مقالات

تحول مبردها و تغییر پارادایم در طراحی سیستم های تهویه مطبوع ؛

از ODP و GWP تا الزامات Gas و Regulation (EU) 2024/573



نویسنده: فرهاد یازعی

مدیر فنی سیستم های تهویه مطبوع شرکت تاسیساتی و ساختمانی شهرک

نماینده انحصاری سیستم های سرمایشی Blue Box در ایران

مشاور مستقل سیستم های HVAC

E- Mail: farhad.yazei@gmail.com

چکیده

تحول مبردها در صنعت تبرید، تهویه مطبوع و پمپ‌های حرارتی طی چهار دهه اخیر صرفاً نتیجه پیشرفت فناوری نبوده است، بلکه حاصل برهم‌کنش میان عملکرد ترمودینامیکی، الزامات زیست‌محیطی، ایمنی، مقررات و شرایط بازار بوده است.

نخستین تحول عمده با شناسایی اثر برخی ترکیبات هالوژنه بر لایه

اوزون و شـــکل‌گیری پروتکل مونترال آغاز شـــد. در پی آن، اســـتفاده از **CFC** هـــا و ســـپس **HCFC** ها به‌تدریـــج محدود شـــد و **HFC** ها به‌عنوان جایگزین بسیاری از این مبردها توسعه یافتند.

HFC ها اگرچه فاقد پتانســـیل تخریب قابل توجه لایه اوزون بودند، اما برخی از آن‌ها دارای **GWP** بالایی بودند و در نتیجه، تغییر اقلیم به دومین محور اصلی سیاست‌گذاری در حوزه مبردها تبدیل شد.

پروتـــکل کیوتـــو **HFC** ها را در چارچوب گازهـــای گلخانه‌ای تحت کنترل قرار داد و اتحادیه اروپا نیز با **Regulation (EC) No 842/2006** و سپس **Regulation (EU) No 517/2014**، نظـــام اختصـــاصی کنترل **F-gases** و کاهش تدریجی عرضه **HFC** ها را توسعه داد.

Regulation (EU) 2024/573 کـــه از 11 مارس 2024 لازم‌الاجرا شـــد و **Regulation (EU) No 517/2014** را لغـــو کرد، ایـــن روند را وارد مرحله جدیدی کرد.

ایـــن مقررات علاوه بر کنترل انتشـــار و عرضه **HFC** هـــا، برای گروه‌های مختلف تجهیزات، محدودیت‌های مرحله‌ای برای **placing on the market** بر اساس نوع تجهیز، ظرفیت، نوع گاز و **GWP** تعیین می‌کند.

این مقاله تحول تاریخی مبردها را از **CFC** و **HCFC** تا **HFO**، **HFC** و مبردهای طبیعـــی بررسی می‌کند و تفاوت مفهومی **ODP** و **GWP** را توضیح می‌دهد.

ســـپس ســـاختار مقررات **F-Gas** اتحادیه اروپا، به‌ویـــژه **Regulation (EU) 2024/573**، و پیامدهای آن برای چیلرها، سیستم‌های تهویه مطبوع، پمپ‌های حرارتی و سیســـتم‌های **Split** بررسی می‌شـــود.در ادامـــه، مبردهایی مانند **R-1234ze(E)**، **R-513A**، **R-454B**، **R-32**، **R-410A** و **R-290** از دیدگاه **GWP**، ایمنی، عملکرد و کاربرد تحلیل می‌شوند.

نتیجـــه اصـــلی مقاله آن اســـت که آینـــده صنعـــت **HVAC** را نمی‌توان بر اســـاس یک «مبـــرد برتـــر» تعریف کرد. انتخـــاب مبرد در نســـل جدید تجهیـــزات باید یک تصمیم چندمعیاره باشـــد که در آن شـــرایط کاربرد،

عملکـــرد ترمودینامیـــکی، راندمان انـــرژی، **GWP**، کلاس ایمـــنی، مقدار شـــارژ، معماری سیســـتم، هزینـــه، قابلیت ســـرویس، اســـتانداردهای ایمنی و الزامـــات قانونی بازار هدف به‌صورت یکپارچه ارزیابی شـــوند.

واژگان کلیدی:

F-Gas، Regulation (EU) 2024/573، HVAC، Refrigerant، GWP، ODP، R-410A، R-32، R-454B، R-513A، R-1234ze(E)، R-290، HFC، HFO، Chiller، Heat Pump

1.مقدمه؛ از انتخاب مبرد تا طراحی مبتنی بر الزامات

انتخاب مبرد در سیســـتم‌های تبرید و تهویه مطبوع، در رویکرد کلاسیک عمدتاً یک مســـئله مهندسی و ترمودینامیکی بـــود. دمای تبخیر و تقطیر، فشـــار کاری، ظرفیت حجمی، راندمان ســـیکل، دمای دهش کمپرســـور، ســـازگاری با روغن و مواد، نوع کمپرســـور، هزینه و دسترسی به مبرد از مهم‌ترین پارامترهای تصمیم‌گیری محسوب می‌شدند.

اما از اواخر قرن بیســـتم، دو شاخص زیســـت‌محیطی به‌تدریج اهمیت بیشتری پیدا کردند:

GWP - Global Warming Potential و ODP- Ozone Depletion Potential

در نتیجـــه، انتخـــاب مبـــرد دیگر صرفـــاً مســـئله‌ای مربوط بـــه عملکرد ترمودینامیکی نبود.

امروزه طراحی یک سیســـتم **HVAC** جدید باید هم‌زمان به عملکرد حرارتی، مصرف انرژی، اثرات اقلیمی، ایمنی، اســـتانداردهای فنی، مقررات و شرایط بازار هدف توجه کند.

از ایـــن منظـــر، **Regulation (EU) 2024/573** را می‌تـــوان بخشی از یک تحول گســـترده‌تر دانست: حرکت صنعت از **Refrigerant Selection** به ســـمت **Refrigerant-Conscious System Design**؛ یعـــنی انتخاب مبرد دیگر تصمیمی مســـتقل از طراحی سیستم نیست و باید از مراحل اولیه توسعه تجهیز مورد توجه قرار گیرد.

2.نسل نخست؛ CFC ها و دوران پیش از بحران اوزون

در بخش بزرگی از قرن بیستم، **CFC** هایی مانند **R-11** و **R-12** و برخی ترکیبات مورد استفاده در کاربردهای صنعتی و تبریدی، کاربرد گسترده‌ای داشتند.

پایداری شیمیایی، سمیت نسبتاً پایین، غیرقابل‌اشتعال بودن و خواص ترمودینامیکی مناسب، این ترکیبات را برای صنعت تبرید بسیار جذاب کرده بود.

اما همین پایداری شیمیایی در جو، در کنار ساختار مولکولی آن‌ها، پیامد زیست‌محیطی مهمی ایجاد کرد.

برخی **CFC** ها پس از رسیدن به استراتوسفر تحت اثر تابش فرابنفش تجزیه شده و گونه‌های فعال کلر ایجاد می‌کنند که در واکنش‌های زنجیره‌ای تخریب اوزون مشارکت دارند.

به این ترتیب، صنعت تبرید با یک اصل جدید مواجه شد:

مناسب‌بودن یک مبرد از نظر مهندسی، الزاماً به معنای مناسب‌بودن آن از نظر زیست‌محیطی نیست.

3.پروتکل مونترال؛ نخستین انقلاب مقرراتی صنعت مبرد

پروتکل مونترال در سال 1987 تصویب شد و چارچوب بین‌المللی اصلی برای کنترل مواد مخرب لایه اوزون را ایجاد کرد.

در نتیجه، صنعت به سمت حذف تدریجی بسیاری از **CFC** ها و سپس **HCFC** ها حرکت کرد.

