان است که با هندسه و مقدار آجها مرتبط است.

هر چه بر تعداد آجها افزوده می شود (نظیر نمونه های P22, Pm10, Dywidag)، میتوان پستی و بلندیهای متناوبی را در منحنی بار - جابجایی مشاهده کرد که طول موج مشاهده شده مساوی فاصله آجها است. با کاهش تعداد آجها و افزوده شدن عرض هر یک (نظیر نمونه های Pm4)، این اثر کمتر قابل ملاحظه است.

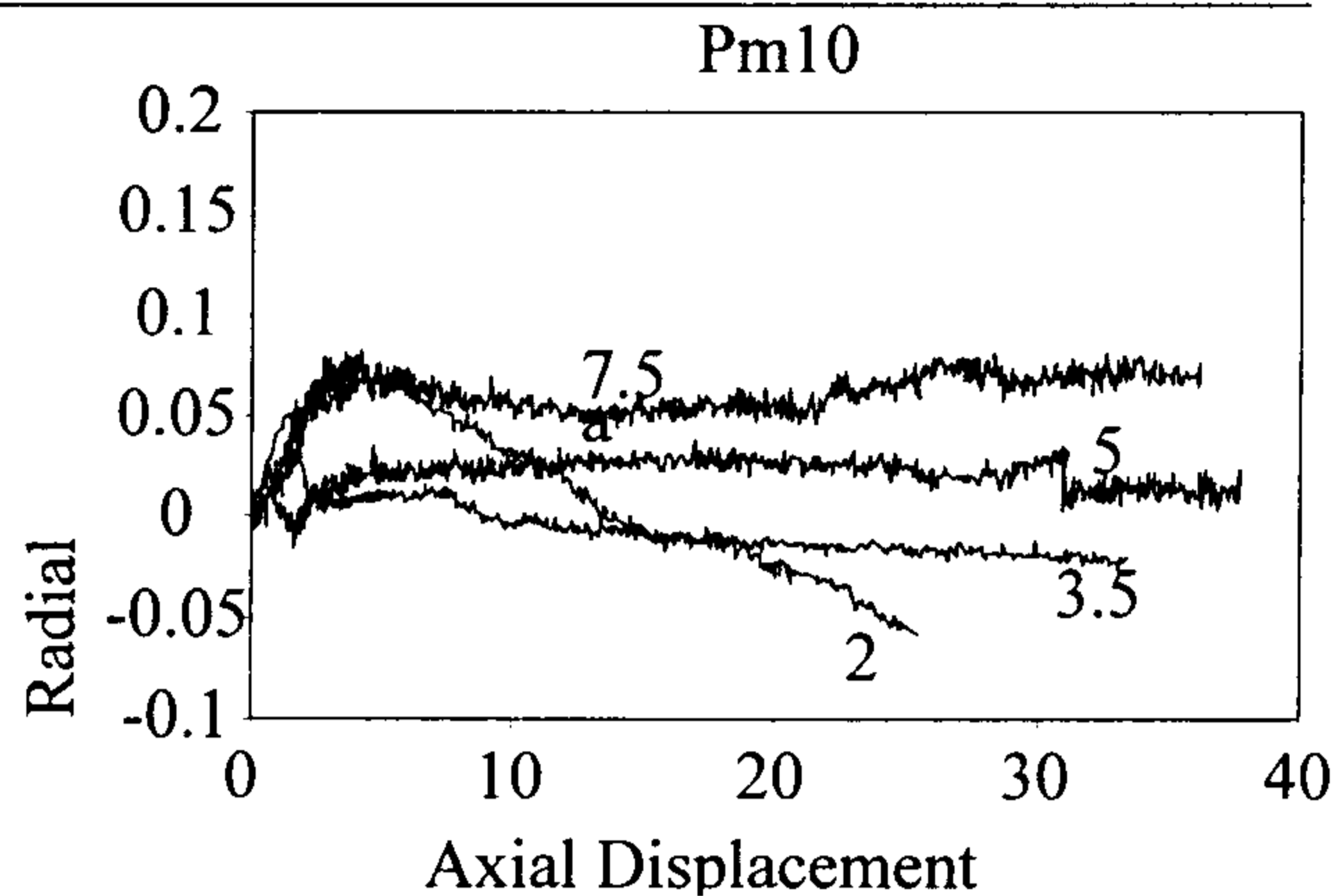
در مورد اتساع مشاهده شده در نمونه ها میتوان گفت:

با افزایش فشار جانبی در برابر بوجود آمدن جابجایی شعاعی مقاومت ایجاد می شود و در نتیجه در تمامی نمونه های بولت، از اتساع اوج کاسته می شود.

