



بسمه تعالی

تاریخ :  
شماره :  
پیوست :

صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تاییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر ( عیج ) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد  
خانم / آقای سیدمحمد سجاری رشتة عمران - گرایش سازه تحت عنوان

بررسی زوریما، نماز بر دوام سن

که در تاریخ ..... با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

قبول ( با درجه : عالی - امتیاز ۱۹/۵ )  دفاع مجدد  مردود

۱- عالی ( ۲۰ - ۱۸ )

۲- بسیار خوب ( ۱۷/۹۹ - ۱۶ )

۳- خوب ( ۱۵/۹۹ - ۱۴ )

۴- قابل قبول ( ۱۳/۹۹ - ۱۲ )

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما آزل	کسب سن	استادیار	
۲- استاد مطلق راهبر دوم	وحید رضا گلکتابان	استادیار	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	فرسید عدوی	استادیار	
۴- استاد متحن	فرسید عدوی	استادیار	
۵- استاد متحن	حلی سعیدی	استادیار	



دانشکده عمران و معماری

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه

عنوان:

## « اثر عمل آوری با بخار بر دوام بتن »

اساتید محترم راهنما:

دکتر محسن تدین

دکتر وحید رضا کلات جاری

دانشجو:

سید محمد سجادی

شهریور ۸۳

تقدیم به

نیاز عارفان، امام عاشقان، منتظر منتظران، حضرت صاحب الزمان (عج)  
به امید آن روز موعود که ندای «انالمهدی» در زمین و آسمان طنین انداز شود.

## تشکر و قدردانی

در تدوین این تحقیق بزرگواران بسیاری مرا یاری نمودند که وظیفه خود می دانم از تک تک

این عزیزان قدردانی نمایم.

▪ جناب آقای دکتر تدین استاد راهنمای دلسوزی که مطالب بسیاری از ایشان آموختم و افتخار شاگردی ایشان نصیبم شد.

▪ جناب آقای دکتر کلاتجاری استاد راهنمای محترم که از کمک های ایشان بهره بردم.

▪ جناب آقای مهندس حمیدکردار مدیر عامل محترم مؤسسه راه ساحل و جناب آقای مهندس تاجیک که با انجام این تحقیق در آزمایشگاه کارخانه محصولات پیش ساخته بتنی عسلویه موافقت فرمودند.

▪ از دوستان گرامی آقای مهندس ناصر ظریف مقدم و آقای مهندس حسن طحان پور مقدم متشکرم.

▪ از تکنیسین های آزمایشگاه آقایان دشتی، انصاری، کشاورز، نادری و اسماعیلی و دیگر عزیزان همکار در آزمایشگاه عسلویه به خاطر زحماتی که در مراحل انجام آزمایش ها کشیدند صمیمانه سپاسگزارم.

▪ از جناب حاج آقای احمدی که همواره مشوق اینجانب در ادامه تحصیل بودند متشکرم.

▪ از زحمات آقایان مهندس مجید میرزائی و حمید میرزائی تشکر می کنم.

▪ از همسر گرامیم به خاطر تحمل سختی های فراوان دوران تحصیل سپاسگزارم.

## چکیده پایان نامه:

بتن با طراحی و اجرای مناسب، همواره به عنوان یکی از مصالح پرمصرف در سازه های عمرانی مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال روند کند و زمان بر کسب مقاومت در بتن از معایب آن محسوب می شود. یکی از روش های موجود جهت تسریع در کسب مقاومت، استفاده از بخار برای عمل آوری بتن است. امکان جابه جایی سریع تر قطعات بتنی، آزاد شدن زودتر قالب ها، کاهش زمان تحویل قطعه به خریدار، کاهش زمان عمل آوری، افزایش سرعت تولید، نصب سریع تر قطعات، آزاد شدن زودتر بستر پیش تنیدگی و کاستن از فضای اشغال شده جهت دپوی قطعات بتنی از مزایای عمل آوری بتن با بخار می باشد.

صرفنظر از مزایای این روش، استفاده نادرست از سیستم عمل آوری با بخار می تواند به کاهش دوام بتن و افزایش خوردگی میلگردها، به ویژه در شرایط مهاجم نظیر خلیج فارس منجر شود. در این تحقیق آزمایشگاهی، بتن های عمل آوری شده با بخار با انجام برخی از آزمایش های دوام بتن و خوردگی میلگرد مورد ارزیابی قرار گرفته اند. نتایج آزمایش ها نشان می دهد با افزایش دمای عمل آوری بتن با بخار از حدودی معین، خواص جذب آب اولیه و نهایی و نیز جذب مویینه بتن افزایش قابل توجهی می یابند. همچنین نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی نشان می دهد عمل آوری بتن با بخار در کلیه دماهای مورد بررسی در این تحقیق موجب تشدید خوردگی میلگردها می شود.

دمای مناسب برای عمل آوری قطعات بتنی با توجه به شرایط بهره برداری سازه و براساس نتایج آزمایش های به دست آمده تعیین و پیشنهاد شده است. همچنین توصیه شده است به دلیل تشدید خوردگی میلگردها، از بخاردهی قطعات بتنی مسلح واقع در مناطق خورنده نظیر منطقه جزر و مد خلیج فارس اجتناب شود.

**کلید واژه ها:** عمل آوری با بخار، دوام، مویینگی، جذب آب، مقاومت فشاری، خوردگی، خلیج فارس، تسریع مقاومت، بلوغ بتن، پتانسیل خوردگی.

## فهرست مطالب

فهرست مطالب	۵
فهرست اشکال	۱۱
فهرست جداول	۱۱
فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱- کلیات	۱
۲-۱- هدف تحقیق	۳
۳-۱- اصول کلی تحقیق و برنامه‌ریزی مطالعات	۴
۴-۱- تقسیم‌بندی فصول پایان‌نامه	۴
۱-۴-۱- مقدمه	۴
۲-۴-۱- جمع‌آوری اطلاعات	۵
۳-۴-۱- مصالح مصرفی و تشریح برنامه آزمایشگاهی	۵
۴-۴-۱- نتایج آزمایش‌ها	۵
۵-۴-۱- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها	۶
۶-۴-۱- نتیجه‌گیری نهایی و پیشنهادها	۶

فصل دوم: جمع آوری اطلاعات ۷

۲-۱-۱- مقدمه ..... ۷

۲-۲- نفوذ سیالات در بتن ..... ۸

۲-۲-۱- نفوذپذیری ..... ۸

۲-۲-۲- مکانیزم های انتقال در بتن ..... ۱۰

۲-۲-۳- عوامل مؤثر در نفوذپذیری بتن ..... ۱۵

۲-۲-۴- جذب آب ..... ۱۸

۲-۲-۵- جذب آب سطحی ..... ۱۸

۲-۲-۶- جذب مویینه بتن ..... ۱۹

۲-۳- دوام بتن در سواحل جنوبی کشور ..... ۲۰

۲-۳-۱- کربناته شدن بتن ..... ۲۲

۲-۳-۲- حمله سولفات ها ..... ۲۴

۲-۳-۳- خوردگی میلگردها ..... ۲۵

۲-۴- عمل آوری بتن به وسیله بخار ..... ۳۱

۲-۴-۱- اثرات دما بر بتن ..... ۳۱

۲-۴-۲- بلوغ بتن ..... ۳۵

۲-۴-۳- عمل آوری بتن در بخار ..... ۳۷

۲-۴-۴- دوام بتن عمل آوری شده با بخار ..... ۳۸

۲-۴-۵- چرخه عمل آوری بتن با بخار ..... ۴۰

۲-۴-۶- اتوکلاو نمودن (عمل آوری در بخار با فشار زیاد) ..... ۴۱

۲-۴-۷- سایر روش های عمل آوری حرارتی بتن ..... ۴۱



فصل سوم: مصالح مصرفی و تشریح برنامه آزمایشگاهی ۴۳

- ۳-۱- مقدمه ..... ۴۳
- ۳-۲- مصالح مصرفی ..... ۴۳
- ۳-۲-۱- سنگدانه معمولی ریزدانه (ماسه) ..... ۴۴
- ۳-۲-۲- سنگدانه معمولی درشتدانه (شن) ..... ۴۴
- ۳-۲-۳- سیمان ..... ۴۷
- ۳-۲-۴- روان کننده ..... ۴۹
- ۳-۲-۵- آب ..... ۵۰
- ۳-۳- طرح اختلاط‌های آزمایش ..... ۵۱
- ۳-۴- نحوه عمل‌آوری آزمون‌ها ..... ۵۴
- ۳-۵- تعیین مدت زمان عمل‌آوری آزمون‌ها ..... ۵۴
- ۳-۶- نامگذاری طرح اختلاط‌ها ..... ۵۸
- ۳-۷- اصول انتخاب طرح اختلاط‌ها ..... ۵۹
- ۳-۸- فرضیات مورد استفاده در طرح اختلاط‌ها ..... ۶۰
- ۳-۹- روش تعیین و ساخت طرح اختلاط‌ها ..... ۶۱
- ۳-۱۰- مقادیر مصالح مصرفی در طرح اختلاط‌ها ..... ۶۲
- ۳-۱۱- تشریح ساخت بتن و آزمایش‌های انجام شده ..... ۶۳
- ۳-۱۱-۱- آزمایش روانی بتن (اسلامپ) ..... ۶۴
- ۳-۱۱-۲- آزمایش تعیین دمای بتن تازه ..... ۶۴
- ۳-۱۱-۳- آزمایش تعیین وزن مخصوص بتن تازه ..... ۶۴
- ۳-۱۱-۴- نمونه‌گیری آزمون‌ها و نگهداری آنها در آزمایشگاه ..... ۶۴

۳-۱۱-۵- تعیین مقاومت فشاری مکعبی..... ۶۵

۳-۱۱-۶- دانسیته بتن سخت شده..... ۶۵

۳-۱۱-۷- آزمایش جذب آب اولیه و نهایی بتن..... ۶۵

۳-۱۱-۸- آزمایش جذب آب مویینه بتن..... ۶۶

۳-۱۱-۹- آزمایش پتانسیل خوردگی (نیم بیل)..... ۶۷

۳-۱۲- نتایج آزمایش های بتن تازه..... ۷۳

فصل چهارم: نتایج آزمایش ها ..... ۷۵

۴-۱- مقدمه..... ۷۵

۴-۲- نتایج آزمایش جذب آب مویینه..... ۷۶

۴-۳- نتایج آزمایش جذب آب اولیه و نهایی بتن..... ۸۳

۴-۴- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی..... ۸۹

۴-۵- نتایج آزمایش مقاومت فشاری..... ۱۱۶

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل نتایج ..... ۱۱۹

۵-۱- مقدمه..... ۱۱۹

۵-۲- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش جذب آب مویینه بتن..... ۱۲۰

۵-۳- تجزیه و تحلیل نتایج جذب آب اولیه و نهایی بتن..... ۱۲۹

۵-۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی..... ۱۴۰

۵-۵- تجزیه و تحلیل نتایج مقاومت فشاری..... ۱۴۶

فصل ششم: نتیجه‌گیری نهایی و پیشنهادات ۱۵۶

۱-۶ - نتیجه‌گیری نهایی ..... ۱۵۶

۲-۶ - پیشنهادهایی برای ادامه تحقیق ..... ۱۵۹

پیوست - تصاویر تحقیق ..... ۱۶۱

فهرست منابع ..... ۱۹۰

نمایه ..... ۱۹۴

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- انواع ارتباط داخلی بین تخلخل و نفوذپذیری [۷] ..... ۱۰
- شکل ۲-۲- اثر نسبت آب به سیمان بر ساختار منفذ و نفوذپذیری بتن [۵] ..... ۱۵
- شکل ۳-۲- تأثیر نسبت آب به سیمان و دمای عمل آوری بر تخلخل خمیر سیمان [۳۹] ..... ۱۷
- شکل ۴-۲- نمودار جذب مویینه بتن ..... ۲۰
- شکل ۵-۲- فرآیند پیشروی کربناسیون [۷] ..... ۲۳
- شکل ۶-۲- توصیف شماتیک از عمر مفید یک سازه بتنی مسلح [۷] ..... ۲۶
- شکل ۷-۲- نمای شماتیک خوردگی الکتروشیمیایی در حضور کلریدها [۷] ..... ۲۷
- شکل ۸-۲- تأثیر دمای عمل آوری بر زمان گیرش اولیه و نهایی خمیر سیمان [۳۸] ..... ۳۱
- شکل ۹-۲- تأثیر دمای ریختن و عمل آوری بر مقاومت های کوتاه مدت و درازمدت بتن [۳۸] ..... ۳۳
- شکل ۱۰-۲- اثر دما بر گرمزایی ناشی از هیدراته شدن  $C_3S$  [۳۹] ..... ۳۴
- شکل ۱۱-۲- اثر دمای اولیه بر رشد دمای بتن حجیم [۳۹] ..... ۳۵
- شکل ۱۲-۲- چرخه عمل آوری بتن با بخار ..... ۴۰
- شکل ۱-۳- آزمایش جذب مویینه بتن [۱۴] ..... ۶۷
- شکل ۲-۳- تعیین پتانسیل خوردگی میلگرد [۵] ..... ۶۸

- شکل ۳-۳- تصویر شماتیک آزمون‌های استوانه‌ای آزمایش پتانسیل خوردگی [۱۰] ..... ۷۱
- شکل ۴-۱- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 50-350.40 ..... ۹۱
- شکل ۴-۲- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 50-350.45 ..... ۹۲
- شکل ۴-۳- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 50-350.50 ..... ۹۳
- شکل ۴-۴- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 50-400.40 ..... ۹۴
- شکل ۴-۵- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 50-400.45 ..... ۹۵
- شکل ۴-۶- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 50-400.50 ..... ۹۶
- شکل ۴-۷- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 60-350.40 ..... ۹۷
- شکل ۴-۸- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 60-350.45 ..... ۹۸
- شکل ۴-۹- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 60-350.50 ..... ۹۹
- شکل ۴-۱۰- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 60-400.40 ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۱۱- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 60-400.45 ..... ۱۰۱
- شکل ۴-۱۲- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 60-400.50 ..... ۱۰۲
- شکل ۴-۱۳- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 70-350.40 ..... ۱۰۳
- شکل ۴-۱۴- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 70-350.45 ..... ۱۰۴
- شکل ۴-۱۵- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 70-350.50 ..... ۱۰۵
- شکل ۴-۱۶- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 70-400.40 ..... ۱۰۶

- شکل ۴-۱۷- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 70-400.45..... ۱۰۷
- شکل ۴-۱۸- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 70-400.50..... ۱۰۸
- شکل ۴-۱۹- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 80-350.40..... ۱۰۹
- شکل ۴-۲۰- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 80-350.45..... ۱۱۰
- شکل ۴-۲۱- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 80-350.50..... ۱۱۱
- شکل ۴-۲۲- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 80-400.40..... ۱۱۲
- شکل ۴-۲۳- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 80-400.45..... ۱۱۳
- شکل ۴-۲۴- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 80-400.50..... ۱۱۴
- شکل ۵-۱- بررسی ضریب جذب موینه بتن عمل آوری شده در بخار ۵۰ درجه..... ۱۲۳
- شکل ۵-۲- بررسی ضریب جذب موینه بتن عمل آوری شده در بخار ۶۰ درجه..... ۱۲۴
- شکل ۵-۳- بررسی ضریب جذب موینه بتن عمل آوری شده در بخار ۷۰ درجه..... ۱۲۵
- شکل ۵-۴- بررسی ضریب جذب موینه بتن عمل آوری شده در بخار ۸۰ درجه..... ۱۲۶
- شکل ۵-۵- بررسی تأثیر افزایش عیار سیمان بر ضریب جذب موینه بتن (S)..... ۱۲۷
- شکل ۵-۶- بررسی تأثیر افزایش عیار سیمان بر ثابت جذب موینه بتن (C)..... ۱۲۸
- شکل ۵-۷- مقایسه تأثیر عمل آوری بتن با بخار ۵۰ درجه بر جذب آب ۳۰ دقیقه بتن..... ۱۳۲
- شکل ۵-۸- مقایسه تأثیر عمل آوری بتن با بخار ۶۰ درجه بر جذب آب ۳۰ دقیقه بتن..... ۱۳۳
- شکل ۵-۹- مقایسه تأثیر عمل آوری بتن با بخار ۷۰ درجه بر جذب آب ۳۰ دقیقه بتن..... ۱۳۴

- شکل ۵-۱۰- مقایسه تأثیر عمل آوری بتن با بخار ۸۰ درجه بر جذب آب ۳۰ دقیقه بتن..... ۱۳۵
- شکل ۵-۱۱- مقایسه تأثیر عمل آوری بتن با بخار ۵۰ درجه بر جذب آب نهایی بتن..... ۱۳۶
- شکل ۵-۱۲- مقایسه تأثیر عمل آوری بتن با بخار ۶۰ درجه بر جذب آب نهایی بتن..... ۱۳۷
- شکل ۵-۱۳- مقایسه تأثیر عمل آوری بتن با بخار ۷۰ درجه بر جذب آب نهایی بتن..... ۱۳۸
- شکل ۵-۱۴- مقایسه تأثیر عمل آوری بتن با بخار ۸۰ درجه بر جذب آب نهایی بتن..... ۱۳۹
- شکل ۵-۱۵- سن شروع خوردگی میلگرد در بتن عمل آوری شده با بخار ۵۰ درجه..... ۱۴۲
- شکل ۵-۱۶- سن شروع خوردگی میلگرد در بتن عمل آوری شده با بخار ۶۰ درجه..... ۱۴۳
- شکل ۵-۱۷- سن شروع خوردگی میلگرد در بتن عمل آوری شده با بخار ۷۰ درجه..... ۱۴۴
- شکل ۵-۱۸- سن شروع خوردگی میلگرد در بتن عمل آوری شده با بخار ۸۰ درجه..... ۱۴۵
- شکل ۵-۱۹- افزایش مقاومت فشاری بتن در اثر ۹ ساعت عمل آوری با بخار..... ۱۴۹
- شکل ۵-۲۰- افزایش مقاومت فشاری بتن در اثر ۱۸ ساعت عمل آوری با بخار..... ۱۵۰
- شکل ۵-۲۱- بررسی تأثیر میزان عمل آوری با بخار بر رشد مقاومت فشاری بتن..... ۱۵۱
- شکل ۵-۲۲- تأثیر عمل آوری بتن با بخار ۵۰ درجه بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن..... ۱۵۲
- شکل ۵-۲۳- تأثیر عمل آوری بتن با بخار ۶۰ درجه بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن..... ۱۵۳
- شکل ۵-۲۴- تأثیر عمل آوری بتن با بخار ۷۰ درجه بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن..... ۱۵۴
- شکل ۵-۲۵- تأثیر عمل آوری بتن با بخار ۸۰ درجه بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن..... ۱۵۵

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲- مقایسه املاح آب خلیج فارس با آب سایر دریاهای دنیا..... ۲۱
- جدول ۱-۳- دانه‌بندی (درصد رده‌ده) سنگدانه‌های معمولی..... ۴۶
- جدول ۲-۳- نتایج آزمایش‌های سنگدانه‌های معمولی..... ۴۷
- جدول ۳-۳- ویژگی‌های شیمیایی سیمان تیپ II هرمزگان..... ۴۸
- جدول ۴-۳- ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سیمان تیپ II هرمزگان..... ۴۸
- جدول ۵-۳- آنالیز شیمیایی آب مصرفی در ساخت و عمل‌آوری بتن‌های تحقیق..... ۵۰
- جدول ۶-۳- شرح آزمون‌های آزمایش‌های تحقیق..... ۵۳
- جدول ۷-۳- پیشرفت بلوغ در مراحل مختلف چرخه عمل‌آوری آزمون‌ها در بخار بر حسب درجه - ساعت..... ۵۶
- جدول ۸-۳- چرخه عمل‌آوری آزمون‌ها در بخار..... ۵۷
- جدول ۹-۳- مقادیر مصالح مصرفی در بتن طرح اختلاط‌ها..... ۶۳
- جدول ۱۰-۳- انواع الکترودها و پتانسیل آنها [۱۴]..... ۶۹
- جدول ۱۱-۳- درصد احتمال فعالیت خوردگی..... ۷۰
- جدول ۱۲-۳- نتایج آزمایش‌های بتن تازه طرح اختلاط‌ها..... ۷۴
- جدول ۱-۴- نتایج آزمایش جذب آب موینه بتن عمل‌آوری شده در دمای ۵۰ درجه..... ۷۹



- جدول ۴-۲- نتایج آزمایش جذب آب مویینه بتن عمل آوری شده در دمای ۶۰ درجه..... ۸۰
- جدول ۴-۳- نتایج آزمایش جذب آب مویینه بتن عمل آوری شده در دمای ۷۰ درجه..... ۸۱
- جدول ۴-۴- نتایج آزمایش جذب آب مویینه بتن عمل آوری شده در دمای ۸۰ درجه..... ۸۲
- جدول ۴-۵- نتایج آزمایش جذب آب اولیه و نهایی بتن عمل آوری شده در بخار ۵۰ درجه..... ۸۵
- جدول ۴-۶- نتایج آزمایش جذب آب اولیه و نهایی بتن عمل آوری شده در بخار ۶۰ درجه..... ۸۶
- جدول ۴-۷- نتایج آزمایش جذب آب اولیه و نهایی بتن عمل آوری شده در بخار ۷۰ درجه..... ۸۷
- جدول ۴-۸- نتایج آزمایش جذب آب اولیه و نهایی بتن عمل آوری شده در بخار ۸۰ درجه..... ۸۸
- جدول ۴-۹- سن شروع خوردگی میلگرد در بتن های عمل آوری شده با بخار در آزمایش پتانسیل خوردگی ۱۱۵
- جدول ۴-۱۰- نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن..... ۱۱۸

## فصل اول: مقدمه

### ۱-۱- کلیات

پس از گذشت حدود ۱۸۰ سال از پیدایش و ثبت سیمان پرتلند توسط معماری در شهر لیدز در سال ۱۸۲۴ میلادی، بتن دستخوش تحولات و پیشرفت‌های شگرفی شده است. در دسترس بودن و فراوانی مصالح تشکیل دهنده آن، شکل‌پذیری آسان بتن تازه و دوام نسبتاً زیاد بتن خوب نسبت به سایر مصالح ساختمانی از مزایای این محصول به شمار می‌رود.

استفاده از مصالحی دیگر نظیر فولاد به عنوان مکمل بتن و در برخی مواقع به عنوان رقیب آن نیز همواره مرسوم و متداول بوده است. یکی از مواردی که در بتن به عنوان یک خصوصیت نه چندان خوشایند - در مقایسه با فولاد - مطرح می‌باشد، زمان‌بر بودن کسب مقاومت در آن است.

از آنجایی که کسب مقاومت در بتن به طور مستقیم به واکنش تدریجی هیدراسیون سیمان وابسته است، تسریع در انجام این واکنش نیز همواره مورد توجه بوده است؛ به عنوان مثال استفاده از

سیمان پرتلند زود سخت شونده (نوع III) و یا استفاده از مواد افزودنی زودگیر کننده بتن به عنوان راه‌هایی که جهت کسب مقاومت اولیه بالا در بتن می‌تواند استفاده شود، مطرح می‌باشد.

افزایش دمای بتن در مرحله عمل‌آوری، سبب تسریع در روند رشد و کسب مقاومت آن می‌شود. بنابراین می‌توان با عمل‌آوری بتن در بخار، سبب افزایش مقاومت آن شد. استفاده از بخار موجبات دستیابی به یک مقاومت اولیه بالا را فراهم می‌سازد، به نحوی که بتوان قطعات بتنی را پس از مدت‌زمان کوتاهی از مرحله قالب‌گیری، حمل و جابجا نمود. بازکردن سریع‌تر قالب‌ها و استفاده مجدد از آنها در تولید قطعات دیگر از مزایای دیگر این روش می‌باشد. همچنین می‌توان در بتن‌های پیش‌تنیده به وسیله بخاردهی در روند کسب مقاومت بتن تسریع<sup>۱</sup> ایجاد کرد و وسایل پیش‌تنیدگی را در زمان کوتاه‌تری برچید. وجود رطوبت به همراه دما دلیل اصلی به کارگیری بخار گرم است.

سیستم عمل‌آوری بتن با بخار صرف نظر از مزایایی که دارد، اگر به نحو مطلوب و قابل‌کنترلی استفاده نشود ممکن است آثار زیان‌باری را در دوام بتن ایجاد نماید. این نتایج ممکن است در مقاومت درازمدت بتن نیز تأثیرگذار باشد که از جهت سازه‌ای اهمیت دارد.

به خاطر طبیعت اقداماتی که باید در عمل‌آوری بتن با بخار فراهم شود از این روش عمدتاً در تولید قطعات بتنی پیش‌ساخته استفاده می‌شود. در ایران نیز استفاده از این سیستم عمل‌آوری، در تولید قطعات پیش‌ساخته بتنی مورد استفاده قرار گرفته و پیشرفت‌های خوبی در زمینه تولید بتن با این سبک پدید آمده است. یکی از کارگاه‌های بزرگ تولید قطعات پیش‌ساخته بتنی که در آن از سیستم عمل‌آوری بتن با بخار استفاده می‌شود «کارخانه محصولات پیش‌ساخته بتنی» است که متعلق به مؤسسه راه ساحل - از مؤسسات تحت پوشش قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا (ص) - می‌باشد. در این کارخانه بتن، روزانه به طور متوسط حدود ۱۰۰۰ متر مکعب بتن به صورت قطعات

---

<sup>۱</sup> Accelerate

پیش‌ساخته با وزن ۵ تا ۱۳۰ تن تولید می‌شود. از این قطعات جهت ساخت پروژه «بندر پتروشیمی پارس» واقع در منطقه عسلویه استان بوشهر استفاده می‌شود. این تحقیق در آزمایشگاه کنترل کیفی کارخانه محصولات پیش‌ساخته بتنی بندر پتروشیمی پارس انجام شده است.

## ۱-۲- هدف تحقیق

دوام بتن به ویژه در مناطق گرم خورنده، شبیه آنچه که در سواحل جنوبی کشور برقرار است از موضوعات مهم ساخت بتن بوده است. در سال‌های اخیر تعداد زیادی از سازه‌های بتنی در کشورهای مختلف و همچنین ایران دچار آسیب‌دیدگی و یا خرابی زودرس شده‌اند؛ به نحوی که عمر مفید این سازه‌ها بسیار کمتر از مقدار پیش‌بینی شده بوده است. به جهت اهمیت این موضوع، بررسی دوام بتن‌های عمل‌آوری شده با بخار و مطالعه در خصوص تأثیر بخاردهی بر پارامترهای دوام، یکی از اهداف این تحقیق به شمار می‌رود.

با توجه به آنکه مسأله خوردگی میلگردها در سازه‌های بتنی مسلح در سواحل خلیج فارس به عنوان یکی از مشکلات حاد سال‌های اخیر مطرح بوده، مشاهده تأثیر عمل‌آوری بتن با بخار بر خوردگی میلگردها یکی دیگر از اهداف این تحقیق است.

به نظر می‌رسد در سیستم عمل‌آوری بتن با بخار با افزایش دمای بخار، اثرات نامطلوب بخاردهی بر دوام بتن مشهودتر شود؛ لذا تلاش شده‌است پس از انجام آزمایش‌های این تحقیق، دمای مناسب برای عمل‌آوری بتن به وسیله بخار تعیین و پیشنهاد گردد.

### ۱-۳- اصول کلی تحقیق و برنامه‌ریزی مطالعات

از آنجایی که طبیعت و شرایط تحقیق به صورت آزمایشگاهی و تجربی است، با مشخص شدن اهداف و محدوده فعالیت پژوهشی، برنامه‌ریزی جهت ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌های مربوطه انجام شد.

ابتدا آزمایش‌های قابل انجام در تحقیق مشخص شدند. سپس در خصوص تهیه ملزومات آزمایش‌ها اقدام گردید و همزمان اطلاعات لازم برای انجام آزمایش‌ها نیز جمع‌آوری شد. مطالب علمی که در خصوص موضوع تحقیق موجود بود مورد بررسی قرار گرفت. سپس اقدامات لازم جهت تأمین مصالح مناسب انجام شد. در نهایت با معلوم بودن آزمایش‌ها، تعداد نمونه‌ها، نسبت‌های مناسب اختلاط و شرایط لازم برای عمل‌آوری بتن، اقدام به ساخت بتن و تهیه نمونه‌ها در آزمایشگاه گردید. با در نظر گرفتن زمان مورد نیاز برای انجام آزمایش‌های مختلف، انجام دقیق این آزمایش‌ها در دستور کار قرار گرفت. پس از اتمام آزمایش‌ها، نتایج به نحو مطلوب جمع‌آوری شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با توجه به اهداف تحقیق، نتایج نهایی و پیشنهاداتی جهت تداوم تحقیق ارائه شد.

### ۱-۴- تقسیم‌بندی فصول پایان‌نامه

فصول این پایان‌نامه به صورت ذیل تقسیم‌بندی شده‌است:

#### ۱-۴-۱- مقدمه

در فصل اول اطلاعاتی کلی در خصوص این تحقیق ارائه گردیده است. هدف از انجام تحقیق و روش مناسب برای رسیدن به آن تشریح شده است و مجموعاً به عنوان یک راهنما در استفاده روشن‌تر از سایر فصول گردآوری شده است.

### ۱-۴-۲- جمع آوری اطلاعات

در فصل دوم ابتدا در خصوص دوام بتن و نفوذ سیالات در آن مطالبی بیان شده است. سپس به بررسی دوام بتن در سواحل جنوبی کشور پرداخته شده و شرایط مهاجم و خورنده‌ای که در آب‌های خلیج فارس وجود دارد مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه این فصل در خصوص اهداف، مزایا، و نیز تأثیرات سوء استفاده از بخار جهت عمل‌آوری بتن توضیحاتی داده شده است. همچنین مطالعات قبلی که در این مورد انجام شده به طور خلاصه مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۱-۴-۳- مصالح مصرفی و تشریح برنامه آزمایشگاهی

در فصل سوم ابتدا در مورد خصوصیات مصالح مصرفی اعم از سیمان، سنگدانه، آب و روان‌کننده توضیحاتی داده شده و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آنها تشریح شده است. سپس در خصوص مخلوط‌های آزمایشی<sup>۱</sup> و نسبت‌های مخلوط<sup>۲</sup>، اصول انتخاب طرح‌اختلاطها، نحوه نامگذاری طرح‌اختلاط و آزمون‌ها، تعداد، شکل و وضعیت عمل‌آوری آزمون‌ها توضیحات کاملی ارائه گشته است. در انتها آزمایش‌های انجام شده مورد بررسی قرار گرفته و تشریح شده است.

### ۱-۴-۴- نتایج آزمایش‌ها

پس از انجام آزمایش‌های بتن تازه، آزمون‌های مورد نیاز تهیه شده و عمل‌آوری آنها نیز صورت گرفت. سپس آزمایش‌های جذب آب<sup>۳</sup> مویینه، جذب آب اولیه و نهایی بتن، پتانسیل خوردگی و مقاومت فشاری آزمون‌ها انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها در فصل چهارم در قالب جداولی به طور خلاصه ذکر شده است.

<sup>۱</sup> Trial mixes

<sup>۲</sup> Mix proportions

<sup>۳</sup> Absorption

#### ۱-۴-۵- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

به طور کلی عمل‌آوری آزمونه‌ها در دو وضعیت شرایط بخار و شرایط استاندارد آزمایشگاهی انجام شده است و نحوه عمل‌آوری نیز در فصل سوم تشریح شده است؛ این مطلب از آن جهت ذکر شد که گفته شود نتایج آزمایش‌ها و پارامترهای متفاوت مورد بررسی، به طور نسبی بررسی شده‌اند. به عبارت دیگر در بررسی پارامترهای هر آزمایش، نتیجه آزمایش نمونه عمل‌آوری شده در بخار نسبت به نتیجه نمونه کنترلی که با بتن مشابه در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل‌آوری شده است سنجیده می‌شود؛ در نتیجه تأثیر بخاردهی بر بتن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در فصل پنجم تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها به تفکیک دمای عمل‌آوری نمونه‌ها با بخار ذکر شده و مورد بحث قرار گرفته است.

#### ۱-۴-۶- نتیجه‌گیری نهایی و پیشنهادها

با توجه به اطلاعات و نکاتی که در فصل‌های اول تا چهارم ذکر شده و با توجه به بررسی‌ها و نتیجه‌گیری‌هایی که در فصل پنجم صورت گرفته است، خلاصه نتایج این تحقیق در فصل ششم بیان شده است. در خصوص تداوم این تحقیق و مشخص شدن زوایای بیشتری از تأثیر سیستم عمل‌آوری با بخار بر بتن، پیشنهادهایی مطرح شده که در انتهای این فصل آمده است.

از آنجایی که روش مطالعه در این تحقیق به صورت آزمایشگاهی بوده است، با ارائه تصاویری از مراحل انجام آزمایش‌ها در قالب پیوست، به تشریح کامل‌تر فعالیت‌های انجام شده پرداخته‌ایم. فهرست منابع نیز در انتهای تحقیق ذکر شده است.

## فصل دوم: جمع آوری اطلاعات

### ۲-۱- مقدمه

بتن خوب تحت انواع وسیعی از شرایط محیطی متنوع، ماده‌ای نسبتاً بادوام است. اصولاً در هر سازه بتنی لازم است عملکردی که برای آن در نظر گرفته شده است تداوم یابد، به این معنا که مقاومت و بهره‌دهی آن در عمر مشخصی که برای آن منظور شده است، حفظ گردد. بنابراین بتن باید بتواند فرآیندهایی را که انتظار می‌رود موجب از هم پاشیده شدن آن شود تحمل نماید. به چنین بتنی می‌توان «بتن بادوام» گفت.

آنچه مسلم است دوام بتن به معنای عمر بی‌نهایت آن نیست و همچنین به این معنا نیست که بتن می‌تواند هرگونه شرایطی را تحمل نماید. در بسیاری از شرایط محیطی، دوام از اهمیت فوق العاده برخوردار است. تا سال‌های اخیر پیشرفت‌های به وجود آمده در زمینه تکنولوژی سیمان و بتن عمدتاً بر دستیابی به بتن با مقاومت‌های زیاد و زیادتر متمرکز بودند. اصولاً این تصور وجود داشت که «بتن بامقاومت، بتنی بادوام است». تنها ملاحظات خاصی که اعمال می‌شد در مورد اثر یخ و آب شدن



متناوب و برخی از انواع حمله شیمیایی بود. امروزه مشخص شده است که برای بسیاری از شرایط رویارویی سازه بتنی، لازم است در مراحل طراحی، هر دو خاصیت «مقاومت» و «دوام» کاملاً در نظر گرفته شوند؛ ممکن است بتنی ساخته شود که مقاومت کافی را داشته باشد اما در برخورد با شرایط محیطی از لحاظ دوام ناکارآمد باشد. طبیعی است که عکس این مطلب نیز صحیح است؛ یعنی بتنی که دوام مناسبی دارد لزوماً به معنای داشتن مقاومت کافی نیست و لذا تأکید می‌شود که «مقاومت» و «دوام» توأماً باید مورد توجه قرار گیرند.

بتن بادوام در صورت رویارویی با محیط اطراف می‌تواند شکل، کیفیت و بازدهی اولیه خود را حفظ کند. عدم پایایی بتن گاه به هزینه‌های تعمیراتی کلانی می‌انجامد که به مراتب از هزینه‌های لازم برای یک طراحی خوب و قابل قبول بیشتر است و بعضاً این هزینه‌ها به قدری زیاد می‌شود که تخریب سازه نسبت به تعمیر آن ارجح است.

## ۲-۲- نفوذ سیالات در بتن

به طور کلی سه نوع سیال وجود دارند که بر دوام بتن اثر می‌گذارند و می‌توانند به داخل بتن نفوذ کنند که عبارتند از آب اعم از خالص و یا حاوی یون‌های مهاجم، دی‌اکسیدکربن و اکسیژن. این مواد به روش‌های مختلفی به داخل بتن نفوذ کرده و جابجا می‌شوند، اما کلیه این جابجایی‌ها عمدتاً به ساختار خمیر هیدراته شده سیمان وابسته‌اند. دوام بتن به سهولتی که سیالات (چه مایعات و چه گازها) می‌توانند به داخل بتن وارد شوند و از میان آن بگذرند بستگی دارد.

### ۲-۲-۱- نفوذپذیری

یکی از پارامترهای بسیار مهم و در واقع تعیین‌کننده میزان خسارت‌پذیری بتن، در برابر عوامل خارجی همچون سولفات‌ها، کلورها و سایر عوامل مخرب شیمیایی، نفوذپذیری بتن است، به نحوی که برای بادوام بودن، بتن باید نسبتاً غیرقابل نفوذ باشد. لذا نفوذپذیری به عنوان مهم‌ترین عامل داخلی

مؤثر در دوام بتن و یا به عبارت دیگر اصلی‌ترین عامل تعیین‌کننده خسارت‌پذیری بتن در مقابل حملات شیمیایی، همواره مورد توجه قرار دارد.

منافذ<sup>۱</sup> مرتبط با نفوذپذیری، آنهایی هستند که قطر آنها حداقل ۱۶۰-۱۲۰ nm باشد. این منافذ لزوماً باید پیوسته باشند. منافذی که ورودی باریکی دارند، حتی اگر خود آنها بزرگ باشند چندان تأثیری در نفوذپذیری ندارند.

سنگدانه‌ها نیز می‌توانند حاوی منافذ باشند، اما این منافذ معمولاً ناپیوسته‌اند. به علاوه سنگدانه‌ها با خمیر سیمان احاطه شده‌اند، به طوری که منافذ سنگدانه‌ها به واسطه عدم اتصال به یکدیگر سهم چندانی در نفوذپذیری بتن ندارند. همین امر در مورد منافذ هوای منفصل مانند حباب‌های هوای ایجاد شده به وسیله افزودنی‌های حباب‌زا نیز صدق می‌کند.

نفوذ مایعات و گازها به داخل بتن می‌تواند به نحو نامطلوبی بر دوام آن اثر بگذارد. برای مثال می‌توان هیدروکسید کلسیم که از بتن به خارج راه می‌یابد و یا حمله‌ای که به وسیله یون‌های کلر و دی‌اکسید کربن و یا مایعی خورنده رخ می‌دهد را نام برد. میزان نفوذ بستگی به نفوذپذیری بتن دارد. در بتن مسلح نفوذ آب و هوا به درون بتن، سبب زنگ‌زدگی میلگردها خواهد شد و از آنجایی که این عمل با افزایش حجمی فولاد همراه است، پوشش بتنی روی میلگردها طبله می‌کند و جدا می‌شود.

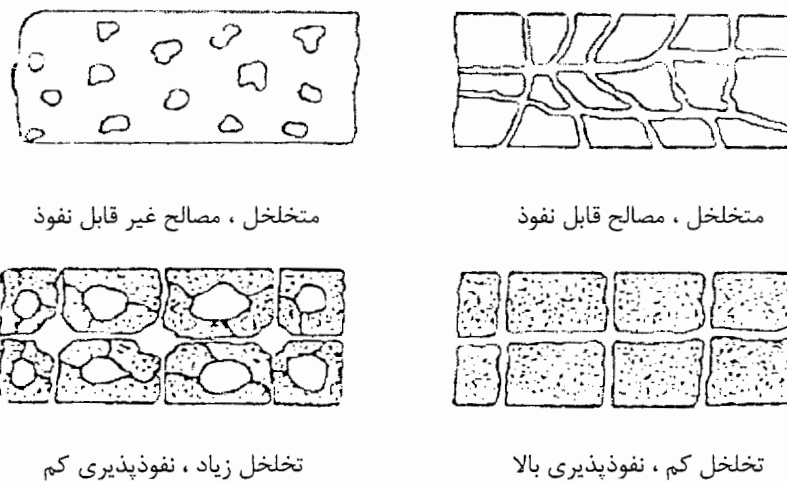
به دلیل وجود انواع مختلف منافذ که بعضی از آنها در نفوذپذیری بتن سهیم بوده و برخی دیگر سهیم نمی‌باشند، تمیز قائل شدن بین دو اصطلاح «تخلخل<sup>۲</sup>» و «نفوذپذیری<sup>۳</sup>» مهم است. تخلخل سنجشی است از نسبتی از کل حجم بتن که توسط منافذ اشغال می‌شود و معمولاً بر حسب درصد بیان می‌گردد. اگر تخلخل زیاد باشد و منافذ پیوسته باشند، در جابجایی سیالات از میان بتن سهیم خواهند بود به طوری که نفوذپذیری آن نیز زیاد می‌شود. از طرف دیگر اگر منافذ ناپیوسته بوده

<sup>1</sup> Pores, Voids

<sup>2</sup> Porosity

<sup>3</sup> Permeability

و یا بر جابجایی سیالات بی تأثیر باشند، در این صورت نفوذپذیری بتن کم خواهد بود، حتی اگر تخلخل آن زیاد باشد. این وضعیت در شکل ۱-۲ مشاهده می شود. نکته دیگری که باید به آن اشاره کرد این است که جذب آب بتن الزاماً به معنای نفوذپذیری آن نیست؛ ممکن است بتن جذب آب بالایی داشته باشد و در عین حال نفوذپذیری آن نیز کم باشد. شیوه های جذب آب نیز با یکدیگر تفاوت دارند و مکانیسم عمل آنها می تواند متمایز از یکدیگر باشد. به عنوان نمونه جذب مویینه بتن با جذب اولیه و نهایی آن یکسان نیست.



شکل ۱-۲- انواع ارتباط داخلی بین تخلخل و نفوذپذیری [۷]

## ۲-۲-۲- مکانیزم های انتقال در بتن

تقریباً در تمام فرایندهای آسیب دیدگی بتن، پدیده انتقال دخالت دارد. این پدیده شامل وارد شدن عوامل مخرب مانند گازها، آب و عناصر شیمیایی به بتن و سپس راه یافتن این عوامل به توده بتن از طریق منافذ است. بنابراین ریزاقلیم و ساختار منافذ نقش مهمی در سرعت و توسعه انتقال به عهده دارند. به طور کلی انتقال یا حرکت محلول ها و یون های مهاجم در بتن تحت یک یا چند مکانیزم زیر انجام می شود [۳۳ و ۳۶].

معمولاً از کلمه نفوذپذیری به جای انتقال استفاده می شود و نوع مکانیزم در نظر گرفته نمی شود. به همین علت در اغلب مراجع کلمه نفوذپذیری جایگزین کلمه انتقال شده است مگر آنکه مکانیزم خاصی از انتقال مورد بررسی قرار گرفته باشد.

پدیده انتقال عوامل مخرب تابع ساختار منافذ است. وقتی عوامل مخرب به داخل بتن راه می یابند سبب تغییراتی در ساختار منافذ می شوند. به عبارت دیگر پدیده اندرکنش بین خاصیت نفوذپذیری و تهاجم دخالت می کند. مثلاً بر اثر کربناسیون از مقدار تخلخل کاسته می شود زیرا بر اثر کربناته شدن هیدروکسید کلسیم در بتن، کربنات کلسیم حاصل می گردد که حجم آن بیشتر از هیدروکسید کلسیم است.

نفوذ کلر نیز در ساختار منافذ اثر می گذارد و در درازمدت باعث قطع ارتباط موبین می شود. همچنین وقتی سولفات به بتن منتقل می شود در مراحل اولیه یون های سولفات باعث کاهش تخلخل می گردند. زیرا از ترکیب سولفات با اجزای بتن فرآورده ای حاصل می شود که حجمی بیشتر از اجزای اولیه دارد ولی با ادامه روند واکنش ها انبساط<sup>۱</sup> حجم باعث تخریب بتن می گردد. بنابراین ریزاقلیم نیز در پدیده انتقال اثر می گذارد.

در پدیده نفوذپذیری فقط سیستم منافذ خمیر سیمان نقش ندارند، بلکه منافذ و ترک<sup>۲</sup> های میکروسکوپی در منطقه انتقال<sup>۳</sup> نیز اثر می گذارند. در واقع فصل مشترک بین خمیر سیمان و سنگدانه ها به منطقه انتقال موسوم است. در منطقه انتقال بر اثر پدیده آب انداختگی نسبت آب به سیمان بیشتر از توده خمیر سیمان و در نتیجه تخلخل در این ناحیه و همچنین مقدار هیدروکسید کلسیم در ناحیه انتقال نسبت به توده خمیر سیمان بیشتر است. در این ناحیه مقدار ترک های

<sup>1</sup> Expansion

<sup>2</sup> Crack

<sup>3</sup> Transition Zone

میکروسکوپی نیز قابل ملاحظه اند. بنابراین ساختار منطقه انتقال باعث می شود که به عنوان ناحیه ای ضعیف و با نفوذپذیری نسبتاً زیاد محسوب گردد [۳۶ و ۳۵].

### ۲-۲-۲-۱- جذب (انتقال محلول ناشی از مکش منافذ مویین)

هر مولکول سیال در مجاورت مرزهای جامد تحت اثر جاذبه مولکول های اطراف خود می باشد. از جمله این نیروها نیروی چسبندگی است که بین مولکول های سیال (آب) و مولکول های جامد (بتن) وجود دارد. این نیرو باعث ایجاد سطح کروی در محل تماس سیال با مرز جامد می شود. از طرف دیگر می دانیم فشار زیر سطوح انحنادار محدب به طور نسبی کمتر و در سطوح مقعر بیشتر از فشار عادی حاصل از سیال می باشد. همین خاصیت باعث می شود که مایع در مجاری باریک یا مویین صعود یا نزول کند. برای مولکول های آب این سطح محدب بوده و باعث صعود آب به داخل بتن می شود. اگر  $r$  شعاع منفذ مویین باشد معمولاً ارتفاع آب (H) معادل  $15/r$  به دست می آید.

### ۲-۲-۲-۲- نفوذ<sup>۱</sup> (انتقال محلول تحت اثر گرادیان یا تغییر فشار)

نفوذپذیری بتن اغلب با آزمایش جریان ایجاد شده تحت فشار مشخص می شود. طبق قانون

داریسی داریم:

$$Q = -KA(dp/dx)$$

Q: میزان سیال انتقال یافته ( $m^3/s$ )

K: ضریب نفوذپذیری ( $m/s$ )

A: مساحت مقطع عرضی جریان ( $m^2$ )

$dp/dx$ : گرادیان فشار (p فشار و x فاصله بین مرجع و مقطع عرضی است).

نفوذپذیری بتن را می توان در آزمایشگاه اندازه گرفت، اما نتایج این آزمایش عمدتاً مقایسه ای

است. در این آزمایش اطراف نمونه را با ماده غطر قابل نفوذ آب بند می کنند و فقط سطح فوقانی

<sup>1</sup> Permeability

آزمونه در معرض آب تحت فشار قرار داده می شود. هنگامی که وضعیت به حالت تعادل می رسد دبی آب از میان یک ضخامت معین از بتن در یک زمان مشخص اندازه گیری می شود و ضریب نفوذپذیری محاسبه می شود [۳۴].

### ۲-۲-۳- پخش<sup>۱</sup> (انتقال یونی تحت اثر گرادیان یا تغییر غلظت)

پخش انتقال ماده است وقتی که در اثر اختلاف غلظت به وجود آید. مکانیزم انتقال واقعی با حرکات تصادفی مولکول ها تعریف می شود. این مولکول ها دائماً در حال برخورد با مولکول های مصالحی هستند که پخش در درون آنها صورت می گیرد. فیک<sup>۲</sup> پی برد که این مراحل شبیه هدایت حرارت می باشد و با معادلات انتقال گرمای فوریه منطبق است، لذا قانون اول خود را به شرح زیر ارائه کرد [۳۴]:

$$Q = - DA(dc/dx)$$

Q : میزان مواد منتقل شده (kg/s)

D : ضریب پخش پذیری (m<sup>2</sup>/s)

A : مساحت مقطعی که از درون آن صورت می گیرد (m<sup>2</sup>)

dc/dx : گرادیان غلظت (c غلظت ماده منتشر شده و x فاصله صفحه مرجع و مقطع عرضی

است. علامت منفی نشان دهنده این است که جهت جریان مخالف با جهت افزایش غلظت است.)

ضریب پخش مشخص شده در معادلات فوق برای مصالح ایزوتروپیک صدق می کند ولی برای بتن نمی تواند به درستی ارزیابی شود. زیرا جریان به ساختار فضاهای خالی قابل نفوذ محدود می شود. فاصله ای که مولکول ها از میان فضاهای خالی طی می کنند از ضخامت نمونه بیشتر است؛ زیرا این مسیر مستقیم نیست و به صورت مارپیچ است. ثانیاً قطر فضاهای خالی ممکن است آنقدر کوچک باشد که حرکت تصادفی مولکول ها را محدود کند [۳۴].

<sup>1</sup> Diffusion

<sup>2</sup> Fick

دایموند<sup>۱</sup> و همکارانش بیان کردند بیشترین پخش وقتی اتفاق می افتد که قطر تخلخل های مویینه از ده برابر مسیر آزاد مولکولی پخش تجاوز کند.

تا آنجا که به پخش گازها مربوط می شود، دی اکسید کربن و اکسیژن مورد توجه اصلی می باشند. گاز دی اکسید کربن منجر به کربناته شدن خمیر هیدراته شده سیمان می گردد و گاز اکسیژن پیشرفت خورگی فولاد مدفون در بتن را میسر می سازد. ضریب پخش یک گاز متناسب است با عکس ریشه دوم جرم مولکولی آن گاز. به عنوان مثال اکسیژن از دیدگاه تئوری ۱/۱۷ برابر سریعتر از دی اکسید کربن پخش می شود. پخش از میان آب ۴ مرتبه کندتر از هوا است. ضریب پخش با عمر نیز تغییر می کند زیرا مجموعه منافذ داخل بتن، به ویژه هنگامی که هیدراسیون سیمان ادامه دارد، با مرور زمان تغییر می کند [۹۵]. پخش اکسیژن از میان بتن شدیداً تحت تأثیر عمل آوری در رطوبت قرار می گیرد؛ مدت طولانی عمل آوری بتن در رطوبت، ضریب پخش را تقریباً شش برابر کاهش می دهد. علاوه بر پخش گازها، یون های دارای ماهیت مهاجمی به ویژه کلریدها و سولفات ها، به روش پخش از میان آب داخل منافذ انتقال می یابند. واکنش های خمیر هیدراته شده سیمان در داخل آب منافذ انجام می گیرند، به طور که «پخش یونی<sup>۲</sup>» با توجه به حمله سولفات ها به بتن و حمله کلریدها به فولاد مدفون در آن اهمیت دارد. پخش یونی وقتی بیشترین تأثیر را دارد که منافذ خمیرسخت شده سیمان اشباع شده<sup>۳</sup> باشند، اما در بتنی که بخشی از آن اشباع شده<sup>۴</sup> نیز پخش یونی اتفاق می افتد.

پخش نیز همانند نفوذپذیری در نسبت های آب به سیمان کمتر، مقدار کمتری دارد اما باید به این نکته توجه داشت که تأثیر نسبت آب به سیمان بر پخش، خیلی کمتر از تأثیر آن بر نفوذپذیری است.

1 Daimond

2 Ionic diffusion

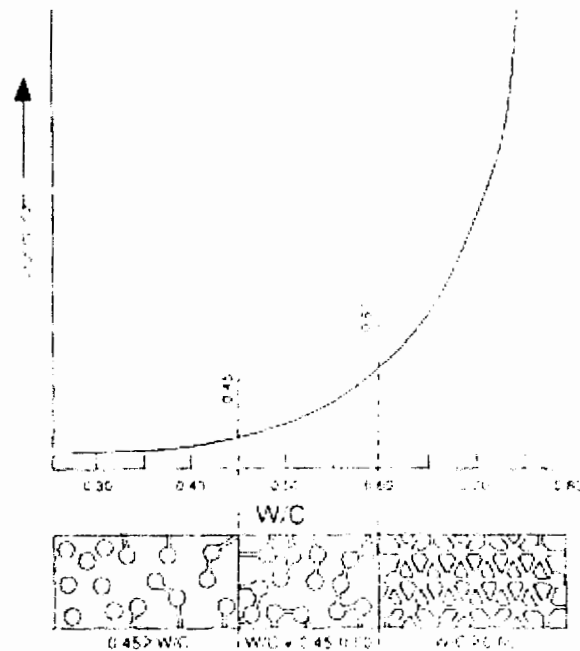
3 Saturated

4 Partially Saturated

### ۲-۲-۳- عوامل مؤثر در نفوذپذیری بتن

به طور کلی نفوذپذیری مبین کیفیت بتن بوده و عامل مهمی در مسأله دوام بتن محسوب می‌شود. نفوذپذیری تحت تأثیر عوامل متعددی قرار می‌گیرد که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- نسبت آب به سیمان: هر چه نسبت آب به سیمان خمیر کمتر می‌شود، روند کاهش در ضریب نفوذپذیری بتن سریع‌تر می‌گردد. برای خمیرهایی که به اندازه یکسان هیدراته شده باشند، هر چه نسبت آب به سیمان کمتر باشد نفوذپذیری کمتر است. این وضعیت در شکل ۲-۲ کاملاً مشهود است.



شکل ۲-۲- اثر نسبت آب به سیمان بر ساختار منفذ و نفوذپذیری بتن [۵]



خمیرهایی که نسبت آب به سیمان آنها کمتر از حدود ۰/۶ است، یعنی خمیرهایی که در آنها لوله‌های مویینه بر اثر پر شدن در بعضی نقاط ناپیوسته شده‌اند، شیب خط به مقدار قابل ملاحظه‌ای کمتر است. همانطور که در شکل ۲-۲ مشاهده می‌شود کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۷۵ به ۰/۳ ضریب نفوذپذیری را یکصد بار کاهش می‌دهد. نسبت آب به سیمان بیشتر حجم تخلخل و مسلماً ابعاد حفرات مویینه را بیشتر می‌کند.

۲- تخلخل بتن: به طور کلی نمی‌توان ارتباط ساده و مستقیمی بین تخلخل و نفوذپذیری برقرار کرد. نفوذپذیری بتن علاوه بر اندازه و توزیع منافذ به تداوم آنها نیز بستگی دارد. هر چند تخلخل ژل<sup>۱</sup> سیمان حدود ۲۸ درصد است اما نفوذپذیری آن تقریباً  $10^{-16}$  متر بر ثانیه است. این مسأله به علت بافت بی‌اندازه ریز خمیر سخت شده سیمان است و منافذ ژلی بی‌اندازه کوچک و متعدد عملاً تأثیری در نفوذپذیری بتن ندارند؛ اما فضاها و حفره‌های مویینه عامل اصلی نفوذپذیری بتن به شمار می‌روند. این حفره‌ها بزرگ‌تر بوده و به همین دلیل عبور آب از میان این منافذ، خیلی آسان‌تر از عبور آب از میان منافذ بسیار کوچک‌تر ژل - که تقریباً غیر قابل نفوذ است - صورت می‌گیرد. نفوذپذیری خمیر سیمان به وسیله تخلخل مویینه آن کنترل می‌شود. کوچکی منافذ ژلی در حدی است که آب بصورت دو یا چند مولکول به بلورهای هیدرات می‌چسبد و این آب نمی‌تواند در فشارهای معمول از جای خود حرکت کند و حتی در دمای معمولی نیز جابجا نمی‌شود. مگر این که دمای بتن زیاد شود که در دمای بیش از ۵۰۰ درجه سانتیگراد این آب‌ها خارج می‌شوند و چسبندگی<sup>۲</sup> ژل از بین می‌رود.

۳- درجه هیدراسیون<sup>۳</sup>: نفوذپذیری خمیر سیمان با پیشرفت درجه هیدراسیون آن تغییر می‌کند. در یک خمیر تازه، جریان آب به وسیله اندازه، شکل و غلظت ذرات اولیه سیمان کنترل می‌شود. با پیشرفت هیدراسیون نفوذپذیری به سرعت کاهش می‌یابد زیرا حجم خالص ژل (شامل

<sup>1</sup> Gel

<sup>2</sup> Cohesion

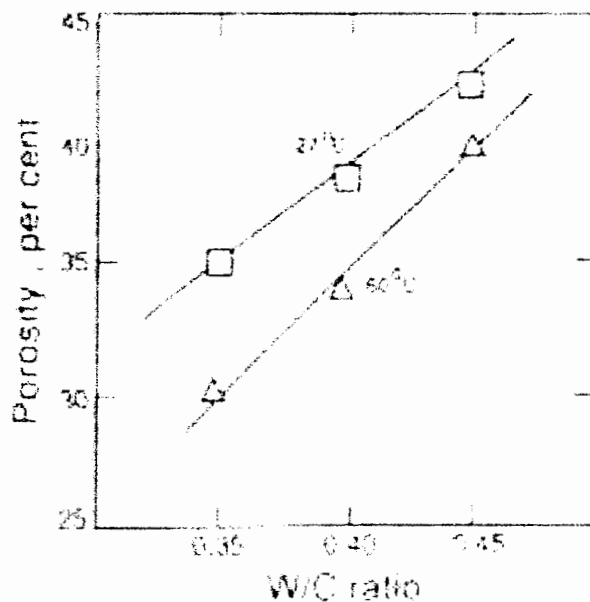
<sup>3</sup> Hydration

منافذ در ژل) تقریباً ۲/۱ برابر حجم سیمان هیدراته نشده است و لذا ژل تدریجاً بعضی از فضاهای اولیه را که با آب پر شده بودند اشغال می‌کند. در یک خمیر به بلوغ رسیده، نفوذپذیری به اندازه، شکل، غلظت ژل و میزان پیوستگی لوله‌های مویینه بستگی دارد.

۴- خواص سیمان: نفوذپذیری بتن تحت تأثیر خواص سیمان نیز قرار می‌گیرد. در یک نسبت آب به سیمان ثابت، سیمان درشت تر تمایل به ایجاد خمیری با نفوذپذیری بیشتر از سیمان ریزدانه دارد. به طور کلی هر چه مقاومت خمیر بیشتر شود نفوذپذیری آن کمتر می‌گردد.

۵- اثر دما: افزایش دما بر نحوه توزیع منافذ داخل بتن اثر می‌گذارد. همچنین این افزایش باعث درشت‌تر شدن منافذ در سیمان هیدراته می‌شود. اصولاً نفوذپذیری از طریق منافذ درشت‌تر تعیین می‌شود. به ویژه در مناطق گرم جنوب ایران، با افزایش دما نفوذپذیری بتن به واسطه درشت‌تر شدن منافذ سیمان، بیشتر می‌شود و در نتیجه دوام بتن بیشتر به خطر می‌افتد.

همانطور که در شکل ۲-۳ مشاهده می‌شود میزان تخلخل خمیر سیمان با افزایش دمای عمل آوری و نسبت آب به سیمان افزایش می‌یابد.



شکل ۲-۳- تأثیر نسبت آب به سیمان و دمای عمل آوری بر تخلخل خمیر سیمان [۳۹]

## ۲-۲-۴- جذب آب

حجم فضای منافذ در بتن، بدون توجه به سرعت حرکت سیال به داخل آن به وسیله جذب آب سنجیده می‌شود. این دو کمیت الزاماً با یکدیگر ارتباط ندارند. جذب آب را معمولاً به وسیله خشک نمودن نمونه تا جرم ثابت، غوطه ور نمودن آن در آب و سنجش افزایش جرم به صورت درصدی از جرم خشک می‌سنجند. در این رابطه روش‌های مختلفی را می‌توان به کار برد و طبیعتاً نتایج متفاوتی به دست می‌آید. یکی از این موارد تفاوت، دمای خشک کردن نمونه بتنی است. برخی از استانداردها دمای بالاتری را برای خشک کردن نمونه تجویز کرده‌اند. خشک شدن در دمای معمولی ممکن است در خارج کردن تمام آب مؤثر نباشد، از طرف دیگر خشک شدن در دماهای زیاد ممکن است قسمتی از آب ترکیب شده را نیز خارج نماید. به هر حال در شرایط یکسان از لحاظ آزمایش، برای اهداف مقایسه‌ای شیوه مناسبی است [۱۳].

## ۲-۲-۵- جذب آب سطحی<sup>۱</sup>

خصوصیات جذب آب منطقه بیرونی بتن که پوشش میلگردها را به عهده دارد، مورد توجه خاص قرار گرفته است. به این دلیل آزمایش‌هایی که جذب آب سطحی را می‌سنجند طرح شده‌اند. آزمایش برای تعیین جذب آب سطحی اولیه، در بخش پنجم آیین نامه BS1881 تشریح شده است. روند جذب آب به وسیله منطقه سطحی بتن نسبت به زمان در دامنه ۱۰ دقیقه تا یک ساعت تحت فشار ۲۰۰mm آب سنجیده می‌شود. این فشار قدری بیشتر از فشاری است که توسط باران شدید ایجاد می‌شود. روند جذب آب سطحی اولیه بر حسب میلی‌لیتر بر مترمربع در ثانیه بیان می‌شود. جرم آبی که توسط بتن در جریان آزمایش جذب می‌شود، به میزان رطوبت قبلی آن بستگی دارد. به این دلیل نتایج جذب آب سطحی اولیه را در صورتی می‌توان تفسیر کرد که بتن قبل از انجام آزمایش‌ها به وضعیت رطوبتی معینی رسانده شده باشد، لذا این آزمایش را نمی‌توان در مورد بتن درجا انجام داد.

<sup>۱</sup> Sorption

## ۲-۲-۶- جذب مویینه بتن

آزمایش‌های نفوذپذیری عمدتاً واکنش بتن نسبت به فشار را می‌سنجند، در حالی که این عامل به ندرت باعث حرکت سیالات در بتن می‌شود. بنابراین نیاز به نوع دیگری از آزمایش‌ها وجود دارد. آزمایش دیگری که در مورد بتن انجام می‌شود به این صورت است که روند جذب آب توسط مکش مویینه بتن اشباع نشده که در تماس با آب قرار گرفته است را می‌سنجند. همانند آزمایش جذب سطحی، هر چه میزان رطوبت بتن بیشتر باشد، مقدار جذب آب مویینه اندازه‌گیری شده کمتر خواهد بود. مکش موئینگی فقط می‌تواند در بتنی که تا حدی خشک شده است صورت گیرد. هیچ‌گونه جذب مویینه‌ای در بتن اشباع صورت نمی‌گیرد.

اساساً در آزمایش جذب مویینه، روند جذب به وسیله بالا رفتن آب در لوله‌های مویینه در یک نمونه بتنی که بر روی تکیه‌گاهی قرار گرفته است و فقط ۲ تا ۵ میلی‌متر تحتانی آن در آب مستغرق است، تعیین می‌گردد. افزایش در وزن نمونه با زمان ثبت می‌شود. نشان داده شده است که رابطه‌ای به صورت زیر برقرار می‌باشد [۹]:

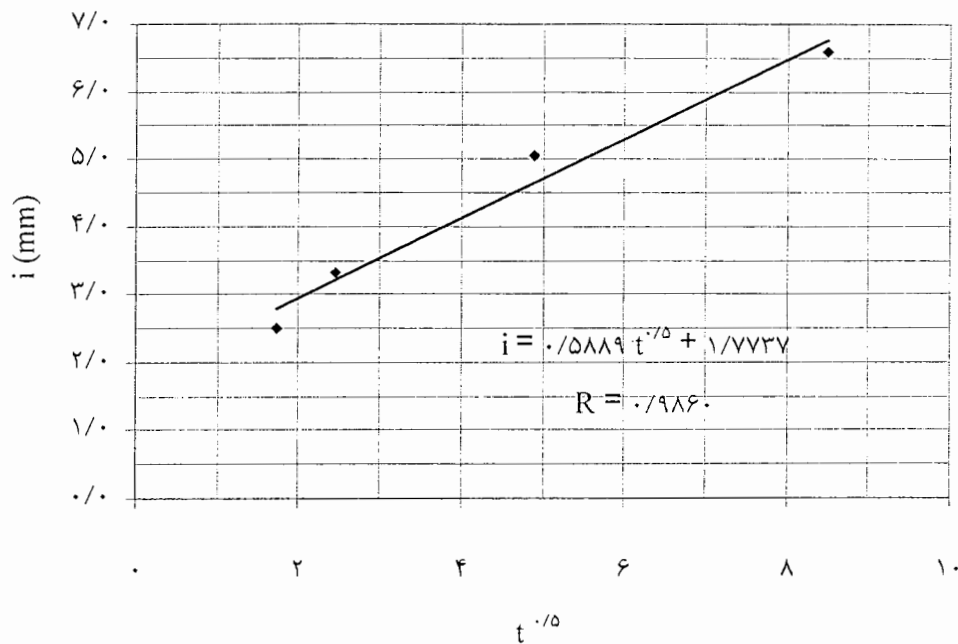
$$i = S.t^{0.5} \quad (1-2)$$

$i$  = افزایش جرم نمونه بر حسب  $gr/cm^2$  یا  $mm$

$t$  = زمان بر حسب ساعت از زمان آغاز آزمایش

$S$  = ضریب جذب مویینه بر حسب  $mm/hr^{0.5}$

در این آزمایش، چندین سنجش در زمان‌های متفاوت صورت می‌گیرد. نقاط مربوط به افزایش در جرم در مقابل جذر زمان رسم می‌شوند و خط مستقیمی بر این نقاط برآزش داده می‌شود. جهت توضیح کامل تر مطلب یک مثال از نمودار جذب مویینه بتن در شکل ۲-۴ ذکر شده است.



شکل ۲-۴- نمودار جذب مویینه بتن

### ۲-۳- دوام بتن در سواحل جنوبی کشور

آنچه مشخص است خلیج فارس از بدترین محیط‌هایی است که به سلامتی و پایداری بتن ضرر می‌زند. درجه حرارت و رطوبت زیاد، وجود املاح و نمک‌های فراوان، حملات بیولوژیکی و سایش امواج در منطقه جزر و مد<sup>۱</sup> از عوامل اصلی تخریب سازه‌های بتنی در سواحل جنوبی کشور به شمار می‌روند. درجه حرارت متوسط این منطقه زیاد بوده و به طور متوسط بین ۳۰-۴۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. تغییرات درجه حرارت در شبانه روز و در طول سال نیز بسیار زیاد است. تغییرات در طول سال به بیش از ۴۵ درجه سانتیگراد می‌رسد.

