

بویلرهای بازیاب حرارتی





## بویلرهای بازیاب حرارتی

مهندس حسین شریفی

شرکت مدیریت پروژه‌های نیروگاهی ایران (مپنا)

انتشارات پندار پارس

سرشناسه	: شریفی، حسین، 1354 -
عنوان و نام پدیدآور	: بویلرهای بازیاب حرارتی/ حسین شریفی.
مشخصات نشر	: تهران: پندار پارس: شرکت مدیریت پروژه‌های نیروگاهی ایران (مپنا)، 1390.
مشخصات ظاهری	: 616 ص: مصور (بخشی رنگی)، جدول، نمودار.
شابک	: 978-964-2989-64-5 ریتال: 165000
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
موضوع	: دیگ‌های بخار بازیاب حرارتی
موضوع	: دیگ‌های بخار
موضوع	: مبدل‌های گرمایی
رده بندی کنگره	: 1390 9ب4/319TJ
رده بندی دیویی	: 621/183
شماره کتابشناسی ملی	: 1815032

### انتشارات پندارپارس



دفتر فروش: انقلاب، ابتدای کارگر جنوبی، کوی رشتچی، شماره 14، واحد 16 [www.pendarepars.com](http://www.pendarepars.com)  
 تلفن: 66572335 - تلفکس: 66926578 همراه: 09122452348 [info@pendarepars.com](mailto:info@pendarepars.com)



نام کتاب	: بویلرهای بازیاب حرارتی
ناشر	: انتشارات پندار پارس، با همکاری شرکت مپنا
تالیف	: حسین شریفی
ویراستار	: معصومه احمدی
چاپ اول	: بهار 90
شمارگان	: 1500 نسخه
طرح جلد	: محمد اسماعیلی هدی (طراح تصویر پشت جلد: خانم مهندس جهانشاهی)
لیتوگرافی، چاپ و صحافی	: ترام‌سنج، قلم آذین
قیمت	: 16500 تومان
شابک	: 978-964-2989-64-5



\* هرگونه کپی برداری، تکثیر و چاپ کاغذی یا الکترونیکی از این کتاب بدون اجازه ناشر تخلف بوده و پیگرد قانونی دارد \*

\*\*\* تمامی حقوق مادی و معنوی این کتاب متعلق به شرکت مپنا می‌باشد \*\*\*

## دیباچه

بویلرهای بازیاب حرارت اولین بار در سال 1949 برای بازیافت انرژی گرمایی خروجی از توربین های گازی و استفاده از آن برای پیشگرم کردن آب ورودی به نیروگاههای بخار به کار گرفته شدند. در سال 1968 این بویلرها با افزایش ظرفیت توربینهای گاز توانستند ظرفیت کافی برای تولید بخار مورد نیاز یک توربین بخار را به دست آورند. از آن هنگام تا کنون این تجهیزات نقش موثری در افزایش راندمان نیروگاههای با سوخت فسیلی پیدا کنند و بازده به کارگرفته شده این سیکل ها را به بیش از 60% برای و توان سیکل ترکیبی را برای یک توربین کلاس H تا بیش از 57% افزایش دهند. انتظار می رود با به کارگیری انرژی خورشیدی در کنار سیکلهای ترکیبی این بازده تا نزدیک 70% افزایش یابد. به کارگرفته شدن سیستمهای تولید همزمان برق و گرما و سرمایه‌ش نیز این روند برای افزایش را تداوم خواهد بخشید.

به همین دلیل است که دستیابی به فناوری طراحی و ساخت بویلرهای بازیاب حرارت برای کشور ما که منابع عظیم سوخت فسیلی را در اختیار دارد بسیار مهم است. گروه مپنا از آغاز تأسیس در سال 1371، با مهندسی، ساخت تجهیزات و احداث نزدیک به 50,000 مگاوات پروژه‌های نیروگاهی در قالب پروژه‌های خاتمه یافته، در دست احداث و آتی خود که نزدیک به 86 درصد از ظرفیت نصب شده نیروگاههای کشور را تشکیل می‌دهند مشارکت داشته است. این گروه بیشترین نقش را در توسعه ظرفیت نیروگاهی به عهده گرفته و از این طریق امکان رشد و توسعه صنعتی را فراهم ساخته است. همچنین گروه مپنا تنها سازنده کلیه تجهیزات اصلی نیروگاههای حرارتی، از جمله توربینهای گاز و بخار، تجهیزات جانبی توربین، پره توربین، ژنراتور، بویلرهای بازیاب حرارتی (HRSG)، بویلرهای معمولی و تجهیزات جانبی آنها تحت لیسانس شرکتهای معتبر جهانی درایران می باشد. در حوزه های فوق الذکر، گروه مپنا اولین و بزرگترین پیمانکار عمومی نیروگاهی در خاورمیانه و غرب آسیا، اولین و بزرگترین سازنده کلیه تجهیزات اصلی نیروگاهی در مناطق فوق و اولین و بزرگترین سرمایه گذار طرحهای نیروگاهی خصوصی در کشور محسوب می‌شود. جذب پیشرفته ترین فناوری و دانش فنی در کلیه حوزه‌های فعالیت صنعتی را می‌توان از دستاوردهای گروه مپنا برشمرد.

گروه مپنا از اواخر دهه 70 موضوع دستیابی به فناوری طراحی و ساخت بویلرهای بازیاب حرارت را در دستور کار خود قرار داد. پس از این تصمیم اولین بویلرهای ساخت گروه مپنا به فاصله کوتاهی در سال 1380 در نیروگاه سیکل ترکیبی فارس به کار گرفته شدند. گروه مپنا تاکنون توانسته است بالغ بر 60 دستگاه از این بویلرها را با وزن حدود 120/000 تن ساخته و تحویل دهد. با استفاده از این بویلرها برای تبدیل نیروگاههای گازی کشور به سیکل ترکیبی نزدیک به 5/000 مگاوات به ظرفیت تولید انرژی برق کشور اضافه شده است. کتاب "بویلرهای بازیاب حرارت" که حاصل تجربیات، تحقیقات و مطالعات متخصصین گروه مپنا است به منظور نشر دانش در دسترس

جامعه علمی و تخصصی کشور قرار می گیرد. انتظار می رود که این کتاب مورد استقبال محققین و طراحان علاقمند واقع شده و ضمن آنکه زمینه ای برای تحقیق و انتشار بیشتر متون علمی در این زمینه را فراهم می کند به توسعه این فناوری حیاتی در داخل کشور کمک کند.

