**پایان نامه کارشناسی ارشد**

مهندسی عمران- سازه

عنوان

# ارزیابی جریان حرارت و رطوبت در بتن

**استاد راهنما:**

**جناب آقای دکتر احمدی**

**استاد مشاور:**

**جناب آقای دکترمرادلو**

**نگارش:**

**وحید صداقت**

شهریور **۹۱**

بسم الله الرحمن الرحیم

با تشکر و سپاس از زحمات گرانقدر جناب آقای دکتر جمال احمدی و دکتر مرادلو که زحمات بسیاری را جهت به بار نشستن این تحقیق متقبل گردیده اند.

## چکیده

سازه های بتنی همواره در شرایط تهاجم آب‌های املاح‌دار، فرسایش ناشی از جریان شدید آب و گرادیان حرارتی بالا قرار دارند. بدین علت بتن این سازه‌ها تحت تهاجم سولفات‌ها و اختلاف حرارتی شدید قرار گرفته و خوردگی آرماتورها و افزایش حجم آنها باعث ترک‌خوردگی و ازهم پاشیدگی بتن می گردد. این آسیب‌دیدگی‌ها باعث آسیب های ناخواسته در خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی بتن گردیده و معمولاً با متلاشی شدن اجزای بتن همراه می‌باشد.

تهاجم یونها، نفوذ عوامل خورنده و کلا ایجاد آسیب در داخل بتن توسط عوامل خارجی عموما به نحوه انتقال و با انتشار این عوامل در داخل بتن وابسته است که مستقیما متاثر از شرایط فیزیکی موجود در داخل شبکه منافذ بتن نظیر نحوه انتشار دما و رطوبت می باشد.

از سوی دیگر جریان و توزیع رطوبت منفذی و حرارت در بتن مستقل از هم نبوده و بر مبنای مشاهدات صورت گرفته کاملا به یکدیگر وابسته هستند بعبارت دیگر برای برآورد و تخمین توزیع رطوبت و حرارت در بتن نیاز به تحلیل این دو جریان بطور همزمان می باشد.

با توجه به اهمیت موضوع در این پایان نامه با استفاده از روش اجزای محدود جریان همزمان رطوبت و حرارت در بتن آنالیز شده است. برای این منظور پس از حل معادلات حاکم بر جریان همزمان رطوبت و حرارت در بتن برنامه تحلیل جریان در محیط MATLAB نوشته شده است. نتایج آنالیز عددی با داده های آزمایشگاهی مقایسه شده که بیانگر انطباق مناسب این دو می باشد. نفوذپذیری به عنوان یکی از عوامل اصلی تأثیرگذار در انتقال رطوبت به شمار می رود. در این پایان نامه نمونه های بتنی گوناگون با نفوذپذیری، سن، رطوبت نسبی و ضریب هدایت حرارتی مختلف تحت گرادیان های مختلف مورد آنالیز عددی قرار گرفتند. با توجه به نتایج بدست آمده از آنالیز عددی نمونه های بتنی مشخص شد هر چه روند اعمال حرارت کندتر باشد، تأثیر نفوذپذیری در توزیع فشار در نمونه بتنی بیشتر است و در حرارت های بالاتر این تأثیر کمتر می شود. بر مبنای نتایج بدست آمده تأثیر سن و رطوبت در توزیع دما در نمونه بتنی تحت حرارت اندک است. و تنها تاثیر ضریب هدایت حرارتی در توزیع دما قابل توجه است.



