نشریه مباحث برگزیده در انرژی

مطالعه آزمایشگاهی احتراق زغال‌سنگ در کوره بستر سیال حبابی

محمودرضا رحیمی [۱*]، جواد صفایی [۲]، مسعود نیکبخت [۳]

۱-آزمایشگاه تحقیقاتی تشدید فرایندها، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه یاسوج
۲-دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی دانشگاه یاسوج
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی دانشگاه یاسوج

چکیده

در این مقاله فرایند احتراق زغال‌سنگ، در کوره بستر سیال حبابی، به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل داده‌های تجربی نشان می‌دهند که اندازه ذرات زغال‌سنگ و نرخ هوای تزریق شده به کوره، از پارامترهای تعیین کننده دمای بستر و احتراق مناسب در کوره بستر سیال است. بالاترین دمای بدست آمده در کوره ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد بوده که در دبی هوای ورودی ۱۲ مترمکعب بر ساعت و مخلوط سوخت با ترکیب ٪۷۵ درصد وزنیاز ذرات گروه ۲ و ٪۲۵ وزنی از ذرات گروه ۳ می‌باشد.

کلید واژگان: بستر سیال حبابی، احتراق، زغالسنگ، توزیع دما

Investigation of performance and exhaust emissions in direct injection engine using coconut oil biodiesel

Mahmood Reza Rahimi[1]، Javad Safaei[2]، Masoud Nikbakht[3]

1-Process Intensification Laboratory، Department of Chemical Engineering، Yasouj University.
2- Msc Student of Chemical Engineering Yasouj University.
3- Msc Student of Chemical Engineering Yasouj University.

Abstract

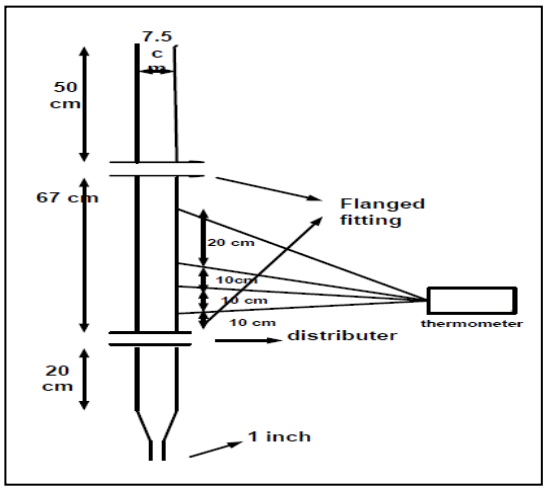
In this paper, coal combustion processes in a bubbling fluidized bed furnace were investigated experimentally. Analysis of experimental data shows that the coal size particles inlet to bed and rate of air injected into the furnace, are determinant parameter in bed temperature and proper combustion in the fluidized bed furnace. The highest temperature of 1050°C was obtained with air flow rate of $12m^3/hr$for the combustion of coal mixture with 75 wt% particles in group 2 and 25 wt% in group 3.

Keywords: Bubbling Fluidized Bed, Combustion, Coal, Temperature distribution

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-12-08]

۱- مقدمه

بویلرهای بستر سیال به طور وسیعی در تولید و تبدیل انرژی به کار می‌روند. بازده احتراق در بویلرهای بستر سیال بالا است، ولی با این وجود می‌توان با تغییر میزان هوای ورودی به بستر به منظور تأمین اکسیژن لازم برای احتراق و تغییر توزیع اندازه ذرات سوخت جامد، بازده احتراق را افزایش داد. افزایش بازده احتراق حتی به میزان ٪۱، سهم قابل ملاحظه‌ای در کاهش مصرف انرژی دارد. ژوو همکاران [۱] در سال ۲۰۰۳ احتراق در بویلر بستر حبابی و تغییرات دما در بستر را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق علاوه بر معادله احتراق زغال‌سنگ که تولید مونوکسید و دی‌اکسیدکربن می‌نماید، معادلات مربوط به نیتروژن نیز مورد توجه بوده و تولید مونواکسید نیتروژن و دی‌اکسید نیتروژن هم مورد بررسی قرار گرفته است. بستر احتراق زغال‌سنگ نیز با روش المان محدود شبیه‌سازی شده است. همچنین افزایش دمای ذرات در دو ثانیه اول مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده که دمای ذرات زغال‌سنگ بعد از یک ثانیه حدود ۶۵ درجه سانتیگراد و بعد از دو ثانیه حدود ۱۴۲ درجه سانتیگراد افزایش می‌یابد. اسکین و گانگور [۲] در سال ۲۰۰۸ اثر هوای اضافی و سرعت هوای ورودی به بستر را مورد توجه قرار داده‌اند. ضمن اینکه تعداد زیادی از معادلات شیمیایی که در بستر اتفاق می‌افتد، هم مورد بررسی قرارگرفته است. طبق نتایج ارائه شده با افزایش میزان هوای اضافی و با افزایش سرعت هوای ورودی به بستر میزان گاز مونواکسیدکربن در خروجی بستر افزایش و دمای بستر کاهش می‌یابد. چی و گنگ [۳] در سال ۲۰۱۱ اثر دمای اولیه بستر، غلظت اکسیژن ورودی به بستر و سرعت هوای ورودی را در بستر حاوی ماده بی‌اثر سنگ در احتراق زغال‌سنگ مورد بررسی قرار داده‌اند. افزایش سنگ به بستر جهت کاهش غلظت کربن و احتراق کامل زغال می‌باشد. هایدن‌هاف و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۳ اثر تغییر سوخت بر توزیع اندازه ذرات در بستر یک کوره بستر سیال حبابی را مورد مطالعه قرار دادند. با استفاده از سوزاندن زغال‌سنگ‌های مختلف در کوره بستر سیال حبابی، خاکسترهای مختلفی مانند خاکستر درشت و خاکستر سبک که همراه جریان گاز از کوره خارج می‌شود تولید شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. ساتو و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۲ اثر اندازه ذرات سوخت را برای چندین نمونه سوخت آنالیز کردند و همچنین سرعت احتراق را همزمان مورد بررسی قرار دادند و مدلی هم برای آن ارائه دادند. در مدل فوق انتقال جرم ساده یک ذره متخلخل در حال سوختن بررسی شده است. بویی و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۱ محصولات گازی حاصل از احتراق زغال‌سنگ را در یک کوره بستر سیال حبابی، در دمای ۹۰۰- ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد بررسی کردند و چندین رابطه برای محصولات گازی حاصل از احتراق و تغییرات دما در کوره ارائه دادند و نتایج را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. کوندو و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۱ احتراق ترکیب سوختی متشکل از ترکیب درصدهای مختلف از سوخت دیزل و پس‌مانده زیتون را با استفاده از دبی‌های مختلف هوای ورودی به بستر، در یک کوره بستر سیال مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که پتانسیل پس‌ماند زیتون به عنوان منبع انرژی قابل توجه است. مطالعات زیادی در زمینه محصولات گازی حاصل از احتراق، اثر هوای اضافی بر دمای احتراق و استفاده از سوخت‌های مختلف و اثر آن بر توزیع دما و توزیع اندازه ذرات در کوره بستر سیال صورت گرفته ولی مطالعه موثری در زمینه تغییر اندازه ذرات سوخت در کوره بستر سیال حبابی و اثر آن بر توزیع دما در دبی‌های مختلف هوای ورودی به بستر، صورت نگرفته است که در این مقاله به این موضوع پرداخته شده است.



شکل ۱: شماتیک کوره بستر سیال حبابی

۲- آزمایشات

در این بخش جهت انجام آزمایشات از کوره بستر سیال حبابی (شکل ۱) استفاده شده که شامل یک لوله فولادی به قطر ۷/۵ سانتی‌متر و طول ۱۲۰ سانتی‌متر می‌باشد و یک توزیع کننده هوا (توری ریز فولادی معمولی) نیز، در قسمت پایین لوله تعبیه شده است. برای اینکه جریان هوای ورودی به کوره توسعه یافته باشد، در قسمت پایین توزیع کننده، لوله‌ای به طول ۲۰ سانتی‌متر و قطر ۷/۵ سانتی‌متر تعبیه شده است. چهار ترموکوپل نوع k در فاصله‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متری بالای شبکه توزیع کننده نصب شده و توسط کابل به نمایشگر دمایی متصل شده‌اند که در شکل (۱) نشان داده شده است.

برای انجام آزمایش ابتدا سوخت با اندازه ذرات مختلف تهیه شد. پودر زغال‌سنگ توسط غربال‌های استاندارد، غربال گردید و به صورت سه گروه از ذرات با مشخصات زیر تقسیم‌بندی شد که در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات سه گروه ذرات زغال‌سنگ که با غربال‌های استاندارد

ذرات زغال‌سنگ	اندازه میانگین ذرات (میلی‌متر)	اندازه غربال‌های استاندارد (میلی‌متر)
گروه ۱	۱/۷۷	۱/۱۸ – ۲/۳۶
گروه ۲	۰/۸۹	۰/۶ – ۱/۱۸
گروه ۳	۰/۴۵	۰/۳ –۰/۶

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-12-08]

شکل ۲: ذرات زغال‌سنگ بعد از غربال و تقسیم‌بندی آن‌ها.

سه نوع ذره زغال‌سنگ که با غربال‌های استاندارد الک شده در شکل (۲) نشان داده شده است. d_p اندازه غربال‌های استفاده شده و d_{mean} میانگین اندازه ذرات، هر دو بر حسب میلی‌متر (mm) می‌باشند.