هجده سال تلاش در زمینه ی جذب و تولید فناوری های پیشرفته و به کارگیری آن برای توسعه ی ملی، گروه مپنا را به یک بنگاه اقتصادی دانش بنیان تبدیل کرده است. انتشار کتاب در زمینه فناوری هایی که گروه مپنا در آن سرآمدی ملی و منطقه ای دارد ایفای بخشی از رسالتهای اجتماعی سازمان از طریق نشر دانش است. گروه مپنا امیدوار است در انجام این وظیفه از حمایت جامعه علمی-تخصصی کشور با دریافت نظرها و پیشنهادهای بهره مند شود.

آذر ماه 1389، محسن حامدی

معاونت تحقیق و توسعه گروه مپنا

## فهرست

1	پیشگفتار
<b>7</b>	<b>فصل 1</b>
7	بویلرهای بازیاب حرارتی در صنایع گوناگون
9	1-1- تلفات انرژی
10	2-1- دسته‌بندی انواع دود و کاربرد آن
10	1-2-1- منابع با درجه‌ی حرارت بالا
11	2-2-1- منابع با درجه‌ی حرارت متوسط
12	3-2-1- منابع با درجه‌ی حرارت پایین
12	3-1- بویلرهای بازیاب در صنایع
12	1-3-1- زباله سوز
15	2-3-1- تجهیزات کاهنده‌ی آلودگی در زباله‌سوزها
18	3-3-1- واحدهای گوگردزایی
22	4-3-1- واحدهای تولید اسیدسولفوریک
24	5-3-1- بازیافت حرارت در واحدهای ذوب فلزات
26	6-3-1- کوره‌ی ذوب شیشه
28	7-3-1- واحدهای تولید کربن
30	8-3-1- واحدهای تولید هیدروژن
34	9-3-1- سیکل‌های ترکیبی و یا تولید همزمان برق و حرارت
<b>41</b>	<b>فصل 2</b>
41	آشنایی با بویلرهای بازیاب حرارتی سیکل ترکیبی
42	1-2- انواع بویلرهای بازیاب
43	1-1-2- بویلرهای بازیاب فایر تیوب
44	2-1-2- بویلرهای بازیاب واتر تیوب
47	1-2-1-2- بویلر بازیاب افقی
49	2-2-1-2- بویلر بازیاب عمودی
57	3-2-1-2- بویلرهای بازیاب یکبارگذر
59	2-2- اجزای یک بویلر بازیاب افقی



- 101 ..... احتراق اضافی ..... 11-2-2-2
- 103 ..... انواع داکت برنرها ..... 1-11-2-2
- 105 ..... فن تأمین هوا در داکت برنر ..... 2-11-2-2
- 105 ..... عملکرد F.D.Fan در حالت توقف عملکرد توربین گاز ..... 1-2-11-2-2
- 106 ..... عملکرد I.D.Fan در حالت توقف عملکرد توربین گاز ..... 2-2-11-2-2
- 107 ..... طراحی داکت توزیع هوای ورودی ..... 3-11-2-2
- 109 ..... شرایط عملکرد داکت برنرها ..... 4-11-2-2
- 109 ..... تعیین سایز داکت برنر ..... 5-11-2-2
- 113 ..... اجزاء داکت برنر ..... 6-11-2-2
- 115 ..... پمپها ..... 12-2-2-2
- 115 ..... پمپ سیرکولاسیون بویلر ..... 1-12-2-2
- 117 ..... پمپ چرخش آب پیشگرمکن ..... 2-12-2-2
- 117 ..... پمپ آب تغذیه ..... 3-12-2-2
- 118 ..... پمپ درین بلودان ..... 4-12-2-2
- 119 ..... پمپ تزریق مواد شیمیایی ..... 5-12-2-2
- 119 ..... روشهای کاهش آلودگی در بویلر بازیاب ..... 13-2-2-2
- 119 ..... کاهش  $NO_x$  ..... 1-13-2-2
- 121 ..... کاهش غیر کاتالیستی انتخابی (SNCR) ..... 1-1-13-2-2
- 121 ..... کاهش کاتالیستی انتخابی (SCR) ..... 2-1-13-2-2
- 123 ..... کاهش کاتالیستی  $NO_x$  & CO (SCONO<sub>x</sub>) ..... 3-1-13-2-2
- 123 ..... روشهای کاهش CO ..... 2-13-2-2
- 124 ..... شیرها ..... 14-2-2-2
- 128 ..... شیر اطمینان ..... 1-14-2-2
- 129 ..... شیرهای توقف بخار ..... 2-14-2-2
- 129 ..... شیرهای تخلیه‌ی بلودان و درین ..... 3-14-2-2
- 130 ..... شیرهای ونت هوا ..... 4-14-2-2
- 130 ..... شیرهای کنترل ..... 5-14-2-2
- 131 ..... شیرهای تقلیل فشار ..... 6-14-2-2
- 132 ..... جانمایی بویلرهای بازیاب ..... 3-3-2-2
- 132 ..... موقعیت بویلر بازیاب نسبت به توربین گاز ..... 1-3-2-2
- 134 ..... موقعیت بویلر در آرایشهای تک محوره و چند محوره ..... 2-3-2-2

136	3-3-2- آرایشهای دیگر بویلر بازیاب
137	4-3-2- بویلرهای بازیاب Indoor و Outdoor
138	5-3-2- موقعیت بویلرهای بازیاب نسبت به مصرف کننده
139	6-3-2- تجهیزات جانبی در بویلرهای بازیاب
141	1-6-3-2- هوازدا
142	2-6-3-2- پمپ آب تغذیه‌ی بویلر
143	3-6-3-2- واحد تزریق مواد شیمیایی

### 145..... فصل 3

145	ترمودینامیک بویلرهای بازیاب سیکل ترکیبی و COGENERATION
145	1-3- سیکل استاندارد هوایی برایتون
147	2-3- سیکل رنکین
148	3-3- چرخه‌ی سیکل ترکیبی
152	4-3- سیکل تکفشاره
155	1-4-3- فشار بخار
158	2-4-3- دمای بخار
160	Pinch & Approach-3-4-3
164	4-4-3- افت فشار مسیر بخار
164	5-4-3- افت فشار دود
166	6-4-3- دمای آب تغذیه ورودی
168	7-4-3- هوازدا
173	8-4-3- دو نمونه بویلر بازیاب تک فشاره در واحدهای Cogeneration
175	5-3- سیکل دوفشاره
180	1-5-3- فشار بخار
183	2-5-3- دمای بخار
184	3-5-3- دمای Pinch
185	6-3- سیکل سه فشاره
188	1-6-3- پارامترهای اصلی در یک سیکل سه فشاره
191	7-3- سیکل گرمایش مجدد
195	1-7-3- تاثیر ریهیت بر عملکرد بویلر بازیاب
195	2-7-3- تاثیر فشار HP و ریهیت بر بویلر بازیاب