کلمات کلیدی: گرادیان دما، گرادیان فشار، نفوذپذیری، آنالیز اجزا محدود

# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


**فصل اول**

**مقدمه**

**۱-۱** تعریف مسئله ..... **۹**

**۱-۲** اهمیت مسئله ..... **۹**

**۱-۳** تاریخچه ..... **۱۰**

**۱-٤**- هدف ..... **۱۱**

**۱-٥** روش تحقیق ..... **۱۱**

**۱-٦** اصول و فرضیات ..... **۱۱**

**۱-۷**- ساختار پایان نامه ..... **۱۲**

**فصل دوم**

**مفاهیم و تعاریف پایه برای فرآیند جریان رطوبت وحرارت در بتن**

**۲-۱** مقدمه ..... **۱۸**

**۲-۲** تاریخچه ..... **۲۱**

**۲-۲-۱** جریان حرارت در بتن ..... **۲۱**

**۲-۲-۲** جریان رطوبت در بتن ..... **۲٥**

**۲-۲-۳** جریان حرارت و رطوبت بصورت کوپل ..... **۲۸**

**۲-۳** جریان حرارت در بتن ..... **۲۸**

**۲-۳-۱** خواص حرارتی بتن ..... **۲۸**

**۲-۳-۲** معادلات حاکم بر انتقال حرارت ..... **۲۹**

**۲-٤** مفاهیم وتعاریف پایه برای جریان رطوبت در بتن ..... **۲۹**

**۲-٤-۱** انتشار ..... **۳۰**

**۲-٤-۲** مکش ..... **۳۱**

**۲-٤-۳** نفوذپذیری ..... **۳۲**

**۲-٥** جریان همزمان رطوبت و حرارت در بتن ..... **۳٥**

۲-۵-۱ رابطه آب قابل تبخیر و رطوبت نسبی داخل بتن ..... ۳۷
۲-۵-۲ چگونگی معادلات فشار منفذی ..... ٤۱
۲-۵-۲ شرایط اولیه مرزی ..... ۵۱
۲-٦ جمع بندی ..... ۵۲

**فصل سوم**

**برنامه تحلیلی ارزیابی کوپل جریان رطوبت وحرارت در بتن**

۳-۱ مقدمه ..... ۵۷
۳-۲ حل معادله حاکم برکوپل جریان رطوبت وحرارت در بتن..... ۵۷
۳-۲-۱ تحلیل اجزای محدود معادلات کوپل جریان رطوبت و حرارت در حالت یک بعدی ..... ۵۸
۳-۲-۲ مراحل حل معادله کوپل جریان رطوبت وحرارت در بتن..... ۷۰
۳-۳- مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی ..... ۷۱
۳-۳-۱ مقایسه نتایج تجربی و عددی دما و فشار منفذی در حالت حرارت دهی سیکلی..... ۷٤
۳-۳-۲ مقایسه نتایج تجربی و عددی دما و فشار منفذی در حالت سریع..... ۷۵
۳-٤ جمع بندی ..... ۷۸

**فصل چهارم**

**ارا ئه نتایج**

٤-۱ مقدمه ..... ۸۰
٤-۲ بررسی عددی تاثیر نفوذپذیری در مقادیر فشار و دما در نمونه های استوانه ای تحت حرارت ..... ۷۲
٤-۲-۱ مقایسه مقادیر عددی دما و فشار منفذی برای نمونه های مختلف در حالت حرارت دهی کوتاه مدت و سریع..... ۸۱
٤-۲-۲ مقایسه مقادیر عددی دما و فشار منفذی برای نمونه های مختلف در حالت حرارت دهی کوتاه مدت و آهسته ..... ۸۷
٤-۲-۳ مقایسه مقادیر فشار منفذی برای طرح های مختلف در حالت حرارت دهی بلند مدت ..... ۹٤
٤-۳ بررسی عددی تاثیر ضریب هدایت حرارتی، سن و رطوبت نسبی در مقادیر فشار منفذی و دما در نمونه های استوانه ای تحت حرارت ..... ۹۸
٤-۳-۱ تاثیر سن نمونه در مقادیر فشار منفذی و دما در نمونه های استوانه ای تحت حرارت ..... ۹۸
٤-۳-۲ تاثیر ضریب هدایت حرارتی نمونه در مقادیر فشار منفذی و دما در نمونه های استوانه ای تحت حرارت ..... ۱۰۲
٤-٤ جمع بندی ..... ۱۰٤

**فصل پنجم**

**نتیجه گیری و پیشنهادات**

**۵-۱** جمع بندی نتایج ..... **۱۰۷**

**۵-۲** پیشنهادات ..... **۱۰۷**

**مراجع ومنابع**

**پیوست ها**

**پیوست الف- حل معادلات کوپل انتقال رطوبت وحرارت در فضای یک بعدی مختصات کارتزین ..... ۱۱۳**

**پیوست ب- برنامه نوشته شده برای پیش بینی انتقال رطوبت و حرارت در فضای MATLAB ..... ۱۲۸**

**پیوست ج- الگوریتم برنامه تحلیل جریان ..... ۱۸۹**

# فصل اول

## مقدمه

## ۱-۱- تعریف مسئله

بتن ماده ایی است که دارای روزنه های اشباع و نیمه اشباع بسیار می باشد. هنگامیکه بتن در معرض حرارت قرار دارد در بتن جریان رطوبت و حرارت برقرار می شود. عامل ایجاد جریان رطوبت و حرارت گرادیان فشار و گرادیان حرارت می باشند. گرادیان فشار بر روی گرادیان دما اثر می گذارد که این تأثیر به صورت متقابل می باشد.