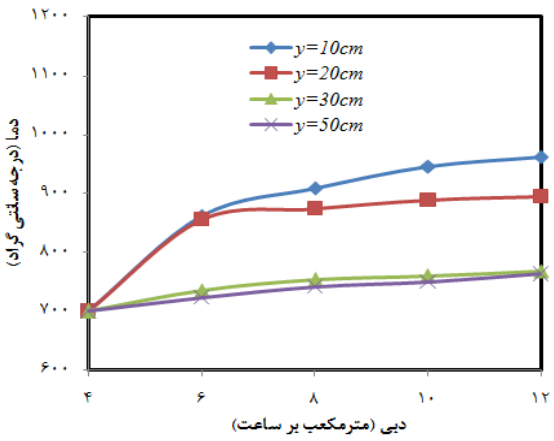
نحوه انجام آزمایشات به این صورت است که هوا توسط کمپرسور فشرده شده و توسط خط لوله به سمت کوره هدایت شده، قبل از ورود هوا به محفظه هوای پایین شبکه توزیع کننده، برای تعیین نرخ هوای ورودی، هوا از یک روتامتر با محدوده ۲-۲۰m^3/hr عبور می‌کند و وارد بستر می‌شود. آزمایش‌ها با جریان هوا ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ مترمکعب بر ساعت که معادل سرعت‌های ۰/۳۶، ۰/۵۰، ۰/۶۳ و ۰/۷۵ متر بر ثانیه می‌باشد انجام گرفت. وزن خالص ذرات زغال‌سنگ در هر آزمایش ۸۰۰ گرم می‌باشد. با توجه به توضیحات بالا آزمایش‌ها با نسبت‌های ۸۰۰-۰، ۶۰۰-۲۰۰، ۴۰۰-۴۰۰، ۲۰۰-۶۰۰، ۰-۸۰۰ گرم ذرات گروه اول با دوم و گروه اول با سوم و گروه دوم با سوم انجام گرفت. بعد از گرمایش اولیه کوره تا حدود ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، سوخت وارد کوره شده و دبی هوای ورودی در مقدار مورد نظر تنظیم می‌شود. هر آزمایش ۱۰ دقیقه به طول می‌انجامد و در هر دقیقه یک بار دما از نمایشگر دمایی ثبت می‌گردد.

۳- نتایج تجربی

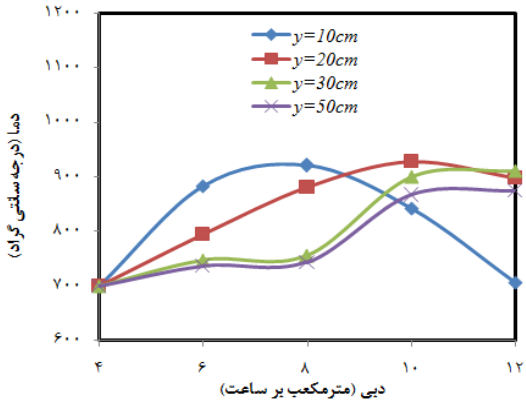
آزمایش‌ها با ترکیب درصدهای وزنی مختلف از سوخت شامل ذرات گروه ۱، ۲ و ۳، با دبی هوای ورودی به بستر (۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ متر مکعب بر ساعت) انجام و دما در طول ستون کوره اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها در دو حالت، ۱: اندازه ذرات سوخت ثابت و ۲: اندازه ذرات سوخت متغیر، به صورت جداگانه انجام شد.

۳-۱- اندازه ذرات سوخت ثابت

در این حالت برای ذرات گروه ۱، ۲ و ۳ فرایند احتراق در دبی‌های مختلف هوای ورودی به بستر (۶، ۸، ۱۰، و ۱۲ مترمکعب بر ساعت)، انجام گرفت که نمودارهای مربوطه در شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) نشان داده شده است. در همه نمودارها، y فاصله بالای صفحه توزیع کننده هوا است. به عنوان مثال مکان y=10 cm، مکانی از محفظه کوره را بیان می‌کند که ۱۰ سانتی‌متر بالاتر از صفحه توزیع کننده قرار دارد.

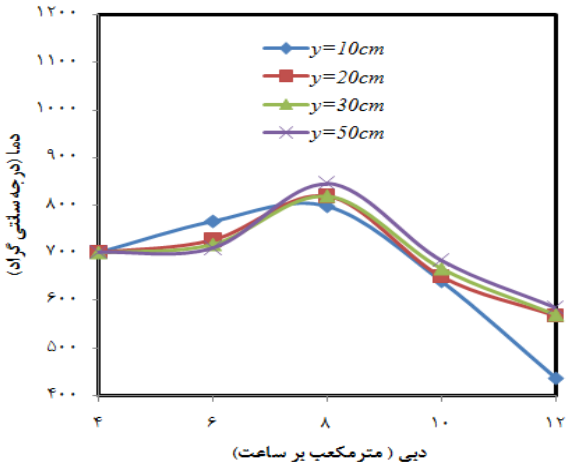


شکل ۳: تغییرات دمای بستر بر حسب افزایش جریان هوا، با اندازه ثابت ذرات، برای ذرات گروه ۱ در مدت زمان ۱۰ دقیقه.



[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-12-08]

شکل ۴: تغییرات دمای بستر بر حسب جریان هوای ورودی به کوره، با اندازه ثابت ذرات، برای ذرات گروه ۲ در مدت زمان ۱۰ دقیقه.



شکل ۵: تغییرات دمای بستر بر حسب جریان هوای ورودی به کوره، با اندازه ثابت ذرات، برای ذرات گروه ۳ در مدت زمان ۱۰ دقیقه.

در شکل (۳)، (ذرات نوع ۱)، با افزایش دبی هوای ورودی به بستر، دما در هر چهار مکان (۵۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰ =yسانتی‌متر) افزایش می‌یابد، به طوری‌که با افزایش دبی هوای ورودی به بستراز ۶ تا ۱۲ متر مکعب بر ساعت، به دلیل افزایش اکسیژن مورد نیاز برای احتراق، دما نیز افزایش می‌یابد. چون ذرات نوع ۱ سنگین‌تر از ذرات نوع ۲ و ۳ هستند، پس اکثر ذرات نوع ۱، حداکثر تا مکان y=۱۰ سانتی‌متر در کوره صعود می‌کنند و احتراق این ذرات بیشتر در این مکان کامل می‌شود و به دنبال آن، ماکزیمم دما نیز در دبی‌های ذکر شده در مکان y=۱۰ سانتی‌متر قرار می‌گیرد. در شکل (۴)، (ذرات نوع ۲)، با افزایش دبی هوای ورودی به بستر تا ۸ متر مکعب بر ساعت، دما در هر چهار مکان (۵۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰ =yسانتی‌متر)، افزایش می‌یابد و ماکزیمم دمای بستر در مکان y=۱۰ سانتی‌متر قرار دارد. در دبی‌های بیشتر از ۸ متر مکعب بر ساعت، روند توزیع دما در بستر تغییر می‌کند و با افزایش دبی هوای ورودی به بستر، ذرات سوخت به مکان‌های بالاتر کوره حرکت کرده و دما در قسمت پایین کوره (مکان y=۱۰ سانتی‌متر)، کاهش می‌یابد به‌طوری که در دبی هوای ورودی به بستر برابر با ۱۲ متر مکعب بر ساعت، دما در مکان y=۱۰ سانتی‌متر نسبت به بقیه مکان‌ها (۵۰، ۳۰، ۲۰ =yسانتی‌متر)، کمتر است. در دبی ۱۰ مترمکعب بر ساعت هوای ورودی به بستر، دما در مکان y=۲۰ سانتی‌متر ماکزیمم است زیرا اکثر ذرات سوخت در حال احتراق در این مکان قرار دارد. با افزایش دبی هوای ورودی به بستر به ۱۲ متر مکعب بر ساعت، اکثر ذرات سوخت به سمت بالای کوره حرکت کرده و احتراق این ذرات در سمت بالای کوره کامل می‌شود به طوری که ماکزیمم دما در این حالت در قسمت بالای کوره و در مکان y=۵۰ سانتی‌متر به دست می‌آید. در شکل (۵)، (ذرات نوع ۳)، در دبی ۶ مترمکعب بر ساعت هوای ورودی به بستر، ماکزیمم دما در قسمت پایین کوره قرار دارد و با افزایش دبی هوا به ۸ مترمکعب بر ساعت با حرکت اکثر ذرات سوخت به سمت بالای کوره (مکان y=۵۰ سانتی‌متر)، احتراق اکثر ذرات سوخت در این مکان تکمیل می‌شود و ماکزیمم دمای کوره در مکان y=۵۰ سانتی‌متر حاصل می‌شود. با افزایش دبی هوای ورودی به کوره به ۱۰ مترمکعب بر ساعت، ذرات سوخت به تدریج همراه جریان هوا از کوره خارج می‌شود و دما در هر چهار مکان کاهش می‌یابد. در دبی ۱۲ مترمکعب بر ساعت، تقریباً همه ذرات از کوره خارج می‌شوند (حمل بادی ذرات)، و دما در همه مکان‌ها کاهش می‌یابد. در این حالت دما در مکان y=۱۰ سانتی‌متر نسبت به بقیه مکان‌ها افت بیشتری دارد، زیرا مکان y=۱۰ سانتی‌متر در پایین‌ترین قسمت کوره قرار دارد و در دبی ۱۲ مترمکعب بر ساعت، هیچ ذره سوخت قابل احتراقی در قسمت پایین کوره وجود ندارد و احتراقی در این مکان صورت نمی‌گیرد و باعث افت دما در این قسمت کوره می‌شود. در مکان‌های بالاتر کوره (۵۰، ۳۰، ۲۰ =yسانتی‌متر)، افت دما کمتر است، زیرا در دبی‌های بالا ممکن است مقدار کمی از ذرات سوخت در حین خروج از کوره، دوباره به کوره برگردند و در این مکان احتراق ناقصی داشته باشند و باعث شود دما به مقدار کمتری نسبت به مکان y=۱۰ سانتی‌متر، افت کند. لازم به ذکر است که در دبی ۴ متر مکعب بر ساعت هوای ورودی به کوره، ذرات بستر به صورت ثابت قرار دارند.

۳-۲- اندازه ذرات سوخت متغیر

خلاصهآزمایش‌های انجام شده برای اندازه ذرات متغیر به صورت زیر در جدول (۲) بیان شده است. نمودارهایمربوط به آزمایش‌های انجام شده در شکل‌های (۶) تا (۱۷) نشان داده شده است

درشکل‌های (۶) و (۷) که مربوط به آزمایش‌های (۱) تا (۸) است، ماکزیمم دما در مکان y=۱۰ سانتی‌متر ثبت شده که بیان‌گر این است که ذرات سوخت بیشتر در قسمت پایین کوره می‌سوزند. با گذشت زمان دما در هر چهار جایگاه افزایش یافته که نشان دهنده این موضوع است که با افزایش دبی هوای ورودی به بستر، میزان اکسیژن در دسترس سوخت هم افزایش پیدا کرده و احتراق ذرات سوخت کامل‌تر شده و با گذشت زمان، توزیع دما هم روند صعودی پیدا می‌کند. روند فوق در شکل‌ها مشخص است. در شکل‌های (۸-۹)، (۸-۱۰) و (۸-۱۱)، ماکزیمم دما در مکان y=۱۰ سانتی‌متر و در شکل (۸-۱۲)، ماکزیمم دما در مکان y=۲۰ سانتی‌متر قرار دارد. در این حالت چون ترکیبی از ذرات نوع ۱ و ۲ استفاده شده و در دبی‌های بالاتر هوای ورودی به بستر، (۱۲ مترمکعب بر ساعت)، ذرات ریزتر (نوع ۲) در مکان بالاتری از کوره قرار گرفته (y=۲۰ سانتی‌متر) و در آن‌جا می‌سوزند و باعث می‌شود که در شکل (۸-۱۲)، بالاترین دما در جایگاه y=۲۰ سانتی‌متر به دست آید.