196	3-7-3- استفاده از بویلر بازیاب به عنوان ریهیتر
198	8-3- بویلر بازیاب با احتراق اضافی
201	1-8-3- مزایا و معایب احتراق اضافی
202	2-8-3- تاثیر داکت برنر بر عملکرد بویلر بازیاب
209	3-8-3- انتخاب موقعیت و سایز داکت برنر
214	4-8-3- فن در داکت برنر
218	9-3- بررسی پارامترهای مرتبط با شرایط سایت
219	1-9-3- دمای هوای محیط
224	2-9-3- فشار هوای محیط
225	3-9-3- رطوبت نسبی محیط
228	4-9-3- سیستم خنک کن
233	5-9-3- فشار بخار (حالت Sliding)
234	1-5-9-3- بهره‌برداری در حالت Sliding
237	6-9-3- بار توربین گاز
238	1-6-9-3- ملاحظات طراحی بویلر برای توربینهای گاز با IGV
239	2-6-9-3- ملاحظات طراحی بویلر برای توربینهای گاز بدون IGV
240	7-9-3- سوخت
241	1-7-9-3- ترکیب و ارزش حرارتی سوخت
243	2-7-9-3- واحدهای IGCC
246	3-7-9-3- میزان انتشار آلودگی
246	4-7-9-3- میزان رسوب بر روی سطوح حرارتی
246	5-7-9-3- میزان خوردگی
247	1-5-7-9-3- مکانیزم تشکیل اسید
250	2-5-7-9-3- روشهای پیشگیری از خوردگی سرد
253	10-3- واحدهای تولید همزمان
254	1-10-3- تولید انرژی حرارتی برای مصارف فرایندی
258	2-10-3- واحدهای گرمایش و سرمایش محلی
261	3-10-3- آب شیرین‌کن
265	11-3- بررسی اثرات روشهای افزایش توان توربین گاز بر عملکرد بویلر بازیاب
265	1-11-3- خنک کاری هوای ورودی به کمپرسور
267	1-1-11-3- سیستم مه پاش

269	.....سیستم فوق پاششی 2-1-11-3
271	.....سرمایش تبریدی 3-1-11-3
274	.....تزریق آب داغ به کمپرسور 2-11-3
274	.....تزریق بخار به محفظه‌ی احتراق 3-11-3
277	.....استفاده از توربین گاز در بویلرهای حرارتی 4-11-3
277	.....استفاده از دود خروجی توربین گاز برای هوای احتراق 1-4-11-3
278	.....استفاده از دود خروجی توربین گاز برای پیشگرم کردن آب تغذیه‌ی ورودی 2-4-11-3
279	.....بازتوانی موازی 3-4-11-3
281	.....بازتوانی کامل 4-4-11-3

#### فصل 4.....283

283	.....محاسبات حرارتی در بویلرهای بازتاب
284	.....تخمین میزان تولید بخار در یک بویلر بازتاب 1-4
290	.....ضرایب کلی انتقال گرما 2-4
292	.....تجزیه و تحلیل مبدل حرارتی 3-4
292	.....روش اختلاف دمای میانگین لگاریتمی 1-3-4
295	.....روش کارایی - NTU 2-3-4
298	.....معادلات حاکم 3-3-4
299	.....ضرایب انتقال حرارت 4-4
299	.....ضریب انتقال حرارت داخلی 1-4-4
299	.....اکونومایزر 1-1-4-4
300	.....سوپرهیتر 2-1-4-4
301	.....اوپراتور 3-1-4-4
303	.....ضریب انتقال حرارت خارجی 2-4-4
303	.....ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی خارجی 1-2-4-4
306	.....ضریب انتقال حرارت تشعشعی 2-2-4-4
311	.....دمای لوله و فین 5-4
312	.....واکنشهای احتراق سوخت 6-4
	.....محاسبه‌ی هوای مورد نیاز برای احتراق و محصولات تثوریک احتراق برای سوخته‌های
316	.....گازی 1-6-4

2-6-4- محاسبه‌ی هوای مورد نیاز جهت احتراق و محصولات تئوری احتراق برای سوخت‌های مایع	318
7-4- خواص ترمودینامیکی و ترموفیزیکی گازها	320
1-7-4- محاسبه‌ی آنتالپی دود	320
2-7-4- محاسبه‌ی ضریب گرمای ویژه CP	322
3-7-4- محاسبه‌ی چگالی	322
4-7-4- محاسبه‌ی ویسکوزیته‌ی دینامیکی	323
5-7-4- ضریب هدایت حرارتی	324
8-4- تخمین نقطه‌ی شبنم	324
1-8-4- محاسبه‌ی نقطه‌ی شبنم آب	324
2-8-4- محاسبه‌ی نقطه‌ی شبنم اسیدسولفوریک	326
9-4- محاسبات اتلاف حرارت خط انتقال آب بخار	328
10-4- محاسبات اتلاف حرارت دیواره‌ی داکت و بویلر	334
11-4- چرخش	336
1-11-4- روند انجام محاسبات چرخش در بویلر	340

## فصل 5.....345

ملاحظات طراحی و عملکرد بویلر بازیاب	345
1-5- انتخاب لوله‌های فین‌دار	345
2-5- تاثیر پارامترهای گوناگون بر دمای نوک فین	347
3-5- تاثیر رسوب بر عملکرد بویلر بازیاب	348
1-3-5- موقعیت تشکیل رسوبهای داخلی	351
2-3-5- مکانیسم رسوب گذاری داخل لوله	352
3-3-5- اثرات رسوب	354
4-3-5- اجزاء عمده‌ی رسوب داخلی بویلر	355
1-4-3-5- اکسیدهای آهن	355
2-4-3-5- فلزات دیگر و اکسیدهای آنها	355
3-4-3-5- نمکها	356
5-3-5- روشهای جلوگیری از رسوبگذاری در بویلر	357
6-3-5- جدا کردن رسوبهای سطوح داخلی لوله‌ها	358
4-5- عایقکاری دودکش	358