بسیاری از خواص حرارتی و رطوبتی بتن وابسته به فشار منفذی و دمای درون بتن می باشند. بعنوان مثال ظرفیت گرمایی آب تابعی از فشار و دما می باشد. بنابراین باید مسأله جریان رطوبت و حرارت به صورت توام حل گردد.

## ۱-۲- اهمیت مسئله

بتن در ۸۰ سال گذشته در بسیاری از رشته های ساختمانی کاربرد داشته و با عمر مفید طولانی خود، مصالح با دوامی را به اثبات رسانده است. بتنی که در پروژه های صنعتی بکار می رود ممکن است در معرض شرایط بسیار سخت محیطی قرار گرفته و دچار صدمات ساختاری و کاربردی را در طول عمر خود بشود که یکی از شرایط سخت می تواند پالایشگاههای کشورهای منطقه خلیج فارس که بیان کننده یک منبع اساسی درآمد مالی برای این کشورها بوده اند باشد. این تأسیسات بزرگ از سالهای ۱۹۵۰ توسط شرکتهای پیمانکار بین المللی از آمریکا و اروپا ساخته شده اند. بسیاری از این سازه های بتنی ساخته شده، هنوز در دست بهره برداری هستند و بسیاری نیز تعمیر و ترمیم یافته اند تا عمر مفید طولانی تری را به آنها بیفزایند.

بتنی که در سازه های صنعتی بکار رفته می تواند بخاطر شرایط ذیل تخریب شود:

۱- درجه حرارت بسیار بالا در کوره های بلند در پالایشگاه ها و ترک خوردگی در اثر آن.

۲- حمله سولفات در نتیجه گازهای سولفوریک همچون $SO_2$ و $H_2S$ که در زمان کار تولیدی پالایشگاه، بعنوان مواد جانبی تولید صنعت نفت ایجاد می شوند و همچنین رطوبت زیاد محیط خلیج فارس.

۳- اسید سولفوریک و باران اسیدی و حملات آنها بر سطح بتن و واکنش شیمیایی $SO_2$ که با رطوبت موجود تولید سولفات کلسیم نموده که به سادگی بخاطر محلول بودن آن توسط آب شسته می شود، بنابراین، تولید سفیدک زدگی (Leaching) انجام می شود و در نتیجه مقاومت بتن کاهش می یابد، بخصوص تحت فعالیت مداوم $SO_2$ و سولفات کلسیم تولید شده، در صورت شستشو جهت تمیز کاری با آب دریا، کریستال گچ بوجود می آید که با سیمان واکنش نشان داده و تاماسایت (Thaumasite) تولید

می شود که باعث تولید خمیر بسیار نرمی می شود. نرخ و پیشرفت خرابی توسط حمله سولفاتها بستگی به غلظت سولفات، نوع نمک سولفات، نفوذپذیری، و تخلخل بتن دارد. خرابی، در زمانی اتفاق می افتد که بتن از یک طرف تحت شرایط فشار آب و از طرف دیگر هوا باشد.

۴- تر و خشک شدن در اثر نشت آب و یا شستشوی سازه بتنی با آب شور دریا، هیدروکربورهای ریخته شده روی سطح بتن، باعث نفوذ آب در خلل و فرج خمیر سیمان و سنگدانه ها و در نتیجه افزایش نفوذپذیری می شود.

۵- نفوذ یون کلر و حملات سولفاتها باعث خوردگی آرماتورها و در نتیجه ترک خوردگی می شوند.

۶- حرکات ماشین آلات، باعث تولید ترکها در بتن می شود.

۷- نشت بخار و گازها از لوله های موجود در پالایشگاهها باعث خرابی سطوح بتنی و در نتیجه اجزاء تشکیل دهنده بتن می شود.