<sup>۱</sup> Tide

جزر و مد در این منطقه در حدود ۲/۵ متر است و درطول شبانه روز عموماً دو بار جزر و مد انجام می‌شود. جزر و مد خود از عواملی است که باعث تشدید فرآیند خرابی بتن می‌گردد. بیشترین خرابی سازه‌های بتنی سواحل جنوبی در محدوده جزر و مد قرار دارد. املاح موجود در آب‌های این منطقه از دیگر آب‌های آزاد جهان بیشتر است. نسبت کلرور سدیم و سولفات سدیم که دو عامل اصلی خرابی بتن هستند، درخلیج فارس به میزان ۱۷ درصد بیشتر از بیشترین حد نمک‌های مشابه در آب‌های آزاد جهان است [۱۳ و ۱۴]. نتایج آنالیز شیمیایی آب خلیج فارس در منطقه عسلویه استان بوشهر، که با همکاری دانشگاه علوم پزشکی استان بوشهر انجام شد نشان می‌دهد املاح موجود در آب خلیج فارس نسبت به سایر آب‌های جهان در حد بسیار بالایی قرار دارد. نتیجه این آنالیز شیمیایی در جدول ۱-۲ آمده است و با وضعیت املاح آب سایر دریاهای دنیا که از منبع [۴] برداشت شده مقایسه شده است.

جدول ۱-۲- مقایسه املاح آب خلیج فارس با آب سایردریاهای دنیا

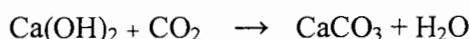
املاح	آب خلیج فارس		مدیترانه	دریای شمال	آتلانتیک	بالتیک
	نمونه دوم (مربوط به منطقه عسلویه)	نمونه اول				
Ca <sup>++</sup>	۵۶۱	۴۳۰	۴۷۰	۴۳۰	۴۱۰	۱۹۰
Mg <sup>++</sup>	۱۳۶۶	۱۴۶۰	۱۷۸۰	۱۳۳۰	۱۵۰۰	۶۰۰
SO <sub>4</sub> <sup>++</sup>	۳۵۵۰	۲۷۲۰	۳۰۶۰	۲۷۸۰	۲۵۴۰	۱۲۵۰
Cl <sup>-</sup>	۱۹۴۰۰	۲۱۴۵۰	۲۱۳۸۰	۱۹۸۹۰	۱۷۸۳۰	۸۹۶۰

رطوبت زیاد و هوای شرجی این منطقه که تغییر روزانه، فصلی و سالانه آن قابل توجه است، نیز از عوامل مؤثر در خرابی بتن محسوب می‌شود. هوای شرجی منطقه که یون‌های فعال کلر را با خود حمل می‌کند، ضمن آنکه بر روی سازه‌های بتنی تأثیر می‌گذارد، به عنوان عاملی برای تشدید خوردگی با دیگر عوامل مضر همکاری می‌نماید.

در حال حاضر بسیاری از سازه‌ها و اسکله‌های بنادر جنوب ایران دچار مشکلات فراوانی از قبیل انبساط مخرب، ریختن قسمت‌هایی از بتن آن و خوردگی میلگردهای داخل آن شده‌اند که نتیجه آن به پایان رسیدن زودرس عمر این سازه‌ها خواهد بود. واکنش‌های شیمیایی مخربی که در بتن‌های واقع در مناطق جنوبی کشور ممکن است انجام شود در ادامه توضیح داده می‌شوند.

### ۲-۳-۱- کربناته شدن بتن<sup>۱</sup>

هوا حاوی CO<sub>2</sub> است و در مجاورت رطوبت، با سیمان هیدراته شده واکنش نشان می‌دهد. قلیائیت زیاد بتن تا حدی ناشی از حضور قلیایی‌های Na<sub>2</sub>O و K<sub>2</sub>O سیمان و به طور اصلی به دلیل وجود هیدروکسید کلسیم است که فرآورده هیدراسیون سیمان می‌باشد. سیستم موئینگی خمیر سیمان اجازه می‌دهد که هوا داخل بتن نفوذ کرده و واکنش CO<sub>2</sub> هوا با هیدروکسید کلسیم Ca(OH)<sub>2</sub> بتن اتفاق بیفتد. این واکنش مطابق معادله زیر انجام می‌شود و «کربناته شدن» یا «کربناسیون» نامیده می‌شود.



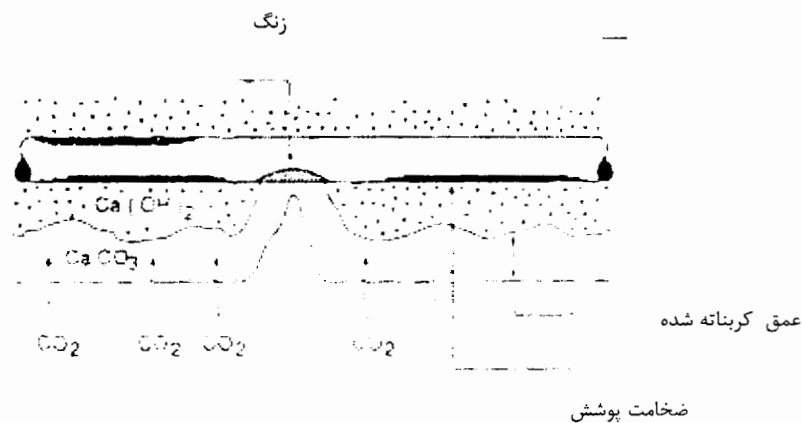
واکنش فوق فقط در حضور رطوبت مناسب انجام می‌گیرد.

کربناته شدن به خودی خود سبب از هم پاشیدگی بتن نمی‌شود، بلکه دارای اثرات جنبی در بتن است. یکی از این اثرات، جمع شدگی<sup>۲</sup> ناشی از کربناته شدن است. اثر دیگری که کربناته شدن دارد آن است که با پیشرفت کربناتاسیون در بتن، میزان PH آب منفذی خمیر سخت شده سیمان از حدود ۱۲/۶ تا ۱۳ به مقداری در حدود ۹ کاهش پیدا می‌کند. وقتی که تمام Ca(OH)<sub>2</sub> کربناته شود، مقدار PH به ۸/۳ کاهش می‌یابد [۷ و ۱۳]. اهمیت پایین آمدن PH به این شرح است:

<sup>1</sup> Carbonation

<sup>2</sup> Shrinkage

بر روی فولاد مدفون در خمیر سیمان در حال هیدراته شدن به سرعت یک «لایه انفعالی» تشکیل می‌شود که به شدت به لایه فولادی زیرین می‌چسبد و از آن به طور کامل در برابر واکنش با اکسیژن و آب محافظت می‌کند و از تشکیل زنگ زدگی و خوردگی جلوگیری می‌گردد. این حالت فولاد به نام «حالت انفعالی» شناخته می‌شود. حفظ این حالت منوط به آن است که PH آب منفذی در تماس با لایه انفعالی، به اندازه کافی زیاد باشد. بنابراین وقتی که جبهه PH کم، به حوالی سطح میلگردهای فولادی برسد، لایه اکسید محافظ از بین می‌رود و خوردگی می‌تواند رخ دهد، مشروط بر آنکه اکسیژن و رطوبت لازم برای واکنش‌های خوردگی موجود باشند. به این دلیل تعیین عمق کربناته شده بتن اهمیت پیدا می‌کند. شکل ۲-۵ توضیح شماتیکی را در خصوص کربناته شدن بتن نشان می‌دهد.



شکل ۲-۵- فرآیند پیشروی کربناسیون [۷]

کربناته شدن از سطح بتن شروع می‌شود و به سمت داخل نفوذ می‌کند. سرعت پیشروی کربناتاسیون از یک طرف به کیفیت بتن (مقدار کل آهک، میزان نفوذپذیری و...) و از طرف دیگر به عوامل محیطی مثل دما و رطوبت بستگی دارد. [۷ و ۱۳].



۲-۳-۲- حمله سولفات‌ها<sup>۱</sup>

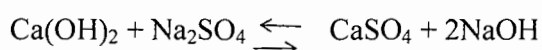
سولفات‌های محلول به ویژه سولفات‌های سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در اغلب نقاط دنیا به طور طبیعی در خاک و آب وجود دارند. کلیه سولفات‌ها برای بتن مضر بوده و محصولات جامد واکنش‌های سولفات‌ها حجم بزرگ‌تری در مقایسه با ترکیبات اولیه دارند و لذا باعث خرد شدن خمیر سیمان می‌شوند. یک عامل خسارت‌زا به ویژه در منطقه پاشش، تبلور سولفات سدیم و منیزیم و افزایش حجم است که یک حمله فیزیکی محسوب می‌شود. به طور کلی حمله سولفات‌ها به محصولات سیمانی از طریق دو واکنش به شرح ذیل صورت می‌گیرد.

الف- واکنش ترکیب سولفات با هیدروکسید کلسیم  $\text{Ca(OH)}_2$

این واکنش به ماهیت سولفات بستگی دارد و به چند صورت انجام می‌شود:

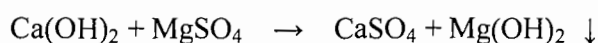
۱- واکنش با سولفات سدیم  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ : این واکنش حالت تعادلی دارد؛ یعنی واکنش به طور

کامل به یک سمت انجام نمی‌شود.



۲- واکنش با سولفات منیزیم  $\text{MgSO}_4$ : برعکس واکنش قبلی، واکنش سولفات منیزیم که به

صورت زیر نوشته می‌شود واکنشی کاملاً یک طرفه است.



از طرف دیگر ژل هیدراته سیلیکات کلسیم (C-S-H) که از محصولات هیدراته شدن سیمان

می‌باشد تنها در حضور هیدروکسید کلسیم  $\text{Ca(OH)}_2$  پایدار است. بنابراین سولفات منیزیم برای به

دست آوردن هیدروکسید کلسیم بیشتر، سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) را تجزیه می‌کند. یعنی

در محلول‌های قوی سولفات منیزیم نه تنها خرابی به علت انبساط اتفاق می‌افتد بلکه شاهد تجزیه

<sup>1</sup> Sulfate Attack

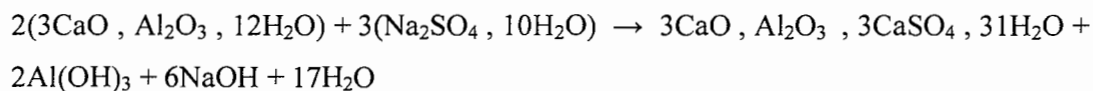
سریع ساختار سیلیکاتی نیز خواهیم بود. نتیجه حیاتی و مهم حمله سولفات منیزیم، از هم پاشیده شدن C-S-H است و لذا حمله سولفات منیزیم از دیگر سولفات‌ها شدیدتر و مخرب تر می‌باشد.

۳- واکنش با سولفات آمونیم: این نوع سولفات معمولاً در محیط‌های کشاورزی یا صنعتی وجود دارد و واکنش آن با هیدروکسید کلسیم  $\text{Ca(OH)}_2$  واکنشی یک طرفه است. در نتیجه واکنش هیدروکسید آمونیم تشکیل شده به طور مداوم به صورت گاز آمونیاک و آب متصاعد می‌شود.

۴- واکنش با سولفات کلسیم  $\text{CaSO}_4$ : سولفات کلسیم با هیدروکسید کلسیم، به دلیل آنکه هر دو طرف واکنش به طور یکسان وجود دارد واکنش نمی‌دهد؛ اما می‌تواند به هیدرات  $\text{C}_3\text{A}$  حمله کند و سولفوآلومینات کلسیم  $(\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, 3\text{CaSO}_4, 31\text{H}_2\text{O})$  را که به نام اترینگایت شناخته می‌شود تشکیل دهد. [۱۳و۷].

ب- واکنش سولفات‌ها با آلومینات کلسیم ( $\text{C}_3\text{A}$ )

سولفات سدیم  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  در بتن تازه طبق فرمول زیر با  $\text{C}_3\text{A}$  واکنش نشان می‌دهد.



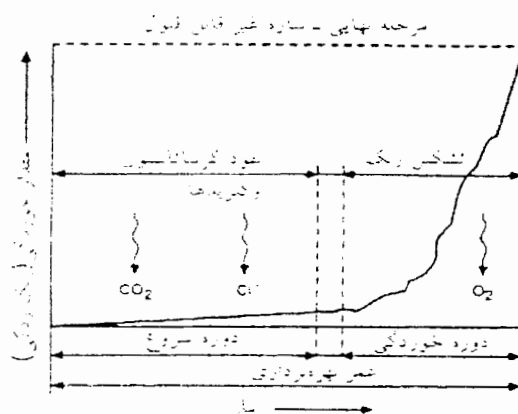
عواقب حمله سولفات‌ها نه تنها شامل انبساط مخرب و ترک خوردگی می‌باشد، بلکه سبب افت مقاومت در اثر از بین رفتن پیوستگی خمیر هیدراته شده سیمان و از بین رفتن چسبندگی سیمان به ذرات سنگدانه نیز می‌شود. مشخصه ظاهری بتنی که مورد حمله سولفات‌ها قرار گرفته است رنگ سفید آن است. خسارت معمولاً از لبه‌ها و گوشه‌ها شروع می‌شود و با ترک خوردن تدریجی و پکیدن بتن، به حالت ترد و حتی نرم تبدیل شده و این عمل ادامه می‌یابد.

### ۲-۳-۳- خوردگی<sup>۱</sup> میلگردها

اصولاً خرابی سازه‌های بتنی در خلیج فارس عمدتاً ناشی از خوردگی فولاد می‌باشد. این خوردگی الکتروشیمیایی بتن مسلح است که بیشترین مشکل را برای دوام و سلامتی سازه‌های بتنی

<sup>۱</sup> Corrosion

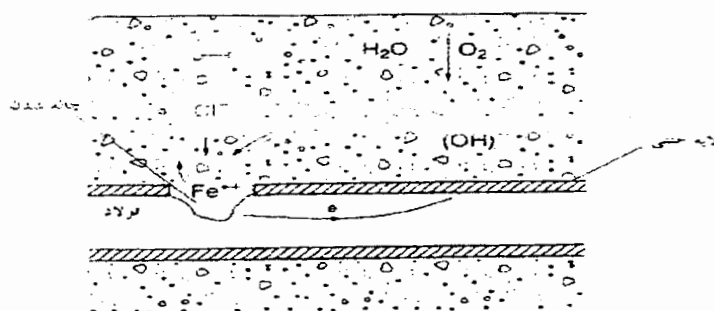
در محیط‌های دریایی به وجود آورده است. در صورتی که  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  محصول اصلی زنگ زدگی میلگرد باشد، حجم آن ۴ برابر آهن خورده نشده است. در نتیجه انبساط آن فشار زیادی به اطراف بتن وارد می‌نماید. این فشار باعث ترک خوردگی پوشش بتنی اطراف میلگرد شده و این پوشش از فولاد فاصله می‌گیرد و نمی‌تواند از آن حفاظت نماید. بدین ترتیب میلگرد بدون محافظ و در معرض عوامل محیطی قرار می‌گیرد. در نتیجه قلیایی بودن آن فایده‌ای به حال میلگرد نخواهد داشت و بلافاصله لایه انفعالی موجود از بین می‌رود. ادامه خوردگی باعث کاهش تدریجی سطح مقطع میلگرد می‌گردد و در صورتی که تعمیرات انجام نشود، تخریب و شکست ممکن است به طور کامل روی دهد. در این حالت عمر مفید سازه به اتمام رسیده است. عمر مفید یک سازه بتنی مسلح در ارتباط با فرآیند خوردگی، به طور شماتیک در شکل ۲-۶ نشان داده شده است.



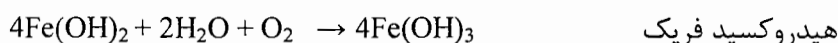
شکل ۲-۶- توصیف شماتیک از عمر مفید یک سازه بتنی مسلح [۷]

توصیف مختصری در مورد پدیده خوردگی به این صورت است که وقتی اختلاف پتانسیل الکتریکی در امتداد طول میلگرد فولادی در بتن به وجود آید، یک پیل الکتروشیمیایی ایجاد می‌گردد و مناطق آند و کاتدی پدید می‌آیند که با الکترولیتی که به صورت آب منفذی در خمیر سخت شده سیمان موجود است با یکدیگر مرتبط می‌شوند. یون‌های آهن با بار مثبت ( $\text{Fe}^{++}$ ) در آند به محلول وارد می‌شوند. از طرف دیگر الکترون‌های آزاد با بار منفی ( $e^-$ ) از میان فولاد عبور کرده و به کاتد می‌روند و در آنجا وارد الکترولیت می‌شوند؛ سپس با آب و اکسیژن ترکیب شده و یون‌های

هیدروکسید  $(OH)^-$  را به وجود می‌آورند. این یون‌ها از میان الکترولیت عبور کرده و با یون‌های آهن ترکیب می‌شوند و هیدروکسید آهن (زنگ) به وجود می‌آید. ظرفیت هیدروکسید آهن با اکسیداسیون بعدی تغییر کرده و خطرناک تر می‌شود. شکل ۷-۲ و واکنش‌های ذیل بیانگر این موضوع هستند.

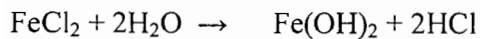
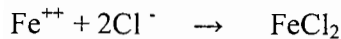


شکل ۷-۲- نمای شماتیک خوردگی الکتروشیمیایی در حضور کلریدها [۷]



همانطور که ملاحظه می‌شود در این واکنش‌ها اکسیژن در حضور آب به تدریج مصرف می‌گردد. در بتن نسبتاً خشک (احتمالاً رطوبت نسبی کمتر از ۶۰٪) و یا در بتنی که کاملاً در آب غرقاب باشد، خوردگی محسوس وجود نخواهد داشت. در بتن خشک به دلیل عدم وجود آب و در بتن غرقاب شده به دلیل عدم وجود اکسیژن به مقدار کافی (به جز مواردی که هوا در آب به وجود می‌آید مانند اثر موج‌ها) واکنش‌های خوردگی صورت نمی‌گیرند. مناسب‌ترین رطوبت نسبی بتن برای کربناته شدن و خوردگی حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد است. در رطوبت‌های نسبی زیادتر پخش اکسیژن در داخل بتن به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد [۷ و ۱۳].

برای آغاز خوردگی لازم است لایه محافظ سوراخ شود. یون‌های کلرید سطح فولاد را فعال می‌سازند و یک آند به وجود می‌آورند و سطح محافظ به عنوان کاتد عمل خواهد نمود واکنش به صورت زیر انجام می‌شود.



همانطور که ملاحظه می‌شود در واکنش اول یون  $\text{Cl}^{-}$  مصرف می‌شود ولی در واکنش دوم مجدداً تولید می‌شود و لذا در مجموع به مرور زمان کاهش مصرف نمی‌شود. بنابراین واکنش همچنان ادامه پیدا می‌کند. در پیل الکتروشیمیایی نیاز به اتصال بین آند و کاتد به وسیله آب منفذی و میلگردهای فولادی وجود دارد. لذا مجموعه منافذ موجود در خمیر سخت شده سیمان عامل عمده مؤثر بر خوردگی به‌شمار می‌رود. اینجاست که فایده کم کردن نسبت آب به سیمان بتن مشخص می‌شود.

پیامدهای خوردگی به دو صورت است: اول آن که محصولات خوردگی به ویژه  $\text{Fe(OH)}_3$  حجمی چندین برابر زیادتر از حجم اولیه فولاد را اشغال می‌کنند و لذا تشکیل آن منجر به ایجاد ترک در بتن شده و پوشش بتنی روی میلگردها از بین می‌برد. این پدیده سبب می‌شود عوامل مهاجم به داخل بتن و اطراف فولاد راه یابند و روند خوردگی به شدت افزایش یابد.

در مرحله دوم با پیشرفت خوردگی در آند، مساحت سطح مقطع فولاد کم می‌شود و لذا ظرفیت باربری آن کاهش می‌یابد. خوردگی القاء شده توسط کلریدها در یک محل بسیار کوچک آند متمرکز شده و در این نقاط چاله‌های بسیار کوچک روی فولاد ایجاد می‌شود. لازم به ذکر است که این نوع خوردگی جنبه کلی ندارد.

## ۲-۳-۱- نفوذ کلریدها

خرابی عرشه بتنی پل‌ها و خوردگی فولاد در ساختمان‌های بتنی، به خصوص سازه‌های بتنی مجاور دریا از مهم‌ترین مسائل بتن در سال‌های اخیر بوده است. علاوه بر تأثیر کربناتاسیون مهم‌ترین عامل زنگ‌زدگی و خوردگی میلگرد در بتن، وجود یون کلرید در آن است. کلریدها می‌توانند از طریق جابه‌جایی آنها در آب و نیز به وسیله پدیده پخش یون‌ها، به داخل بتن نفوذ نمایند. نفوذ طولانی و یا مکرر می‌تواند به مرور زمان منجر به تراکم یون‌های کلرید در سطح میلگردهای فولادی شود. وقتی که

بتن به صورت دائم مستغرق باشد کلریدها تا عمق قابل ملاحظه‌ای نفوذ می‌نمایند ولی تا زمانی که اکسیژن در کاتد وجود نداشته باشد هیچ‌گونه خوردگی رخ نخواهد داد. در بتنی که گاهی در معرض آب دریا قرار می‌گیرد و گاهی خشک می‌شود، نفوذ کلریدها پیش‌رونده است و توصیف آن اهمیت ویژه دارد. شرح این مطلب به صورت ذیل می‌باشد:

بتن خشک، آب نمک‌دار را جذب می‌کند و این وضعیت تحت بعضی از شرایط تا اشباع شدن بتن ادامه پیدا می‌کند. حال اگر شرایط بیرونی بتن به وضعیت خشک تغییر یابد، جهت حرکت آب معکوس و آب از انتهای لوله‌های مویینه‌ای که به هوای آزاد راه دارند تبخیر می‌شود. ولیکن در این مرحله فقط آب خالص تبخیر می‌شود و نمک‌ها باقی می‌مانند. بنابراین در نزدیکی سطح بتن غلظت نمک در آبی که هنوز در بتن وجود دارد، افزایش می‌یابد. شیب به وجود آمده در غلظت نمک باعث می‌شود که نمک‌های موجود در آب نزدیک سطح بتن به طرف مناطق داخلی که غلظت نمک آنها کمتر است حرکت نمایند. به این عمل همانطور که قبلاً توضیح داده شد جابه‌جایی به وسیله پخش می‌گویند. متناسب با رطوبت نسبی خارج بتن و طول مدت زمان خشک شدن، امکان دارد قسمت عمده آب منطقه خارجی بتن تبخیر شود. لذا آب باقی‌مانده در داخل آن با نمک اشباع می‌گردد و بعضاً این نمک‌ها به صورت بلورهایی رسوب می‌کنند. بنابراین با توجه به این وضعیت می‌توان مشاهده نمود که آب به طرف خارج و نمک‌ها به طرف داخل بتن حرکت می‌کنند.

در چرخه بعدی خیس شدن بتن با آب نمک دار، با برقراری مجدد جریان آب در داخل لوله‌های مویینه، مقدار بیشتری از نمک موجود در محلول به داخل این منافذ راه می‌یابد. حال غلظت در عمق بیشتر است و شیب آن به سمت سطح بتن کاهشی است و ممکن است قدری از نمک‌ها با روش پخش به طرف سطح بتن جابه‌جا شوند. ولیکن اگر زمان خیس شدن کوتاه باشد و خشک شدن بتن دوباره شروع شود، نفوذ آب نمک در بتن نمک را تا عمق زیادی حمل می‌کند. ضمن آنکه با شروع خشک شدن بعدی، آب خالص مجدداً تبخیر می‌شود و نمک‌ها باقی می‌مانند. میزان دقیق حرکت

نمک به طول مدت‌های خیس‌شدن و خشک‌شدن بستگی دارد. خیس‌شدن بتن خیلی سریع اتفاق می‌افتد اما خشک‌شدن آن خیلی کندتر است.

نفوذ کلریدها به داخل بتن به‌شدت تحت تأثیر تر و خشک‌شدن آن قرار می‌گیرد. حتی قسمت‌های مختلف یک سازه خاص ممکن است تحت تأثیر الگوی متفاوتی از تر و خشک‌شدن قرار گیرند و در نتیجه خسارت ناشی از خوردگی نیز در قسمت‌های مختلف یک سازه متفاوت باشد.

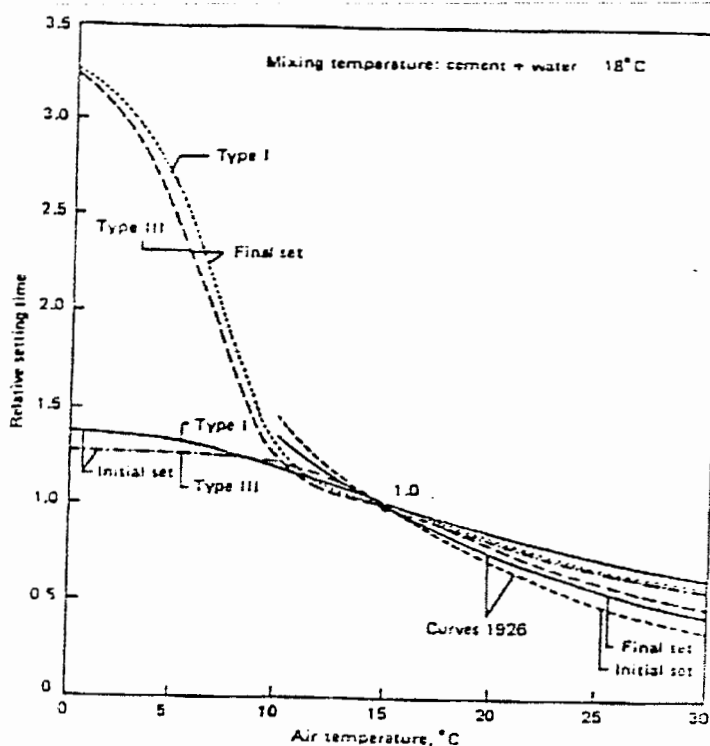
نکته مهم دیگر اینکه خشک‌شدن زیادتر بتن، این امکان را برای کلریدها فراهم می‌کند که به هنگام ترشدن بعدی بتوانند تا عمق بیشتری از بتن نفوذ کنند. بتن واقع شده در منطقه جزر، فقط هنگام پائین رفتن سطح آب نمایان می‌شود و لذا فقط در این زمان شروع به خشک‌شدن می‌کند، اما بتنی که در منطقه پاشش یا مد قرار دارد، در حالت عادی نسبتاً خشک است و فقط هنگامی که سطح آب بالا می‌آید مرطوب می‌شود. لذا کلریدها در منطقه پاشش که فقط گه‌گاهی مرطوب می‌شود بهتر و بیشتر می‌توانند نفوذ کنند و در نتیجه خوردگی در این منطقه شدیدتر از منطقه جزر است [۱۳]. به عبارت دیگر در منطقه جزر و مد هر چه از عمق به طرف سطح آب می‌آییم شدت خوردگی افزایش پیدا می‌کند.

همانطور که گفته شد بیشترین آسیب در بتنی رخ می‌دهد که فقط گه‌گاه با آب دریا خیس می‌شود. بنابراین در سطوح اطراف میله‌های مهاربند ساحلی کشتی (محلی که طناب‌های تر پیچیده می‌شوند)، یا در اطراف شیر آتش‌نشانی (در محلی که از آب دریا استفاده می‌شود) و یا در مناطق صنعتی که سطوح بتنی آنها به‌صورت متناوب با آب دریا شستشو شده و در سایر مواقع در اثر تابش خورشید و دمای زیاد خشک هستند، خوردگی بسیار شدید است [۱۳].

## ۴-۲- عمل آوری بتن به وسیله بخار

## ۱-۴-۲- اثرات دما بر بتن

آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه‌ها غالباً در دمای کنترل شده و ثابتی انجام شده است. از آنجا که آزمایش‌های اولیه در آب و هوای معتدل صورت گرفتند، دمای استاندارد انتخاب شده معمولاً در محدوده دمایی حدود ۱۸ تا ۲۱ درجه بوده است و لذا بخش زیادی از اطلاعات موجود در خصوص بتن تازه و بتن سخت شده بر اساس این محدوده دمایی تعیین شده است. ساخت و سازهای جدید و توسعه روزافزون اجرای سازه‌های بتنی در آب و هوای متنوع اعم از مناطق گرمسیر و سردسیر، ایجاب کرده است که رفتار بتن در این دماها نیز مورد بررسی قرار گیرد. با افزایش دمای عمل آوری، زمان‌های گیرش اولیه و نهایی خمیر سیمان کاهش می‌یابد. این مطلب در شکل ۲-۸ مشاهده می‌شود.



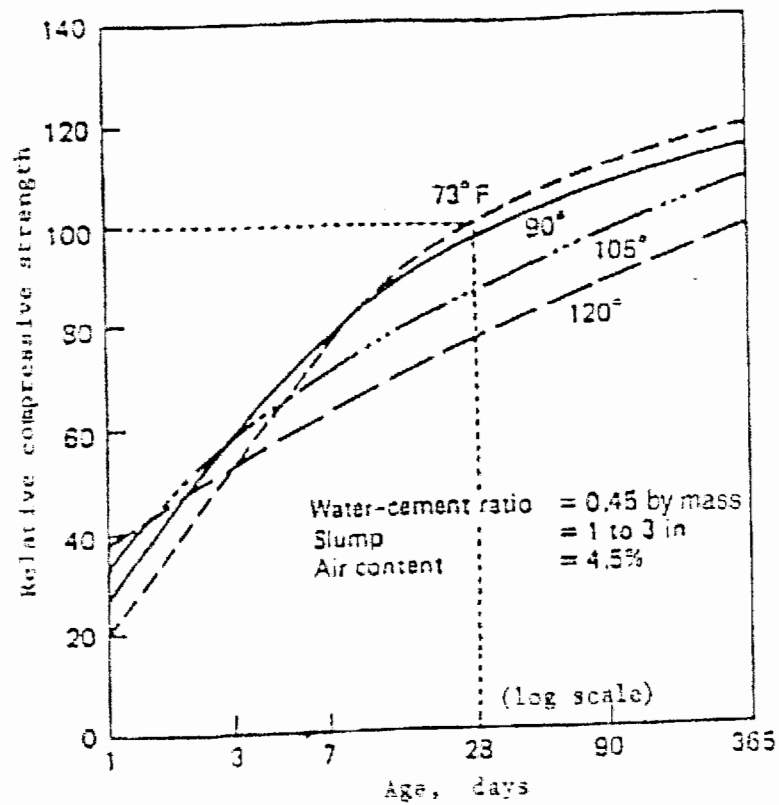
شکل ۲-۸- تأثیر دمای عمل آوری بر زمان گیرش اولیه و نهایی خمیر سیمان [۳۸]



دمای زیادتر بتن تازه در جریان ریختن و گیرش آن، مقاومت زوددهنگام بتن را افزایش می‌دهد، اما به نحو نامطلوبی بر مقاومت سنین هفت روز به بعد اثر می‌گذارد. هیدراسیون سریع اولیه، محصولاتی با ساختار فیزیکی ضعیف‌تر و تخلخل بیشتر تشکیل می‌دهد. همچنین روند سریع هیدراسیون اولیه باعث می‌شود، این محصولات در داخل خمیر به صورت غیر یکنواخت توزیع شوند. قسمت‌های ضعیف‌تر باعث کاهش مقاومت کل خمیر هیدارته شده سیمان می‌گردد [۱۳]. بررسی بتن‌هایی که تا سن ۲۸ روز در دماهای مشخص عمل‌آوری شده و سپس در دمای استاندارد آزمایشگاهی (۲۳ درجه سانتیگراد) نگهداری شدند نشان می‌دهد دمای زیادتر منتهی به مقاومت بیشتری در جریان چند روز اولیه شده است اما پس از یک تا چهار هفته وضعیت به صورت بنیادی تغییر می‌کند؛ کلیه نمونه‌هایی که تا عمر ۲۸ روز در دماهای بین ۴ تا ۲۳ درجه سانتیگراد عمل‌آوری شدند، نسبت به آنهایی که در دمای ۳۲ تا ۴۹ درجه سانتیگراد عمل‌آوری شده بودند، مقاومت بیشتری از خود نشان دادند. در این گروه، «هرچه دمای عمل‌آوری بیشتر بود، افت مقاومت بیشتری مشاهده شد». حتی بتنی که در دمای ۴ درجه سانتیگراد در قالب ریخته شد و سپس به مدت ۲۸ روز در دمای ۴- درجه سانتیگراد عمل‌آوری شده و در نهایت به مدت طولانی در دمای ۲۳ درجه سانتیگراد نگهداری شد، از عمر ۳ ماه به بعد، نسبت به بتن مشابهی که به طور مداوم در دمای استاندارد آزمایشگاهی (۲۳ درجه سانتیگراد) عمل‌آوری شده بود، مقاومت بیشتری از خود نشان داد [۱۳].

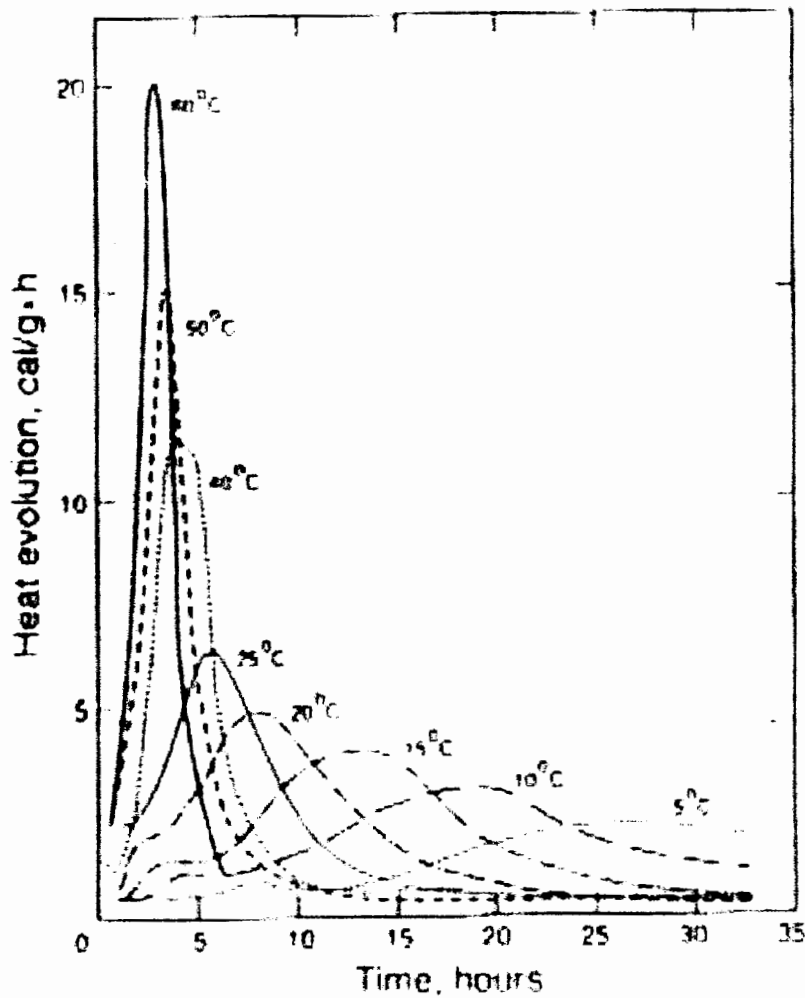
نمونه ای دیگر از تأثیر دمای ریختن و عمل آوری بتن بر مقاومت های کوتاه مدت و درازمدت

بتن در شکل ۹-۲ ملاحظه می شود.



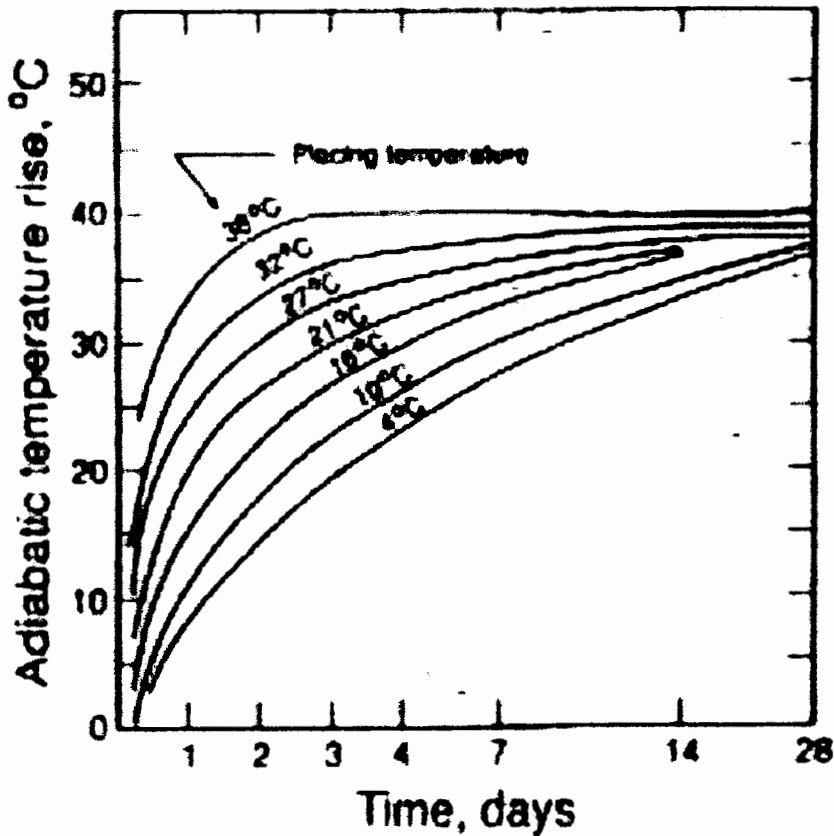
شکل ۹-۲- تأثیر دمای ریختن و عمل آوری بر مقاومت های کوتاه مدت و درازمدت بتن [۳۸].

واکنش بین آب و سیمان یک واکنش گرمازاست. در اثر افزایش دما در انجام این واکنش تسریع ایجاد می شود. بنابراین طبیعی است که میزان حرارت زایی ناشی از هیدراته شدن اجزاء سیمان تابعی از دما باشد. بررسی منابع موجود این مطلب را تأیید می کند. در شکل ۱۰-۲ گرمزایی ناشی از هیدراته شدن  $C_3S$  و تأثیرپذیری آن از دما مشاهده می شود.



شکل ۱۰-۲- اثر دما بر گرمزایی ناشی از هیدراته شدن  $C_3S$  [۳۹]

در بتن های حجیم<sup>۱</sup> (جسیم) نظیر سدهای بتنی، افزایش دمای بتن و در نتیجه انبساط ناشی از آن باید کاملاً مشخص و شناخته شده باشد. لذا افزایش گرمایی و تأثیرپذیری آن از دمای ریختن و عمل آوری بتن، در بتن های حجیم اهمیت خاصی دارد. شکل ۲-۱۱ این تأثیر را بیان می کند.



شکل ۲-۱۱- اثر دمای اولیه بر رشد دمای بتن حجیم [۳۹]

## ۲-۴-۲- بلوغ بتن

با سپری شدن زمان و افزایش سن بتن، مقاومت آن به واسطه پیشرفت هیدراسیون سیمان افزایش پیدا می کند. این مطلب به همراه این واقعیت که افزایش دما نیز موجب تسریع در واکنش هیدراسیون سیمان و در نتیجه افزایش مقاومت بتن می گردد، موجب این پیشنهاد شد که مقاومت

<sup>۱</sup> Mass Concrete

بتن به صورت تابعی مرکب از «زمان» و «دما» بیان شود. به عبارت دیگر می‌توان گفت مقاومت بتن تابعی است از (دما × فاصله زمانی)  $\Sigma$  و حاصل این انتگرال را «بلوغ<sup>۱</sup> بتن» یا «رسیدگی بتن» می‌نامند.

طبعاً مبدأ زمان در تابع بلوغ از هنگام ساخت بتن در نظر گرفته می‌شود، چرا که از این هنگام واکنش هیدراسیون سیمان آغاز می‌شود. در مورد دما نیز باید مبدأ مربوطه که در دماهای پائین‌تر از آن واکنش هیدراسیون انجام نگیرد را پیدا نمود. این مبدأ به صورت تجربی برابر ۱۲- تا ۱۰- درجه سانتیگراد بدست آمده است. بتن به مرور زمان در دماهای زیر نقطه انجماد آب و تا حدود ۱۲- درجه سانتیگراد افزایش مختصری در مقاومت از خود نشان می‌دهد. معمولاً دمای پایه‌ای که در تابع بلوغ به کار برده می‌شود ۱۰- درجه سانتیگراد است [۱۳]. بر این اساس ACI 308 رابطه بلوغ بتن را به صورت زیر بیان کرده است [۱۶].

$$M = \Sigma (C + 10) \cdot \Delta t$$

که در آن:

M : بلوغ بتن بر حسب درجه-روز (°C.day) و یا درجه-ساعت (°C.hr)

C : دمای بتن بر حسب درجه سانتیگراد

$\Delta t$  : مدت دمایی که بتن در دمای C عمل‌آوری شده است بر حسب روز یا ساعت

اگر مقادیر مقاومت فشاری بتن بر حسب لگاریتم بلوغ بتن ترسیم گردد، منحنی مربوطه پس از یک دوره اولیه تقریباً خطی خواهد بود [۲]. از این منحنی می‌توان به عنوان روشی برای تخمین مقاومت بتن استفاده نمود. در این زمینه آئین نامه ASTM C1074 روابط مفیدی را پیشنهاد نموده است [۳۰]. اگر در نظر باشد که مقاومت بتنی با سابقه دمایی مشخص به طور تقریبی تخمین زده شود، محاسبه بلوغ بتن می‌تواند کاربرد داشته باشد. به عنوان مثال، در مواردی که لازم است درباره بازکردن قالب و حایل‌های اطراف آن، باز کردن وسایل پیش تنیدگی یا خاتمه دادن به محافظت بتن

<sup>۱</sup> Maturity

در هوای سرد تصمیم‌گیری شود، دانستن تابع بلوغ بتن ارزش پیدا می‌کند. تجهیزاتی جهت اندازه‌گیری بلوغ بتن نیز به صورت تجاری عرضه شده است. این وسایل در حقیقت دستگاه‌های اندازه‌گیری دما هستند که با ساعت کنترل شده و در داخل بتن کار گذاشته می‌شوند. انتگرال دمای بتن در رابطه با زمان گرفته می‌شود و عددی را بر حسب درجه سانتیگراد- ساعت به عنوان بلوغ بتن ارائه می‌دهد. این دستگاه‌ها می‌تواند بسیاری از عدم اطمینان‌ها را در خصوص مقاومت بتن از بین برده و لاقل در حد مؤثری کاهش دهد.

رابطه دقیق مقاومت - بلوغ به عوامل گوناگونی بستگی دارد که از آن جمله می‌توان به مقدار واقعی سیمان مصرفی، نسبت آب به سیمان و اینکه در مدت عمل آوردن بتن، کاهشی در مقدار آب درونی آن صورت پذیرفته است یا خیر، اشاره نمود. از این گذشته اثر زیانبار دمای اولیه فوق العاده بالا، قانون بلوغ بتن را از واقعیت دور می‌کند و به عبارت ساده‌تر آن را بی‌اعتبار می‌سازد. از این جهت این قانون تحت شرایط مشخص و کنترل شده‌ای قابل اعتماد و بهره‌برداری است [۲].

## ۲-۴-۳- عمل آوری بتن در بخار

افزایش دمای عمل آوری بتن، باعث افزایش روند توسعه مقاومت می‌شود. با استفاده از سیستم

عمل آوری با بخار<sup>۱</sup> می‌توان به مزایای زیر دست یافت [۲ و ۸ و ۱۳]:

- ۱- افزایش مقاومت اولیه بتن تا حد مورد نیاز
- ۲- امکان جابجایی قطعات بتنی در سن کم
- ۳- آزاد شدن قالب‌های مورد استفاده و امکان به کارگیری مجدد
- ۴- کاهش زمان لازم برای عمل آوری
- ۵- نصب سریع‌تر قطعات پیش ساخته بتنی
- ۶- کاهش زمان لازم برای تحویل قطعه به مشتری

<sup>۱</sup> Steam Curing

## ۸- افزایش سرعت تولید قطعات بتنی

## ۹- کاستن از فضای اشغال شده جهت انبار قطعات

تجهیزاتی که لازم است جهت عمل آوری بتن با بخار فراهم شود و اصولاً ماهیت این فعالیت‌ها ایجاب می‌کند که این روش به طور عمده جهت تولید قطعات پیش‌ساخته بتنی به کار رود. معمولاً در عمل آوری بتن در بخار با فشار اتمسفر<sup>۱</sup> از اطاق‌های مخصوص و یا تونل‌های ویژه‌ای که قطعات بتنی از میان آنها به وسیله ریل یا تسمه نقاله حرکت می‌کنند، استفاده می‌شود. روش دیگری نیز جهت عمل آوری بتن با بخار وجود دارد. در این روش می‌توان با استفاده از پوشش‌های پلاستیکی یا برزنتی روی قطعه را پوشاند و بخار را به وسیله لوله‌های انعطاف پذیر به زیر پوشش هدایت نمود. استفاده از جعبه‌های چوبی که قابل حمل بوده و می‌توان با گذاشتن آنها بر روی قطعه بتنی اتاقک کوچکی را تشکیل داد، یکی دیگر از روش‌های موجود در این سیستم است.

## ۲-۴-۴- دوام بتن عمل آوری شده با بخار

عمل آوری بتن در دماهای خیلی زیاد باعث مقاومت اولیه<sup>۲</sup> بالایی می‌شود؛ اما در درازمدت مقاومت کمتری از خود نشان می‌دهد. به همین جهت لازم است بین دماهایی که مقاومت اولیه زیادی را موجب می‌شوند و دماهایی که مقاومت نهایی زیادی را به وجود می‌آورند حد اعتدالی رعایت شود. احتمالاً کاهش در مقاومت درازمدت<sup>۳</sup> بتنی که در بخار عمل آوری شده است، به علت وجود ترک‌های خیلی ریزی است که در اثر انبساط حباب‌های هوای موجود در خمیر سیمان به وجود می‌آید. ضریب انبساط حرارتی<sup>۴</sup> هوا بیش از دو برابر ضریب انبساط حرارتی محیط اطراف آن است؛ به همین دلیل هنگامی که دمای بتن افزایش می‌یابد میزان انبساط هوا بیشتر خواهد بود. این انبساط

<sup>1</sup> Atmospheric Pressure

<sup>2</sup> Early Strength

<sup>3</sup> Late Strength

<sup>4</sup> Coefficient of Thermal Expansion

به وسیله خمیر سیمان مهار می‌شود و در نتیجه هوا تحت فشار قرار می‌گیرد. فشار هوای به وجود آمده موجب تنش‌های کششی در خمیر سیمان اطراف شده و احتمالاً ترک‌های خیلی ریزی را به وجود می‌آورد [۳]. با این توصیف، افت مقاومت در تمامی سنین بتن به وجود می‌آید اما در سنین کمتر از ۲۸ روز با اثرات افزایش مقاومت در اثر بالا بودن دمای عمل‌آوری پوشانده می‌شود.

اثرات مخرب ناشی از انبساط حباب‌های هوا را می‌توان با استفاده از یک «زمان تأخیر<sup>۱</sup>»، قبل از شروع عمل‌آوری به وسیله بخار و نیز با روند آهسته تر افزایش دما کاهش داد. در اثر این وقفه که معمولاً حدود ۲ تا ۵ ساعت در نظر گرفته می‌شود، سیر نزولی کمتری در مقاومت درازمدت پدید می‌آید. مقاومت کششی بتن در زمان تأخیر به تدریج افزایش می‌یابد و مانع از بروز ریزترک‌ها می‌گردد.

از آنجا که اثر نامساعد عمل‌آوری در بخار بر مقاومت درازمدت بتن، ناشی از تغییرات در تخلخل و اندازه منافذ در خمیر هیدراته شده سیمان می‌باشد، می‌توان انتظار داشت که عمل‌آوری در بخار، بر دوام بتن<sup>۲</sup> تأثیر داشته باشد [۱۳]. به واسطه آن که دما به هنگام زمان گیرش<sup>۳</sup> بتن، بیشترین تأثیر را بر مقاومت در عمرهای بعدی می‌گذارد، زمان تأخیر را تا هنگام گیرش در نظر می‌گیرند. پس از گذشت زمان تأخیر کافی، اثرات نامطلوب حرارت‌دهی به نحو مؤثری کاهش می‌یابد. بدون در نظر گرفتن این دوره تأخیر، افت در مقاومت ۲۸ روزه بتن عمل‌آوری شده در بخار ۷۵ درجه سانتیگراد و با نسبت آب به سیمان ۰/۵ می‌تواند به زیادی ۴۰ درصد باشد [۱۳].

دلیل دیگری نیز برای اهمیت سپری شدن زمان تأخیر وجود دارد؛ در این فاصله زمانی، واکنش سنگ گچ با  $C_3A$  در حال انجام شدن است. در دماهای زیادتر قابلیت انحلال سنگ گچ کاهش می‌یابد و در نتیجه بخشی از آن وارد واکنش با  $C_3A$  نمی‌شود. این واکنش ممکن است هنگام

<sup>1</sup> Delay Time

<sup>2</sup> Durability of Concrete

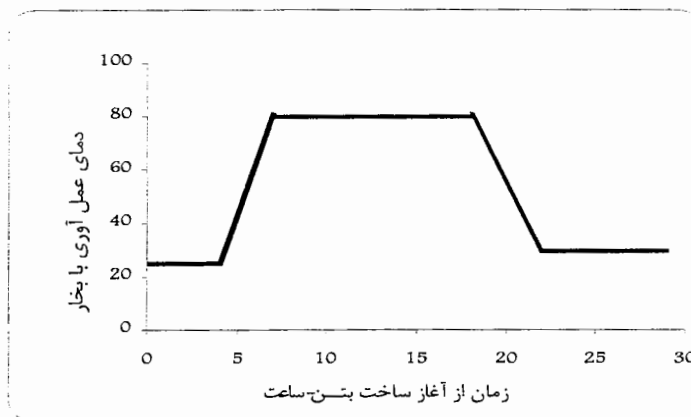
<sup>3</sup> Setting Time



می‌یابد و در نتیجه بخشی از آن وارد واکنش با  $C_3A$  نمی‌شود. این واکنش ممکن است هنگام سخت شدن بتن انجام شود و از آنجایی که از نوع منبسط شونده است برای بتن مضر و مخرب خواهد بود؛ لذا در نظر گرفتن زمان تأخیر از پیدایش این مسأله جلوگیری می‌کند.

## ۲-۴-۵- چرخه عمل آوری بتن با بخار

پس از یک زمان تأخیر ۲ تا ۵ ساعته که بتن در شرایط عمل آوری مرطوب و معمولی نگهداری می‌شود، دما با شدت حداکثر حدود ۲۲ تا ۳۳ درجه سانتیگراد در هر ساعت افزایش پیدا می‌کند. سپس در دمای حداکثر تثبیت می‌شود. حداکثر این دما در منابع موجود حدود ۸۰ درجه سانتیگراد ذکر شده است [۸ و ۱۳]. پس از آنکه بتن به مقدار لازم (برحسب مقاومتی که مورد نیاز است) در دمای حداکثر عمل آوری شد، مرحله خنک کردن بتن فرا می‌رسد. این مرحله که در آن دمای بتن به تدریج کاهش می‌یابد، باید به صورت ملایم و آهسته انجام شود. در شکل ۲-۱۲ چرخه عمل آوری بتن با بخار به صورت شماتیک مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۱۲- چرخه عمل آوری بتن با بخار

عمل آوری در بخار را می‌توان به صورت موفقیت آمیز، با انواع سیمان پرتلند و همچنین سیمان‌های آمیخته به کار گرفت اما هرگز نباید در مورد سیمان پرآلومین<sup>۱</sup> به کار برد. شرایط بسیار گرم و مرطوب آثار ناهنجار و زیان‌بخشی بر مقاومت این سیمان به جای خواهد گذاشت [۱۳و۲].

#### ۲-۴-۶- اتوکلاو نمودن<sup>۲</sup> (عمل آوری در بخار با فشار زیاد)

هر چند این مبحث ارتباط کمتری با موضوع این تحقیق دارد، ولی جهت کامل‌تر شدن مطلب به طور مختصر اشاره‌ای به این نوع عمل آوری نیز می‌گردد. در روش اتوکلاو فشارهای بیش از یک اتمسفر مورد استفاده قرار می‌گیرد و اتاق‌های عمل آوری بتن نیز باید از نوع مخزن فشار با منبع بخار تر باشد. عمل آوری بتن در بخار با فشار زیاد<sup>۳</sup> باعث می‌شود مقاومت اولیه بسیار زیادی به دست آید. به نحوی که می‌توان در ظرف تقریباً ۲۴ ساعت به مقاومت ۲۸ روزه بتن عمل آوری شده در شرایط استاندارد آزمایشگاهی رسید. به عنوان مثال به مقاومت‌های ۸۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال نیز دست پیدا کرده اند [۱۳].

معمولاً چرخه عمل آوری بتن با بخار پرفشار به این صورت است که پس از سپری شدن زمان تأخیر، افزایش دما تا حدود ۱۸۰ درجه سانتیگراد در مدت ۳ ساعت انجام می‌شود. سپس بتن به مدت ۵ تا ۸ ساعت در این دما نگه داشته می‌شود و در مدت ۲۰ تا ۳۰ دقیقه آخر فشار بخار آزاد شده و بتن خنک می‌گردد [۱۳و۸].

#### ۲-۴-۷- سایر روش‌های عمل آوری حرارتی بتن

روش‌های دیگری نیز جهت تسریع در کسب مقاومت بتن به ویژه در مناطق سردسیر وجود دارد که در این قسمت ذکر می‌شود. روش «مخلوط گرم» یکی از روش‌های موجود است که با گرم

<sup>۱</sup> High-alumina cement

<sup>۲</sup> Autoclaving

<sup>۳</sup> High Pressure Steam

کردن سنگدانه یا آب، دمای بتن تازه را به حدود ۳۲ درجه سانتیگراد می‌رسانند؛ در نتیجه روند کسب مقاومت بتن افزایش می‌یابد. چندین روش عمل‌آوری الکتریکی نیز وجود دارد که در این روش‌ها، جریان الکتریسیته را از میان بتن تازه بین دو الکترود خارجی عبور می‌دهند. جهت جلوگیری از الکترولیز خمیر سیمان از جریان متناوب استفاده می‌شود. عبور جریان زیاد در ولتاژ کم از میان میلگردهای موجود در قطعه بتنی نیز به عنوان روشی دیگر در کسب سریع‌تر مقاومت بتن مطرح است. پتوهای الکتریکی بزرگ هم می‌تواند جهت گرم نگه داشتن دال‌های بتنی استفاده شود. همچنین می‌توان از سیم‌های دارای مقاومت الکتریکی به صورتی که بتوان آنها را داخل قطعه بتنی مدفون کرد، استفاده نمود. پس از عمل‌آوری این سیم‌ها قطع شده و داخل بتن باقی می‌مانند. در برخی از کشورها از تشعشعات مادون قرمز استفاده می‌شود. [۱۳]. استفاده از قالب‌های گرم نیز جهت تسریع کسب مقاومت بتن مطرح است و در آئین‌نامه آبا ذکر شده است [۱]؛ اما باید توجه داشت که در این حالت حفظ رطوبت بتن اهمیت ویژه‌ای دارد.

## فصل سوم: مصالح مصرفی و تشریح برنامه آزمایشگاهی

### ۳-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی مصالح مورد استفاده در آزمایش‌ها، خصوصیات آنها و نتایج آزمایش‌های مصالح می‌پردازیم. همچنین نحوه نامگذاری مخلوط‌های بتن، اصول انتخاب نسبت مصالح و روش طرح اختلاط‌های مورد استفاده توضیح داده می‌شود. در ادامه توضیحاتی در خصوص آزمایش‌های انجام شده بتن تازه و سخت شده، همراه با ذکر شماره استاندارد مربوطه داده شده است. نحوه ساخت و عمل‌آوری آزمون‌ها و مشخصات آنها شامل تعداد آزمون‌ها و غیره نیز در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۳-۲- مصالح مصرفی

در ساخت بتن‌های این تحقیق از مصالح زیر استفاده شده است:

- ۱- سنگدانه معمولی ریزدانه (ماسه) با محدوده اندازه اسمی (۰-۶) میلیمتر
- ۲- سنگدانه معمولی درشت‌دانه (شن ریز) با محدوده اندازه اسمی (۶-۱۲) میلیمتر

۳- سنگدانه معمولی درشت‌دانه (شن متوسط) با محدوده اندازه اسمی (۲۰-۱۲) میلیمتر

۴- سیمان پرتلند تیپ II کارخانه سیمان هرمزگان (بندر خمیر)

۵- روان‌کننده پوزولیت (POZZOLITH LD 10)

۶- آب

### ۳-۲-۱- سنگدانه معمولی ریزدانه<sup>۱</sup> (ماسه)

ماسه مورد استفاده در بتن‌های این تحقیق با محدوده اندازه اسمی (۶-۰ میلیمتر) از نوع ماسه شکسته است و از معدن ظفر ۳ واقع در ۱۰ کیلومتری عسلویه استان بوشهر تامین شده است. به طور کلی در این منطقه به واسطه کم بودن بسترهای رودخانه، ماسه رودخانه‌ای به مقدار زیاد موجود نیست. در نتیجه بخش عمده‌ای از ماسه مورد استفاده در بتن‌ها از نوع ماسه شکسته می‌باشد. این ماسه‌ها معمولاً درشت‌تر از ماسه‌های سایر مناطق بوده و مقدار ذرات ۲-۰ میلیمتر آنها نسبتاً کم است. آزمایش‌های زیر بر روی ماسه انجام شد:

۱- آزمایش دانه‌بندی براساس استاندارد ASTM C136-96

۲- آزمایش چگالی و جذب آب براساس استاندارد ASTM C128-97

۳- آزمایش درصد مواد ریزتر از الک نمره ۲۰۰ بر اساس ASTM C117-95

۴- آزمایش ارزش ماسه (SE) براساس ASTM D2419-91

۵- آزمایش وزن مخصوص فضایی ( دانسیته ) خشک متراکم با میله طبق ASTM C29-97

### ۳-۲-۲- سنگدانه معمولی درشت‌دانه<sup>۲</sup> (شن)

سنگدانه درشت‌دانه در دو اندازه اسمی مورد استفاده قرار گرفته است: شن ریز (۱۲-۶ میلیمتر)

و شن متوسط (۲۰-۱۲ میلیمتر). شن ریز از معدن ظفر ۳ و شن متوسط از معدن ظفر ۲ در فاصله ۵۰

<sup>1</sup> Fine Aggregate

<sup>2</sup> Coarse Aggregate

کیلومتری منطقه عسلویه تأمین شد. مصالح این معادن در پروژه بندر پتروشیمی پارس مورد استفاده قرار گرفته است.

آزمایش‌های زیر در مورد شن‌ها انجام شده است و نتایج آن به تفکیک نوع شن در ادامه خواهد آمد:

۱- آزمایش دانه‌بندی براساس ASTM C136-96

۲- آزمایش چگالی و جذب آب براساس ASTM C127 - 88 (2001)

۳- آزمایش درصد مواد ریزتر از الک نمره ۲۰۰ براساس ASTM C117- 95

۴- آزمایش درصد سایش (لوس آنجلس) براساس ASTM C131- 96

۵- آزمایش وزن مخصوص فضایی (دانسیته) خشک متراکم با میله براساس ASTM C29-97

۶- آزمایش درصد شکستگی

خلاصه نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی مصالح سنگی به شرح ذیل می‌باشد.

الف- نتایج آزمایش دانه‌بندی:

نتایج دانه بندی دو نوع شن و یک نوع ماسه در جدول ۳-۱ ذکر شده است. منحنی دانه‌بندی

شن‌ها در محدوده‌های دانه‌بندی ASTM C33-01 قرار می‌گیرند ولی منحنی دانه‌بندی ماسه در این

محدوده واقع نمی‌شود که با توجه به درشت بودن ماسه امری طبیعی است. منحنی دانه‌بندی ماسه

به محدوده‌های BS 882-92 (استاندارد انگلیس) و ISIRI 302-82 (استاندارد ایران) نسبتاً نزدیک

است. مدول ریزی (FM) ماسه ۴/۱۳ می‌باشد.

جدول ۳-۱- دانه‌بندی (درصد رده‌ده) سنگدانه‌های معمولی

الک ASTM	اندازه چشمه الک (mm)	شن متوسط (۱۲-۲۰ میلی‌متر)	شن ریز (۶-۱۲ میلی‌متر)	ماسه (۰-۶ میلی‌متر)
1 "	۲۵/۰	۱۰۰		
3/4 "	۱۹/۰	۹۷	۱۰۰	
1/2 "	۱۲/۵	۵۲	۹۹	
3/8 "	۹/۵	۱۰	۷۸	۱۰۰
1/4 "	۶/۳۵	۵	۲۸	۹۶
4	۴/۷۵	۳	۳	۸۳
8	۲/۳۸		۱	۵۱
16	۱/۱۹			۲۸
30	۰/۶			۱۵
50	۰/۳			۶
100	۰/۱۵			۳

ب- نتایج سایر آزمایشها:

نتایج مندرج در جدول ۳-۲ از سایر آزمایش‌های سنگدانه‌های درشت‌دانه و ریزدانه معمولی بدست آمده است. مدول ریزی سنگدانه‌ها براساس نتایج دانه‌بندی مشخص شده است. درصد شکستگی مصالح درشت‌دانه به صورت وزنی و بر حسب مقدار شکستگی کل سطح سنگدانه تعیین شده است.

جدول ۳-۲- نتایج آزمایش‌های سنگدانه‌های معمولی

ماسه	شن ریز	شن متوسط	واحد	ویژگی و شرح آزمایش
mm(۰-۶)	mm(۶-۱۲)	mm(۱۲-۲۰)		
۴/۱۳	۶/۱۷	۶/۹۰	-	(FM) مدول نرمی
۲/۲۹	۱/۲۷	۰/۸۴	%	درصد گذشته از الک نمره ۲۰۰
۷۷	-	-	%	ارزش ماسه
۳/۵۹	۲/۴۱	۱/۷۱	%	جذب آب
۲/۵۴۵	۲/۵۱۰	۲/۵۵۴	gr/cm <sup>3</sup>	چگالی حجمی اشباع با سطح خشک
۲/۴۵۷	۲/۴۵۱	۲/۵۱۱	gr/cm <sup>3</sup>	چگالی حجمی ذرات (خشک)
۲/۶۹۵	۲/۶۰۵	۲/۶۲۴	gr/cm <sup>3</sup>	چگالی ظاهری ذرات (خشک)
۱۵۴۴	۱۵۸۷	۱۵۳۹	Kg/m <sup>3</sup>	دانسیته متراکم با میله (خشک)
-	۵۹	۶۳	%	درصد شکستگی
-	۲۴	۲۰	%	درصد سایش ( لس آنجلس )

### ۳-۲-۳- سیمان

سیمان مصرفی در کلیه طرح اختلاط‌ها، سیمان تیپ II هرمزگان (بندر خمیر) می‌باشد. نتایج آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی که از کارخانه سیمان هرمزگان اخذ شده است در جداول ۳-۳ و ۴-۳ ملاحظه می‌شود. چگالی ذرات سیمان تیپ II هرمزگان به وسیله فلاسک لوشاتلیه و براساس استاندارد ASTM C188-89 در آزمایشگاه تعیین شده و مقدار آن  $gr/cm^3$  ۳/۱۶ بدست آمد.



جدول ۳-۳- ویژگی‌های شیمیایی سیمان تیپ II هرمزگان

درصد	ترکیب شیمیایی	درصد	ترکیب شیمیایی
۰/۹۰	LOI	۲۱/۸۸	SiO <sub>2</sub>
۰/۲۲	IR	۴/۷۷	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۱/۲۵	Free CaO	۳/۸۷	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۴۵/۳۳	C <sub>3</sub> S	۶۳/۰۲	CaO
۲۸/۵۵	C <sub>2</sub> S	۱/۵۴	MgO
۶/۰۹	C <sub>3</sub> A	۲/۵۸	SO <sub>3</sub>
۱۱/۷۸	C <sub>4</sub> AF	۰/۵۶	K <sub>2</sub> O
۹۹/۶۱	جمع ترکیبات	۰/۴۹	Na <sub>2</sub> O

جدول ۳-۴- ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سیمان تیپ II هرمزگان

نتیجه آزمایش	واحد	ویژگی	
۳۰۰۰	Cm <sup>2</sup> /gr	ریزی سیمان	
۱۷۰	Min.	اولیه	زمان گیرش
۳۲۰		نهایی	
۲۴۲	Kg/cm <sup>2</sup>	۳ روزه	مقاومت فشاری ملات استاندارد
۳۰۵		۷ روزه	
۳۹۳		۲۸ روزه	

### ۳-۲-۴- روان کننده

در طرح اختلاطهایی که نسبت آب به سیمان کمی داشته و در نتیجه اسلامپ و کارایی مناسبی ندارند از یک نوع روان کننده به نام پوزولیت (POZZOLITH LD 10) استفاده شده است. این روان کننده محصول شرکت آتروپات شیمی است. جنس آن از نوع لیگنوسولفونات و با پایه سدیمی می باشد. چگالی این افزودنی در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد برابر با  $1/175 \text{ kg/lit}$  می باشد. رنگ آن قهوه ای تیره است و براساس استاندارد ASTM C494 با توجه به مقدار مصرف می توان این ماده را از نوع A، B یا D دانست. این روان کننده قدری خاصیت کندگیری داشته و گیرش های اولیه و نهایی بتن را کمی به تاخیر می اندازد. مقدار مصرف معمول آن ۱۶۰ تا ۷۰۰ میلی لیتر در هر ۱۰۰ کیلو سیمان می باشد. به لحاظ وزنی این مقدار حدود ۰/۲ تا ۰/۸ درصد وزن سیمان است. در طرح اختلاط های این تحقیق، مقدار مصرف روان کننده برحسب درصد وزن سیمان ذکر شده است. مصرف زیاد این روان کننده منجر به دیرگیری بتن و حبابزایی بیش از حد می شود. در طرح اختلاط های آزمایشی از افزودنی های فوق روان کننده استفاده شد اما به جهت آنکه بتن های حاصله خشن بوده و به راحتی در آنها جداسازی اتفاق می افتاد مناسب مصرف تشخیص داده نشدند و نهایتاً روان کننده پوزولیت انتخاب شد. در طرح اختلاط های این تحقیق از پوزولیت استفاده شد و پیوستگی و چسبندگی بتن ها مناسب بوده و جداسازی<sup>۱</sup> و آب انداختن<sup>۲</sup> در آنها مشاهده نشد.