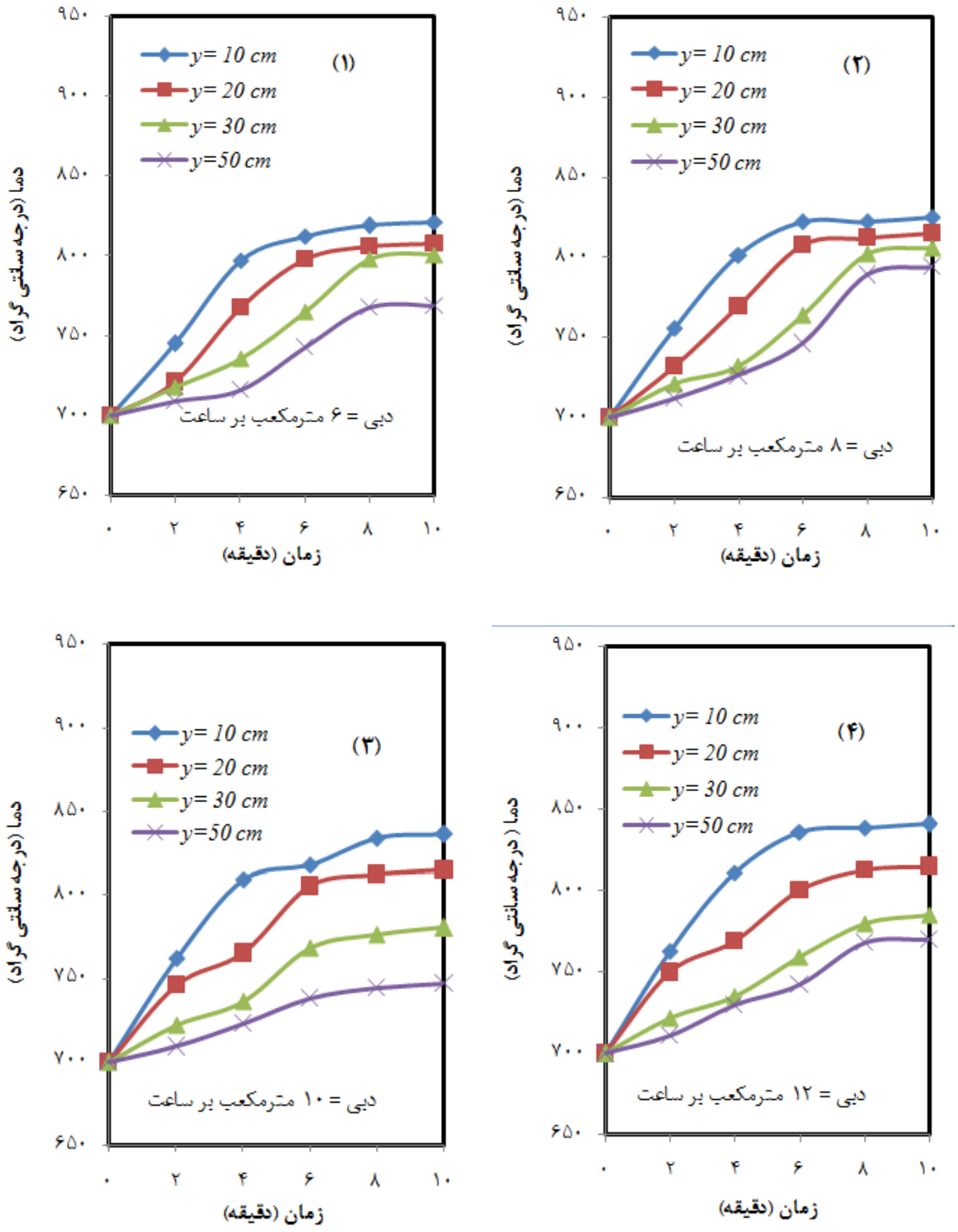
از طرفی در مجموعه شکل (۸) با افزایش دبی هوای ورودی به بستر و افزایش اکسیژن موجود در بستر، با گذشت زمان دما در هر چهار مکان در ارتفاع کوره روند افزایشی دارد. در شکل‌های (۹-۱۳) و (۹-۱۴)، ماکزیمم دما در مکان y=۱۰ سانتی‌متر ثبت شده و بیانگر آن است که اکثر ذرات سوخت در مکان y=۱۰ سانتی‌متر سوزانده شده‌اند زیرا با به‌کارگیری دبی هوای ورودی ۶ مترمکعب بر ساعت در شکل (۹-۱۳) و ۸ مترمکعب بر ساعت در شکل (۹-۱۴)، ماکزیمم حرکت ذرات (اکثر ذرات) تا ارتفاع y=۱۰ سانتی‌متر می‌باشد.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-12-08]

جدول ۲: خلاصه آزمایشات انجام شده با ترکیب درصد وزنی مختلف از ذرات، در دبی‌های مختلف هوای ورودی به بستر کوره.

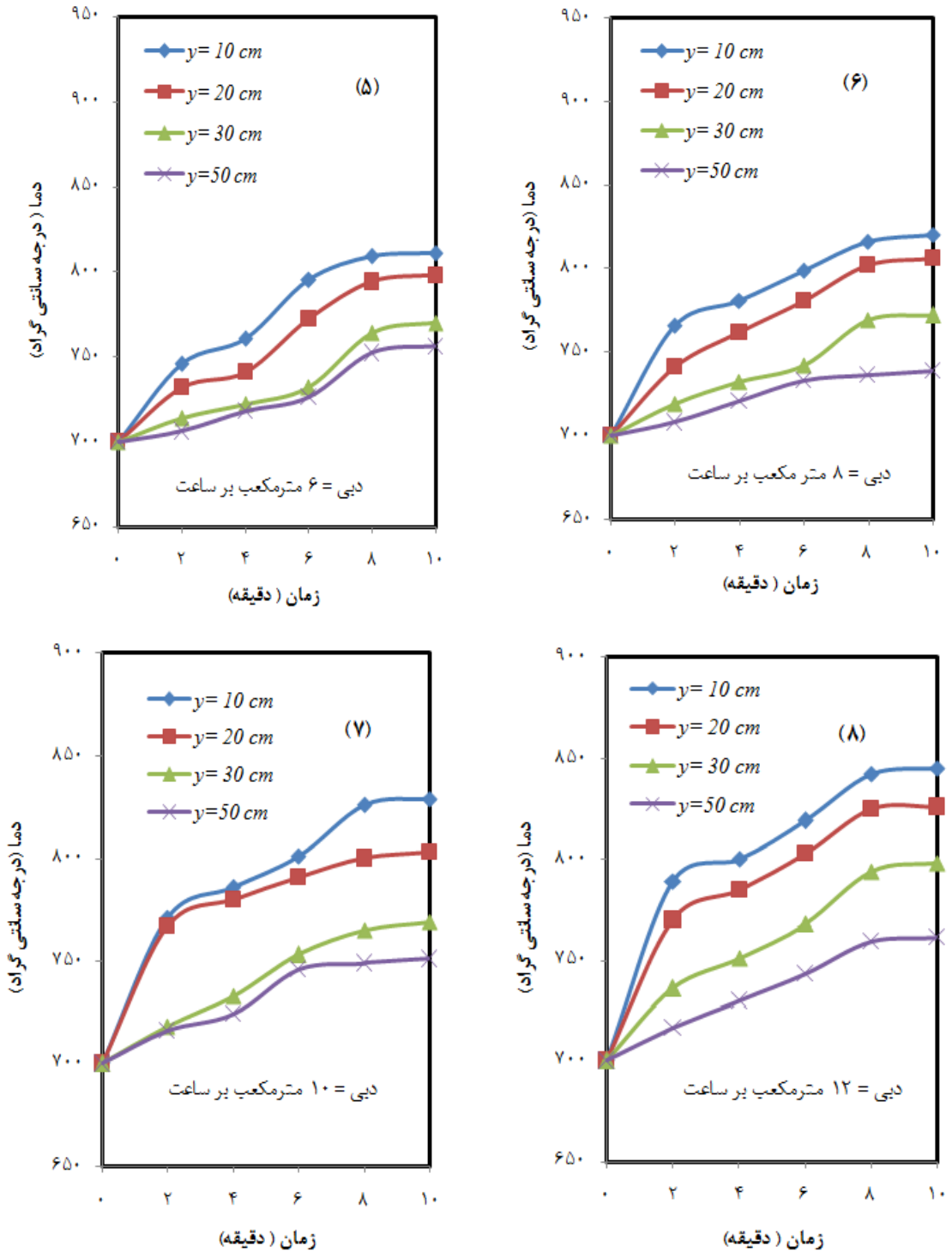
دبی (مترمکعب بر ساعت)	درصد ذرات نوع ۳ (درصد وزنی)	درصد ذرات نوع ۲ (درصد وزنی)	درصد ذرات نوع ۱ (درصد وزنی)	شماره آزمایش
۶، ۸، ۱۰، ۱۲	۰	۰	۱۰۰	۱، ۲، ۳، ۴
۶، ۸، ۱۰، ۱۲	۰	۲۵	۷۵	۵، ۶، ۷، ۸
۶، ۸، ۱۰، ۱۲	۰	۵۰	۵۰	۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲
۶، ۸، ۱۰، ۱۲	۰	۷۵	۲۵	۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶
۶، ۸، ۱۰، ۱۲	۲۵	۰	۷۵	۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰
۶، ۸، ۱۰، ۱۲	۵۰	۰	۵۰	۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴
۶، ۸، ۱۰، ۱۲	۷۵	۰	۲۵	۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸
۶، ۸، ۱۰، ۱۲	۰	۱۰۰	۰	۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲
۶، ۸، ۱۰، ۱۲	۲۵	۷۵	۰	۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶
۶، ۸، ۱۰، ۱۲	۵۰	۵۰	۰	۳۷، ۳۸، ۳۹، ۴۰
۶، ۸، ۱۰، ۱۲	۷۵	۲۵	۰	۴۱، ۴۲، ۴۳، ۴۴
۶، ۸، ۱۰، ۱۲	۱۰۰	۰	۰	۴۵، ۴۶، ۴۷، ۴۸