دلایل بالا حاکی از آن هستند که بیشتر خرابی موجود در سازه های بتنی صنعتی که دارای اهمیت فراوانی هستند در ارتباط با جریان رطوبت و حرارت هستند. برخی از دلایل بالا می توانند عامل خرابی سازهای غیر صنعتی نیز باشند. بنابراین مطالعه جریان رطوبت و حرارت دارای اهمیت زیادی در سازه های بتنی می باشد.

## ۳-۱- تاریخچه

در اغلب موارد جریان حرارت به صورت مستقل در نظر گرفته می شد. تا قبل از آمدن نرم افزارهای اجزای محدود معمولا با حل معادله حاکم به روشهای عددی و اعمال شرایط مرزی مناسب اقدام به نوشتن برنامه تحلیل جریان حرارت می شد. اما با آمدن نرم افزارهایی مثل ANSYS، ABAQUS و..... مسائل گوناگون انتقال حرارت در بتن با استفاده از آنها مدل می شود.

در گذشته برای پیش بینی توزیع رطوبت داخلی وتغییرات آن با زمان از معادله خطی انتشار استفاده وسیعی می شد. معادله خطی انتشار در بازه زمانی گسترده دارای اختلاف زیادی با نتایج حاصل از آزمایشها بود. سیر تکاملی در بهبود نگرش اولیه به فرایند خروج رطوبت با اعلام نظر Pickett آغاز و با آزمایشات Pihlajavaara و همکارانش ادامه یافته و سرانجام در بین سالهای ۱۹۷۲-۱۹۷۱ در مطالعاتی که توسط Najjar و Bazant [۱و۲] انجام شد به اوج خود رسید.

جریان همزمان رطوبت و حرارت‌اولین بار در سال ۱۹۷۲ در مقاله ای توسط Bazant [۳] مورد بررسی واقع شده بود. بعد آن در مقالات دیگری برای حل مسائل مختلف از جمله سازهایی که در برابر آتش قرار دارند، پوشش بتنی پیش تنیده راکتورهای اتمی و.... از معادلات همزمان جریان رطوبت و حرارت در بتن استفاده شد.

### ۱-٤- هدف

هدف اصلی از این پایان نامه برآورد همزمان جریان رطوبت و حرارت در داخل بتن می باشد. برای این منظور پس از بسط معادلات کوپل حرارت و رطوبت در بتن در مختصات قطبی، به تحلیل این معادلات با استفاده از تحلیل اجزای محدود غیر خطی پرداخته شده است. لازم بذکر است که از محیط نرم افزار MATLAB بمنظور نوشتن برنامه تحلیل جریان بهره گرفته شده است.

### ۱-۵- روش تحقیق

در این مطالعات و در ابتدا به جمع آوری اطلاعات در خصوص چگونگی توزیع جریان رطوبت و حرارت در بتن و پارامترهای تأثیرگذار اقدام شده است. در تحلیل عددی با استفاده از تحلیل اجزای محدود اقدام به حل معادله دیفرانسیلی حاکم بر جریان همزمان رطوبت و حرارت شده است و در ادامه جریان رطوبت و حرارت در بتن با استفاده از برنامه تحلیل جریان نوشته شده بر مبنای معادلات خارج شده از روش عددی در بتن تحلیل شده است، نتایج برگرفته از آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در ادامه جریان همزمان رطوبت و حرارت در طرح های گوناگون بتنی با نفوذپذیری های مختلف با برنامه تحلیل جریان تحلیل شده و نتایج آن نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۱-٦- اصول و فرضیات

عامل ایجاد جریان رطوبت و حرارت گرادیان حرارت و گرادیان فشار در نظر گرفته شده است. در مطالعات عددی از مفهوم رطوبت نسبی بجای محتوی رطوبت قابل تبخیر در تحلیل معادله غیر خطی حاکم بر جریان همزمان رطوبت و حرارت استفاده شده است.

مرز بین حالت غیر اشباع و انتقال اشباع رطوبت نسبی ۰/۹۶ درصد و همچنین مرز بین حالت انتقال اشباع و تمام اشباع رطوبت نسبی ۱/۰۴ درصد در نظر گرفته شده است. ضریب هدایت حرارتی آب به صورت تابعی از فشار و دما در نظر گرفته شده است.