HCFC هایی مانند **R-22** در این دوره در بسیاری از کاربردها نقش مبردهای انتقالی را ایفا کردند. **R-22** نسبت به بسیاری از **CFC** های قدیمی **ODP** پایین‌تری داشت، اما **ODP** آن صفر نبود.

بنابراین، **HCFC** ها را نیز نمی‌توان راه‌حل نهایی حفاظت از اوزون دانست.

اهمیت این دوره فقط در تغییر ماده مبرد نبود. تغییر مبرد به‌تدریج بر کمپرسورها، مبدل‌های حرارتی، روغن‌ها، کنترل‌ها، ابزارهای سرویس، روش‌های شارژ و آموزش تکنسین‌ها نیز اثر گذاشت.

این تجربه نخستین نشانه جدی از آن بود که:

مقررات زیست‌محیطی می‌توانند معماری فناوری یک صنعت را تغییر دهند.

4.گذار از HCFC به HFC؛ حل یک مسئله و ظهور مسئله‌ای دیگر

با تشـــدید محدودیت‌های مربوط به مواد مخـــرب لایه اوزون، **HFC** ها به‌عنوان جایگزین بسیاری از **CFC** ها و **HCFC** ها توسعه یافتند.

از جمله مبردهای مهم این دوره می‌توان به **R-134a، R-404A، R-407C و R-410A** اشاره کرد.

مزیت اصلی **HFC** ها این بود که **ODP** آن‌ها صفر است؛ بنابراین برخلاف **CFC** ها و **HCFC** ها، در تخریب لایه اوزون نقشی ندارند.

اما مسئله جدیدی پدیدار شد: **GWP بالا در بسیاری از HFC ها**.

بـــرای نمونه، مقادیـــر مـــورد اســـتفاده در **Annex I Regulation (EU) 2024/573** برای **HFC-32** و **HFC-134a** به‌ترتیب 675 و 1430 است.

در نتیجه، مســـیر کلی تحول سیاستی و فناوری را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

CFC → Montreal Protocol (1987) → HCFC → HFC → Kyoto Protocol (1997) → EU F-Gas (2006) → Kigali Amendment (2016) → HFC Phase-down → EU F-Gas 2024/573 → Low-GWP / HFO / Natural Refrigerants

این نمودار یک روند کلی تاریخی را نشـــان می‌دهد و به‌دلیل هم‌پوشانی زمـــانی و کاربـــردی خانواده‌های مختلف مبرد، نبایـــد به‌عنوان یک توالی کاملاً خطی و جایگزینی کامل هر نسل با نسل بعدی تفسیر شود.

5. دو شاخص با دو مفهوم متفاوت GWP و ODP:

5-1. ODP چیست؟

ODP یا **Ozone Depletion Potential** شـــاخصی نســـبی برای مقایســـه ظرفیت یک ماده در تخریب لایه اوزون نسبت به یک ماده مرجع است. مبردهـــایی ماننـــد **R-22** دارای **ODP** غیرصفر هســـتند، در حالی که **HFC** هایی مانند **R-32** و **R-134a** دارای **ODP** صفر هستند.

بنابراین: شاخص حفاظت از لایه اوزون = **ODP**

اما صفر بودن **ODP** به معنای صفر بودن اثر اقلیمی نیست.

5-2. GWP چیست؟

GWP یا **Global Warming Potential** شـــاخصی برای مقایسه اثر گرمایشی یک گاز نسبت به CO_2 است.

در تحلیل‌هـــای معمول، **GWP100** یعنی اثر یک گاز طی افق زمانی 100 ســـاله. با این حال، مقدار **GWP** را باید همیشـــه همراه با مرجع علمی و روش محاسبه تفسیر کرد.

به همین دلیل، در تحلیل حقوقی **Regulation (EU) 2024/573**، مقادیر **GWP** مندرج در **Annex I** همان مقررات باید مبنای اصلی قرار گیرند، نه اعداد پراکنده موجود در منابع تجاری قدیمی.

6.پروتکل کیوتو و ورود HFC ها به سیاست اقلیمی

پروتکل کیوتو در 11 دسامبر 1997 تصویب شد.

HFC هـــا در چارچوب گازهای گلخانه‌ای تحـــت کنترل این پروتکل قرار گرفتند. این تحول از نظر تاریخی اهمیت زیادی داشـــت، زیرا نشان داد سیاســـت‌گذاری مبردها دیگر صرفاً مســـئله حفاظت از اوزون نیست و اثرات اقلیمی نیز باید مورد توجه قرار گیرد. در نتیجه، دو سؤال اساسی هم‌زمان مطرح شد:

1.آیا مبرد به لایه اوزون آسیب می‌زند؟

2.آیا مبرد در صورت انتشار، اثر قابل توجهی بر گرمایش جهانی دارد؟

7. تولد نظام F-Gas اتحادیه اروپا

اتحادیه اروپا یـــکی از جامع‌ترین نظام‌های مقرراتی جهان را برای کنترل گازهای فلوئوردار ایجاد کرده است.

7-1. Regulation (EC) No 842/2006

Regulation (EC) No 842/2006 یـــکی از نخســـتین چارچوب‌هـــای اختصاصی اتحادیه اروپـــا برای کنترل **F-gases** بود. این مقررات تنها بر

انتخاب مبرد تمرکز نداشت، بلکه موضوعاتی مانند جلوگیری از انتشار، کنترل نشـــت، بازیابی مبرد و مدیریت آن در طول عمر تجهیزات را نیز دربر می‌گرفت.

در نتیجه، رویکرد قانون‌گذاری از کنترل صرف «ماده» به سمت مدیریت **ماده در چرخه عمر تجهیزات** حرکت کرد.

8. Regulation (EU) No 517/2014؛ آغاز مرحله جدی HFC Phase-down

Regulation (EU) No 517/2014 مرحله مهم دیگری در سیاست اقلیمی اتحادیه اروپا بود.

یـــکی از مهم‌ترین عناصـــر آن، ایجاد نظـــام **HFC Phase-down** بود که عرضه **HFC** ها را بر مبنای **CO_2-equivalent** محدود می‌کرد.

$$\text{CO}_2\text{-equivalent} = \text{Mass of refrigerant} \times \text{GWP}$$

رابطه ساده این مفهوم عبارت است از:

بنابراین یک کیلوگرم مبرد با **GWP** بالا، سهم بیشتری از ظرفیت **CO_2-equivalent** را مصرف می‌کند.

در نتیجه، **GWP** از یک شاخص صرفاً زیست‌محیطی به یک عامل مؤثر بر **اقتصاد بازار، سهمیه، زنجیره تأمین و انتخاب فناوری** تبدیل شد.

9. Regulation (EU) 2024/573؛ مرحله جدید F-Gas

Regulation (EU) 2024/573 در 7 فوریـــه 2024 تصویـــب و در 20 فوریه 2024 در **Official Journal** منتشر شد. این مقررات از 11 مارس 2024 لازم‌الاجـــرا شـــد و **Regulation (EU) No 517/2014** را لغـــو کرد. متن مقررات در **EUR-Lex** همچنین دارای اصلاحیه منتشرشـــده در سال 2025 است؛ بنابراین برای کار حقوقی باید به نسخه معتبر و اصلاح‌شده مقررات مراجعه کرد.

اهمیت **Regulation 2024/573** در این است که رویکرد قبلی را توسعه داده و مجموعه‌ای از ابزارها را هم‌زمان به کار می‌گیرد، از جمله:

- کنترل انتشار **F-gases**
- الزامات مربوط به تجهیزات
- محدودیت‌های **placing on the market**
- کاهش عرضه **HFC** ها
- الزامات مربوط به مدیریت مبرد
- توسعه الزامات مربوط به برخی تجهیزات **HVAC** و **refrigeration**
- ایجاد فشار مقرراتی برای استفاده از گزینه‌های **GWP** پایین.

