۲۶ و ۲۷ بهمن‌ماه ۱۳۹۰
تالار شهید چمران - انستیتو مصالح ساختمانی
پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران
اولین کنفرانس ملی بتن سبک
دانشگاه تهران

نقش اتوکلاوینگ بهینه در تولید بتن سبک هوادار

مجید صالحی
مشاور در بتن سبک، مدیر واحد خدمات مهندسی شرکت سبک سازان شرق
Email: msalehimgr@yahoo.com

چکیده :

در صنعت ساختمان اتوکلاوها به عنوان مخازن تحت فشار و حجیم دارای شرایط ایمنی ویژه ای خواهند بود. نقش عمل آوری در بتن های معمولی و سنگین به عنوان ایجاد کنندهٔ رنگ سفید و کاهش دهندهٔ انقباض خشک شدگی شناخته شده است. متداولترین کاربرد اتوکلاو ینگ در صنعت بتن های سبک به عنوان یک فرایند پرهزینه از حساسیت و اهمیت زیادی برخوردار است. بتن های هوادار در طبقه بندی کلاسیک بتن های سبک با به کارگیری مصالح با وزن معمول پودر شده و با استفاده از عامل حباب ساز به سبکی می رسند. اتوکلاوینگ به عنوان یک روش کارا و صنعتی برای تولید با ظرفیت بالا و برطرف کنندهٔ نقص اساسی انقباض ناشی از خشک شدن این بتن در سراسر دنیا مورد توجه است. بخار اشباع با فشار ۱۳-۱۲ بار و حجم میانگین ۱۰۰ متر مکعب برای هر اتوکلاو در یک کارخانهٔ با ظرفیت متوسط که دارای حدّ اقل ۵ اتوکلاو از این نوع می باشد انرژی عظیمی است که مدیریت تولید، انتقال و مصرف آن می تواند باعث بهینه شدن کمّی و کیفی محصول تولید شده باشد. در این مقاله ضمن معرفی و شناخت اجمالی بخار و بتن سبک نتیجه گیری می شود که ؛ اتوکلاوینگ به عنوان یک فرایند پر اهمیت در تولید بتن های هوادار سبک تا کنون غیر قابل حذف باقیمانده است. اتوکلاوینگ بهینه به معنی انجام عمل آوری در کوتاهترین زمان ممکن با بیشترین بهره وری از انرژی بخار و کمترین آسیب فیزیکی به محصول می باشد. این بهسازی مستلزم شناخت دقیق فرایند تولید محصول و همچنین انرژی بخار به عنوان عامل عمل آوری از یک طرف و ایجاد کنترل و مانیتورینگ کامل در انتقال و زمانبندی بهینه در فازهای افزایش و کاهش فشار بخار از طرف دیگر می باشد.

واژه های کلیدی : اتوکلاوینگ، عمل آوری، بتن هوادار، بخار اشباع، بتن سبک

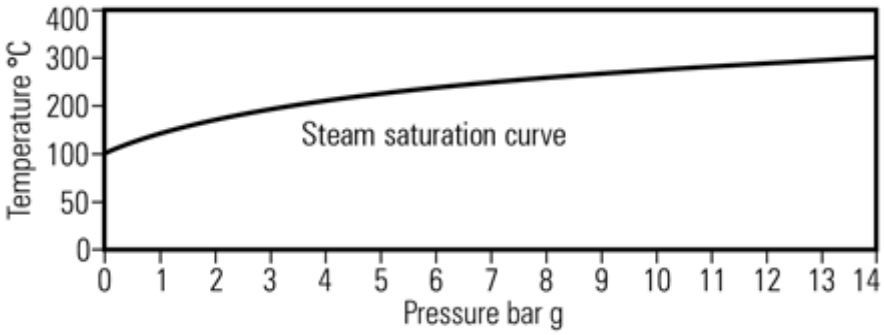
۱-مقدمه :

اتوکلاوینگ در صنعت ساختمان و بتن به معنی عمل آوری تحت فشار بخار بالا (High Pressure Steam Curing) بیش از یکصد سال است که به عنوان موثرترین روش صنعتی برای ایجاد سریع و ارزان فازهای CSH در بافت قطعات بتنی و سرامیکی شناخته شده است. اتوکلاوها در این صنعت محفظه های بسته ایی هستند که در آنها عمل آوری تحت فشار بخار بر روی قطعات