- 4-5- پارامترهای مؤثر بر سایز عایق ..... 361
- 1-4-5- تاثیر سرعت باد بر دمای دیواره و تلفات حرارتی ..... 361
- 2-4-5- تاثیر ضریب صدور سطح عایق بر دمای دیواره و تلفات حرارتی از سطح ..... 362
- 3-4-5- تاثیر دمای محیط بر دمای دیواره و تلفات حرارتی از سطح ..... 362
- 5-5- تخمین زمان مورد نیاز برای گرم کردن بویلر ..... 363
- 6-5- تعیین نرخ انتقال حرارت در اواپراتور و اثر نوسان انرژی ورودی بر دبی بخار ..... 366
- 7-5- تعیین ارزش حرارتی سوخت مایع براساس ترکیب آن ..... 369
- 8-5- تعیین دانسیته‌ی سوخت مایع ..... 370
- 9-5- محاسبات هوای لازم برای مقدار مشخصی از سوخت ..... 371
- 10-5- دمای احتراق و نحوه‌ی تخمین آن ..... 373
- 11-5- رابطه‌ی بین درصد هوای اضافی و میزان  $O_2$  موجود در گازهای خروجی ..... 374
- 12-5- تصحیح میزان آلاینده‌ها بر حسب درصد اکسیژن و یا دمای مرجع ..... 375
- 13-5- تبدیل میزان آلاینده‌هایی از واحد جرمی به ppmd ..... 376
- 14-5- تبدیل از پی‌پی‌ام حجمی به میلی‌گرم بر مگاژول ..... 379
- 15-5- محاسبه‌ی اکسیژن مصرفی در یک داکت‌برنر ..... 380
- 16-5- تعیین دمای دود پس از داکت‌برنر ..... 381
- 17-5- تبدیل از  $Nm^3$  و  $Sm^3$  به شرایط سایت ..... 382
- 18-5- تبدیل از ppm به  $mg/lit$  یا  $mg/m^3$  ..... 384
- 19-5- سطح حرارتی در لوله‌های فین‌دار ..... 384
- 1-19-5- فینهای نوع Solid ..... 385
- 2-19-5- فینهای نوع Serrated ..... 386
- 20-5- محاسبه‌ی افت فشار سمت دود ..... 388
- 1-20-5- جریان دود از روی دسته لوله‌های فین‌دار ..... 388
- 2-20-5- جریان دود از روی دسته لوله‌های بدون فین ..... 390
- 21-5- راههای پیشگیری از تشکیل بخار در اکونومایزر ..... 392
- 22-5- معیار انتخاب و سایزینگ دی‌سوپرهیتر ..... 397
- 1-22-5- موقعیت دی‌سوپرهیتر ..... 398
- 2-22-5- میزان آب اسپری مورد نیاز ..... 400
- 3-22-5- دیگر ملاحظات طراحی و نصب دی‌سوپرهیتر ..... 402
- 23-5- شیرهای اطمینان ..... 404
- 1-23-5- نقطه‌ی تنظیم فشار ..... 406

- 407 ..... 2-23-5- سائیزینگ شیرهای اطمینان
- 412 ..... 24-5- دما و فشار طراحی
- 412 ..... 1-24-5- فشار طراحی
- 412 ..... 2-24-5- دمای طراحی
- 414 ..... 25-5- محاسبات ابعادی
- 415 ..... 26-5- محاسبات مقاومتی
- 415 ..... 1-26-5- نحوه‌ی محاسبه‌ی ضخامت تیوبها
- 416 ..... 2-26-5- نحوه‌ی محاسبه‌ی ضخامت لوله‌ها
- 424 ..... 3-26-5- بازده لیگامنت
- 424 ..... 1-3-26-5- سوراخها به موازات محور مخزن یا هدر تعبیه شده‌اند
- 425 ..... 2-3-26-5- سوراخها عمود بر محور مخزن تعبیه شده‌اند
- 427 ..... 3-3-26-5- سوراخها در امتداد قطر
- 429 ..... 27-5- متریالهای مورد استفاده در بویلر بازیاب
- 429 ..... 1-27-5- فولادهای کربنی
- 431 ..... 2-27-5- فولاد آلیاژی
- 431 ..... 3-27-5- فولادهای زنگ‌نزن
- 431 ..... 1-3-27-5- فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی
- 431 ..... Straight Grades - 1-1-3-27-5
- 432 ..... 2-1-3-27-5- گروههای L
- 432 ..... 3-1-3-27-5- گروههای H
- 434 ..... 2-3-27-5- فولادهای زنگ‌نزن فریتی
- 435 ..... 3-3-27-5- فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی
- 436 ..... 4-3-27-5- فولادهای دوبلکس
- 436 ..... 5-3-27-5- فولادهای سوپر آلیاژی
- 436 ..... 4-27-5- تاثیر عناصر گوناگون بر خواص فولاد
- 441 ..... 5-27-5- ورقها و لوله‌های مورد استفاده در بویلر
- 441 ..... 1-5-27-5- لوله‌های خطوط انتقال
- 441 ..... 2-5-27-5- اکونومايزر
- 442 ..... 3-5-27-5- اواپراتور
- 442 ..... 4-5-27-5- درام
- 442 ..... 5-5-27-5- سوپرهیتر و ریپهتر

- 444 ..... 6-27-5 مقایسه‌ی متریا‌های لوله‌ی بویلر در استانداردهای گوناگون
- 446 ..... 7-27-5 خواص فولادهای گوناگون مورد استفاده در بویلر
- 448 ..... 28-5-28-5 درام
- 448 ..... 1-28-5-1 پارامترهای مؤثر بر تعیین ابعاد درام
- 448 ..... Retention time - 1-1-28-5
- 449 ..... 2-1-28-5-2 نسبت حجم درام به اوپراتور
- 449 ..... 3-1-28-5-3 قطر و طول درام
- 449 ..... 4-1-28-5-4 انتخاب سطوح آلام
- 451 ..... 2-28-5-2 حجم درام
- 451 ..... 1-2-28-5-1 حجم آب در بخش بدنه‌ی درام
- 452 ..... 2-2-28-5-2 حجم آب بخش کلگی
- 453 ..... 3-28-5-3 محاسبات ضخامت در کلگی و بدنه‌ی درام
- 455 ..... 4-28-5-4 ساختارهای سه گانه سیستم کنترل سطح درام
- 455 ..... 1-4-28-5-1 سیستم کنترل تک المانه
- 456 ..... 2-4-28-5-2 سیستم کنترل دو المانه
- 457 ..... 3-4-28-5-3 سیستم کنترل سه المانه
- 458 ..... 29-5-29-5 ارتعاش در دسته‌لوله‌ها
- 458 ..... 1-29-5-1 عوامل تولید ارتعاش
- 459 ..... 2-29-5-2 کنترل ارتعاش ناشی از صوت
- 460 ..... 1-2-29-5-1 فرکانس امواج ایستاده
- 460 ..... 2-2-29-5-2 فرکانس جریانهای گردابی
- 462 ..... 3-29-5-3 کنترل ارتعاش ناشی از ناپایداری الاستیکی سیال
- 463 ..... 1-3-29-5-1 سرعت بحرانی دود
- 464 ..... 30-5-30-5 مکانیزمهای خرابی و کاهش عمر بویلر باز یاب
- 465 ..... 1-30-5-1 خوردگی قلیایی
- 467 ..... 1-1-30-5-1 عوامل مؤثر در خوردگی قلیایی
- 468 ..... 2-30-5-2 کاویتاسیون
- 469 ..... 1-2-30-5-1 عوامل مؤثر در کاویتاسیون
- 471 ..... 3-30-5-3 خسارت هیدروژنی
- 472 ..... 1-3-30-5-1 قابلیت ایجاد خسارت هیدروژنی در فلزات گوناگون
- 473 ..... 2-3-30-5-2 مکانیسم حمله‌ی هیدروژنی در بویلر