<sup>1</sup> Segregation

<sup>2</sup> Bleeding

### ۳-۲-۵-آب

آب مصرفی جهت ساخت و عمل‌آوری بتن از آب مورد استفاده در کارخانه محصولات پیش‌ساخته بتنی بندر پتروشیمی پارس تامین شد. نتایج آنالیز شیمیایی آب که با همکاری آزمایشگاه دانشگاه علوم پزشکی بوشهر انجام شد در جدول ۳-۵ ذکر شده است.

جدول ۳-۵- آنالیز شیمیایی آب مصرفی در ساخت و عمل‌آوری بتن های تحقیق

مقدار	واحد	آزمایش
۱۵۶	mg/lit	کلورها
۲۰	mg/lit	سولفات‌ها بر حسب $SO_4^{--}$
۶/۷۶	-	PH
۶/۴	mg/lit	کلسیم
ناچیز	mg/lit	منیزیم
ناچیز	mg/lit	آهن
ناچیز	mg/lit	آمونیاک
ناچیز	mg/lit	نیتрат
ناچیز	mg/lit	نیتريت
ناچیز	mg/lit	فسفات‌ها
ناچیز	mg/lit	فلوئورها
۲۰	mg/lit	قلیائیت کل
۶۴۸	Micro mous	هدایت الکتریکی
۱۲۹	mg/lit	کل مواد جامد محلول

### ۳-۳- طرح اختلاط‌های آزمایش

در ابتدا جهت تمرین و برای آشنایی با بتن‌هایی که قرار است در آزمایش‌های مربوط به پارامترهای دوام بتن و خوردگی میلگردها مورد استفاده قرار گیرند، تعدادی طرح اختلاط با نسبت‌های مختلف آب به سیمان، عیارسیمان و روان‌کننده و فوق روان‌کننده‌های مختلف ساخته شد. امکان عدم استفاده از روان‌کننده و فوق روان‌کننده بررسی شد. هر چند الزام استفاده از روان‌کننده در برخی حالات کاملاً بدیهی بود. در هر صورت حدود مقدار مصرف روان‌کننده مشخص شد. در این مرحله هشت طرح اختلاط آزمایشی ساخته شد.

طبق آئین‌نامه بتن ایران (آبا) در بتن‌های سواحل جنوبی کشور با توجه به موقعیت و شرایط مهاجم خلیج فارس، لازم است عیار سیمان حداقل ۳۵۰ و حداکثر ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب انتخاب شود. در این تحقیق با توجه به این مطلب عیار سیمان در دو حالت ۳۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب - که کاربرد بیشتری داشته و در پروژه بندر پتروشیمی پارس نیز جهت ساخت قطعات پیش‌ساخته بتنی مورد استفاده بوده است - مبنای کار قرار گرفت. نسبت آب به سیمان مخلوط‌های بتنی این تحقیق در سه وضعیت ۰/۴۰، ۰/۴۵ و ۰/۵۰ در نظر گرفته شد.

مخلوط‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۵۰ دارای کارایی مناسب و قابل قبولی بودند و نیازی به مصرف روان‌کننده نداشتند. مخلوط‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ مقدار حداقل روان‌کننده را نیاز داشتند و در مخلوط‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ مقادیر بیشتر و نزدیک به مقدار حداکثر مصرف روان‌کننده مورد استفاده قرار گرفت تا به اسلامپ مناسبی در بتن‌ها دست یافتیم.

دمای عمل‌آوری با بخار که برای بتن‌ها در نظر گرفته شدند چهار حالت ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتیگراد می‌باشند. بر این اساس با توجه به سه حالت عیار سیمان و دو حالت آب به سیمان، نهایتاً ۶ طرح اختلاط وجود دارد که در ۴ دمای مختلف، عمل‌آوری می‌شود. بنابراین مجموعاً ۲۴

<sup>۱</sup> Mix design

حالت و در نتیجه ۲۴ سری نتایج آزمایش وجود دارند که باید مورد بررسی قرار گیرد. ساخت بتن‌ها و آزمایش‌های مربوط به هر وضعیت در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول آزمون‌های آزمایش‌های مربوط به پارامترهای دوام شامل «آزمایش جذب آب اولیه و نهایی»، «آزمایش جذب مویینه» و «آزمایش پتانسیل خوردگی» ساخته شد. در مرحله دوم، آزمایش مقاومت فشاری بتن و تاثیر بخاردهی بر مقاومت فشاری کوتاه‌مدت و ۲۸ روزه مورد بررسی قرار گرفت. علت این امر محدودیت ظرفیت مخلوط کن و گرمچال آزمایشگاه و تعداد قالب‌ها بود.

در مرحله اول در هر دفعه، ۲۵ لیتر بتن ساخته شده و از این بتن تعداد ۱۰ قالب مکعبی ۱۰×۱۰ سانتیمتر و ۶ قالب استوانه‌ای ۶×۱۵ سانتیمتر تهیه گردید. قالب‌های مکعبی برای آزمایش جذب آب اولیه و نهایی و آزمایش جذب مویینه و قالب‌های استوانه‌ای برای آزمایش پتانسیل خوردگی - با روشی که در ادامه خواهد آمد - مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از ساخت آزمون‌ها، ۴ قالب مکعبی ۱۰×۱۰ سانتیمتر و ۳ قالب استوانه‌ای ۶×۱۵ سانتیمتر در گرمچال با دمای مورد نظر قرار می‌گیرد. بقیه قالب‌ها یعنی ۶ قالب مکعبی و ۳ قالب استوانه‌ای در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل‌آوری می‌شوند. نحوه عمل‌آوری آزمون‌ها در بخش بعد توضیح داده خواهد شد.

آزمایش‌های زیر در مورد هر یک از مخلوط‌های بتنی انجام شد:

- ۱- آزمایش تعیین روانی بتن (اسلامپ) به وسیله مخروط ناقص آبراهام طبق ASTM C143-00
  - ۲- آزمایش تعیین دمای بتن تازه براساس ASTM C1064-99
  - ۳- آزمایش تعیین وزن مخصوص بتن متراکم تازه براساس ASTM C138-01
  - ۴- آزمایش مقاومت فشاری مکعبی ۱۰×۱۰ و ۱۵×۱۵ سانتیمتر براساس BS 1881 Part 108,111,116
  - ۵- آزمایش جذب آب اولیه و نهایی بتن براساس ASTM C642 و BS 1881 Part 122,208
  - ۶- آزمایش جذب آب مویینه براساس RILEM CPC 11.2
  - ۷- آزمایش پتانسیل خوردگی براساس ASTM C876 - 91(1999) در آب خلیج فارس
- تعداد آزمون‌ها و نوع آنها برای آزمایش‌های مختلف در جدول ۳-۶ مشاهده می‌شود.

جدول ۳-۶- شرح آزمون‌های آزمایش‌های تحقیق

تعداد آزمون	نوع آزمون و مشخصات	نوع آزمایش
۱	به وسیله مخروط ناقص اسلامپ بلافاصله پس از ساخت بتن	روانی بتن
۱	توسط دماسنج دیجیتالی تستو	دمای بتن تازه
۱	به وسیله استوانه ۱۴ لیتری	وزن مخصوص بتن متراکم تازه
۵	مکعب ۱۰×۱۰ سانتیمتر - دو آزمون در شرایط بخار و سه آزمون در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل‌آوری می‌شود.	جذب آب اولیه و نهایی بتن
۵	مکعب ۱۰×۱۰ سانتیمتر - دو آزمون در شرایط بخار و سه آزمون در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل‌آوری می‌شود.	جذب آب مویینه بتن
۶	استوانه ۶×۱۵ سانتیمتر - سه آزمون در شرایط بخار و سه آزمون در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل‌آوری می‌شود.	پتانسیل خوردگی ( نیم پیل )
۱۸	مکعب ۱۰×۱۰ و ۱۵×۱۵ سانتیمتر - شش مکعب در شرایط بخار و دوازده مکعب در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل‌آوری می‌شود.	مقاومت فشاری کوتاه‌مدت بتن
۹	مکعب ۱۰×۱۰ سانتیمتر - شش مکعب در شرایط بخار و سه مکعب در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل‌آوری می‌شود.	مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن
۴۳	تعداد آزمون در هر مخلوط بتن	
۶۰ لیتر	حجم بتن مورد نیاز	

### ۳-۴- نحوه عمل آوری آزمونه‌ها

پس از ساختن بتن و نمونه‌گیری از آن، ابتدا آزمونه‌ها در محل آزمایشگاه و در زیر نایلون نگهداری می‌شوند تا زمان گیرش اولیه آنها سپری شود. برای این زمان ۴ ساعت در نظر گرفته شده است. پس از سپری شدن زمان گیرش اولیه، بتن می‌تواند افزایش دما را تحمل کند و در شرایط دمایی بالاتر قرار گیرد. جهت شبیه‌سازی عمل‌آوری با بخار در آزمایشگاه و کنترل دمای آن، از گرمچال استفاده شد. قرار دادن آزمونه‌ها در گرمچال با این هدف انجام می‌شود که بتن در دمای مشخص و تحت شرایط کاملاً کنترل شده و معلومی عمل‌آوری شده و شرایطی مشابه با بخار در آزمایشگاه ایجاد شده باشد. جهت حفظ رطوبت آزمونه‌ها و عدم کاهش آب بتن، آزمونه‌ها در داخل یک نایلون ضخیم قرار داده شده و محکم بسته شد. به علاوه این مجموعه به وسیله یک پوشش ضخیم پشم شیشه نیز محافظت می‌شود. سپس دمای گرمچال بر روی مقدار مورد نیاز تنظیم می‌شود و این دما در مدت عمل‌آوری ثابت نگه داشته می‌شود. همان‌طور که در بخش گذشته توضیح داده شد برای دمای عمل‌آوری ۴ حالت در نظر گرفته شده است. این دماها عبارتند از ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتیگراد. در هر مرتبه عمل‌آوری بتن‌ها در گرمچال، یکی از این دماها مورد استفاده قرار گرفت. آزمونه‌های عمل‌آوری شده در گرمچال، «آزمونه بخار دیده» و آزمونه‌ای که در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل‌آوری شده است «آزمونه کنترلی» نامیده شد.

### ۳-۵- تعیین مدت زمان عمل‌آوری آزمونه‌ها

همان‌طور که گفته شد پس از هر دفعه ساخت بتن، آزمونه‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند: آزمونه‌های کنترلی در شرایط استاندارد آزمایشگاهی و آزمونه‌های بخار دیده در شرایط بخار عمل‌آوری می‌شوند. بتن آزمونه‌ها را به اندازه‌ای عمل‌آوری کردیم که بلوغ آنها معادل بلوغ ۷ روز عمل‌آوری در شرایط استاندارد باشد. توضیح کامل تر مطلب به این شرح است؛ آزمونه‌هایی که در شرایط استاندارد آزمایشگاهی قرار دارند ابتدا به مدت ۲۴ ساعت به صورت مرطوب در زیر نایلون نگه

داشته شدند. سپس قالب آنها را باز کرده و به داخل حوضچه آب با دمای استاندارد منتقل می کنیم. پس از آنکه این آزمونه‌ها ۷ روزه شدند، آماده انجام آزمایش‌های مربوطه می‌باشند.

دسته دوم پس از نمونه‌گیری، به مدت ۴ ساعت در زیر نایلون و در شرایط آزمایشگاهی نگهداری می‌شوند. سپس آزمونه‌ها را به داخل گرمچال منتقل کرده و آنها را به اندازه‌ای عمل‌آوری می‌کنیم که بلوغ بتن آنها معادل بلوغ آزمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد آزمایشگاهی شده باشد. برای این منظور از محاسبات بلوغ بتن که در فصل دوم ذکر شد کمک می‌گیریم. بدیهی است با توجه به آنکه دمای عمل‌آوری در گرمچال بالاتر از دمای استاندارد آزمایشگاهی است، طول مدت عمل‌آوری با بخار کوتاهتر از مدت متناظر در آزمونه‌های کنترلی است. مقدار دقیق این زمان در ادامه مطلب محاسبه و ذکر خواهد شد.

براساس استاندارد ASTM C192-90a (روش ساخت و عمل‌آوری آزمونه‌های بتن در آزمایشگاه)، دمای عمل‌آوری استاندارد آزمایشگاهی  $23 \pm 1/7 \text{ } ^\circ\text{C}$  ( معادل  $73/4 \pm 3 \text{ } ^\circ\text{F}$  ) می‌باشد. بنابراین براساس محاسبات بلوغ بتن، آزمونه‌ای که ۷ روز در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل‌آوری شده باشد دارای بلوغ زیر می‌باشد:

$$M = \Delta t . ( C + 10 )$$

$$\Delta t = 7 \text{ day} = 168 \text{ hr}$$

$$C = 23 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow M = 231 \text{ } ^\circ\text{C}.\text{day} = 5544 \text{ } ^\circ\text{C}.\text{hr}$$

همان‌طور که ذکر شد پس از نمونه‌گیری از بتن، آزمونه‌ها به مدت ۴ ساعت در شرایط آزمایشگاهی نگهداری می‌شوند تا زمان گیرش اولیه آنها سپری شود. سپس آزمونه‌ها جهت بخاردهی آماده‌گی دارند. دمای آزمونه‌ها در مدت زمان ۲ ساعت از دمای اولیه به مقدار حداکثر عمل‌آوری رسانده می‌شود. سپس به میزان مورد نیاز در این دما عمل‌آوری می‌شود و در نهایت مرحله خنک کردن آزمونه‌ها در مدت ۳ ساعت انجام می‌گیرد. مدت زمانی که لازم است بتن در دمای حداکثر نگه داشته



شود از محاسبات بلوغ تعیین می شود. افزایش بلوغ بتن‌های عمل‌آوری شده در بخار را می‌توان به ۴ قسمت تقسیم نمود:

۱- از زمان ریختن بتن در قالب تا شروع بخاردهی: این مدت ۴ ساعت در نظر گرفته شده است. در این فاصله زمانی، بلوغ بتن به اندازه ۱۳۲ درجه - ساعت رشد می‌کند و برای تمام حالات یکسان است. این مقدار معادل ۲٪ بلوغ کل ۷ روز است.

۲- بلوغ مربوط به مرحله گرم کردن آزمون‌ها

۳- بلوغ مربوط به مرحله قله دمایی

۴- بلوغ مربوط به مرحله سردکردن آزمون: در این مرحله در مدت‌زمان ۳ ساعت، دمای آزمون از مقدار حداکثر به دمای محیط (۲۳ درجه سانتیگراد) رسانده می‌شود.

مقادیر بلوغ کسب شده در بتن آزمون‌ها در هر مرحله از چرخه عمل‌آوری با بخار در جدول

۳-۷ ذکر شده است.

جدول ۳-۷- پیشرفت بلوغ در مراحل مختلف چرخه عمل‌آوری آزمون‌ها در بخار بر حسب درجه - ساعت

دما (°C)	زمان تأخیر	مرحله گرم کردن	مرحله قله دما	مرحله سرد کردن	بلوغ کل
۵۰	۱۳۲	۹۳	۵۱۷۹	۱۴۰	۵۵۴۴
۶۰	۱۳۲	۱۰۳	۵۱۵۴	۱۵۵	۵۵۴۴
۷۰	۱۳۲	۱۱۳	۵۱۲۹	۱۷۰	۵۵۴۴
۸۰	۱۳۲	۱۲۳	۵۱۰۴	۱۸۵	۵۵۴۴

بر این اساس مدت زمان لازم برای بخاردهی بتن در هر یک از دماها به صورتی که در جدول

۳-۸ آمده است محاسبه شدند.

جدول ۳-۸- چرخه عمل آوری آزمون‌ها در بخار

کل زمان (hr)	مرحله سرد کردن (hr)	مرحله قله دما (hr)	مرحله گرم کردن (hr)	زمان تأخیر (hr)	دمای عمل آوری (°C)
۹۵	۳	۸۶	۲	۴	۵۰
۸۳	۳	۷۴	۲	۴	۶۰
۷۴	۳	۶۵	۲	۴	۷۰
۶۷	۳	۵۸	۲	۴	۸۰

همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش دمای عمل آوری بتن با بخار، طول دوره عمل آوری کوتاهتری انتخاب شده است تا در نهایت، بلوغ همه آزمون‌ها یکسان باشند و بتوان نتایج بدست آمده از آزمایش‌های دوام را در بلوغ یکسان مقایسه نمود.

از بتن هایی که به شیوه فوق الذکر عمل آوری شده اند در آزمایش های دوام بتن و خوردگی میلگرد استفاده شد. در مورد آزمایش مقاومت فشاری بتن باید گفته شود مقایسه نتیجه مقاومت فشاری در سن یکسان، مطلوب تر و مفید فایده تر از این مقایسه در بلوغ یکسان است. چرا که در این صورت می توانیم رشد مقاومت فشاری در اثر بخاردهی را بررسی نمائیم. طبیعی است در یک بتن مشخص، نمونه های با بلوغ های یکسان قاعدتاً مقاومت های یکسان و یا نزدیک به هم دارند. به همین خاطر آزمون های آزمایش مقاومت فشاری را به گونه ای دیگر عمل آوری و بررسی کردیم. در این آزمون ها، سن عمل آوری نمونه کنترلی و نمونه بخار دیده به صورت یکسان در نظر گرفته شد و پس از عمل آوری، آزمون ها را در سن مساوی شکستیم. مدت زمان عمل آوری دو حالت ۹ ساعت و ۱۸ ساعت انتخاب شد. همچنین مقاومت ۲۸ روزه بتن های بخار دیده و کنترلی را نیز بررسی کردیم. توضیح دقیق تر مطلب به این صورت است. پس از ساخت بتن در هر دفعه، تعداد ۲۷ آزمون مکعبی تهیه گردید. پس از گذشت ۴ ساعت به عنوان زمان تأخیر، تعداد دوازده آزمون جهت بخاردهی در

گرمچال قرار داده شد. پانزده آزمون باقیمانده در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل‌آوری شدند. از آزمون‌های داخل گرمچال، شش آزمون به مدت ۹ ساعت و شش آزمون به مدت ۱۸ ساعت به وسیله بخار عمل‌آوری شدند. پس از پایان ۹ ساعت بخاردهی، شش آزمون بخار دیده را از گرمچال خارج کردیم. سه آزمون را شکسته و سه آزمون بخار دیده دیگر به حوضچه آب منتقل شدند تا در سن ۲۸ روز تست شوند. همزمان تعداد سه آزمون کنترلی نیز شکسته شدند تا مشخص شود مقاومت فشاری بتن در اثر ۹ ساعت بخاردهی چه مقدار رشد کرده است. همین روال برای ۱۸ ساعت بخاردهی نیز انجام شد.

در این وضعیت عمل‌آوری طبیعتاً بلوغ بتن‌های بخار دیده بیشتر از بتن‌های کنترلی است. مقاومت نمونه‌های بخار دیده در سن یکسان بیشتر از نمونه‌های کنترلی به دست خواهند آمد و میزان افزایش، بیانگر میزان تأثیر بخاردهی است. بررسی مقاومت فشاری ۲۸ روزه نیز میزان افت احتمالی مقاومت درازمدت در اثر بخاردهی را نشان خواهد داد.

جهت تکمیل تحقیق، مقایسه مقاومت فشاری در بلوغ یکسان نیز انجام شد. به این صورت که سه آزمون را که در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل‌آوری می‌شوند، پس از آنکه بلوغشان به اندازه نمونه بخار دیده شد شکسته و با مقاومت فشاری نمونه بخار دیده مقایسه می‌کنیم. این نمونه را «نمونه معادل» نامیدیم. نمونه معادل و نمونه بخار دیده بواسطه آنکه بلوغشان یکسان است، مقاومت فشاری نزدیک به هم خواهند داشت.

### ۳-۶- نامگذاری طرح اختلاط‌ها

به طور کلی هر یک از بتن‌هایی را که با عیار سیمان و نسبت آب به سیمان مشخص و دمای عمل‌آوری خاص ساخته شد را M نامیدیم. نمونه‌هایی را که در شرایط شبیه‌سازی شده بخار عمل‌آوری شدند را با حرف S نمایش دادیم و آزمون‌های کنترلی را که در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل‌آوری می‌شوند با حرف C نامگذاری نمودیم. پس از گذاشتن این حرف، ابتدا دمای

عمل‌آوری بتن با بخار ذکر می‌شود. سپس خط تیره گذاشته می‌شود و بعد از خط تیره عیار سیمان قید می‌گردد. بعد از عیار سیمان، ممیز گذاشته می‌شود و بعد از ممیز، نسبت آب به سیمان نوشته می‌شود. به عنوان مثال اگر می‌خواهیم بتن با عیار ۴۰۰ و نسبت آب به سیمان ۰/۵۰ را در دمای عمل‌آوری ۷۰ درجه بررسی نمائیم نام کل آزمونه‌های مربوط به این وضعیت را M70-400.50 می‌گذاریم. آزمونه‌هایی را که در بخار عمل‌آوری شده اند S70-400.50 و آزمونه‌های کنترلی را که در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل‌آوری می‌گردند C70-400.50 می‌خوانیم.

### ۳-۷- اصول انتخاب طرح اختلاط‌ها

اصول انتخاب طرح اختلاط‌هایی که در این تحقیق از آنها استفاده شده است، در این قسمت تشریح می‌شوند.

حداکثر اندازه سنگدانه در بسیاری از سازه‌های مسلح عمدتاً در حد ۲۰ میلیمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ لذا این مقدار در طرح اختلاط‌ها مناسب تشخیص داده شد. جهت پرهیز از جدایی سنگدانه‌ها، شن در دو اندازه (۶-۱۲) میلیمتر و (۲۰-۱۲) میلیمتر مورد استفاده قرار گرفت.

در انتخاب نسبت آب به سیمان، به مشخصات فنی بتن‌های پروژه بندر پتروشیمی پارس توجه شده است. با انتخاب سه نسبت آب به سیمان ۰/۴۰، ۰/۴۵ و ۰/۵۰، عمده‌حالاتی که در سایر پروژه‌ها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد در تحقیق منظور شد. در انتخاب سیمان با در نظر گرفتن شرایط محیطی خلیج فارس، سیمان تیپ II انتخاب شده است. محدوده مناسب عیار سیمان در این شرایط محیطی - طبق آئین‌نامه آبا - ۳۵۰ تا ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. بر این اساس دو مقدار ۳۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب که کاربرد بیشتری دارد انتخاب شده است.

اسلامپ (روانی) طرح اختلاط‌ها با استفاده از روان‌کننده پوزولیت به حدود ۵ تا ۱۰ سانتیمتر رسانده شد. سعی شد ضمن توجه به مقادیر حداقل و حداکثر قابل مصرف که در مشخصات فنی این روان‌کننده اشاره شده است، محدوده اسلامپ بتن نیز در حد متوسط بدست آید تا بتن‌ها همگنی و

یکنواختی لازم را داشته باشند و پدیده جداسازی نیز اتفاق نیفتد. تراکم بهتر بتن آزمون‌ها نیز مورد نظر بوده است. در هر صورت در برخی حالات عملاً، اسلامپ بتن از این محدوده خارج شد که در یک فعالیت آزمایشگاهی دور از انتظار نیست.

جهت تعیین سهم هر یک از مصالح سنگی از محدوده‌های دانه‌بندی مؤسسه تحقیقات راه بریتانیا استفاده کردیم. تلاش شد سهم هر یک از مصالح به گونه ای انتخاب شود که بافت دانه‌بندی متوسطی را داشته باشیم. براین اساس به ترتیب برای ماسه، شن ریز و شن متوسط سهم های ۵۵، ۱۸ و ۲۷ درصد را انتخاب کردیم. با توجه به درشت بودن نسبی ماسه و کم بودن مقدار مواد ۰-۲ میلیمتر آن، بخشی از منحنی حاصل درشت تر از حد متوسط و بخشی از آن ریزتر از حد متوسط قرار می‌گیرد. درصد هوای بتن در مخلوط‌های بدون روان‌کننده یا با روان‌کننده کم حدود ۱/۵ تا ۲ درصد و در مخلوط‌های با روان‌کننده بیشتر حدود ۲/۵ تا ۴ درصد فرض شد. جابجایی روان‌کننده بیشتر از حد انتظار می‌باشد.

### ۳-۸- فرضیات مورد استفاده در طرح اختلاط ها

با توجه به نتایج آزمایش‌های مصالح که ابتدا تشریح شد، مشخصات و فرضیات زیر جهت تعیین مقدار مصالح مورد استفاده قرار گرفت:

- سیمان تیپ II هرمزگان با چگالی ذرات معادل  $3/16 \text{ gr/cm}^3$

- سنگدانه معمولی درشت دانه با محدوده اندازه اسمی (۲۰-۱۲) میلیمتر با ظرفیت جذب آب ۱/۷۱ درصد و چگالی اشباع با سطح خشک برابر با  $2/554 \text{ gr/cm}^3$  به مقدار ۲۷ درصد وزن کل سنگدانه در حالت اشباع با سطح خشک

- سنگدانه معمولی درشت دانه با محدوده اندازه اسمی (۱۲-۶) میلیمتر با ظرفیت جذب آب ۲/۴۱ درصد و چگالی اشباع با سطح خشک برابر با  $2/510 \text{ gr/cm}^3$  به مقدار ۱۸ درصد وزن کل سنگدانه در حالت اشباع با سطح خشک

- سنگدانه معمولی ریزدانه با محدوده اندازه اسمی (۶-۰) میلیمتر با ظرفیت جذب آب  $3/59$  درصد و چگالی اشباع با سطح خشک برابر با  $2/545 \text{ gr/cm}^3$  به مقدار ۵۵ درصد وزن کل سنگدانه در حالت اشباع با سطح خشک

- مایع روان کننده پوزولیت (POZZOLITH LD10) با چگالی  $1/175 \text{ gr/cm}^3$  که از ۴۰ درصد وزنی پودر و ۶۰ درصد آب تشکیل شده است. مقدار مصرف با توجه به اسلامپ تعیین می شود.

- درصد هوای فرض شده برای بتن های بدون روان کننده و یا دارای مقدار کم روان کننده  $1/5$  تا ۲ درصد و در بتن های با نسبت آب به سیمان  $0/40$  که مقدار روان کننده بیشتری مصرف شده است  $2/5$  تا ۴ درصد، می باشد.

- چگالی اشباع با سطح خشک میانگین کل سنگدانه ها شامل ماسه، شن ریز و شن متوسط، با توجه به سهم آنها که به ترتیب ۵۵، ۱۸ و ۲۷ درصد می باشد برابر با  $2/541 \text{ gr/cm}^3$  به دست می آید که در محاسبات طرح اختلاط استفاده شده است.

### ۳-۹- روش تعیین و ساخت طرح اختلاطها

جهت تعیین نسبت های اختلاط با توجه به اصول و فرضیاتی که در قسمت قبل توضیح داده شد بر مبنای روش بریتانیایی طرح مخلوط و با استفاده از فرمول حجم مطلق، مقادیر و اوزان اجزاء بتن محاسبه و تعیین شد.

روال محاسبه و ساختن هر طرح اختلاط به صورت زیر می باشد:

- ۱- با معلوم بودن نسب آب به سیمان و مقدار سیمان، آب آزاد ( $W_f$ ) محاسبه می شود.
- ۲- برای دستیابی به روانی مناسب با توجه به تجربیات قبلی و مخلوط های آزمایشی مقدار مناسبی برای روان کننده در نظر گرفته می شود.
- ۳- آب موجود در روان کننده از آب آزاد کسر می شود. این مقدار ۶۰ درصد وزن روان کننده است.
- ۴- درصد مناسبی برای هوا فرض می شود.

۵- با مشخص بودن وزن سیمان، آب و افزودنی و با استفاده از فرمول حجم مطلق، وزن کل مصالح سنگی در حالت SSD محاسبه می گردد.

۶- با مشخص بودن سهم هر یک از سنگدانه‌ها، وزن SSD هر یک از آنها به تفکیک تعیین می‌شود.

۷- با استفاده از مقدار جذب آب هر یک از مصالح سنگی، وزن خشک مصالح و میزان آبی که جذب هر یک می‌شود - یعنی تفاوت وزن خشک و وزن SSD - تعیین می‌گردند.

۸- مقدار آب کل ( $W_l$ ) از مجموع آب آزاد و آبی که جذب مصالح سنگی می‌شود بدست می‌آید.

۹- درصد رطوبت سه نوع مصالح سنگی که قرار است با آنها بتن ساخته شود را تعیین می‌کنیم.

۱۰- با استفاده از وزن خشک مصالح سنگی و درصد رطوبت آنها، وزن مرطوب مصالح سنگی و مقدار آب موجود در مصالح محاسبه می‌گردد.

۱۱- آب موجود در مصالح سنگی و روان‌کننده از آب کل کسر شده و مقدار آب اختلاط ( $W_m$ ) بدست می‌آید.

۱۲- حال وزن تک‌تک مصالح مورد نیاز برای ساخت یک متر مکعب بتن مشخص شده است. با توجه به حجم بتن لازم، مصالح را توزین کرده و بتن را به وسیله مخلوط کن آزمایشگاهی می‌سازیم.

۱۳- روان‌کننده به مقدار مورد نیاز و توسط آب‌فشان به بتن پاشیده می‌شود تا اسلامپ مناسب به دست آید. میزان دقیق روان‌کننده مصرفی ثبت و گزارش می‌گردد.

### ۳-۱۰- مقادیر مصالح مصرفی در طرح اختلاطها

همانطور که توضیح داده شد ۳ حالت برای نسبت آب به سیمان و ۲ حالت برای عیار سیمان در نظر گرفته شده است. بنابراین در واقع ۶ طرح اختلاط مینا وجود دارد که هر کدام ۴ مرتبه ساخته شده و در یکی از ۴ حالت دمائی در نظر گرفته شده برای بخار، عمل‌آوری می‌شوند. جزئیات مقادیر مصالح مصرفی در ۶ طرح اختلاط مینا در جدول ۳-۹ ذکر شده است.

جدول ۳-۹- مقادیر مصالح مصرفی در بتن طرح اختلاطها

وزن مخصوص محاسباتی بتن تازه (Kg/m <sup>3</sup> )	هوای فرض شده %	روان کننده (Kg/m <sup>3</sup> )	آب کل (Kg/m <sup>3</sup> )	وزن خشک مصالح سنگی (Kg/m <sup>3</sup> )			نسبت آب به سیمان	عیار سیمان (Kg/m <sup>3</sup> )	ردیف
				شن متوسط (۱۲-۲۰ mm)	شن ریز (۶-۱۲ mm)	ماسه (۰-۶ mm)			
۲۲۵۹	۲	-	۲۴۶	۴۴۰	۲۹۲	۸۸۱	۰/۵۰	۴۰۰	۱
۲۲۹۲	۲	۰/۶	۲۲۸	۴۵۴	۳۰۱	۹۰۸	۰/۴۵	۴۰۰	۲
۲۳۱۲	۲/۵	۲/۰	۲۰۹	۴۶۴	۳۰۸	۹۲۹	۰/۴۰	۴۰۰	۳
۲۲۸۸	۲	-	۲۲۴	۴۶۸	۳۱۰	۹۳۶	۰/۵۰	۳۵۰	۴
۲۳۲۷	۲	۱/۳	۲۰۸	۴۸۳	۳۱۹	۹۶۶	۰/۴۵	۳۵۰	۵
۲۲۹۳	۴	۲/۸	۱۹۰	۴۷۸	۳۱۶	۹۵۶	۰/۴۰	۳۵۰	۶

### ۳-۱۱- تشریح ساخت بتن و آزمایش‌های انجام شده

پس از توزین مصالح ابتدا مصالح سنگی درشت‌دانه و بخشی از آب اختلاط با یکدیگر مخلوط می‌شوند. سپس ماسه و سیمان به تدریج به داخل مخلوط کن ریخته می‌شود و بقیه آب اختلاط نیز به این ترکیب اضافه می‌گردد. در نهایت روان‌کننده به وسیله آفشان - تا رسیدن اسلامپ بتن به حد مورد نظر - به بتن پاشیده می‌شود. پس از تهیه بتن آزمایش‌های زیر انجام شدند که در این قسمت شرح داده می‌شود.



### ۳-۱۱-۱- آزمایش روانی بتن (اسلامپ)

این آزمایش طبق استاندارد ASTM C143-00 و بلافاصله پس از ساخت بتن انجام شد.

### ۳-۱۱-۲- آزمایش تعیین دمای بتن تازه

در مناطق جنوبی کشور و در حاشیه خلیج فارس، دمای مصالح سنگی در فصل تابستان و به هنگام روز بسیار بالاست و اگر تدبیری اندیشیده نشود دمای بتن تولیدی در حالت عادی به حدود ۳۵ تا ۴۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. این دما تأثیرات سوء زیادی بر کیفیت و دوام بتن می‌گذارد. برای حل این مشکل معمولاً از آب سرد و یخ استفاده می‌کنند تا دمای بتن به کمتر از ۳۲ درجه سانتیگراد برسد. در آزمایشگاه تلاش شد دمای بتن تولیدی در محدوده ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتیگراد بدست آید. در هر صورت جهت کنترل وضعیت دمای اولیه بتن از دماسنج دیجیتالی با دقت ۰/۱ درجه سانتیگراد استفاده شد و دمای بتن براساس ASTM C1064 تعیین شد.

### ۳-۱۱-۳- آزمایش تعیین وزن مخصوص بتن تازه

این آزمایش براساس استاندارد ASTM C138 با استفاده از پیمانانه استوانه ای با ظرفیت اسمی ۱۴ لیتر انجام شد. ابتدا با استفاده از آب، حجم دقیق پیمانانه کنترل شد و برابر با ۱۳/۹۴ لیتر بدست آمد و پس از هر مرتبه ساخت بتن، وزن مخصوص متراکم آن تعیین شد.

### ۳-۱۱-۴- نمونه‌گیری آزمونه‌ها و نگهداری آنها در آزمایشگاه

آزمونه‌های مکعبی طبق دستورالعمل BS 1881 تهیه و نگهداری شدند. این آزمونه‌ها که در آزمایش‌های مقاومت فشاری، جذب آب اولیه و نهایی و جذب آب موئینه بتن مورد استفاده قرار گرفتند در روز اول به مدت ۲۴ ساعت در زیر نایلون به صورت مرطوب نگهداری شدند و در روزهای بعد در حوضچه آب با دمای حدود ۲۳ درجه سانتیگراد عمل‌آوری شدند. آزمونه‌هایی که می‌باید در شرایط بخار عمل‌آوری می‌شدند در گرمچال آزمایشگاه قرار گرفتند که توضیحات مربوطه در

قسمت‌های قبل داده شد. آزمون‌های آزمایش پتانسیل خوردگی که در قالب استوانه‌ای لوله پلیکا تهیه شدند در مدت ۷ روز اولیه در زیر نایلون و در شرایط مرطوب نگهداری شدند. سطح بالایی آزمون به وسیله یک پوشش ضخیم نایلون محافظت شد. از سطوح جانبی آزمون به واسطه وجود لوله ضخیم پلیکا تبخیری صورت نمی‌گیرد. سطح تحتانی آزمون نیز در داخل آب معمولی قرار گرفت. آزمون‌های آزمایش پتانسیل خوردگی پس از گذراندن عمل‌آوری اولیه و کسب بلوغ مربوط به ۷ روز، قالب‌برداری شده و در حوضچه حاوی آب خلیج فارس قرار گرفتند. به جهت نزدیک بودن محل آزمایشگاه به ساحل خلیج فارس، به سهولت می‌توان حوضچه را از آب خلیج پر کرده و آب آن را به مرور زمان تعویض نمود.

### ۳-۱۱-۵- تعیین مقاومت فشاری مکعبی

مقاومت فشاری آزمون‌های مکعبی براساس BS 1881 انجام شد. جهت تبدیل مقاومت فشاری مکعب  $10 \times 10$  به مکعب  $15 \times 15$  سانتیمتر از ضریب  $1/0.5$  استفاده شد.

### ۳-۱۱-۶- دانسیته بتن سخت شده

دانسیته بتن سخت شده با اندازه‌گیری ابعاد و توزین آزمون‌ها به صورت اشباع تعیین شد. دانسیته خشک آزمون‌هایی که جهت آزمایش‌های جذب آب توسط گرمچال خشک شدند نیز مشخص می‌باشد.

### ۳-۱۱-۷- آزمایش جذب آب اولیه و نهایی بتن

این آزمایش با استفاده از آزمون‌های مکعبی  $10 \times 10$  سانتیمتر و بر اساس دستورالعمل BS 1881 - part 122 انجام می‌شود. روال کار به این صورت است که ابتدا آزمون به مدت ۱۴ روز بدون هر گونه پوشش در گرمچال قرار داده می‌شود و در دمای حدود ۵۰ درجه سانتیگراد کاملاً خشک می‌گردد. سپس آزمون را توزین کرده و با ثبت دقیق زمان، به مدت ۳ روز در داخل آب

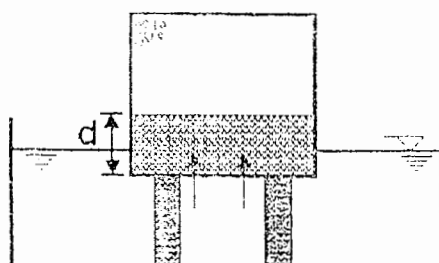
غوطه‌ور می‌نماییم. آزمون در زمان‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۶۰ دقیقه از آب خارج شده، سطح آن خشک می‌شود و توزین می‌گردد. جذب آب بتن در این زمان‌ها تعیین می‌گردد و به عنوان جذب آب اولیه بتن گزارش می‌شود. این نتایج می‌تواند به عنوان نتایج آزمایش جذب آب سطحی (ISAT) نیز محسوب شود. آزمایش جذب آب سطحی طبق دستورالعمل BS 1881 - Part 208 انجام می‌شود که در آن آزمون بتنی و نحوه تماس آب با سطح بتن به نحو خاصی تدارک دیده می‌شود و اندازه‌گیری‌ها توسط یک لوله موئینه و خط کش صورت می‌گیرد و تجهیزات ویژه‌ای را می‌طلبد. این در حالی است که با غوطه‌ور کردن آزمون بتنی در آب و با توزین آزمون‌ها پس از غرقاب کردن، مقدار جذب آب اولیه بتن با سهولت بیشتری بدست می‌آید.

آزمون‌ها تا ۳ روز در آب نگهداری می‌شوند و در زمان‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت نیز توزین می‌گردند و بدین وسیله جذب آب نهایی بتن تعیین می‌شود. معمولاً پس از گذشت یک روز تغییر وزن آزمون اندک است. در استاندارد ASTM C642 خشک کردن آزمون‌های بتنی در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد انجام می‌شود و با استاندارد BS 1881 از این جهت متفاوت است.

### ۳-۱۱-۸- آزمایش جذب آب موئینه بتن

این آزمایش براساس دستورالعمل RILEM CPC 11.2 , TC 14-CPC انجام می‌شود. بر این اساس ابتدا آزمون‌های مکعبی ۱۰×۱۰ سانتیمتر دوره عمل‌آوری لازم را می‌گذرانند. سپس به مدت ۱۴ روز در گرمچال با دمای حدود ۵۰ درجه سانتیگراد خشک شده و در انتها توزین می‌گردد. آزمایش به این صورت است که ۵ میلیمتر تحتانی آزمون داخل آب قرار می‌گیرد و آب به تدریج از طریق لوله‌های موئینه، جذب بتن شده و به طریق موئینه در بتن نفوذ می‌نماید. وزن آزمون در زمان‌های ۳، ۶، ۲۴ و ۷۲ ساعت ثبت می‌گردد. با استفاده از وزن خشک اولیه آزمون و وزن ثانویه آن می‌توان وزن آبی را که جذب آزمون بتنی می‌شود بدست آورد. با استفاده از سطح مقطع تحتانی آزمون می‌توان جذب در واحد سطح (i) را تعیین نمود. برازش مقادیر i بر حسب جذر زمان، یک نمودار نسبتاً خطی

را به دست می‌دهد و معادله این خط دو پارامتر «ضریب جذب مویینه S» و «ثابت جذب مویینه C» را مشخص خواهد کرد. تصویر شماتیک آزمایش جذب مویینه در شکل ۱-۳ ملاحظه می‌شود.



شکل ۱-۳- آزمایش جذب مویینه بتن [۱۴]

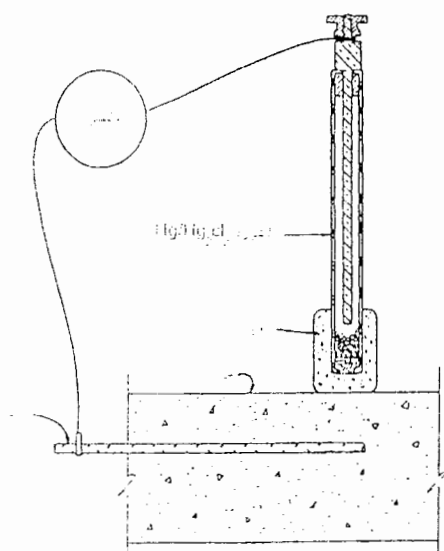
### ۳-۱۱-۹- آزمایش پتانسیل خوردگی (نیم پیل)

وقتی که کلر به سطح میلگرد می‌رسد یا پوشش بتنی میلگرد کربناته می‌شود فرآیند خوردگی آغاز می‌گردد. در چنین مواردی گفته می‌شود میلگرد در حالت فعال قرار دارد و در صورتی که میلگرد فعالیت خوردگی نداشته باشد، در حالت انفعالی یا خنثی خواهد بود.

آزمایش پتانسیل خوردگی فعال یا انفعالی بودن میلگرد در بتن را تعیین می‌کند. به عبارت دیگر، آزمایش پتانسیل خوردگی نشان می‌دهد که میلگرد از نظر خوردگی احتمالاً در چه وضعیتی قرار دارد. این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C876-91(1999) انجام می‌شود. در هنگام انجام این آزمایش به دو نکته باید توجه نمود:

- ۱- باید توجه داشت که پتانسیل خوردگی، شدت یا سرعت خوردگی را نشان نمی‌دهد. برای تعیین شدت خوردگی از دستگاهی به نام پتانسیواستات (پتانسیومتر) استفاده می‌شود.

۲- ممکن است آزمایش پتانسیل خوردگی نشان دهد که میلگرد در بتن فعال است، ولی وقتی که پوشش بتنی از روی میلگرد برداشته شود، هیچگونه آثار زنگ و خوردگی بر روی سطح میلگرد مشاهده نشود. باید توجه نمود که پتانسیل خوردگی نشانه فعال بودن میلگرد و به عبارت دیگر آلوده بودن پوشش بتنی به کلر و دی اکسید کربن را نشان می‌دهد. ممکن است مشاهده آثار زنگ بر روی میلگرد، ماه‌ها و سال‌ها به طول انجامد [۱۴]. نحوه اتصال الکتروود و ولت‌متر به بتن و میلگرد در شکل ۲-۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۳- تعیین پتانسیل خوردگی میلگرد [۵]

پتانسیل خوردگی میلگرد به صورت مطلق قابل اندازه‌گیری نیست، بلکه برای اندازه‌گیری آن نیاز به الکتروود مرجع است. باید توجه داشت که پتانسیل خوردگی میلگرد نسبت به الکتروود مرجع مقایسه و اندازه‌گیری می‌شود. الکتروودهای مرجع انواع مختلف دارند ولی پتانسیل تمام الکتروودهای مرجع نسبت به الکتروود هیدروژن سنجیده و تعیین می‌گردد. فرض بر این است که پتانسیل الکتروود هیدروژن برابر با صفر است. انواع الکتروودهایی که برای آزمایش پتانسیل خوردگی سازه‌های بتنی

مسلح مورد استفاده قرار می‌گیرند همراه با پتانسیل آنها نسبت به الکتروود هیدروژن در جدول ۳-۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۳-۱۰- انواع الکتروودها و پتانسیل آنها [۱۴]

پتانسیل (میلی‌ولت)	نوع الکتروود مرجع
۰	الکتروود هیدروژن Pt / H <sub>2</sub>
- ۲۲۲	الکتروود کلرید نقره - نقره Ag / AgCl
- ۲۴۴	الکتروود کالومل اشباع Hg / Mg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>
- ۳۱۸	الکتروود سولفات مس - مس Cu / CuSO <sub>4</sub>

هنگام گزارش نتایج پتانسیل خوردگی، باید نوع الکتروود مرجعی که استفاده شده است، ذکر گردد. لازم به ذکر است که پتانسیل خوردگی نسبت به هر الکتروود را به راحتی می‌توان به الکتروودهای مرجع دیگر تبدیل نمود. به عنوان مثال پتانسیل ۳۵۰- میلی‌ولت نسبت به الکتروود مرجع سولفات مس - مس (حد فعال شدن میلگرد) معادل است با:

- پتانسیل ۳۲- میلی‌ولت نسبت به الکتروود هیدروژن

- پتانسیل ۲۵۴- میلی‌ولت نسبت به الکتروود کلرید نقره - نقره

- پتانسیل ۲۷۶- میلی‌ولت نسبت به الکتروود کالومل اشباع

الکتروود مرجع تشکیل نیم پیل الکتریکی را داده و وقتی که به میلگرد و بتن متصل می‌گردد یک پیل کامل تشکیل می‌شود. استاندارد ASTM C876 در ارتباط با خوردگی محدوده‌های پتانسیلی مشخصی را ارائه داده است. این حدود بر اساس آزمایش‌های خوردگی که در پل‌های بتنی آلوده به یون کلرید است، پایه‌گذاری شده است [۵]. مقادیر پتانسیل طبق جدول ۳-۱۱ می‌باشد. مقادیر پتانسیل بیان شده در این جدول بر مبنای الکتروود مرجع سولفات مس - مس می‌باشد.

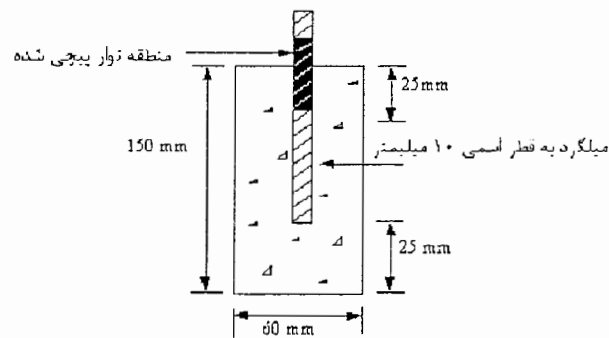
جدول ۱۱-۳- درصد احتمال فعالیت خوردگی

درصد احتمال فعالیت خوردگی	مقدار پتانسیل خوردگی (میلی‌ولت)
۹۰٪	بیشتر از ۳۵۰ -
۵۰٪	بین ۲۰۰ تا ۳۵۰-
۱۰٪	کمتر از ۲۰۰-

برای تشکیل پیل الکتریکی و یا به عبارت دیگر، برای اندازه‌گیری پتانسیل میلگرد، باید ارتباط الکتریکی بین الکتروود مرجع با میلگرد و بتن برقرار گردد. قطب منفی ولت‌متر به الکتروود مرجع و قطب مثبت ولت‌متر به میلگرد اتصال داده می‌شود. سپس الکتروود بر روی سطح مرطوب شده بتن قرار داده می‌شود و پتانسیل خوردگی قرائت می‌گردد. نکته مهمی که در این آزمایش باید به آن اشاره کرد آن است که میلگردها لزوماً باید بدون پوشش باشند. در برخی سازه‌های مسلح برای جلوگیری از خوردگی میلگرد، بر روی آنها پوشش محافظ قرار داده می‌شود. باید توجه داشت که برخی از این محافظ‌ها به عنوان یک ماده فنا شونده عمل می‌کنند. با شروع خوردگی پوشش محافظ، از زنگ زدن میلگرد جلوگیری می‌شود. در این وضعیت اگر از آزمایش پتانسیل خوردگی استفاده شود ولت‌متر اختلاف پتانسیل بالایی را نشان می‌دهد که بیانگر خورده شدن پوشش میلگرد است و نباید این نتیجه را گرفت که خوردگی میلگرد شروع شده است.

برای تعیین پتانسیل خوردگی میلگرد در آزمایشگاه به صورت نیم پیل، روش استاندارد وجود ندارد ولی با توجه به نکات استاندارد ASTM C876 معمولاً آزمون‌های خاصی با جزئیاتی که در ادامه توضیح داده خواهد شد را تهیه می‌کنند و آزمایش پتانسیل خوردگی بر روی آنها انجام می‌شود. این سبک آزمون و آزمایش در تحقیق‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است.

جهت انجام این آزمایش آزمونه‌های استوانه‌ای بتنی به قطر ۶۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر به نحوی ساخته شد که یک میلگرد با قطر اسمی ۱۰ میلی‌متر در محور مرکزی آزمونه بتنی قرار داشته باشد. تصویر شماتیک این آزمونه‌ها در شکل ۳-۳ دیده می‌شود.



شکل ۳-۳- تصویر شماتیک آزمونه‌های استوانه‌ای آزمایش پتانسیل خوردگی [۱۰]

میلگردهای مورد استفاده در این تحقیق از نوع آجدار AII می‌باشد. قبل از استفاده از میلگردها لازم است زنگ‌زدایی آنها انجام شود. پس از بریدن میلگردها، آنها را در داخل اسید سولفوریک با غلظت ۱۰ درصد قرار دادیم و بدین طریق سطح آنها کاملاً تمیز و بدون زنگ شد. جهت تهیه آزمونه‌های این آزمایش ابتدا یک شابلون چوبی مناسب ساخته شد، به صورتی که بتوان میلگرد را در سوراخ وسط آن ثابت نمود. قالب آزمونه‌های استوانه‌ای از لوله پلیکا به قطر ۶۰ میلیمتر و با طول ۱۵۰ میلی‌متر تهیه شد. این لوله به همراه میلگرد، توسط شابلون چوبی نگه داشته می‌شود به نحوی که میلگرد در مرکز آن قرار بگیرد. پوشش بتن روی میلگرد با توجه به قطر لوله و میلگرد حدود ۲۵ میلی‌متر می‌باشد. برای انجام این آزمایش باید به سه نکته توجه کرد. اولاً طول میلگرد و نحوه قرارگیری آن باید به صورتی باشد که مقدار پوشش (پوشش) بتن روی میلگرد در تمام



نقاط آزمون مشابه باشد. لذا فاصله انتهای میلگرد تا کف آزمون باید معادل ۲۵ میلیمتر باشد و کمتر نشود. نکته دوم آنکه در قسمت بالای آزمون لازم است میلگرد تا عمق ۲۵ میلیمتر از سطح آزمون به وسیله پوشش عایق مناسب پوشانده شود تا خوردگی از محل خروج میلگرد از بتن در قسمت بالا شروع نشود. نکته سوم که در ساخت آزمونها باید به آن توجه نمود، عمود بودن میلگرد بر صفحه شابلون چوبی و هم محور بودن آن با لوله استوانه‌ای است. در صورتی که این نکته رعایت نشود پوشش بتنی آزمون در یک سمت میلگرد کمتر از ۲۵ میلیمتر شده و در سمت دیگر از این مقدار فراتر می‌رود و خوردگی میلگرد زودتر از زمان واقعی، و از قسمتی که پوشش کمتری دارد شروع می‌شود.

پس از پوشاندن بخش فوقانی میلگرد به وسیله چسب نواری، لوله پلیکا و میلگرد توسط شابلون چوبی به صورت ثابت نگه داشته می‌شود. پس از ساختن بتن، ابتدا قالب و شابلون بر روی میز لرزاننده قرار داده می‌شود. سپس بتن در سه لایه داخل قالب ریخته می‌شود و با لرزاندن آزمون توسط میز لرزاننده، تراکم بتن انجام می‌شود. در هر دفعه ساخت بتن، تعداد ۶ آزمون استوانه‌ای  $150 \times 60$  میلیمتر با وضعیتی که توصیف شد تهیه می‌شود. سه آزمون به صورت مرطوب و در زیر نایلون به مدت ۷ روز نگهداری می‌شوند. سپس تا دو سوم ارتفاع در حوضچه آب مخصوص قرار داده می‌شوند. معمولاً در این آزمایش از آب نمک استفاده می‌کنند اما با توجه به آنکه در این تحقیق، بررسی خوردگی میلگردها در شرایط محیطی خلیج فارس مورد نظر بوده است، از آب خلیج فارس استفاده شد. سه عدد آزمون دیگر در داخل گرمچال قرار داده شدند تا شرایط عمل‌آوری با بخار را بگذرانند. پس از خروج از گرمچال، این آزمونها نیز در حوضچه آب خلیج فارس قرار داده شدند.

برای انجام آزمایش پتانسیل خوردگی در این تحقیق از ولت متر با دقت ۱ میلی‌ولت و الکتروود کالومل اشباع استفاده شد. برای قرائت اختلاف پتانسیل بین سطح بتن و میلگرد، ابتدا الکتروود متصل به ولتمتر در حوضچه آب خلیج فارس قرار داده شد. سپس با متصل نمودن سر آزاد میلگرد به قطب دیگر ولتمتر، اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد.

### ۳-۱۲- نتایج آزمایش های بتن تازه

پس از ساخت بتن در هر مرتبه ابتدا آزمایش های بتن تازه شامل اسلامپ، دما و وزن مخصوص انجام شده و سپس اقدام به نمونه گیری و تهیه آزمون های مورد نیاز گردید. از آن جایی که آزمایش های بتن تازه جزء آزمایش های اولیه محسوب می شود، نتایج آنها در این فصل ذکر گردید. نتایج آزمایش های دوام بتن و خوردگی میلگردها به طور کامل در فصل های چهارم و پنجم تشریح و بررسی خواهد شد.

لازم به ذکر است به دلیل محدودیت های آزمایشگاهی موجود از قبیل ظرفیت مخلوط کن آزمایشگاهی، فضای مفید گرمچال، تعداد قالب ها و...، هر مخلوط بتنی در دو مرحله ساخته شد. ابتدا آزمون های مربوط به آزمایش های جذب آب و پتانسیل خوردگی تهیه گردید و در مرحله دوم کار ساخت آزمون های مربوط به آزمایش مقاومت فشاری انجام شد. به همین جهت دو سری نتایج آزمایش های بتن تازه وجود دارد که این نتایج مختصراً در جدول ۳-۱۲ مشاهده می شود. در برخی حالات نتایج این آزمایش ها کمتر و یا بیشتر از حد پیش بینی شده به دست آمد که در تحقیق های آزمایشگاهی چندان دور از انتظار نیست. هر چند ممکن است تأثیر خطاهای احتمالی آزمایشگاهی نیز باشد.

جدول ۳-۱۲- نتایج آزمایش های بتن تازه طرح اختلاط ها

شماره طرح اختلاط	نتایج مربوط به آزمایش های جذب آب و پتانسیل خوردگی				نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری				وزن مخصوص محاسباتی Kg/m <sup>3</sup>
	مقدار افزودنی	اسلامپ	دما	وزن مخصوص	مقدار افزودنی	اسلامپ	دما	وزن مخصوص	
	% C	cm	°C	Kg/m <sup>3</sup>	% C	cm	°C	Kg/m <sup>3</sup>	
M 50-350.40	۰/۱۶۷	۶/۰	۲۴/۵	۲۲۱۴	۰/۱۶۷	۸/۰	۲۷/۸	۲۱۹۰	۲۲۹۳
M 50-350.45	۰/۱۳۶	۸/۰	۲۵/۷	۲۳۰۱	۰/۱۳۶	۷/۰	۲۶/۹	۲۲۱۸	۲۳۲۷
M 50-350.50	۰	۵/۵	۲۵/۷	۲۳۱۲	۰	۲/۵	۲۷/۲	۲۲۹۳	۲۲۸۸
M 50-400.40	۰/۱۵۴	۸/۰	۲۵/۵	۲۲۴۴	۰/۱۵۴	۱۳/۰	۲۶/۶	۲۰۸۳	۲۳۱۲
M 50-400.45	۰/۱۱۵	۱۱/۰	۲۶/۰	۲۳۵۳	۰/۱۱۵	۶/۰	۲۷/۷	۲۱۳۵	۲۲۹۲
M 50-400.50	۰	۱۰/۰	۲۶/۸	۲۲۵۹	۰	۱۱/۰	۲۶/۶	۲۲۴۵	۲۲۵۹
M 60-350.40	۰/۱۸۷	۱۱/۰	۲۷/۰	۲۱۲۵	۰/۱۶۷	۲/۰	۲۸/۱	۲۲۴۵	۲۲۹۳
M 60-350.45	۰/۱۲۸	۵/۰	۲۱/۰	۲۲۷۵	۰/۱۳۶	۲/۰	۲۷/۷	۲۲۵۱	۲۳۲۷
M 60-350.50	۰	۸/۰	۲۷/۰	۲۲۷۳	۰	۶/۵	۲۸/۸	۲۲۵۳	۲۲۸۸
M 60-400.40	۰/۱۴۸	۵/۵	۲۷/۰	۲۲۷۷	۰/۱۵۴	۱۱/۰	۲۸/۲	۲۱۷۲	۲۳۱۲
M 60-400.45	۰/۱۰	۱۰/۵	۲۵/۷	۲۲۶۴	۰/۱۱۵	۱۰/۵	۲۹/۶	۲۲۲۰	۲۲۹۲
M 60-400.50	۰	۱۰/۰	۲۷/۰	۲۲۸۷	۰	۱۶/۰	۲۷/۶	۲۲۳۷	۲۲۵۹
M 70-350.40	۰/۱۸۰	۱۱/۰	۲۳/۰	۲۱۵۲	۰/۱۶۷	۳/۰	۲۸/۱	۲۲۴۱	۲۲۹۳
M 70-350.45	۰/۱۴۵	۶/۰	۲۶/۰	۲۲۲۴	۰/۱۳۶	۶/۰	۲۸/۴	۲۲۵۲	۲۳۲۷
M 70-350.50	۰	۸	۲۴/۵	۲۲۵۳	۰	۶/۰	۲۷/۵	۲۲۷۵	۲۲۸۸
M 70-400.40	۰/۱۴۴	۱۰/۰	۲۲/۰	۲۲۶۴	۰/۱۵۴	۱۴/۰	۲۸/۲	۲۱۷۳	۲۳۱۲
M 70-400.45	۰/۱۲	۱۶/۰	۲۴/۶	۲۲۷۷	۰/۱۱۵	۱۲/۰	۲۸/۷	۲۲۵۵	۲۲۹۲
M 70-400.50	۰	۹/۵	۲۵/۲	۲۲۸۶	۰	۱۶/۰	۲۲/۸	۲۲۷۹	۲۲۵۹
M 80-350.40	۰/۱۷۱	۶/۰	۲۷/۹	۲۲۰۰	۰/۱۸۲	۹/۵	۲۷/۷	۲۱۲۳	۲۲۹۳
M 80-350.45	۰/۱۳۶	۴/۵	۲۳/۷	۲۲۴۹	۰/۱۳۶	۳/۰	۲۸/۵	۲۲۷۵	۲۳۲۷
M 80-350.50	۰	۳/۵	۲۶/۳	۲۲۹۴	۰	۵/۵	۳۰/۲	۲۲۵۰	۲۲۸۸
M 80-400.40	۰/۱۵۴	۱۴/۵	۲۴/۸	۲۱۴۵	۰/۱۵۴	۱۶/۰	۲۸/۸	۲۱۵۳	۲۳۱۲
M 80-400.45	۰/۱۲۵	۹/۵	۲۶/۸	۲۲۹۴	۰/۱۱۵	۸/۰	۲۸/۱	۲۲۴۳	۲۲۹۲
M 80-400.50	۰	۱۶/۰	۲۷/۰	۲۲۸۰	۰	۱۵/۰	۲۸/۲	۲۲۵۰	۲۲۵۹

## فصل چهارم: نتایج آزمایش ها

### ۴-۱ - مقدمه

مراحل ساخت و نمونه گیری ۲۴ مخلوط بتنی با شرحی که در فصل گذشته داده شد انجام گردید و برای هر طرح اختلاط ۴۳ نمونه تهیه شد. مجموعاً ۱۰۳۲ نمونه ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفتند.

در این فصل به ترتیب نتایج آزمایش های جذب آب موینه، جذب آب اولیه و نهایی، پتانسیل خوردگی و مقاومت فشاری ذکر می شوند. سعی شده است نتایج به صورت خلاصه و در قالب جداول ذکر شود و در شرح نتیجه هر آزمایش، اطلاعات کلی و یا جزئی که ذکر آنها ممکن است مفید باشد بیان گردد. تجزیه و تحلیل نتایج در فصل پنجم انجام خواهد شد.

## ۴-۲- نتایج آزمایش جذب آب مویینه

پس از اتمام آزمایش‌ها، ابتدا مقادیر جذب در واحد سطح (i) را محاسبه کرده و نمودار i بر حسب جذر زمان را تشکیل می‌دهیم. سپس اطلاعات نقاط قرائت شده را به نمودار منتقل می‌کنیم. با برازش بهترین خط، مقادیر «ضریب جذب مویینه (S)»، «ثابت جذب مویینه (C)» و «ضریب همبستگی (R)» تعیین می‌گردد و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. همانطور که در فصل سوم ذکر شد برای هر یک از نمونه‌های عمل‌آوری شده در بخار، یک نمونه کنترلی نیز در نظر گرفته شده است. بنابراین برای هر معادله جذب مویینه نمونه‌های بخار دیده که بدست می‌آید، یک معادله جذب مویینه مربوط به نمونه کنترلی نیز وجود دارد. پارامترهای این دو معادله با یکدیگر مقایسه شده و نتیجه‌گیری‌های لازم به عمل خواهد آمد. ضریب جذب مویینه نمونه‌های بخار دیده  $S_s$  و ضریب جذب مویینه نمونه‌های کنترلی  $S_c$  نامیده شد. اندیس s بیانگر نمونه بخار دیده و اندیس c بیانگر نمونه کنترلی می‌باشد. این اندیس‌ها برای پارامترهای ثابت جذب مویینه و ضریب همبستگی نیز مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق واحد ضریب جذب مویینه، میلیمتر بر جذر ساعت و واحد ثابت جذب مویینه، میلیمتر می‌باشد که بعضاً به جهت اختصار ذکر نشده است.

نتایج جذب مویینه نمونه‌های عمل‌آوری شده در بخار با دمای ۵۰ درجه در جدول ۴-۱ مشاهده می‌شود. ضرایب همبستگی (R) بدست آمده برای نمونه‌های کنترلی بین ۰/۹۵۸ تا ۰/۹۸۵ و به طور میانگین ۰/۹۷۷ می‌باشد. در نمونه‌های بخار دیده این ضریب از ۰/۹۴۹ تا ۰/۹۸۸ با میانگین ۰/۹۷۴ تغییر می‌کند. ضرایب همبستگی به دست آمده مناسب بوده و بیانگر همگرایی قابل قبول نقاط نمودار i بر حسب جذر زمان می‌باشد. اگر نمودار i بر حسب  $\ln(t)$  و یا نمودار  $\ln(i)$  بر حسب  $\ln(t)$  ترسیم شوند، ضرایب همبستگی به مراتب بهتر از این اعداد خواهند شد. بر این اساس پیشنهاد می‌شود روابط (۱-۵) و (۲-۵) نیز در آزمایش جذب مویینه بتن مورد استفاده قرار گیرند:

$$i = C + S \cdot \ln(t) \quad (1-5)$$

$$\ln(i) = \ln(C) + S \cdot \ln(t) \quad \text{یا} \quad i = C \cdot t^S \quad (2-5)$$

ضریب جذب مویینه (S) در نمونه‌های کنترلی با تغییر عیار سیمان و نسبت آب به سیمان متغیر بوده و مقادیر آن از  $0.270 \text{ mm/hr}^{0.5}$  تا  $0.988$  تغییر می‌کند. در نمونه‌های بخاردهی شده محدوده مقادیر این ضرایب از  $0.226$  تا  $0.408$  بدست آمد.

ثابت جذب مویینه (C) در نمونه‌های کنترلی از حد  $0.899 \text{ mm}$  تا  $2.055$  متغیر می‌باشد. مقادیر این پارامتر در نمونه‌های بخاردهی شده در محدوده  $1.147$  تا  $1.833$  تغییر می‌کند. ثابت جذب مویینه به نوع بتن و روش پرداخت سطح آن وابسته است [۱۵].

نتایج جذب مویینه بتن عمل‌آوری شده در دمای  $60$  درجه در جدول ۴-۲ ذکر شده است. مقدار ضریب همبستگی نمونه‌های کنترلی از  $0.928$  تا  $0.976$  تغییر می‌کند و به طور متوسط دارای مقدار  $0.961$  می‌باشد. ضریب همبستگی نمونه‌های بخاردهی شده از  $0.959$  تا  $0.991$  با میانگین  $0.977$  تغییر می‌کند. ضریب جذب مویینه نمونه‌های کنترلی از  $0.287 \text{ mm/hr}^{0.5}$  تا  $0.622$  تغییر می‌کند. این ضریب در مورد نمونه‌های بخاردهی شده در این دما در محدود  $0.351$  تا  $1.267$  قرار می‌گیرد. ثابت جذب مویینه (C) در نمونه‌های کنترلی در محدوده  $1.292 \text{ mm}$  تا  $2.701$  و در نمونه‌های بخاردهی شده در محدوده  $0.792$  تا  $2.486$  می‌گنجد.

عمل‌آوری نمونه‌های بتنی در دمای  $70$  درجه نتایج مندرج در جدول ۴-۳ را به همراه داشت. ضریب همبستگی نمونه‌های کنترلی با میانگین  $0.974$  در محدوده  $0.958$  تا  $0.989$  قرار می‌گیرد. این ضریب در نمونه‌های بخاردهی شده با میانگین  $0.978$  در محدوده  $0.968$  تا  $0.989$  قرار دارد. ضریب جذب مویینه در نمونه‌های کنترلی از  $0.427 \text{ mm/hr}^{0.5}$  تا  $0.889$  و در نمونه‌های بخاردهی شده از کمترین مقدار  $0.416$  تا بیشترین مقدار خود یعنی  $0.927$  تغییر می‌کند. ثابت جذب مویینه (C) در نمونه‌های کنترلی از  $1.352 \text{ mm}$  تا  $2.831$  و در نمونه‌های بخاردهی شده در دمای  $70$  درجه از  $1.390$  تا  $2.008$  متغیر بوده است.