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-12-08]



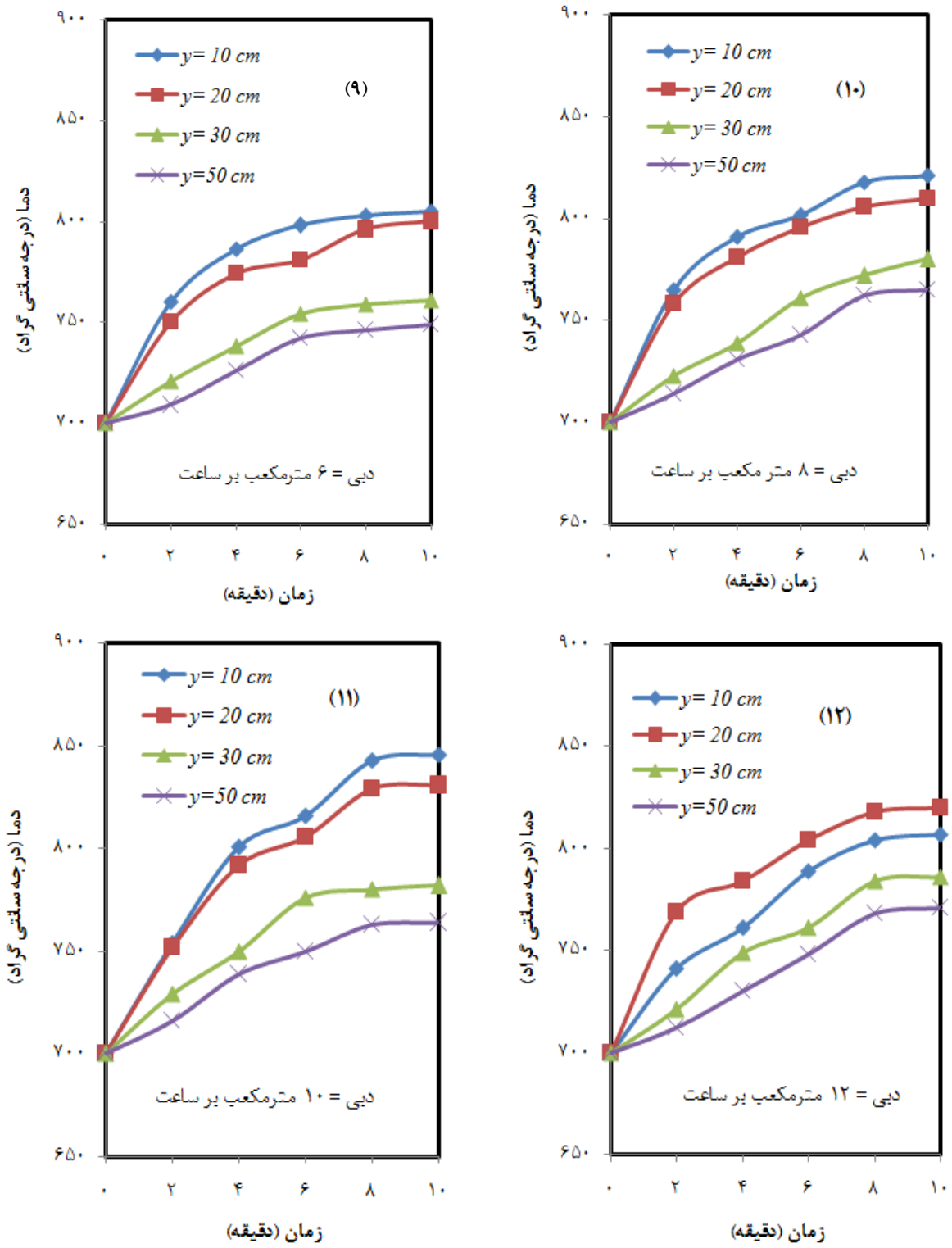
شکل ۶: توزیع دمای بستر در ارتفاع کوره بر حسب زمان در دبی‌های ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ متر مکعب بر ساعت هوای ورودی به کوره برای ۱۰۰٪ وزنی ذرات گروه ۱ در مدت زمان ۱۰ دقیقه. (آزمایش‌های ۱، ۲، ۳ و ۴)

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-12-08]



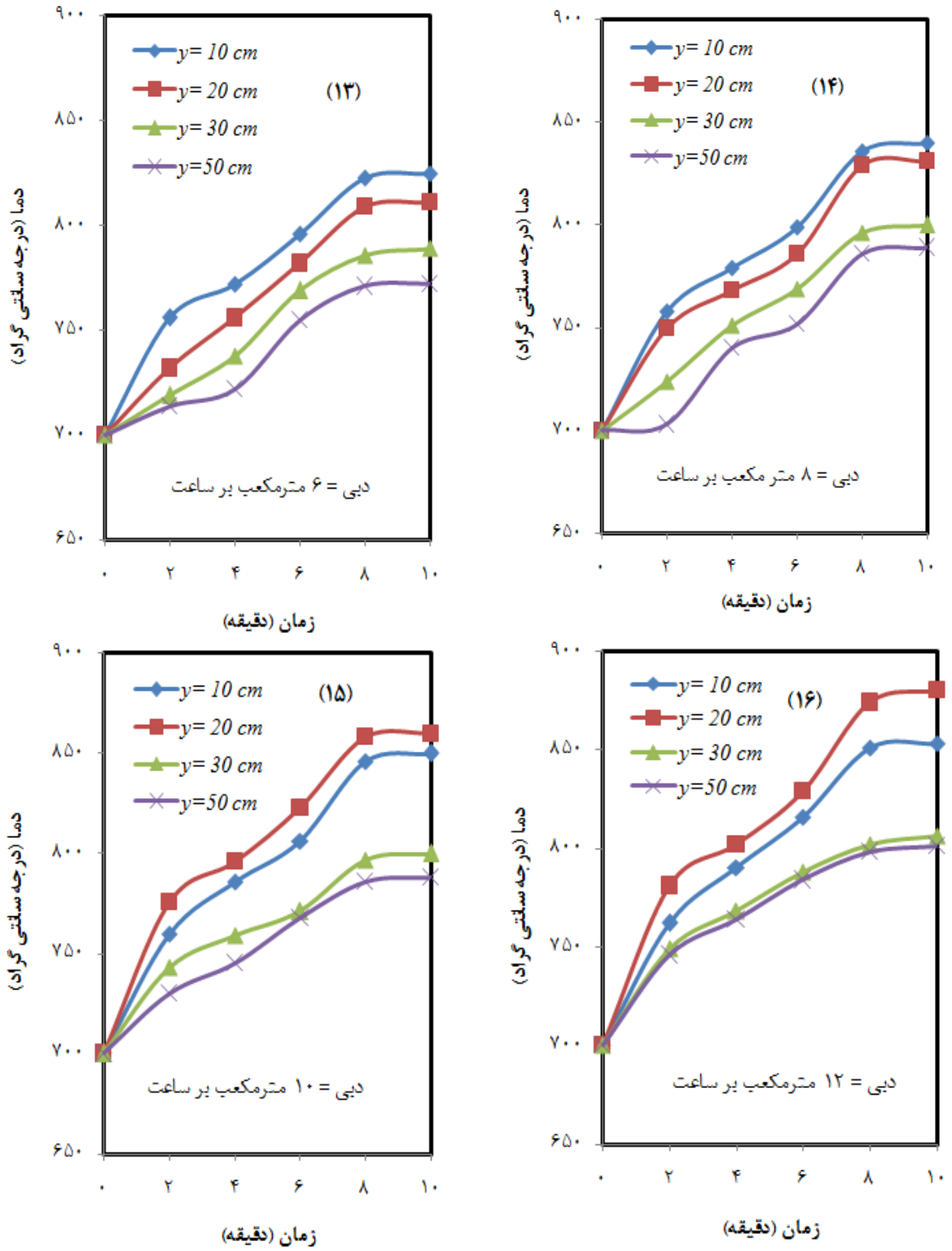
شکل ۷: توزیع دمای بستر در ارتفاع کوره بر حسب زمان در دبی‌های ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ متر مکعب بر ساعت هوای ورودی به کوره برای ٪۷۵ وزنی ذرات گروه ۱ و ٪۲۵ وزنی ذرات گروه ۲ در مدت زمان ۱۰ دقیقه. (آزمایش‌های ۵، ۶، ۷ و ۸)

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-12-08]