بنابراین، **Regulation 2024/573** را نباید صرفاً یک قانون درباره «مبرد» دانست؛ این مقررات در موارد مختلف می‌تواند بر **طراحی خود تجهیز** نیز اثر بگذارد.

10. تفاوت اساسی میان «ممنوعیت تجهیز جدید» و «ممنوعیت استفاده از تجهیز موجود»

یکی از مهم‌ترین نکات در تفسیر **Regulation 2024/573**، مفهوم **placing on the market** است.

بسیاری از ممنوعیت‌های **Annex IV** مربوط به قرار دادن محصولات و تجهیزات جدید در بازار هستند.

بنابراین عبارت ساده‌ای مانند: "از سال **X** استفاده از مبرد **Y** در اروپا ممنوع است" می‌تواند گمراه‌کننده باشد.

باید میان مفاهیم زیر تفاوت گذاشت:

- طراحی تجهیز جدید؛
- تولید تجهیز جدید؛
- **placing on the market**؛
- نصب تجهیز؛
- بهره‌برداری از تجهیز موجود؛

- سرویس؛
- تعمیر؛
- شارژ مجدد؛
- بازیابی مبرد؛
- و پایان عمر تجهیز.

بنابرایــن وضعیت حقوقی یک مبرد بایــد در ارتباط با نوع تجهیز، تاریخ، مقدار شارژ، نوع فعالیت و ماده قانونی مربوطه بررسی شود.

11.چیلرها؛ یکی از مهم‌ترین نقاط تغییر

Annex IV Regulation 2024/573 برای stationary chillers زمان‌بندی مشخصی تعیین کرده است.

مطابق مقررات:

نوع چیلر	شرط مبرد	تاریخ
تا و شامل 12kw	F-gas با GWP ≥ 150	1ژانویه 2027
تا و شامل 12kw	F-gases	1ژانویه 2032

در هر مورد، استثناهای مرتبط با الزامات ایمنی محل استفاده باید مورد توجه قرار گیرد.

این نکته برای بازار چیلر بسیار مهم است.

بــرای مثال، **R-134a، R-410A و R-407C** از نظر **GWP** بالاتر از آســتانه 750 قــرار دارند؛ بنابراین برای چیلرهای **stationary** بالاتر از **12 kW** که در دامنه این بنــد قرار می‌گیرند، از 2027 با محدودیت **placing on the market** مواجه خواهند شد.

این به معنی ممنوعیت فوری تمام چیلرهای موجود با این مبردها نیست.

11-1. یک تحول حقوقی مهم در سال 2026

برای تحلیل به‌روز در سال 2026، باید به یک نکته جدید نیز توجه کرد.

کمیســـیون اروپا در **Regulation (EU) 2026/286** برای برخی **stationary chillers** مورد استفاده در پشتیبانی از تولید نیمه‌رساناها، برای دوره 2027 تا 2029 معافیت مشخصی از برخی ممنوعیت‌های **Annex IV** ایجاد کرده اســـت. این معافیت شامل برخی چیلرهای **≥12 kW** و برخی چیلرهای **< 12 kW** با شرایط خاص دمایی است.

این نمونه نشـــان می‌دهد که حتی پس از تعییـــن ممنوعیت‌های عمومی، **استثناهای کاربردی و مقررات اجرایی بعدی** می‌توانند وضعیت برخی تجهیزات خاص را تغییر دهند.

12. تجهیزات خودکفا، تهویه مطبوع و Heat Pump

Regulation 2024/573 برای **air-conditioning equipment، self-contained و heat pumps** نیز جدول زمانی جداگانه‌ای دارد.

بـــرای نمونه، برای تجهیزات خودکفا تا و شـــامل **12 kW** که از **F-gases** با **GWP ≥150** اســـتفاده می‌کنند، تاریخ مهم 1 ژانویه 2027 تعیین شـــده اســـت؛ با استثناهای مرتبط با الزامات ایمنی. برای برخی گروه‌های دیگر نیز تاریخ‌های 2030 و 2032 تعیین شده‌اند.

بنابرایـــن نمی‌توان گفت: " از 2027 تمام تجهیزات **HVAC** با **GWP** بالاتر از 150 ممنوع می‌شوند."

تعبیر دقیق‌تر این است:

Regulation 2024/573 برای گروه‌های مشخصی از تجهیزات، بر اساس نوع تجهیز، ظرفیت، نوع **F-gas، GWP** و تاریخ مشخص، محدودیت‌های **placing on the market** تعیین می‌کند.

13. سیستم‌های Split؛ یکی از مهم‌ترین نقاط تغییر بازار

سیستم‌های **Split** دارای جدول زمانی اختصاصی هستند.

نوع سیستم	ظرفیت نامی	آستانه GWP	تاریخ اجرا	وضعیت کلی
Single-split	< 3 kg F-gas	GWP ≥ 750	2025	محدودیت قرار دادن در بازار
Split air-to-water	≤ 12 kW	GWP ≥ 150	2027	محدودیت قرار دادن در بازار
Split air-to-air	≤ 12 kW	GWP ≥ 150	2029	محدودیت قرار دادن در بازار
برخی از Split systems	≤ 12 kW	F-gases	2035	محدودیت گسترده‌تر
Split systems	> 12 kW	GWP ≥ 750	2029	محدودیت قرار دادن در بازار
Split systems	> 12 kW	GWP ≥ 150	2033	محدودیت قرار دادن در بازار

این محدودیت‌ها مربوط به **placing on the market** هستند و مشمول شرایط و استثناهای مقرر در **Annex IV**، از جمله موارد مربوط به الزامات ایمنی، می‌شوند.

این جدول یکی از روشن‌ترین نمونه‌های تغییر پارادایم است: مقررات دیگر صرفاً نمی‌گوید «انتشار مبرد را کاهش دهید»، بلکه از طریق الزامات مربوط به محصول جدید، بر **جهت طراحی فناوری** اثر می‌گذارد.

14. R-410A؛ پایان یک دوره، نه پایان فوری تمام تجهیزات

R-410A یکی از مهم‌ترین مبردهای نسل مدرن تهویه مطبوع، **Heat Pump** **VRF** و برخی کاربردهای دیگر بوده است. **GWP** آن در چارچوب مقادیر رایج مقرراتی حدود 2088 است.

مزیت مهم آن نسبت به **R-22**، **ODP** صفر بود؛ اما **GWP** بالا باعث شده است در بسیاری از طراحی‌های جدید اروپایی با محدودیت‌های فزاینده مواجه شود.

بنابراین باید میان دو موضوع تفاوت گذاشت:

R-410A در تجهیزات جدید و R-410A در تجهیزات موجود

این دو از نظر فنی و حقوقی یکسان نیستند.

15. R-32؛ یک HFC با GWP پایین‌تر، نه یک راه‌حل نهایی عمومی

R-32 یک **HFC** با **GWP** برابر 675 و **ODP** صفر است. این مبرد در بسیاری از سیستم‌های **AC و Heat Pump** مورد استفاده قرار گرفته و نسبت به **R-410A GWP** پایین‌تری دارد. از نظر ایمنی، **R-32** در طبقه **A2L** قرار می‌گیرد.

در نتیجه، استفاده از **R-32** نیازمند توجه به قابلیت اشتعال؛ مقدار شارژ؛ محل نصب؛ تهویه؛ منابع اشتعال؛ تجهیزات الکتریکی؛ ابزار سرویس؛ روش بازیابی؛ و استانداردهای ایمنی مربوطه است..

نکته مهم: R-32 را نباید صرفاً به دلیل **GWP** پایین‌تر، «مبرد نهایی» یا راهکار بلندمدت برای تمامی کاربردها تلقی کرد.