نتایج بالاترین دمای عمل‌آوری بتن در این تحقیق، یعنی دمای  $80$  درجه در جدول ۴-۴ منعکس شده است. متوسط ضریب همبستگی در نمونه‌های کنترلی و نمونه‌های بخاردهی شده به

ترتیب ۰/۹۶۱ و ۰/۹۸۶ می باشد و در نمونه‌های کنترلی در محدوده ۰/۹۳۷ تا ۰/۹۷۵ و در نمونه‌های بخاردهی شده در محدوده ۰/۹۵۸ تا ۰/۹۹۷ تغییر می کند. ضرایب جذب مویینه در نمونه‌های کنترلی از مقدار نسبتاً کم  $0.5 \text{ mm/hr}$  تا ۰/۱۱۹ تا ۰/۶۲۴ تغییر می کند. این پارامتر در نمونه‌هایی که در بخار با دمای ۸۰ درجه عمل‌آوری شده‌اند در محدوده ۰/۲۵۰ تا ۰/۶۸۴ قرار دارد. ثابت جذب مویینه در نمونه‌های کنترلی از ۱/۴۷۰ تا ۲/۷۶۹ و در نمونه‌های بخاردهی شده از ۰/۸۱۷ تا ۲/۲۰۴ در نوسان است.

جدول ۴-۱ - نتایج آزمایش جذب آب مویینه بتن عمل آوری شده در دمای ۵۰ درجه

شرایط عمل آوری	عیار سیمان ( Kg/m <sup>3</sup> )	۳۵۰			۴۰۰			
		نسبت آب به سیمان	۰/۴۰	۰/۴۵	۰/۵۰	۰/۴۰	۰/۴۵	۰/۵۰
نمونه در بخار	جذب در واحد سطح	۳ hr	۱/۶۶	۱/۴۱	۲/۱۷	۱/۷۸	۱/۹۴	۱/۸۷
		۶ hr	۲/۱۷	۱/۷۹	۲/۸۰	۲/۱۸	۲/۵۶	۲/۲۵
		۲۴ hr	۳/۴۴	۲/۶۳	۴/۰۳	۳/۰۸	۳/۸۶	۳/۱۸
		i (mm)	۴/۴۴	۲/۹۸	۴/۷۱	۳/۸۹	۴/۷۷	۴/۰۰
۵۰ درجه	Ss (mm/hr <sup>0.5</sup> )	۰/۴۰۵	۰/۲۲۶	۰/۳۶۳	۰/۳۰۶	۰/۴۰۸	۰/۳۱۰	
	Cs	۱/۱۴۷	۱/۲۰۸	۱/۸۳۳	۱/۳۸۹	۱/۴۹۳	۱/۴۶۲	
نمونه کنترلی	جذب در واحد سطح	۳ hr	۱/۴۶	۱/۹۵	۲/۲۹	۲/۲۲	۲/۳۷	۳/۱۷
		۶ hr	۱/۹۹	۲/۶۳	۲/۷۹	۳/۰۶	۳/۲۷	۴/۴۷
		۲۴ hr	۲/۴۵	۴/۲۲	۲/۶۹	۴/۹۴	۵/۱۵	۷/۴۷
		i (mm)	۴/۴۸	۵/۵۳	۴/۱۹	۶/۵۳	۶/۲۵	۹/۹۸
استاندارد	Sc (mm/hr <sup>0.5</sup> )	۰/۴۴۳	۰/۵۲۰	۰/۲۷۰	۰/۶۲۴	۰/۵۵۸	۰/۹۸۸	
	Cc	۰/۸۹۹	۱/۲۹۹	۲/۰۵۵	۱/۴۴۶	۱/۸۰۹	۱/۹۳۲	
آزمایشگاهی	شماره نمونه	Rc	۰/۹۸۱	۰/۹۸۵	۰/۹۵۸	۰/۹۸۵	۰/۹۶۶	۰/۹۸۵
		S 50-350.40	C 50-350.40	C 50-350.50	S 50-400.40	C 50-400.40	C 50-400.45	C 50-400.50



جدول ۴-۲- نتایج آزمایش جذب آب مویینه بتن عمل آوری شده در دمای ۶۰ درجه

شرایط عمل آوری	عیار سیمان	۲۵۰			۴۰۰					
		( Kg/m <sup>3</sup> )	نسبت آب به سیمان	۰/۴۰	۰/۵۰	۰/۴۰	۰/۴۵			
نمونه در بخار	جذب در واحد سطح	۲ hr	۱/۲۹	۲/۳۱	۳/۲۵	۱/۹۹	۲/۴۵	۳/۴۵		
		۶ hr	۱/۶۶	۳/۰۶	۴/۴۸	۲/۵۷	۳/۷۴	۵/۱۷		
		۲۴ hr	۲/۷۱	۴/۹۲	۹/۵۰	۳/۹۶	۵/۸۲	۸/۷۳		
		۷۲ hr	۳/۶۸	۶/۵۱	۱۱/۶۸	۵/۰۵	۷/۷۲	۱۰/۵۸		
۶۰ درجه	Ss (mm/hr <sup>0.5</sup> )	ضریب جذب مویینه	۰/۳۵۱	۰/۶۱۲	۱/۲۶۷	۰/۴۴۵	۰/۷۴۶	۱/۰۲۴		
	Cs	ثابت جذب مویینه	۰/۷۹۲	۱/۵۱۱	۱/۶۶۴	۱/۴۳۸	۱/۶۵۷	۲/۴۸۶		
	Rs	ضریب همبستگی	۰/۹۹۱	۰/۹۸۷	۰/۹۶۲	۰/۹۸۳	۰/۹۸۰	۰/۹۵۹		
نمونه کنترلی	جذب در واحد سطح	شماره نمونه						S 60-400.40	S 60-400.45	S 60-400.50
		۲ hr	۱/۶۷	۲/۲۳	۲/۷۸	۱/۷۴	۲/۴۵	۳/۰۰		
		۶ hr	۲/۱۱	۲/۹۶	۲/۶۳	۲/۳۵	۲/۷۵	۳/۹۹		
		۲۴ hr	۳/۱۹	۴/۴۶	۵/۲۷	۲/۲۸	۵/۶۸	۵/۷۹		
در شرایط استاندارد	Sc (mm/hr <sup>0.5</sup> )	۷۲ hr	۳/۹۰	۵/۵۴	۶/۳۲	۳/۷۹	۷/۱۷	۶/۳۵		
		ضریب جذب مویینه	۰/۳۲۵	۰/۴۷۶	۰/۵۰۶	۰/۲۸۷	۰/۶۶۲	۰/۴۷۴		
آزمایشگاهی	Cc	ثابت جذب مویینه	۱/۲۹۲	۱/۷۰۷	۲/۲۷۷	۱/۵۴۱	۱/۸۵۶	۲/۷۰۱		
	Rc	ضریب همبستگی	۰/۹۷۵	۰/۹۷۶	۰/۹۶۸	۰/۹۵۰	۰/۹۶۸	۰/۹۲۸		
	شماره نمونه						C 60-350.40	C 60-350.50	C 60-400.45	C 60-400.50

جدول ۴-۳- نتایج آزمایش جذب آب مویینه بتن عمل آوری شده در دمای ۷۰ درجه

شرایط عمل آوری	عیار سیمان ( Kg/m <sup>3</sup> )	۲۵۰				۴۰۰			
		نسبت آب به سیمان	۰/۴۰	۰/۴۵	۰/۵۰	۰/۴۰	۰/۴۵	۰/۵۰	
نمونه در بخار	جذب در واحد سطح i (mm)	۳ hr	۱/۹۲	۲/۵۱	۳/۰۱	۲/۴۸	۲/۸۳	۲/۰۶	
		۶ hr	۲/۶۲	۳/۳۱	۴/۱۵	۳/۲۰	۴/۴۱	۲/۸۲	
		۲۴ hr	۴/۱۴	۵/۰۵	۶/۹۰	۵/۱۵	۶/۸۰	۴/۱۱	
		۷۲ hr	۵/۲۰	۶/۵۸	۹/۳۸	۶/۵۳	۸/۸۴	۵/۰۰	
۷۰ درجه	Ss (mm/hr <sup>0.5</sup> )	ضرب جذب مویینه	۰/۴۷۴	۰/۵۸۹	۰/۹۲۷	۰/۶۰۳	۰/۸۴۵	۰/۴۱۶	
	Cs	ثابت جذب مویینه	۱/۳۹۰	۱/۷۷۸	۱/۷۸۷	۱/۶۶۷	۲/۰۰۸	۱/۶۶۹	
نمونه کنترلی	جذب در واحد سطح i (mm)	۳ hr	۱/۷۵	۲/۴۳	۳/۲۶	۲/۶۵	۲/۵۷	۳/۷۹	
		۶ hr	۲/۴۷	۳/۳۱	۴/۳۹	۳/۵۹	۳/۱۵	۴/۸۶	
		۲۴ hr	۳/۹۶	۵/۲۱	۷/۱۹	۵/۹۵	۴/۴۱	۷/۶۰	
		۷۲ hr	۴/۷۲	۶/۵۰	۹/۳۶	۷/۲۶	۵/۶۳	۹/۳۶	
استاندارد	Sc (mm/hr <sup>0.5</sup> )	ضرب جذب مویینه	۰/۴۲۷	۰/۵۸۷	۰/۸۸۹	۰/۶۷۲	۰/۴۴۳	۰/۸۱۳	
	Cc	ثابت جذب مویینه	۱/۳۵۲	۱/۷۸۳	۲/۱۴۵	۱/۹۱۲	۱/۹۹۶	۲/۸۳۱	
آزمایشگاهی	Rc	ضرب همبستگی	۰/۹۵۸	۰/۹۷۴	۰/۹۸۳	۰/۹۶۷	۰/۹۸۹	۰/۹۷۵	
	شماره نمونه		C 70-350.40	C 70-350.45	C 70-350.50	C 70-400.40	C 70-400.45	C 70-400.50	

جدول ۴-۴ - نتایج آزمایش جذب آب مویینه بتن عمل آوری شده در دمای ۸۰ درجه

شرایط عمل آوری	عیار سیمان ( Kg/m <sup>3</sup> )	۲۵۰			۴۰۰			
		نسبت آب به سیمان	۰/۴۰	۰/۴۵	۰/۵۰	۰/۴۰	۰/۴۵	۰/۵۰
نمونه در بخار	جذب در واحد سطح i (mm)	۳ hr	۱/۴۰	۲/۰۷	۲/۸۷	۲/۱۶	۲/۶۸	۲/۳۱
		۶ hr	۱/۴۶	۲/۵۸	۳/۱۹	۲/۳۴	۳/۵۱	۳/۱۰
		۲۴ hr	۲/۵۲	۳/۷۰	۴/۳۷	۳/۱۲	۶/۱۶	۴/۷۲
		۷۲ hr	۳/۴۴	۴/۸۳	۵/۶۵	۳/۸۳	۷/۳۰	۶/۰۸
۸۰ درجه	Ss (mm/hr <sup>0.5</sup> )	ضریب جذب مویینه	۰/۳۱۶	۰/۴۰۰	۰/۴۱۴	۰/۲۵۰	۰/۶۸۴	۰/۵۴۳
	Cs	ثابت جذب مویینه	۰/۸۱۷	۱/۵۴۰	۲/۲۰۴	۱/۷۶۳	۱/۹۰۷	۱/۶۶۹
	Rs	ضریب همبستگی	۰/۹۹۲	۰/۹۹۱	۰/۹۹۷	۰/۹۹۳	۰/۹۵۸	۰/۹۸۳
نمونه کنترلی	جذب در واحد سطح i (mm)	۳ hr	S 80-350.40	S 80-350.45	S 80-350.50	S 80-400.40	S 80-400.45	S 80-400.50
		۶ hr	۱/۷۲	۲/۴۰	۲/۸۷	۱/۷۴	۲/۵۵	۳/۳۴
		۲۴ hr	۲/۰۶	۳/۰۸	۲/۹۷	۱/۸۷	۳/۶۶	۴/۵۰
		۷۲ hr	۲/۸۱	۴/۱۱	۳/۴۱	۲/۴۵	۴/۸۲	۶/۴۴
استاندارد	Sc (mm/hr <sup>0.5</sup> )	ضریب جذب مویینه	۰/۲۲۸	۰/۳۴۷	۰/۱۱۹	۰/۱۲۵	۰/۴۰۶	۰/۶۲۴
	Cc	ثابت جذب مویینه	۱/۴۷۰	۲/۰۹۳	۲/۷۰۵	۱/۵۸۱	۲/۳۶۳	۲/۷۶۹
آزمایشگاهی	Rc	ضریب همبستگی	۰/۹۷۳	۰/۹۶۷	۰/۹۷۵	۰/۹۴۶	۰/۹۳۷	۰/۹۶۶
	شماره نمونه		C 80-350.40	C 80-350.45	C 80-350.50	C 80-400.40	C 80-400.45	C 80-400.50

### ۴-۳- نتایج آزمایش جذب آب اولیه و نهایی بتن

جذب آب بتن بر حسب درصد وزن خشک نمونه در زمان‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۶۰ دقیقه و نیز ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت قرائت شده است. جداول ۴-۵، ۴-۶، ۴-۷ و ۴-۸ به ترتیب جذب آب بتن‌های عمل‌آوری شده در دماهای ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهند. در این جداول نتایج جذب آب نمونه‌های کنترلی که در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل‌آوری شده‌اند نیز ذکر شده است. جذب آب بدست آمده تا زمان ۶۰ دقیقه به عنوان «جذب آب اولیه بتن» شناخته شده و در تجزیه و تحلیل نتایج در نمودارهای فصل پنجم با نماد  $W_i$  نشان داده شده است. جذب آب ۷۲ ساعته به عنوان «جذب آب نهایی بتن» در نظر گرفته شده و نماد  $W_f$  برای آن انتخاب شده است.

جذب آب ۳۰ دقیقه بتن را به عنوان شاخص جذب آب اولیه و جذب آب ۷۲ ساعته را برای شاخص جذب آب نهایی بتن در نظر گرفتیم. هر چند پس از ۴۸ ساعت، تقریباً کلیه بتن‌ها اشباع شده‌اند و عملاً افزایش وزن چندانی را نشان نمی‌دهند. در جدول ۴-۵ نتایج عمل‌آوری بتن در دمای ۵۰ درجه و تأثیر آن بر جذب آب اولیه و نهایی بتن مشاهده می‌شود. کمترین و بیشترین جذب آب اولیه در نمونه‌های بخار دیده به ترتیب در نمونه های شماره S 50-400.45 و S 50-400.40 دیده می‌شود. کمترین و بیشترین جذب آب اولیه نمونه‌های کنترلی به ترتیب در بتن‌های شماره C 50-400.40 و C 50-400.50 دیده می‌شود. در بین کل نمونه‌های کنترلی و نمونه‌های بخار دیده در این دما کمترین مقدار جذب آب اولیه ۱/۵۱ درصد و بیشترین مقدار ۲/۸۸ درصد می‌باشد. کمترین و بیشترین جذب آب نهایی در این جدول نیز با همان ترتیبی است که در جذب آب اولیه وجود داشت. کمترین و بیشترین مقدار جذب آب نهایی به ترتیب ۳/۳۶ درصد و ۵/۹۹ درصد به دست آمده است.

در جدول ۴-۶، مربوط به عمل‌آوری بتن در دمای ۶۰ درجه کمترین و بیشترین جذب آب اولیه نمونه‌های بخار دیده در نمونه های S 60-350.40 و S 60-400.50 دیده می‌شود. در بین

نمونه‌های کنترلی کمترین و بیشترین جذب آب اولیه در نمونه های C 60-350.40 و C 60-400.50 و C 60-400.50 اتفاق افتاده است. کمترین و بیشترین مقدار جذب آب نهایی در بتن‌های بخار دیده به ترتیب در نمونه های S 60-400.40 و S 60-400.50 می‌باشد. همین طور در بین نمونه‌های کنترلی، کمترین جذب آب نهایی در بتن C 60-400.40 و بیشترین مقدار آن مشترکاً در بتن‌های C 60-400.45 و C 60-400.50 دیده می‌شود. جذب آب اولیه نمونه‌های این جدول از ۱/۴۴ درصد تا ۲/۹۵ درصد تغییر کرده‌اند. جذب آب نهایی این نمونه‌ها از ۳/۷۵ درصد در کمترین مقدار، تا ۵/۹۸ درصد در بیشترین مقدار متغیر بوده است.

در نتایج عمل‌آوری بتن با بخار ۷۰ درجه که در جدول ۴-۷ درج شده است، کمترین و بیشترین جذب آب اولیه نمونه‌های بخار دیده به ترتیب در نمونه‌های S 70-350.40 و S 70-400.45 بدست آمده است. بتن‌های C 70-350.40 و C 70-400.50 به ترتیب کمترین و بیشترین جذب آب اولیه را در نمونه‌های کنترلی داشته‌اند. کمترین و بیشترین مقدار جذب آب نهایی بتن‌های بخار دیده به ترتیب در نمونه های S 70-400.50 و S 70-350.50 به دست آمد. در نمونه‌های کنترلی، نمونه های C70-350.45 و C70-350.50 مقادیر حداقل و حداکثر جذب آب نهایی را دارا می‌باشند. مقادیر جذب آب اولیه در محدوده ۱/۸۹ تا ۲/۸۶ درصد و جذب آب نهایی در محدوده ۴/۵۷ تا ۵/۷۱ درصد تغییر کرده است.

جدول ۴-۸ نتایج عمل‌آوری بتن با بخار ۸۰ درجه را بیان کرده است. در این دمای عمل‌آوری، بتن‌های S 80-400.40 و S 80-400.45 به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار جذب آب اولیه و نهایی را داشته‌اند. در بین نمونه‌های کنترلی، بتن‌های C 80-400.40 و C 80-400.50 به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار جذب آب (هم اولیه و هم نهایی) را به خود اختصاص داده‌اند. جذب آب اولیه در این جدول از ۱/۱۷ تا ۲/۹۹ درصد و جذب آب نهایی از ۲/۴۹ تا ۵/۱۰ درصد تغییر کرده‌اند.

جدول ۴-۵- نتایج آزمایش جذب آب اولیه و نهایی بتن عمل آوری شده در بخار ۵۰ درجه

شرایط عمل آوری	شماره نمونه	زمان							
		۱۰ دقیقه	۲۰ دقیقه	۳۰ دقیقه	۶۰ دقیقه	۲۴ ساعت	۴۸ ساعت	۷۲ ساعت	
نمونه های بخار دیده	S50-350.40	۱/۱۹	۱/۵۶	۱/۸۹	۲/۳۳	۴/۲۹	۴/۴۰	۴/۴۱	
	S50-350.45	۱/۴۶	۱/۸۱	۲/۰۵	۲/۷۲	۳/۸۵	۴/۰۲	۴/۱۰	
	S50-350.50	۱/۴۶	۱/۸۱	۲/۰۴	۲/۴۲	۳/۹۰	۴/۱۰	۴/۱۶	
	S50-400.40	۱/۰۸	۱/۳۶	۱/۵۱	۱/۸۱	۳/۱۱	۳/۲۶	۳/۳۶	
	S50-400.45	۱/۷۲	۲/۰۸	۲/۳۹	۲/۹۰	۴/۴۴	۴/۶۳	۴/۶۷	
	S50-400.50	۱/۷۹	۲/۱۴	۲/۲۶	۲/۶۶	۳/۹۸	۴/۱۱	۴/۱۹	
نمونه های کنترلی	C50-350.40	۱/۲۵	۱/۵۴	۱/۸۶	۲/۳۸	۴/۸۱	۴/۸۹	۴/۹۳	
	C50-350.45	۱/۶۱	۱/۹۷	۲/۲۸	۲/۶۵	۴/۷۴	۴/۸۴	۴/۹۰	
	C50-350.50	۱/۶۸	۲/۰۶	۲/۳۴	۲/۸۸	۵/۰۸	۵/۱۸	۵/۲۵	
	C50-400.40	۱/۲۸	۱/۶۱	۱/۸۴	۲/۴۱	۴/۵۱	۴/۵۸	۴/۶۳	
	C50-400.45	۱/۸۱	۲/۲۰	۲/۵۴	۳/۲۰	۴/۹۴	۵/۰۶	۵/۰۷	
	C50-400.50	۲/۰۳	۲/۶۲	۲/۸۸	۳/۸۱	۵/۹۲	۵/۹۶	۵/۹۹	

جدول ۴-۶- نتایج آزمایش جذب آب اولیه و نهایی بتن عمل آوری شده در بخار ۶۰ درجه

شرایط عمل آوری	شماره نمونه	زمان									
		۱۰ دقیقه	۲۰ دقیقه	۳۰ دقیقه	۶۰ دقیقه	۲۴ ساعت	۴۸ ساعت	۷۲ ساعت			
نمونه های بخار دیده	S60-350.40	۱/۰۲	۱/۲۷	۱/۴۴	۱/۸۴	۴/۲۳	۴/۵۵	۴/۶۶			
	S60-350.45	۱/۴۶	۱/۸۸	۲/۸۶	۲/۷۰	۴/۴۲	۴/۵۷	۴/۶۶			
	S60-350.50	۱/۹۵	۲/۴۷	۲/۹۰	۳/۵۴	۵/۶۰	۵/۶۴	۵/۶۶			
	S60-400.40	۱/۰۳	۱/۳۵	۱/۵۱	۱/۹۲	۳/۴۶	۳/۶۶	۳/۷۸			
	S60-400.45	۱/۸۸	۲/۴۲	۲/۸۰	۲/۵۵	۵/۵۴	۵/۶۴	۵/۶۹			
	S60-400.50	۲/۰۷	۲/۵۸	۲/۹۵	۳/۷۱	۵/۹۲	۵/۹۸	۵/۹۸			
نمونه های کنترلی	C60-350.40	۱/۱۰	۱/۴۰	۱/۶۲	۲/۰۹	۴/۰۴	۴/۲۴	۴/۳۴			
	C60-350.45	۱/۴۳	۱/۸۱	۲/۰۸	۲/۷۴	۴/۲۹	۴/۴۳	۴/۴۹			
	C60-350.50	۱/۸۴	۲/۳۳	۲/۶۵	۳/۳۷	۴/۹۹	۵/۱۰	۵/۱۶			
	C60-400.40	۱/۱۷	۱/۴۹	۱/۷۳	۲/۱۵	۳/۵۱	۳/۶۷	۳/۷۵			
	C60-400.45	۱/۹۲	۲/۳۳	۲/۷۰	۳/۴۴	۵/۰۷	۵/۲۱	۵/۲۸			
	C60-400.50	۱/۹۹	۲/۴۸	۲/۸۱	۳/۴۶	۵/۰۸	۵/۲۱	۵/۲۸			

جدول ۴-۷- نتایج آزمایش جذب آب اولیه و نهایی بتن عمل آوری شده در بخار ۷۰ درجه

شرایط عمل آوری	شماره نمونه	زمان									
		۱۰ دقیقه	۲۰ دقیقه	۳۰ دقیقه	۶۰ دقیقه	۲۴ ساعت	۴۸ ساعت	۷۲ ساعت			
نمونه های بخار دیده	S70-350.40	۱/۳۱	۱/۶۳	۱/۸۹	۲/۳۶	۴/۷۹	۴/۹۴	۵/۰۰			
	S70-350.45	۱/۴۶	۱/۸۵	۲/۱۰	۲/۶۵	۴/۵۸	۴/۶۸	۴/۷۱			
	S70-350.50	۱/۹۰	۲/۴۰	۲/۷۳	۲/۴۲	۵/۵۸	۵/۶۷	۵/۷۱			
	S70-400.40	۱/۵۲	۱/۹۳	۲/۲۳	۲/۸۱	۴/۸۵	۴/۹۶	۴/۹۹			
	S70-400.45	۱/۹۹	۲/۵۰	۲/۸۶	۲/۴۷	۵/۳۳	۵/۴۴	۵/۵۰			
	S70-400.50	۱/۵۷	۱/۹۴	۲/۱۷	۲/۵۸	۴/۲۲	۴/۴۴	۴/۵۷			
	C70-350.40	۱/۳۱	۱/۶۴	۱/۸۹	۲/۴۴	۴/۷۹	۴/۹۱	۴/۹۹			
نمونه های کنترلی	C70-350.45	۱/۵۳	۱/۹۸	۲/۳۱	۲/۹۱	۴/۶۷	۴/۶۹	۴/۷۶			
	C70-350.50	۱/۸۸	۲/۲۷	۲/۶۶	۲/۴۶	۵/۵۷	۵/۶۶	۵/۷۰			
	C70-400.40	۱/۶۲	۲/۰۸	۲/۴۳	۲/۰۸	۴/۷۸	۴/۸۸	۴/۹۲			
	C70-400.45	۱/۷۰	۲/۱۰	۲/۴۲	۲/۰۲	۴/۷۸	۴/۹۵	۴/۹۹			
	C70-400.50	۱/۸۱	۲/۴۰	۲/۷۳	۲/۴۳	۵/۰۹	۵/۲۱	۵/۲۴			



جدول ۴-۸- نتایج آزمایش جذب آب اولیه و نهایی بتن عمل آوری شده در بخار ۸۰ درجه

شرایط عمل آوری	شماره نمونه	زمان							
		۱۰ دقیقه	۲۰ دقیقه	۳۰ دقیقه	۶۰ دقیقه	۲۴ ساعت	۴۸ ساعت	۷۲ ساعت	
نمونه های بخار دیده	S80-350.40	۰/۹۲	۱/۰۸	۱/۳۰	۱/۵۳	۲/۳۴	۳/۶۲	۳/۷۴	
	S80-350.45	۱/۱۱	۱/۳۲	۱/۴۷	۱/۷۸	۳/۳۶	۳/۶۱	۳/۷۶	
	S80-350.50	۱/۴۳	۱/۶۵	۱/۸۵	۲/۲۷	۴/۳۳	۴/۵۳	۴/۵۸	
	S80-400.40	۰/۹۲	۱/۰۵	۱/۱۷	۱/۴۳	۳/۰۰	۳/۲۴	۳/۳۸	
	S80-400.45	۱/۳۷	۱/۹۰	۲/۱۷	۲/۷۳	۴/۸۴	۵/۰۰	۵/۰۲	
	S80-400.50	۱/۳۶	۱/۶۷	۱/۸۶	۲/۱۸	۳/۹۰	۴/۲۵	۴/۳۸	
نمونه های کنترلی	C80-350.40	۱/۰۲	۱/۲۶	۱/۴۸	۱/۷۸	۳/۰۶	۳/۲۳	۳/۳۴	
	C80-350.45	۱/۵۱	۱/۸۳	۲/۰۴	۲/۴۸	۳/۶۶	۳/۷۷	۳/۹۱	
	C80-350.50	۱/۳۰	۱/۴۷	۱/۶۰	۱/۸۶	۲/۸۶	۳/۰۴	۳/۱۲	
	C80-400.40	۰/۹۵	۱/۰۹	۱/۱۹	۱/۴۰	۲/۲۷	۲/۴۱	۲/۴۹	
	C80-400.45	۱/۶۱	۲/۰۳	۲/۳۱	۲/۷۷	۴/۰۸	۴/۲۲	۴/۲۸	
	C80-400.50	۲/۰۶	۲/۴۳	۲/۹۹	۳/۵۵	۴/۹۲	۵/۰۷	۵/۱۰	

## ۴-۴ - نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی

آزمونه‌های پتانسیل خوردگی به شکل استوانه  $6 \times 15$  سانتیمتر بوده و با قرار دادن میلگرد به قطر ۱۰ میلیمتر در مرکز آنها، مجموعاً به تعداد ۱۴۴ عدد ساخته شدند. در هر دفعه ساخت بتن، تعداد ۶ آزمونه تهیه شد. نیمی از آزمونه‌ها در شرایط بخار و بقیه در زیر نایلون به صورت مرطوب نگهداری شدند تا بلوغ همه نمونه‌ها به اندازه ۵۵۴۴ درجه - ساعت (معدل ۷ روز عمل آوری در شرایط استاندارد آزمایشگاهی) برسد. سپس نمونه‌ها در حوضچه حاوی آب خلیج فارس قرار گرفتند. تلاش شد اختلاف پتانسیل نمونه‌ها از همان روزهای ابتدایی قرار گرفتن در آب دریا، قرائت شود و تا فعال شدن میلگرد همه آزمونه‌ها ادامه پیدا کند. بر این اساس اختلاف پتانسیل آزمونه‌ها حداقل به مدت ۱۰ هفته و حداکثر تا حدود ۱۸ هفته (پس از اطمینان از شروع خوردگی میلگردها) ثبت گردید. پس از پایان قرائت‌ها برای هر طرح اختلاط نمودار اختلاف پتانسیل - زمان تهیه شد.

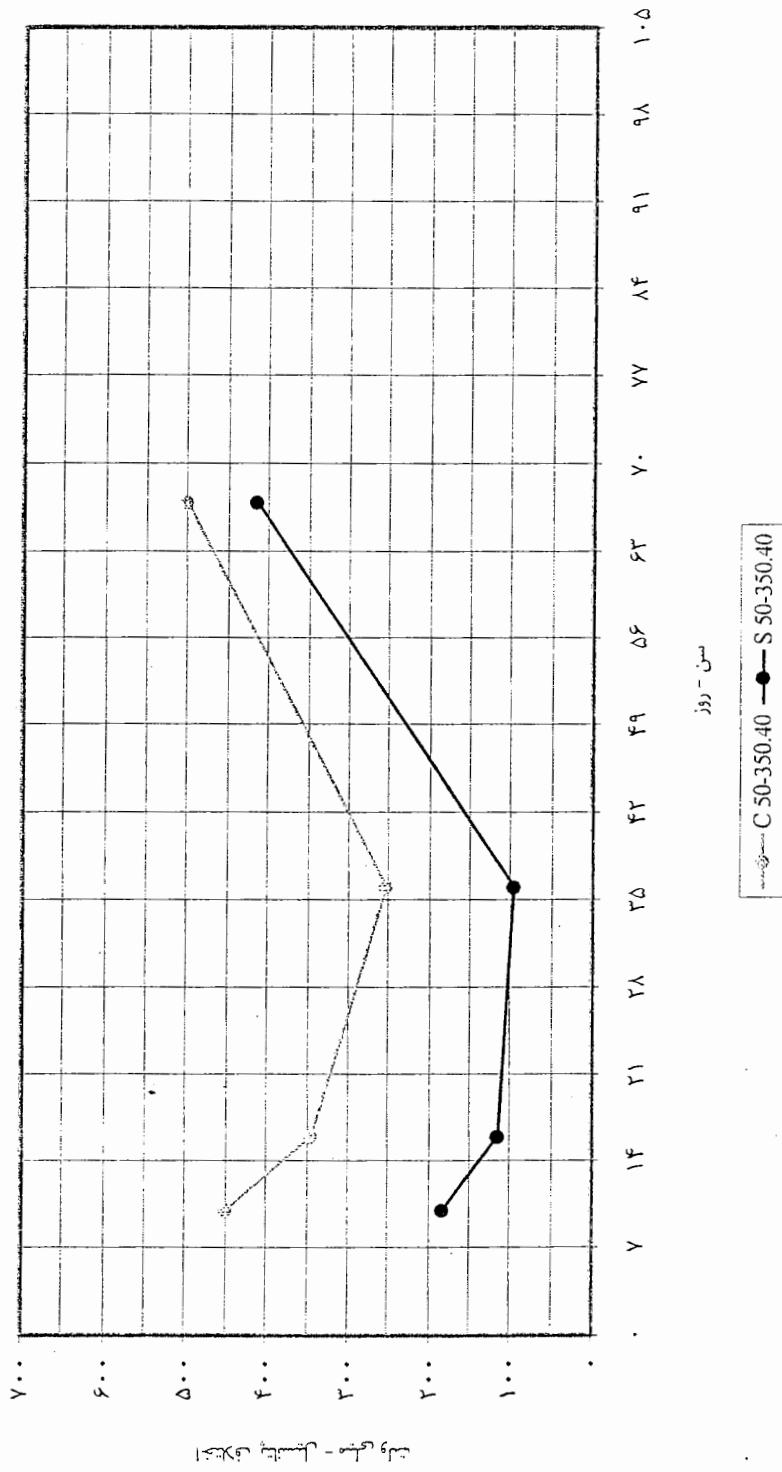
در این نمودار دو منحنی ترسیم شد که یک منحنی مربوط به نمونه‌های بخار دیده و منحنی دیگر مربوط به نمونه‌های کنترلی - که در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل آوری شده است - می‌باشد. با توجه به آنکه در این تحقیق از الکتروود کالومل اشباع استفاده شده است، بر اساس استاندارد ASTM C876 اختلاف پتانسیل‌های بیشتر از ۲۷۶ میلی‌ولت به معنای آن است که احتمال خوردگی میلگرد بیش از ۹۰ درصد است و این زمان را عملاً به عنوان آستانه شروع خوردگی و فعال شدن میلگرد در نظر می‌گیرند.

در آزمایش پتانسیل خوردگی بعضاً نوسان‌هایی در اختلاف پتانسیل‌های قرائت شده مشاهده می‌شود که خاصیت ذاتی این آزمایش است. قرائت‌های نخستین در بسیاری از آزمونه‌ها به ویژه در آزمونه‌های کنترلی، اعداد نسبتاً بالایی بود که به تدریج کاهش یافتند. به نظر می‌رسد علت بالا بودن نسبی اعداد ابتدایی، کم بودن سن آزمونه‌ها می‌باشد. توضیح کامل تر اینکه هر چند آزمونه‌ها در شرایط مهاجم آب دریا قرار گرفته‌اند، اما با این وجود هیدراسیون سیمان همچنان در آنها انجام

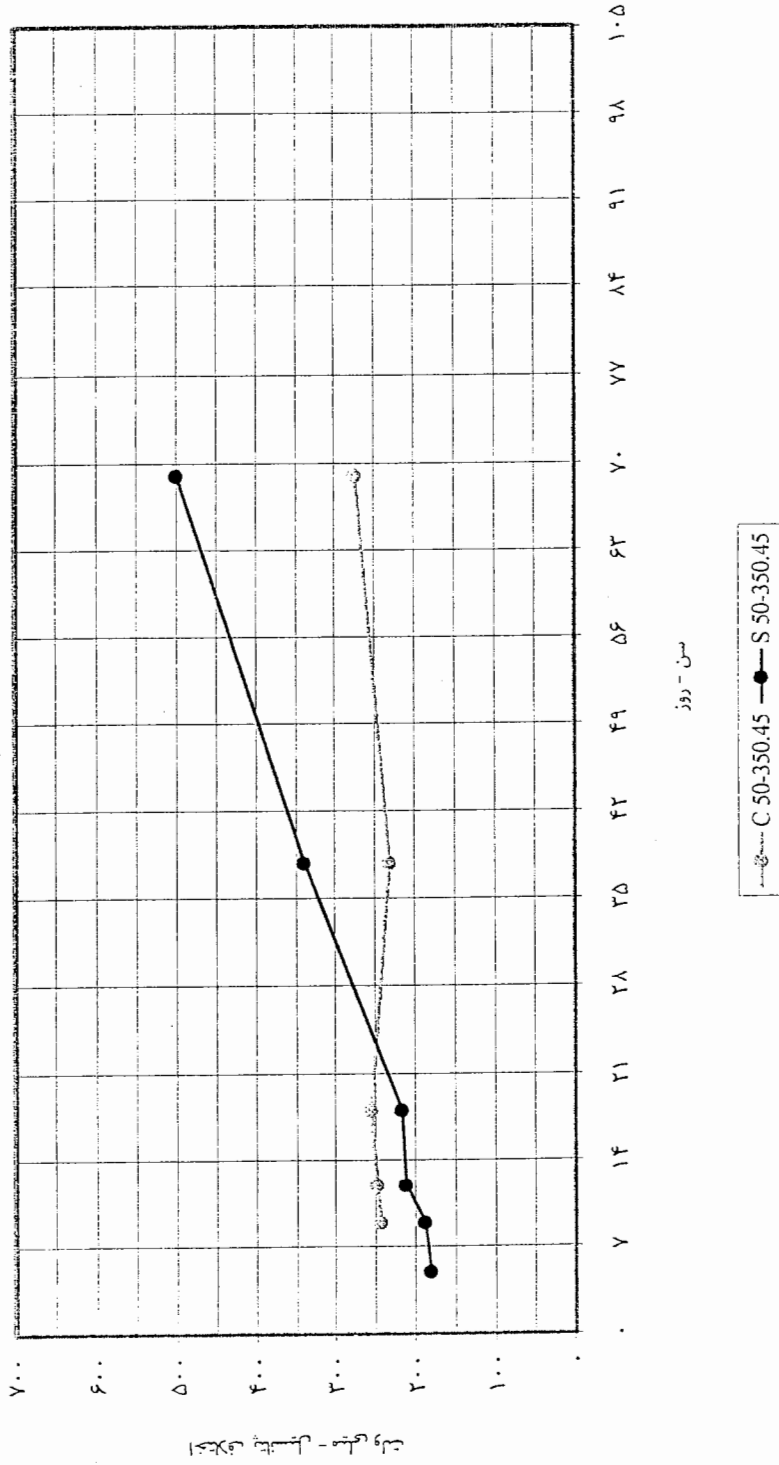
می شود و بتن نفوذناپذیرتر می گردد. به همین دلیل مقاومت بتن در برابر نفوذ عوامل خوردنده میلگرد بیشتر شده و کاهش اختلاف پتانسیل به مرور زمان مشاهده می شود. به عبارت دیگر همزمان دو عامل متضاد با یکدیگر تأثیر می گذارند؛ هیدراسیون سیمان موجب کاهش اختلاف پتانسیل می شود و وجود شرایط مهاجم آب دریا و نفوذ تدریجی یون کلر باعث افزایش اختلاف پتانسیل می گردد. با شروع خوردگی و فعال شدن میلگرد، تأثیر نسبی هیدراسیون سیمان ناچیز می شود و عملاً میزان افزایش اختلاف پتانسیل بیشتر از میزان کاهش آن خواهد بود.

با فعال شدن میلگرد و شروع خوردگی آن می توان به قرائت اختلاف پتانسیل ها پایان داد و این زمان را به عنوان «سن شروع خوردگی میلگرد» اعلام نمود؛ اما قرائت اختلاف پتانسیل آزمونه ها تا زمان های طولانی تر - در حدی که زمان تحقیق اجازه می داد - ادامه پیدا کرد و توجه به این جواب ها نیز اطلاعات مفیدی را در اختیار قرار می دهد. نمودارهای مربوط به ۲۴ طرح اختلاطی که در این تحقیق ساخته شده است در شکل های ۴-۱ تا ۴-۲۴ مشاهده می شود. سن شروع خوردگی میلگردها زمانی است که اختلاف پتانسیل بیشتر از حد ۲۷۶ میلی ولت شود. این سن نیز تعیین شده است که در جدول ۴-۹ ملاحظه می شود. لازم به ذکر است از ۲۴ حالت موجود تنها در ۲ مورد (در طرح اختلاط های M 50-350.40 و M 50-350.50)، سن شروع خوردگی نمونه بخار دیده بیشتر از نمونه کنترلی است.

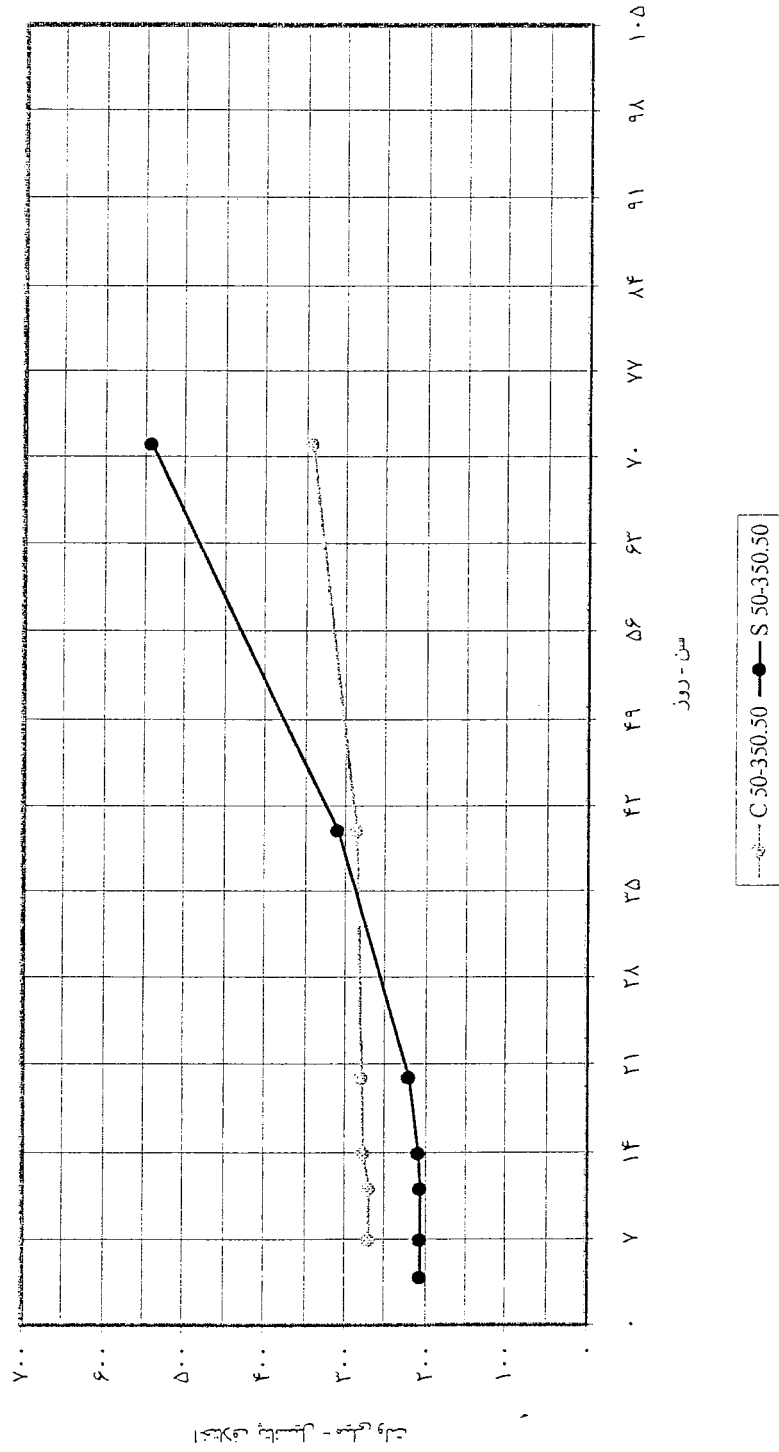
شکل ۴-۱ - نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 50-350.40



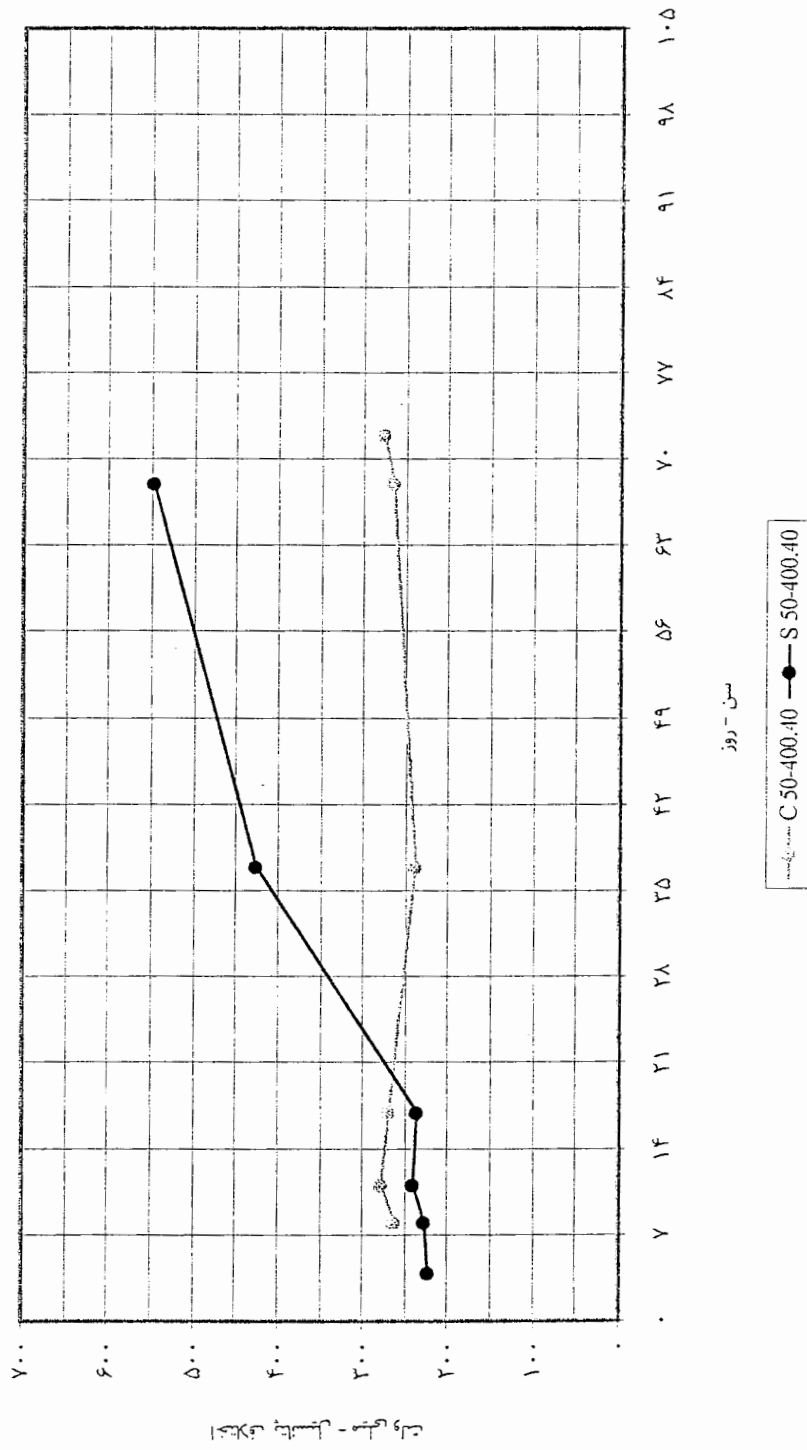
شکل ۴-۲- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 50-350.45



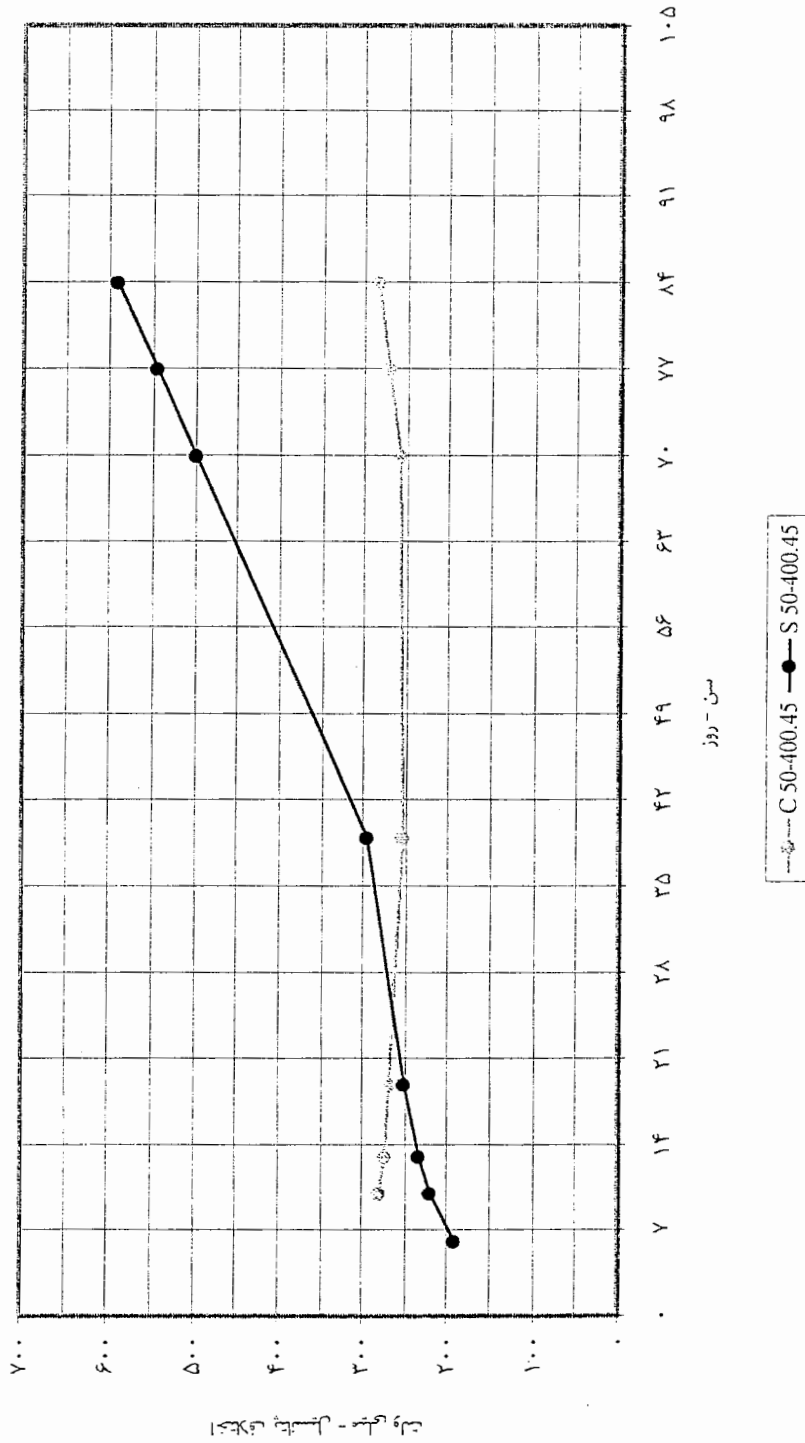
شکل ۳-۴- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 50-350.50



شکل ۴-۴- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 50-400.40

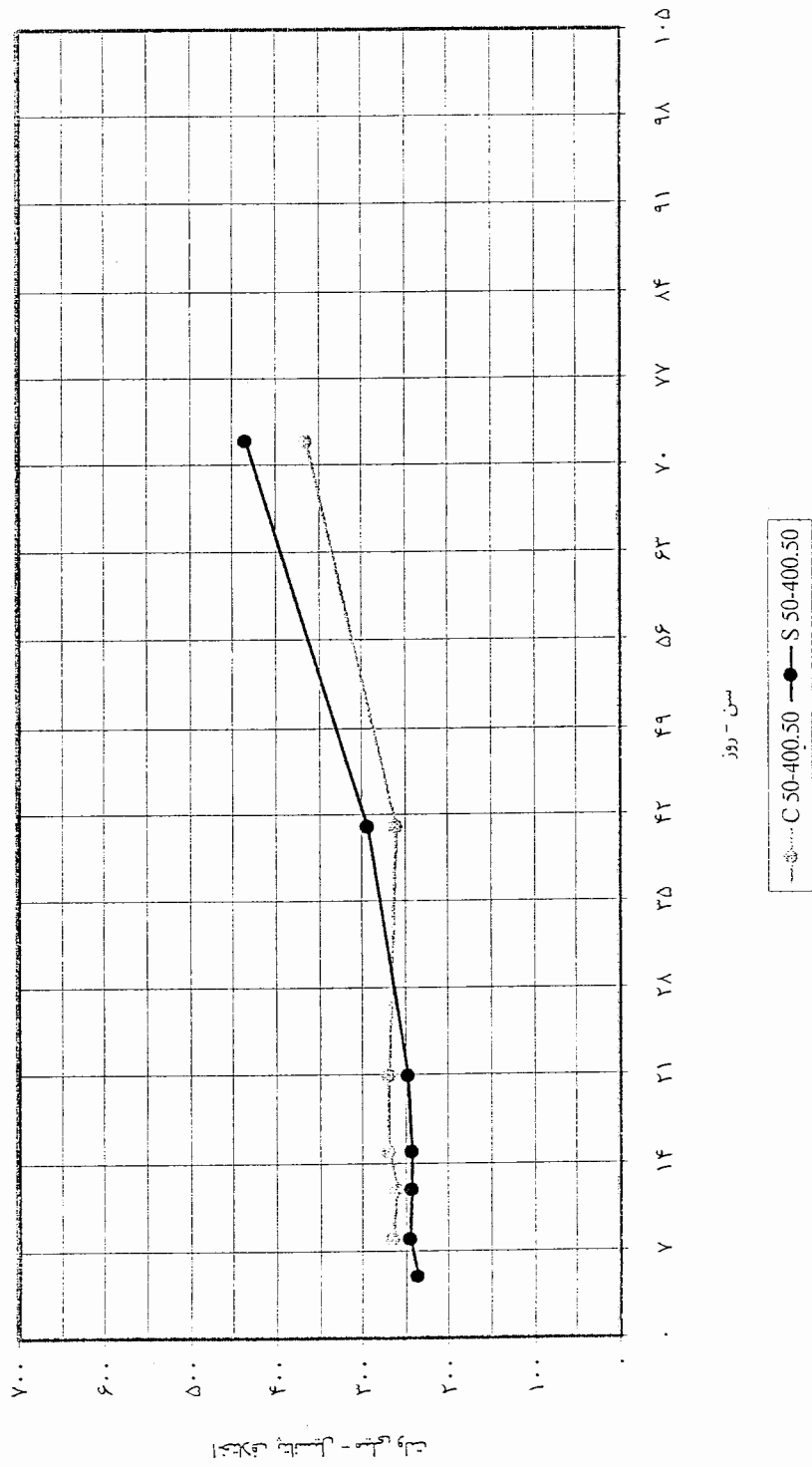


شکل ۴-۵- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 50-400.45

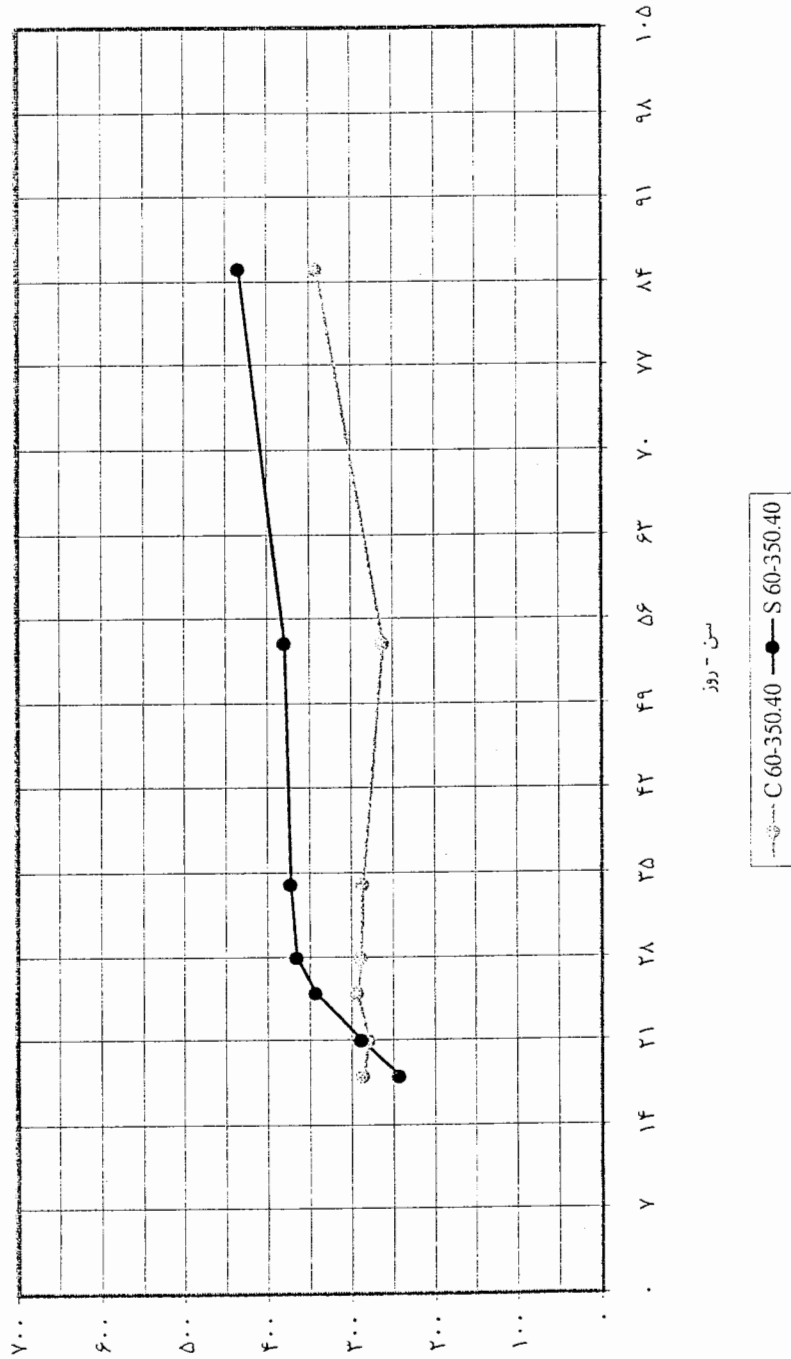




شکل ۴-۶- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 50-400.50

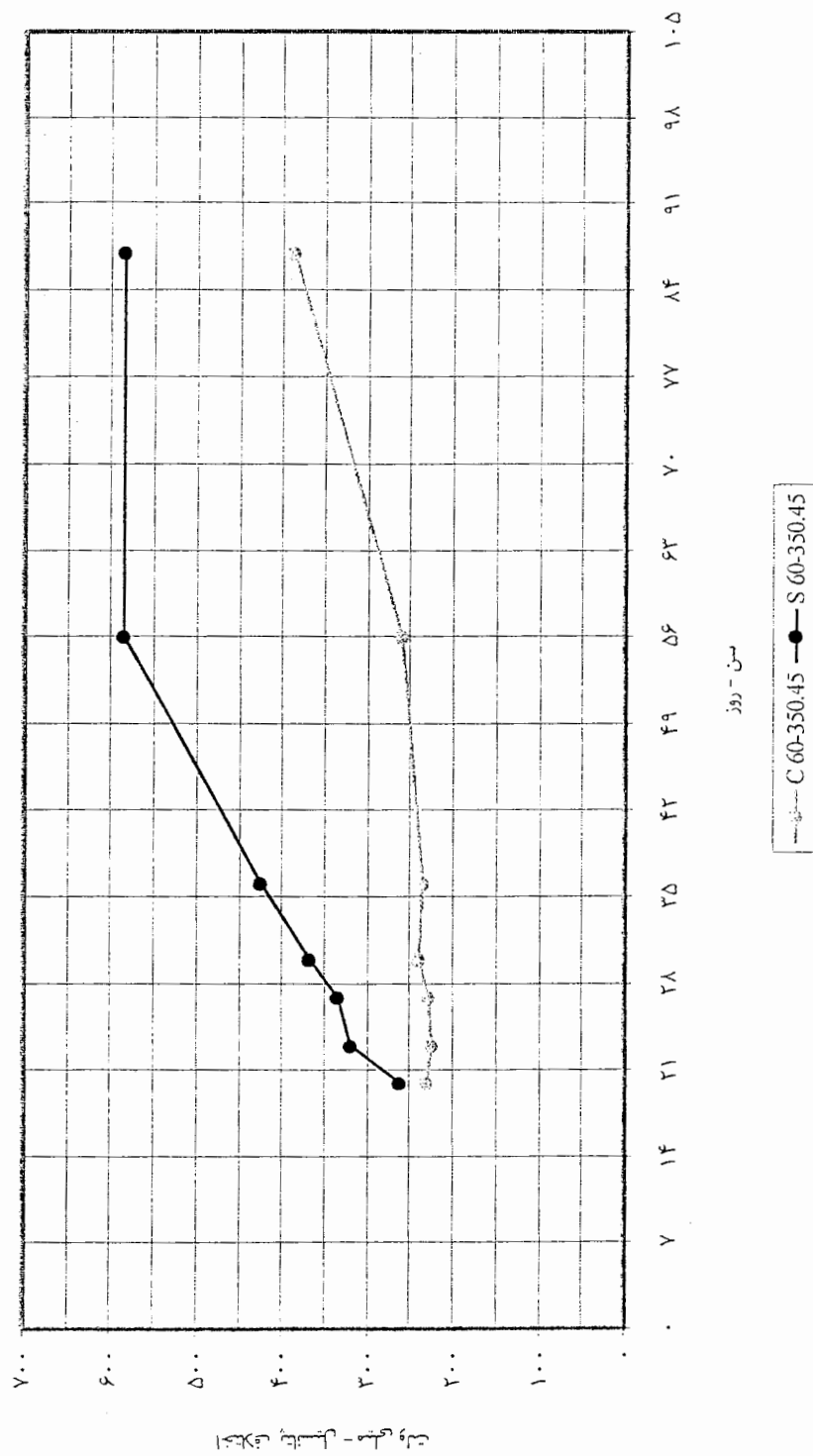


شکل ۴-۷- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 60-350.40

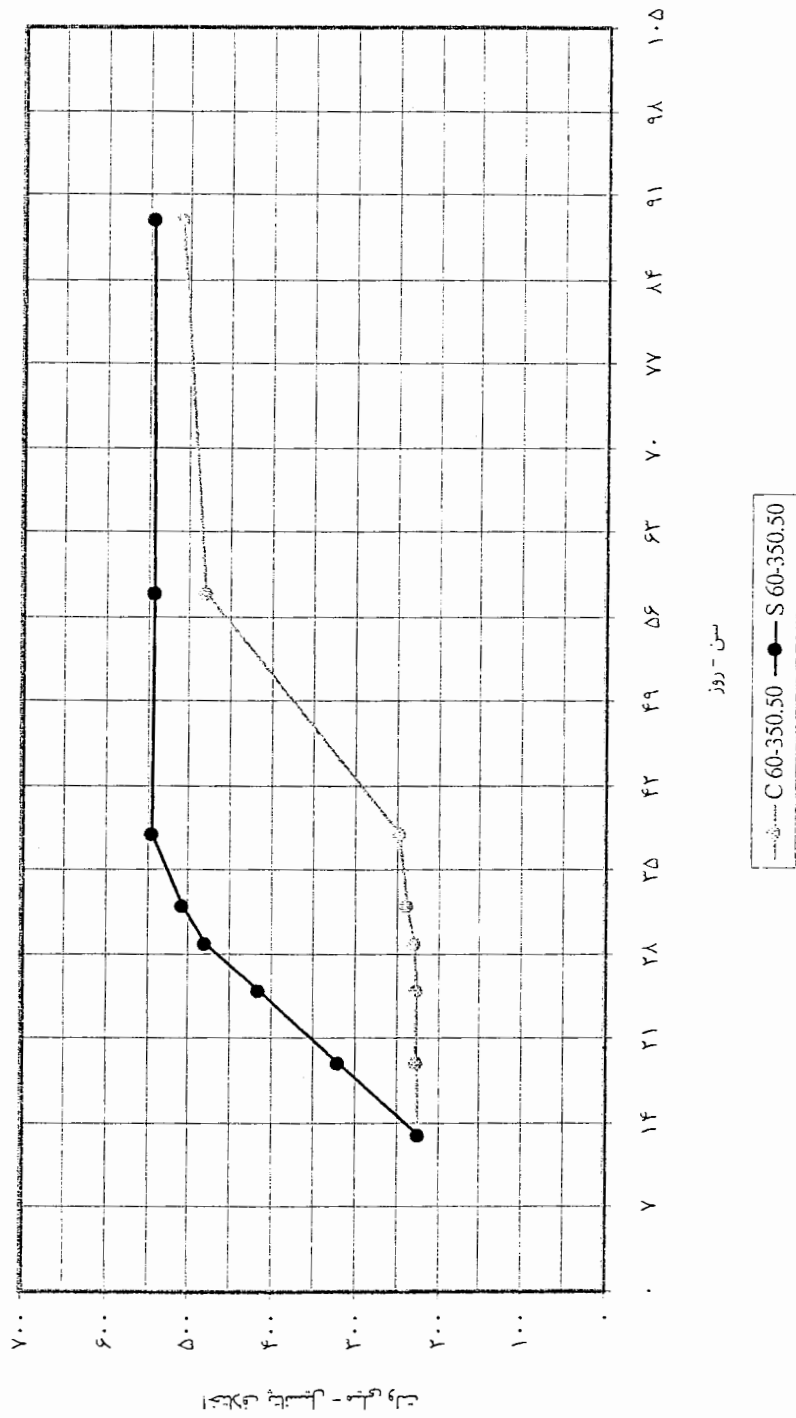


اختلاف پتانسیل - میلی ولت

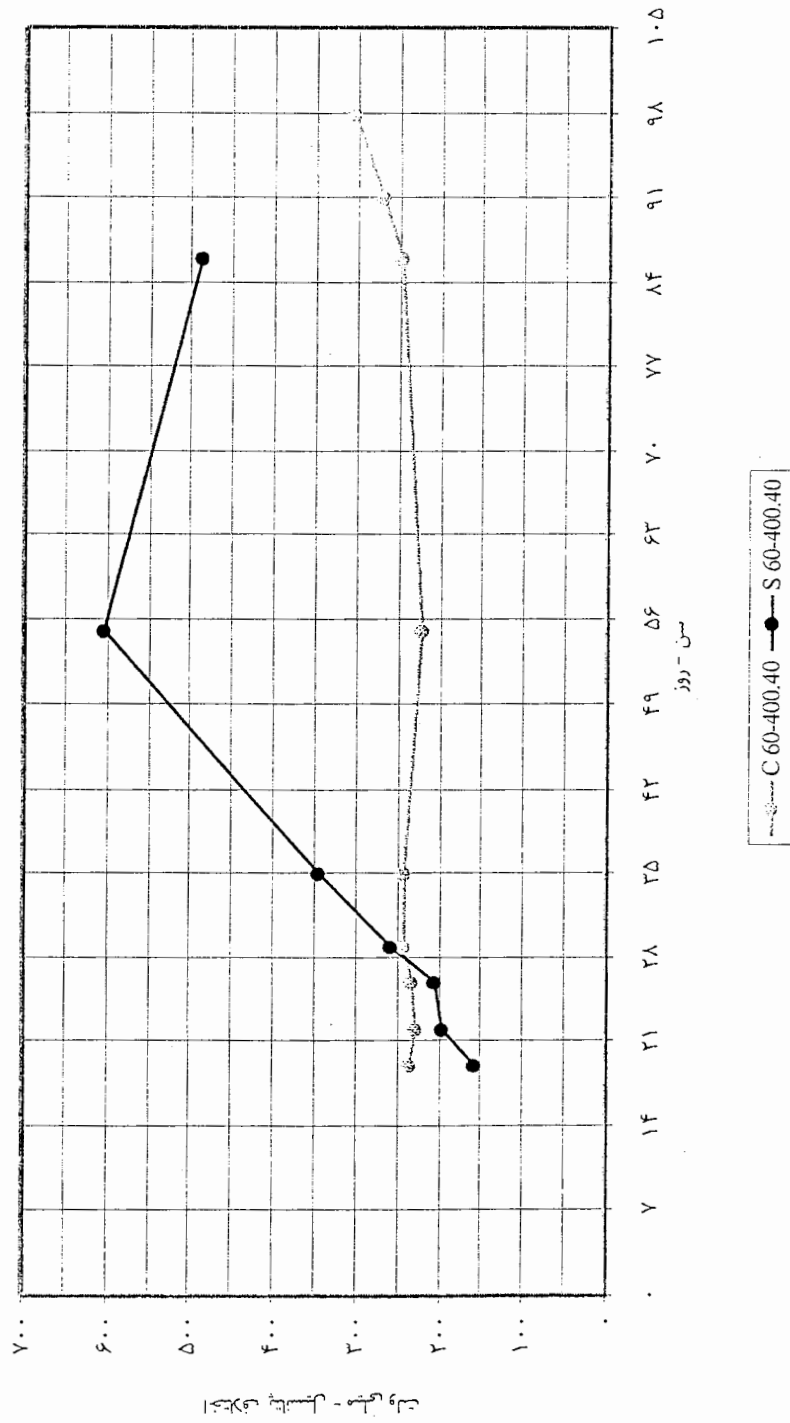
شکل ۴-۸- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 60-350.45