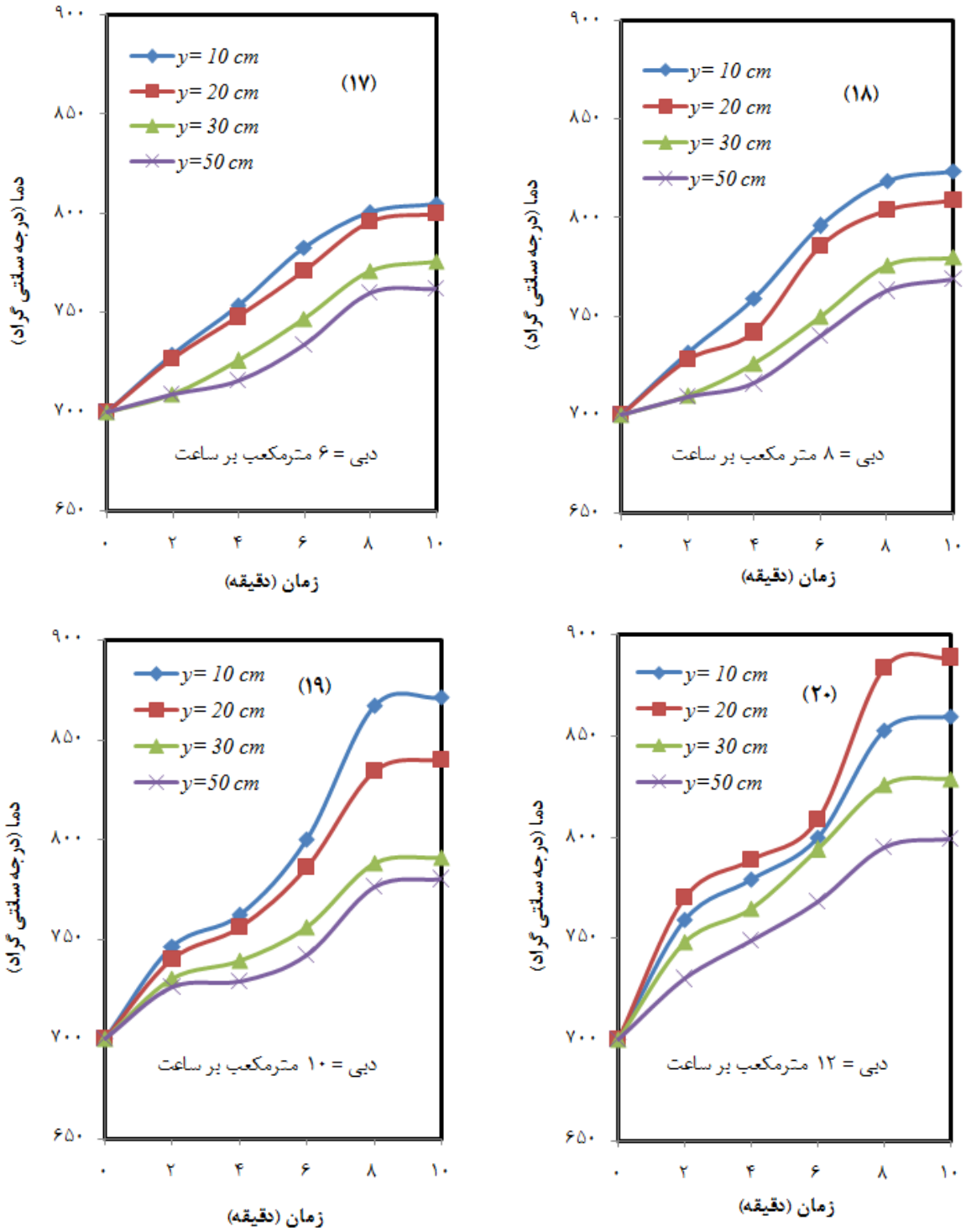
شکل ۸: توزیع دمای بستر در ارتفاع کوره بر حسب زمان در دبی‌های ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ متر مکعب بر ساعت هوای ورودی به کوره برای ۵۰٪ وزنی ذرات گروه ۱ و ۵۰٪ درصد وزنی ذرات گروه ۲ در مدت زمان ۱۰ دقیقه. (آزمایش‌های ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲)

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-12-08]



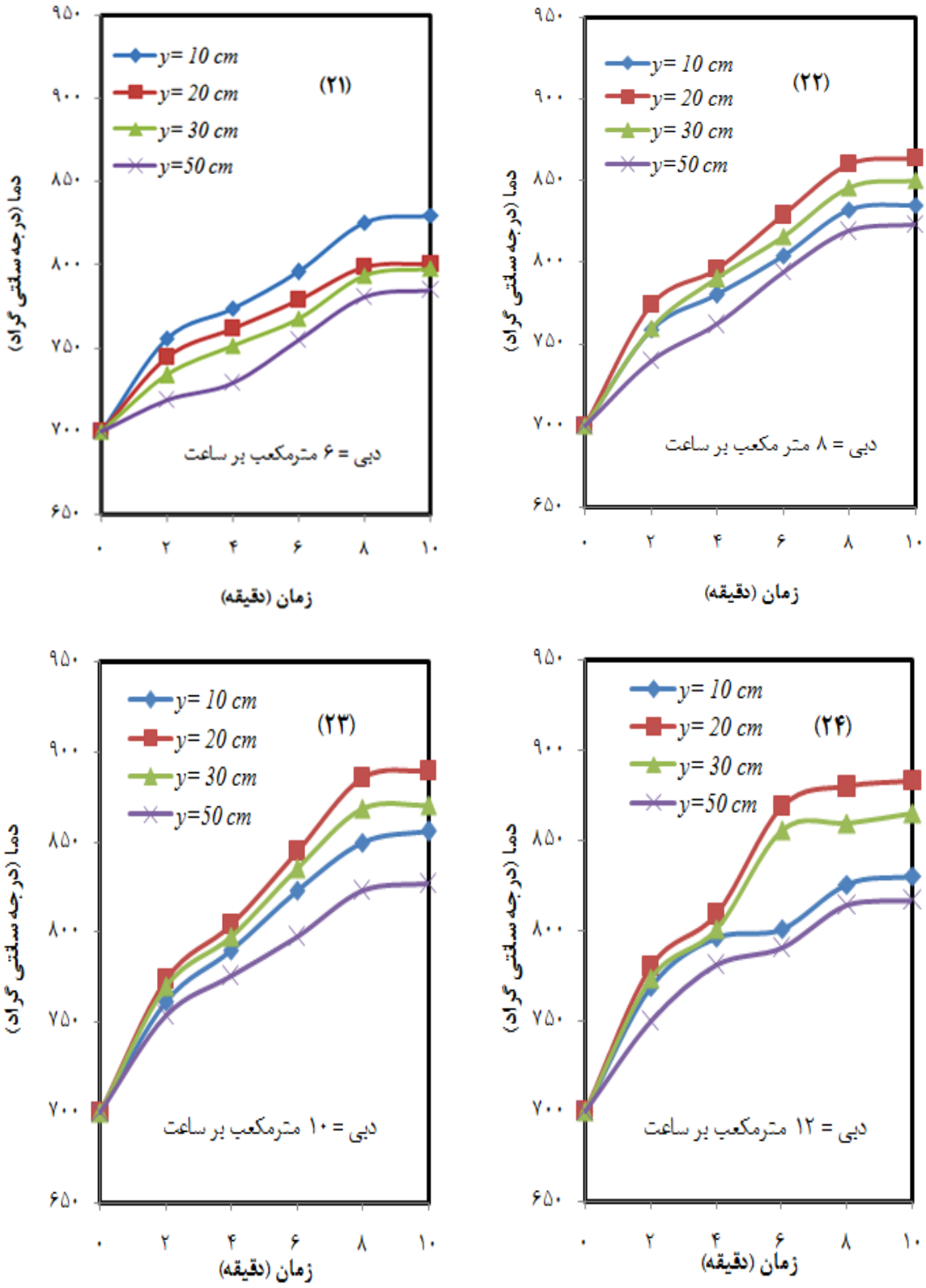
شکل ۹: توزیع دمای بستر در ارتفاع کوره بر حسب زمان در دبی‌های ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ متر مکعب بر ساعت هوای ورودی به کوره برای ٪۲۵ وزنی ذرات گروه ۱ و ٪۷۵ درصد وزنی ذرات گروه ۲ در مدت زمان ۱۰ دقیقه. (آزمایش‌های ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶)

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-12-08]



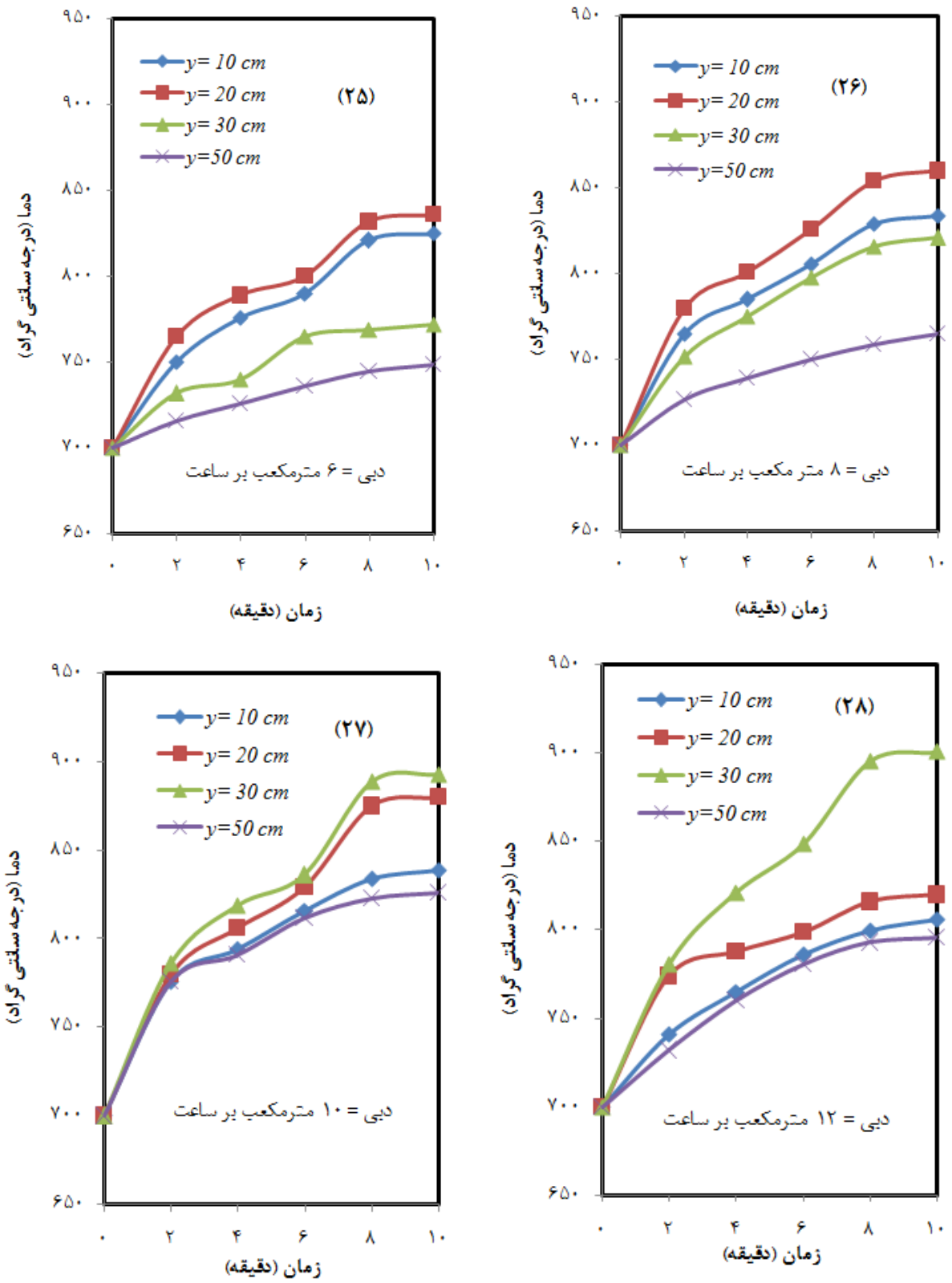
شکل ۱۰: توزیع دمای بستر در ارتفاع کوره بر حسب زمان در دبی‌های ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ متر مکعب بر ساعت هوای ورودی به کوره برای ٪۷۵ وزنی ذرات گروه ۱ و ٪۲۵ درصد وزنی ذرات گروه ۳ در مدت زمان ۱۰ دقیقه. (آزمایش‌های ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰)