بتنی آماده انجام می شود. در حوزهٔ بتن های معمولی و سنگین عمل آوری تحت فشار بخار علاوه بر ایجاد و تکمیل فازهای بلورین CSH و افزایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته باعث پایدار سازی رنگ در بتن های رنگی و همچنین درخشانی و سفید شدن رنگ بتن های معمولی و همچنین باعث کاهش قابل توجه شرنکیج بتن می شود[۱]. در این مقاله ضمن شناخت اجمالی بخار تحت فشار و انواع آن و فازهای تولید شده در عمل آوری به کاربرد گستردهٔ عمل آوری تحت فشار بخار در تولید یکی از فراگیرترین انواع بتن سبک غیر سازه ایی یعنی بتن هوادار اتوکلاو شده (Autoclaved Aerated Concrete) پرداخته و مشخصاً به چگونگی بهینه سازی فرایند اتوکلاوینگ در تولید این محصول ساختمانی پرداخته خواهد شد.

۲– شناخت اجمالی بخار آب و کاربرد آن در صنعت

آب در فشار اتمسفریک (0barg) در $^{\circ}C$ ۱۰۰ به جوش می آید. برای جوش آمدن آب ابتدا۴۱۹ KJ انرژی گرمایی لازم است تا ۱ کیلوگرم آب از $^{\circ}C$ ۰ به $^{\circ}C$ ۱۰۰ برسد. این انرژی یه آنتالپی آب (h_f) نامیده می شود. به همین ترتیب که انرژی گرمایی انتقالی به آب اضافه می شود، برخی مولکولهای آب دارای چنان انرژ ی جنبشی می شوند که قادر می شوند از درون مایع به سطوح بالای آب حرکت کنند. با جذب بیشتر انرژی گرمایی در شرایط نقطهٔ جوش، حبابهای بخار قادر به شکافتن سطح مایع شده و فضای بالای سطح آب کم کم از مولکولهای بخار پوشیده می شود.(انرژی گرمایی که به آب $^{\circ}C$ ۱۰۰ اعمال می شود تا از حالت مایع به بخار تغییر فاز دهد آنتالپی تبخیر (h_{fg}) نامیده می شود که در مورد آن در ادامه بیشتر توضیح خواهیم داد) اگر فشار بخار بالای سر آب ثابت بماند، اضافه شدن انرژی گرمایی به آب باعث بالا رفتن دمای آب نمی شود بلکه باعث می شود آب به تدریج از شکل مایع به شکل بخار اشباع (Saturated Steam) تبدیل شود. دمای آبی که در حال جوشیدن است با دمای بخار اشباع در یک سیستم یکی است ولی انرژی حرارتی در واحد وزنی بخار بیشتر از آب است. در فشار اتمسفریک دمای اشباع (Saturated Temperature) یعن دمایی که در آن آب با گرفتن گرمای هر چه بیشتر فقط تبخیر می شود و دمایش بالاتر نمی رود اطلاق می شود. باید توجه داشته باشیم که دمای اشباع نمی تواند در فشارهای مختلف بخار ثابت بماند، در نتیجه در چنین حالتی همزمان با افزایش فشار بخار آب، دمای آب از $^{\circ}C$ ۱۰۰ فراتر می رود. این بالا رفتن دمای آب در واقع معادل افزایش آنتالپی آب (h_f) و دمای اشباع است. منحنی شکل ۱ که معروف به منحنی بخار اشباع است این موضوع را به نمایش گذاشته است.



شکل ۱۱– منحنی دما– فشار بخار اشباع [۲]

در دمای اشباع تمام گرمایی که به آب داده می شود صرف تبخیر مولکولهای آب می شود این گرمای اضافه شده به آب هیچ تاثیری روی افزایش دمای مخلوط آب/بخار ندارد و تماماً صرف تغییر حالت مایع (آب) به گاز (بخار اشباع) شده است. به این انرژی گرمایی، آنتالپی تبخیر (h_{fg}) می گویند. چون انرژی گرمایی اضافه شده روی افزایش دمای آب اثری ندارد در منابع قدیمیتر از این آنتالپی با عنوان " گرمای نهان " Latent Heat نیز نام برده شده است.