- 474 ..... 3-3-30-5 روشهای پیشگیری از حمله‌ی هیدروژنی در بویلر
- 476 ..... 4-30-5 خوردگی اکسیژنی
- 477 ..... 1-4-30-5 عوامل مؤثر در خوردگی اکسیژنی
- 478 ..... 2-4-30-5 روشهای جلوگیری از خوردگی اکسیژنی
- 479 ..... 5-30-5 سایش
- 480 ..... 1-5-30-5 موقعیتهای وقوع خرابی سایش
- 481 ..... 6-30-5 خوردگی FAC
- 482 ..... 1-6-30-5 پارامترهای مؤثر بر وقوع این گونه خرابی
- 483 ..... 2-6-30-5 نواحی مستعد برای وقوع خوردگی FAC
- 485 ..... 7-30-5 خرابیهای دما بالا
- 486 ..... 1-7-30-5 خزش
- 486 ..... 2-7-30-5 گرافیت شدن زنجیره‌ای
- 486 ..... 3-7-30-5 عوامل مؤثر در ایجاد بیش‌گرمایش در تجهیزات بویلرها
- 488 ..... 8-30-5 ایجاد ترک در اثر خوردگی تنش
- 489 ..... 1-8-30-5 روشهای جلوگیری از خوردگی تحت تنش SCC
- 491 ..... 9-30-5 ایجاد ترک در اثر خستگی خوردگی
- 491 ..... 1-9-30-5 مکانیسم خستگی خوردگی
- 493 ..... 10-30-5 خستگی در بویلر بازیاب
- 494 ..... 1-10-30-5 خستگی ارتعاشی
- 494 ..... 2-10-30-5 خستگی حرارتی
- 495 ..... 11-30-5 بهره‌برداری از بویلر در حالت نوسانی
- 499 ..... 31-5 آزمون عملکرد بویلرهای بازیاب
- 500 ..... 1-31-5 استاندارد
- 500 ..... 2-31-5 اصول راهنما برای اجرای آزمون
- 501 ..... 1-2-31-5 برنامه‌ریزی برای آزمون
- 502 ..... 2-2-31-5 آمادگی برای آزمون
- 503 ..... 3-2-31-5 انجام آزمون
- 504 ..... 4-2-31-5 ابزار دقیق و روشهای اندازه‌گیری
- 505 ..... 3-31-5 منحنیهای تصحیح
- 507 ..... 4-31-5 روشهای تعیین بازده
- 510 ..... 1-4-31-5 محاسبات تعیین دبی و ترکیب دود خروجی توربین گاز

511	.....	2-4-31-5- روند انجام محاسبات
511	.....	1-2-4-31-5- محاسبه‌ی ترکیب هوا
514	.....	2-2-4-31-5- محاسبات احتراق سوخت در توربین گاز و داکت برنر
514	.....	3-2-4-31-5- تعیین آنتالپی دود
514	.....	4-2-4-31-5- تعیین انرژی حرارتی ورودی ناشی از احتراق اضافی
516	.....	5-2-4-31-5- تعیین انرژیهای جذب شده و خارج شده از بویلر بازیاب
<b>519</b>	.....	<b>پیوست شماره 1</b>
519	.....	خواص آب و بخار
<b>525</b>	.....	<b>پیوست شماره 2</b>
525	.....	خواص دود
<b>541</b>	.....	<b>پیوست شماره 3</b>
541	.....	خواص فولاد
<b>555</b>	.....	<b>پیوست شماره 4</b>
555	.....	مشخصات انواع گوناگون توربین گاز
<b>567</b>	.....	<b>پیوست شماره 5</b>
567	.....	تبدیل واحد
<b>579</b>	.....	<b>پیوست شماره 6</b>
579	.....	استانداردهای مورد استفاده در طراحی بویلر
<b>593</b>	.....	<b>مراجع</b>

## پیشگفتار

"علم و دانش را با نوشتن به بند آورید."

پیامبر اکرم (ص)

هنگامی که در اواخر دهه‌ی 1940، توربینهای گاز برای استفاده در صنعت برق معرفی شدند، انقلابی در نیروگاههای با سوخت فسیلی ایجاد کردند، تا آنجا که بیست سال پس از آن، توربینهای گازی به بخش مهمی از تاسیسات تأمین‌کننده‌ی بار در زمان پیک مصرف تبدیل شدند. از اوایل دهه‌ی 1990، توربینهای گازی سهم زیادی از فرایند تولید قدرت در سراسر جهان را تشکیل می‌دهند به‌گونه‌ای که در کمتر از 50 سال، آنچه در آغاز برای تکنولوژی توربین جت بود، به راه‌حلی اساسی با تکنولوژی بالا برای بسیاری از نیازهای تولید انرژی تبدیل شد.

در توربو ژنراتورهای گازی، ابتدا هوا در یک کمپرسور متراکم شده و پس از ترکیب با سوخت در محفظه‌ی احتراق، دمای آن افزایش می‌یابد. این هوای پرفشار با درجه‌ی حرارت بالا در هنگام گذر از توربین گاز منبسط شده و نتیجه‌ی آن تولید برق است. مشکل عمده‌ی این نیروگاهها راندمان نسبتاً پایین و دمای دود خروجی بالای آنهاست که به‌صورت تلفات حرارتی از طریق دودکش به محیط تخلیه می‌شود. اگرچه دمای دود خروجی از توربینهای گاز جزء منابع با درجه‌ی حرارت متوسط

تقسیم‌بندی می‌شود اما دبی بالای دود خروجی توربین، آن را در صدر منابع تلف‌کننده‌ی انرژی قرار داده است.

ایده ساخت سیکل‌های ترکیبی با هدف بازیافت انرژی خروجی توربین‌های گاز شکل گرفت. در سیکل‌های ترکیبی، گاز داغ حاصل از احتراق پس از عبور از توربین‌های گاز وارد بویلر بازیاب می‌شود و حرارت خود را توسط مبدل‌های حرارتی به آب داخل بویلر می‌دهد. از بخار یا آب گرم تولیدشده برای تولید برق در توربین بخار و یا مصارف فرایندی در واحدهای گوناگون استفاده می‌شود.