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-12-08]



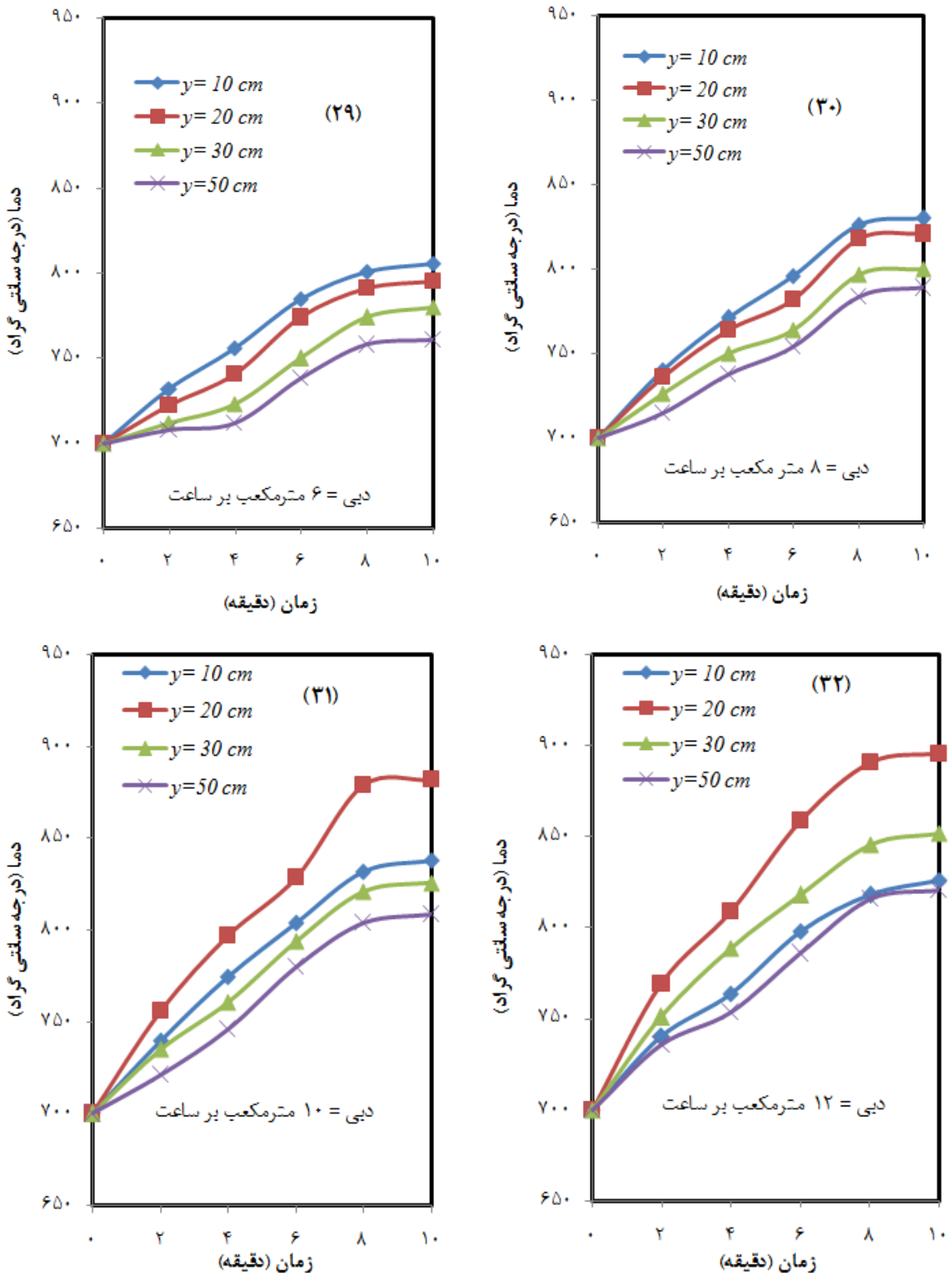
شکل ۱۱: توزیع دمای بستر در ارتفاع کوره بر حسب زمان در دبی‌های ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ متر مکعب بر ساعت هوای ورودی به کوره برای ٪۵۰ وزنی ذرات گروه ۱ و ٪۵۰ درصد وزنی ذرات گروه ۳ در مدت زمان ۱۰ دقیقه. (آزمایش‌های ۲۱، ۲۲، ۲۳ و ۲۴)

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-12-08]



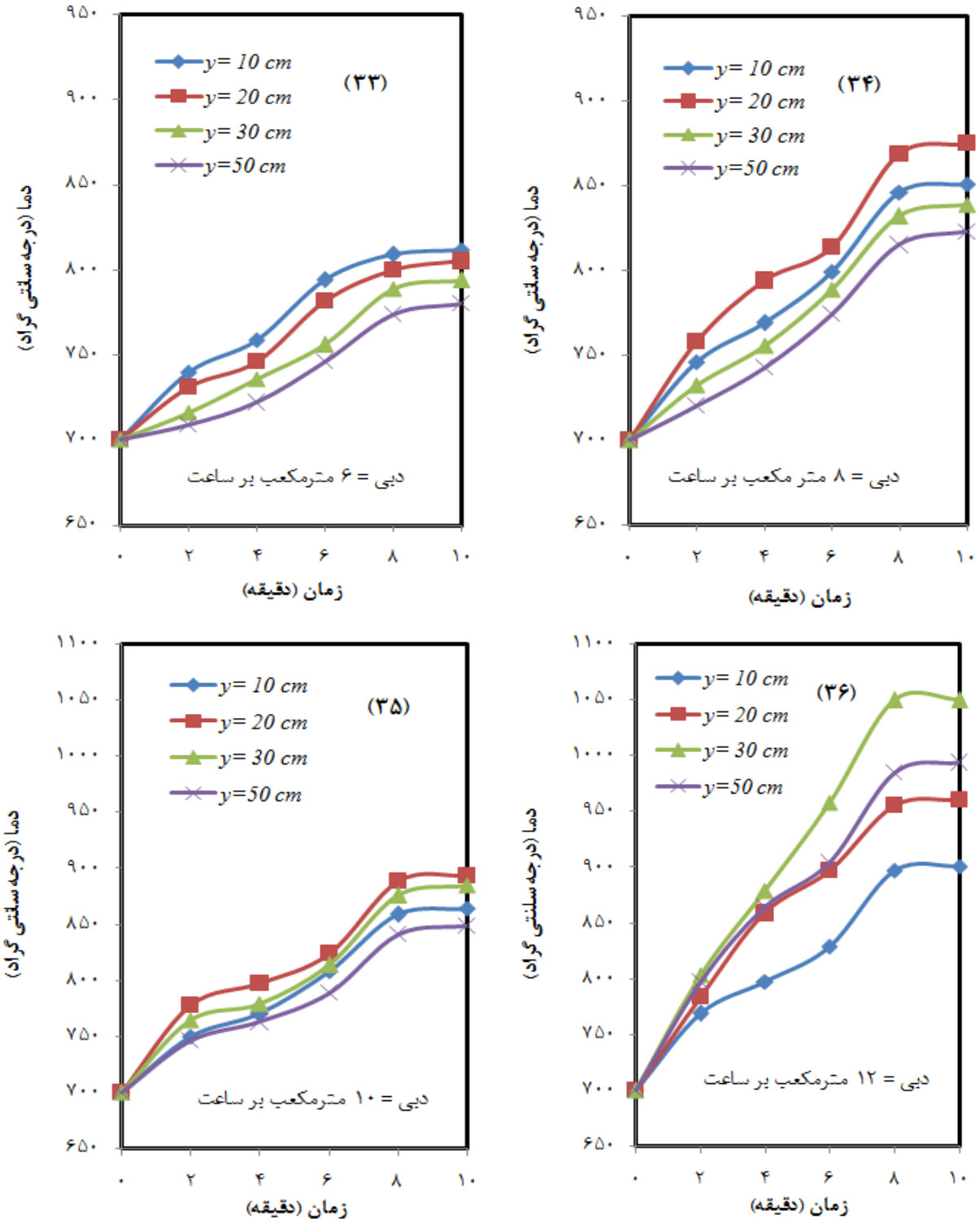
شکل ۱۲: توزیع دمای بستر در ارتفاع کوره بر حسب زمان در دبی‌های ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ متر مکعب بر ساعت هوای ورودی به کوره برای ٪۲۵ وزنی ذرات گروه ۱ و ٪۷۵ درصد وزنی ذرات گروه ۳ در مدت زمان ۱۰ دقیقه. (آزمایش‌های ۲۵، ۲۶، ۲۷ و ۲۸)

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-12-08]



شکل ۱۳: توزیع دمای بستر در ارتفاع کوره بر حسب زمان در دبی‌های ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ متر مکعب بر ساعت هوای ورودی به کوره برای ۱۰۰٪ وزنی ذرات گروه ۲ در مدت زمان ۱۰ دقیقه. (آزمایش‌های ۲۹، ۳۰، ۳۱ و ۳۲)