با این توصیفات آنتالپی بخار اشباع یا کلّ گرمای بخار اشباع (h_g) نتیجهٔ مجموع آنتالپی آب (h_f) و آنتالپی تبخیر (h_{fg}) می باشد همان طورکه در رابطهٔ زیر به نمایش گذاشته شده است :

$$h_g = h_f + h_{fg}$$

در فشار اتمسفریک (0barg) خواهیم داشت:

$$h_g = h_f + h_{fg} = ۲۲۵۷ ۴۱۹ +$$

$$h_g = ۲۶۷۶ \text{ K J/Kg}$$

همان طور که گفته شد همزمان با افزودن فشار بخار تولید شده در این فرایند به طور مداوم دمای اشباع و آنتالپی مایع افزایش یافته و همزمان آنتالپی تبخیر مقداری کاهش می یابد ولی در مجموع همزمان با افزوده شدن فشار بخار آنتالپی بخار اشباع افزایش می یابد. در جدول ذیل خلاصه ایی از آنچه گفته شد به نمایش گذاشته شده است. در ستون آخر حجم مخصوص بخار به نمایش گذاشته شده است که نشانگر این است که با اضافه شدن فشار بخار، حجم واحد وزن بخار کاهش می یابد.

جدول ۱- رابطهٔ بین فشار و سایر پارامترهای اصلی در بخار اشباع [۲]

Pressure bar g	Saturation temperature °C	Enthalpy kJ/kg			Volume of dry saturated steam m³/kg
		Water h_f	Evaporation h_{fg}	Steam h_g	
0	100	419	2 257	2 676	1.673
1	120	506	2 201	2 707	0.881
2	134	562	2 163	2 725	0.603
3	144	605	2 133	2 738	0.461
4	152	641	2 108	2 749	0.374
5	159	671	2 086	2 757	0.315
6	165	697	2 066	2 763	0.272
7	170	721	2 048	2 769	0.240

بخار تولید شده در فشار اتمسفریک در صنعت قابل کاربرد نیست چرا که انتقال آن از طریق لوله ها تحت فشار خودش عملاً امکان پذیر نیست. با توجّه به رابطه ایی که بین فشار و حجم مخصوص در جدول فوق ملاحظه شد معمولاً در بویلر های تولید بخار، فشار حداقل ۷ بار تولید می شود چراکه از این فشار به بالا ست که سایز لوله های انتقال بخار در حدّ اقتصادی قرار می گیرد.

۲-۱- بخار اشباع- بخار سوپر هیت- آب کندانس

همانگونه که در منحنی شکل ۱ دیده می شود نقاط روی منحنی معرف شرایط بخار اشباع می باشند. اگر بخار اشباع تولید شده از یک بویلر به یک سطح با دمای بالاتر از دمای خودش برخورد کند دمای آن افزایش یافته و بخار ایجاد شده بخار سوپر هیت (Super Heat Steam) نامیده می شود. نقاط معرف این نوع بخار در بالاتر از منحنی بخار اشباع قرار می گیرند.

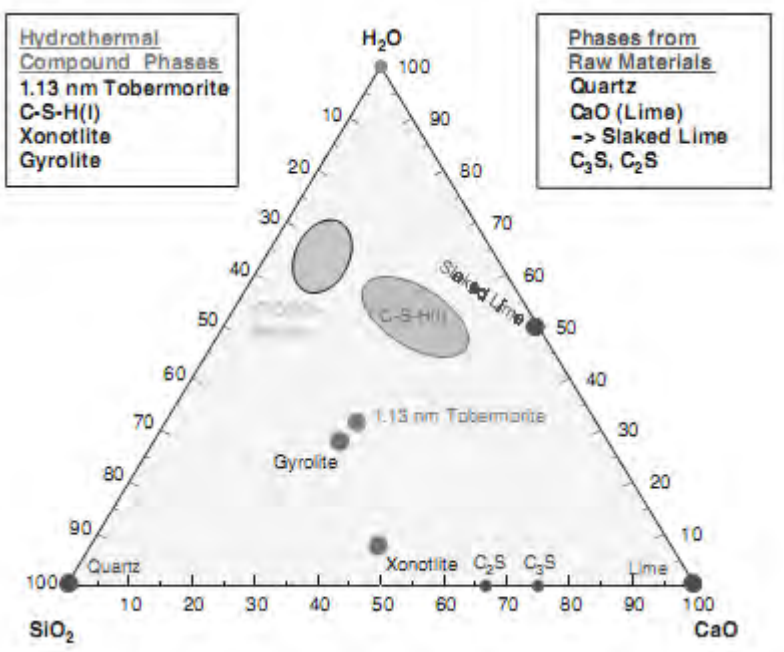
اگر بخار اشباع تولید شده از یک بویلر به یک سطح با دمای پایین تر از دمای خودش برخورد کند در یک فشار معین، آنتالپی تبخیر از آن خارج شده و بخار به آب هم دمای بخار تبدیل شده و این برگشت و تغییر فاز اصطلاحاً به کندانس (Condense) یا میعان شناخته می شود.