## ۱-۷- ساختار پایان نامه

پس ارائه کلیاتی در خصوص تعاریف، اصول، اهداف و روش تحقیق در فصل اول، در فصل دوم به بیان پارامترهای تأثیرگذار در جریان رطوبت و حرارت و همچنین شرح معادلات حاکم بر آن پرداخته شده است. در فصل سوم حل معادلات حاکم بر جریان همزمان رطوبت و حرارت با استفاده از آنالیز اجزای محدود (در حالت یک بعدی) ارائه شده است و به شرح برنامه تحلیل جریان با توجه به معادلات خارج شده از آنالیز اجزای محدود برای قطعه بتنی مورد نظر پرداخته شده و در نهایت نتایج حاصله از آنالیز عددی با داده های آزمایشگاهی در این پایان نامه مقایسه شده است. با استفاده از برنامه تحلیل جریان نمونه های بتنی گوناگون با نفوذپذیری، سن، رطوبت نسبی و ضریب هدایت حرارتی مختلف تحت گرادیان های مختلف مورد آنالیز عددی قرار گرفتند.

# فصل دوم

# مفاهیم و تعاریف پایه برای فرآیند جریان رطوبت

# وحرارت در بتن

# فهرست علائم

| | |
|---|---|
| $C_c$ | مقدار وزنی سیمان برای طرح اختلاط بتن $(kg/m^3)$ |
| W | مقدار وزنی آب برای طرح اختلاط بتن $(kg/m^3)$ |
| a | مقدار وزنی مصالح سنگی برای طرح اختلاط بتن $(kg/m^3)$ |
| S | مقدار وزنی ماسه برای طرح اختلاط بتن $(kg/m^3)$ |
| G | مقدار وزنی شن برای طرح اختلاط بتن $(kg/m^3)$ |
| WR | نسبت مقدار وزنی مواد کاهنده بکار گرفته شده به مقدار وزنی سیمان |
| AE | نسبت مقدار وزنی مواد هوازا بکار گرفته شده به مقدار وزنی سیمان |
| $C_3S$ | سه کلسیم سیلیکات، یکی از اجزای اصلی تشکیل دهنده سیمان |
| $C_2S$ | دو کلسیم سیلیکات، یکی از اجزای اصلی تشکیل دهنده سیمان |
| $C_3A$ | سه کلسیم آلومینات، یکی از اجزای اصلی تشکیل دهنده سیمان |
| $C_4AF$ | چهار کلسیم آلومینو فریت، یکی از اجزای اصلی تشکیل دهنده سیمان |
| $Q_3$ | ماکزیمم حرارت تولید شده در سن معادل 3 روز بتن $(kj/kg)$ |
| $Q_7$ | ماکزیمم حرارت تولید شده در سن معادل 7 روز بتن $(kj/kg)$ |
| $Q_{max}$ | ماکزیمم حرارت تولید شده در بتن $(kj/kg)$ |
| $t_0$ | سن بتن $(day)$ |
| v | سرعت باد $(m/s)$ |
| ρ | وزن واحد حجم بتن $(kg/m^3)$ |

| | |
|---|---|
| $C_1$ | گرمای ویژه بتن $(kj/kg^{o}k)$ |
| b | ضریب هدایت گرمایی بتن $(kj/m.s.^{o}k)$ |
| $k_1$ | ضریب هدایت گرمایی قالب بندی بتن $(kj/m^2.s.^{o}k)$ |
| $k_2$ | ضریب انتقال حرارت سطح بتن $(kj/m^2.s.^{o}k)$ |
| $t_{con}$ | دمای بتن ریزی $(^{o}k)$ |
| $t_{en}$ | میانگین دمای محیط $(^{o}k)$ |
| $\dot{Q}$ | روند تولید حرارت در واحد حجم جسم $(kj/m^3.s)$ |
| $\alpha$ | قابلیت پخش $(m^2/s)$ |
| T | دما در هر نقطه از جسم $(^{o}k)$ |
| t | زمان (s) |
| j | شار رطوبتی $(kg/m^3)$ |
| $S_1$ | ضریب جذب یا مکش |
| $c^0$ | ضریب مکش اولیه |
| w | آب های آزاد موجود در منافذ اشباع و نیمه اشباع بتن |
| q | شار حرارتی $(w/m^2)$ |
| a | نفوذپذیری (m/s) |
| g | شتاب جاذبه $(m/s^2)$ |
| p | فشار (pa) |
| $w_d$ | میزان آب آزاد شده بعلت دی هیدراتاسیون شدن سیمان |