با وجود آنکه **GWP** حدود 675 برای **R-32** در مقایسه با بسیاری از **HFC** های رایج مقدار قابل‌توجهی پایین‌تر است، این مقدار همچنان در چارچوب روند کاهش استفاده از مبردهای با **GWP** بالا در اتحادیه اروپا، به‌ویژه تحت الزامات **Regulation (EU) 2024/573**، می‌تواند در برخی کاربردها با محدودیت‌ها و الزامات آینده مواجه شود.

16. R-454B؛ گزینه کمGWP برای برخی طراحی‌های نسل R-410A

R-454B یک **blend** از **R-32** و **R-1234yf** است و **GWP** آن در منابع مقرراتی و فنی رایج حدود 466 گزارش می‌شود. این مبرد برای برخی کاربردهایی که پیش‌تر به **R-410A** وابسته بودند، مورد توجه قرار گرفته است. اما **R-454B** را نباید یک **drop-in replacement** عمومی برای **R-410A** دانست. تغییر مبرد می‌تواند نیازمند بررسی مجدد موارد زیر باشد:

- کمپرسور؛
- روغن؛

•مبدل حرارتی؛
•کنترل‌ها؛
•شیر انبساط؛
•مقدار شارژ؛
•فشار کاری؛
•عملکرد **blend**؛
•و الزامات ایمنی.

بنابراین:

Refrigerant Replacement ≠ Drop-in Replacement

17. R-513A؛ مزیت A1 در برابر GWP متوسط

R-513A یک **blend** از **HFC/HFO** است که برای برخی کاربردهای مرتبط با **R-134a** توسعه یافته است.

GWP آن در چارچوب **Regulation 2024/573** برابر حدود 629 در نظر گرفته می‌شود. مزیت مهم آن، طبقه‌بندی ایمنی **A1** است. این ویژگی می‌تواند در کاربردهایی که استفاده از مبردهای **A2L یا A3** دشوار است، مزیت مهندسی داشته باشد.اما بودن به معنی مصون‌بودن از محدودیت‌های اقلیمی نیست.

GWP حدود 629 همچنان از آستانه 150 بسیاری از محدودیت‌های آینده بالاتر است.

بنابراین **R-513A** را باید یک **راه‌حل کاربردمحور و بالقوه میان‌مدت برای برخی کاربردها** دانست، نه پاسخ عمومی به آینده صنعت.

18. R-1234ze (E) و HFOها

HFO ها مسیر متفاوتی نسبت به **HFC** های سنتی ایجاد کرده‌اند.

R-1234ze (E) یکی از **HFO** های مهم در برخی کاربردهای چیلر، **Heat Pump** و تجهیزات صنعتی است. **Regulation 2024/573** برای

HFO-1234ze و ایزومرهـای آن مقـدار **GWP100** برابر 1.37 درج می‌کنـد. این مقدار بسـیار پایین، آن را از نظـر اقلیمی در موقعیت کاملاً متفاوتی نسـبت به **HFC** هایی مانند **R-410A** قرار می‌دهد.

با این حال، **GWP** پایین به معنای حذف الزامات ایمنی نیسـت.

R-1234ze(E) در چارچوب طبقه‌بندی‌های متداول ایمنی در گروه **A2L** قرار می‌گیرد و بنابراین طراحی سیسـتم باید متناسب با ویژگی‌های آن انجام شود.

19. R-290؛ مبرد طبیعی با GWP بسیار پایین

R-290 همان پروپان است. مزایای مهم آن عبارت‌اند از:

- **GWP** بسیار پایین؛
- **ODP** صفر؛
- خواص ترمودینامیکی مناسب؛
- امکان استفاده در طیف متنوعی از کاربردها.

اما **R-290** در طبقه **A3** قرار دارد. بنابراین استفاده از **R-290** صرفاً به معنای جایگزین‌کردن ماده مبرد در یک مدار موجود نیست. معماری سیستم باید از ابتدا با توجه به قابلیت اشتعال طراحی شود و عواملی مانند:

- مقدار شارژ؛
- محل نصب؛
- تهویه؛
- منابع اشتعال؛
- تجهیزات الکتریکی؛
- طراحی محفظه کمپرسور؛
- روش شارژ؛
- بازیابی؛
- و آموزش تکنسین

در نظر گرفته شوند.

20. مقایسه مبردهای منتخب

مبرد	خانواده	GWP_{100} مرجع	ODP	کلاس ایمنی	کاربردهای شاخص	جایگاه در گذار مبردها
R22	HCFC	1810	0.055	A1	AC ،Heat Pump ، Chiller ، Refrigeration	نسل قدیم / حذف‌شده
R134a	HFC	1430	0	A1	Chiller ،AC ، Refrigeration	نسل قدیم / HFC در حال جایگزینی
R404A	HFC Blend	≈3922	0	A1	Commercial Refrigeration ، Low-Temperature	نسل قدیم / بسیار پر GWP-
R407C	HFC Blend	1774	0	A1	AC ،Heat Pump ، Chiller	نسل قدیم / HFC در حال جایگزینی
R410A	HFC Blend	2088	0	A1	AC ،Heat Pump ، VRF	نسل قدیم / HFC در حال جایگزینی
R32	HFC	675	0	A2L	Heat Pump ،AC، برخیChiller ها	Low-GWP / گذار های HFC نسبت به قدیمی
R513A	HFC/HFO Blend	629	0	A1	Chiller ،AC ، Refrigeration	جایگزین کم GWP برای برخی R134a
R454B	HFC/HFO Blend	466	0	A2L	AC ،Heat Pump	نسل جدید / جایگزینR410A
R454C	HFC/HFO Blend	≈148	0	A2L	Commercial Refrigeration ، Heat Pump	Low-GWP / نسل جدید
R1234ze(E)	HFO	≈1.37	0	A2L	Heat ،Chiller Pump، برخی کاربردهای Refrigeration	Very Low-GWP / نسل جدید
R290 (Propane)	HC	≈0.02	0	A3	Chiller ،Heat Pump ،AC ، Refrigeration	Natural Refrigerant / Very Low-GWP

توجه: مقادیر **GWP** باید همیشه همراه با منبع و مبنای محاسبه تفسیر شوند. در تحلیل حقوقی **Regulation 2024/573**، مقادیر **Annex I** مقررات باید مبنای اصلی قرار گیرند.

21. آیا آینده فقط متعلق به مبردهای طبیعی است؟

خیــر. این تصور که آینده صنعــت **HVAC** صرفاً متعلق به **CO_2، R-290** و آمونیاک است، از نظر مهندسی بیش از حد ساده‌سازی شده است. هر مبرد باید در زمینه کاربرد خود ارزیابی شود.

برای مثال:

- **R-290** از نظر **GWP** بسیار جذاب است، اما **A3** است.
- **R-32** در بسیاری از **AC** ها و **Heat Pump** ها عملکرد مناسبی دارد، اما **A2L** است و **GWP** آن 675 است.
- **R-454B** برای برخی طراحی‌های جدید **AC** و **Heat Pump** گزینه مهمی است، اما **A2L** است.
- **R-513A** مزیت **A1** دارد، اما **GWP** آن 629 است.
- **R-1234ze(E) GWP** بسیار پایینی دارد و در برخی چیلرها گزینه مهمی محسوب می‌شود، اما الزامات ایمنی خاص خود را دارد.

بنابراین آینده صنعت را بهتر است **چندمبردی و کاربردمحور** دانست.

22. تغییر پارادایم؛ از Refrigerant Selection به Integrated System Design

یــکی از مهم‌ترین پیامدهای تحول مقرراتی و فنی در صنعت **HVAC** این است که انتخاب مبرد دیگر نمی‌تواند به‌عنوان تصمیمی مستقل و صرفاً در انتهای فرآیند طراحی سیستم در نظر گرفته شود.