تولید و کاربرد بخار سوپر هیت در صنعت بتن عملاً غیر اقتصادی و بی فایده خواهد بود و عمده ترین کاربرد آن در توربین های بخار و جهت تولید برق می باشد.

ایجاد آب کندانس موضوعی است که در کاربرد و مصرف بخار اشباع در صنایع همواره جزء جدایی ناپذیر بخار محسوب شده که می باید در هر طرح انتقال بخار تمهیدات لازم برای جمع آوری و انتقال آن از طریق تراپ (تله) های بخار (Steam Traps) انجام گیرد. آب کندانس حاصل از دست رفتن آنتالپی تبخیر است که سهم بیشتری نسبت به آنتالپی آب در کلّ انرژی موجود در بخار دارد و این به این معنی است که کمتر کردن حجم آب کندانس با بهینه سازی فرایند باعث صرفه جویی بالایی در مصرف انرژی یک واحد تولیدی خواهد شد.

۳- فرایند هیدرو ترمال تشکیل پیوند های CSH تحت فشار بخار

در شکل ۳ مواد اولیه اصلی و تشکیل فازهای هیدروترمال اصلی در سیستم سه تایی H_2O و SiO_2 و CaO و همچنین موقعیت فرمولاسیون بتن سبک قبل از عمل آوری نشان داده شده است. بیست ترکیب فازی که همگی شامل ترکیب سه تایی فوق هستند می توانند در داخل این دیاگرام قرار گیرند.



شکل ۳ – فازهای CSH در سیستم سه تایی Cao وSiO2 و H2O] ۳ [

در میان تمام این پیوندها C-S-H(I) (مونو سیلیکات کلسیم هیدراته) و توبرموریت (Tobermorite) بیشترین تاثیر را در خواص کیفی بتن سبک هوادار یا AAC دارند. ایجاد مقاومت با اضافه شدن حجم سیلیکات کلسیم هیدراته و همزمان افزایش تولید میکروپورهای (ریز تخلخل ها) کمتر از ۱۰۰ nm صورت می پذیرد[۴]. ادامهٔ اتوکلاوینگ باعث تولید فازهای مهم ژیرولیت (Gyrolit) و گزونتولیت (Xontolit) و نتیجتاً کم شدن مقاومت فشاری می شود. به تجربه ثابت شده است که زمان اتوکلاوینگ بهینه به طور مستقیم به کیفیت مواد اولیه و میزان خلوص SiO2 در مواد سیلیسی مورد استفاده و CaO محتوا در آهک و سیمان مرتبط است.

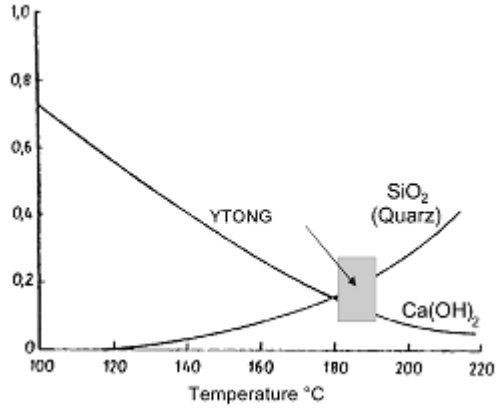
۳–۱– زمان و فشار بهینه در اتوکلاوینگ بتن سبک هوادار

تا به امروز فقط عمل آوری تحت فشار بخار (اتوکلاوینگ) بوده است که قادر به تولید صفحه های بلورین توبرموریت ۱۳/۱ nm در بتن سبک شده است [۳] مراحل تشکیل این ترکیبات در داخل اتوکلاو به شرح ذیل است :

۱– انحلال سیلیس از کوارتز و کلسیم از آهک : انحلال پذیری سیلیسیم با PH و زمان مرتبط است و میزان آن افزایش می یابد.

۲– انجام واکنش سیلیس Si^{4-} و کلسیم Ca^{2+} با آب و تشکیل فازهای CSH

منحنی شکل ۴ نشانگر منحنی های انحلال سیلیس و کلسیم از SiO2 و Ca(OH)2 می باشد.