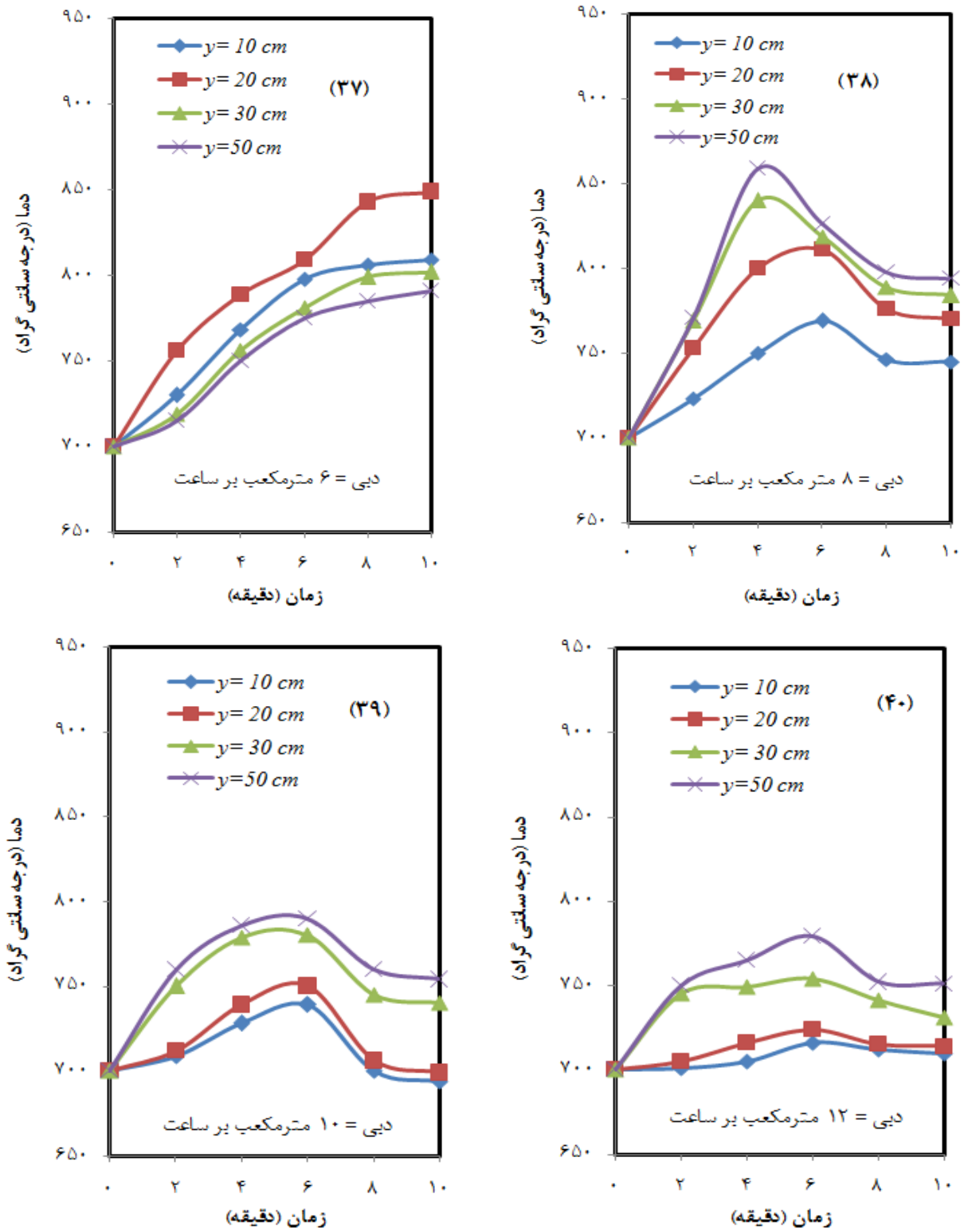
[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-12-08]



شکل ۱۴: توزیع دمای بستر در ارتفاع کوره بر حسب زمان در دبی‌های ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ متر مکعب بر ساعت هوای ورودی به کوره برای ٪۷۵ وزنی ذرات گروه ۲ و ٪۲۵ درصد وزنی ذرات گروه ۳ در مدت زمان ۱۰ دقیقه. (آزمایش‌های ۳۳، ۳۴، ۳۵ و ۳۶)

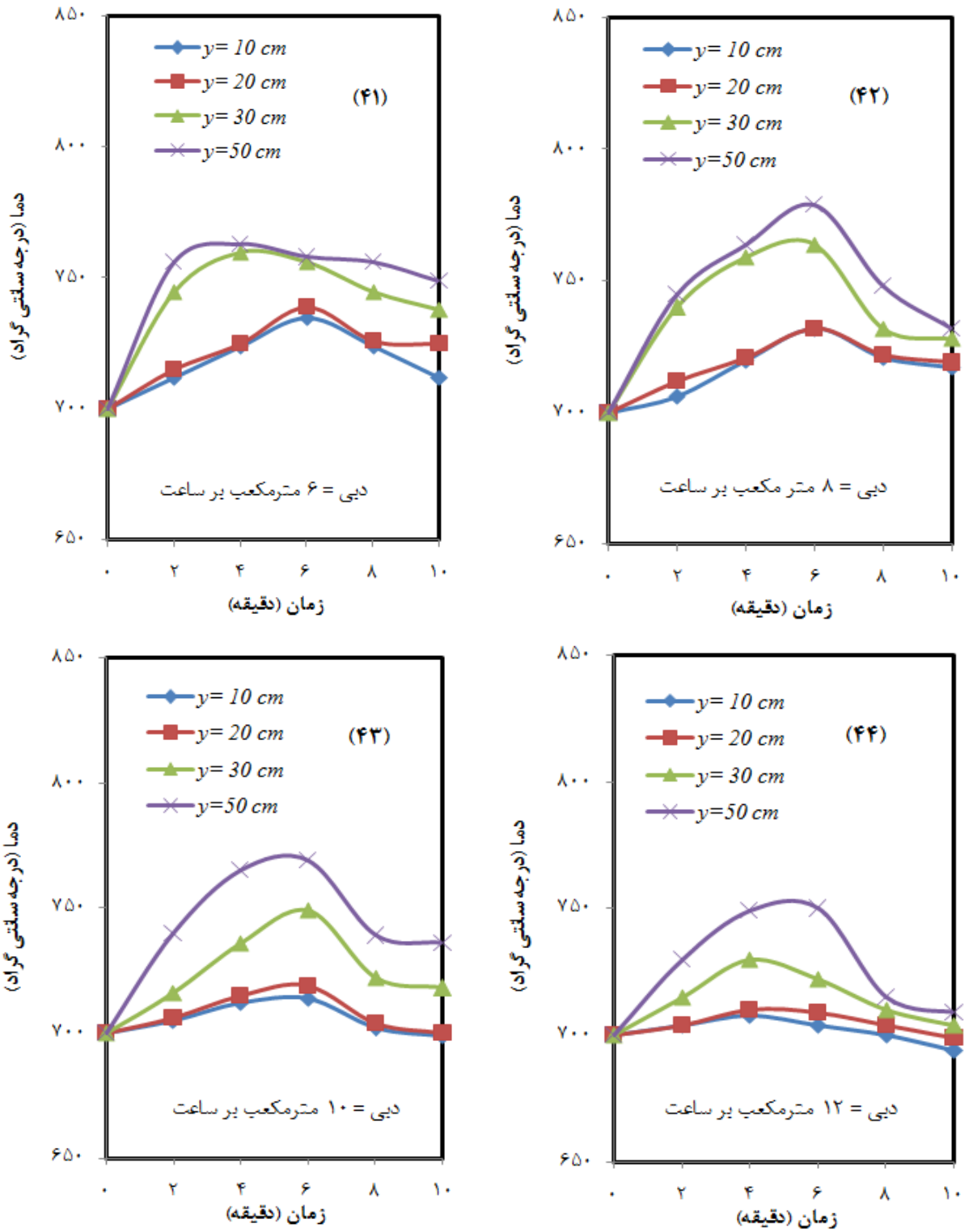
[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-12-08]

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-12-08]



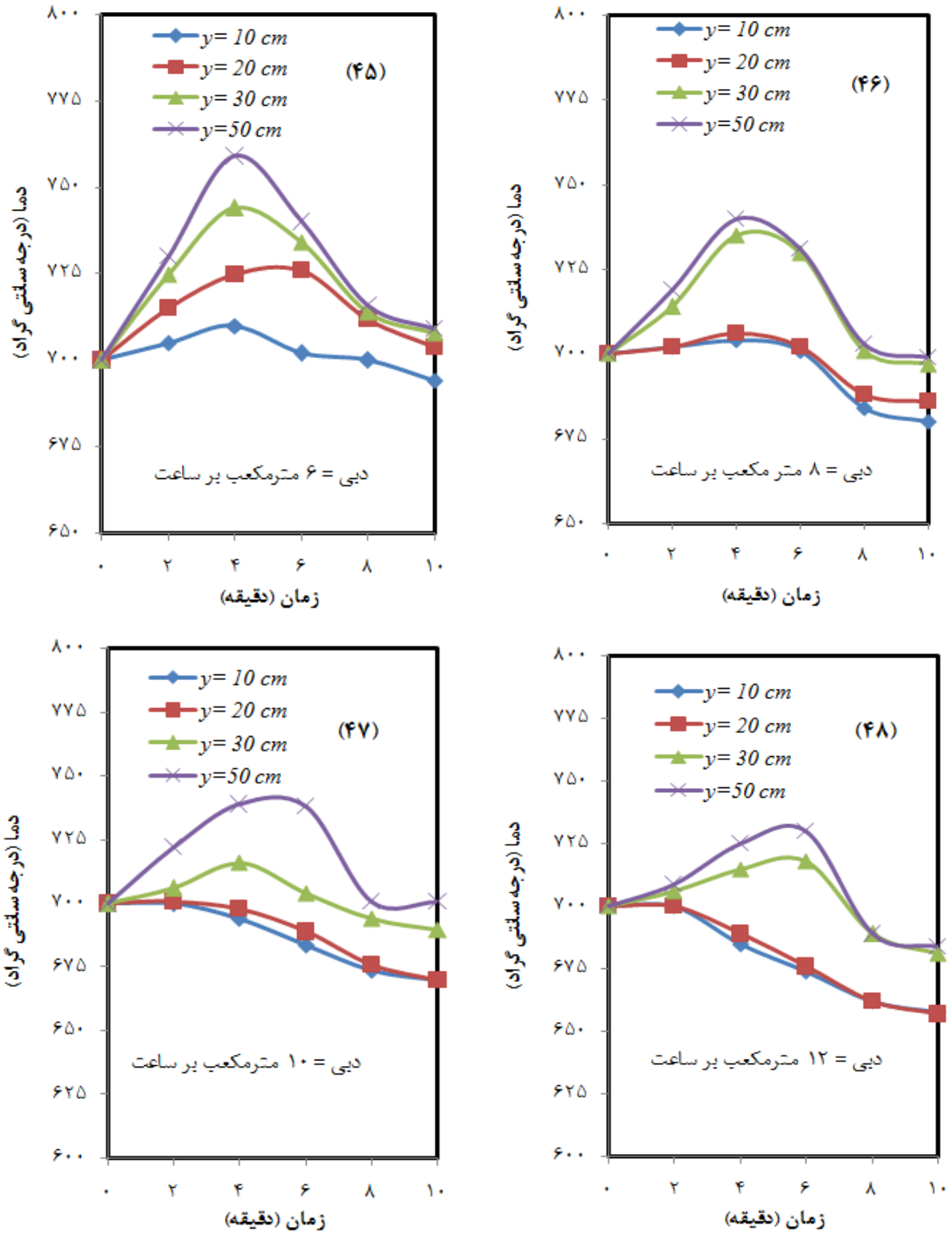
شکل ۱۵: توزیع دمای بستر در ارتفاع کوره بر حسب زمان در دبی‌های ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ متر مکعب بر ساعت هوای ورودی به کوره برای ٪۵۰ وزنی ذرات گروه ۲ و ٪۵۰ درصد وزنی ذرات گروه ۳ در مدت زمان ۱۰ دقیقه. (آزمایش‌های ۳۷، ۳۸، ۳۹ و ۴۰)