در سال‌های 1950 تا 1960، گاهی از دود خروجی توربین‌های گاز برای احتراق در بویلرهای حرارتی استفاده می‌شد ولی بهره‌گیری از بویلرها در این بخش چندان توسعه نیافت. در آغاز، کشور آمریکا در صنعت ساخت بویلر بازیاب پیشتان بود و بیشتر بویلرهای بازیاب به صورت افقی طراحی می‌شد. در سال 1952، نخستین واحد توربین‌های گاز در آکلاه‌های آمریکا به یک بویلر بازیاب متصل گردید. این واحد شامل 2 توربین گاز 3/5 مگاوات بود و از بویلر بازیاب برای پیشگرم‌نمودن آب تغذیه ورودی به نیروگاه حرارتی 35 مگاواتی، که مجاور واحدهای فوق قرار داشت، استفاده می‌گردید.

پس از گذشت مدتی از ساخت بویلر بازیاب و با پیشرفت در صنایع توربین‌های گاز و همچنین پیشرفت در قابلیت ساخت بویلر بازیاب، ظرفیت و تکنولوژی ساخت بویلرهای بازیاب توسعه‌ی چشمگیری یافت و بویلرهایی با چند سطح فشار و با قابلیت ریهیت بخار تولید گردید؛ ضمن آنکه در این مدت صنایع اروپا نیز متمایل به ساخت بویلرهای بازیاب حرارتی شدند. امروزه با افزایش توان توربین‌های گاز و تکنولوژی ساخت بویلر، بویلرهای بازیاب سه‌فشاره، ریهیتدار با قابلیت هوازای مجتمع ساخته شده‌اند که این موضوع تعداد چیدمان‌های ممکن را به گونه‌ای چشمگیر افزایش داده است.

در ایران نیز، استفاده از بویلرهای بازیاب حرارتی برای نیروگاههای سیکل ترکیبی از سال 1370 خورشیدی، با نیروگاه سیکل ترکیبی گیلان که از نوع عمودی بود، آغاز شد. بعد از این پروژه، روند تبدیل واحدهای گازی به سیکل ترکیبی با سرعت زیادی ادامه پیدا کرد.

امروزه نزدیک به 100 بویلر بازیاب در نیروگاههای سیکل ترکیبی و واحد های صنعتی در حال بهره برداری است و بیش از 50 بویلر نیز در آینده نزدیک به بهره برداری می رسد. به این لیست باید دهها سیکل ساده توربین گازی را که قابلیت تبدیل به سیکل ترکیبی دارند اضافه نمود.

بیشتر این بویلر ها توسط گروه مپنا تامین شده است. در ابتدا این بویلر ها با همکاری شرکتهای خارجی مانند فاستر ویلر و دوسان ساخته می شدند تا اینکه در سال 1378 شرکت مپنا بویلر به منظور تامین بویلر های مورد نیاز نیروگاهها و صنایع دیگر از جمله نفت ، گاز و پتر و شیمی با استفاده از حداکثر توانمندی و ظرفیت های داخل کشور تاسیس شد. این شرکت در طول فعالیت های خود به موازات اجرای پروژه های مختلف اقدام به انتقال دانش فنی طراحی، ساخت و نصب بویلر های بازیافت حرارتی (HRSG) از شرکت دوسان کره جنوبی نموده و علاوه بر آن با اجرای موافقتنامه و قرارداد های مختلف، از همکاری فنی شرکت های Macchi ایتالیا و Thermodesign کانادا جهت ارتقای دانش فنی خود بهره مند شده است.

سازماندهی مناسب، ارتقاء دانش مهندسی ، ساخت، کنترل پروژه و دارا بودن کارخانه مجهز تولید قطعات بویلر به همراه انجام موفقیت آمیز چندین پروژه ساخت بویلر، این شرکت را در ردیف یکی از شرکت های تراز اول ساخت بویلر قرارداده است. این شرکت تا به امروز بیش از 22 بویلر بازیاب حرارتی و 11 بویلر کمکی به کارفرمایان خود تحویل داده و 57 بویلر دیگر نیز در حال طراحی و ساخت دارد.

نگارش کتاب پیش رو با هدف آشنایی بیشتر متخصصان با مبانی انتخاب و طراحی بویلر های بازیاب بوده و در 5 فصل ارائه شده است.

در فصل اول کتاب توضیح مختصری در مورد بازیافت انرژی دود در صنایع مختلف و از جمله سیکل ترکیبی داده شده است. در فصل دوم با محور قراردادن بویلر های بازیاب سیکل ترکیبی، به جزئیات بیشتری از اجزای بویلر بازیاب و کارکرد و انواع آنها پرداخته شده است.

در فصل سوم چیدمان اجزای داخلی انواع مختلف بویلر های بازیاب ( اعم از تکفشاره ، دوفشاره ، سه فشاره و ...) به همراه تاثیر پارامترهای مختلف بر کارایی بویلر های بازیاب به تفصیل بیان شده است. این فصل به گونه ای تهیه شده که با مطالعه آن بتوان با داشتن مشخصات دود خروجی توربین گاز و شرایط سایت یک آرایش اولیه از بویلر بازیاب مناسب ارائه داد.

فصول چهارم و پنجم به ارائه مختصری از معادلات و ملاحظات طراحی و انتخاب و سایزینگ تجهیزات می پردازند. ذکر این نکته ضروری است که معادلات و محاسبات بویلر بسیار بیشتر از آن چیزی است که در فصول ذکر شده ارائه شده است و خوانندگان محترم می توانند به مراجع ذکر شده در هر بخش مراجعه نمایند.

در روند تکمیل کتاب از همکاری و راهنمایی افراد زیادی بهره گرفته ام. در اینجا از همکاران واحد طراحی و مهندسی شرکت مپنا بویلر ، بویژه بخش تحقیق و توسعه و بخش طراحی پایه و فرایند که با نظرات اصلاحی خویش بر غنای کتاب افزوده اند تشکر می نمایم. از همسر عزیزم نیز برای تایپ مطالب کتاب و بردباری و پشتیبانی در طی تالیف این کتاب قدردانی می نمایم.

این کتاب مرور مختصری بر مبانی طراحی بویلر های بازیاب است که در حد بضاعت علمی نویسنده تهیه شده و علیرغم کوششی که در رفع اشکالات بعمل آمده ، بدون نقص نمی باشد. پیشاپیش از همه خوانندگان و صاحب نظران محترم که با بیان تصحیحات و پیشنهادات خود راهنمای اینجانب خواهند بود سپاسگزاری می نمایم.