Regulation (EU) 2024/573 با تعیین محدودیت‌هایی برای عرضه برخی محصــولات و تجهیزات در بازار، بر اســاس نوع تجهیز، نوع گاز، مقدار **GWP** و تاریــخ اجــرای ممنوعیت‌ها، اهمیت انتخاب مبــرد را از مرحله بهره‌بــرداری فراتر بــرده و آن را به یکی از ملاحظــات مهم در طراحی تجهیزات جدید تبدیل کرده است.

در نسل قدیم تجهیزات، فرآیند طراحی را می‌توان به‌صورت ساده‌شده زیر در نظر گرفت:

Capacity (ظرفیت) → Compressor (کمپرسور) → Heat Exchanger (مبدل حرارتی) → Refrigerant (مبرد)

در چنین رویکردی، مبرد تا حد زیادی به‌عنوان یکی از اجزای انتخاب‌شده پس از تعیین معماری اصلی سیستم در نظر گرفته می‌شد. در حالی که در طراحی نسل جدید، انتخاب مبرد باید از مراحل اولیه طراحی وارد فرآیند تصمیم‌گیری شود و در ارتباط با سایر پارامترهای فنی، ایمنی، زیست‌محیطی و قانونی سیستم بررسی گردد.

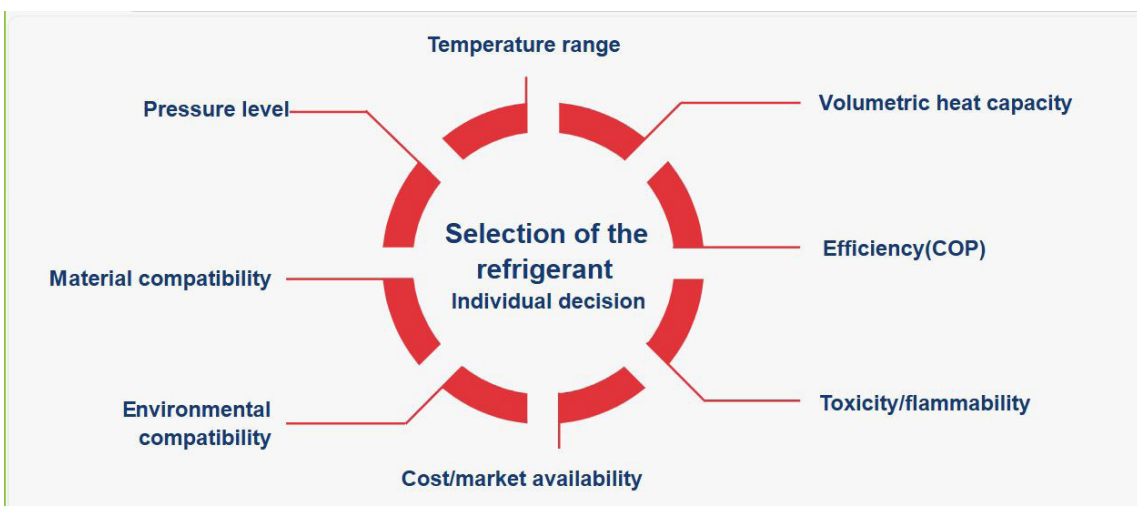
برای بیان این رویکرد به‌صورت یک چارچوب مهندسی، می‌توان فرآیند تصمیم‌گیری را به‌صورت کلی چنین در نظر گرفت:

Application (کاربرد) ↔ Capacity (ظرفیت) ↔ Temperature (دما) ↔ Efficiency ↔ (مقدار شارژ) Charge ↔ (ایمنی) Safety ↔ (مبرد) Refrigerant ↔ (راندمان) Architecture (معماری سیستم) ↔ Regulation (الزامات قانونی)

در این میان، انتخاب خود مبرد نیز یک تصمیم چندمعیاره است.

عواملی مانند محدوده دمایی (**Temperature Range**)، سطح فشار(**Pressure Level**)،ظرفیت حجمی (**Volumetric Heat Capacity**)، راندمان(**Efficiency/COP**)، سازگاری با مواد (**Material Compatibility**)، سازگاری زیست‌محیطی (**Environmental Compatibility**)، سمیت و اشتعال‌پذیری (**Toxicity/Flammability**) و هزینه و دسترسی به بازار (**Cost/Market Availability**) می‌توانند در ارزیابی گزینه‌های مختلف مبرد نقش داشته باشند.

بنابراین، انتخاب مبرد را نمی‌توان صرفاً بر اساس یک شاخص مانند **GWP** یا حتی یک ویژگی ترمودینامیکی انجام داد.



شکل - معیارهای انتخاب مبرد **(Selection Criteria for Refrigerants)**

بـــه همین دلیـــل، انتخاب مبرد باید هم‌زمان با انتخاب کمپرســـور، مبدل حرارتی، شیر انبساط، سیستم کنترل، مقدار شارژ، محل نصب، سیستم تهویه، سنسورها، تجهیزات الکتریکی و روش سرویس انجام شود.

نوع مبرد انتخاب‌شده می‌تواند بر مشخصات و انتخاب این اجزا و الزامات اثـــر بگذارد و در مقابل، محدودیت‌های معماری و عملیاتی سیســـتم نیز می‌توانند دامنه مبردهای قابل استفاده را محدود کنند.

بنابراین، رابطه میان مبرد و سیستم یک رابطه یک‌طرفه نیست، بلکه یک فرآیند متقابل و یکپارچه است.

ایـــن موضوع با ورود مبردهای **A2L** و **A3** اهمیت بیشـــتری پیدا می‌کند. کاهش **GWP** در برخی موارد با تغییر طبقه‌بندی ایمنی و افزایش الزامات مربوط به اشـــتعال‌پذیری همراه است؛ در نتیجه، انتخاب مبرد می‌تواند پیامدهایی برای مقدار شـــارژ، محل نصب، تهویـــه، تجهیزات الکتریکی، سنسورها، روش‌های سرویس و آموزش تکنسین‌ها داشته باشد.

از این رو، یک مبرد با **GWP** پایین لزوماً به معنای ساده‌تر شدن طراحی سیســـتم نیســـت و باید ویژگی‌های فنی، ایمنی و عملیـــاتی آن به‌صورت هم‌زمان ارزیابی شود.

از این منظر، تغییر پارادایم اصلی صنعت را می‌توان چنین خلاصه کرد:

از انتخـــاب مبرد به طراحی یکپارچه سیســـتم From Refrigerant Selection to Integrated System Design

در این پارادایم، مبرد بخشی از معماری و عملکرد کل سیســـتم اســـت و انتخاب آن باید هم‌زمان با تصمیم‌گیری درباره طراحی، ایمنی، بهره‌وری، الزامات زیست‌محیطی و الزامات بازار هدف انجام شود.در نتیجه، طراحی نســـل جدید تجهیزات **HVAC** را می‌توان یـــک فرآیند مهندسی یکپارچه و تکرارشونده(**Integrated and Iterative Engineering Process**) دانست که در آن مبرد و سیستم به‌صورت متقابل بر یکدیگر اثر می‌گذارند.

23. نقش استانداردهای ایمنی

Regulation (EU) 2024/573 را نباید با اســتانداردهای طراحی و ایمنی سیستم یکی دانست. این دو حوزه به یکدیگر مرتبط هستند، اما وظایف متفاوتی دارند.

حوزه مورد بررسی	Regulation (EU) 2024/573	استانداردهای ایمنی
هدف اصلی	حفاظت اقلیمی و کنترل F-gases	ایمنی افراد، تجهیزات و محیط نصب
GWP و اثر اقلیمی مبرد	✓	–
کنترل انتشار و نشت F-gases	✓	✓*
محدودیت عرضه و قرار دادن تجهیزات در بازار	✓	–
مدیریت مبرد در چرخه عمر	✓	✓*
طبقه‌بندی ایمنی مبرد	مرجع/مرتبط	✓
سمیت و اشتعال‌پذیری	مرتبط با الزامات مقررات	✓
محدودیت مقدار شارژ از دیدگاه ایمنی	–	✓
الزامات محل نصب	–	✓
طراحی ایمن سیستم	–	✓
نمونه‌های اصلی	Regulation (EU) 2024/573	EN 378، ISO 5149، ASHRAE 15 و ASHRAE 34

*بسته به دامنه و الزامات استاندارد مربوطه.