| | |
|---|---|
| $w_h$ | میزان آب مصرف شده توسط ذرات هیدراته شده سیمان |
| $C$ | ظرفیت حرارتی بتن $(j/^{o}k)$ |
| $h$ | رطوبت نسبی بتن |
| $C_a$ | گرمای جذب شده در بتن از آب آزاد $(j)$ |
| $C_w$ | ظرفیت گرمایی حجمی آب $(j/m^3.^{o}k)$ |
| $w_e$ | رطوبت قابل تبخیر |
| $t_e$ | سن معادل هیدراتاسیون بتن $(day)$ |
| $R$ | ثابت گازها |
| $Q_h$ | انرژی جنبشی ناشی از هیدراتاسیون $(j)$ |
| $k_k$ | شیب منحنی ایزوترم |
| $w_1$ | جرم آب در لایه اول جذب شده |
| $p_s$ | فشار بخار آب در حالت اشباع $(pa)$ |
| $p_c$ | فشار مویینه $(pa)$ |
| $\gamma$ | کشش سطحی آب $(N/m)$ |
| $w_1$ | میزان رطوبت در بتن پس از گذشت زمان t |
| $n$ | نسبت تخلخل در بتن |
| $\varepsilon^v$ | کرنش حجمی بتن |
| $\sigma^v$ | نیروهای موجود در بتن بدلیل فشار منفذی $(pa)$ |
| $\alpha$ | ضریب انبساط حرارتی بتن $(1/^{o}k)$ |

$n_0$ نسبت تخلخل بتن

$k_b$ مدول بالک (pa)

$\rho_0$ چگالی جرمی سیمان ($kg/m^3$)

r شعاع هلال مویینگی (m)

$B_w$ ضریب انتقال سطحی رطوبت در بتن (cm/day)

$B_T$ ضریب انتقال سطحی حرارت در بتن ($j/m^2.s.^ok$)

$T_b$ دمای سطح بتن ($^ok$)

$T_{en}$ دمای محیط ($^ok$)

$a_0$ نفوذپذیری مرجع در دمای $298.16^ok$ (m/s)

$h_c$ درصد رطوبتی که در آن نفوذپذیری بین مقدار حداکثر و حداقلش نصف گردد

## ۲-۱- مقدمه

بتن ماده ای است ناهمگن که دارای خواص حرارتی متفاوتی می باشد. حرارت زایی بتن به علت واکنش هیدراسیون سیمان بوده که واکنشی گرمازا می باشد. هنگامی که بتن حجیم در برابر اتمسفر عایق نشده باشد گرادیان حرارتی اتفاق می افتد. زیرا درون بتن داغ می شود در حالیکه سطح آن حرارت خود را به اتمسفر می دهد. این گرادیان سبب ایجاد تغییر حجم متفاوت و در نتیجه ایجاد تنش می گردد. همچنین قید های داخلی ناشی از گرادیان های حرارتی ایجاد شده روی انقباض بتن در حین افت دما از دمای حداکثر به دمای ثابت نهایی تنش های کششی قابل توجهی در بتن ایجاد می نماید. از آنجائیکه بتن در مقابل تنشهای فشاری قوی و در کشش ضعیف عمل می کند، تنش تولید شده می تواند باعث ایجاد ترک در بتن گردد. بنابراین تعیین روندی برای تخمین نحوه توزیع حرارت تولید شده در بتن و همچنین تاریخچه زمانی آن الزام آور به نظر می رسد.

رطوبت و تغییرات آن علاوه بر تاثیر مستقیم بر روی محیط پیرامون ارتباط مستقیم با ایجاد و گسترش فرآیندهای مختلف همچون خوردگی، جمع شدگی و خزش در بتن، چوب و یا سایر مصالح ساختمانی دارد.

رطوبت موجود در داخل مواد و تغییرات آن معمولا به دو صورت رطوبت نسبی داخلی مواد و یا میزان رطوبت قابل تبخیر بیان می شود. به نسبت فشار بخار آب داخل به فشار بخار آب حالت اشباع رطوبت نسبی داخلی مصالح گفته می شود [۴]. به نسبت فشار بخار آب در هوا به فشار بخار هوای اشباع در دمای ثابت رطوبت نسبی هوا گفته می شود [۵].