حسین شریفی

[sharifi@mapnaboiler.com](mailto:sharifi@mapnaboiler.com)



# فصل ۱

## بویلرهای بازیاب حرارتی در صنایع گوناگون

واژه‌ی بازیافت حرارتی مفهوم و کاربرد بسیار گسترده‌ای دارد و شامل بازیافت انرژی از هر سیال عاملی است که با درجه‌ی حرارت بالاتر از محیط به صورت تلفات حرارتی وارد آن می‌شود. این بازیافت می‌تواند شامل بازیافت انرژی بخار، آب گرم، دود خروجی از بخشهای گوناگون واحدهای فرایندی، بازیافت از دود خروجی توربین گاز و ... باشد. آنچه مد نظر این کتاب می‌باشد بازیافت انرژی حرارتی دود خروجی از واحدهای صنعتی است. در این واحدها، محصولات احتراق پس از انجام کار یا تبادل حرارت و یا پس از انجام واکنش شیمیایی در یک دمای بالا به هدر می‌رود. هدف از بازیافت انرژی این دود، استفاده از آن در سیستمهای فرایندی و یا تولید الکتریسیته است.

علیرغم تلاشهای جهانی برای ارتقاء فناوری استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی، سهم تأمین انرژی از این منابع تنها 7% از کل انرژی مصرفی جهان را در بر می‌گیرد و منبع تأمین 93% انرژی باقیمانده، سوختهای فسیلی و انرژی هسته‌ای می‌باشد که از این میان سهم انرژی هسته‌ای تنها 6% بوده و از این رو، سوختهای فسیلی با 87%، بالاترین نقش را در تأمین انرژی جهانی به‌عهده دارند.

محدودبودن منابع سوخت فسیلی، سهم بالای آنها در تأمین انرژی مورد نیاز در دنیا، اثرات سوء زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوختهای فسیلی و افزایش قیمت جهانی این فراورده‌ها همگی از جمله عواملی هستند که باعث شده‌اند تا در سالهای اخیر توجه زیادی به جلوگیری از مصرف بیهوده‌ی این منابع معطوف شود.

نوع متداول بازیافت انرژی حرارتی دود، که برای بازیافت انرژی دود خروجی از بویلرهای حرارتی رایج<sup>1</sup> استفاده می‌شود، پیشگرمکن های هوا (ژانگستروم) هستند که برای افزایش بازده احتراق در بویلر استفاده می‌شوند.

ولی در بویلرهای بازیاب حرارتی که به نام های Waste Heat Recovery Boiler، Heat Recovery Boiler و یا Heat Recovery Steam Generator شناخته می‌شوند عموماً از سیال عامل آب استفاده می‌شود. بسته به دبی و دمای دود و اهداف بازیافت حرارتی، در این مبدلهای حرارتی از انرژی دود برای تولید آب گرم، آب اشباع، بخار اشباع و یا بخار سوپرهیت استفاده می‌شود [1].

گاهی سیال عامل در این سیکلها به جای آب، سیالاتی دیگر نظیر آمونیاک است. این سیالات در حالتی که دمای دود پایین باشد مزایای بیشتری از لحاظ بازیافت انرژی و قابلیت تولید کار دارند ولی هزینه‌ی بالاتر، قابلیت دسترسی کمتر و خطرات زیست‌محیطی بیشتر، از موانع استفاده‌ی گسترده‌ی این نوع سیکلها می‌باشد.

امروزه، بویلرهای بازیاب به‌عنوان بخش تکمیلی در واحدهای فرایندی تولید آمونیاک، اتیلن، متانول، هیدروژن، اسید سولفوریک، اسید نیتریک، ترشی‌زدایی گاز، کوره‌های ذوب فلزات، شیشه، کوره‌های زباله‌سوز، توربین گاز و ... هستند.

به‌طور عمده بویلرهای بازیاب به دو دسته تقسیم می‌شوند [2]:

1. بویلرهایی که بازیافت انرژی دود را با هدف کاهش دمای آن تا مقدار مشخصی، برای شرکت در واکنشهای شیمیایی و فرایندی انجام می‌دهند. در حقیقت بازیافت انرژی دود در رده‌ی دوم اهمیت قرار دارد و دمای دود خروجی از این بویلرها باید همیشه ثابت باشد. این سیستمها در واحدهای هیدروژن و اسیدسولفوریک یافت می‌شوند. برای کنترل دمای دود خروجی از این سیستمها از مسیرهای کنارگذر دود استفاده می‌شود.

2. در بقیه‌ی موارد که دود خروجی مصارف دیگری نداشته و به‌صورت تلفات حرارتی به هدر می‌رود، بیشینه‌ی بازیافت انرژی از دود با توجه به ملاحظات مربوط به خوردگی و اقتصادی بودن طرح قابل انجام است. نمونه‌ی مشخص این نوع واحدها توربینهای گاز هستند.

برخلاف بویلرهای حرارتی رایج، استاندارد مشخصی برای طراحی و دسته‌بندی بویلرهای بازیاب وجود ندارد. در بویلرهای حرارتی می‌توان آرایش سطوح حرارتی را بر اساس میزان بخار تولیدی

<sup>1</sup> Conventional Boiler

در بویلر دسته‌بندی نمود و تفاوت‌های مربوط به سایت‌های گوناگون اعم از ترکیب سوخت و تغییرات شرایط آب‌وهوایی می‌تواند سایز و نوع تجهیزات را تغییر دهد. طراحی بویلرهای بازیاب به شدت تابع ترکیبات دود، دما، دبی آن و دمای آب ورودی و همچنین مشخصات بخار مورد نیاز است. عموماً کوره‌های گوناگون دارای دبی و دما و ترکیبات دود گوناگون هستند. ترکیبات دود گوناگون موجب تغییر آنتالپی دود می‌گردد. گاهی ملاحظات طراحی مربوط به وجود عناصر خورنده در دود می‌تواند موجب محدود شدن دمای دود خروجی و یا به‌کارگیری تجهیزات خاص برای مقابله با آن گردد.

حتی توربین‌های گاز مشابه که در سایت‌های گوناگون نصب می‌شوند به‌علت تفاوت در دانسیته‌ی هوا دارای دبی و دمای دود خروجی متفاوت‌اند. از این‌رو بویلرهای نصب‌شده پس از این نوع توربین‌های گاز، ممکن است تفاوت زیادی با هم داشته باشند.

موارد زیادی در طراحی یک سیستم بازیافت حرارت نقش دارند از جمله:

1. دبی و محدوده‌ی دمایی دود و عناصر تشکیل دهنده‌ی آن،
2. نیازمندی‌های فرایندی که در واقع شرایط خروجی سیال بخش سرد را تعیین می‌کند. این سیال می‌تواند بخار سوپرهیت، بخار اشباع، آب اشباع، آب گرم و یا هوای گرم باشد،
3. فضای در دسترس،
4. محدودیت‌های بازیافت دود، مانند خوردگی،
5. مسائل اقتصادی.

موارد فوق، اصلی‌ترین مسائلی هستند که امکان بازیافت و چگونگی انجام آن را تعیین می‌کنند.