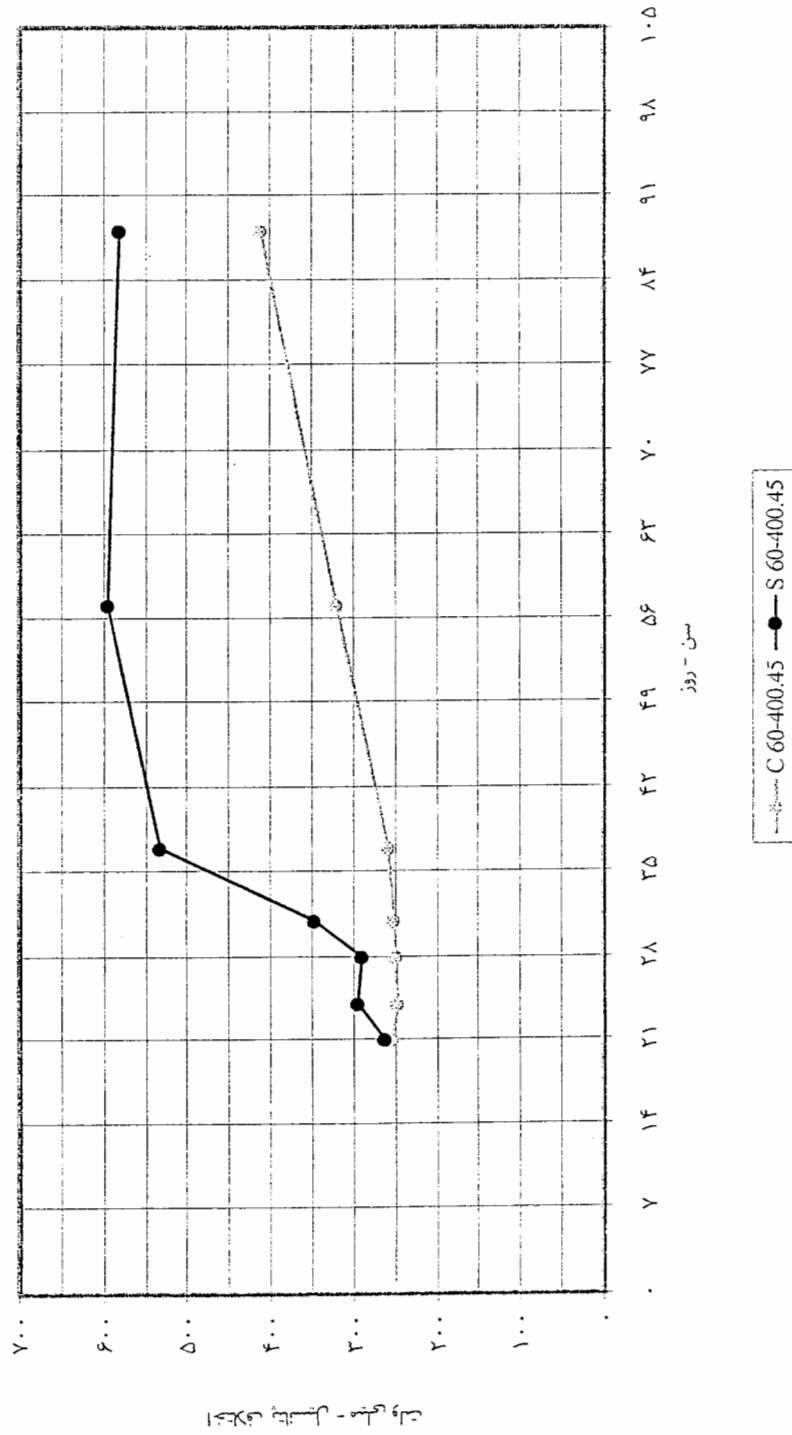
شکل ۴-۹- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 60-350.50



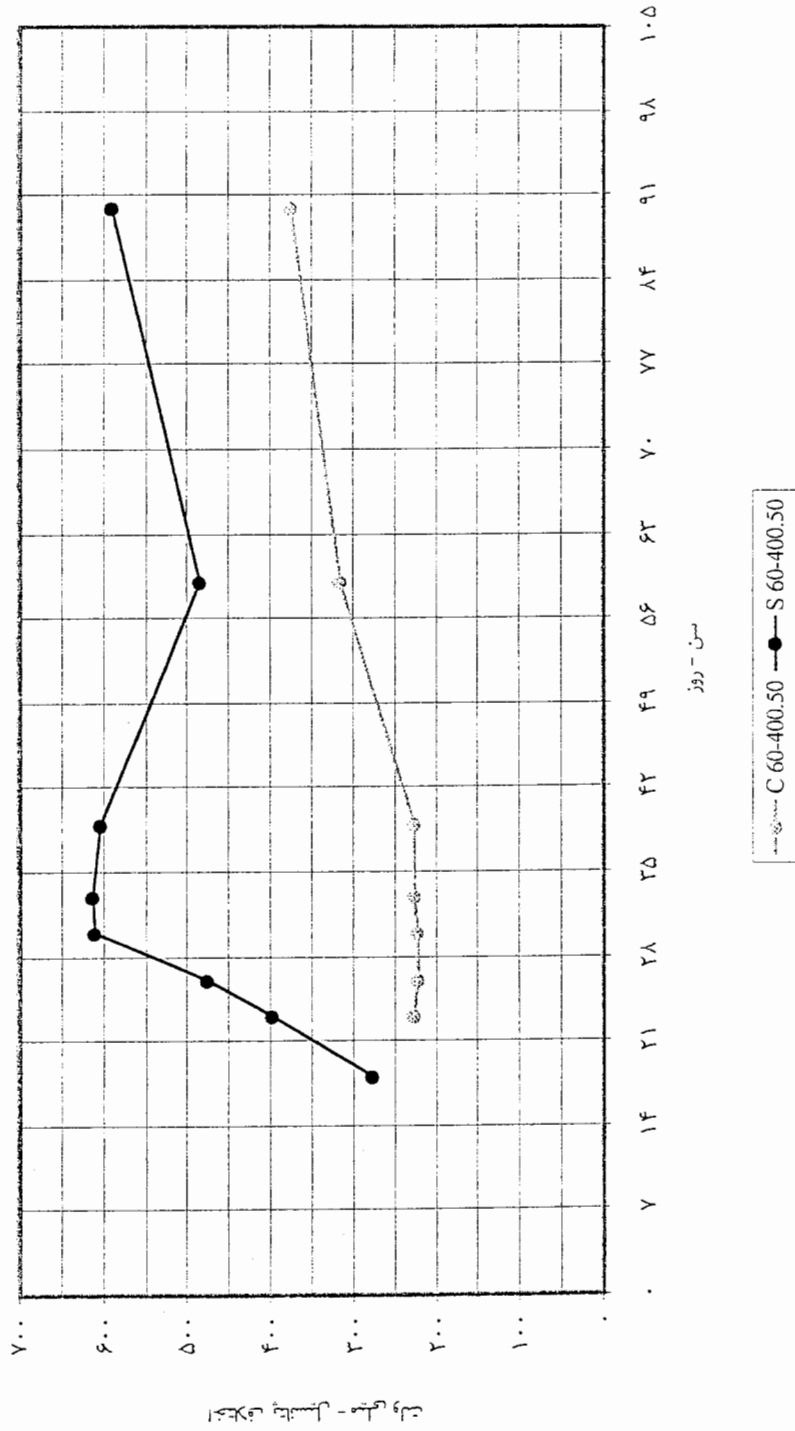
شکل ۱-۴-۱- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 60-400.40



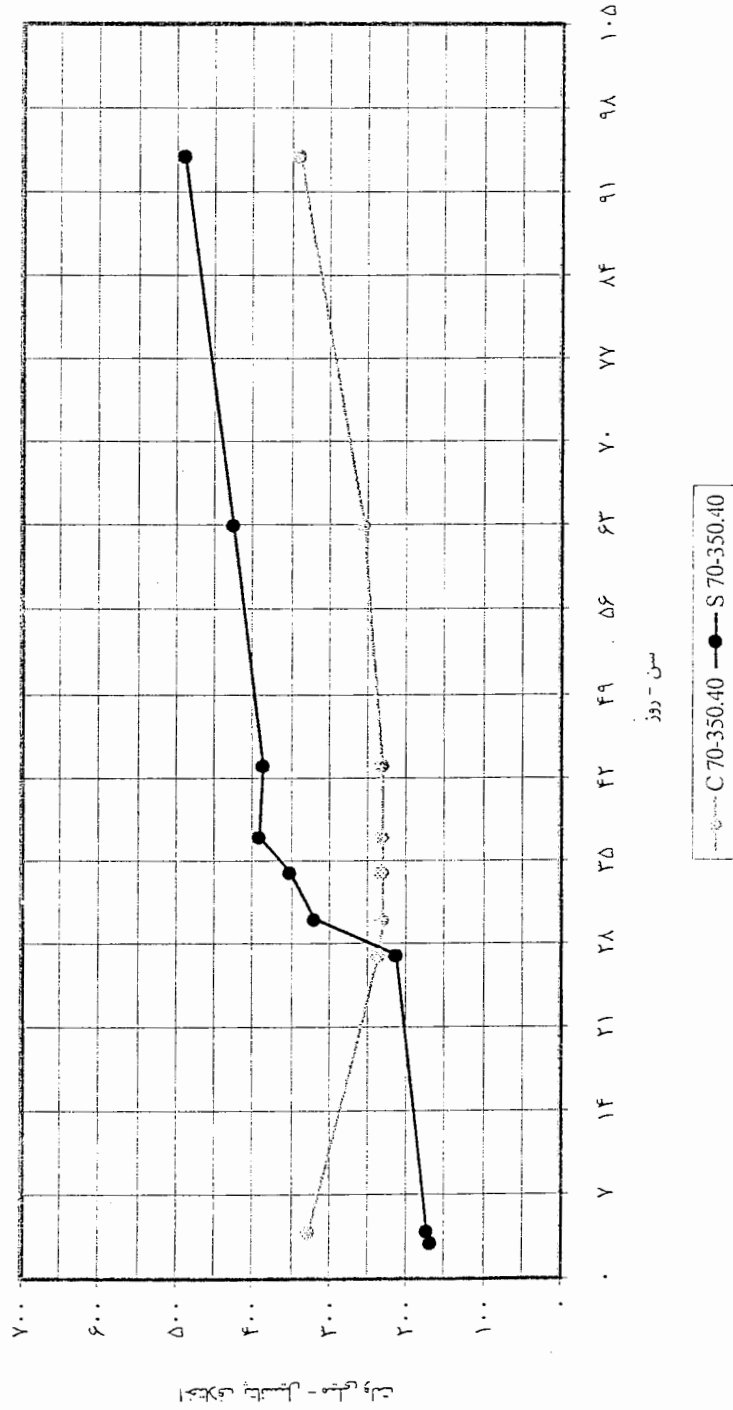
شکل ۱-۴- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 60-400.45



شکل ۱۲-۴ - نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 60-400.50

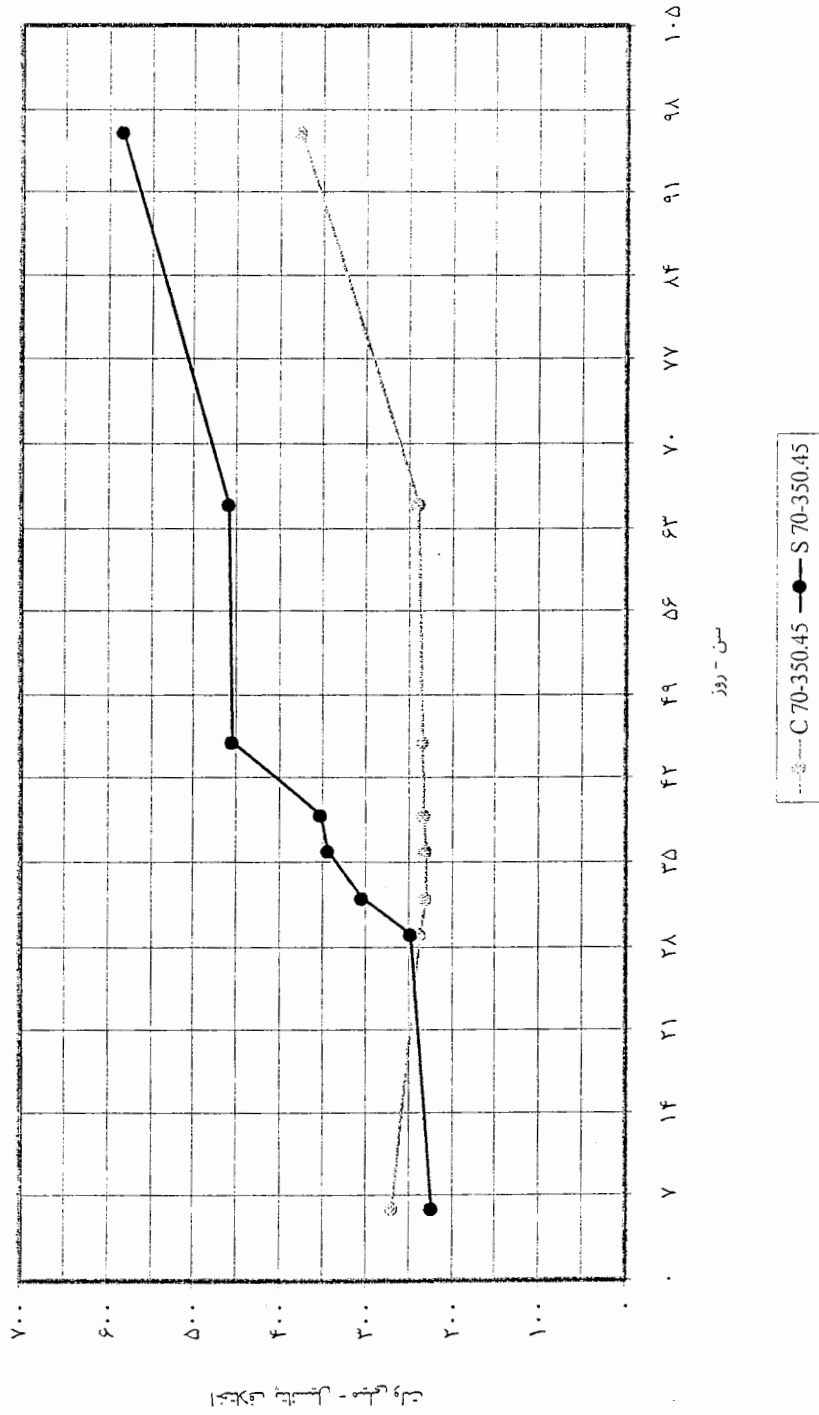


شکل ۱۳-۴ - نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 70-350.40

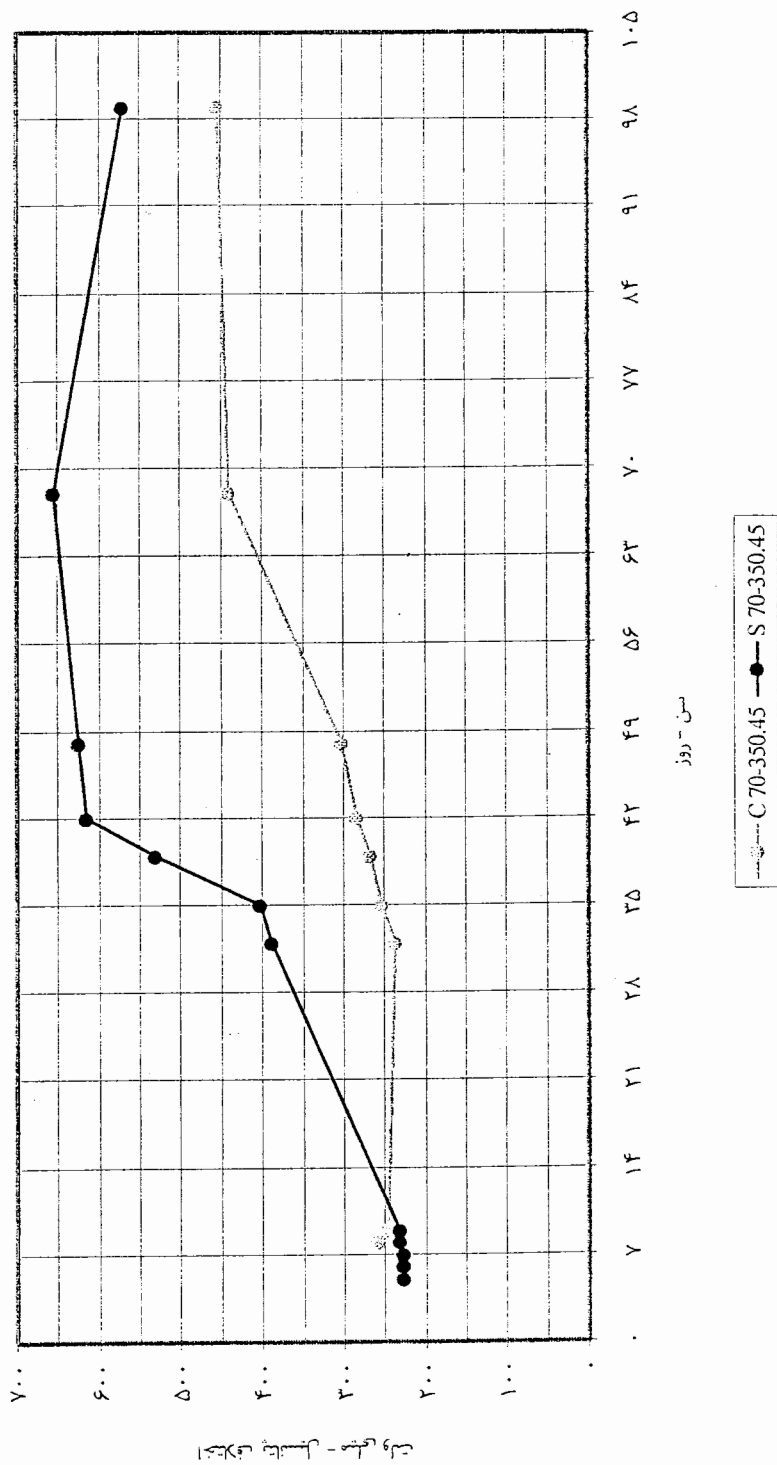




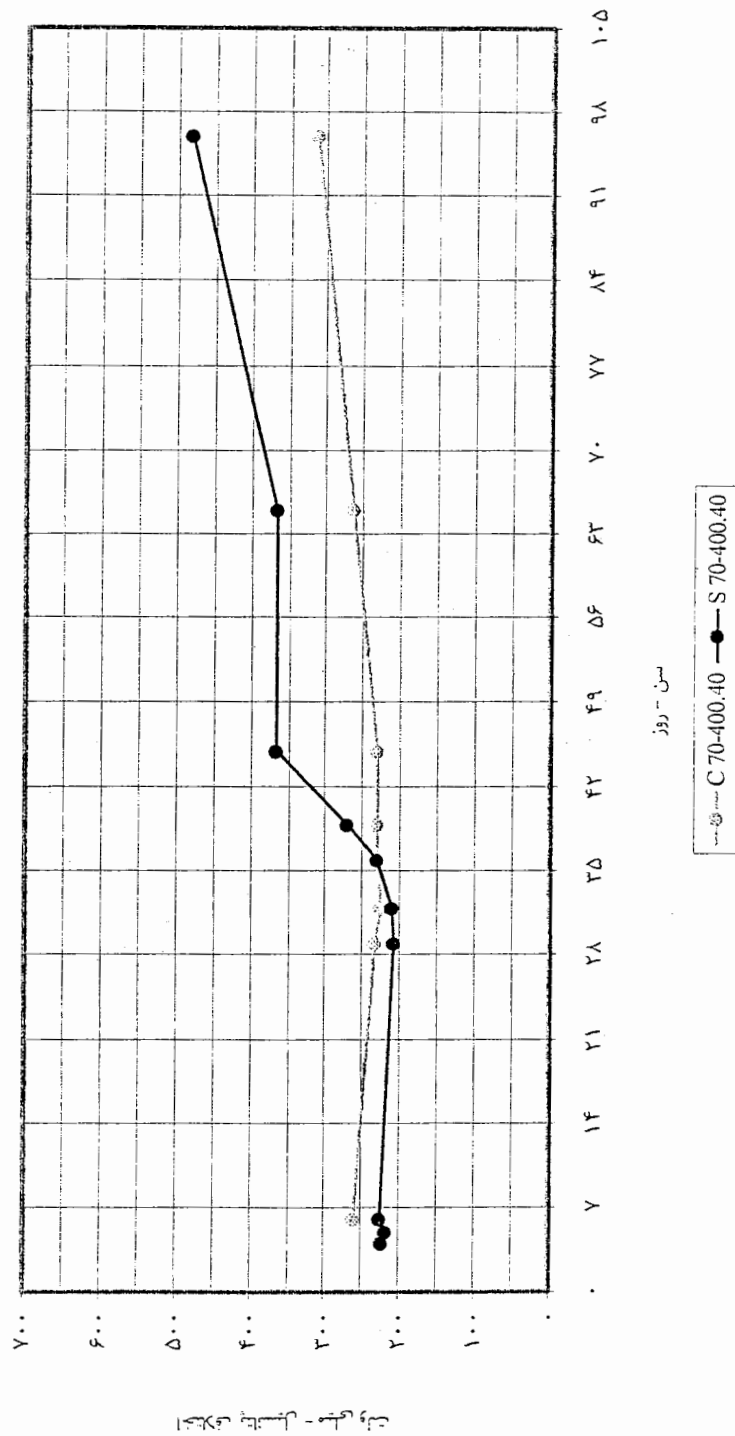
شکل ۱۴-۴ - نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 70-350.45



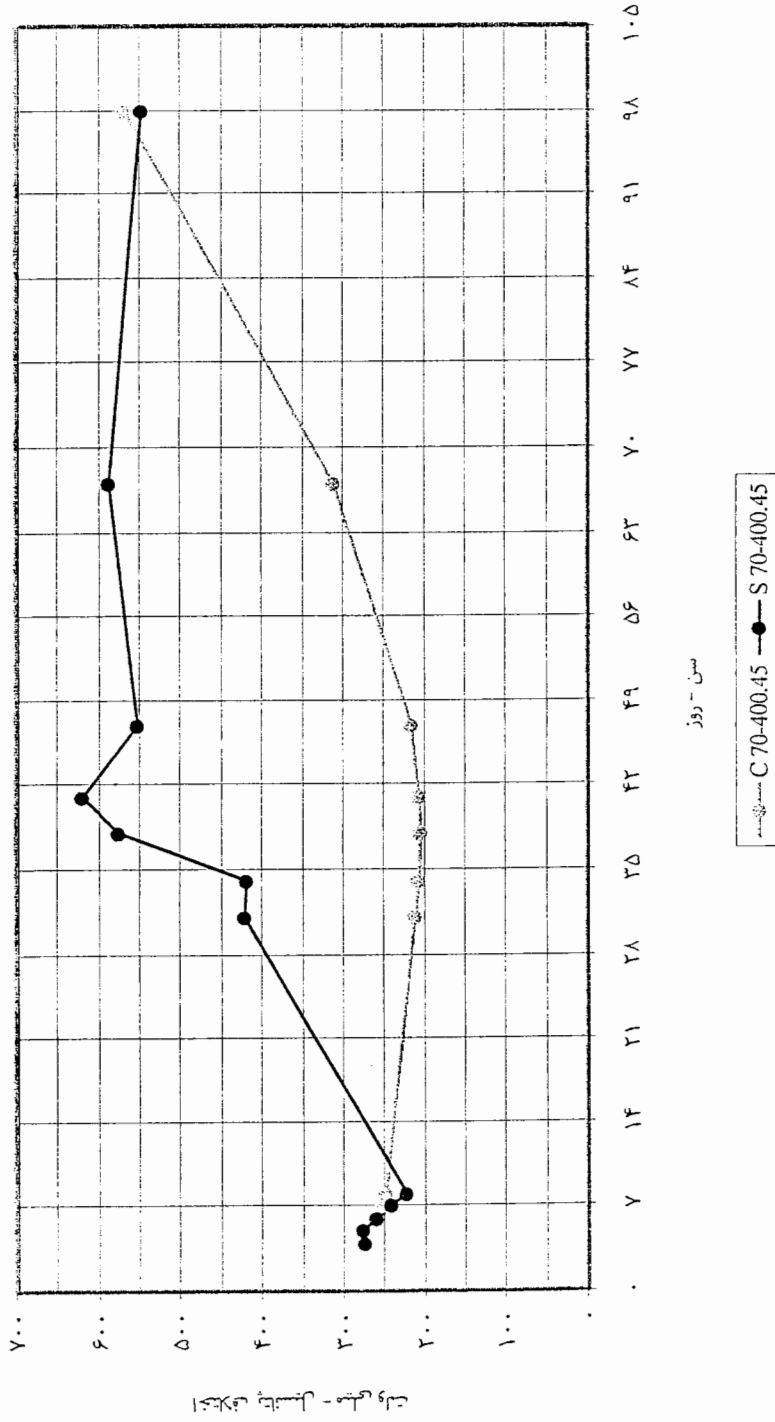
شکل ۱۵-۴ - نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 70-350.50



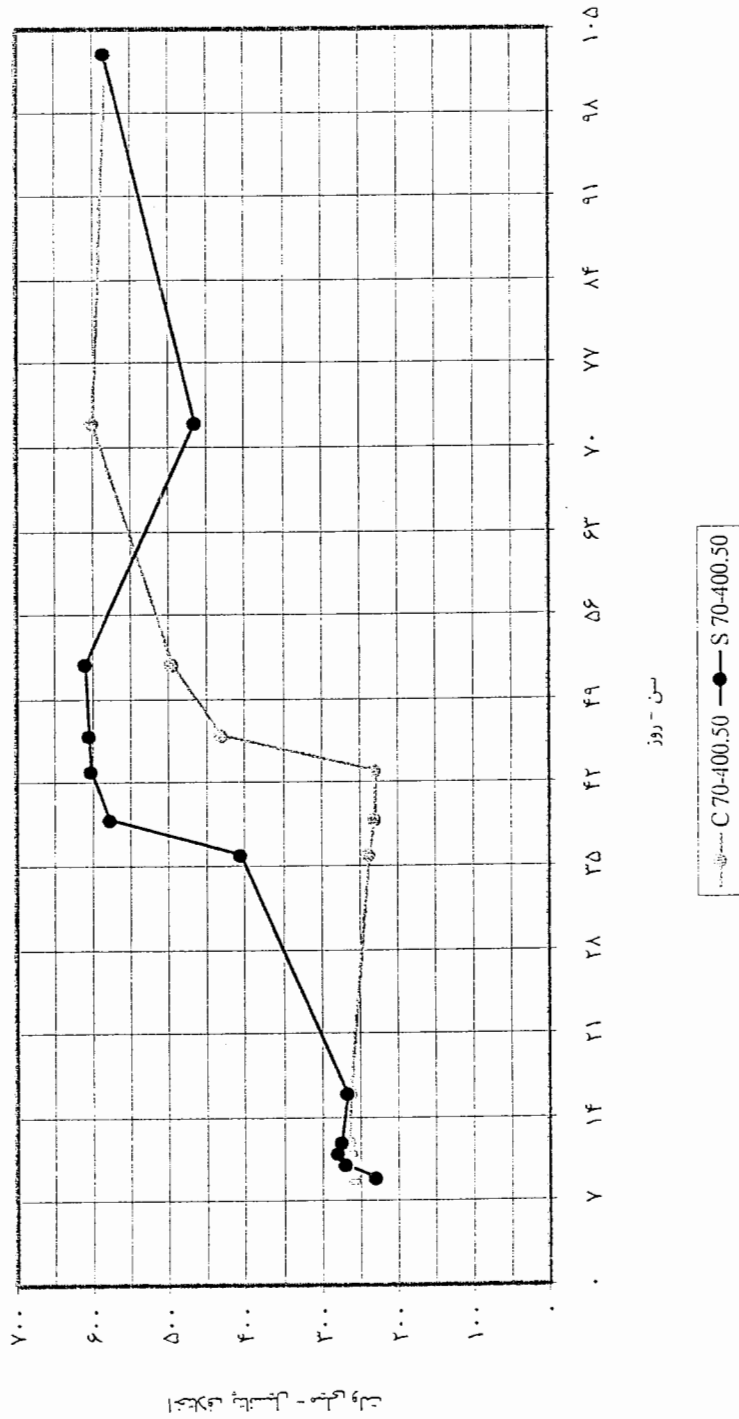
شکل ۱۶-۴ - نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 70-400.40



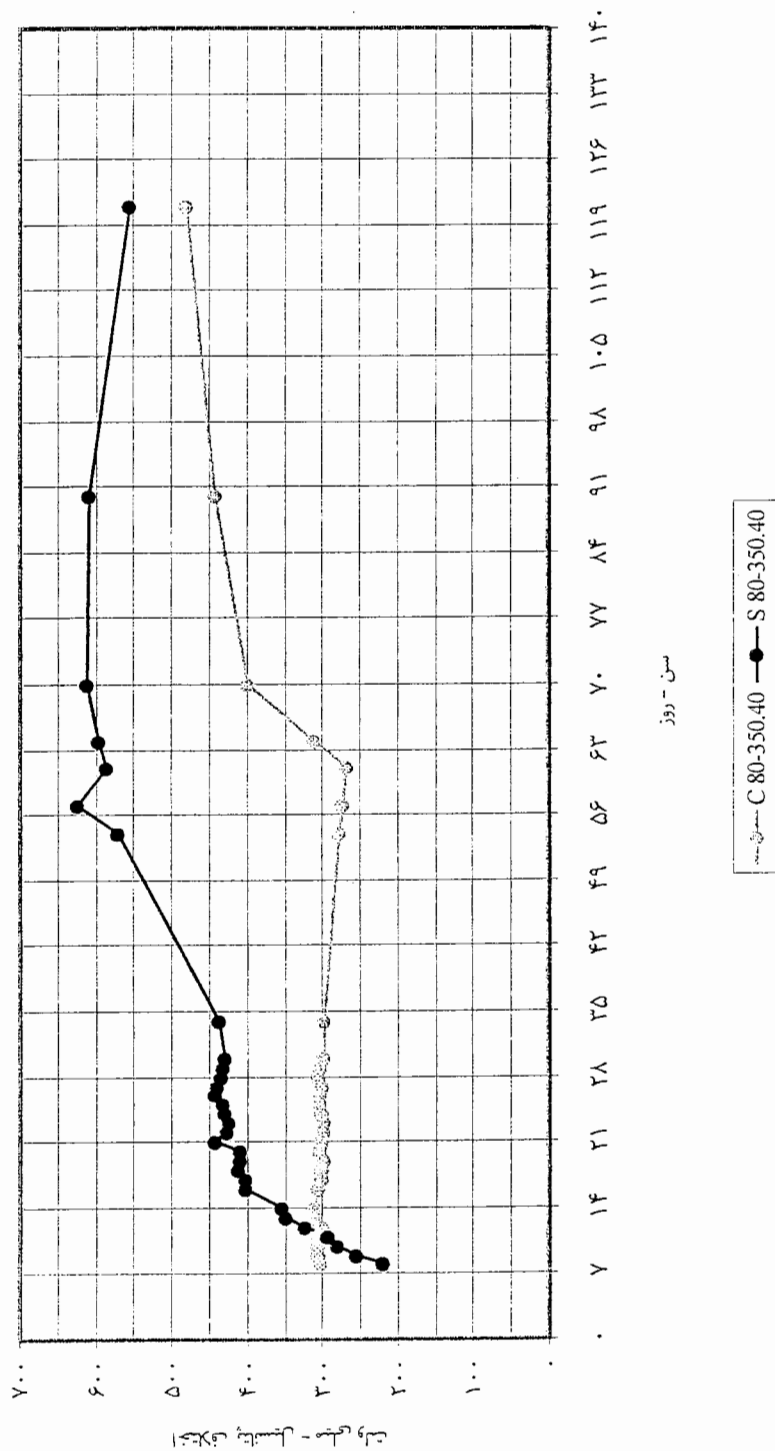
شکل ۴-۱۷- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 70-400.45



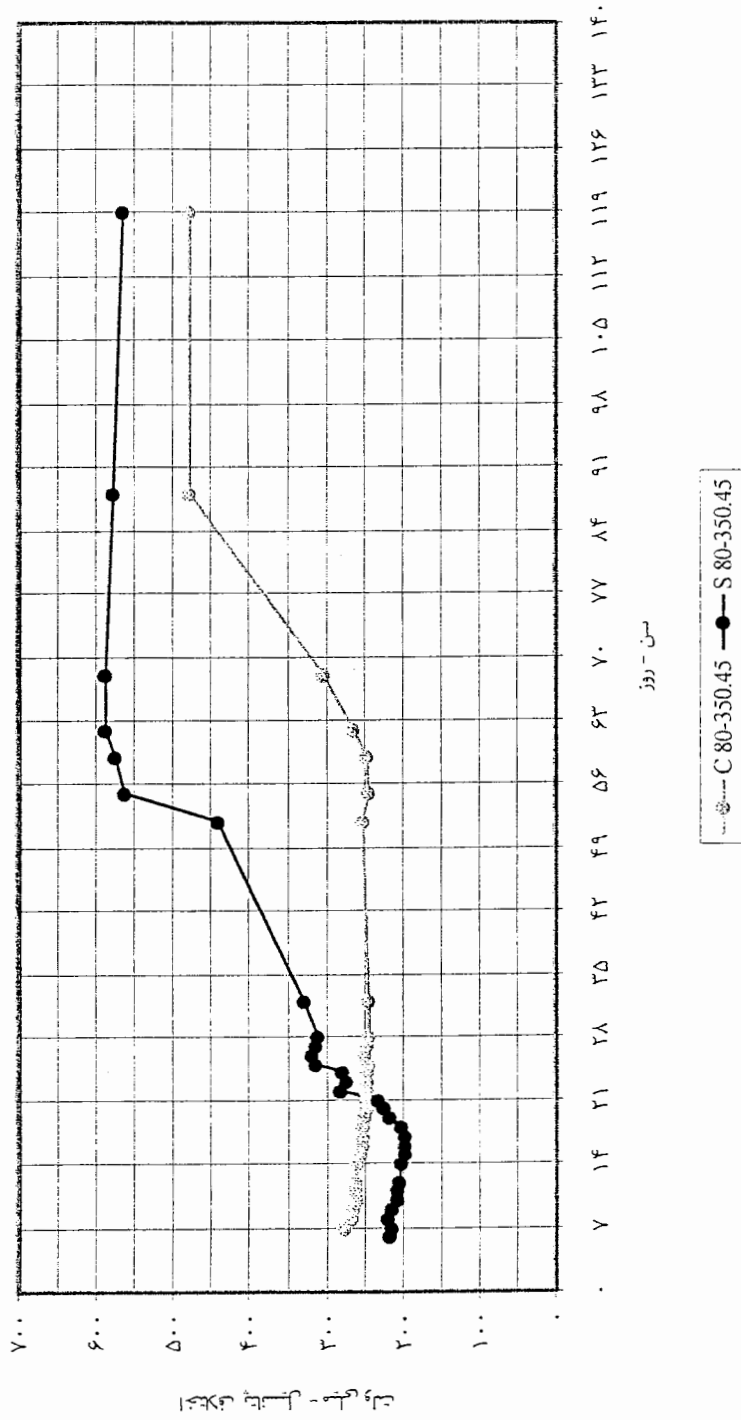
شکل ۱۸-۴ - نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 70-400.50



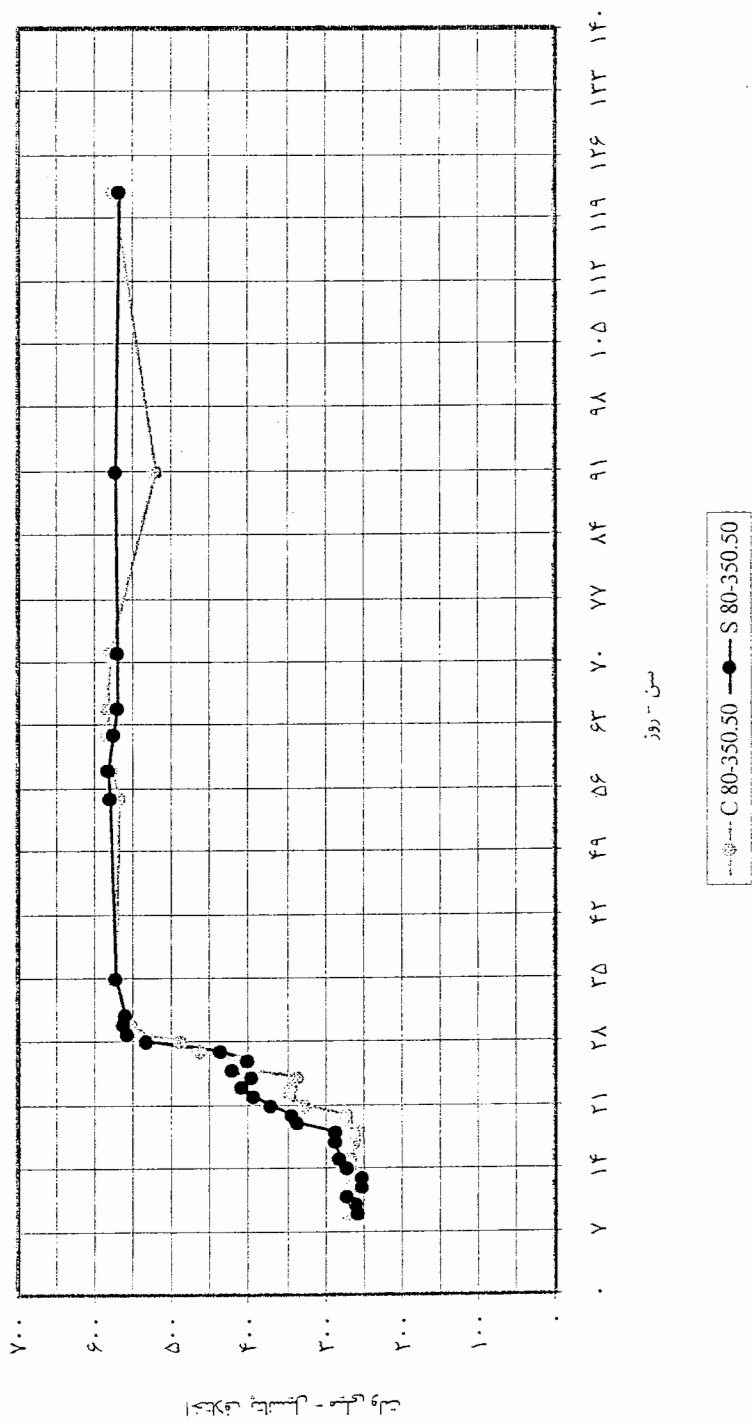
شکل ۴-۱۹ - نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 80-350.40



شکل ۲-۴-۲۰ - نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 80-350.45

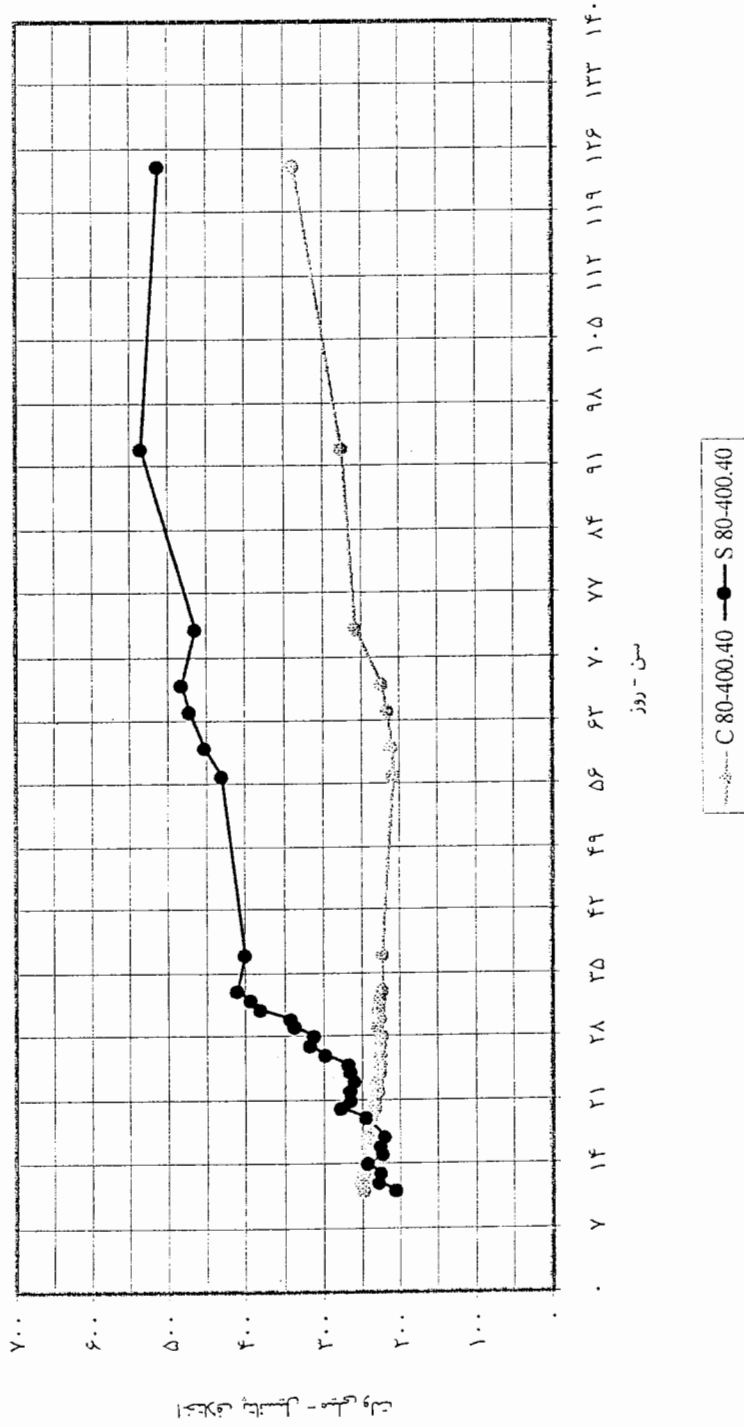


شکل ۴-۲۱- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 80-350.50

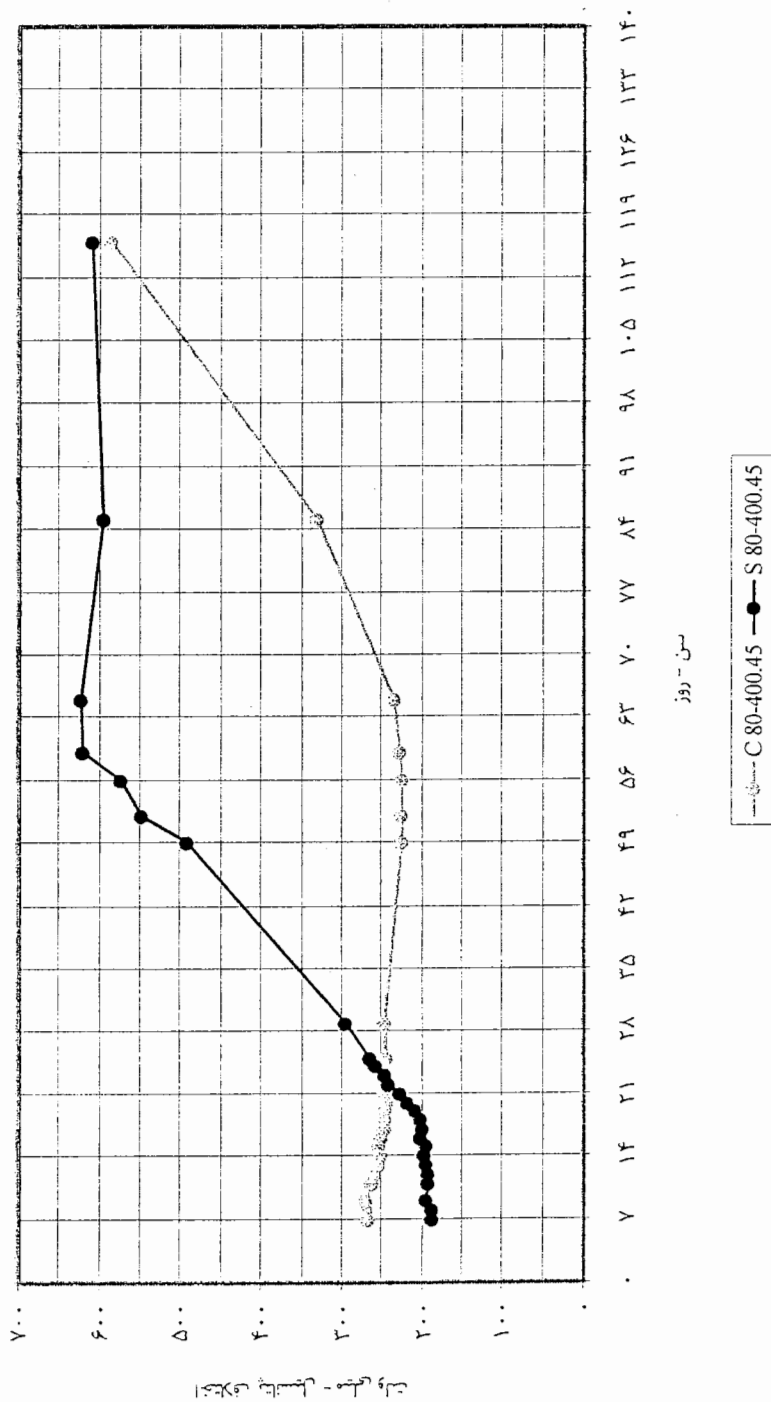




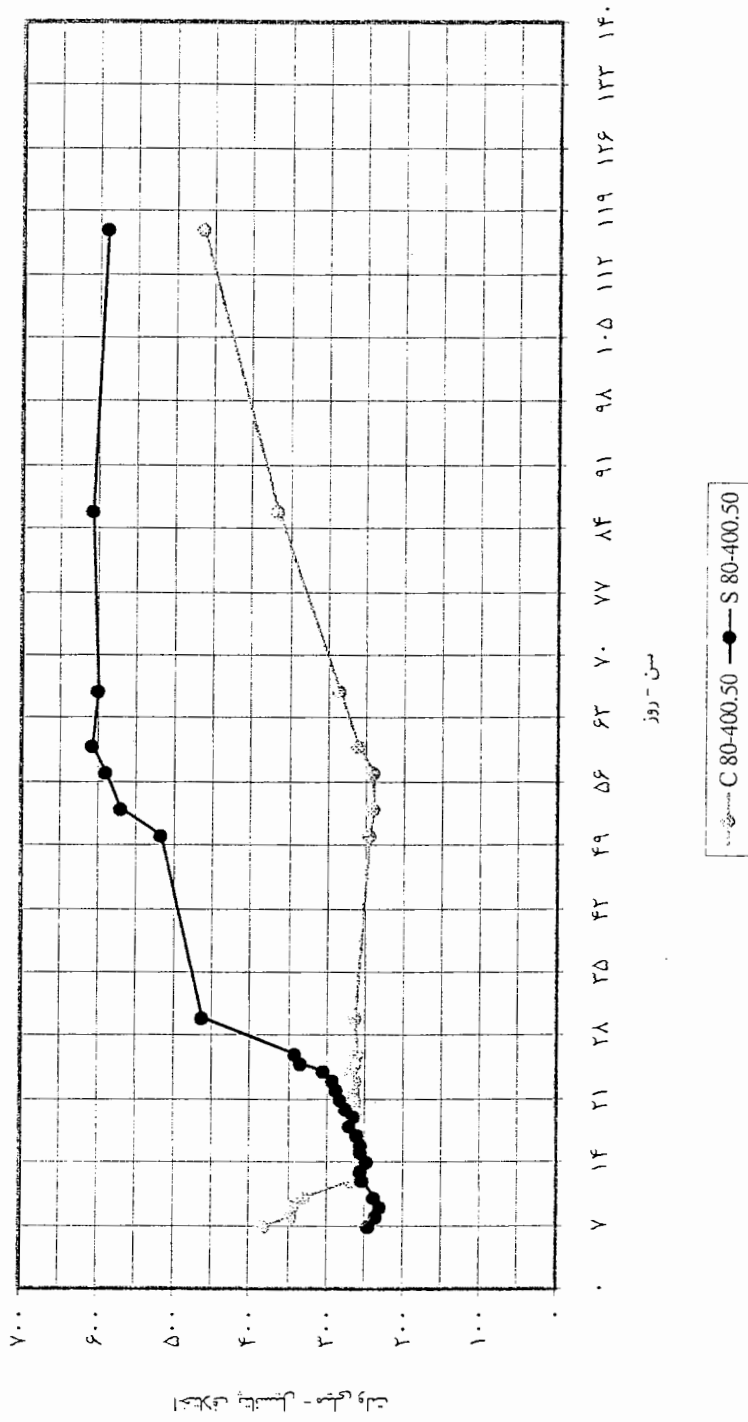
شکل ۴-۲۲- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 80-400.40



شکل ۲۳-۴- نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 80-400.45



شکل ۴-۲ - نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی در طرح اختلاط M 80-400.50



جدول ۴-۹- سن شروع خوردگی میلگرد در بتن های عمل آوری شده با بخار در آزمایش پتانسیل خوردگی

نام طرح اختلاط	دمای بخار ° C	عیار سیمان Kg/m <sup>3</sup>	نسبت آب به سیمان	نمونه کنترلی	نمونه بخار دیده
M 50-350.40	۵۰	۳۵۰	۰/۴۰	۳۹	۵۳
M 50-350.45			۰/۴۵	۶۹	۲۷
M 50-350.50			۰/۵۰	۱۴	۳۳
M 50-400.40		۴۰۰	۰/۴۰	۷۲	۲۱
M 50-400.45			۰/۴۵	۷۹	۴۵
M 50-400.50			۰/۵۰	۵۸	۳۲
M 60-350.40	۶۰	۳۵۰	۰/۴۰	۶۰	۲۰
M 60-350.45			۰/۴۵	۶۰	۲۱
M 60-350.50			۰/۵۰	۴۰	۱۶
M 60-400.40		۴۰۰	۰/۴۰	۹۲	۳۰
M 60-400.45			۰/۴۵	۴۲	۲۲
M 60-400.50			۰/۵۰	۵۰	۱۸
M 70-350.40	۷۰	۳۵۰	۰/۴۰	۷۰	۲۹
M 70-350.45			۰/۴۵	۷۳	۳۱
M 70-350.50			۰/۵۰	۴۰	۱۵
M 70-400.40		۴۰۰	۰/۴۰	۷۲	۴۰
M 70-400.45			۰/۴۵	۶۰	۱۴
M 70-400.50			۰/۵۰	۴۴	۱۷
M 80-350.40	۸۰	۳۵۰	۰/۴۰	۶۱	۱۰
M 80-350.45			۰/۴۵	۶۴	۲۳
M 80-350.50			۰/۵۰	۲۰	۱۵
M 80-400.40		۴۰۰	۰/۴۰	۹۴	۲۵
M 80-400.45			۰/۴۵	۷۴	۲۶
M 80-400.50			۰/۵۰	۶۴	۲۱

## ۴-۵ - نتایج آزمایش مقاومت فشاری

کسب سریع‌تر مقاومت فشاری در بتن، اساسی‌ترین و مهم‌ترین هدفی است که در عمل‌آوری بتن با بخار مورد نظر می‌باشد. به عبارت دیگر صرف‌نظر از اثرات منفی بخاردهی بر دوام بتن، عمده‌مزیتی که در این روش مورد توجه می‌باشد، آن است که به وسیله بخاردهی بتن در روند کسب مقاومت کوتاه‌مدت آن تسریع ایجاد کرده باشیم. بررسی افزایش مقاومت فشاری کوتاه‌مدت بتن یکی از اهداف این تحقیق به شمار می‌رود. تأثیر عمل‌آوری به‌وسیله بخار در دراز مدت نیز اهمیت خاصی دارد. لذا در این تحقیق کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن در اثر بخاردهی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به جهت محدودیت زمان تحقیق، امکان بررسی مقاومت فشاری درازمدت بتن (در حد ۳ ماه و بالاتر) فراهم نشد. مقاومت فشاری بتن عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد آزمایشگاهی که دارای بلوغ معادل نمونه بخاردهیده است نیز مورد بررسی قرار گرفته است. مدت زمان عمل‌آوری در دو حالت ۹ ساعت و ۱۸ ساعت در نظر گرفته شده است. بنابراین برای دوره عمل‌آوری با بخار به مدت ۹ ساعت مجموعاً ۴ مقاومت مطرح است:

- ۱- مقاومت فشاری نمونه بخاردهیده پس از ۹ ساعت بخاردهی
  - ۲- مقاومت فشاری نمونه کنترلی که هم سن با نمونه بخاردهیده شکسته می‌شود.
  - ۳- مقاومت فشاری نمونه کنترلی که دارای بلوغ معادل با بلوغ نمونه بخاردهیده است.
  - ۴- مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ای که ۹ ساعت بخاردهی شده است.
- همین روال برای دوره عمل‌آوری ۱۸ ساعته نیز مطرح است. به علاوه مقاومت فشاری بتنی که در شرایط استاندارد آزمایشگاهی به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شده و هیچ‌گونه بخاری به آن داده نشده باشد، نیز تعیین شده است. لذا پس از ساخت و آزمایش هر طرح اختلاط، ۹ پارامتر مقاومت فشاری بدست آمده و باید مورد بررسی قرار گیرند. با توجه به آنکه قبل از شروع بخاردهی ۴ ساعت زمان تأخیر لحاظ شده است، سن نمونه‌های بخاردهی شده به مدت ۹ ساعت و ۱۸ ساعت به ترتیب ۱۳ ساعته و ۲۲ ساعته می‌باشد. نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری که برای ۲۴ طرح

اختلاط انجام شده است به طور خلاصه در جدول ۴-۱۰ ذکر شده است. هر یک از این اعداد میانگین مقاومت فشاری سه آزمون می باشد که توسط جک بتن شکن تعیین شده است. در برخی از موارد به ویژه در طرح هایی که روان کننده بیشتری استفاده شده است حبابزایی بیشتر از حد انتظار مشاهده شد و این عامل ضمن کاهش مقاومت فشاری از حدود مورد انتظار از میزان دقت و یکسانی نتایج بتن های مشابه نیز کاست. در هر صورت مجموع نتایج مقاومت فشاری که در آزمایشگاه به دست آمد در جدول ذکر شده است.

جدول ۴-۱۰- نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن

نام طرح اختلاط	پس از ۹ ساعت بخاردهی			پس از ۱۸ ساعت بخاردهی			۲۸ روزه		
	نمونه بخار دیده	نمونه کنترلی ۱۳ ساعته	نمونه کنترلی معادل	نمونه بخار دیده	نمونه کنترلی ۲۲ ساعته	نمونه کنترلی معادل	۹ ساعت بخاردهی	۱۸ ساعت بخاردهی	استاندارد آزمایشگاهی
M 50-350.40	۱۴۹	۴۲	۱۵۱	۲۵۲	۱۵۸	۱۹۶	۳۲۳	۳۶۳	۳۷۹
M 50-350.45	۲۰۹	۷۹	۱۹۱	۲۷۳	۱۸۶	۲۳۴	۳۹۰	۲۹۸	۴۲۱
M 50-350.50	۱۶۵	۱۰۴	۱۷۴	۲۳۶	۱۴۳	۲۱۷	۳۴۶	۳۲۲	۳۷۶
M 50-400.40	۱۷۵	۸۷	۱۶۳	۲۲۹	۱۶۸	۲۲۳	۳۳۸	۳۶۶	۳۸۹
M 50-400.45	۱۱۹	۶۹	۱۴۲	۲۲۲	۱۵۷	۱۹۴	۲۸۶	۲۹۳	۲۹۳
M 50-400.50	۱۴۶	۷۴	۱۲۶	۱۹۹	۱۵۴	۱۹۶	۲۸۹	۳۲۵	۳۵۴
M 60-350.40	۲۱۲	۱۳۲	۲۳۴	۳۱۰	۲۳۴	۲۸۸	۴۱۱	۳۷۹	۴۵۷
M 60-350.45	۱۸۵	۸۷	۱۳۸	۱۸۸	۱۳۸	۱۸۶	۳۸۲	۳۵۹	۳۹۸
M 60-350.50	۱۵۵	۶۵	۱۲۹	۱۸۸	۱۲۹	۱۷۲	۲۹۹	۲۸۶	۳۰۶
M 60-400.40	۱۷۸	۸۷	۱۵۸	۲۴۶	۱۵۸	۲۳۰	۳۹۳	۳۵۶	۴۱۴
M 60-400.45	۱۴۵	۹۰	۱۴۹	۱۸۲	۱۴۹	۱۸۰	۳۴۴	۳۲۳	۳۹۸
M 60-400.50	۱۴۹	۶۹	۱۴۰	۱۹۲	۱۴۰	۱۸۸	۳۲۶	۳۱۶	۳۲۲
M 70-350.40	۱۷۲	۱۲۷	۱۷۰	۲۴۲	۱۶۸	۲۳۸	۳۸۲	۳۴۶	۴۲۷
M 70-350.45	۱۷۸	۱۱۶	۱۸۴	۱۹۹	۱۷۷	۲۵۷	۳۷۳	۳۹۲	۳۹۲
M 70-350.50	۱۵۵	۶۸	۱۴۲	۱۸۸	۱۲۹	۲۰۷	۲۹۳	۳۱۳	۲۹۸
M 70-400.40	۱۱۷	۷۸	۲۱۳	۱۴۶	۲۰۶	۲۴۸	۳۳۳	۳۳۲	۴۱۸
M 70-400.45	۱۹۵	۹۰	۱۵۹	۲۴۶	۱۶۵	۲۲۱	۳۱۸	۳۷۲	۳۹۲
M 70-400.50	۱۵۵	۸۲	۱۵۴	۲۱۵	۱۴۸	۱۸۸	۲۹۳	۲۶۹	۳۵۵
M 80-350.40	۱۰۲	۴۹	۱۲۹	۲۴۷	۱۴۳	۲۴۱	۳۳۲	۱۹۲	۲۶۶
M 80-350.45	۹۷	۸۷	۱۶۷	۲۳۲	۱۳۵	۲۰۰	۳۲۴	۲۹۵	۳۵۹
M 80-350.50	۱۲۵	۸۵	۱۶۲	۲۲۲	۱۵۵	۲۱۸	۳۴۵	۳۰۶	۳۶۴
M 80-400.40	۱۲۶	۶۲	۱۱۹	۱۸۲	۱۱۴	۱۳۷	۲۳۶	۲۴۶	۲۴۲
M 80-400.45	۱۹۷	۱۲۵	۱۸۶	۲۵۲	۱۷۱	۲۶۰	۳۲۰	۲۶۲	۳۳۳
M 80-400.50	۱۳۹	۷۹	۱۵۹	۲۰۹	۱۵۴	۲۰۷	۳۱۵	۳۱۵	۳۴۶
میانگین	۱۵۶	۸۵	۱۶۰	۲۲۱	۱۵۷	۲۱۴	۳۲۹	۳۱۸	۳۶۳

## فصل پنجم: تجزیه و تحلیل نتایج

### ۵-۱ - مقدمه

در این فصل نتایج آزمایش‌هایی که در فصل چهارم ذکر شدند با همان ترتیب مورد ارزیابی و بررسی قرار می‌گیرند. جهت تبیین بهتر نتایج و مقایسه روشن تر آنها سعی شده است از نمودارهای مناسب کمک گرفته شود. نتایج هر آزمایش که مربوط به عمل‌آوری با بخار در دماهای ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتیگراد می‌باشد به صورت مجزا در نمودارهای میله ای با یکدیگر مقایسه شده است. نسبت پارامتر مورد بررسی در هر آزمایش، در دو حالت عمل‌آوری با بخار و عمل‌آوری در شرایط استاندارد آزمایشگاهی نیز محاسبه شده و در ذیل نمودار آمده است. از آنجایی که این نسبت بیانگر تأثیر بخاردهی بر پارامتر مورد نظر می‌باشد و میزان کاهش یا افزایش آن را نشان می‌دهد، عمده مقایسه‌ها بر اساس این نسبت‌ها انجام شده است. در بررسی نتایج علاوه بر اینکه به تأثیر عمل‌آوری بتن با بخار در تغییر پارامترهای دوام توجه می‌شود، لازم است به میزان حساسیت آزمایش‌ها نیز توجه گردد؛ ممکن است تغییر یک عامل، به واسطه حساسیت کم یک آزمایش خاص، آنچنان که مورد انتظار بوده است در نتیجه آزمایش تفاوتی را ایجاد نکرده باشد. همچنین لازم است به دقت انجام



آزمایش‌ها نیز اشاره کرد. هر چند سعی شده است آزمایش‌ها در نهایت دقت و نظم انجام شود اما بروز خطاهای احتمالی آزمایشگاهی نیز نباید دور از ذهن بماند.

## ۵-۲ - تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش جذب آب مویینه بتن

همانطور که در قسمت‌های قبل شرح داده شد برای هر نمونه‌ای که در شرایط بخار عمل‌آوری شده است، نمونه مشابهی که دقیقاً از همان بتن تهیه شده باشد در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل‌آوری و نگهداری می‌شود. کلیه آزمایش‌ها و از جمله آزمایش جذب مؤئینه در مورد هر دو نمونه به صورت مشابه انجام می‌شود. بنابراین نتایجی که از نمونه‌های بخار دیده بدست می‌آید در مقایسه با نتایج نمونه‌های کنترلی مفید فایده است. به همین منظور نسبت بین نتایج نمونه‌های بخار دیده به نمونه‌های کنترلی محاسبه شده و در ذیل نمودارها آمده است. بالطبع اگر این نسبت بزرگتر از یک باشد به معنای آن است که آن پارامتر در اثر بخاردهی بتن افزایش پیدا می‌کند و اگر نسبت بدست آمده کمتر از یک باشد بیانگر کاهش آن پارامتر در اثر بخاردهی است.

در آزمایش جذب مویینه دو پارامتر «ضریب جذب مویینه S» و «ثابت جذب مویینه C» از برآزش منحنی جذب در واحد سطح (i) نسبت به جذر زمان ( $t^{0.5}$ ) تعیین می‌شوند. هر چند مقادیر ثابت جذب مویینه به نوعی نشان دهنده پتانسیل جذب مویینه بتن هستند اما باید توجه نمود که در بحث جذب آب بتن، آهنگ جذب آب اهمیت نخست را دارد و در بررسی نتایج جایگاه مهم‌تری را به خود اختصاص می‌دهد. لذا در تجزیه و تحلیل نتایج جذب مویینه، روند جذب آب مویینه بتن باید بررسی شود. «ضریب جذب مویینه S» از این جهت اهمیت پیدا می‌کند و در این بخش تشریح می‌شود.

ضریب جذب مویینه بتن‌های عمل‌آوری شده در بخار با دمای ۵۰ درجه سانتیگراد در شکل ۱-۵ مشاهده می‌شود. همانطور که از نتایج مشهود است در اثر عمل‌آوری بتن در بخار با دمای ۵۰ درجه، ضریب جذب مویینه در اکثر موارد کاهش یافته است. نسبت بین ضرایب جذب مویینه که در

ذیل نمودار ذکر شده است به خوبی بیانگر این موضوع است. بر این اساس می‌توان چنین قضاوت کرد که در اثر بخاردهی در دمای ۵۰ درجه در غالب موارد جذب مویینه بتن کاهش می‌یابد و لذا می‌توان نتیجه گرفت که این دمای عمل‌آوری تأثیر سوء چندانی بر بتن ندارد.

شکل ۵-۲ نتایج ضریب جذب مویینه بتن‌های عمل‌آوری شده در دمای ۶۰ درجه را نشان می‌دهد. ضرایب جذب مویینه نمونه‌های بخاردهی شده در تمام موارد بیشتر شده است. مخصوصاً این تغییر در نسبت آب به سیمان ۰/۵ مشهودتر است. هر چند تغییرات به وجود آمده بیشتر از حد انتظار است ولی به نظر می‌رسد در این دما، با توجه به افزایش ضریب جذب مویینه بتن‌ها، مجموعاً خاصیت موئینگی بتن افزایش زیادی پیدا می‌کند.

مقایسه نتایج جذب مویینه بتن‌های عمل‌آوری شده در دمای ۷۰ درجه در شکل ۵-۳ مشاهده می‌شود. در دو حالت، ضرائب جذب مویینه کاهش یافته است و در بقیه موارد با افزایش ضریب جذب مویینه مواجه شدیم. مجموعاً نتایج بیانگر آن است که این دما نیز کم و بیش بر بتن اثر سوء دارد و نمی‌توان از دوام بتن‌های بخاردهی شده نسبت به نمونه‌های کنترلی اطمینان کافی داشت.