شکل ۴- انحلال سیلیس و کلسیم در دماهای مختلف [۳]

انحلال در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد به ترتیب برای سیلیس و کلسیم معادل ۳۰۰ ppm وppm ۵۰ است. در حالیکه در همین دما سرعت تشکیل فازهای سیلیکات کلسیمی (مرحلهٔ دوم واکنش) فقط ۱ -۱۰ ppm است. بنابراین اگر دما در ۲۰۰ درجه یا بالاتر نگه داشته شود واکنش تا آنجایی ادامه می یابد که مقدار یکی از واکنش دهنده ها به اتمام برسد. معمولاً در واکنشهای شیمیایی یک دمای بهینه، دمایی است که در آن واکنش دهنده ها در نسبتهای برابر انحلال به یکدیگر برخورد نمایند و در مورد سیستم مورد بحث همانطور که از شکل ۴ نمایان است این برابری انحلال پذیری در اطراف دمای ۱۹۰- ۱۸۰ درجهٔ سانتیگراد قرار دارد. حال با مقایسهٔ این دما با منحنی شکل ۱ (منحنی بخار اشباع) دیده می شود که بخار اشباع در فشار ۱۲ تا ۱۳ بار قرار می گیرد.

در مورد زمان اتوکلاو کردن نتایج یک تحقیق نشان می دهد مقاومت فشاری از ۱تا ۸ ساعت نزدیک به ۲ برابر افزایش می شود در حالیکه اضافه شدن زمان اتوکلاوینگ به ۱۶ ساعت فقط ۲/۱ برابر نسبت به ساعت اول و پس از ۳۲ ساعت فقط ۲/۲۷ برابر نسبت به ساعت اول بوده است.] ۴[بالا بردن زمان اتوکلاوینگ بیش از ۱۰ ساعت ممکن است باعث افزایش مقاومت فشاری بشود ولی مقدار آن قابل توجه نبوده و اقتصادی نیست.

به تجربه ثابت شده است که پایین بودن خلوص واکنش دهنده ها در محتوای مواد اولیهٔ مصرفی باعث می شود که زمان بهینه برای دستیابی به مقاومت مطلوب افزوده شود.همچنین میزان رطوبت محتوای کیک قبل از ورود به اتوکلاو و میزان آب کندانس جذب شده از بخار اشباع عوامل دیگری هستند که به طور مستقیم روی زمان اتوکلاوینگ اثر می گذارند. برای وارد شدن به این بحث ذکر مقدماتی به شرح ذیل ضروری می باشد.

۴- کندانس (میعان) بخار اشباع در اتوکلاوینگ بتن سبک

به عنوان یک قانون کلّی باید بدانیم که موضوع تبدیل بخار اشباع به آب که در برخی منابع از آن به عنوان فاز انتقال (Transition Phase) نامیده می شود، یک ترم بسیار مهم در مباحث انرژی به شمار می آید و شناخت شرایط فاز انتقالی از اهمیت بالایی در بهینه سازی فرایند اتوکلاوینگ برخوردار است. وقتی در ب های یک اتوکلاو با ابعاد متوسط در صنایع بتن سبک با ابعاد قطر در طول ۲×۳۱ متر که حاوی کیک بتن سبک است بسته می شود و بخار با فشار ۱۲ بار به آن تزریق می شود.بخار تزریق شده با ۵ آیتم به شرح ذیل برخورد می کند :

۱- برخورد با بدنهٔ داخلی فلزی جسم اتوکلاو

۲- برخورد با تجهیزات فلزی که کیک بر روی آنها قرار داده شده است مثل گاری، صفحات کناری Side Plate، صفحات کفی Bottom Plates و برخی نگه دارنده های دیگر

۳- برخورد با کیک بتن سبک

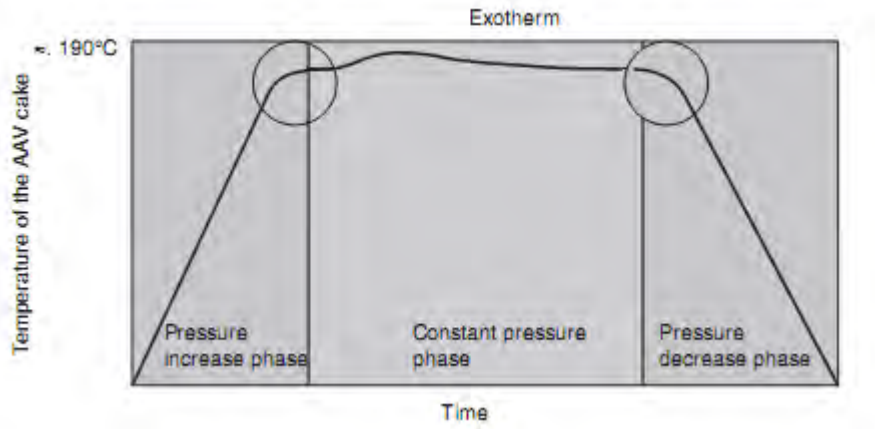
۴- پر کردن فضای خالی بین کیک ها و تجهیزات حمل کننده و بدنهٔ اتوکلاو و در نتیجه افزایش فشار داخلی اتوکلاو