## ۱-۱- تلفات انرژی

تلفات حرارتی در واقع انرژی حرارتی است که توسط دود حاصل از احتراق سوخت یا واکنش‌های شیمیایی، تولید و با درجه‌ی حرارت بالاتر از محیط وارد آن می‌گردد. این انرژی حرارتی می‌تواند با اهداف اقتصادی و یا زیست‌محیطی بازیافت گردد. روشی که برای بازیافت انرژی دود به‌کار گرفته می‌شود به میزان انرژی در دسترس دود بستگی دارد. بازیافت انرژی در هر دمایی از دود امکان‌پذیر است ولی بازیافت حرارتی برای دودهای با دما و دبی بالاتر اقتصادی‌تر است [3]. نخستین مرحله در بازیافت دود، ارزیابی انرژی موجود در آن است.

میزان انرژی تابع دو پارامتر مقدار و کیفیت دود است. کیفیت معمولاً به صورت آنتالپی نشان داده می‌شود و تابع ترکیب دود، دما و فشار آن است.

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} \dot{m} C_p dT$$

$Q$  = میزان انرژی در دسترس (kW)

$C_p$  = گرمای ویژه دود (kJ/kg°C)

$\dot{m}$  = دبی خروجی دود (kg/s)

$T$  = دمای دود (°C)

پتانسیل اقتصادی بازیافت دود بر پایه‌ی دبی آن سنجیده نمی‌شود بلکه آنتالپی دود که در میان متغیرهای وابسته به آن دما بیشترین تاثیر را دارد نقش مهم‌تری ایفا می‌کند. بدین جهت دسته‌بندی انواع بازیافت انرژی بر اساس دمای دود تعیین می‌شود نه دبی آن.

دود با دمای بالاتر، قابلیت بازیافت اقتصادی بیشتری دارد. بازیافت مقدار  $\Delta T$  مشخص دود در دماهای بالاتر به مراتب به سطح کمتری نیاز دارد و اقتصادی‌تر است.

## ۱-۲- دسته‌بندی انواع دود و کاربرد آن

امروزه، دمای دودهای خروجی از واحدهای صنعتی بازه گسترده‌ای دارد. مدل‌های گوناگون بازیافت انرژی دود، با هدف افزایش بازده کلی سیستم و کاهش مصرف سوخت به‌کار گرفته شده‌اند. دودهای در دسترس واحدهای گوناگون صنعتی به سه دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند [4]:

دمای بالا	$650^\circ\text{C} < T < 1650^\circ\text{C}$
دمای متوسط	$250^\circ\text{C} < T < 650^\circ\text{C}$
دمای پایین	$50^\circ\text{C} < T < 250^\circ\text{C}$

### 1-2-1- منابع با درجه‌ی حرارت بالا

در جدول (1-1) دمای دود خروجی از چندین واحد صنعتی گوناگون نشان داده شده است [4]. تمام این دودها از احتراق سوخت‌های فسیلی تولید شده‌اند. منابع با دمای بالا ضرورتاً به معنی بالاتر بودن انرژی در دسترس نمی‌باشد زیرا ممکن است دبی دود پایینی داشته باشند ولی حتماً بازیافت انرژی آنها اقتصادی است و برای بیشتر کاربردها مفید خواهند بود. به علت نیاز به مواد با مقاومت حرارتی

بالا، ملاحظات طراحی بیشتر و تجهیزات با شرایط ویژه، تحقیق و توسعه‌ی این بخش از سیستمهای بازیافت انرژی با شتاب زیاد همچنان ادامه دارد.

### 1-2-2- منابع با درجه‌ی حرارت متوسط

در جدول (1-2) محدوده‌ی دمایی دود خروجی از تجهیزات و منابع با درجه‌ی حرارت متوسط نشان داده شده است [4]. بازیافت انرژی دود در این محدوده‌ی دمایی اقتصادی بوده و نمونه‌های گوناگون آن، امروزه توسعه زیادی پیدا کرده‌اند از جمله‌ی آن، بویلرهای بازیاب حرارتی سیکل ترکیبی است که در بازه وسیعی برای بازیافت دود خروجی توربینهای گاز به‌کار گرفته شده‌اند.

جدول (1-1) محدوده‌ی دمایی تلفات حرارتی از منابع با درجه‌ی حرارت بالا

منبع تولید دود	درجه‌ی حرارت °C
صنایع ذوب نیکل	1370-1650
صنایع ذوب آلومینیوم	650-760
صنایع ذوب روی	760-1100
صنایع ذوب مس	925-1050
صنایع ذوب فولاد	650-1450
کارخانه‌ی سیمان	620-730
صنایع ذوب شیشه	1000-1550
واحد تولید هیدروژن	650-1000
زیاله‌سوز	650-1450

جدول (2-1) محدوده‌ی دمایی تلفات حرارتی از منابع با درجه‌ی حرارت متوسط

منبع تولید دود	درجه‌ی حرارت °C
توربین گاز	370-650
موتورهای دیزلی	315-600
کوره‌های عملیات حرارتی	425-650

### 1-2-3- منابع با درجه‌ی حرارت پایین

بازیافت این رنج دمایی، برای تولید کار، عموماً کاربردی نمی‌باشد و انرژی بازیافت شده برای پیشگرم‌کردن سیالات با فشار پایین به‌کار می‌رود. گاهی بازیافت مستقیم این دسته از دودها در یک مبدل مستقیم، اقتصادی و کاربردی نیست. امروزه روشهای دیگری نیز برای بازیافت انرژی سیالات با درجه‌ی حرارت پایین توسعه یافته‌اند. از جمله‌ی این روشها به‌کارگیری پمپهای حرارتی و لوله‌های حرارتی است [5].

## ۱-۳- بویلرهای بازیاب در صنایع

### 1-3-1- زباله سوز<sup>1</sup>

زباله‌سوزی روشی بهداشتی برای دفع زباله است. ازدیاد حجم زباله‌های شهری و افزایش مشکلات دفع آن و همچنین کمبود زمین برای دفن زباله و مسائل زیست‌محیطی، سبب رویکرد به روش زباله‌سوزی در جهان امروز شده است. جدول (1-3) درصد جرمی تقریبی ترکیبات زباله‌ی شهری تهران را نشان می‌دهد [7]. ارزش حرارتی تقریبی زباله‌ی شهر تهران برابر 8700 کیلو ژول برکیلوگرم است.

جدول (1-3) درصد ترکیبات جرمی زباله‌های شهری تهران

درصد جرمی موجود در زباله	نوع مواد
60 - 75	مواد آلی قابل تبدیل
8 - 14	کاغذ و مقوا
4 - 7	پلاستیک
2 - 4	شیشه
2 - 4	منسوجات

<sup>1</sup> Incinerator