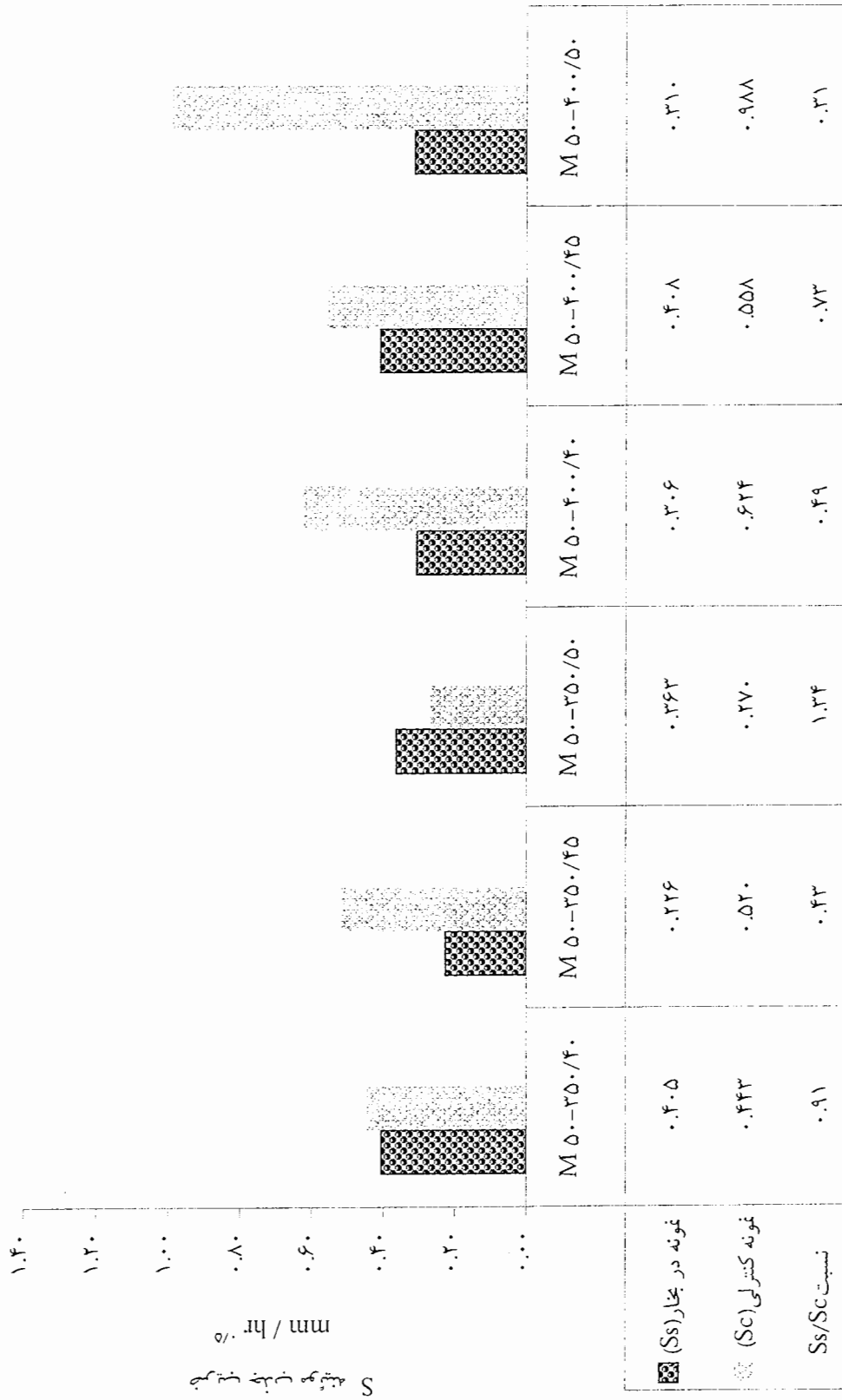
نتایج ضریب جذب مویینه بتن‌های عمل‌آوری شده در دمای ۸۰ درجه در شکل ۵-۴ مقایسه شده است. افزایش چشمگیر ضریب جذب مویینه در غالب موارد ملاحظه می‌شود. ضریب جذب مویینه در یکی از حالات در مقایسه با نمونه کنترلی به حدود ۳/۵ برابر افزایش پیدا کرده است. هر چند در یک مورد نیز کاهش مختصری در یکی از ضرائب جذب مویینه دیده می‌شود اما اگر مقدار ضریب جذب مویینه این بتن با بقیه ضرائب مقایسه شود ملاحظه می‌شود مقدار ضریب جذب مویینه نمونه کنترلی هم نسبتاً زیاد است.

یکی از مواردی را که به عنوان نتیجه جانبی مورد بررسی قرار دادیم وضعیت جذب مویینه نمونه‌های کنترلی می‌باشد. همانطور که قبلاً گفته شد بتن‌های ساخته شده در این تحقیق دارای دو حالت عیار سیمان شامل مقادیر ۳۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و سه حالت آب به سیمان شامل مقادیر ۰/۴۰ و ۰/۴۵ و ۰/۵۰ می‌باشند. در واقع شش نوع بتن متفاوت با یکدیگر داریم که هر یک از

این بتن‌ها چهار مرتبه ساخته شده‌اند. حال اگر چهار ضریب و چهار ثابت جذب مویینه‌ای را که مربوط به یک بتن با نسبت آب به سیمان و عیار مشخص است از جداول استخراج کرده و میانگین‌گیری نمائیم، می‌توانیم تأثیر عیار سیمان را بر خواص موئینگی بتن بررسی نمائیم. میانگین ضریب و ثابت جذب مویینه این بتن‌ها در شکل‌های ۵-۵ و ۵-۶ دیده می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌شود در نسبت آب به سیمان یکسان، با افزایش عیار سیمان ضریب جذب مویینه و ثابت جذب مویینه بتن افزایش می‌یابد. این افزایش مخصوصاً در نسبت آب به سیمان  $0/5$  بیشتر از دو حالت دیگر می‌باشد. بنابراین این‌گونه نتیجه می‌گیریم که کاهش عیار سیمان می‌تواند اقدام مفید و قابل توصیه‌ای جهت کم کردن جذب مویینه بتن باشد.

جمع بندی این بخش به این صورت است که با توجه به نتایج جذب مویینه به نظر می‌رسد بتن‌هایی که به وسیله بخار عمل‌آوری می‌شوند از دیدگاه جذب مویینه آسیب‌پذیر می‌شوند. در بتن‌هایی که در بخار با دمای  $60$  درجه و بالاتر عمل‌آوری شده‌اند، در غالب موارد افزایش جذب مویینه بتن مشاهده می‌شود؛ به طوری که از  $18$  حالت مربوط به دمای  $60$  درجه و بالاتر، در  $15$  وضعیت ضریب جذب مویینه افزایش پیدا کرده است. سیستم جذب آب در برخی قطعات بتنی به صورت مویینه است، مانند بتن‌هایی که در منطقه جزر و مد قرار می‌گیرند و یا قطعات بتنی که بر روی بستر مرطوب واقع می‌شوند و نقشی شبیه به شالوده دارند. پیشنهاد می‌شود در صورتی که عمل‌آوری این قطعات بتنی به وسیله بخار انجام می‌شود، حداکثر دمای عمل‌آوری به  $50$  درجه سانتیگراد محدود شود. ضمن آنکه توصیه می‌شود تا حد امکان عیار سیمان پائین‌تری مورد استفاده قرار گیرد.

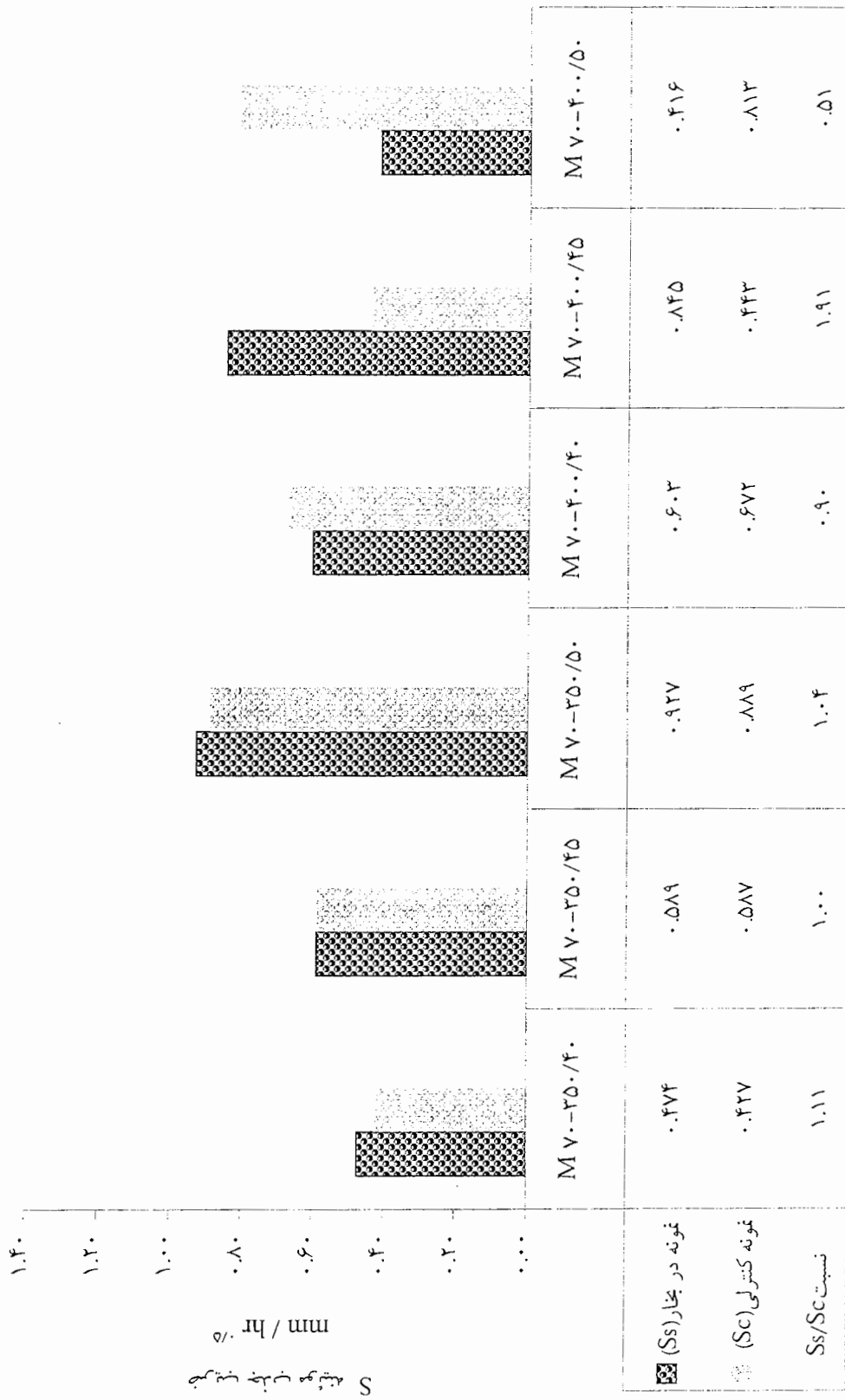
شکل ۵-۱- بررسی ضریب جذب موئینه بتن عمل آوری شده در بخار ۵۰ درجه



شکل ۵-۲- بررسی ضریب جذب مؤینه بتن عمل آوری شده در بخار ۶۰ درجه



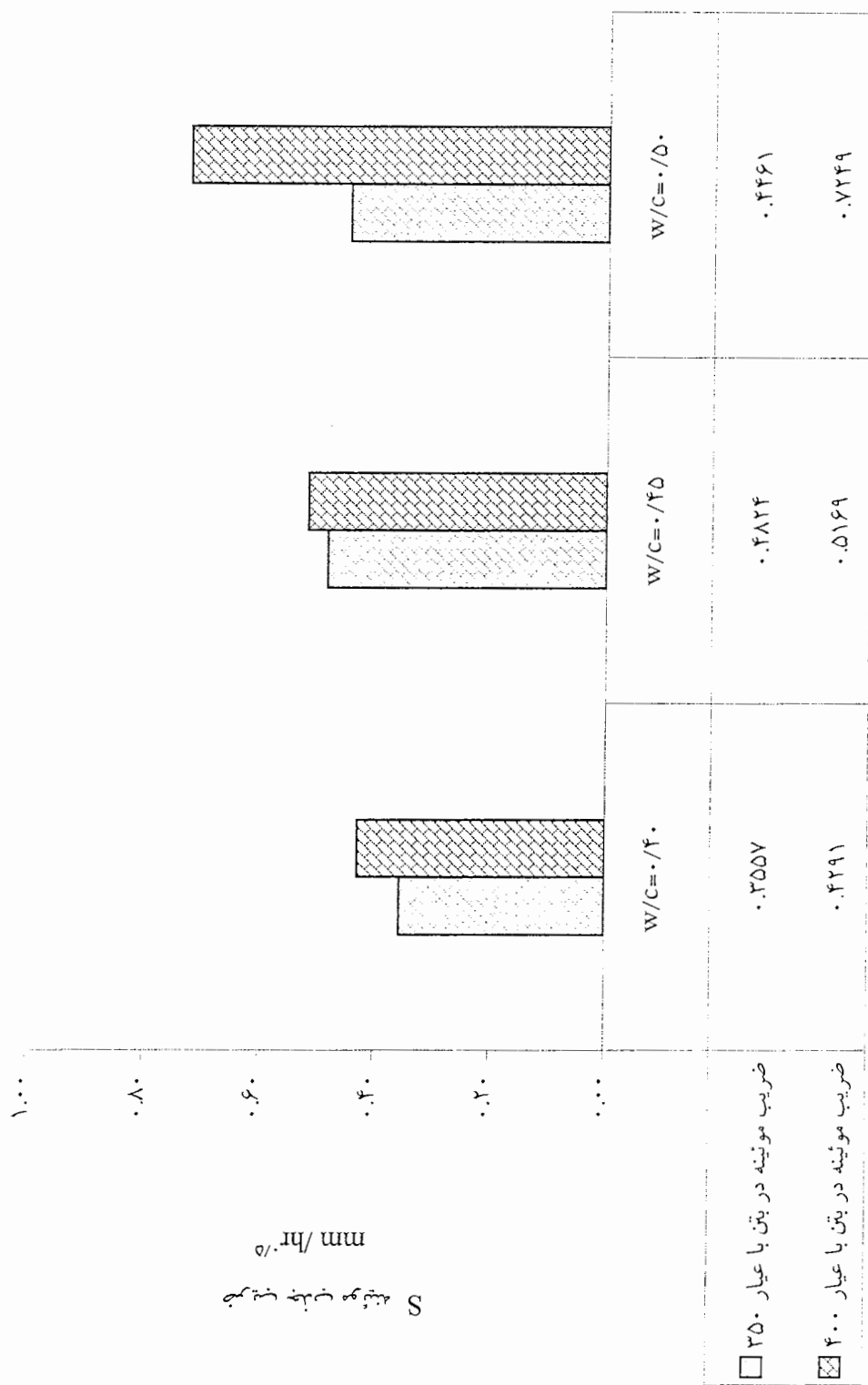
شکل ۵-۳- بررسی ضریب جذب موئینه بتن عمل آوری شده در بخار ۷۰ درجه



شکل ۴-۵- بررسی ضریب جذب موئینه بتن عمل آوری شده در بخار ۸۰ درجه

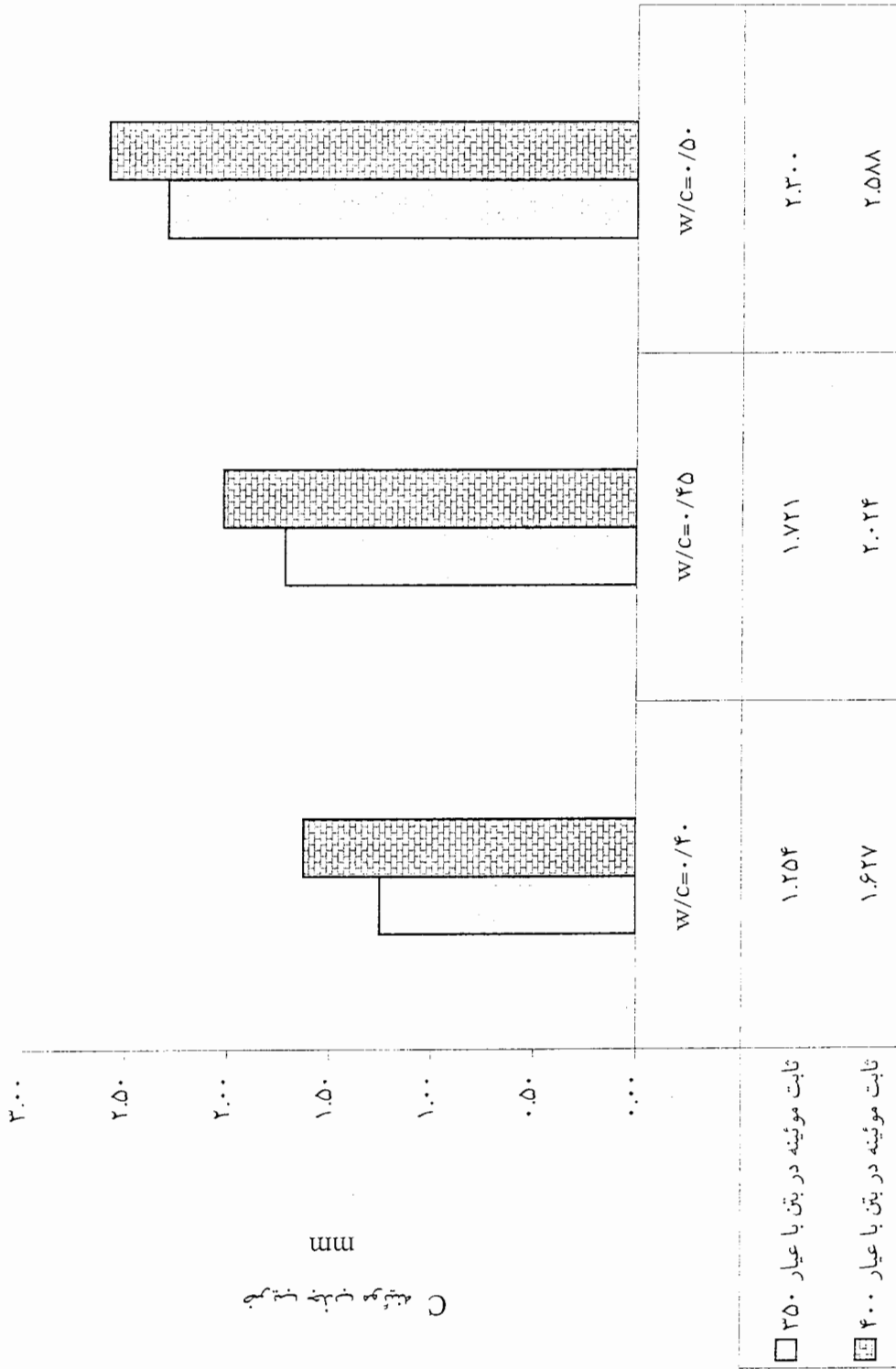


شکل ۵-۵- بررسی تاثیر افزایش عیار سیمان بر ضریب جذب موئینه بتن (S)





شکل ۵-۶- بررسی تاثیر افزایش عیار سیمان بر ثابت جذب موئینه بتن (C)



### ۵-۳- تجزیه و تحلیل نتایج جذب آب اولیه و نهایی بتن

در این قسمت، با توجه به نتایج مندرج در فصل گذشته، ابتدا نتایج جذب آب اولیه بتن را مورد بررسی قرار می‌دهیم. علاوه بر ذکر مقادیر جذب آب اولیه نمونه بخار دیده و نمونه کنترلی، نسبت آنها نیز در ذیل نمودارها مشاهده می‌شود.

شکل ۵-۷ بیانگر نتایج مربوط به دمای عمل‌آوری ۵۰ درجه می‌باشد. همانطور که از مقایسه مقادیر جذب آب اولیه دو نمونه نتیجه می‌شود، در اثر عمل‌آوری بتن با بخار ۵۰ درجه، مقادیر جذب آب اولیه تمامی بتن‌ها به طور نسبی کاهش یافته است، هر چند تفاوت بین جذب آب نمونه بخار دیده و نمونه کنترلی نسبتاً کم است. نسبت جذب آب اولیه دو نمونه بیانگر آن است که این پارامتر در بتن M50-400.50 بیشترین کاهش را داشته است. در بتن M50-350.40 به مقدار ناچیز ۲ درصد، افزایش جذب آب اولیه دیده می‌شود و در بقیه بتن‌ها نیز کاهش جذب آب اولیه را شاهد هستیم.

در شکل ۵-۸ مقایسه نتایج جذب آب اولیه بتن بخار دیده در دمای ۶۰ درجه ملاحظه می‌شود. در سه حالت کاهش و در سه حالت دیگر افزایش مختصری در جذب آب اولیه دیده می‌شود. بیشترین کاهش در بتن M60-400.40 به مقدار ۱۳ درصد و بیشترین افزایش در بتن M60-350.50 به مقدار ۹ درصد مشاهده می‌شود. مقادیر جذب آب اولیه نمونه‌های بخار دیده و نمونه‌های کنترلی نزدیک به هم هستند.

شکل ۵-۹ نتایج مربوط به بخار ۷۰ درجه را نشان می‌دهد. آنچه در این شکل مشاهده می‌شود بیانگر آن است که در این دما نیز تأثیر بخاردهی بر جذب آب اولیه، کم و ناچیز است. بیشترین کاهش در بتن M70-400.50 اتفاق افتاده است و مقدار جذب آب اولیه آن از ۲/۷۳ درصد به ۲/۱۷ درصد به مقدار نسبی ۲۱ درصد کاهش یافته است. بیشترین افزایش جذب آب اولیه را در بتن M70-400.45 شاهد هستیم که مقدار این پارامتر از ۲/۴۲ درصد به ۲/۸۶ درصد به مقدار نسبی ۱۸

درصد تغییر پیدا کرده است. بقیه بتن‌ها نیز مقادیر جذب آب نزدیک به این اعداد را دارند. این مقادیر تغییر چندانی نکرده‌اند و از قاعده خاصی نیز پیروی نمی‌کنند.

در شکل ۵-۱۰ آخرین بخش از نتایج جذب آب اولیه مشاهده می‌شود. بررسی نتایج مربوط به دمای ۸۰ درجه که در این شکل آمده است حاکی از آن است که غیر از یک مورد افزایش جذب آب اولیه که در بتن M80-350.50 دیده می‌شود، در بقیه بتن‌ها کاهش در جذب آب اولیه بتن در اثر بخاردهی دیده می‌شود.

مجموعاً از دیدگاه این آزمایش، بخاردهی در تمامی دماها - حتی دماهای بالا - موجب کاهش نسبی و یا دست کم عدم تغییر جذب آب اولیه بتن می‌گردد. به نظر می‌رسد بخاردهی بتن تأثیر قابل توجه و ضابطه‌مندی بر جذب آب اولیه بتن ندارد. حساسیت این آزمایش در محدوده تغییرات انجام شده در خواص و نحوه عمل‌آوری بتن‌ها، نسبتاً کم است.

در ادامه مطلب، به بررسی نتایج جذب آب نهایی بتن می‌پردازیم. شکل ۵-۱۱ مقایسه نتایج جذب آب نهایی بتن عمل‌آوری شده در دمای ۵۰ درجه با نمونه‌های کنترلی را نشان می‌دهد. استفاده از بخار با این دما جهت عمل‌آوری در تمام بتن‌ها، جذب آب نهایی آن را کاهش داده است. بیشترین کاهش در بتن M50-400.50 به مقدار ۳۰ درصد دیده می‌شود. البته مقدار جذب آب نهایی نمونه کنترلی این بتن نسبت به بقیه نمونه‌ها بیشتر است، ولی در هر صورت کاهش به وجود آمده در جذب آب نهایی بیشتر از سایر بتن‌هاست. به نظر می‌رسد این دمای عمل‌آوری، تأثیر سوء چندانی بر جذب آب نهایی بتن ندارد.

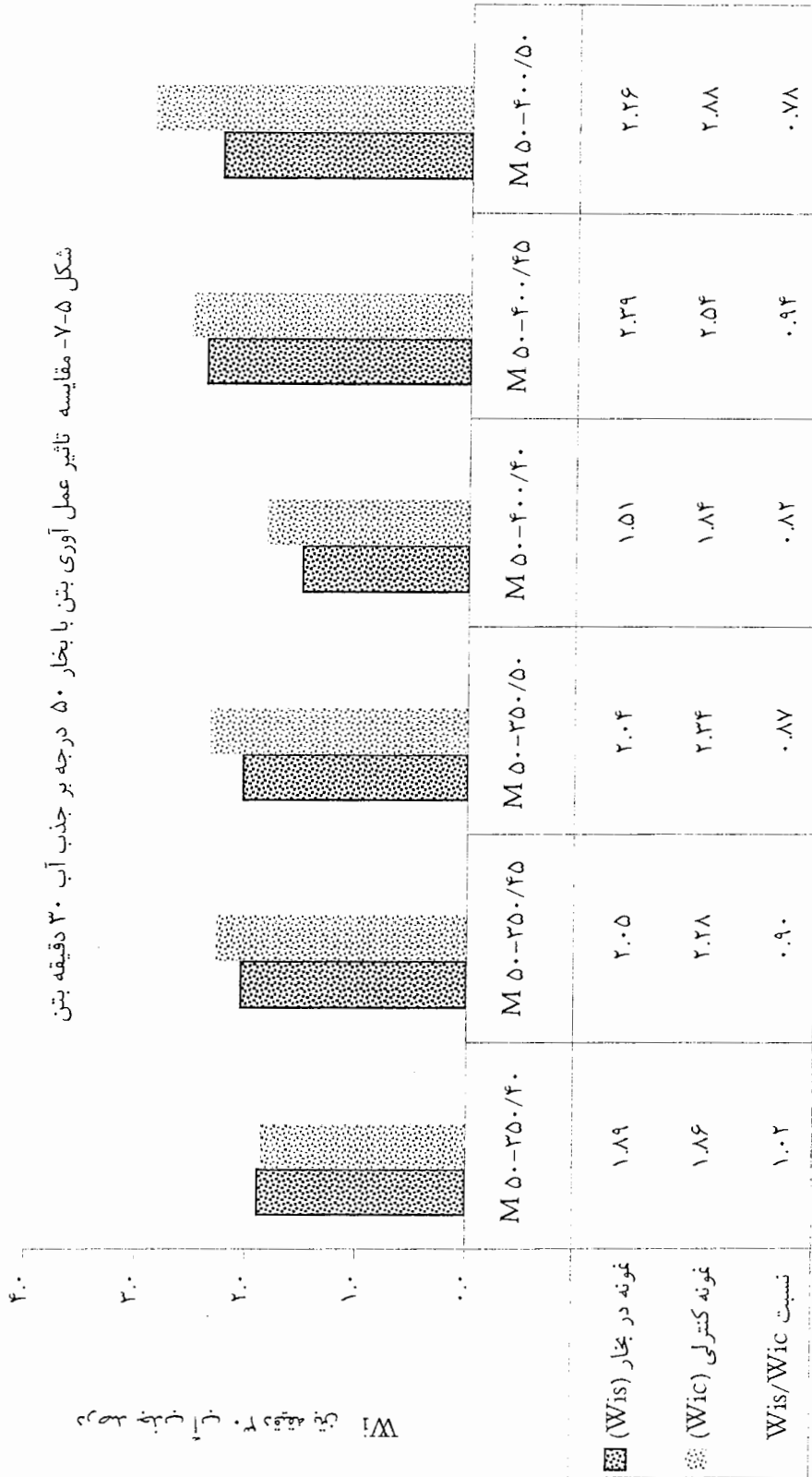
شکل ۵-۱۲ مربوط به بخار ۶۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که جذب آب نهایی بتن به مقدار مختصر افزایش یافته است. این افزایش، کم و بیش در تمام بتن‌ها دیده می‌شود. جذب آب نهایی نسبی بتن در این دما، بین ۱ تا ۱۳ درصد افزایش یافته است. در بتنی که بیشترین مقدار تغییر اتفاق افتاده است، مقدار جذب آب نهایی تنها به اندازه ۰/۷ درصد تغییر کرده است که به نظر قابل اغماض می‌باشد.

شکل ۵-۱۳ مقایسه نتایج مربوط به دمای ۷۰ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. در ۴ حالت، مقدار نسبی جذب آب نهایی کمتر از ۱ درصد تغییر کرده است. در یک حالت، افزایش جذب آب نهایی به مقدار نسبی ۱۰ درصد و در یک مورد دیگر کاهش جذب آب نهایی به مقدار نسبی ۱۳ درصد دیده می‌شود. تغییر مقدار جذب آب نهایی در بیشترین وضعیت حدود ۰/۷ درصد است. این دمای عمل‌آوری نیز تأثیر سوء چندانی را بر جذب آب نهایی بتن نشان نمی‌دهد.

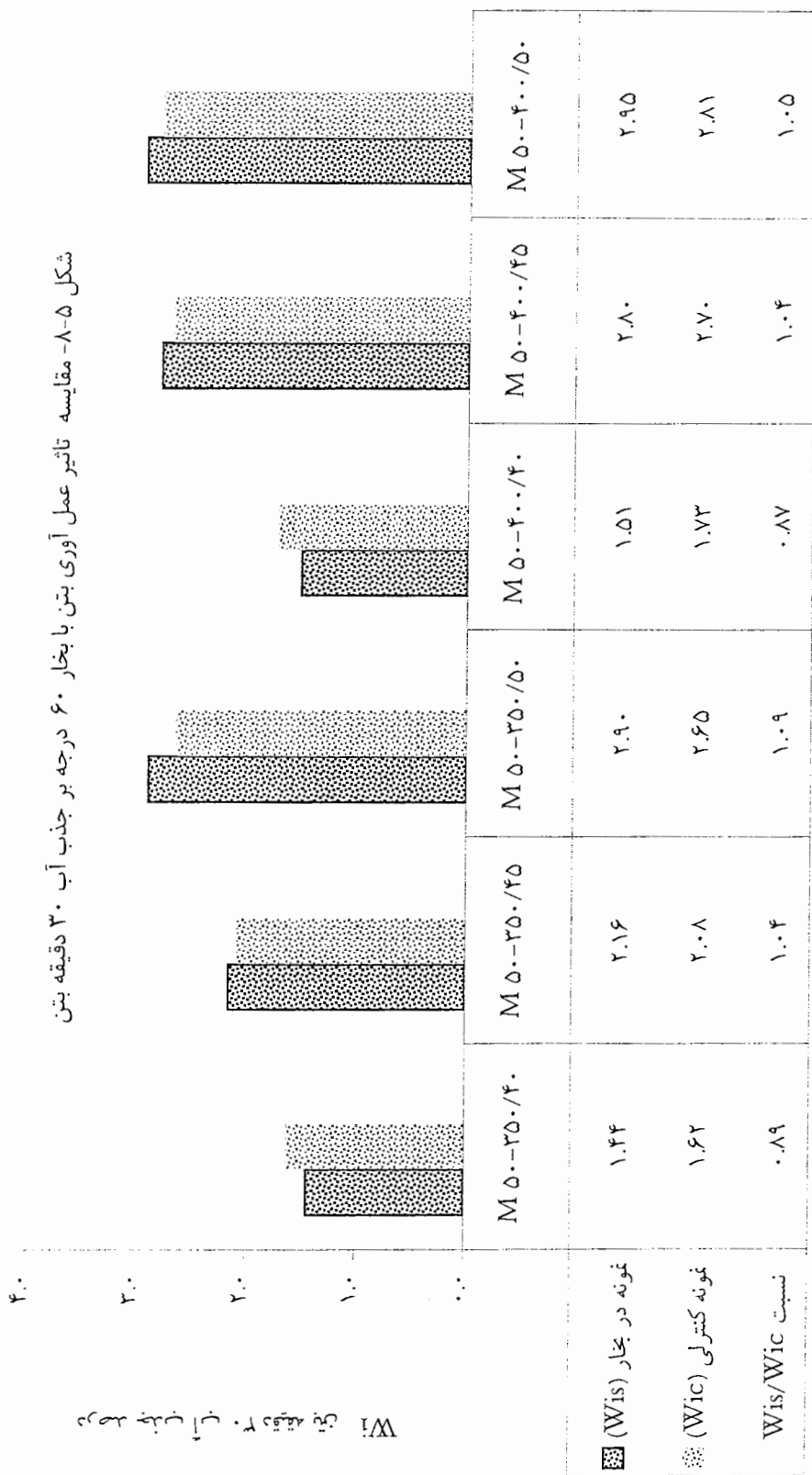
دمای عمل‌آوری ۸۰ درجه تغییرات بیشتری را در جذب آب نهایی بتن‌ها به وجود آورده است که در شکل ۵-۱۴ مشاهده می‌شود. هر چند در این دما، کاهش نسبی مختصر جذب آب نهایی در دو مورد دیده می‌شود، اما باید توجه داشت که در مواردی نیز افزایش قابل ملاحظه جذب آب نهایی بتن‌های بخار دیده اتفاق افتاده است. افزایش نسبی جذب آب نهایی از ۱۲ تا ۴۷ درصد دیده می‌شود. در نامناسب‌ترین وضعیت، مقدار جذب آب نهایی از ۳/۱۲ درصد به ۴/۵۸ درصد افزایش پیدا کرده است. به نظر می‌رسد دمای عمل‌آوری ۸۰ درجه سانتیگراد افزایش نسبتاً زیادی در جذب آب نهایی بتن به وجود می‌آورد.

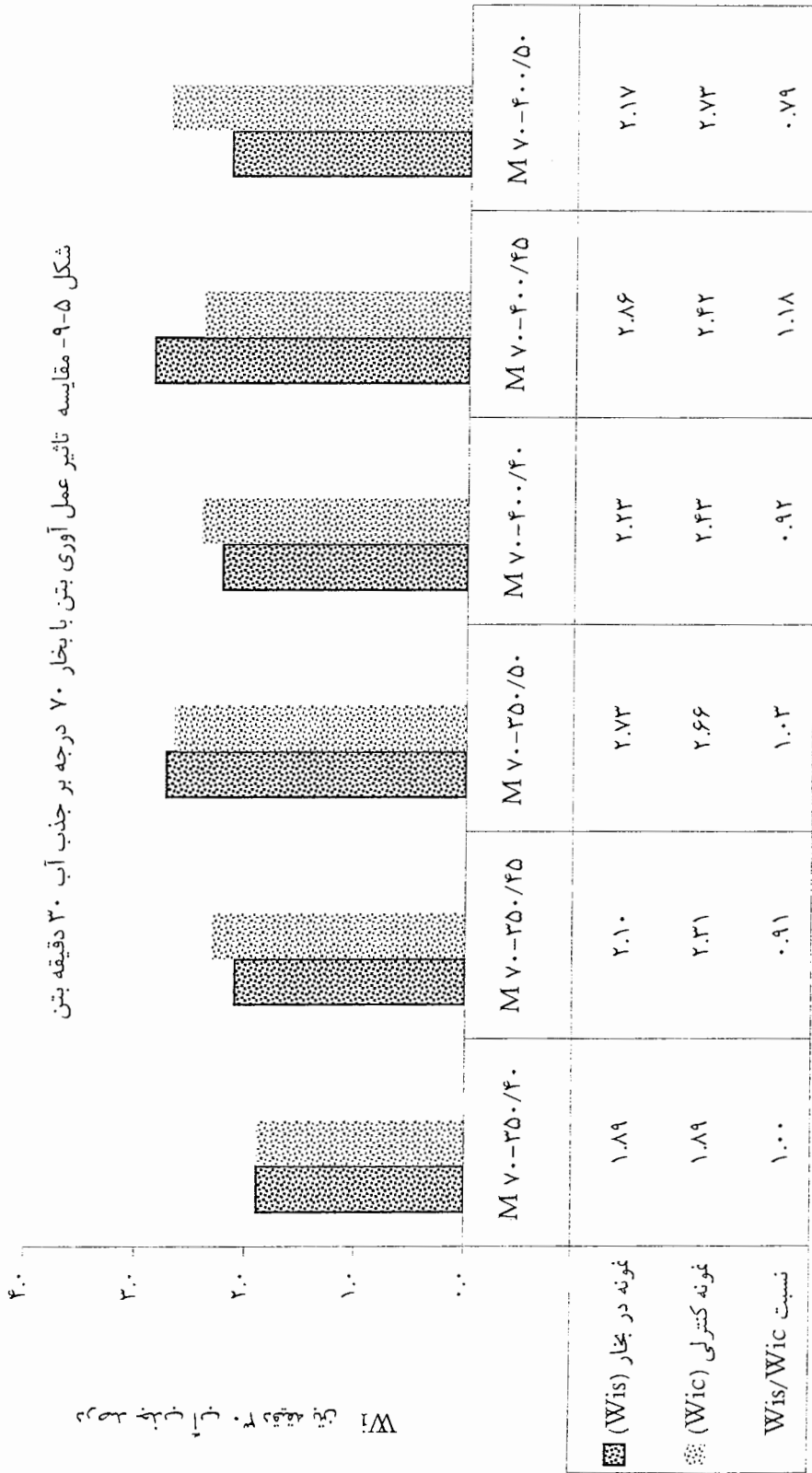
مجموعاً با توجه به نتایج جذب آب نهایی بتن به نظر می‌رسد بتوان این نتیجه را گرفت که افزایش دمای عمل‌آوری بتن با بخار تا حد ۷۰ درجه، اثر چندانی نامساعدی بر این پارامتر دوام نداشته است. سیستم جذب آب بتن‌هایی که در زمان بهره‌برداری به طور کامل در آب قرار می‌گیرند و غرقاب می‌شوند، نسبتاً مشابه با این آزمایش است. بنابراین توصیه می‌شود در عمل‌آوری قطعات بتنی که قرار است در زیر آب نصب شوند، حداکثر دمای عمل‌آوری با بخار در حد ۷۰ درجه سانتیگراد محدود گردد و جهت اطمینان نسبی از دوام بتن از دماهای بالاتر استفاده نشود.

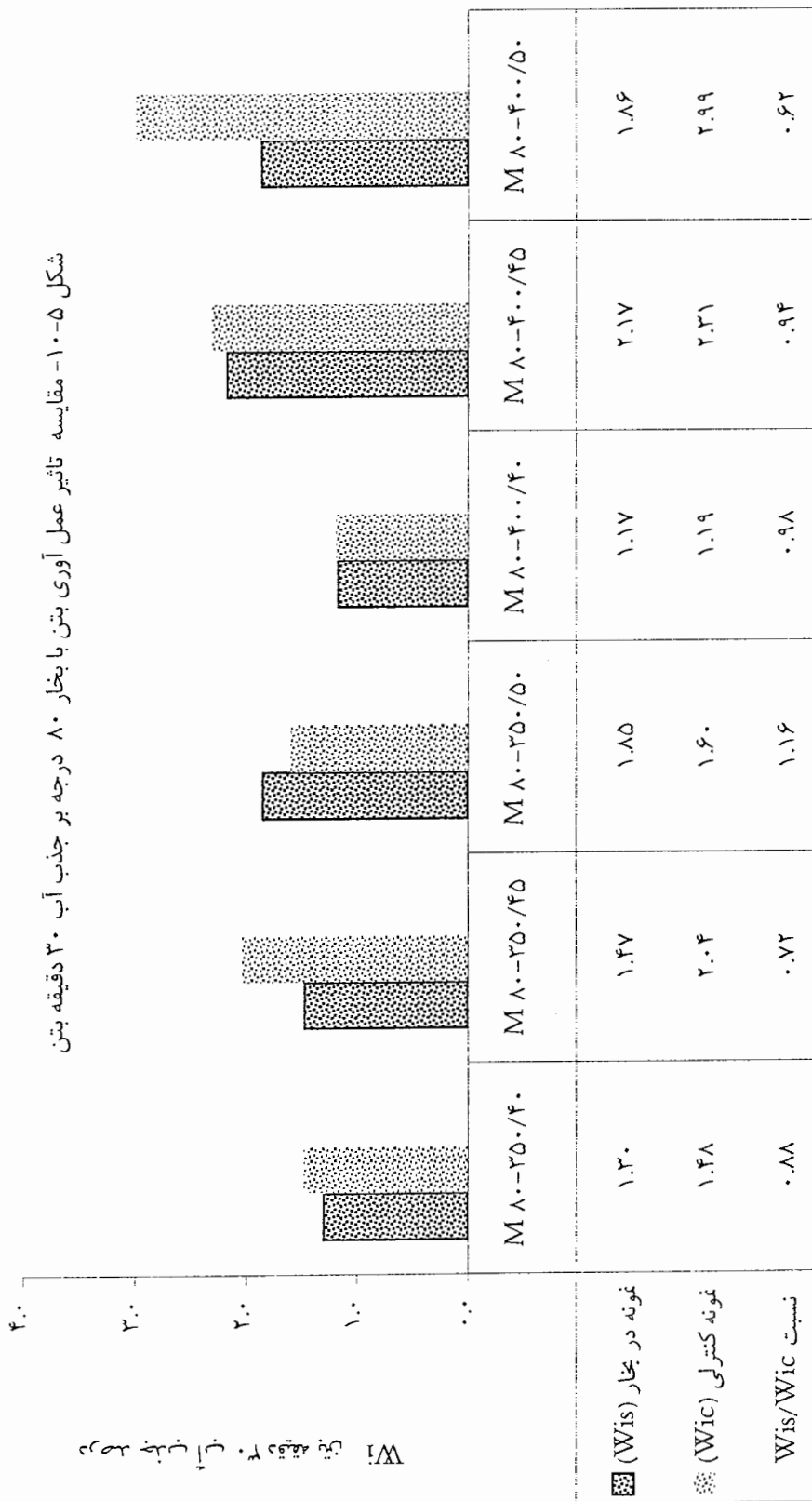
شکل ۷-۵- مقایسه تاثیر عمل آوری بتن با بخار ۵۰ درجه بر جذب آب ۳۰ دقیقه بتن



شکل ۵-۸- مقایسه تاثیر عمل آوری بتن با بخار ۶۰ درجه بر جذب آب ۳۰ دقیقه بتن

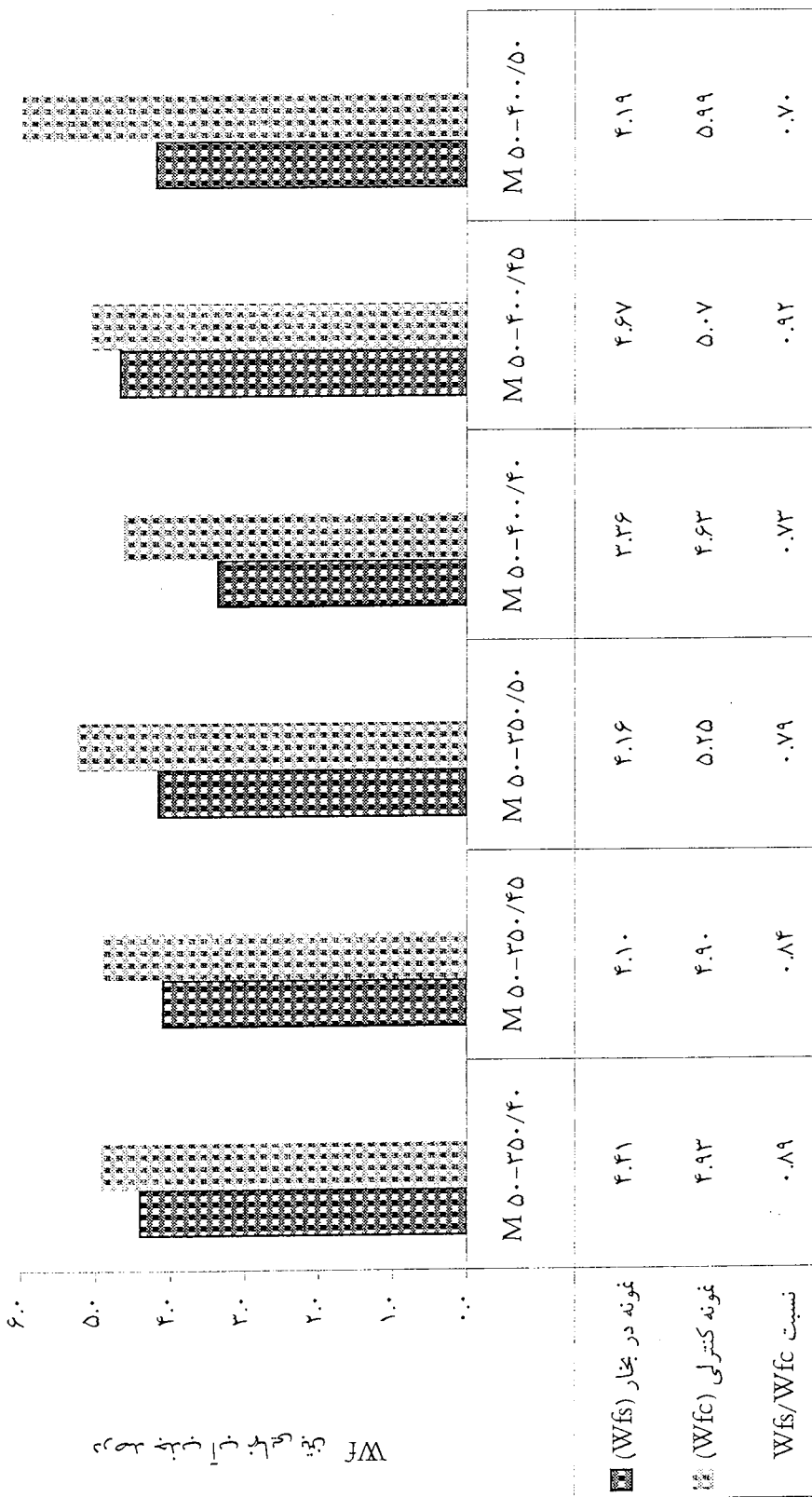








شکل ۵-۱۱- مقایسه تاثیر عمل آوری بتن با بخار ۵۰ درجه بر جذب آب نهایی بتن



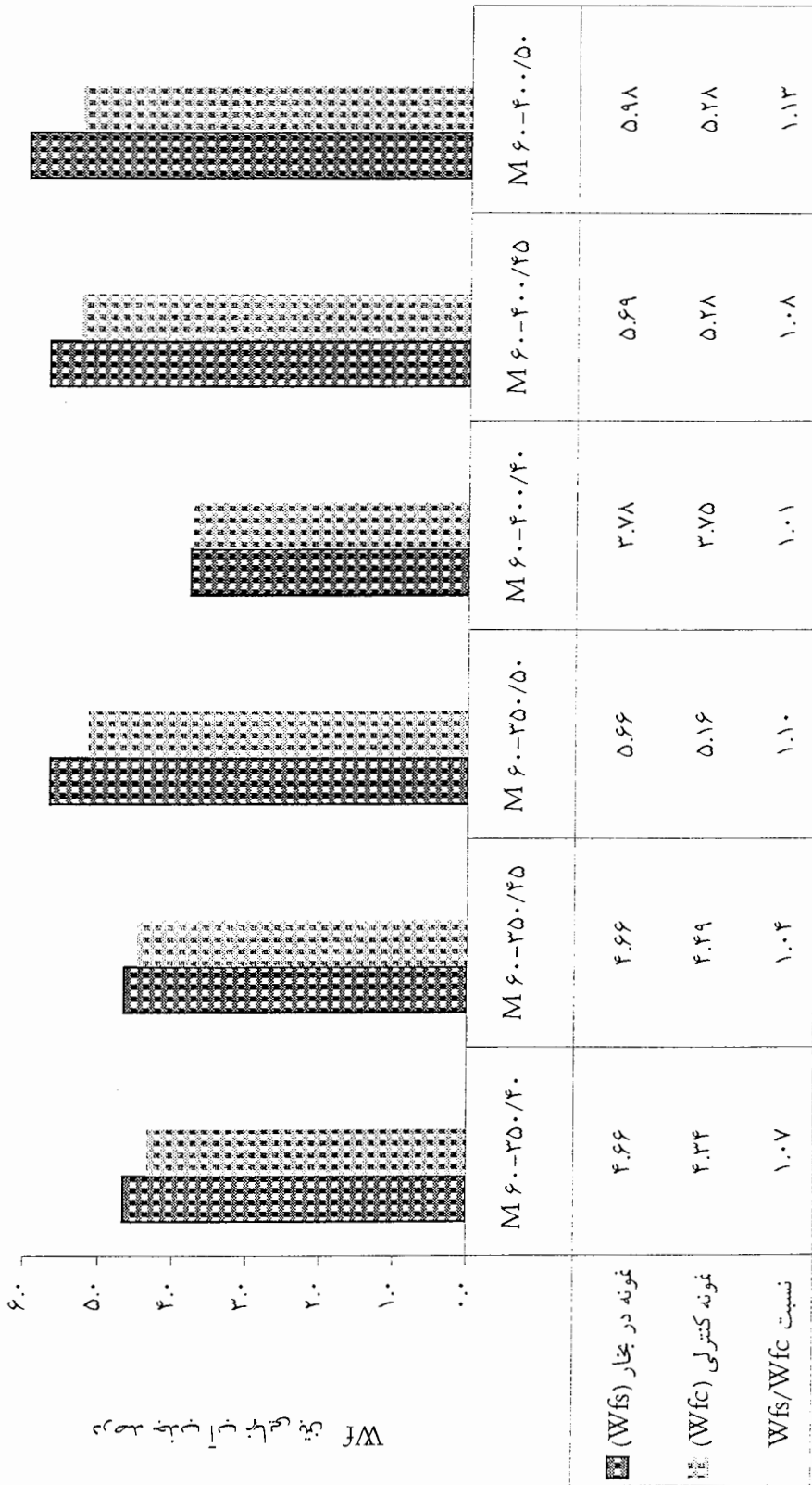
Wf: درصد جذب آب نهایی بتن

■ نمونه در بخار (Wf)

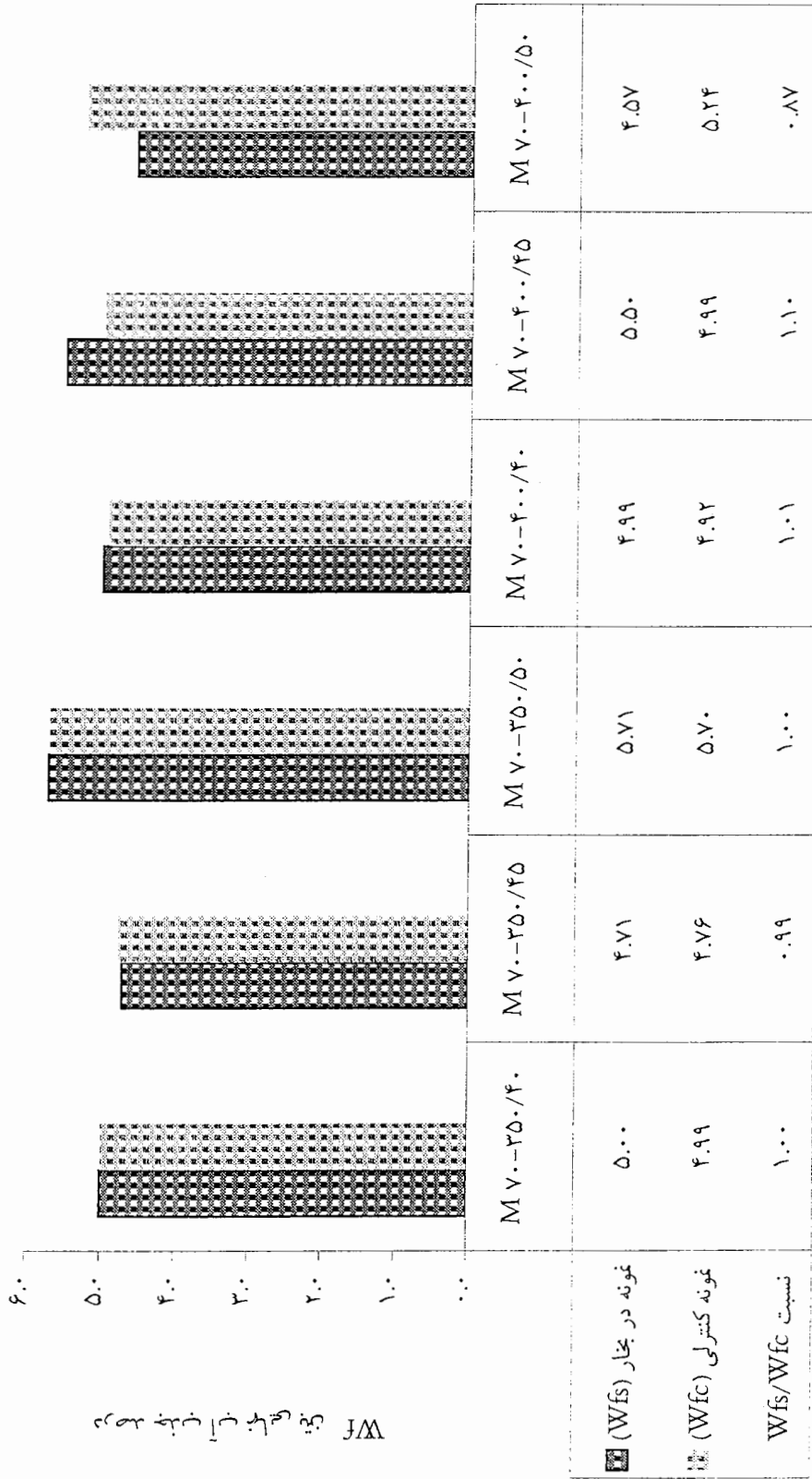
▨ نمونه کنترلی (Wfc)

نسبت Wf/Wfc

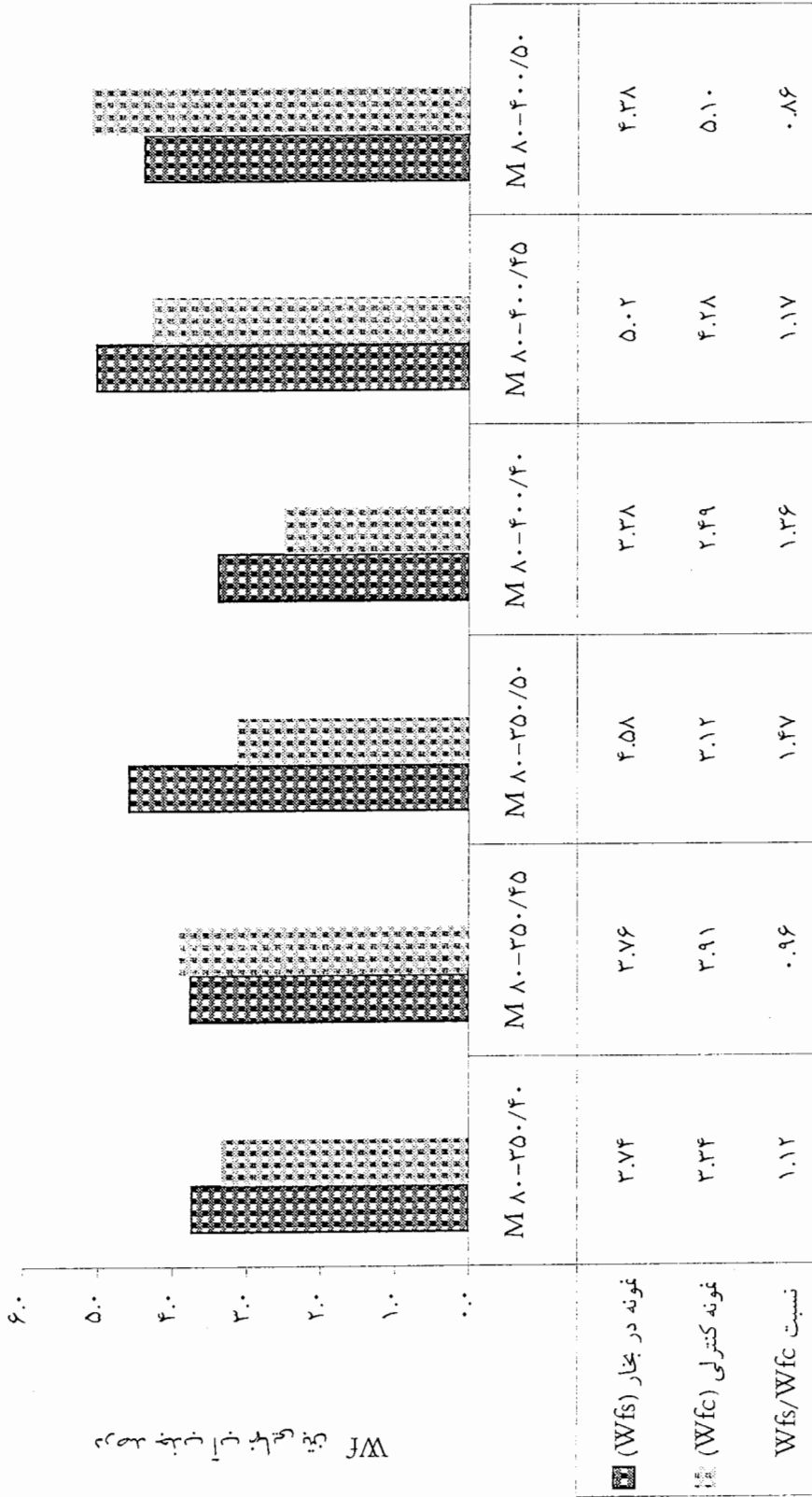
شکل ۵-۱۲- مقایسه تاثیر عمل آوری بتن با بخار ۶۰ درجه بر جذب آب نهایی بتن



شکل ۵-۱۳- مقایسه تاثیر عمل آوری بتن با بخار ۷۰ درجه بر جذب آب نهایی بتن



شکل ۵-۱۴ - مقایسه تاثیر عمل آوری بتن با بخار ۸۰ درجه بر جذب آب نهایی بتن



## ۵-۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی

در فصل دوم عنوان شد که مسأله خوردگی میلگردها در مناطق جنوبی کشور به واسطه شرایط محیطی خاص خلیج فارس و دریای عمان اهمیت ویژه‌ای دارد. بنابراین به نظر می‌رسد بررسی تأثیر بخاردهی بر خوردگی میلگردها در این تحقیق اهمیت ویژه‌ای داشته باشد.

سن شروع خوردگی میلگردها در طرح اختلاط‌های این تحقیق، در جدول ۴-۹ فصل گذشته ذکر شد. با بررسی این جدول ملاحظه می‌شود در غالب موارد مقاومت بتن در برابر نفوذ عوامل مهاجم آب دریا، در اثر بخاردهی کاهش پیدا کرده است. کاهش سن شروع خوردگی به معنای آن است که بتن در محافظت از میلگرد و جلوگیری از خوردگی آن آسیب‌پذیر شده است.

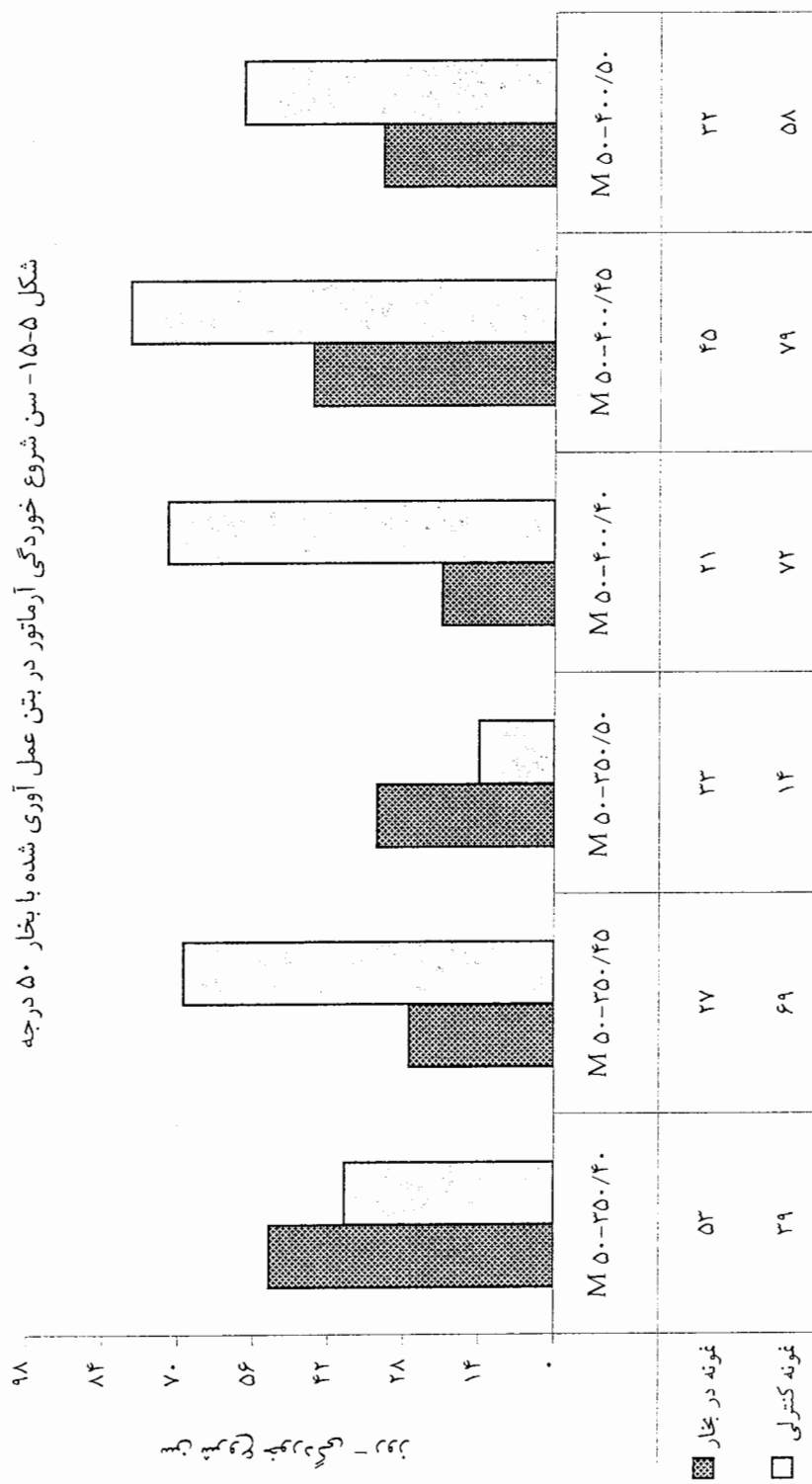
شکل ۵-۱۵ مقایسه زمان شروع خوردگی بتن‌هایی را که در بخار ۵۰ درجه عمل‌آوری شده‌اند نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود در دو مورد، زمان شروع خوردگی نمونه بخار دیده بیشتر از نمونه کنترلی بدست آمده است و در بقیه موارد عکس این مطلب صادق است. این دو مورد بتن‌های M 50-350.40 و M 50-350.50 می‌باشند که وضعیت آنها را در این قسمت بررسی می‌نمائیم. در بتن اول (M 50-350.40) به نظر می‌رسد در اثر بخاردهی بتن، به دلیل پائین بودن دمای بخار و نیز کم بودن نسبت آب به سیمان و حجم خمیر سیمان، آسیب چندانی بر مقاومت آن در برابر نفوذ عوامل خورنده میلگرد به وجود نیامده است؛ هر چند با توجه به نتایجی که در سایر موارد بدست آمده است، نمی‌توان این مطلب را با اطمینان بیان کرد. در بتن دوم (M 50-350.50) هر چند سن شروع خوردگی در بتن بخار دیده بیشتر از نمونه کنترلی است، اما این مطلب بیانگر مقاوم بودن این بتن در برابر عوامل خورنده میلگرد نیست؛ چرا که اساساً در این بتن، نمونه کنترلی در سن نسبتاً کم ۱۴ روز فعال شده و خوردگی میلگرد آن شروع شده است که ممکن است تأثیر نسبت آب به سیمان نسبتاً زیاد این بتن باشد. بنابراین می‌توانیم این نتیجه را بگیریم که در اثر عمل‌آوری بتن مسلح در دمای ۵۰ درجه، خوردگی میلگرد تشدید می‌شود.

در شکل‌های ۵-۱۶ و ۵-۱۷ زمان شروع خوردگی بتن‌های عمل‌آوری شده با بخار ۶۰ و ۷۰ درجه سانتیگراد مشاهده می‌شود. این نتایج نیز بیانگر کاهش مقاومت بتن‌ها در برابر نفوذ عوامل خوردنده میلگرد در اثر بخاردهی است. با بالا رفتن دمای عمل‌آوری به نظر می‌رسد تأثیر نامطلوب بخاردهی بیشتر شده است. در دمای عمل‌آوری ۶۰ و ۷۰ درجه در تمام موارد، سن شروع خوردگی میلگرد نمونه‌های بخار دیده کاهش یافته است.