بخار در برخورد با تمامی آیتم های فوق کندانس می شود. به عنوان مثال کل آنتالپی بخار اشباع در فشار ۰ بار مقدار کل انرژی موجود در یک کیلوگرم بخار h_g = ۲۶۷۶ کیلو ژول است. در برخورد ۱ کیلوگرم بخار با دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد با ۱۰۰ کیلوگرم آهن با دمای ۲۵ درجه تمامی آنتالپی تبخیر (h_{fg}) آزاد شده و باعث می شود دمای آهن ۴۸ درجه سانتیگراد افزایش

یافته به ۷۳ درجه سانتیگراد برسد. با مصرف شدن آنتالپی تبخیر، تنها آنتالپی آب باقی می ماند که آن نیز صرف تولید ۱ کیلوگرم آب کندانس با دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد می کند که این آب کندانس از بدنهٔ فلز سرازیر می شود و به پایین می ریزد.
شرایط برخورد بخار با کیک بتن سبک و تولید کندانس در آن بسیار متفاوت است به گونه ایی که همین بخار با شرایط پیش گفته در برخورد با کیک هم دما و هم وزن آهن مثال قبل فقط باعث افزایش دمای کیک به مقدار ۱۲ درجهٔ سانتیگراد شده و ۱ کیلوگرم آب کندانس ایجاد شده تماماً جذب بدنهٔ کیک شده و از آن خارج نشده و وزن کیک را ۱ کیلوگرم افزوده است.] ۳ [
با نگاهی به ظرفیت گرمایی ویژهٔ (C_p) آهن (۴۷/۰ $\overset{\circ}{k}$ K j/Kg)، مواد جامد خشک کیک (۱ $\overset{\circ}{k}$ K j/Kg) و آب ($\overset{\circ}{k}$ K ۷/۴ j/Kg) صحت نتایج فوق به اثبات می رسد. دو نتیجه گیری می توان از بحث فوق داشت : اولاً بالا بودن ظرفیت گرمایی ویژهٔ آب به نسبت سایر محتویات اتوکلاو به معنی آن است که بیشترین سهم هدررفت انرژی صرف گرم کردن آب محتوای کیک ها شده و این یکی از بزرگترین چالشهای پیش روی تولید کنندگان خواهد بود. ثانیاً آب کندانس ایجاد شده در مرحلهٔ کندانس توسط خود کیک بتن سبک – که مثل یک اسفنج عمل کرده – جذب شده است. نتایج نشان می دهد،کیک در مرحلهٔ پس از پایان افزایش فشار در داخل اتوکلاو رطوبتش به ۷۰ در صد وزنش رسیده است !] ۳ [این در حالی است که کیکی که وارد به اتوکلاو می شود کمتر از ۵۰ درصد رطوبت دارد.
خروج آب کندانس از داخل اتوکلاو از طریق لوله کشی هایی که به تله های بخار متصل هستند امکان پذیر است. باز بودن شیرهای مربوط به تله های بخار و زمان های بازو بسته کردن آنها ارتباط مستقیم به شرایط تولید و اتوکلاو ها دارد. پارامترهایی همانند ابعاد اتوکلاوها، ابعاد و حجم کیک های تولیدی، دما و وزن آب کیک ها، دمای محیط قبل از اتوکلاو و.... مهمترین آنها هستند.
در برخی کارخانه ها این شیرها دائماً باز هستند. برخی کارخانه ها از اواسط فاز افزایش فشار تا پایان فاز فشار ثابت. به هر حال با مشاهدهٔ عملی حجم آب خروجی باید برنامه ایی اجرا شود که آب برای مدت زیادی در کف اتوکلاو جمع نشود چراکه این امر در تغییر شکل اتوکلاو در طول پروسه و یا حتّی ایجاد کندانس بیشتر آب در اثر ورود بخارو برخورد به سطح آب کف ایجاد می کند. از طرف دیگر باز بودن دائمی شیرها عمر تله ها را کاهش داده به مرور باعث فرار دائمی و محدود بخار از داخل اتوکلاو می شود.