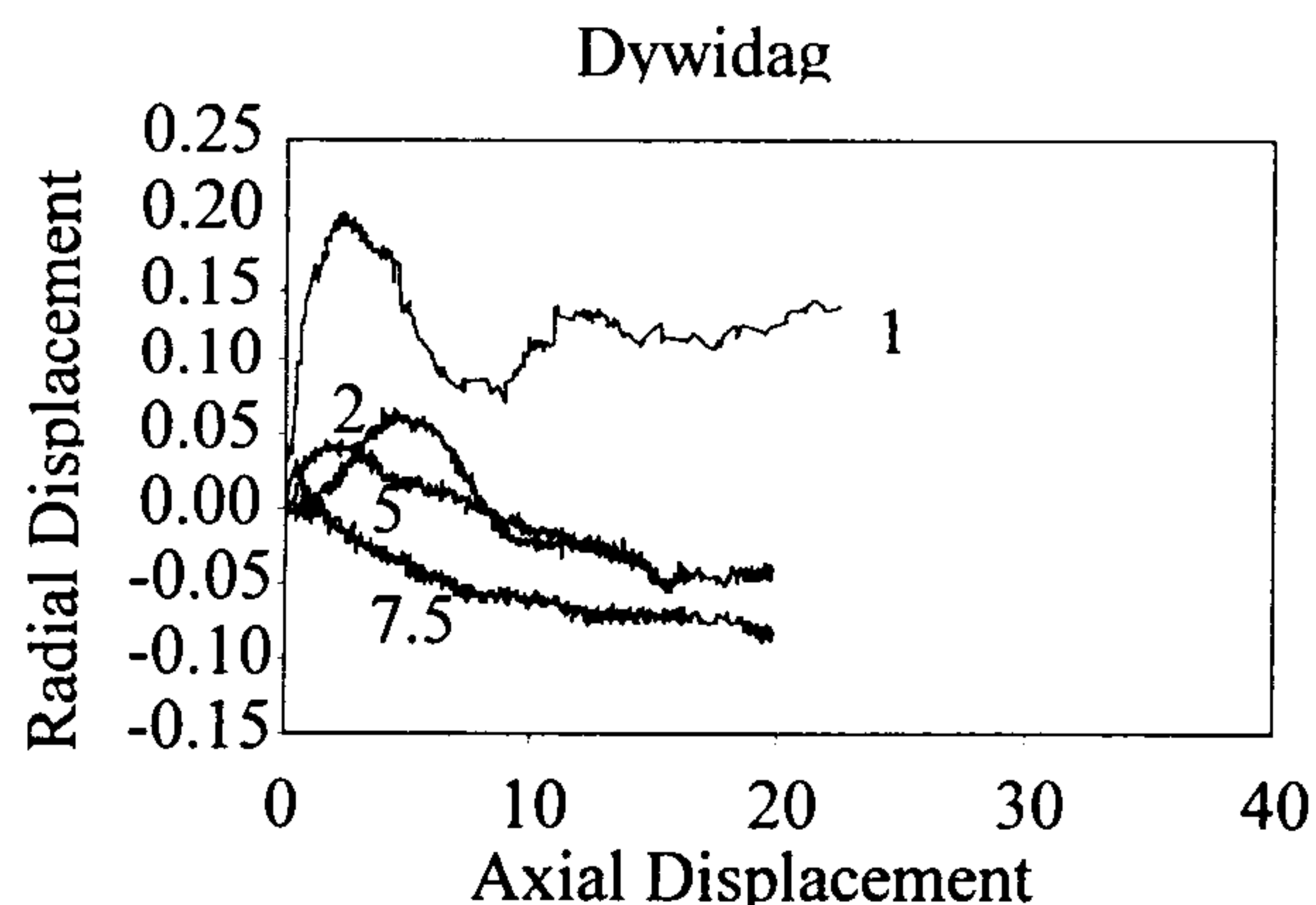
شکل منحنی اتساع در نمونه هایی که دارای تعداد زیادی آج می باشند (نظیر P22, Pm10, Dywidag) مشابه ولی در نمونه های با آج پهن (Pm4) شکل اتساع کاملاً متفاوت می باشد. در نمونه های پر دندانه، مقدار اتساع بصورت تناوبی و موجی تغییر می کند حال آنکه این اثر در نمونه با آج پهن دیده نمی شود.