استانداردهایی مانند **EN 378، ASHRAE 15، ASHRAE 34 و ISO 5149** نقش مهمی در حوزه ایمنی و طراحی دارند. در نتیجه:

F-Gas Regulation ≠ Safety Standard

بلکه این دو چارچوب باید در طراحی واقعی سیستم به‌صورت مکمل در نظر گرفته شوند.

24. فراتر از GWP؛ از شاخص مبرد به اثر کل سیستم

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های تمرکز صرف بر **GWP** این است که **GWP** فقط ویژگی اقلیمی خود مبرد را بیان می‌کند.اثر اقلیمی کل یک سیستم را می‌توان به‌صورت مفهومی به دو بخش تقسیم کرد:

انتشار مستقیم ناشی از:

- نشت؛
- سرویس؛
- خرابی؛
- شارژ؛
- پایان عمر.

انتشار غیرمستقیم ناشی از انرژی مصرف‌شده توسط سیستم در طول عمر بهره‌برداری.

در نتیجه، شاخص‌هایی مانند **TEWI** و در مطالعات جامع‌تر **LCCP** می‌توانند اطلاعات بیشتری نسبت به **GWP** مبرد به‌تنهایی ارائه دهند.

بنابراین:

Low-GWP ≠ Automatically Lowest Total Climate Impact

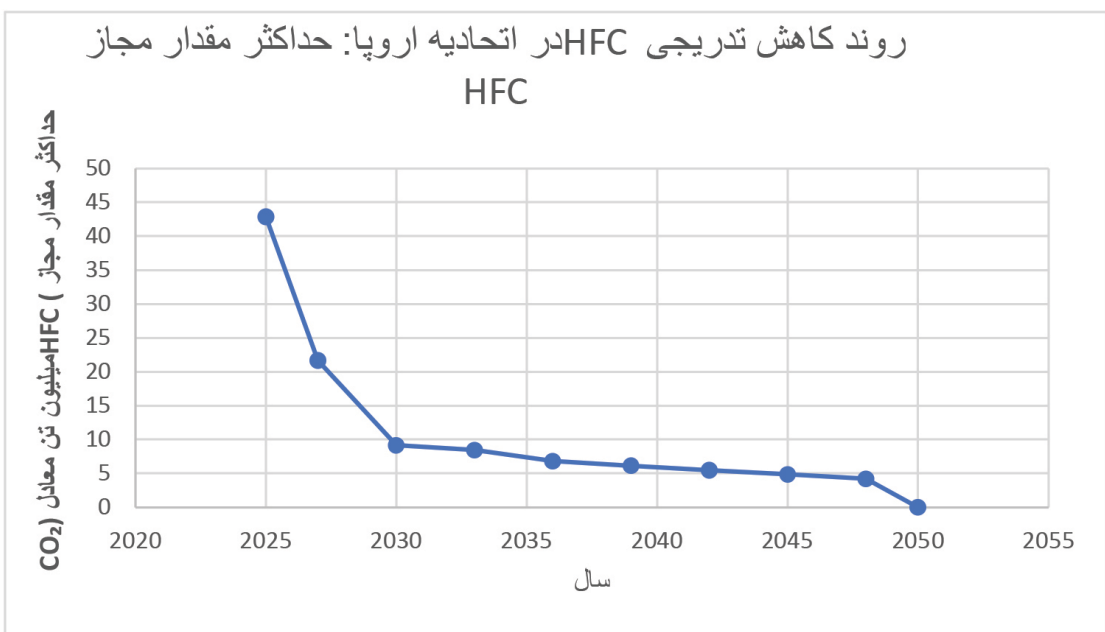
اگر یک سیستم با مبرد بسیار کم **GWP**، در شرایط واقعی انرژی بسیار بیشتری مصرف کند، نتیجه نهایی لزوماً از نظر اقلیمی بهینه نخواهد بود.

25. سهمیه HFC و آینده بازار اروپا

یکی از بنیادی‌ترین عناصر **Regulation 2024/573** ادامه کاهش سقف عرضه **HFC** هاست.

مطابق **Annex VII**، حداکثر مقدار **HFC** مجاز برای **placing on the Union market** به‌صورت زیر تعیین شده است:

دوره	حداکثر مقدار HFC (tCO_2e)
2025–2026	42,874,410
2027–2029	21,665,691
2030–2032	9,132,097
2033–2035	8,445,713
2036–2038	6,782,265
2039–2041	6,136,732
2042–2044	5,491,199
2045–2047	4,845,666
2048–2049	4,200,133
از 2050 به بعد	0



مقدار پایه **2015** نیز **tCO_2e 176,700,479** تعیین شده است. این روند یکی از مهم‌ترین شواهد جهت‌گیری بلندمدت بازار اروپا است. اما یک نکته مهم باید صریحاً بیان شود:

صفر شدن سقف HFC در 2050 به معنای صفر شدن تمام F-gases نیست.

این جدول و نمودار مربوط به **hydrofluorocarbons (HFCs)** است و نباید با تمام گازهای فلوئوردار یکسان تلقی شود.

26.پیامدهای صنعتی برای صنعت چیلر

چیلرها از جمله تجهیزاتی هستند که تغییر مبرد در آن‌ها می‌تواند پیامدهای مهندسی عمیقی داشته باشد.

انتخاب مبرد در یک چیلر بزرگ به عواملی مانند:

- نوع کمپرسور؛
- **Centrifugal، Scroll، Screw** یا **Reciprocating**؛
- دمای آب خروجی؛
- دمای محیط؛
- دمای تبخیر؛
- دمای تقطیر؛
- فشار بحرانی؛
- ظرفیت حجمی؛
- نسبت فشار؛
- دمای دهش؛
- نوع کندانسور؛
- مقدار شارژ؛
- و محل نصب

وابسته است.

به همین دلیل انتظار نمی‌رود یک مبرد واحد تمام بازار چیلر را در اختیار بگیرد.

احتمالاً آینده چیلر شامل ترکیبی از:

- **HFO** ها؛
- **HFC/HFO blends**؛
- **R-290**؛

- **R-744** در کاربردهای خاص؛
- **R-717** در کاربردهای صنعتی؛
- و سایر گزینه‌های کم **GWP**

خواهد بود.

27. پیامدهای تحول مبردها برای تکنسین‌های HVAC

تحول مبردها بازار نیروی انسانی را نیز تغییر می‌دهد.

تکنسین آینده علاوه بر مهارت‌هایی مانند:

Pressure Testing (آزمون فشار)؛ **Superheat**(سوپرهیت/فوق‌گرمایی)؛

Leak Detection (تشخیص نشتی)؛ **Charging** (شارژ مبرد)؛

Commissioning (راه‌اندازی و تحویل سیستم)؛ **Vacuum** (خلأگیری)؛

Subcooling (ساب‌کول/زیرسردی)؛ **Recovery** (بازیابی مبرد)؛

باید با موضوعاتی مانند:

A2L Refrigerants (مبردهای با قابلیت اشتعال پایین)؛

A3 Refrigerants (مبردهای با قابلیت اشتعال بالا)؛

Flammability Risk(ریسک اشتعال‌پذیری)؛

Charge Limits (محدودیت‌های مقدار شارژ مبرد)؛

Refrigerant-specific Tools (ابزارهای اختصاصی متناسب با نوع مبرد)؛

Recovery Procedures(روش‌ها و رویه‌های بازیابی مبرد)؛

Ventilation (تهویه)؛ **Emergency Procedures** (روش‌های اضطراری)؛

و الزامات قانونی آشنا باشد.