رطوبت درون بتن به دو صورت آب شیمیایی و آب فیزیکی در ساختار بتن جای می گیرد. آب شیمیایی در فعل و انفعالات شیمیایی درگیر شده و جزء جدا نشدنی از ساختار جدید حاصل از واکنش ها می باشد.

مولکول های آب شیمیایی در درون ساختار تثبیت شده بتن بشدت توسط نیروهای قوی به مولکولهای بتن متصل هستند که تحت شرایط عادی از ماده جدید جدا نمی شوند. این مولکول ها در صورت صرف انرژی زیاد و بر هم خوردن ساختار بتن از ساختارهای تثبیت شده جدا می شوند. بنابراین تغییرات عادی در شرایط محیطی تأثیری بر روی آنها نمی گذارد.

آب فیزیکی معمولا در دو موقعیت مختلف در درون بتن حضور دارند. این مولکولها یا به ساختار جامد در لایه های مختلف چسبیده و یا در منافذ موجود داخل ساختار بتن قرار می گیرند. مولکول های آب چسبیده به ساختار جامد یا لایه اول جذب شده در سطوح و ساختار داخلی بتن، توسط نیروهای بسیار قوی به ساختار بتن چسبیده اند و حرکت مولکول های آن بسیار کند بوده که تا دمای ۴۰درجه سانتیگراد زیر صفر در بعضی موارد یخ نمی زنند [۶]. مولکولهای موجود در این لایه تقریبا بصورت جزئی از ساختار جامد

عمل می کنند، بگونه ای که در سطح تمامی مواد خشک دیده می شوند [۷]. آب موجود در لایه های بالاتر به دارای تحرک بیشتری هستند، چون مقدار نیروهای نگهدارنده در لایه بالاتر کمتر است. بنابراین امکان حرکت یونها و واکنشهای شیمیایی در این لایه ها وجود دارد که در این حالت مولکولهای آب در حالت تعادل ترمودینامیکی با شرایط محیطی می باشند و با کوچکترین تغییر در این شرایط از حالت پایا خارج می شوند. بنابراین در بتن جریان رطوبت تشکیل می شود که این جریان در درون بتن تا زمانی که میان مناطق مختلف بتن و همچنین کل مجموعه و محیط پیرامونی در فازهای مختلف توازن ایجاد نشود، وجود دارد.

آب در مواد متخلخلی نظیر بتن هم بصورت لایه های جذب شده در سطوح مختلف و هم بصورت مقادیر قابل توجه انباشته شده در منافذ موئینه وجود دارد. در حالت تعادل بتن در درصد رطوبت های پایین تنها مقدار بسیار اندکی آب در داخل این شبکه منافذ دیده می شود که این مقدار آب هم در داخل منافذ کوچکتر است. در حالیکه در درصد های رطوبت نسبی بالاتر علاوه بر اشباع کامل منافذ کوچک، منافذ بزرگتر نیز آب در آنها موجود است.

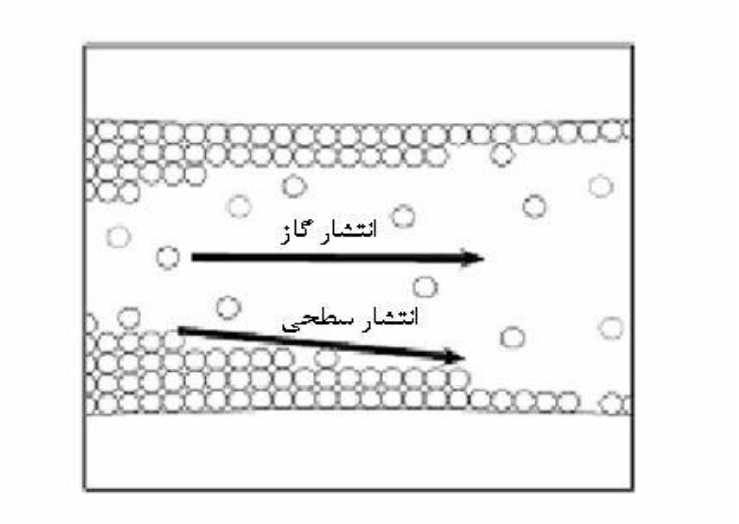
نرخ و سرعت فرآیندهایی که تحت تأثیر آب موجود در بتن هستند، وابسته به محتوی آب و روند تغییرات آن با زمان هستند. برای نمونه حداقل رطوبت نسبی حدود ۸۰ درصد برای ادامه فرآیند هیدراتاسیون در بتن لازم می باشد [۸]. و نیز برخی واکنشهای شیمیایی نظیر نفوذ یون کلر داخل بتن به ویژگیهای انتقالی آب وابسته می باشد.