بطور کلی مقدار اتساع به ترتیب در نمونه های Pm4 از همه بیشتر و سپس در نمونه های P22 و نهایتاً نمونه های Pm10 و Dywidag کمتر و کمتر می شود.

به دلیل مقدار کم اتساع در نمونه ها، مخصوصاً در فشارهای بالا، رسیدن به یک جمع بندی قطعی در مورد مشابهت یا عدم مشابهت مقدار اتساع در بولتهای مختلف تحت شرایط فشار جانبی یکسان غیر ممکن است ولی بطور کلی میتوان گفت مقدار ظرفیت چسبندگی نهایی و



شکل ۱۱: نمودار اتساع در فشارهای جانبی ۳/۵، ۵، ۷/۵ و مگاپاسکال در بولت آجدار ساخته شده با ۱۰ ردیف آج باریک با بولت به قطر ۲۲mm.



شکل ۱۲: نمودار اتساع در فشارهای جانبی ۱، ۲، ۵ و ۷/۵ مگاپاسکال در بولت Dywidag با قطر ۲۰mm.

با توجه به تنوع آزمایشهای انجام شده موارد زیر در ارتباط با ظرفیت چسبندگی سیمان به بولت قابل ذکر است: بطور کلی با بالا رفتن فشار جانبی، مقاومت نهایی و همچنین جابجایی محوری لازم برای رسیدن به مقاومت نهایی نیز بیشتر می شود. بنظر می رسد که یک استثنا برای این قاعده کلی مقدار مقاومت نهایی برای فشارهای جانبی بیش از ۷/۵ مگاپاسکال باشد (جایی که در آن سیمان به مرحله پلاستیک می رسد).

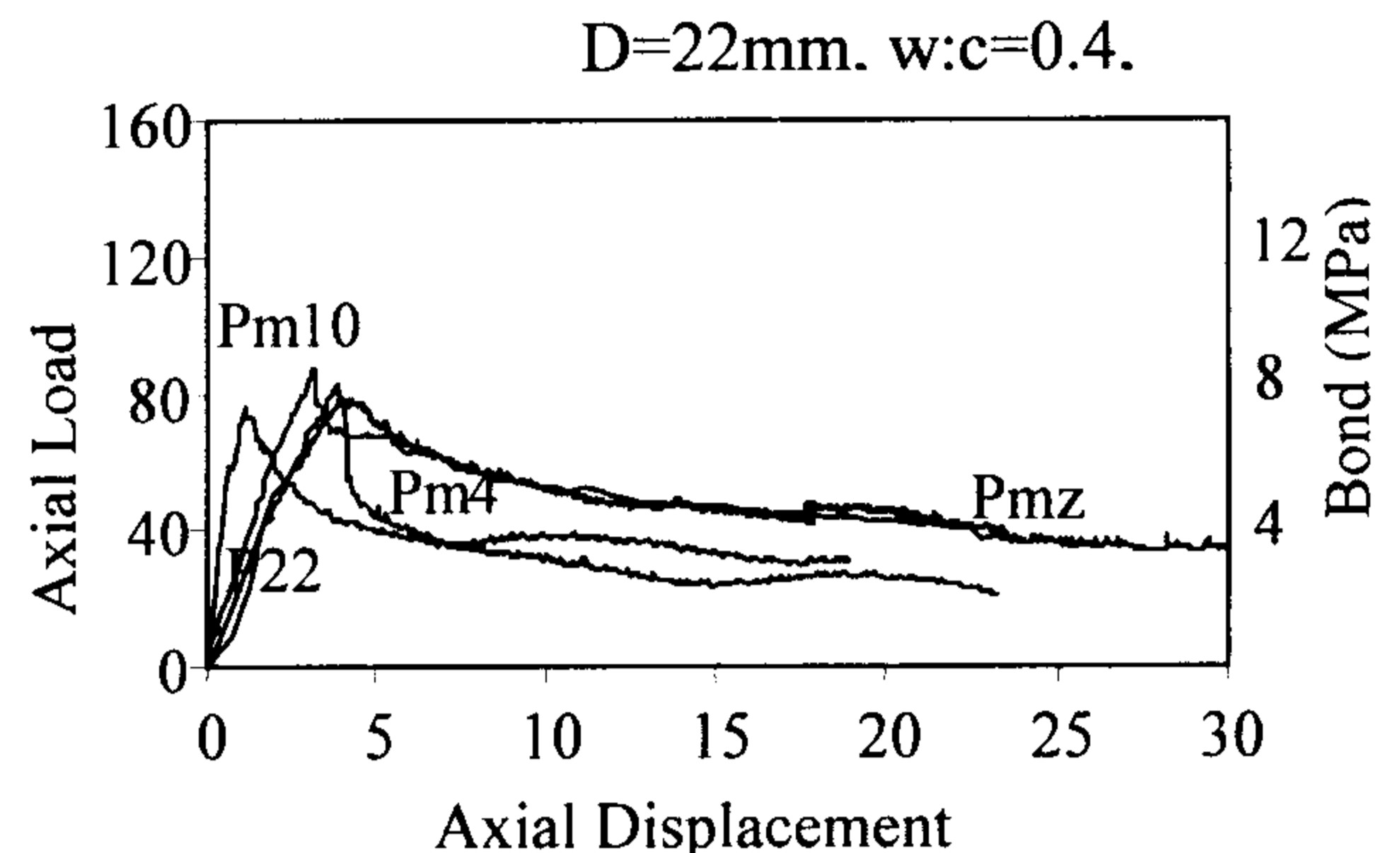
برای فشار جانبی ۲ مگاپاسکال، ظرفیت نهایی چسبندگی حداکثر در هر سه نوع بولت (P22, Pm4, Pm10) حدود ۷-۸ مگاپاسکال و ظرفیت باقیمانده آن در حدود ۲