بنابراین ارزش یک تکنسین در آینده صرفاً با توانایی «شارژ مبرد» سنجیده نخواهد شد؛ بلکه توانایی مدیریت **ایمن، فنی و قانونی کل سیستم** اهمیت بیشتری پیدا خواهد کرد.

28.پیامدهای احتمالی برای صنعت HVAC ایران

Regulation (EU) 2024/573 مستقیماً قانون بازار ایران نیست.

بنابراین نباید ادعا کرد که این مقررات مستقیماً تجهیزات موجود در ایران را ملزم به استفاده از مبرد خاصی می‌کند. اما اثر غیرمستقیم آن می‌تواند قابل توجه باشد. عوامل مؤثر عبارت‌اند از:

- زنجیره تأمین جهانی؛
- واردات تجهیزات؛
- فناوری تولیدکنندگان؛
- تولید کمپرسور؛
- دسترسی به مبرد؛
- انتقال فناوری؛
- حضور شرکت‌های بین‌المللی.

در نتیجه، تغییرات اروپا می‌توانند به‌صورت غیرمستقیم بر بازار ایران نیز اثر بگذارند.

28-1. تغییر تدریجی تجهیزات وارداتی

با تغییر سبد محصولات جهانی، احتمال افزایش حضور تجهیزاتی با:

R-32، R-454B، R-290، HFOs و سایر مبردهای کم **GWP** وجود دارد.

28-2. افزایش اهمیت ایمنی

افزایش استفاده از **A2L** و **A3** به آموزش‌های جدید نیاز خواهد داشت.

تکنسینی که سال‌ها با **R-22** و **R-410A** کار کرده است، الزاماً بدون آموزش تکمیلی برای کار ایمن با **R-290** یا مبردهای **A2L** آماده نیست.

29. R-22 در ایران؛ فناوری موجود، نه مسیر آینده

R-22 ممکن است همچنان در بخشی از تجهیزات قدیمی ایران وجود داشته باشد.

اما باید میان **Legacy Equipment** و **New Equipment Design** تفاوت گذاشت.

R-22 دارای **ODP** غیرصفر است و روند بین‌المللی حذف مواد مخرب لایه اوزون، استفاده از آن را به‌عنوان گزینه نسل جدید کنار گذاشته است. بنابراین وجود **R-22** در تجهیزات قدیمی به معنای مناسب‌بودن آن برای طراحی نسل آینده نیست.

30. آینده بازار HVAC؛ چند مسیر موازی

آینده صنعت را بهتر است نه به‌صورت یک مسیر واحد، بلکه به‌صورت چند مسیر موازی تصور کرد.

مسیر اول: A2L

مانند: **R-454B**، **R-32** و برخی **HFC/HFO blends**

مسیر دوم: HFO ها

مانند: **R-1234ze(E)** و سایر **HFO** های مناسب برای کاربردهای خاص

مسیر سوم: مبردهای طبیعی

مانند: **R-744**، **R-290** و **R-717**

این مسیرها الزاماً رقیب مستقیم یکدیگر نیستند. در بسیاری از موارد، آینده صنعت بر پایه:

Application-Specific Refrigerant Selection خواهد بود، نه

One Refrigerant for All Applications

31. چارچوب مهندسی پیشنهادی برای انتخاب مبرد و طراحی سیستم

برای طراحی نسل جدید تجهیزات **HVAC**، انتخاب مبرد نباید صرفاً بر اساس **GWP** انجام شود.چارچوب پیشنهادی زیر می‌تواند برای ارزیابی اولیه مورد استفاده قرار گیرد:

مرحله 1 - Application

نوع کاربرد مشخص شود:

AC، Heat Pump، Chiller، Commercial Refrigeration یا

.Industrial Refrigeration

مرحله 2 - Capacity

ظرفیت سرمایشی یا گرمایشی، محدوده بار و شرایط **Part-load** تعیین شود.

مرحله 3 - Operating Conditions

دمای تبخیر، تقطیر، دمای سیال و محدوده دمای محیط تعیین شوند.

مرحله 4 - Performance & Efficiency

COP، EER، SEER، SCOP و عملکرد در بار جزئی بررسی شوند.

مرحله 5 - Preliminary Refrigerant Screening

مبردها باید بر اساس فشار؛ ظرفیت حجمی؛ خواص انتقال حرارت؛ دمای دهش؛ نسبت فشار؛ سازگاری با کمپرسور؛ روغن؛ و مواد غربال شوند.

مرحله 6 - Environmental Assessment

ODP، GWP، CO_2-equivalent و انتشار احتمالی در طول عمر ارزیابی شوند.

مرحله 7 - Safety Assessment

کلاس ایمنی، سمیت، اشتعال‌پذیری، شرایط نصب و استانداردهای مربوطه بررسی شوند.

مرحله 8 - Charge Assessment

مقدار شارژ و پیامدهای آن بر ایمنی؛ تهویه؛ نشتی؛ و معماری سیستم ارزیابی شود.

مرحله 9 - System Architecture

کمپرسور، مبدل‌ها، شیر انبساط، کنترل، سنسورها، تجهیزات حفاظتی و سایر اجزا با مبرد انتخاب‌شده تطبیق داده شوند.

مرحله 10 - Regulatory & Standards Compliance

طرح نهایی از نظر:

Regulation 2024/573 (مقررات 2024/573)؛ **placing on the market** (عرضه در بازار)؛ **F-Gas requirements** (الزامات گازهای فلوئوردار)؛ استانداردهای ایمنی؛ و الزامات بازار هدف ارزیابی شود.

این فرآیند خطی و یک‌باره نیست. اگر در مرحله **Safety** یا **Regulation** مشخص شود که یک مبرد مناسب نیست، باید به مراحل قبلی بازگشت و مبرد یا حتی معماری سیستم را بازنگری کرد.
بنابراین مدل صحیح‌تر:

Application → Capacity → Operating Conditions → Performance → Refrigerant Screening → Environmental Assessment → Safety → Charge → Architecture → Regulatory Compliance

با یک حلقه **Iterative Reassessment** ↺ است.

32.آیا R-32، R-410A و R-454B جایگزین مستقیم یکدیگر هستند؟

خیر. این یکی از مهم‌ترین نکات مهندسی مقاله است.

عبارت" **R-410A** را تخلیه کنید و **R-32 یا R-454B** را جایگزین کنید" به‌عنوان یک دستورالعمل عمومی صحیح نیست.

این مبردها از نظر فشار- دما؛ ترکیب؛ رفتار **Blend** (مخلوط)؛ قابلیت اشتعال؛ ظرفیت حجمی؛ دمای دهش؛ روغن؛ کمپرسور؛ مقدار شارژ؛ و الزامات ایمنی با یکدیگر تفاوت دارند.

بنابراین باید میان دو مفهوم تفاوت گذاشت:

Retrofit و New Equipment Design

در بسیاری از موارد، انتخاب مبرد جدید مستلزم تغییر یا تأیید مجدد بخش‌هایی از سیستم است.

در نتیجه: **Low-GWP Refrigerant ≠ Universal Drop-in Replacement**

33. فراتر از GWP؛ نگاه Life-Cycle

ارزیابی یک سیستم **HVAC** تنها بر اساس **GWP** مبرد، تصویر کاملی از اثرات آن ارائه نمی‌کند.