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-12-08]



شکل ۱۶: توزیع دمای بستر در ارتفاع کوره بر حسب زمان در دبی‌های ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ متر مکعب بر ساعت هوای ورودی به کوره برای ٪۲۵ وزنی ذرات گروه ۲ و ٪۷۵ درصد وزنی ذرات گروه ۳ در مدت زمان ۱۰ دقیقه. (آزمایش‌های ۴۱، ۴۲، ۴۳ و ۴۴)

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-12-08]



شکل ۱۷: توزیع دمای بستر در ارتفاع کوره بر حسب زمان در دبی‌های ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ متر مکعب بر ساعت هوای ورودی به کوره برای ۱۰۰٪ وزنی ذرات گروه ۳ در مدت زمان ۱۰ دقیقه. (آزمایش‌های ۴۵، ۴۶، ۴۷ و ۴۸)

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-12-08]

در شکل‌های (۹-۱۵) و (۹-۱۶)، ماکزیمم دما به مکان بالاتر (y=۲۰ سانتی‌متر) منتقل شده، چون در این حالت ترکیبی از ذرات نوع ۱ و ۲ (۲۵ درصد وزنی آر ذرات نوع ۱ و ۷۵ درصد وزنی ذرات نوع ۲)، استفاده شده با افزایش دبی هوای ورودی به بستر، ذرات نوع ۲ که سبک‌تر هستند، تا ارتفاع بالاتری (y=۲۰ سانتی‌متر) در کوره حرکت می‌کنند و در همان ارتفاع می‌سوزند. روند تغییرات در نمودارهای شکل (۱۰) دقیقاً مانند نمودارهای شکل (۹) می‌باشد با این تفاوت که از ذرات نوع ۱ و ۳ استفاده شده است. در نمودارهای شکل‌های (۱۱) و (۱۲) با افزایش درصد وزنی ذرات ریزتر (ذرات نوع ۳)، حرکت ذرات سوخت به مکان‌های بالاتر کوره افزایش یافته و ماکزیمم دما در مکان‌های بالاتر کوره بدست می‌آید. در نمودار شکل (۱۱-۲۱)، ماکزیمم دما در مکان y=۱۰ سانتی‌متر و در شکل‌های (۱۱-۲۲)، (۱۱-۲۳) و (۱۱-۲۴)، ماکزیمم دما در مکان y=۲۰ سانتی‌متر ثبت شده است. ضمن این‌که در شکل‌های (۱۱-۲۲)، (۱۱-۲۳) و (۱۱-۲۴)، دما در مکان y =۳۰ سانتی‌متر بیشتر از دما در مکان y=۱۰ سانتی‌متر است که بیان‌گر حرکت ذرات سوخت به مکان‌های بالاتر کوره و به دنبال آن احتراق ذرات سوخت در مکان‌های بالاتر کوره نسبت به مکان‌های پایین‌تر کوره بیشتر شده است. در نمودارهای شکل (۱۲-۲۵) و (۱۲-۲۶) ماکزیمم دما در مکان y=۲۰ سانتی‌متر و در شکل‌های (۱۲-۲۷) و (۱۲-۲۸) ماکزیمم دما در مکان y=۳۰ سانتی‌متر قرار دارد. در این حالت چون ترکیب درصد ذرات نوع ۳ که سبک هستند، در مخلوط سوخت افزایش یافته، با افزایش دبی هوای ورودی به کوره، ذرات به مکان‌های بالاتری در کوره حرکت کرده و باعث افزایش دما در مکان‌های بالای کوره می‌شود.

در نمودارهای شکل (۱۳) نیز با افزایش دبی هوای ورودی به بستر، دمای ماکزیمم به ارتفاع بالاتر کوره انتقال یافته به طوری که در دبی‌های ۱۰ و ۱۲ متر مکعب بر ساعت هوای ورودی به بستر کوره، ماکزیمم دما به مکان y=۲۰ سانتی‌متر انتقال می‌یابد. در نمودارهای شکل (۱۴) ماکزیمم دما در مکان y=۳۰ سانتی‌متر قرار دارد. در شکل (۱۴) نیز متناسب با افزایش دبی جریان هوای ورودی به کوره و با افزایش درصد وزنی ذرات ریز (ذرات نوع ۲ و ۳)، روند انتقال دمای ماکزیمم به قسمت‌های بالای کوره ادامه دارد به طوری‌که بالاترین دمای عملیاتی در نمودار شکل (۱۴-۳۶) حاصل آمده که برابر با ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد بوده و در مکان y=۳۰ سانتی‌متر و در دبی هوای ورودی به بستر برابر با ۱۲ مترمکعب بر ساعت به‌دست آمده که مربوط به ترکیب سوخت متشکل از ۷۵ درصد وزنی ذرات گروه ۲ و ۲۵ درصد وزنی ذرات گروه ۳ می‌باشد. در شکل‌های (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) روند توزیع دما در طول بستر تغییر کرده است. در نمودارهای فوق در همه مکان‌ها با گذشت زمان، روند توزیع دما ابتدا افزایشی و سپس کاهشی است. در نمودار شکل‌های (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) به علت استفاده از ذرات سوختی ریزتر (با ترکیب درصد وزنی بیشتر از ذرات نوع ۳ و ترکیب درصد وزنی کمتر از ذرات نوع ۲)، حمل بادی ذرات صورت گرفته و ذرات به خارج کوره منتقل می‌شوند. به دلیل حمل بادی ذرات سوخت به خارج کوره، احتراق ذرات سوخت کامل نمی‌شود و ذرات سوخت به صورت نیم‌سوز یا سوزانده نشده به خارج از کوره منتقل می‌شوند. مقدار کمی از ذرات سوخت در کوره به صورت ناقص سوزانده می‌شوند که باعث می‌شوند با گذشت زمان روند توزیع دما صعودی باشد. با گذشت زمان اکثر ذرات سوخت به خارج کوره انتقال داده شده و باعث می‌شود روند توزیع دما نزولی شود. در نمودار شکل‌های (۶) تا (۱۴)، متناسب با افزایش دبی هوای ورودی به بستر کوره، به علت افزایش میزان اکسیژن لازم برای احتراق، دما نیز در هر چهار مکان مشخص شده در ارتفاع کوره افزایش می‌یابد که این روند در شکل‌ها مشخص است.

۴- نتیجه‌گیری

با افزایش دبی هوای ورودی به بستر (در صورتی که حمل بادی ذرات صورت نگیرد)، به دلیل افزایش میزان اکسیژن مورد نیاز برای احتراق، دما در قسمت‌های مختلف کوره افزایش می‌یابد. برای سوخت با اندازه ذرات ثابت، برای ذرات با اندازه بزرگتر (ذرات نوع ۱)، با افزایش هوای ورودی به کوره، دما در همه نقاط کوره روند صعودی دارد و برای ذرات با اندازه کوچکتر (ذرات نوع ۳)، توزیع دما در تمام نقاط کوره ابتدا صعودی است و سپس به دلیل حمل بادی ذرات سوخت، توزیع دما نزولی می‌شود. برای ذرات سوخت با اندازه متوسط (ذرات نوع ۲)، روند توزیع دما در کوره، ترکیبی از دو حالت قبل است. برای سوخت با اندازه ذرات ثابت، بیشترین دما برای ذرات نوع ۲ به دست آمد و توزیع دمانیز یکنواخت‌تر است. برای سوخت با اندازه ذرات متغیر، وقتی که ترکیب درصد ذرات بزرگ در سوخت افزایش می‌یابد، دمای قسمت پایین کوره بیشتر از دمای قسمت بالای کوره است و هنگامی که ترکیب درصد ذرات کوچک در کوره بیشتر می‌شود در صورتی که حمل بادی ذرات صورت نگیرد، دمای قسمت بالای کوره بیشتر از دمای قسمت پایین کوره است. هنگامی که از ترکیب درصد مساوی از ذرات بزرگ و کوچک استفاده شود، توزیع دما ترکیبی از دو حالت ذکر شده است. بالاترین دما در استفاده از سوخت با اندازه ذرات متغیر، برای ترکیب درصد وزنی متشکل از ٪۷۵ ذرات نوع ۲ و ٪۲۵ درصد وزنی ذرات نوع ۳ حاصل شد و توزیع دما برای این ترکیب درصد از یکنواختی بیشتری برخوردار بود. با توجه به بررسی احتراق زغال‌سنگ در دو حالت اندازه ذرات سوخت ثابت و متغیر، استفاده از سوخت با اندازه ذرات متغیر، نسبت به سوخت با اندازه ذرات ثابت مناسب‌تر است زیرا در استفاده از سوخت با اندازه ذرات متغیر، علاوه بر افزایش دمای کوره، توزیع دمای یکنواخت‌تری نیز حاصل می‌شود.

۴- منابع

1. H. Zhou,G. Flamant, D. Gauthier and Y. Flitris, Simulation of coal combustion in a bubbling fluidized bed by distinct element method, Institution of Chemical Engineers Trans IChemE, Part A 81, 2003.
2. A.Gungor, N. Eskin, Two-dimensional coal combustion modelingof CFB, International journal of thermal sciences 47, 2008, pp. 157-174.
3. Y. Geng, an extended DEM-CFD dodel for char combustion in a bubbling fluidized bed combustor of inert sand, chemical engineering scienc. 66, 2011, pp. 207-219.
4. N. Heidenhof, W. Althoff, Importkohleeinsatz in der zirulierendenatmospharischenWiberlschichtfeuerung des Heizkraftwerkes I der Stadtwerke Duisburg AG. Power tech 12,2003, pp. 87-89.
5. R. He, J. Sato, C. Chen, Modeling char combstion with fractal pore effects, combust. Sci. Tech. 174, 2002, 19.
6. Byuug- Ho Song, Yong- Won Jang, Sang- Done Kim and Soon- Kook Kang. Department of Chemical Engineering National University, Kunsan, Korea, 2001, pp. 573-701.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-12-08]

7. M. Kondoh, S. Mori, The development of FC generation process by organic waste gasification, Chemical Engineering, 2001, pp. 45-51.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-12-08]