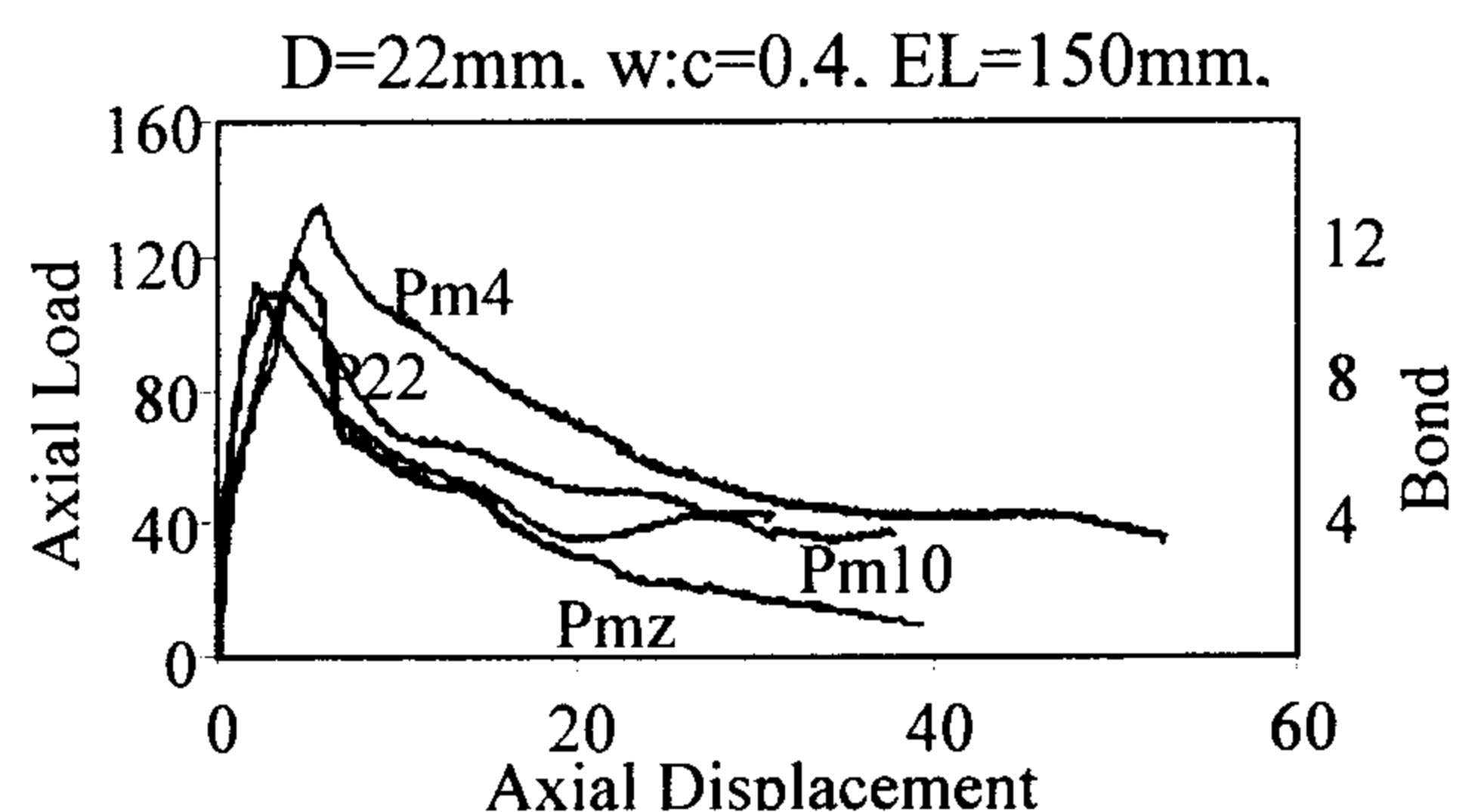
### جمع بندی و نتیجه گیری

بر اساس شواهد موجود از تستهای فراوان انجام گرفته بر روی بولتهای آج دار تزریق شده با سیمان پرتلند، چنین بر می آید که ظرفیت چسبندگی بولت به سیمان تنها تابع سطحی از سیمان است که در حین کشش بولت تحت برش قرار می گیرد. به عبارت دیگر شکل آج چنانکه پیش از این تصور می شد به تنهایی تاثیر زیادی بر ظرفیت باربری بولت نداشته به شرطی که اشکال گوناگون آج باعث تغییر در سطح برش سیمان نگردد. این فرضیه در پژوهش حاضر با تست بولتهای مختلفی که علیرغم اشکال ظاهری متفاوت سطوح برش سیمان یکسانی را ایجاد می کنند مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهند که این ادعا صحیح بوده و اگر فشار جانبی وارده بر بولت ثابت باقی بماند، بولتهای با اشکال متفاوت نتایج یکسانی را ارائه خواهند داد. بدیهی است در صورتیکه بولت توسط محیط پیرامون خود (نظیر توده سنگ یا بتن) محصور شده باشد و با اتساعهای مختلف ناشی از آجهای گوناگون فشار جانبی وارده بر بولت تغییر نماید این وضعیت صادق نخواهد بود.

باقیمانده، یکسانی بیشتری از مقدار اتساع این بولتها نشان می دهند.



شکل ۱۳: مقایسه چسبندگی انواع بولت آجدار با قطر ۲۲ میلیمتر تحت فشار جانبی ثابت ۲ مگاپاسکال.



شکل ۱۴: مقایسه چسبندگی انواع بولت آجدار با قطر ۲۲ میلیمتر تحت فشار جانبی ثابت ۵ مگاپاسکال.

### مراجع

- 1 - Malvar, J. (1992). "Bond of reinforcement under controlled confinement." *ACI Journal*, PP. 593-601.
- 2 - Moosavi, M. (1997). *Load distribution along fully grouted cable bolts based on constitutive models obtained from modified hoek cell*. Ph.D Thesis Queens University, Canada.

۳- خسروی، آر.ش. "بررسی نتایج حاصله از آزمایشهای چسبندگی بولت به سیمان در سلول تغییر یافته هوک." تز کارشناسی

ارشد، گروه مهندسی معدن دانشکده فنی، دانشگاه تهران، (۱۳۷۹).

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

---

2 – Pull-Out Test

3 – Modified Hoek Cell

4 – Debonding

5 – Embedment Length

6 – Data Acquisition

7 – Pressure Transducer