یک ارزیابی جامع‌تر باید حداقل موارد زیر را در نظر بگیرد:

English	فارسی	نقش در ارزیابی چرخه عمر
Direct Emissions	انتشار مستقیم	انتشار مبرد در اثر نشت، سرویس، خرابی و پایان عمر تجهیز
Indirect Emissions	انتشار غیرمستقیم	انتشار ناشی از مصرف انرژی سیستم در طول دوره بهره‌برداری
Energy Efficiency	بهره‌وری انرژی	عملکرد انرژی و میزان مصرف انرژی سیستم
Refrigerant Charge	مقدار شارژ مبرد	مقدار مبرد موجود در سیستم و پتانسیل انتشار مستقیم
Leakage Rate	نرخ نشت	میزان از دست رفتن مبرد در طول عمر سیستم
Lifetime	طول عمر	مدت بهره‌برداری و اثر تجمعی سیستم در طول عمر
Safety	ایمنی	الزامات مرتبط با سمیت، اشتعال‌پذیری و شرایط ایمن بهره‌برداری
End-of-Life Recovery	بازیابی در پایان عمر	میزان بازیابی مبرد و جلوگیری از انتشار آن هنگام اسقاط یا تعمیرات اساسی

از این منظر، **TEWI** و **LCCP** می‌توانند در کنار **GWP** برای ارزیابی جامع‌تر مورد استفاده قرار گیرند.

بنابراین بهترین مبرد الزاماً مبردی نیست که کمترین **GWP** را دارد. بهتر است پرسش مهندسی این باشد:

کدام ترکیب مبرد–سیستم در شرایط واقعی، در طول عمر تجهیز، کمترین اثر اقلیمی را با سطح ایمنی، عملکرد و هزینه قابل قبول ایجاد می‌کند؟

34. بحث نهایی؛ تغییر واقعی در فلسفه طراحی

تحول مبردها را نباید صرفاً مجموعه‌ای از جایگزینی‌های شیمیایی دانست.

تغییر اصلی، تغییر در **فلسفه طراحی سیستم** است.

در نسل‌های قدیمی‌تر می‌توان فرآیند را به‌صورت ساده چنین تصور کرد:

Component Selection → Refrigerant

اما در نسل جدید، رابطه پیچیده‌تر است:

Regulation + Refrigerant + Safety + Efficiency + System Architecture

هیچ‌یک از این عوامل به‌تنهایی تصمیم نهایی را تعیین نمی‌کند.

Regulation 2024/573 نشان می‌دهد که قانون‌گذار اروپا علاوه بر کنترل انتشار، از طریق محدودیت‌های **placing on the market** نیز بر جهت فناوری تجهیزات جدید اثر می‌گذارد.

هم‌زمان، کاهش تدریجی سقف عرضه **HFC** ها فشار بیشتری بر زنجیره تأمین ایجاد می‌کند. **Annex VII** این روند را تا رسیدن سقف **HFC** به صفر از 2050 نشان می‌دهد.

در نتیجه، آینده صنعت **HVAC** احتمالاً متعلق به شرکت‌هایی خواهد بود که بتوانند چهار حوزه را هم‌زمان مدیریت کنند:

Technology + Safety + Regulation + Service

35. نتیجه‌گیری

تحول مبردها طی چهار دهه اخیر را می‌توان به‌صورت کلی چنین خلاصه کرد:

CFC → Ozone Depletion → Montreal Protocol → HCFC → HFC → Climate Impact → Kyoto Protocol → EU F-Gas → HFC Phase-down → Low-GWP HFC / HFO / Natural Refrigerants

این مسیر نشان می‌دهد که صنعت تبرید دیگر صرفاً توسط پیشرفت کمپرسورها و مبدل‌های حرارتی هدایت نمی‌شود.

قانون‌گذاری زیست‌محیطی اکنون بر: انتخاب مبرد؛ طراحی تجهیزات؛ تولیدکنندگان؛ زنجیره تأمین؛ تکنسین‌ها؛ ابزارهای سرویس؛ آموزش؛ و بازار تجهیزات اثر می‌گذارد.

Regulation (EU) 2024/573 این روند را وارد مرحله جدیدی کرده است. مقررات مذکور با کاهش تدریجی سقف عرضه **HFC** ها و تعیین محدودیت‌های مرحله‌ای برای **placing on the market** گروه‌های مختلف تجهیزات، مسیر بازار اروپا را به سمت فناوری‌های کم **GWP** و طراحی‌های جدید سوق می‌دهد.

در این مسیر:

- **R-410A** نماینده یک نسل مهم اما تحت فشار مقرراتی فزاینده در تجهیزات جدید است؛
- **R-32** یکی از مبردهای مهم **HFC** با **GWP** پایین‌تر و کلاس **A2L** است؛
- **R-454B** برای برخی طراحی‌های جدید **AC** و **Heat Pump** گزینه مهمی است؛

• **R-513A** برای برخی کاربردهای **A1** مرتبط با نسل **R-134a** می‌تواند گزینه‌ای کاربردمحور باشد؛

• **R-1234ze(E)** نمونه‌ای از **HFO** های بسیار کم **GWP** برای کاربردهای مشخص است؛

• **R-290** یکی از مهم‌ترین مبردهای طبیعی با **GWP** بسیار پایین است.

اما هیچ‌یک از این مبردها را نمی‌توان پاسخ واحد تمام کاربردهای آینده دانست.

مسیر آینده صنعت را بهتر است چنین خلاصه کرد:

مبرد مناسب + راندمان بالا + ایمنی + مقدار شارژ بهینه + معماری مناسب سیستم + انطباق قانونی + تکنسین آموزش‌دیده

در نهایت، تغییر بنیادین صنعت این نیست که:

R-410A → R-32 → R-454B → R-290

بلکه تغییر واقعی این است که:

مبرد دیگر یک انتخاب مستقل از سیستم نیست.

مبرد به بخشی از معماری سیستم، ایمنی، عملکرد، اقتصاد، زنجیره تأمین، سرویس و آینده قانونی تجهیز تبدیل شده است.

بنابراین، نسل جدید **HVAC** باید نه بر اساس جست‌وجوی یک «مبرد برتر»، بلکه بر اساس انتخاب یک راه‌حل یکپارچه مبرد–سیستم–ایمنی–انرژی–مقررات طراحی شود.

منابع

منابع حقوقی و بین‌المللی

1. UNEP Ozone Secretariat. Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, 1987.
2. European Union. Regulation (EC) No 842/2006 on certain fluorinated greenhouse gases.
3. European Union. Regulation (EU) No 517/2014 on fluorinated greenhouse gases.
4. European Union. Regulation (EU) 2024/573 of the European Parliament and of the Council of 7 February 2024 on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014.
5. Regulation (EU) 2024/573, Annex I — Fluorinated greenhouse gases and their GWP values.
6. Regulation (EU) 2024/573, Annex IV — Prohibitions on placing products and equipment on the market.
7. Regulation (EU) 2024/573, Annex VII — Maximum quantities and calculation of reference values and quota for placing HFCs on the Union market.
8. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Kyoto Protocol, 1997.
9. Regulation (EU) 2026/286 of 10 February 2026, authorising an exemption pursuant to Regulation (EU) 2024/573 with regard to certain chillers used for semiconductor manufacturing.

منابع علمی و فنی

10. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Sixth Assessment Report, 2021.
11. UNEP OzonAction. Publications on refrigerants, GWP and the Montreal Protocol.
12. ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 34 — Designation and Safety Classification of Refrigerants.
13. ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 15 — Safety Standard for Refrigeration Systems.
14. ISO. ISO 817 — Refrigerants — Designation and Safety Classification.
15. CEN. EN 378 — Refrigerating systems and heat pumps — Safety and environmental requirements.
16. Lemmon, E.W., Bell, I.H., Huber, M.L., McLinden, M.O. NIST Standard Reference Database 23: REFPROP.
۱۷. منابع فنی سازندگان کمپرسور و تجهیزات HVAC درباره مبردهای A2L، HFO و مبردهای طبیعی.