۵– مراحل عمل آوری تحت فشار بخار

سه مرحله برای عمل آوری تحت فشار شامل ۱– افزایش فشار Pressure Increasing ۲– فشار ثابت Constant Exothermic Pressure ۳– کاهش فشار Pressure Decreasing وجود دارد که در ادامه به شرایط عملی هرکدام بر پایهٔ آنچه گفته شد پرداخته می شود



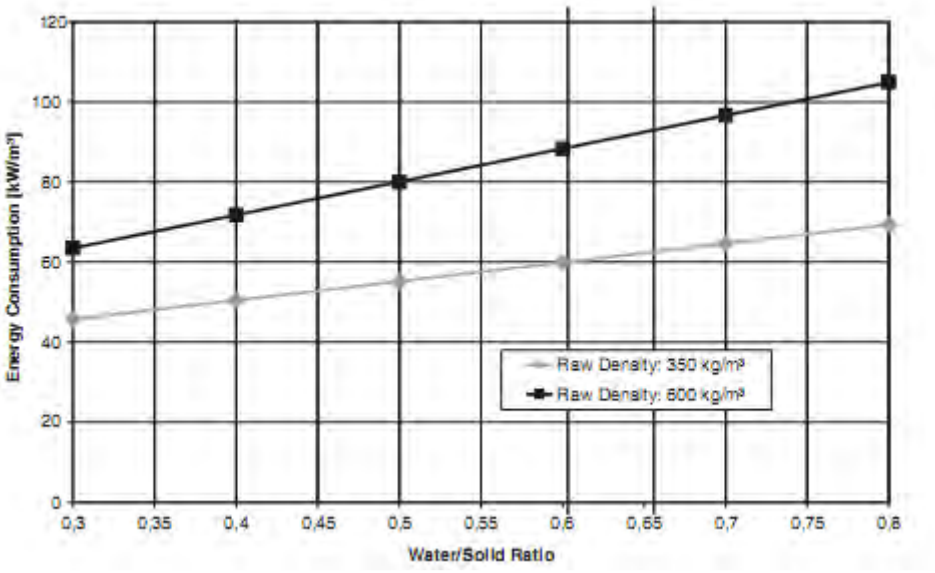
شکل ۵– مراحل مختلف عمل آوی تحت فشار نسبت به زمان [۳]

۵–۱– مرحلهٔ افزایش فشار: همانطور که ذکر شد در این مرحله مقدار آب کندانس ایجاد شده از برخورد بخار اشباع به کیک به خود کیک جذب می شود. حجم آب کندانس ارتباط مستقیم به دمای مواد جامد کیک، دمای آب محتوای کیک و مقدار آب محتوای کیک دارد.

شکل۶- اثر رطوبت و نم در محصول خروجی اتوکلاو [۵]

در یک اتوکلاوینگ بهینه باید کاری کرد که فرایند تولید کیک قبل از اتوکلاو به گونه ایی عمل کند که نتیجهٔ آن کمتر شدن آب کندانس و جذب آن توسط کیک شود. یعنی کیک باید تا حدّ امکان گرم بوده و W/S (نسبت آب به جامد) آن پایین باشد. امکان اینکه آب محتوای کیک و آب کندانس جذب شده به آنها به اندازه ایی باشد که حتّی در پایان اتوکلاوینگ، اثر آن به شکل نم در سطوح برش دیده بشود در مواردی وجود دارد مانند آنچه که در شکل ۶ دیده می شود.

۵-۲- مرحلهٔ فشار ثابت: در این مرحله بخار سعی به نفوذ در بافت متخلخل کیک بتن و پس راندن آب به مناطق مرکزی کیک دارد. اگر ظرفیت تخلخلهای کیک برای پذیرش بخار نفوذی و آب کندانس بیش از حجم آب باشد فرایند پیشرفت خوبی دارد. ظرفیت تخلخلها با تولید کیک با دانسیتهٔ پایین تر می تواند افزوده شود. در صورتیکه امکان پایین آوردن دانسیته وجود ندارد به هر حال تنها راه برطرف کردن مشکل، افزودن زمان اتوکلاوینگ تا نفوذ کامل بخار و پس زدن آب کندانس است. افزودن زمان اتوکلاوینگ به معنی افزایش انرژی مصرفی در واحد تولید می باشد. منحنی شکل ۷ میزان مصرف انرژی برای دو نوع کیک با دانسیتهٔ متفاوت در نسبتهای W/S مختلف را به نمایش گذاشته است که در واقع خلاصه ایی از تحلیل های فوق است.