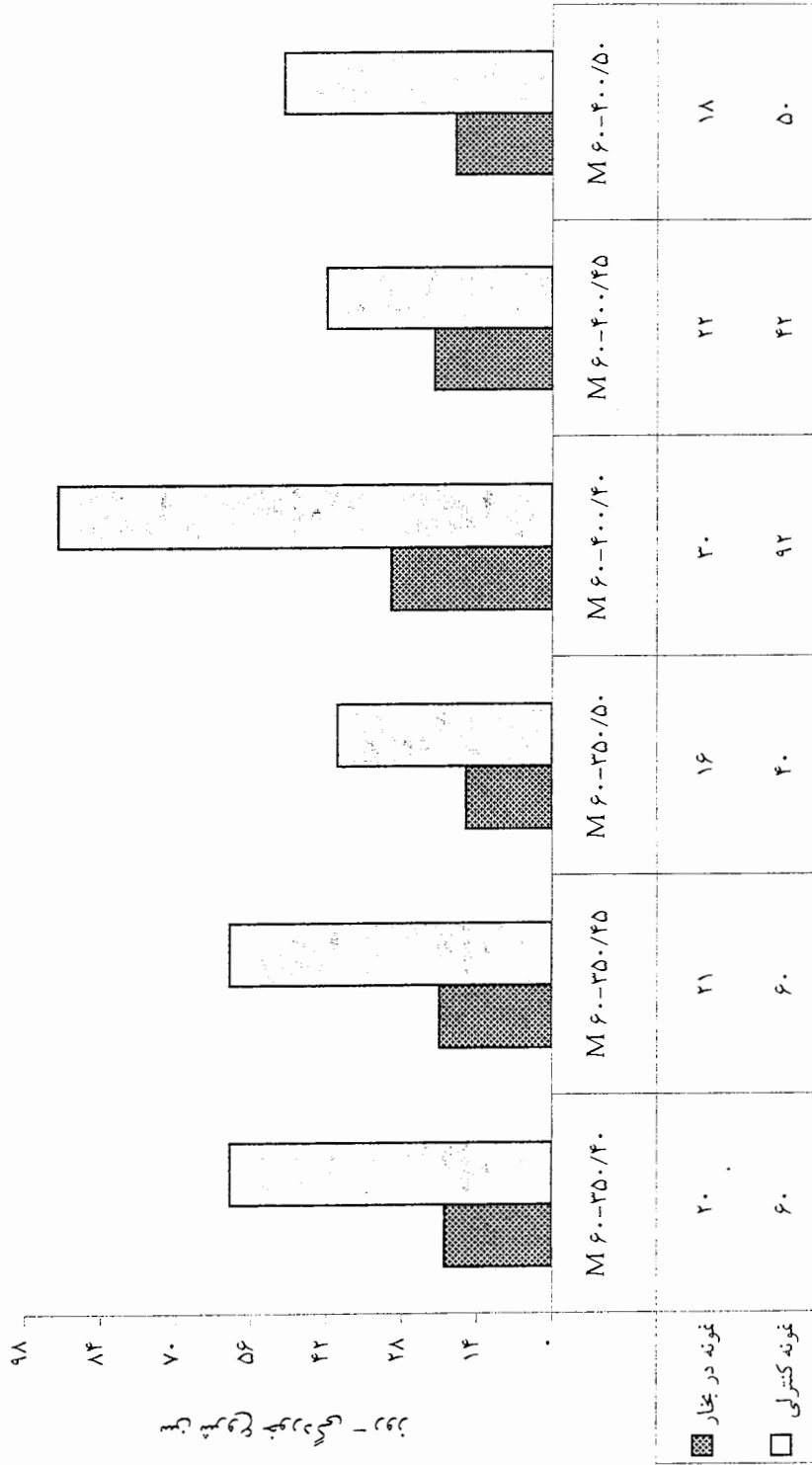
با افزایش دمای عمل‌آوری بخار به حد ۸۰ درجه، زمان شروع خوردگی میلگرد در بتن‌های بخار دیده به شدت کاهش می‌یابد. این مطلب در شکل ۵-۱۸ به وضوح مشاهده می‌شود. در بتن M 80-350.40 علیرغم آنکه بتن دارای نسبت آب به سیمان پائینی است و زمان شروع خوردگی نمونه کنترلی نسبتاً طولانی بوده و ۶۱ روز بدست آمده است، مشاهده می‌شود که سن فعال شدن میلگرد نمونه بخار دیده به حد بسیار کم ۱۰ روز کاهش پیدا کرده است. در سایر بتن‌ها نیز این وضعیت به وضوح دیده می‌شود.

بررسی منحنی‌های اختلاف پتانسیل بر حسب زمان که در فصل گذشته ذکر شد نیز اطلاعات خوبی را در اختیارمان قرار داد. بعد از فعال شدن و شروع خوردگی میلگرد نمونه‌های کنترلی و بخار دیده ملاحظه می‌شود که در بسیاری از موارد، پتانسیل خوردگی نمونه بخاردهی شده بیشتر از نمونه کنترلی است و بعضاً تفاوت بسیار زیادی دارد. هر چند آزمایش پتانسیل خوردگی شدت خوردگی میلگرد را نشان نمی‌دهد، اما به نظر می‌رسد تفاوت فاحش پتانسیل خوردگی نمونه‌های بخار دیده نسبت به نمونه‌های کنترلی، در مجموع بیانگر ضعیف‌تر بودن بتن بخار دیده است.

با توجه به این نتایج پیشنهاد می‌شود به علت بحرانی بودن مسئله خوردگی میلگردها در منطقه جزر و مد، آن دسته از قطعات بتنی مسلحی که در این منطقه قرار می‌گیرند به وسیله بخار عمل‌آوری نشوند. بدیهی است در مناطقی که خوردگی میلگرد ناچیز است ( نظیر بتن‌هایی که دائماً در آب قرار دارند و هیچ وقت خشک نمی‌شوند)، کاهش مقاومت بتن در برابر نفوذ عوامل خوردنده میلگرد به دلیل مطرح نبودن خوردگی در این مناطق اهمیت کمتری دارد.

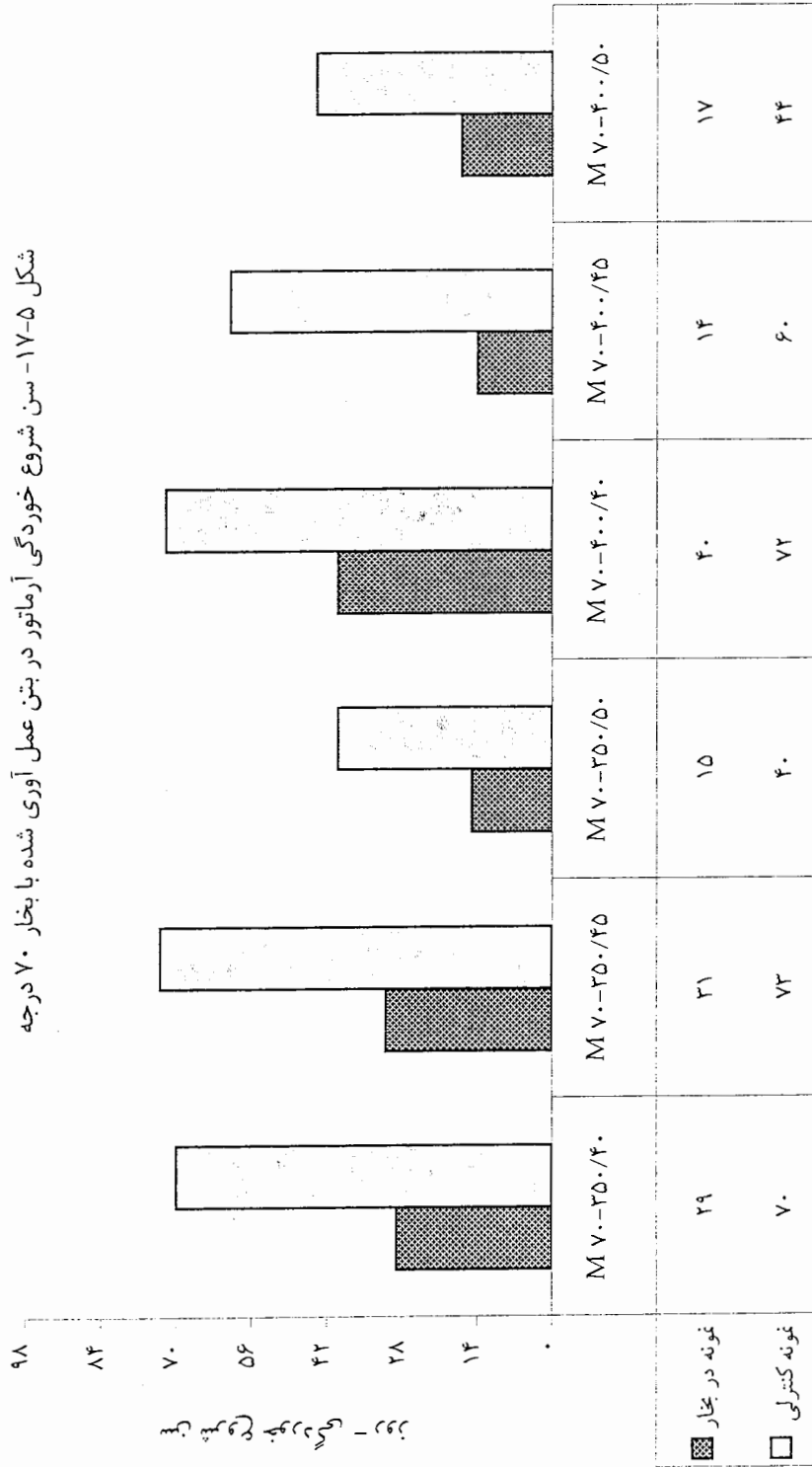


شکل ۵-۱۶ - سن شروع خوردگی آرماتور در بتن عمل آوری شده با بخار ۶۰ درجه

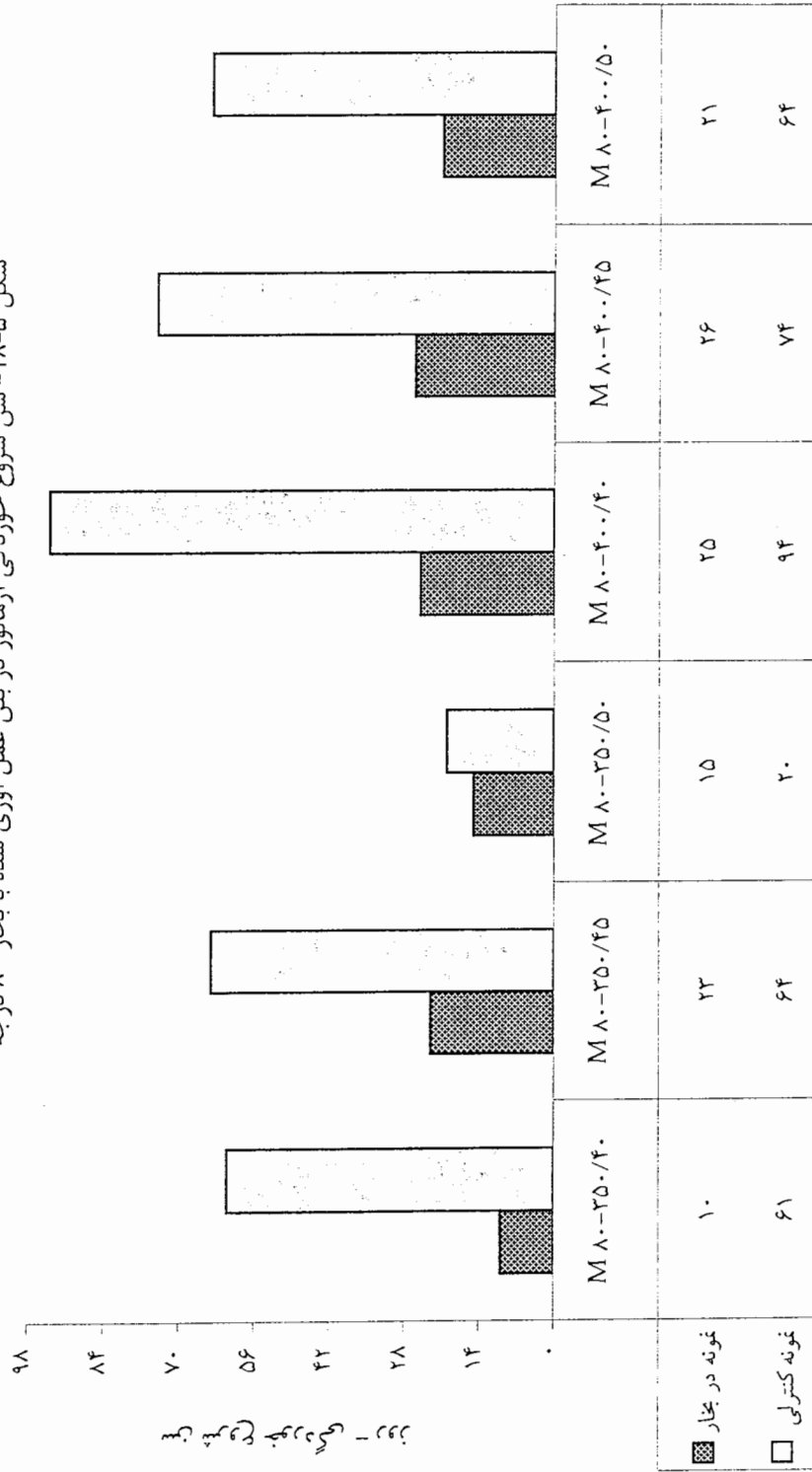




شکل ۵-۱۷ - سن شروع خوردگی آرماتور در بتن عمل آوری شده با بخار ۷۰ درجه



شکل ۵-۱۸- سن شروع خوردگی آرماتور در بتن عمل آوری شده با بخار ۸۰ درجه



## ۵-۵- تجزیه و تحلیل نتایج مقاومت فشاری

در این قسمت ابتدا مقاومت نمونه‌های بتنی را که در چرخه زمانی ۹ ساعت و ۱۸ ساعت به وسیله بخار با دماهای مختلف عمل‌آوری شده‌اند را با نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد آزمایشگاهی که بلوغ معادل نمونه‌های بخار دیده را دارند مقایسه می‌کنیم. طبیعتاً انتظار آن است که مقاومت بتن این دو گروه نزدیک و یا مساوی با هم باشد. نتایج نشان می‌دهد هر چند در بعضی موارد این مسأله اتفاق نیفتاده است اما به نظر می‌رسد در مجموع همخوانی مناسب و قابل قبولی بین نتایج این دو گروه وجود داشته باشد. میانگین مقاومت‌های بدست آمده از بتن‌هایی که به مدت ۹ ساعت با بخار عمل‌آوری شده‌اند  $156 \text{ kg/cm}^2$  بدست آمده است و میانگین مقاومت‌های بدست آمده از نمونه‌هایی که بلوغ بتن آنها معادل نمونه‌های بخار دیده در چرخه عمل‌آوری ۹ ساعته هستند  $160 \text{ kg/cm}^2$  می‌باشد. این مقادیر در چرخه عمل‌آوری ۱۸ ساعته با بخار برای نمونه‌های بخار دیده و نمونه‌های با بلوغ معادل به ترتیب برابر با  $221 \text{ kg/cm}^2$  و  $214 \text{ kg/cm}^2$  بدست آمد. از این مطلب نتیجه می‌گیریم که محاسبات مربوط به بلوغ در مورد بتن‌های این تحقیق به طور تقریبی برقرار است. مقاومت فشاری در اثر عمل‌آوری با بخار در کوتاه‌مدت افزایش پیدا می‌کند. این افزایش بسته به دمای عمل‌آوری، مدت و چرخه عمل‌آوری و شرایط بتن متفاوت خواهد بود. اشکال ۵-۱۹ و ۵-۲۰ افزایش مقاومت بتن را به ترتیب در اثر ۹ ساعت و ۱۸ ساعت عمل‌آوری با بخار نشان می‌دهند. در این نمودارهای میله ای قسمت تحتانی هر شاخص (که کمرنگ تر می باشد) مقاومت نمونه کنترلی را نشان می‌دهد؛ قسمت فوقانی شاخص که به رنگ تیره می باشد افزایش مقاومت بتن در اثر بخاردهی را بیان می‌کند. همانطور که دیده می‌شود افزایش مقاومت بتن در کوتاه‌مدت قابل توجه و نسبتاً زیاد است. به همین جهت استفاده از این سیستم عمل‌آوری در کارخانه‌های تولید قطعات پیش‌ساخته بتنی کاملاً توجیه‌پذیر است.

نکته دیگری که از بررسی نتایج می‌توان استنباط نمود آن است که رشد نسبی مقاومت بتن در اثر بخاردهی در زمانهای کوتاهتر مشهودتر است. به عبارت دیگر بخاردهی، مقاومت بتن را در ساعات اولیه بیشتر افزایش می‌دهد. این مطلب در شکل ۵-۲۱ با وضوح بیشتری درک می‌شود. بر اساس این شکل، در اثر عمل‌آوری بتن در بخار به مدت ۹ ساعت، میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های بخار دیده به مقدار  $156 \text{ kg/cm}^2$  رسیده است و میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های کنترلی هم سن، مقدار  $85 \text{ kg/cm}^2$  می‌باشد. به عبارت دیگر در اثر بخاردهی بتن در بخار با این شرایط، افزایش مقاومت به میزان ۸۴ درصد اتفاق افتاده است. این در حالی است که اگر نمونه‌های عمل‌آوری شده در چرخه ۱۸ ساعته را بررسی نمائیم به ترتیب در نمونه‌های بخار دیده و کنترلی به مقاومت‌های میانگین  $221 \text{ kg/cm}^2$  و  $157 \text{ kg/cm}^2$  می‌رسیم. با این وضعیت افزایش مقاومت، ۴۱ درصد خواهد بود. بنابراین می‌توان این نتیجه را گرفت که آهنگ رشد نسبی مقاومت بتن در اثر بخاردهی با گذشت زمان کم می‌شود.

هر چند مقاومت زود هنگام این بتن‌ها رشد قابل توجهی نسبت به نمونه‌های کنترلی دارد، اما درازمدت مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در بخار کمتر از نمونه‌هایی است که در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل‌آوری شده‌اند. میزان افت مقاومت به‌طور نسبی ارتباط مستقیمی با طول دوره عمل‌آوری داشته است. به‌طوریکه نمونه‌های عمل‌آوری شده در زمانهای طولانی‌تر افت مقاومت بیشتری داشته‌اند. شرح کاملتر این نتایج در این قسمت ارائه می‌شود.

شکل ۵-۲۲ نتایج مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای ۵۰ درجه را نشان می‌دهد. به جز یک مورد، در مجموع مقاومت نمونه‌های عمل‌آوری شده در بخار در درازمدت افت کرده است. در اثر ۹ ساعت عمل‌آوری بتن با بخار در این دما، مقاومت ۲۸ روزه بتن به‌طور میانگین حدود ۱۰ درصد افت کرده است. این افت در اثر ۱۸ ساعت عمل‌آوری با بخار معادل ۹ درصد بدست آمد. در این دما تأثیر طول مدت عمل‌آوری مشهود نیست.

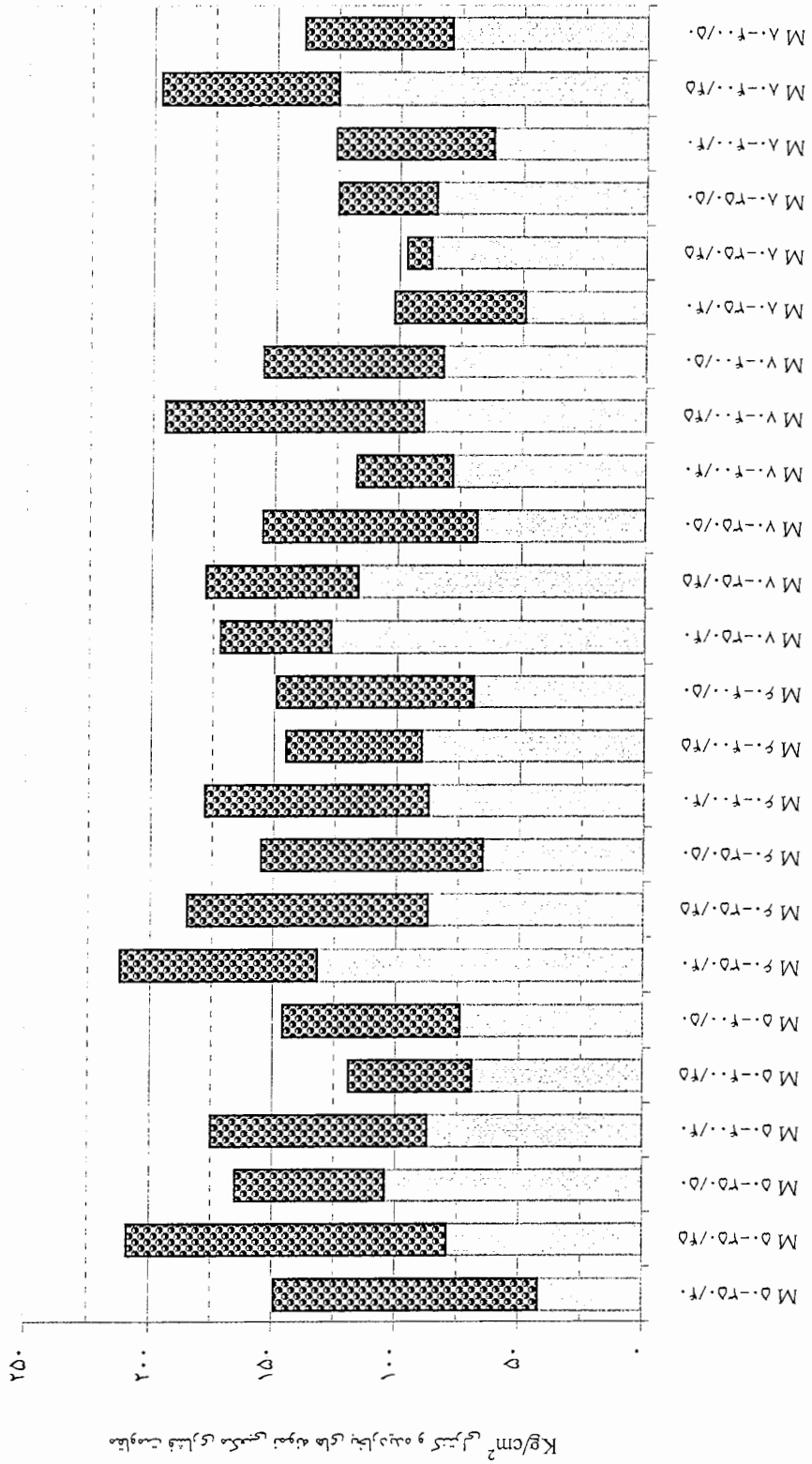
شکل ۵-۲۳ نتایج مربوط به دمای ۶۰ درجه و تأثیر آن بر مقاومت ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. در این دما نیز در غالب موارد کاهش مقاومت درازمدت دیده می‌شود. در اثر عمل‌آوری با بخار به مدت ۹ ساعت و ۱۸ ساعت به ترتیب ۶ درصد و ۱۲ درصد کاهش در مقاومت ۲۸ روزه دیده می‌شود.

شکل ۵-۲۴ مربوط به دمای ۷۰ درجه است. به غیر از دو مورد که نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بخار دیده نزدیک به نمونه‌های کنترلی بدست آمده است در سایر موارد افت مقاومت مشاهده شد. به‌طور میانگین به ترتیب حدود ۱۲ و ۹ درصد افت، در مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌هایی که ۹ و ۱۸ ساعت با بخار عمل‌آوری شده‌اند دیده می‌شود.

همانگونه که در شکل ۵-۲۵ مربوط به عمل‌آوری بتن‌ها در بخار با دمای ۸۰ درجه نشان داده شده است، به‌طور میانگین در اثر عمل‌آوری بتن در چرخه ۹ ساعته و ۱۸ ساعته، به ترتیب حدود ۷ درصد و ۱۵ درصد افت در مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌ها اتفاق افتاده است.

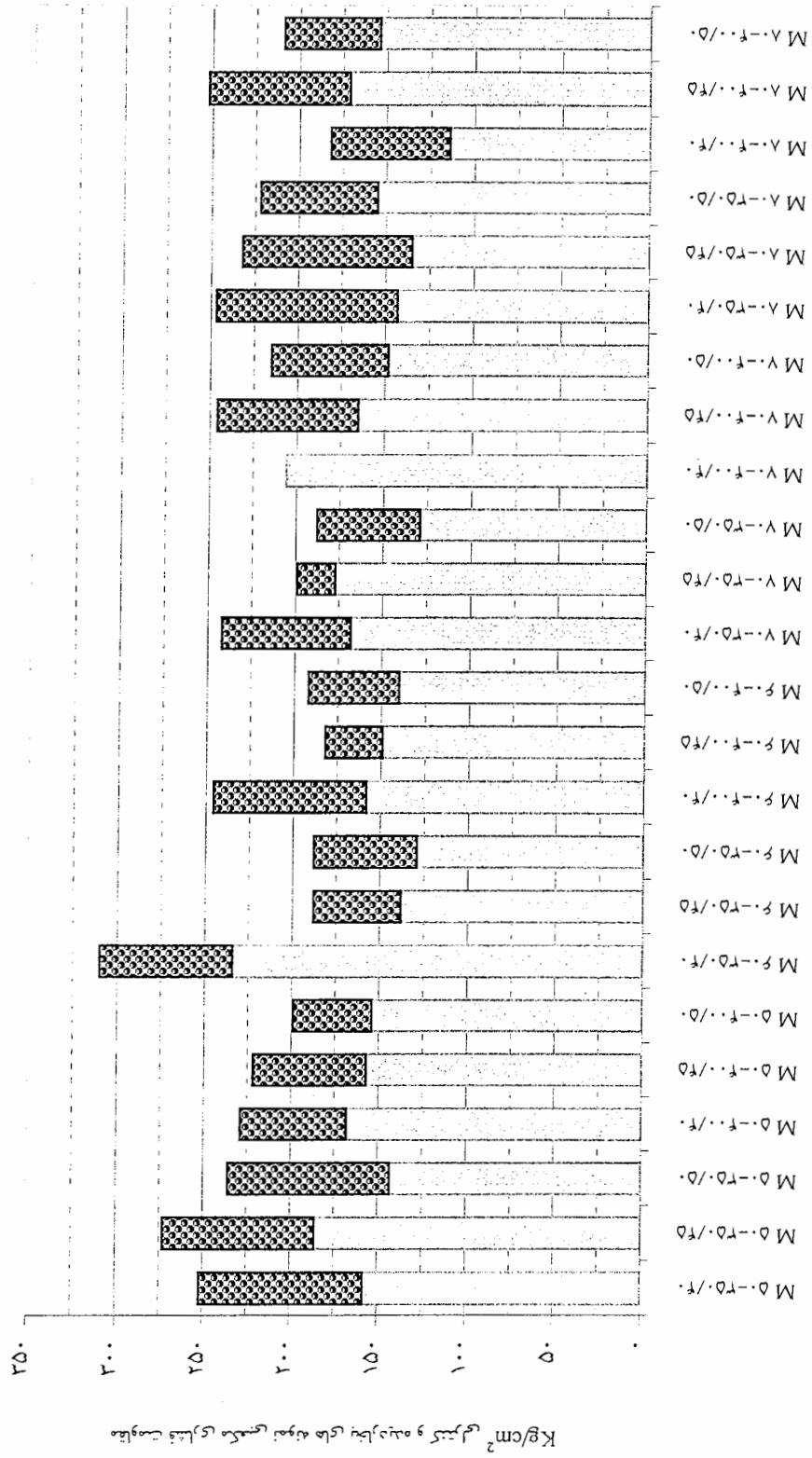
هر چند همخوانی نتایج بدست آمده کمتر از حد انتظار است، اما در مجموع می‌توان گفت در اثر بخاردهی بتن با بخار در محدوده دمایی ۵۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد به مدت ۹ ساعت، به‌طور میانگین ۹ درصد در مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن افت ایجاد می‌شود. میانگین این افت مقاومت در اثر ۱۸ ساعت بخاردهی، ۱۱ درصد بدست آمد.

شکل ۵-۱۹- افزایش مقاومت فشاری بتن در اثر ۹ ساعت عمل آوری با بخار



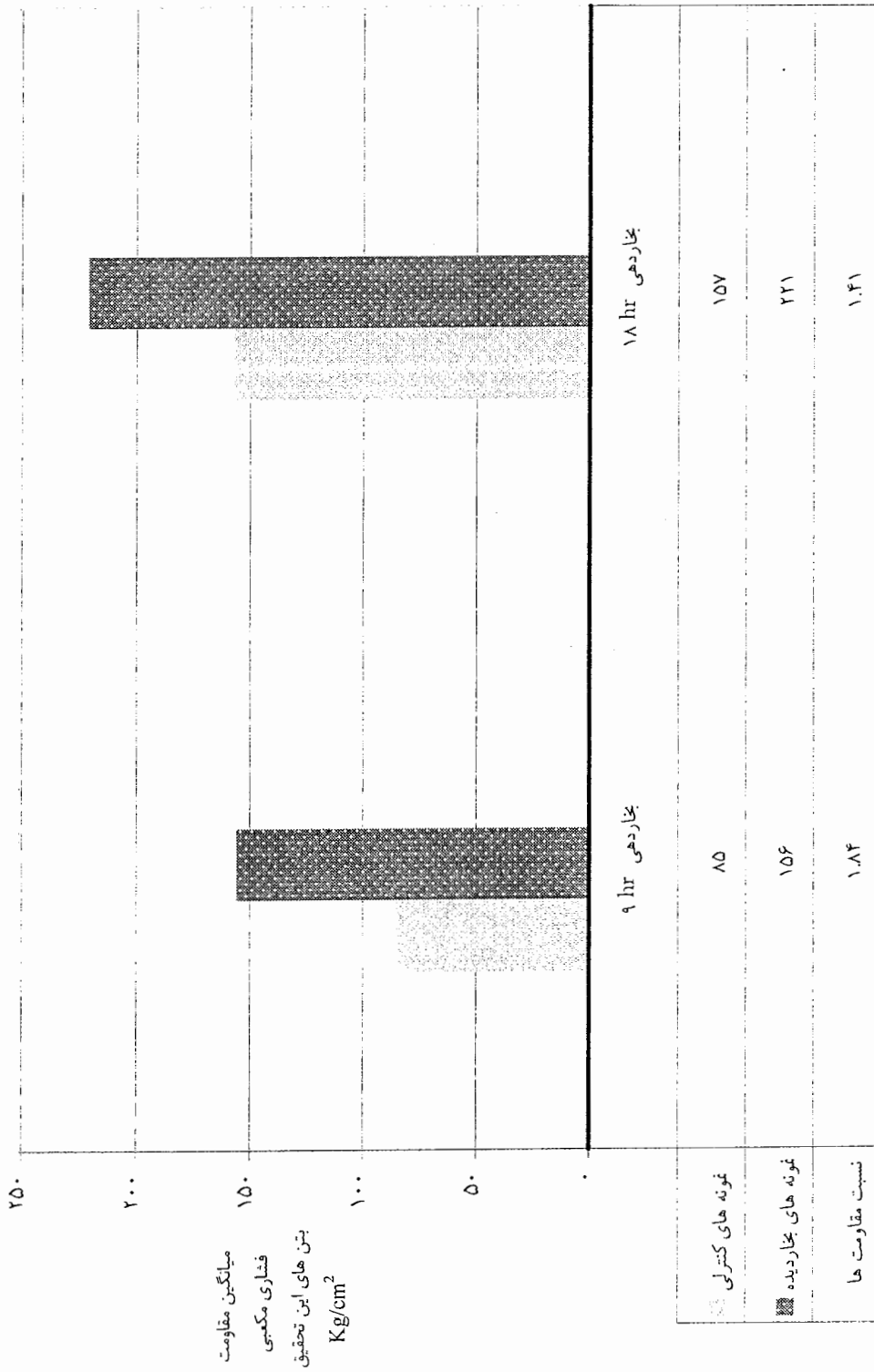
شماره طرح اختلاط

شکل ۵-۲۰- افزایش مقاومت فشاری بتن در اثر ۱۸ ساعت عمل آوری با بخار



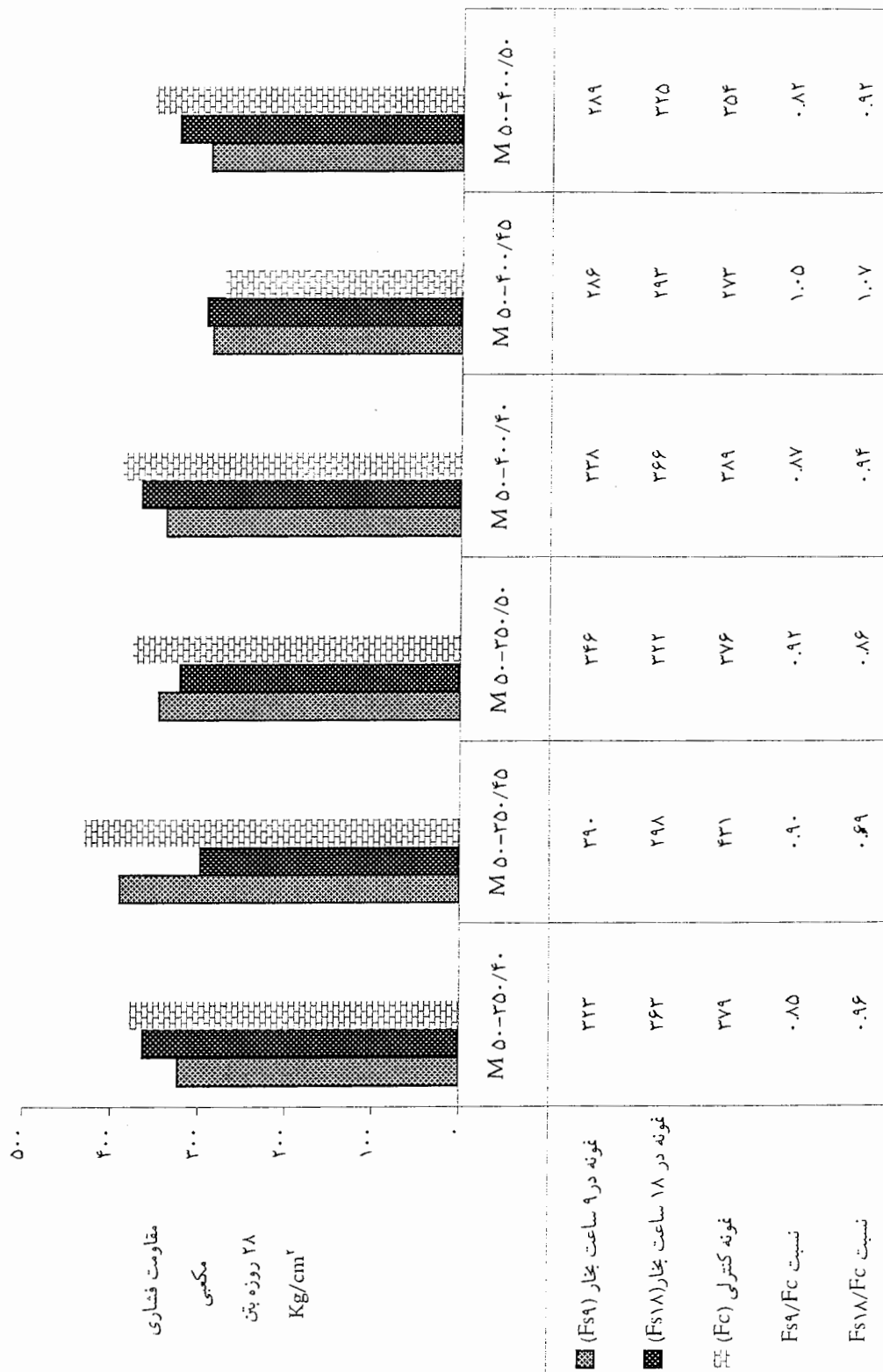
شماره طرح اختلاط

شکل ۵-۲۱- بررسی تاثیر میزان عمل آوری با یخار بر رشد مقاومت فشاری بتن

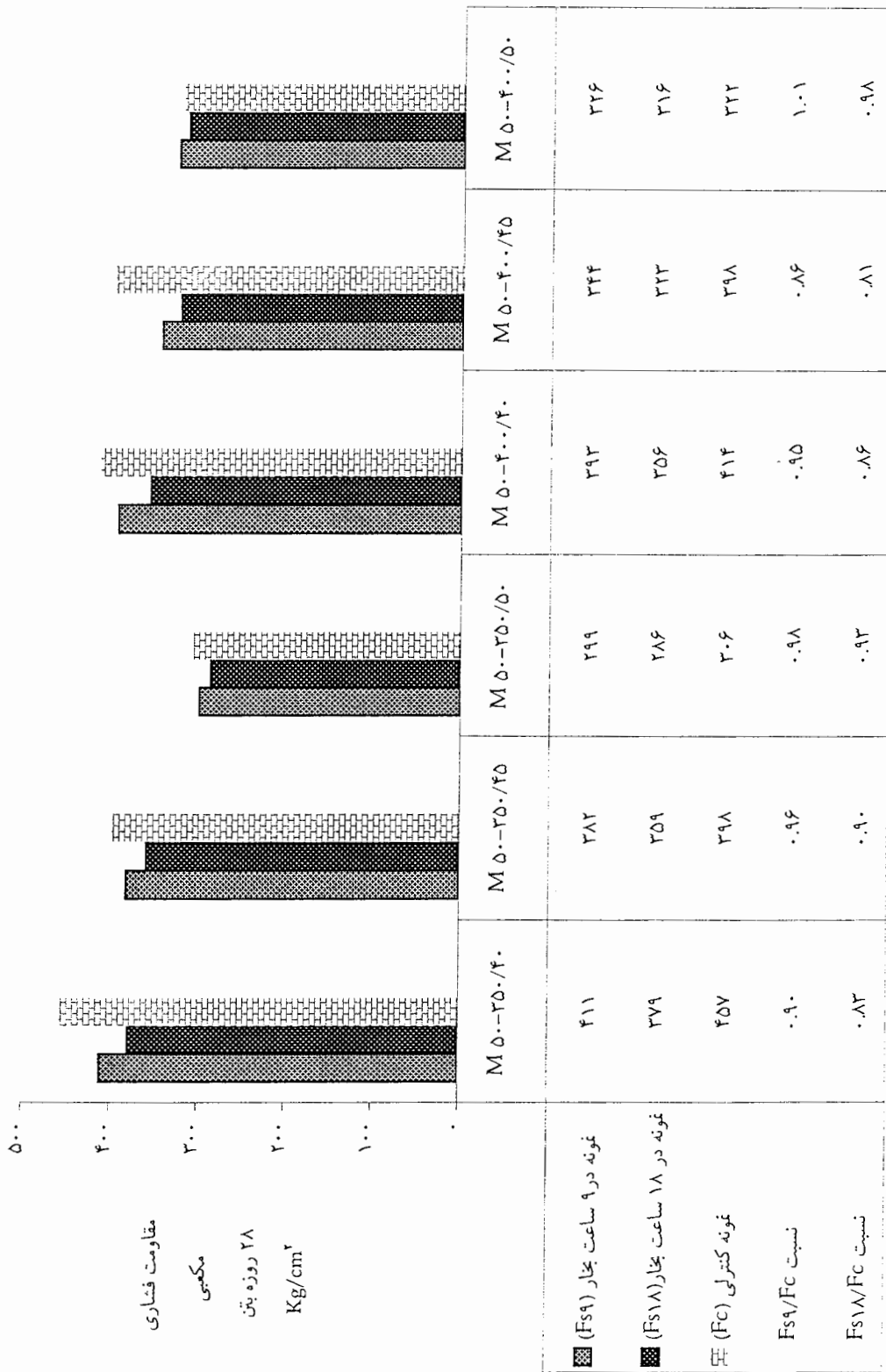




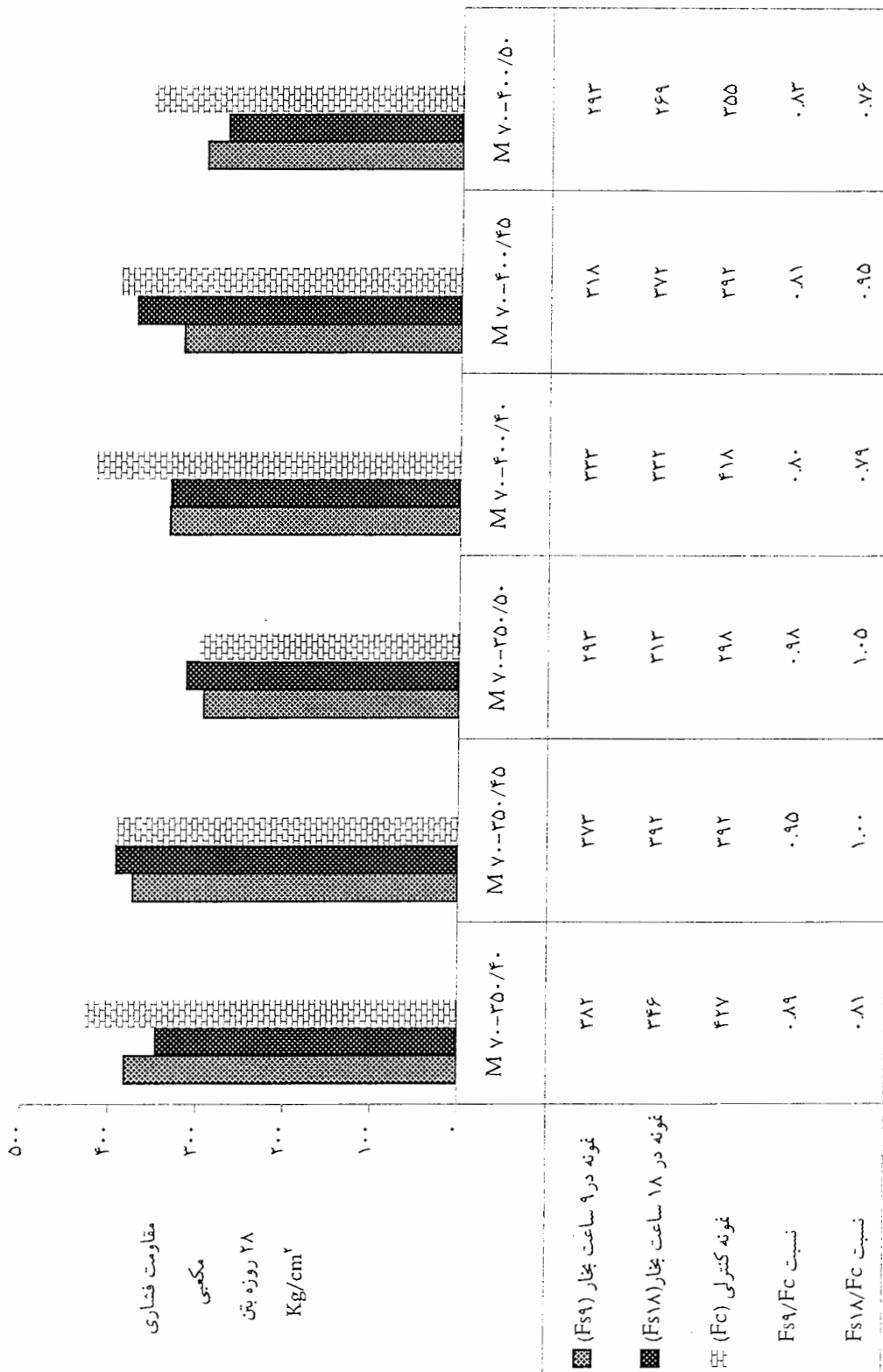
شکل ۵-۲۲- تاثیر عمل آوری بتن با بخار ۵۰ درجه بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن



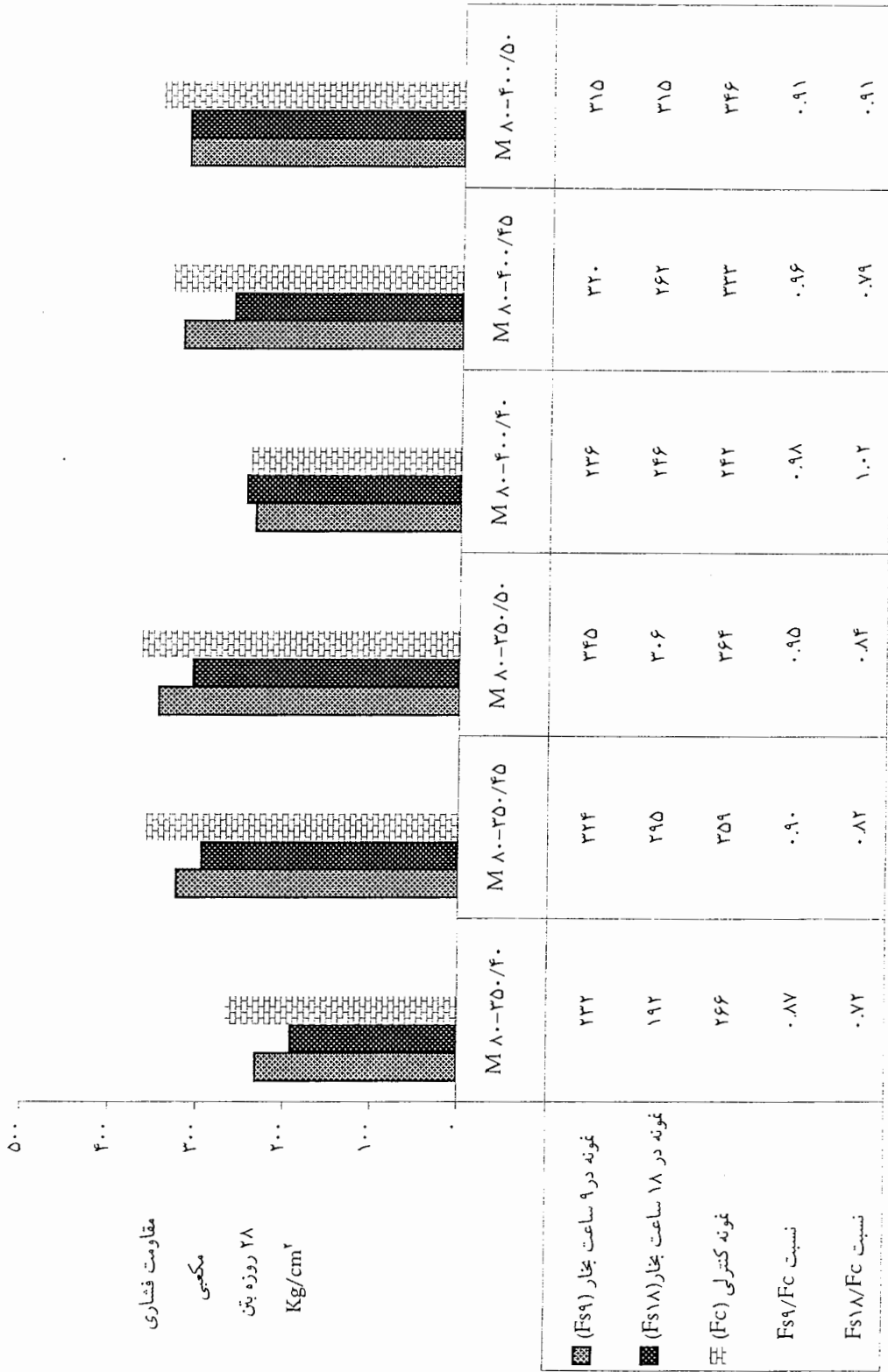
شکل ۵-۲۲- تاثیر عمل آوری بتن با بخار ۵۰ درجه بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن



شکل ۵-۲۴- تاثیر عمل آوری بتن با بخار ۷۰ درجه بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن



شکل ۵-۲۵- تاثیر عمل آوری بتن با بخار ۸۰ درجه بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن



## فصل ششم: نتیجه گیری نهایی و پیشنهادها

### ۱-۶ - نتیجه گیری نهایی

با در نظر گرفتن آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق و اطلاعات موجود در منابع مختلف و با توجه به محدودیت‌های موجود در مطالعات آزمایشگاهی، مجموعاً موارد ذیل در عمل‌آوری بتن به وسیله بخار مطرح بوده و قابل نتیجه‌گیری می‌باشد:

۱ - در بررسی پارامترهای دوام بتن، ضروری است به وضعیت واقعی سازه و شرایط محیطی که با آن مواجه است توجه کافی نمود.

۲ - ممکن است آزمایش‌های مختلف دوام بتن، نتایج متفاوت با یکدیگر را ارائه دهند که در این خصوص، توجه به شرایط بهره‌برداری سازه می‌تواند راهنمای مناسبی در مقایسه نتایج باشد.

۳ - نتایج جذب آب مویینه بتن برای آن دسته از سازه‌های بتنی که سیستم جذب آب آنها به صورت مویینه است، نظیر بتن‌هایی که در شرایط جزر و مد آب دریا قرار می‌گیرند و یا سازه‌های بتنی که بر روی بستر مرطوب اجرا می‌شوند (نظیر شالوده‌ها) قابل استفاده است.

۴- به نظر می‌رسد سیستم جذب آب در سازه‌هایی که به طور کامل در آب قرار می‌گیرند و غرقاب می‌شوند با شیوه آزمایش جذب آب اولیه و نهایی بتن که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است تشابه و همخوانی بیشتری دارد. بنابراین از نتایج این آزمایش برای سازه‌های بتنی این منطقه استفاده می‌شود.

۵- با توجه به وضعیت آب و هوایی و محیطی سواحل جنوبی کشور و شرایط مهاجم و خورنده آب خلیج فارس تأکید می‌شود که نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی به‌طور ویژه باید مورد توجه قرار گیرد. در سازه‌های بتنی مسلح که تمام یا بخشی از آن در منطقه جزر و مد آب خلیج فارس قرار می‌گیرد، مهمترین پدیده ای که مطرح است مسأله خوردگی میلگردها می‌باشد. بدین جهت گفته می‌شود که نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی برای این منطقه حائز اهمیت است. بدیهی است با توجه به آنکه خوردگی میلگرد در زیر آب دریا اساساً مطرح نیست، بنابراین نتایج آزمایش پتانسیل خوردگی برای سازه‌های بتنی مسلحی که در منطقه زیر آب دریا واقع می‌شوند اهمیت کمتری دارد.

۶- نتایج جذب آب مویینه بتن با شرایطی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت نشان می‌دهد در اثر عمل‌آوری بتن در بخار با دمای بالاتر از ۵۰ درجه سانتیگراد، ضریب جذب مویینه افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد عمل‌آوری بتن در بخار با دماهای بالاتر، بتن را به لحاظ خاصیت موئینگی آسیب پذیر می‌کند. پیشنهاد می‌شود در بتن‌هایی که جذب آب مویینه در آنها اهمیت بیشتری دارد، نظیر بتن‌های واقع در منطقه جزر و مد، حداکثر دمای عمل‌آوری با بخار به حد ۵۰ درجه سانتیگراد محدود شود.

۷- جذب آب مویینه بتن در اثر افزایش عیار سیمان، بیشتر می‌شود. به همین جهت کاهش عیار سیمان در بتن‌هایی که جذب آب آنها بیشتر به طریق مویینه صورت می‌گیرد، توصیه می‌شود.

۸- جذب آب نهایی بتن‌های عمل‌آوری شده در بخار با دمای تا حدود ۷۰ درجه سانتیگراد، افزایش چندانی را نسبت به نمونه‌های کنترلی که در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل‌آوری شده‌اند نشان نمی‌دهد. در بخار با دمای بالاتر از ۷۰ درجه سانتیگراد، در برخی از بتن‌ها افزایش قابل توجهی

در جذب آب نهایی بتن دیده می‌شود. لذا پیشنهاد می‌شود برای بتن‌هایی که به طور کامل در داخل آب قرار می‌گیرند، حداکثر دمای عمل‌آوری با بخار در حد ۷۰ درجه سانتیگراد محدود شود.

۹- عمل‌آوری بتن در بخار با دماهای ۵۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد که در بتن‌های این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت تأثیر مشخصی بر جذب آب اولیه بتن (مربوط به زمان ۳۰ دقیقه) نداشته است. به نظر می‌رسد حساسیت جذب آب اولیه بتن چندان زیاد نیست.

۱۰- در اثر بخار دهی بتن با بخار به ویژه در دماهای بالاتر از ۵۰ درجه سانتیگراد، مقاومت بتن در برابر نفوذ عوامل خوردنده میلگرد کاهش می‌یابد. هر چه بخار با دمای بالاتری مورد استفاده قرار گیرد، شروع خوردگی میلگرد سریع‌تر اتفاق می‌افتد.

۱۱- توصیه می‌شود برای بتن‌های مسلح واقع در منطقه جزر و مد و منطقه خارج از آب دریا که در سواحل جنوبی کشور اجرا می‌شود، به دلیل آنکه خوردگی میلگرد بسیار محتمل است و اهمیت ویژه‌ای دارد، جهت عمل‌آوری بتن از بخاردهی استفاده نشود.

۱۲- با توجه به نتایج آزمایش‌های بدست آمده و در نظر گرفتن شرایط بهره‌برداری بتن در قسمت‌های مختلف آب دریا، توصیه می‌شود ملاحظات زیر در خصوص بخاردهی بتن مورد توجه قرار گیرد:

الف- در منطقه زیر آب دریا برای بتن مسلح و غیر مسلح، حداکثر دمای بخاردهی ۷۰ درجه سانتیگراد استفاده شود.

ب- در منطقه جزر و مد آب دریا برای بتن غیر مسلح، حداکثر دمای بخاردهی ۵۰ درجه سانتیگراد مناسب است.

ج - برای بتن مسلح که در منطقه جزر و مد و یا بیرون آب دریا قرار می‌گیرد، استفاده از بخار جهت عمل‌آوری بتن مناسب نیست.

۱۳- بیشترین رشد مقاومت فشاری بتن در اثر عمل‌آوری با بخار، در ساعات اولیه بخاردهی اتفاق می‌افتد. با تداوم این نوع عمل‌آوری، رشد نسبی مقاومت فشاری بتن بخار دیده نسبت به بتن عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد آزمایشگاهی کمتر می‌شود.

۱۴- مقاومت فشاری درازمدت بتن در اثر عمل‌آوری با بخار افت می‌کند. بررسی افت مقاومت ۲۸ روزه بتن‌های این تحقیق که در محدوده دمایی ۵۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد به وسیله بخار عمل‌آوری شده‌اند نشان می‌دهد، به طور میانگین در اثر ۹ ساعت عمل‌آوری با بخار ۹ درصد، و در اثر ۱۸ ساعت عمل‌آوری با بخار به مقدار ۱۱ درصد از مقاومت ۲۸ روزه بتن‌ها کاسته می‌شود.

## ۲-۶ - پیشنهادهایی برای ادامه تحقیق

جهت ادامه تحقیقات و مشخص شدن ابعاد تازه‌تری از تأثیر عمل‌آوری با بخار بر دوام و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بتن، موارد زیر جهت بررسی بیشتر پیشنهاد می‌گردد:

- ۱- بررسی تأثیر متقابل افزودنی‌ها و عمل‌آوری با بخار بر دوام بتن، به ویژه بررسی وجود افزودنی‌های حبابزا
- ۲- بررسی تأثیر مقدار عمل‌آوری با بخار؛ به نظر می‌رسد با کاهش زمان عمل‌آوری با بخار به نحو مؤثری بتوان از اثرات منفی بخاردهی بر دوام بتن کاست.
- ۳- بررسی تأثیر استفاده از دوده سیلیسی و پوزولان‌ها در بتن‌های عمل‌آوری شده با بخار
- ۴- مطالعه در خصوص تأثیر بخاردهی بر مقاومت کششی، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته
- ۵- انجام آزمایش‌های کاملتر دوام بتن‌های عمل‌آوری شده با بخار نظیر مقاومت الکتریکی، شدت خوردگی ماکروپیل، شدت خوردگی میکروپیل، سرعت پالس، نفوذ یون کلر، نفوذ یون سولفات، تعیین عمق کربناتاسیون و ...
- ۶- انجام آزمایش‌های دوام در قطعات بتنی پیش ساخته که برای مدت طولانی در معرض شرایط مهاجم آب خلیج فارس قرار گرفته‌اند.



۷- انجام آزمایش نفوذپذیری آب (تحت فشار) در بتن‌های عمل‌آوری شده به وسیله بخار؛ به نظر می‌رسد نتایج این آزمایش برای قطعات بتنی پیش‌ساخته که در اعماق آب دریا نصب می‌شوند قابل قبول‌تر از سایر آزمایش‌ها باشد.

۸- بررسی تأثیر عیارهای سیمان پائین‌تر و بالاتر از حدودی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت.

۹- تحقیق در خصوص تأثیر دانه‌بندی، حداکثر اندازه سنگدانه و نوع سیمان بر خصوصیات دوام و خوردگی بتن مسلح عمل‌آوری شده در بخار

۱۰- مطالعه در خصوص تأثیر عمل‌آوری بتن سبکدانه به وسیله بخار

۱۱- بررسی تنش‌های حرارتی اعمال شده بر قطعات بتنی پیش‌ساخته حجیم و نیمه‌حجیم که به وسیله بخار عمل‌آوری می‌شوند.

۱۲- تحقیق در خصوص تأثیر عمل‌آوری بتن با بخار در فشار زیاد ( اتوکلاو) بر دوام بتن

۱۳- مطالعه خزش بتن عمل‌آوری شده با بخار و بررسی تأثیر آن در بتن پیش‌تنیده

۱۴- آنالیز اقتصادی در خصوص کاهش هزینه‌های ساخت و تولید قطعات پیش‌ساخته بتنی که به وسیله بخار عمل‌آوری می‌شوند و بررسی میزان صرفه‌جویی در هزینه‌ها

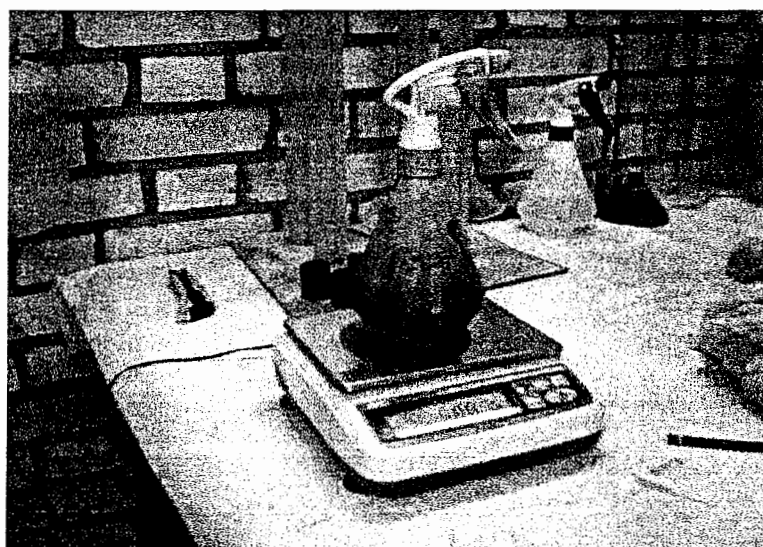
۱۵- بررسی تأثیر حذف زمان تأخیر در چرخه عمل‌آوری با بخار بر دوام بتن؛ ممکن است بعضاً در شرایط کارگاهی قطعات بتنی تولید شده بدون سپری شدن زمان گیرش اولیه بتن و زودتر از زمان مجاز به تونل‌های بخار منتقل شوند. بررسی اثرات این خطای کارگاهی می‌تواند اطلاعات مفیدی را در اختیار بگذارد.

## پیوست - تصاویر تحقیق

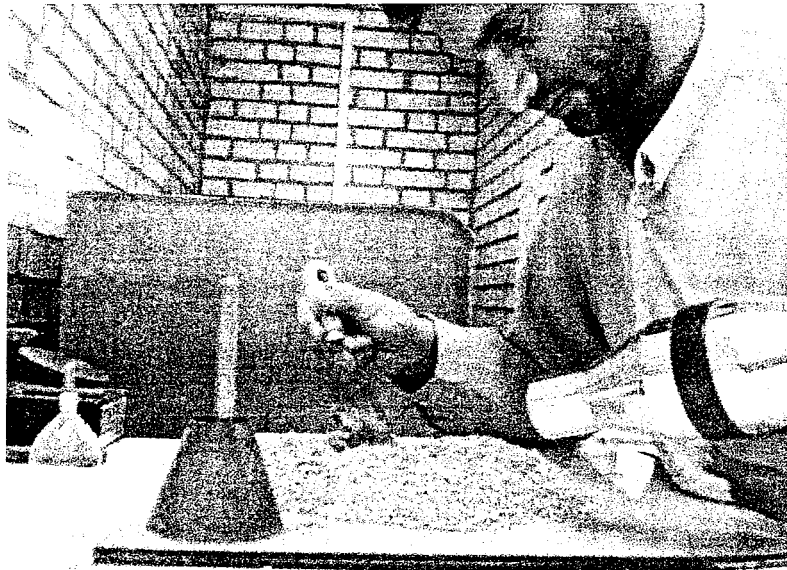
با توجه به اینکه این تحقیق به صورت آزمایشگاهی انجام شده است، ارائه تصاویری از مراحل مختلف فعالیت ها می تواند کامل کننده مشخصات تحقیق باشد. بر این اساس عکس هایی در حین انجام آزمایش های مختلف تهیه گردید که در این قسمت ارائه می گردد.



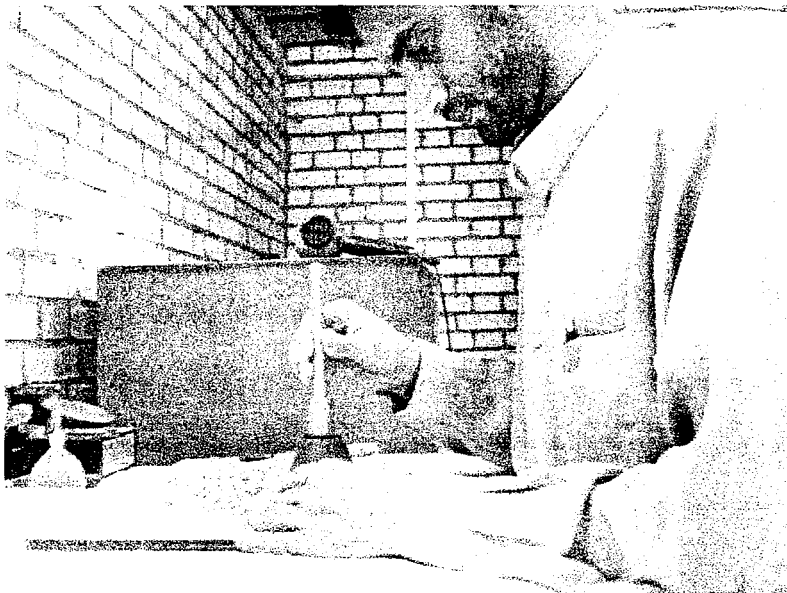
ت ۱- توزین پودر روان کننده جهت ساختن محلول



ت ۲- توزین محلول روان کننده جهت استفاده در بتن



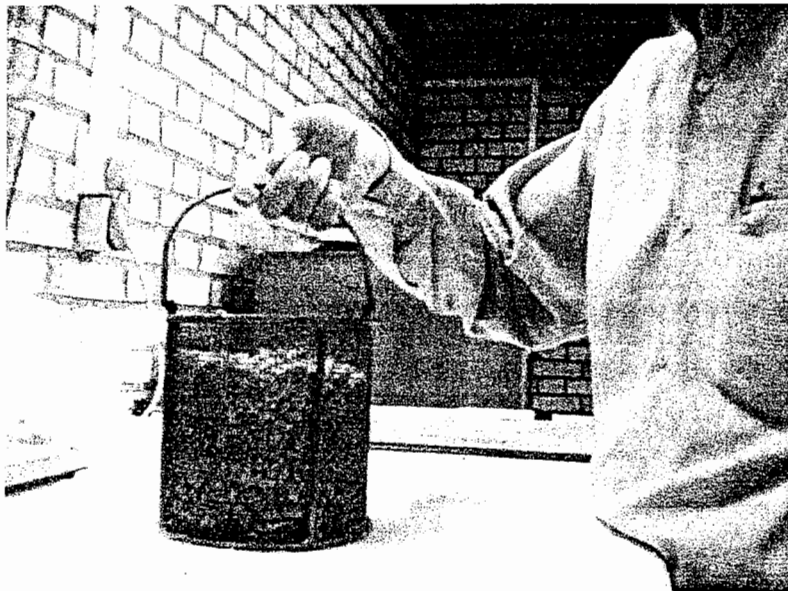
ت ۳- کاهش رطوبت ماسه جهت رسیدن به حالت اشباع با سطح خشک (SSD)



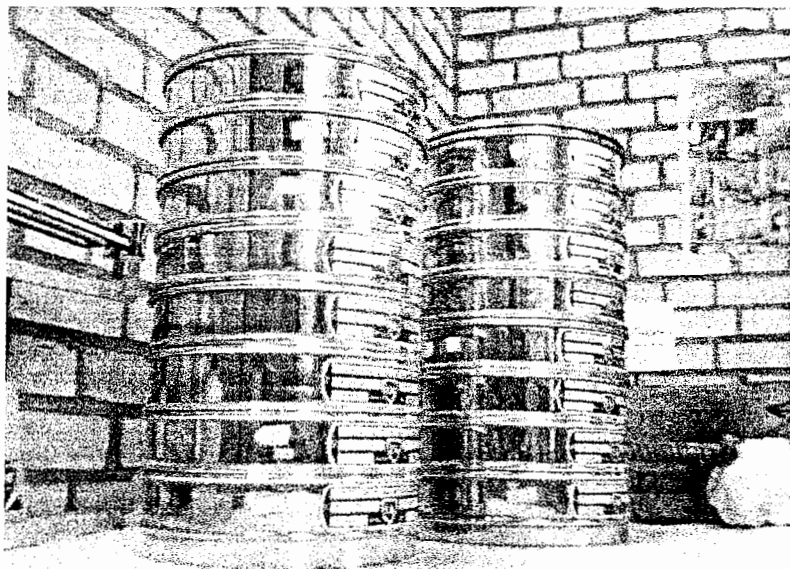
ت ۴- جهت تعیین چگالی و جذب آب ماسه از ماسه اشباع با سطح خشک استفاده می شود.