هنگامی که بتن رطوبت محیطی کمتری از رطوبت داخلی خود تجربه نماید، بتن آب از دست می دهد و یا دچار خشک شدگی می شود که تعادلی جدید به سبب برهم خوردن تعادل ترمودینامیکی بین آب و بخار آب موجود در بتن ایجاد می شود. در این حالت گرادیان بخار آب از داخل منافذ به سمت سطوح آزاد نمونه ایجاد می شود.

فشار قسمت گاز شامل بخار آب و هوای خشک نیز در طی فرآیند ترکیبی انتشار بخار آب و تبخیر آب ثابت نمی ماند و تنها زمانی که تعادل بین رطوبت محیط و رطوبت داخلی بتن به همراه فشار بخار آب داخل شبکه منافذ ایجاد شود، این فرآیند مرکب به اتمام می رسد.

به جریان خالص مولکولهای آب در نتیجه حرکت تصادفی از منطقه ای با تمرکز بیشتر به منطقه ای با تمرکز کمتر مولکولی انتقال و یا انتشار گفته می شود. انتقال بخار در منافذی اتفاق می افتد که کاملا توسط آب پر نشده اند. انتقال بخار به سه بخش انتقال منفذی، انتقال سطحی و انتقال موئینه تقسیم بندی می شود [۷]. انتقال منفذی انتقال در منافذ بسیار ریز و در محلهایی که تصادم بین مولکولهای آب و دیواره منافذ تاثیر قابل توجهی بر روی نرخ انتقال مولکولها در این منافذ دارد، وجود دارد. حرکت ذرات متصل

شده در سطوح مختلف جذب شده بر روی ساختار داخلی بتن انتقال سطحی می باشد و انتقال در منافذ موئینه بخاطر اختلاف پتانسیل آب در شبکه منافذ متصل به هم انتقال موئینه می باشد. در هر صورت در مطالعات انجام یافته به دلیل پیچیدگی آن و بر همکنش آنها با ساختار داخلی بتن، تمایلی به تفکیک انواع مختلف انتقال مولکولهای آب وجود نداشته و این پدیده در بتن بصورت کلی بررسی می شود.




شکل ۲-۱- انتقال مولکولهای آب در فازهای متفاوت[۸]

مسیر حرکت مولکولهای آب از سه ناحیه متفاوت منافذ موئینه داخل بتن سخت شده، حفره ها و منافذ مربوط به سنگدانه ها و حفره های موجود در سطح مشترک (ناحیه مرزی) بین سنگدانه ها و سیمان می گذرد [۹].

سیمان سخت شده دارای حفره هایی از قبیل حفرها و لوله های موئینه در ژل سیمان می باشد. حفره های سنگدانه ها تأثیر قابل توجهی بر روی سرعت نفوذ رطوبت نخواهد داشت که علت آن توزیع سنگدانه ها در داخل ماتریس سیمان و عدم ارتباط آنها با یکدیگر جهت ایجاد مسیر جریان رطوبت می باشد. در لایه مرزی کانالهای موئینه که در نتیجه عدم تراکم کافی، آب انداختگی و ...ایجاد شده اند برای جابجایی و نفوذ آب وجود دارد. این کانالها به حرکت آب و خروج آب از داخل بتن سرعت می بخشند و دارای نقش اصلی و محوری در ایجاد وگسترش پدیده جمع شدگی و خزش هستند.

انتقال رطوبت یک فرآیند بسیار کند در داخل ریز ساختار و شبکه منافذ داخل بتن می باشد. مدت زمانی که نیاز هست یک عضو به تعادل رطوبتی با محیط برسد، تابعی از ضخامت و هندسه عضو و شرایط محیطی می باشد. که ممکن است، مدت زمان چند مـاه و حتی چندین سال طول بکشد.