شکل ۷- مصرف انرژی در کیک های با دانسیته و W/S مختلف [۳]

۵-۳- مرحلهٔ کاهش فشار : خروج بخار به معنی کاهش فشار و افزایش حجم بخار محتوی اتوکلاو است در این مرحله بخار وارد شده به تخلخلها و ریز تخلخلها و مویینگی ها با مقدار زیادی افزایش حجم مواجه هستند. افزایش حجم در فشارهای پایین تر مشهود تر است. افزایش حجم درکاهش فشار از ۲به ۱ بار ۲۴۰ بار بیشتر از کاهش فشار ۱۲ به ۱۱ بار است] ۵ [افزایش حجم بخار به ویژه در ریز تخلخلها و مویینگی ها اگر با سرعت زیاد باشد باعث ایجاد ترک و شکاف در دیوارهٔ آنها و در ادامه در بدنهٔ محصول می شود. در فصول سرد سال حتّی باز کردن ناگهانی درب اتوکلاو و خروج ناگهانی بخار باقیمانده در اتوکلاو با مکانیزم مذکور باعث ترکهایی به ویژه در لبه های فوقانی محصول می شود.

در یک کارخانهٔ تولیدی نظارت بر جریان و مراحل عمل آوری تحت فشار فقط زمانی امکان پذیر است که شرایط بخاردهی تحت نظارت لحظه ایی مدیریت قرار گیرد. مانیتورینگ اتفاقات داخل اتوکلاو همانند آنچه که در شکل ۵ دبده می شود به مسئولین کنترل کیفیت امکان می دهد تا تغییرات را به صورت لحظه ایی ثبت کرده و اثر تغییرات را ببینند.

یک مرحله بالاتر از مانیتورینگ کنترل شیرهای بخار نحت فرمان اتوماتیک و برنامه ریزی شده است که باعث حذف هرگونه خطای انسانی نیز می شود. استفاده از شیرهای رگولاتور دار (Regulated Needle Valve) به خصوص کمک زیادی در انتقال آرام و بدون شوک از فازهای سه گانه به یکدیگر خواهد داشت.

۶- نتایج

بر اساس آنچه که در این مقاله تقدیم شد، اتوکلاوینگ بهینه به معنی توجه خاص به نتایج ذیل و به کارگیری عملی آنها بر اساس شرایط عملی موجود در هر کارخانه می باشد :

۱- موضوع تشکیل آب کندانس از یک طرف و بافت اسفنجی کیک بتن سبک از طرف دیگر، حساسیت و پیچیدگی عمل آوری بتن هوادار را بیشتر می کند.

۲- ازدیاد حجم آب جذب شده به کیک در داخل اتوکلاو، باعث بروز نواقصی مانند اثر رطوبت، ترک و شکست در بدنهٔ محصول می شود.

۳- بهینه کردن نسبت W/S کیک بتن سبک، جلوگیری از سرد شدن مواد ورودی به اتوکلاو، بهینه کردن وزن کیک و سایر اجسام فلزی از جمله مواردی هستند که باید مورد توجه مهندسین تولید و کیفیت کارخانه قرار گیرند..

۴- با مانیتور کردن لحظه ایی شرایط عمل آوری داخل اتوکلاو و کنترل بخار دهی با شیرهای رگولاتور دار می توان خطاهای انسانی و هرگونه شوک اعمال شده به کیک - به ویژه در فازهای انتقالی فشار بخار- را به حدّ اقل رسانید.

۷- مراجع

1- ACI publishing " Mezel Symposium on High Pressure Steam Curing" 1972
2- Spirex Sarco publishing" Steam generation and application"2011
3- M.Hass" Optimum Autoclaving" printed in the 4th International Conference on AAC ,2005, Kingston University, London
4- T.Mitsuda,T.kiriabashi,K.Sasaki&H.Ishida" Influence of Hydrothermal processing of Autoclaved Aerated Concrete" printed in the 3th International Conference on AAC,1992,Zurich,Switzerland
5- Veladimir Martynenko " The influence of aerated concrete products technology on the energy consumption during autoclaving" printed in 5th International Conference on AAC,2011,Bydgoszcz,Poland