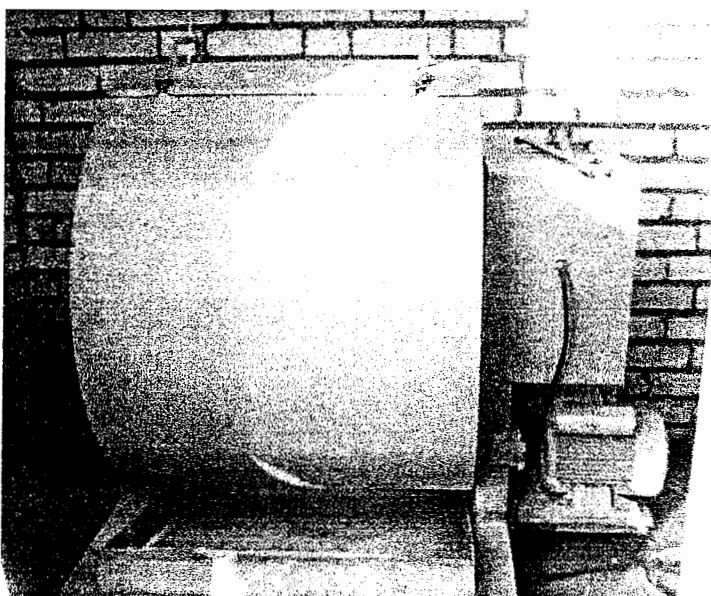
ت ۵- تعیین چگالی ماسه به وسیله بالن ژوژه



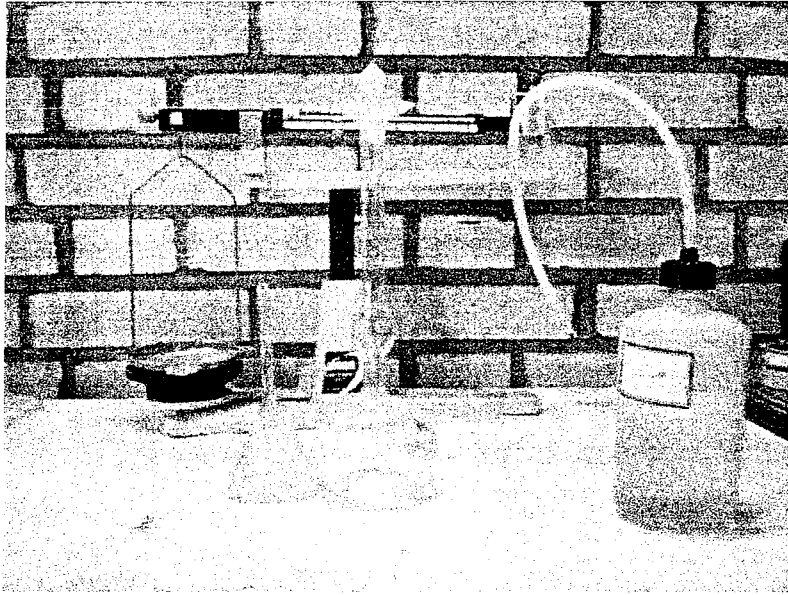
ت ۶- تعیین چگالی شن



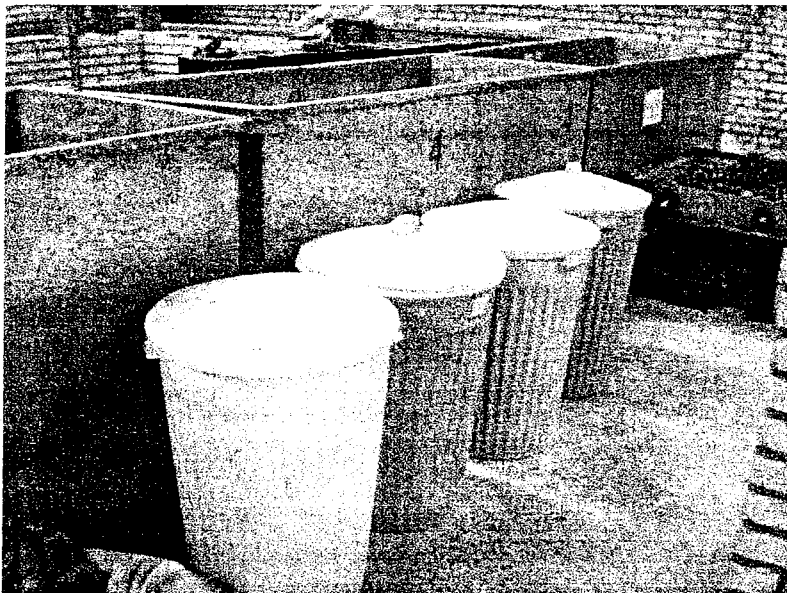
ت ۷- دانه بندی شن و ماسه



ت ۸- تعیین درصد سایش شن به وسیله دستگاه لوس آنجلس



ت ۹- تعیین چگالی سیمان به وسیله فلاسک لوشاتلیه



ت ۱۰- محل نگهداری سنگدانه ها



ت ۱۱- توزین مصالح جهت ساخت بتن

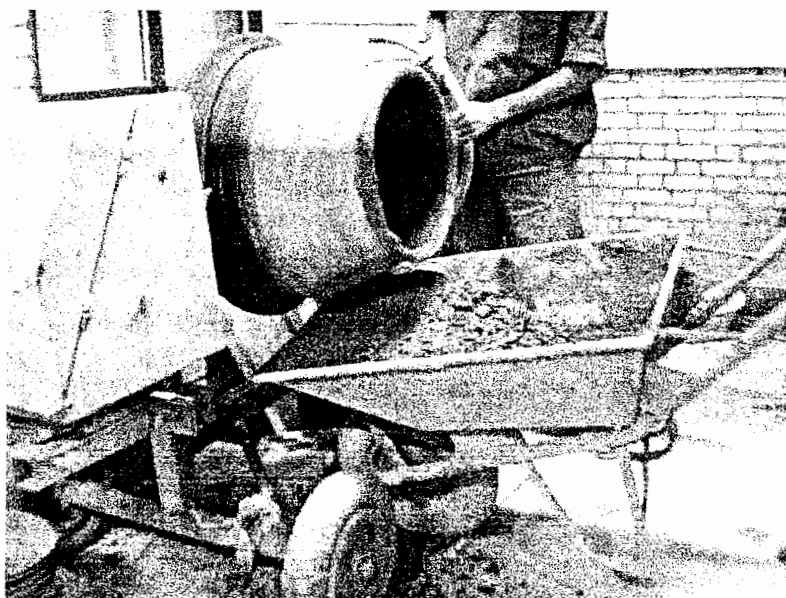


ت ۱۲- نمایی از محل ساخت بتن در آزمایشگاه : مصالح توزین شده، مخلوط کن آزمایشگاهی، ظرف وزن مخصوص، وسایل اسلامپ و ...





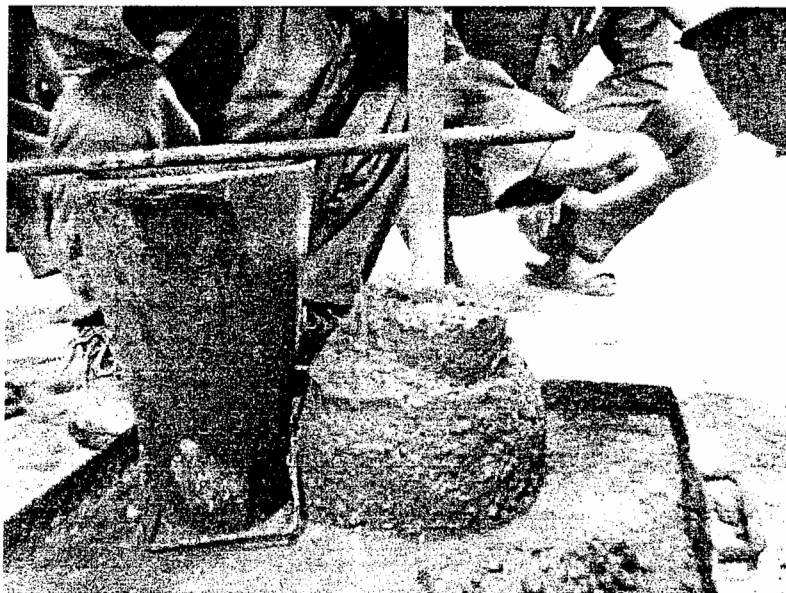
ت ۱۳- اسپری نمودن روان کننده به بتن داخل مخلوط کن آزمایشگاهی  
برای افزایش روانی بتن



ت ۱۴- بتن ساخته شده در حال تخلیه از مخلوط کن



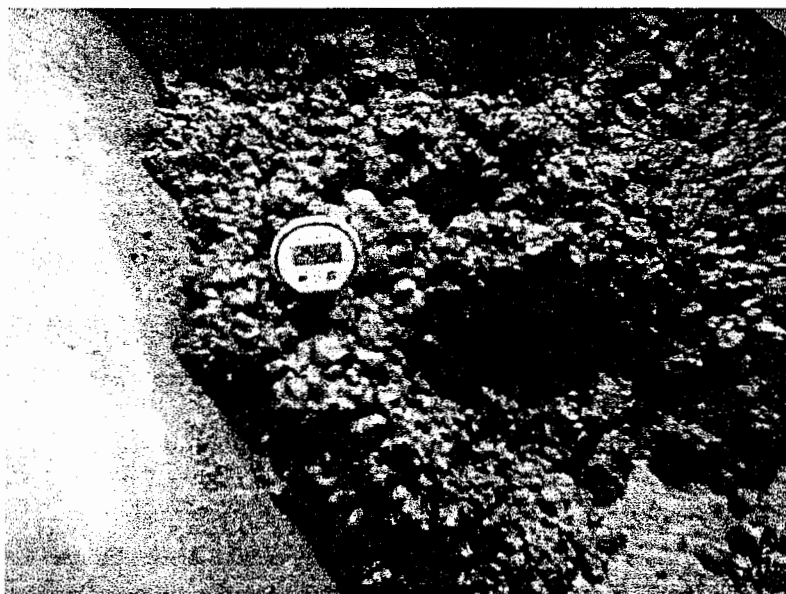
ت ۱۵- آزمایش روانی بتن (اسلامپ)



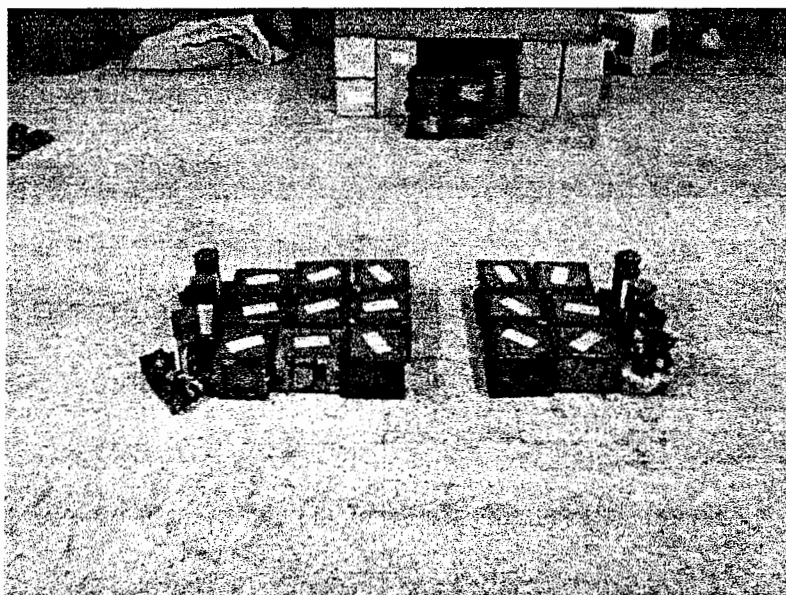
ت ۱۶- در آزمایش اسلامپ میزان افت مرکز بتن اندازه گیری می شود.



ت ۱۷- تعیین وزن مخصوص بتن تازه به وسیله ظرف ۱۴ لیتری



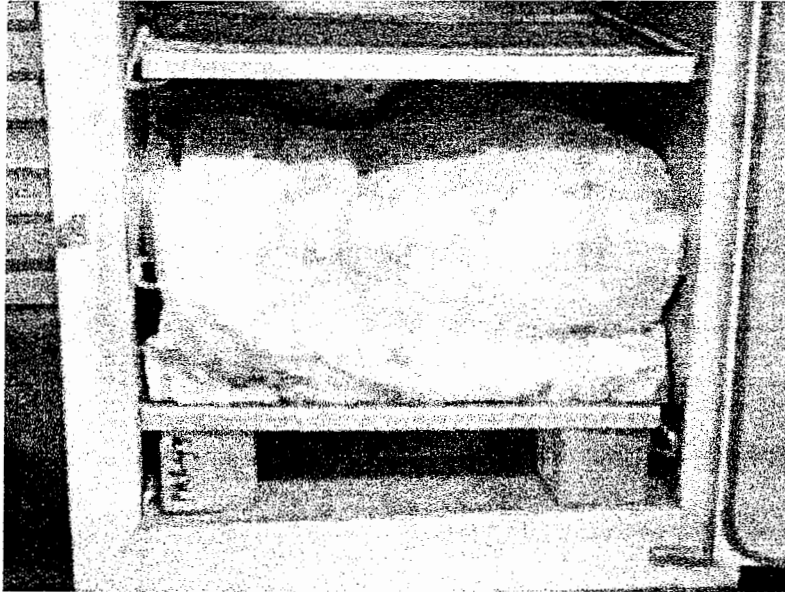
ت ۱۸- ثبت دمای بتن تازه



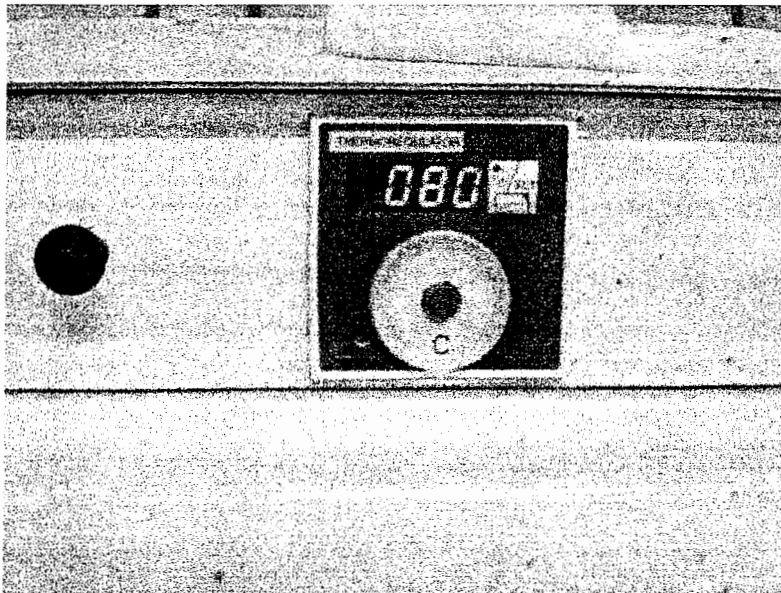
ت ۲۱- آزمون‌ها به دو گروه تقسیم شدند: عمل آوری یک گروه در شرایط بخار و گروه دوم در شرایط استاندارد آزمایشگاهی انجام شد.



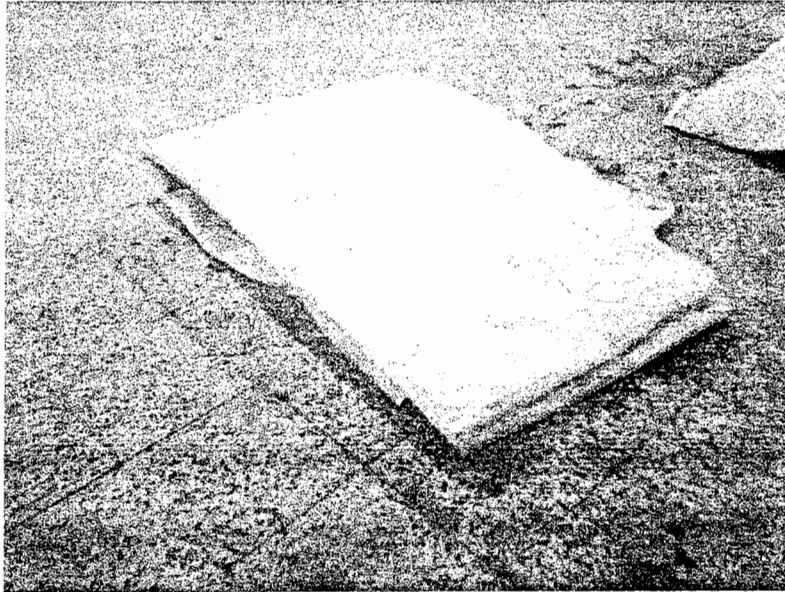
ت ۲۲- جهت شبیه سازی شرایط بخار در آزمایشگاه از اون (گرمچال) استفاده شد.



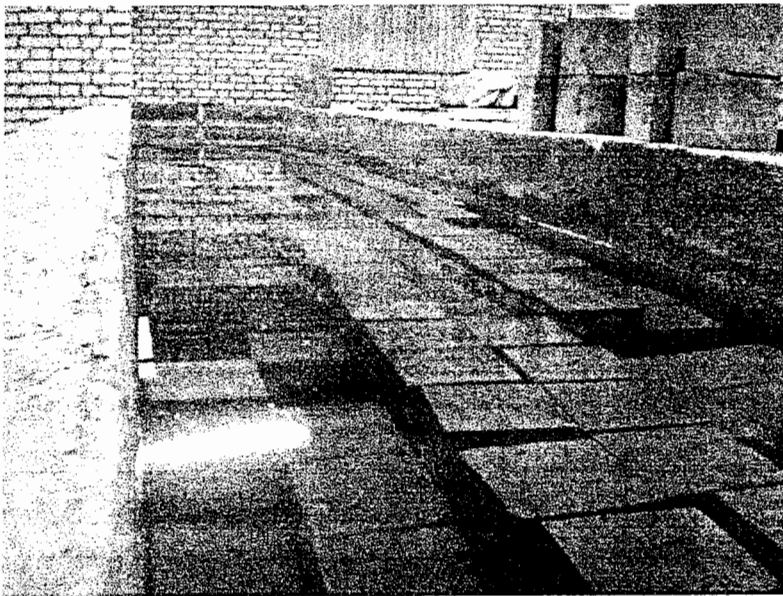
ت ۲۵- جهت حفظ رطوبت بتن ، علاوه بر پلاستیک ضخیم  
از پوشش پشم شیشه نیز استفاده شد.



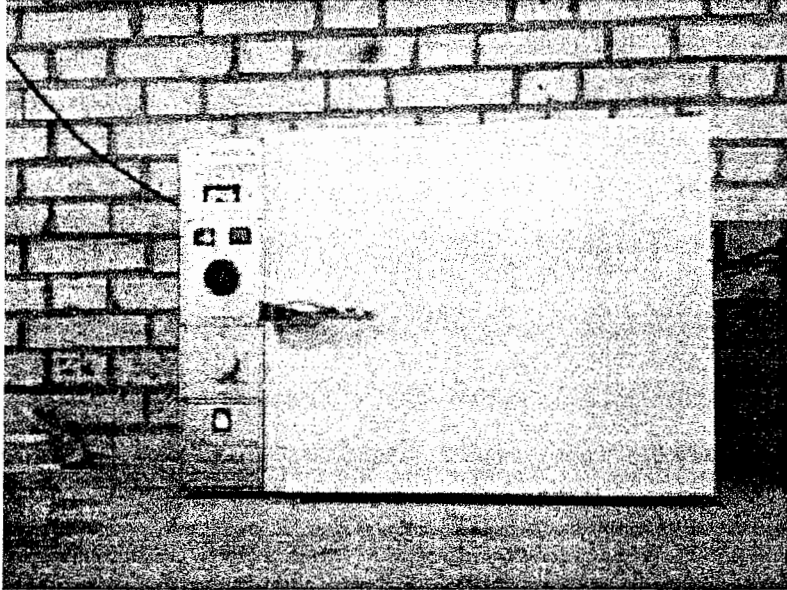
ت ۲۶- تنظیم دمای گرمچال به اندازه مورد نظر



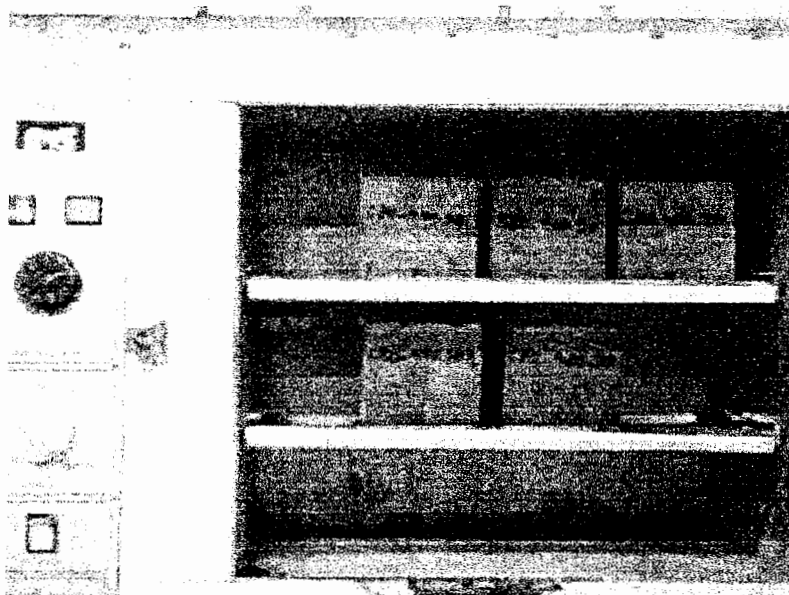
ت ۲۷- نمونه ها پس از خروج از گرمچال در داخل پشم شیشه قرار گرفتند تا خنک شدن آنها به تدریج انجام شود.



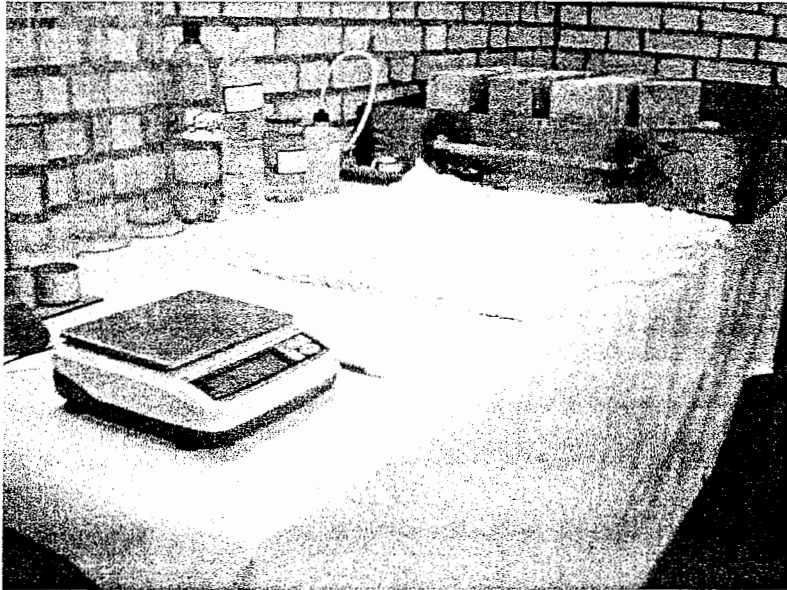
ت ۲۸- عمل آوری نمونه های کنترلی در شرایط استاندارد آزمایشگاهی



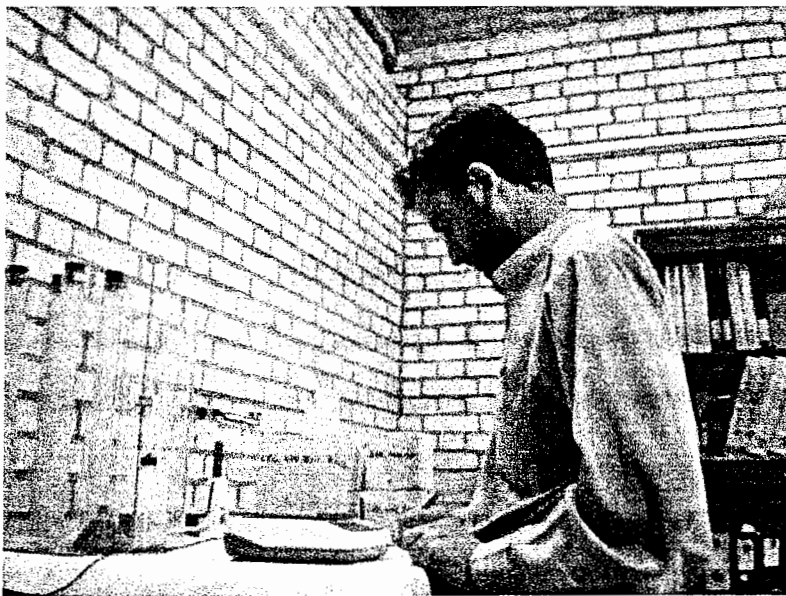
ت ۲۹- آزمون‌های مربوط به آزمایش‌های جذب آب، به مدت دو هفته در گرمچال دیگری با دمای ۵۰ درجه کاملاً خشک شدند.



ت ۳۰- خشک شدن آزمون‌های آزمایش‌های جذب آب در گرمچال

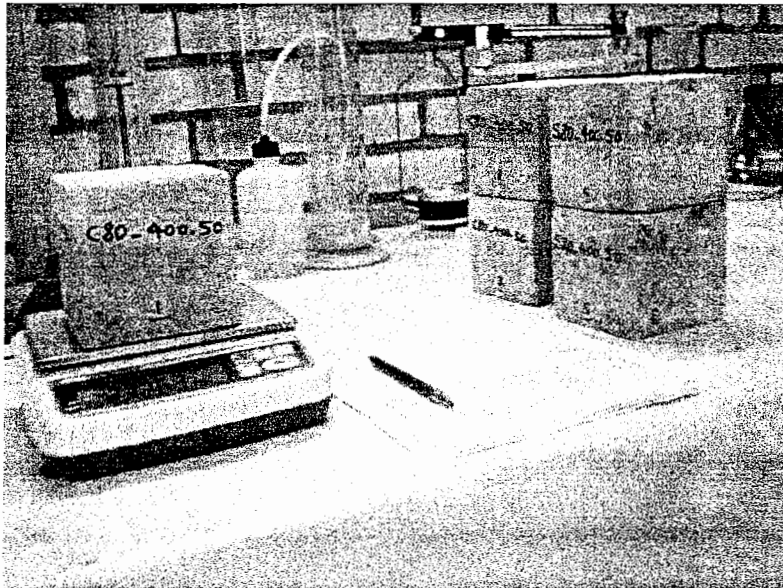


ت ۳۱- نمایی از محل انجام آزمایش های جذب آب بتن

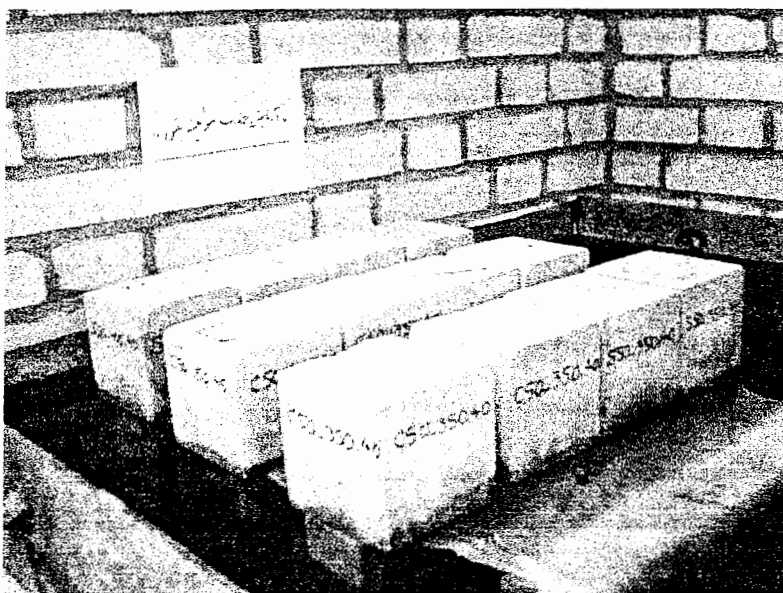


ت ۳۲- ثبت مشخصات آزمون های بتنی

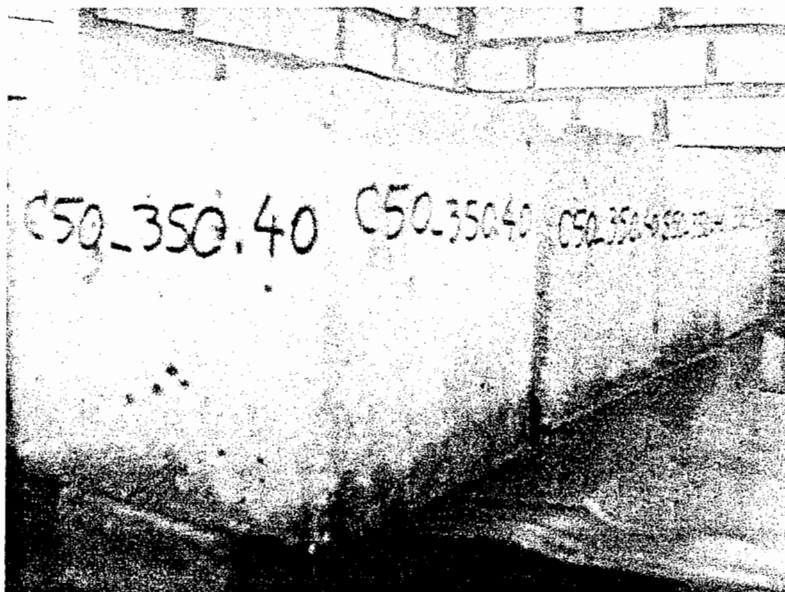




ت ۳۳- توزین آزمون‌های خشک شده در ابتدای آزمایش‌های جذب آب



ت ۳۴- در آزمایش جذب مویینه بتن ، قسمت تحتانی آزمون به اندازه حدود ۵ میلی‌متر در آب قرار می‌گیرد .



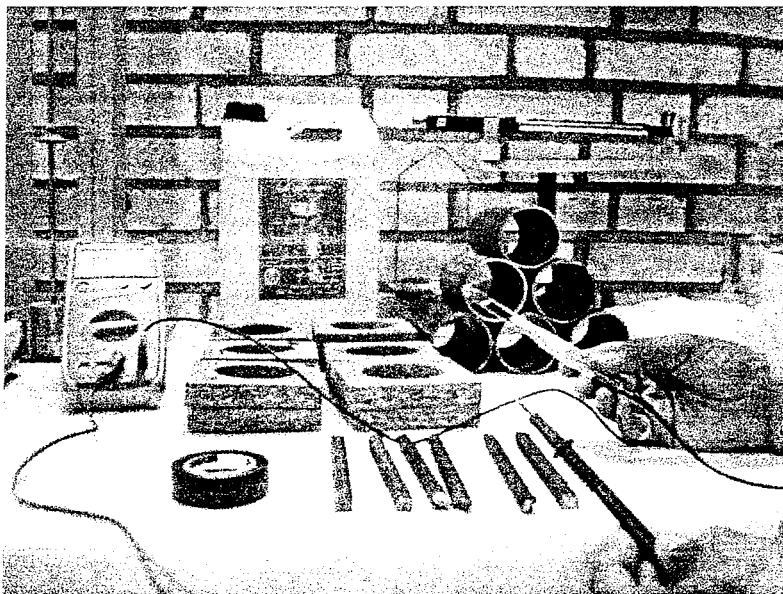
ت ۳۵- آب از طریق لوله های موئین به داخل بتن نفوذ می کند .  
صعود آب در تصویر دیده می شود .



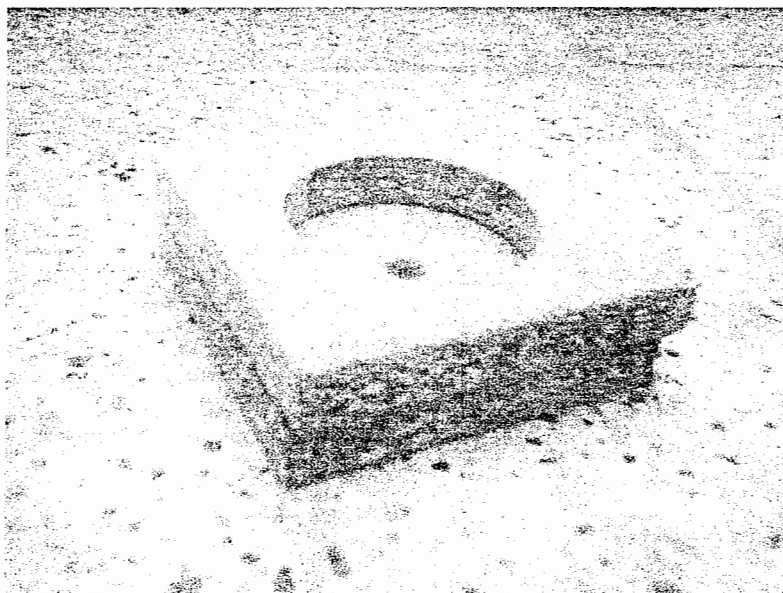
ت ۳۶- در آزمایش جذب آب اولیه و نهایی بتن ، آزمونه  
به طور کامل در آب غوطه ور می شود.



ت ۳۷- خارج کردن آزمون از آب در زمان های مشخص ،  
خشک کردن سطح آن و توزین به وسیله ترازو



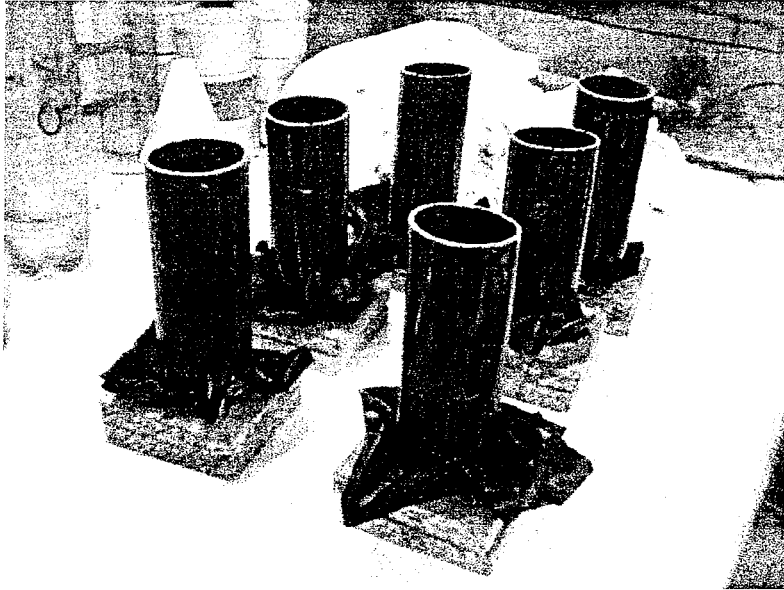
ت ۳۸- اقلام مورد نیاز جهت آزمایش پتانسیل خوردگی : الکتروود کالومل اشباع،  
ولت‌متر، لوله پلیکا، شابلون چوبی، چسب، میلگرد و اسید سولفوریک



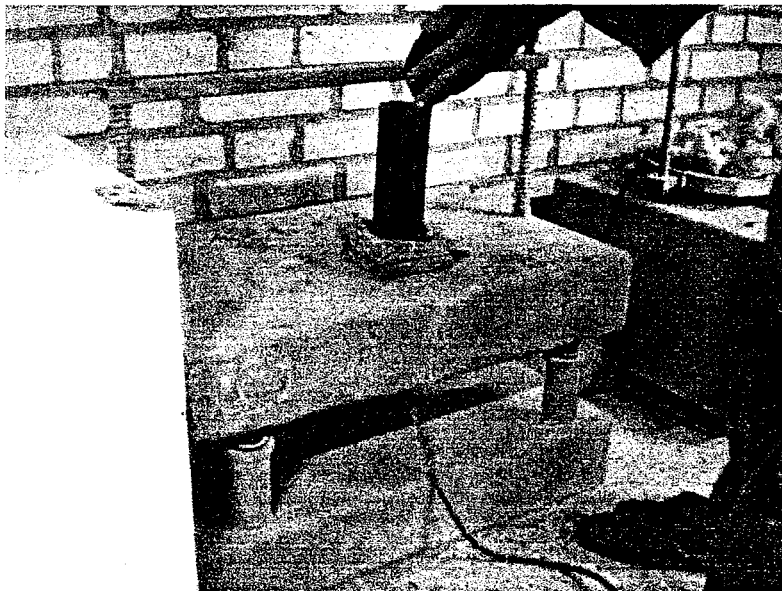
ت ۳۹- شابلون چوبی جهت نگه داشتن لوله پلیکا و میلگرد



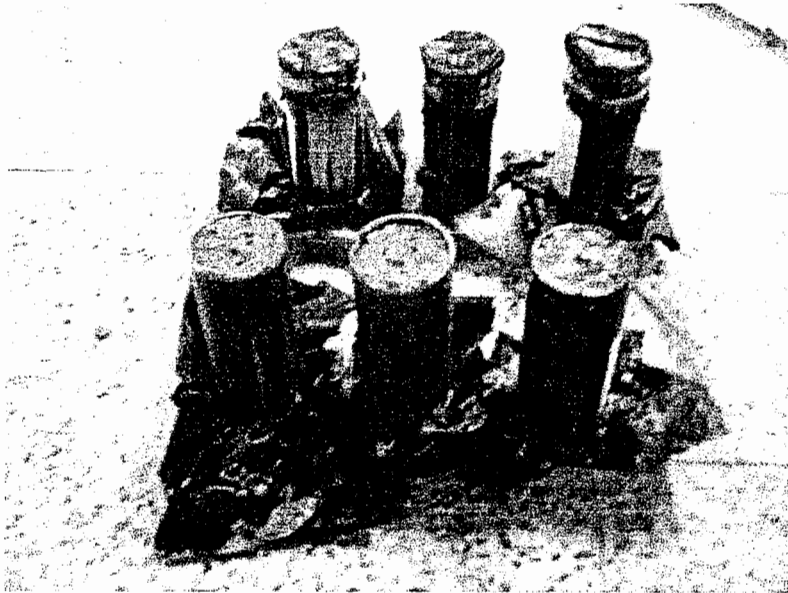
ت ۴۰- زنگ زدایی میلگردها به وسیله اسید سولفوریک با غلظت ۱۰ درصد



ت ۴۱- قالب های آماده جهت تهیه نمونه های آزمایش پتانسیل خوردگی،  
میلگرد در مرکز لوله پلیکا قرار دارد .



ت ۴۲- ریختن بتن در داخل قالب استوانه ای و تراکم آن به وسیله میز ویبره



ت ۴۳- در هر طرح اختلاط ۶ آزمون پتانسیل خوردگی تهیه شد.



ت ۴۴- مجموعاً ۱۴۴ آزمون پتانسیل خوردگی ساخته شده و در حوضچه حاوی آب خلیج فارس قرار داده شدند.



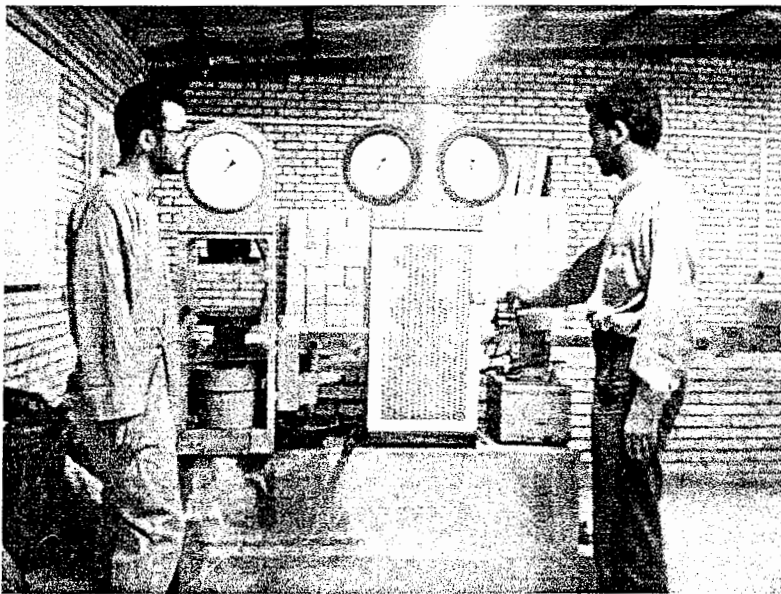
ت ۴۵- الکتروود در داخل آب قرار می گیرد و قطب دیگر ولت‌متر به سر میلگرد وصل می شود.



ت ۴۶- قرائت اختلاف پتانسیل به وسیله ولت‌متر دیجیتالی

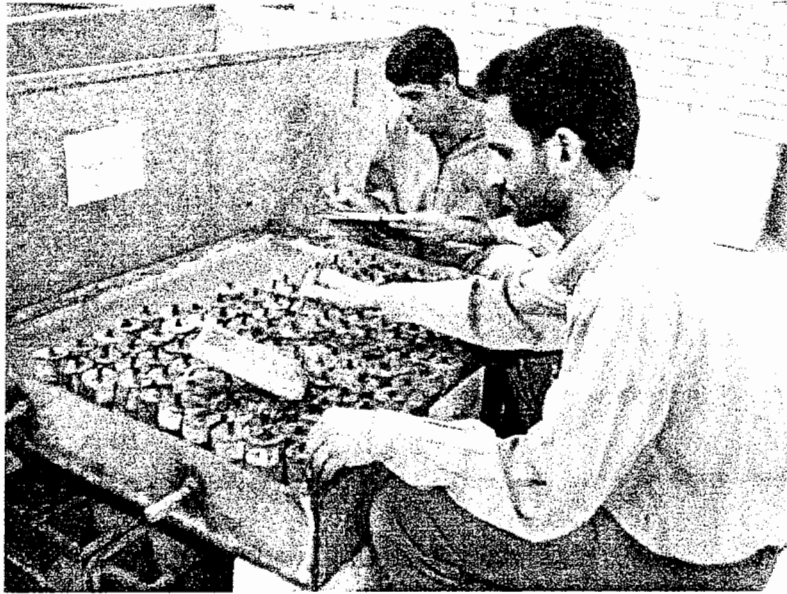


ت ۴۷- تعیین مقاومت فشاری مکعبی بتن



ت ۴۸- شکستن آزمون مکعبی توسط جک بتن شکن

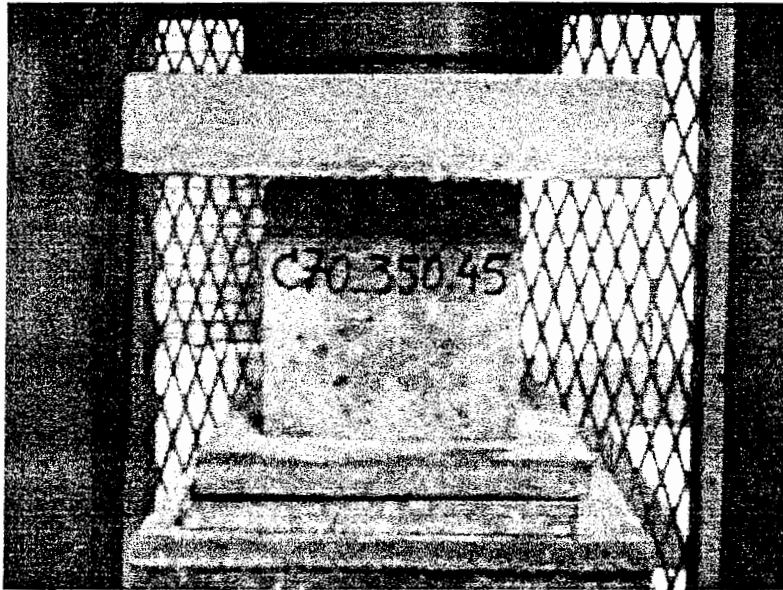




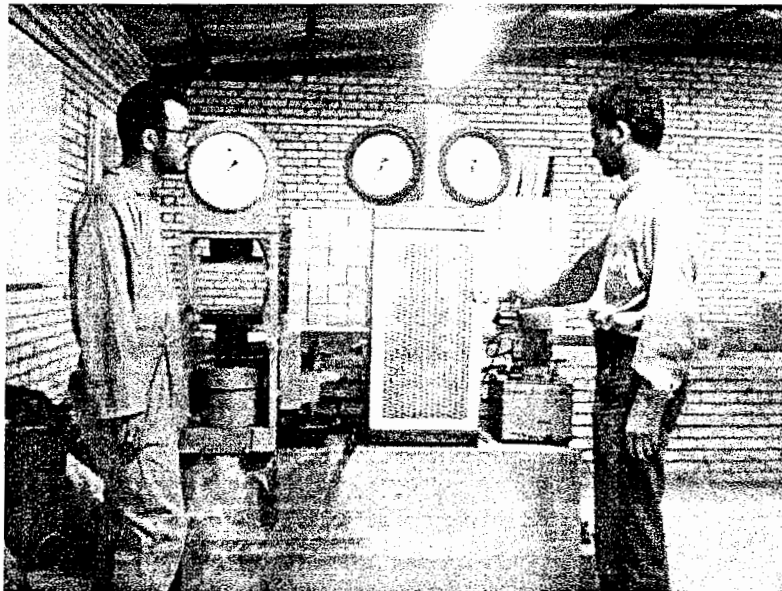
ت ۴۵- الکتروود در داخل آب قرار می گیرد و قطب دیگر ولت‌متر به سر میلگرد وصل می شود.



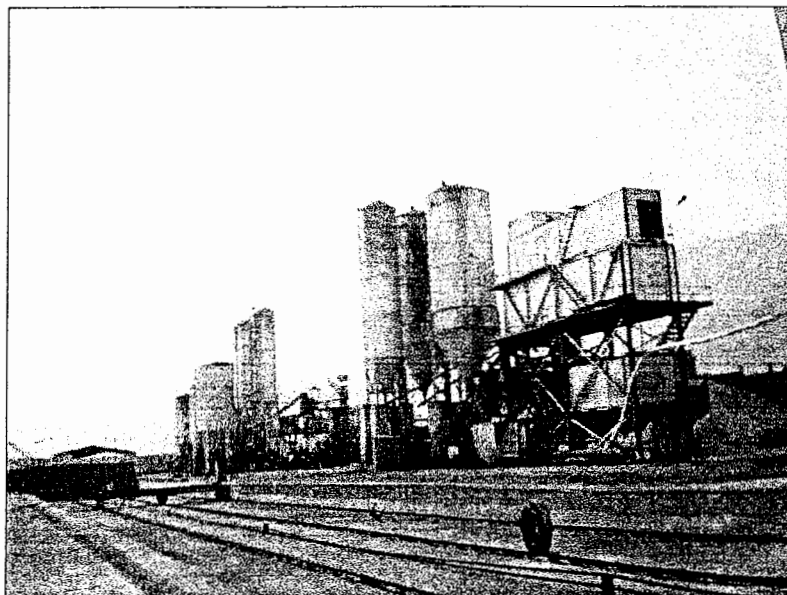
ت ۴۶- قرائت اختلاف پتانسیل به وسیله ولت‌متر دیجیتالی



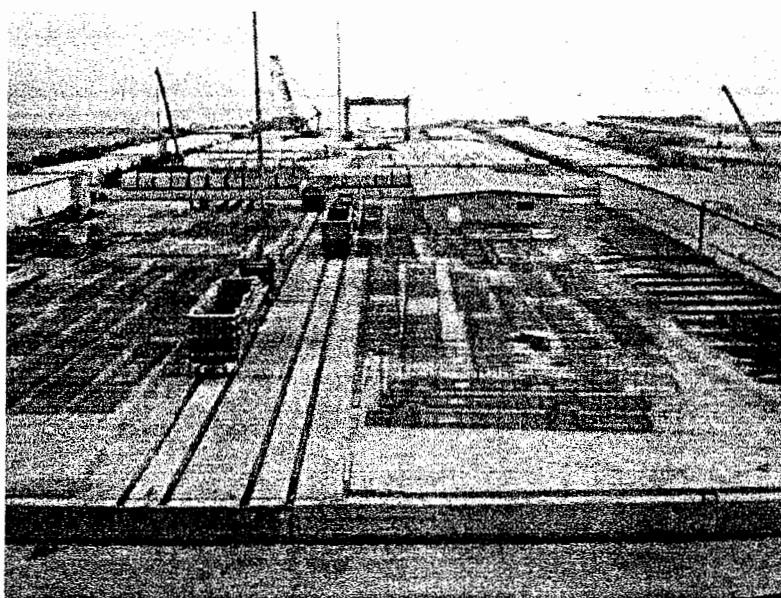
ت ۴۷- تعیین مقاومت فشاری مکعبی بتن



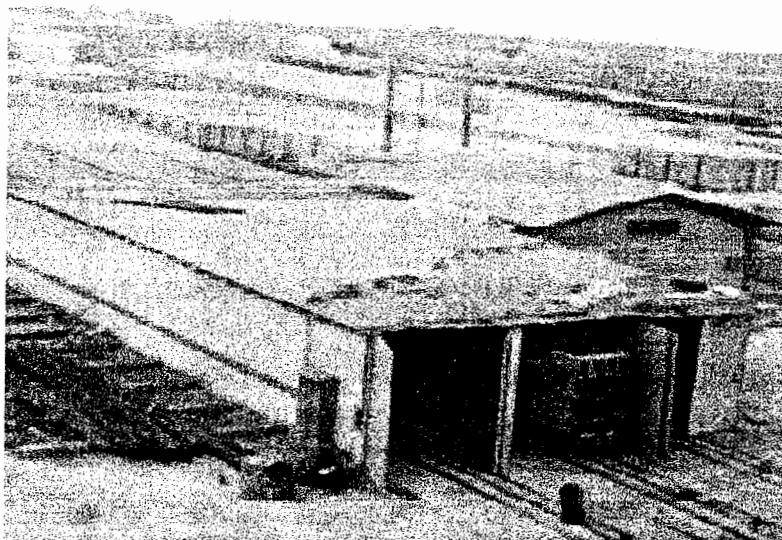
ت ۴۸- شکستن آزمون مکعبی توسط جک بتن شکن



ت ۴۹- تولید قطعات ۱۳۰ تنی پیش ساخته در کارخانه محصولات پیش ساخته بتنی بندر پتروشیمی پارس واقع در عسلویه



ت ۵۰- نمایی از کارخانه محصولات پیش ساخته بتنی و محل آزمایشگاه



ت ۵۱- قرار دادن قطعات بتنی در داخل تونل بخار با سیستم قالب متحرک بر روی ریل



ت ۵۲- نمایی از داخل تونل های بخار؛  
بخاردهی از لوله های قسمت پایین تونل انجام می شود .

## فهرست منابع

- ۱- سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور. دفتر امور فنی و تدوین معیارها، «آئین نامه بتن ایران (آبا)»، چاپ اول ۱۳۷۹.
- ۲- نویل، آدام، «تکنولوژی بتن»، مترجمین علی اکبر رضانیانپور و محمد رضا شاهنظری، پرهام، تهران، چاپ هشتم، ۱۳۸۰.
- ۳- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، «مجموعه مقالات اولین کنفرانس بین المللی بتن و توسعه»، تدوین عباسعلی تسنیمی و محسنعلی شایانفر، تهران، چاپ اول، ۱۳۸۰.
- ۴- میل واگانام، نوئل پی، «تعمیر و حفاظت سازه‌های بتنی»، مترجمین علی اکبر رضانیانپور و رضا پاشائی، نویردازان، تهران، چاپ اول، ۱۳۸۱.
- ۵- قدوسی، پ.، گنجیان، ا.، پرهیزگار، ط.، رضانیانپور، ع. ا.، «فن آوری بتن در شرایط محیطی خلیج فارس، آسیب شناسی بتن و ارزیابی آن»، جلد اول، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، چاپ اول، ۱۳۷۸.
- ۶- سامع، سید علی، «کیفیت و طرح اختلاط بتن»، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، اصفهان، چاپ اول، ۱۳۷۷.
- ۷- رضانیانپور، علی اکبر، «دوام بتن با سیمان‌های پوزولانی در شرایط آزمایشگاهی مشابه خلیج فارس»، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران، چاپ اول، ۱۳۸۰.
- ۸- وادل جوزف، دوبروولسکی جوزف ای، «دستنامه اجرای بتن»، مترجمین علی اکبر رضانیانپور، شاپور طاحونی و منصور پیدایش، علم و ادب، تهران، چاپ اول، ۱۳۸۰.
- ۹- دیلمقانی، صمد، «تکنولوژی بتن»، دانشگاه تبریز، تبریز، چاپ چهارم، ۱۳۸۰.

۱۰ - تدین، محسن، «بررسی و ارزیابی مقاومت کششی، مدول ارتجاعی، ضریب پواسون و شدت خوردگی بتن سبک پرمقاومت با مصالح موجود در ایران»، پایان‌نامه دکترا، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۱.

۱۱- پرهیزگار، ط.، رضانیانپور، ع.ا.، قدوسی، پ.، «عملکرد برخی از مصالح برای تعمیر سطحی بتن در شرایط شبیه‌سازی شده خلیج فارس»، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران، چاپ اول، ۱۳۸۲.

۱۲ - رضانیانپور، علی اکبر و پیدایش، منصور، «دوام بتن و نقش سیمان‌های پوزولانی»، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران، چاپ اول ۱۳۷۶.

۱۳ - نوپل، آدام، «خواص بتن»، ترجمه هرمز فامیلی، ابوریحان بیرونی، تهران، چاپ اول ۱۳۷۸.

۱۴- قدوسی، پ.، پرهیزگار، ط.، مظفری، ن.، قاسمی، ع.، «مقایسه روش‌های جذب آب در نمونه‌های بتنی»، مجله فنی و مهندسی مدرس، شماره چهارم، صفحه ۳۰ تا ۳۷، تهران، ۱۳۷۸.

15-ACI Committee 517, " Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressure - Stata of the Art", ACI Manual of Concrete Practice, 1980.

16- ACI Commottee 308, "Standard Practice for Curing Concrete", ACI Manual of concrete practice, 1998.

17- ACI Commttee 201, " Guide to Durable Concrete", (ACI 201.2R-92), ACI Manual of Concrete Practice, Part 1.

18- Neville, A.M., "Properties of Concrete", 4th ed, longman, London, 1995 .

19- ASTM Standards,"C136-96a Test Method for Sieve Analysis of Fine and Corse Aggregates", ASTM Vol 04.02, 2001.

20- ASTM Standards, "C876-91(1999) Test Method for Half-Cell Potentials of uncoated Reinforcing Steel in Concrete", ASTM Vol 04.02, 2001.

21- ASTM Standards, "C642- 97 Test Method for Density, Absorption, and voids in Hardened Concrete", ASTM Vol 04.02, 2001.

22- RILEM CII.2-TC14-CPC, "Absorption of Water by Concrete by Cappillarity ", E and FN SPON, Chapman and Hall, 1994.

- 23- ASTM Standards," C128-97 Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate", ASTM Vol 04.02, 2001.
- 24- ASTM Standards," C117-95 Test Method for Material Finer Than 75  $\mu\text{m}$  (NO .200) Sieve in Mineral Aggregates by washing ", ASTM Vol 04.02, 2001.
- 25- ASTM Standards," C127-88(2001) Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate ", ASTM Vol 04.02, 2001.
- 26- ASTM Standards," C131-96 Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine", ASTM Vol 04.02, 2001.
- 27- ASTM Standards," C143/C 143M-00 Test Method for Slump of Hydraulic-cement Concrete " ASTM Vol 04.02, 2001.
- 28- ASTM Standards," C 138/C 138M-01a Test Method for Density ( Unit Weight), Yield, and Air Content ( Gravimetric) of concrete", ASTM Vol 04.02, 2001.
- 29- ASTM Standards," C1064/C 1064M-99 Test Method for Temperature of Freshly Mixed Portland Cement Concrete", ASTM Vol 04.02, 2001.
- 30- ASTM Standards," C1074- 98 Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method", ASTM Vol 04.02, 2001.
- 31- MC Carter, W. J., Emerson, M., Ezirim, H., " Properties of Concrete in the cover zone. Development in Monitoring Techniques", Magazine of concrete Research, 47, No. 172, pp. 243-251,1995.
- 32- Emerson, M., "Mechanisms of Water Absorption by Concrete", Transport and Road Research Lab.,UK., 1990.
- 33- Comitte Euro – International Du Beton, "Durable Concrete Structures ", Design Guide, Thomas Telford Publications,1989.
- ۳۴- رمضانینپور، ع.ا.، پاشایی، ر.، «کربناتاسیون در سازه های بتن مسلح»، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۷۵، نشریه شماره ک- ۲۳۷.
- 35- Mehta, P.K., "Concrete Structures, Properties and Materials", Prentice – Hall Publications, 1986.
- ۳۶- زارع امامی، علی، «تأثیر ضخامت پوشش بتن بر روی مقاومت بتن های معمولی و توانمند در برابر نفوذ یون کلر»، پایان نامه کارشناسی ارشد عمران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۰.

۳۷- چینی، مهدی، «بررسی اثر نسبت آب به سیمان و استفاده از دوده سیلیس بر نرخ نفوذ یون کلر در بتن»، پایان نامه کارشناسی ارشد عمران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۳.

38- Popovics, Sándor, "Strength and Related Properties of Concrete", John Wiley & Sons, Inc., 1998.

39- Soroka, I., "Concrete in Hot Environments", E & FN Spon, London, 1993.

40- American Concrete Institute, "Durable Concrete in Hot Climates", Michigan, 1993.

41- Pigeon, M., "Durability of Concrete in Cold Climates", E & FN Spon, London, 1995.



## نمایه

۱۱۶، ۱۱۵، ۸۹، ۸۰، ۷۸، ۸۴، ۷۵، ۷۴، ۷۳، ۷۲

۱۱۹، ۱۲۰، ۱۲۲، ۱۲۹، ۱۳۰، ۱۳۱، ۱۴۰، ۱۴۱

۱۴۶، ۱۴۷، ۱۴۸، ۱۵۶، ۱۵۷، ۱۵۸، ۱۵۹، ۱۶۰

۱۷۳، ۱۷۴، ۱۸۹

بلوغ، ۱۷، ۳۵، ۳۶، ۳۷، ۵۴، ۵۵، ۵۶، ۵۷، ۵۸، ۶۵

۸۹، ۱۱۶، ۱۴۶

پ

پتانسیل خوردگی، ۷۲، ۷۴، ۸۹، ۹۱، ۹۲، ۹۳، ۹۴

۹۵، ۹۶، ۹۷، ۹۸، ۹۹، ۱۰۰، ۱۰۱، ۱۰۲، ۱۰۳

۱۰۴، ۱۰۵، ۱۰۶، ۱۰۷، ۱۰۸، ۱۰۹، ۱۱۰، ۱۱۱

۱۱۲، ۱۱۳، ۱۱۴، ۱۱۵، ۱۱۸، ۱۸۴، ۱۸۵

ج

جذب آب، ۵، ۱۸، ۱۹، ۴۴، ۴۷، ۵۲، ۵۳، ۶۰، ۶۱

۶۲، ۶۴، ۶۵، ۶۶، ۷۳، ۷۴، ۷۵، ۷۶، ۷۲، ۷۳، ۷۴

۷۵، ۸۳، ۸۴، ۷۸، ۸۰، ۱۲۰، ۱۲۲، ۱۲۹، ۱۳۰

۱۳۱، ۱۵۶، ۱۵۷، ۱۵۸، ۱۶۳، ۱۷۷، ۱۷۸، ۱۷۹

۱۸۱، ۱۹۱

جزر و مد، ۲۰، ۲۱، ۳۰، ۱۲۲، ۱۴۱، ۱۵۶، ۱۵۷، ۱۵۸

آ

آب، ۵، ۷، ۸، ۹، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۱، ۲۲

۲۳، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۴۴، ۴۵، ۴۷، ۴۹

۵۰، ۵۱، ۵۲، ۵۳، ۵۴، ۵۵، ۵۸، ۵۹، ۶۰، ۶۱، ۶۲

۶۳، ۶۴، ۶۵، ۶۶، ۷۲، ۷۳، ۷۵، ۷۶، ۷۷، ۸۳، ۸۴

۸۹، ۱۲۰، ۱۲۱، ۱۲۲، ۱۲۹، ۱۳۰، ۱۳۱، ۱۴۰

۱۴۱، ۱۵۶، ۱۵۷، ۱۵۸، ۱۵۹، ۱۶۰، ۱۹۱

ب

بتن، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷

۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸

۲۹، ۳۰، ۳۱، ۴۳، ۴۹، ۵۰، ۵۱، ۵۲، ۵۳، ۵۴، ۵۵، ۵۶

۵۹، ۶۰، ۶۱، ۶۲، ۶۳، ۶۴، ۶۵، ۶۶، ۶۷، ۶۸، ۶۹

۷۰، ۷۱، ۷۲، ۷۶، ۷۷، ۸۳، ۸۴، ۸۹، ۱۱۶، ۱۱۹

۱۲۰، ۱۲۱، ۱۲۲، ۱۲۹، ۱۳۰، ۱۳۱، ۱۴۰، ۱۴۱

۱۴۶، ۱۴۷، ۱۴۸، ۱۵۶، ۱۵۷، ۱۵۸، ۱۵۹، ۱۶۰

۱۹۰، ۱۹۱

بخار، ۲، ۳، ۵، ۶، ۳۱، ۳۷، ۳۸، ۳۹، ۴۰، ۴۱، ۵۱، ۵۳

۵۴، ۵۵، ۵۶، ۵۷، ۵۸، ۵۹، ۶۲، ۶۴، ۷۲، ۷۶، ۷۸

ز

زمان تأخیر، ۳۹، ۴۰، ۴۱، ۵۶، ۵۷، ۱۱۶، ۱۶۰

زنگ، ۲۳، ۲۶، ۲۷، ۶۸، ۷۰، ۷۱، ۱۸۳

س

سازه، ۷، ۸، ۲۶، ۳۰، ۱۵۶

سایش، ۲۰، ۴۵، ۴۷، ۱۶۶

سولفات، ۲۱، ۲۴، ۲۵، ۶۹، ۱۵۹

سیمان، ۱، ۵، ۷، ۸، ۹، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۲۲، ۲۳،

۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۸، ۳۲، ۳۵، ۳۶، ۳۷، ۳۸، ۳۹، ۴۱،

۴۲، ۴۴، ۴۷، ۴۸، ۴۹، ۵۱، ۵۸، ۵۹، ۶۰، ۶۱، ۶۲

۶۳، ۷۷، ۷۲، ۷۳، ۷۴، ۷۵، ۸۹، ۱۱۵، ۱۲۱، ۱۲۲،

۱۴۰، ۱۴۱، ۱۵۷، ۱۶۰، ۱۶۶

ش

شن، ۴۳، ۴۴، ۴۵، ۴۶، ۴۷، ۵۹، ۶۰، ۶۱، ۶۳، ۱۶۵،

۱۶۶

م

ماسه، ۴۳، ۴۴، ۴۵، ۴۶، ۴۷، ۶۰، ۶۱، ۶۳، ۱۶۳،

۱۶۵، ۱۶۴

مقاومت فشاری، ۵۲، ۵۷، ۵۸، ۷۴، ۱۸۷

چ

چگالی، ۱۶۳، ۱۶۴، ۱۶۵، ۱۶۶

خ

خلیج فارس، ۳، ۲۰، ۲۱، ۵۱، ۵۲، ۵۹، ۶۴، ۶۵، ۷۲،

۸۹، ۱۴۰، ۱۵۷، ۱۵۹، ۱۸۵، ۱۹۰، ۱۹۱

د

دانسیته، ۴۴، ۴۵، ۴۷، ۶۵

دانه بندی، ۴۵، ۱۶۵

درازمدت، ۲، ۳۸، ۳۹، ۵۸، ۱۱۶، ۱۴۷، ۱۴۸، ۱۵۹

درشت دانه، ۶۰

دما، ۱۷، ۲۳، ۳۱، ۳۲، ۳۵، ۳۶، ۳۷، ۳۹، ۴۰، ۴۱،

۵۴، ۵۵، ۵۶، ۵۷، ۶۴، ۷۳، ۷۴، ۷۷، ۷۲، ۷۳، ۷۴،

۷۵، ۸۳، ۱۱۵، ۱۲۱، ۱۲۹، ۱۳۰، ۱۳۱، ۱۴۰،

۱۴۷، ۱۴۸، ۱۷۱، ۱۷۵، ۱۷۷

دوام، ۱، ۲، ۳، ۵، ۷، ۸، ۹، ۱۵، ۱۷، ۲۰، ۲۵، ۳۸، ۳۹،

۵۱، ۵۲، ۵۷، ۶۴، ۷۳، ۱۱۶، ۱۱۹، ۱۲۱، ۱۳۱،

۱۵۶، ۱۵۹، ۱۶۰، ۱۹۰، ۱۹۱

ر

روان کننده، ۴۹، ۱۶۲، ۱۶۸

ریزدانه، ۱۷، ۴۳، ۴۴، ۴۶، ۶۱

ن

نیم پیل، ۵۳، ۶۷، ۶۹، ۷۰

موئینه، ۵، ۱۶، ۱۷، ۱۹، ۲۹، ۵۲، ۵۳، ۶۴، ۶۶، ۶۷

۱۲۱، ۱۲۰، ۷۵، ۷۴، ۷۳، ۷۲، ۷۸، ۷۷، ۷۶، ۷۵

۱۸۰، ۱۵۷، ۱۵۶، ۱۲۲

ی

یون، ۲۸، ۶۹، ۹۰، ۱۵۹

میلگرد، ۹، ۲۶، ۲۸، ۵۷، ۶۷، ۶۸، ۶۹، ۷۰، ۷۱، ۷۲

۸۹، ۹۰، ۱۱۵، ۱۴۰، ۱۴۱، ۱۵۷، ۱۵۸، ۱۸۲

۱۸۶، ۱۸۴، ۱۸۳

## « Effect of Steam Curing on Concrete Durability »

### **Abstract**

In general, concrete with suitable design and execution always has used as a high consumption materials. However slow process and long earning the strength of concrete is one of the defects of it. *Steam curing* is one the agent that we can use it for accelerating of concrete strength. Some of the advantages for steam curing are: fast transferring and installation, releasing as soon as the moulds, reduce the curing time, increasing the speed of production, decreasing the needed area for storing the segments, to be released as soon as the equipments of prestressing and etc.

Regardless of the benefits of this method, badly using of the steam curing will decrease durability of concrete and will increase metal corrosion specially in corrosive conditions similar to the Persian Gulf environment.

In this experimental thesis the concrete specimens that cured with steam are evaluated with some tests for durability of concrete and corrosion of metals. The results show that when temperature of steam curing exceeds from specified limits, initial and final absorption and capillary absorption will increase. It can be shown by potential of corrosion test that steam curing with all temperatures that used in this thesis will increase the corrosion of metals.

According to results of this research and also service conditions of concrete we can determine suitable temperature for steam curing. Because of increasing the corrosion of metals it can be suggested that steam curing to get forbid for reinforced concrete that are placed in corrosive conditions such as tide zone.

**Keywords:** steam curing, durability, capillary, absorption, compressive strength, corrosion, Persian Gulf, accelerating of strength, maturity, Potential of corrosion.



Shahrood University of Technology

A Thesis Presented for the Degree of  
Master of Science in Structural Engineerin

Title:

**«Effect of Steam Curing on Concrete Durability»**

Supervisors:

Dr. Mohsen Tadayyon

Dr. Vahid Reza Kalatjari

Student:

Seyyed Mohammad Sajjadi

September 2004