

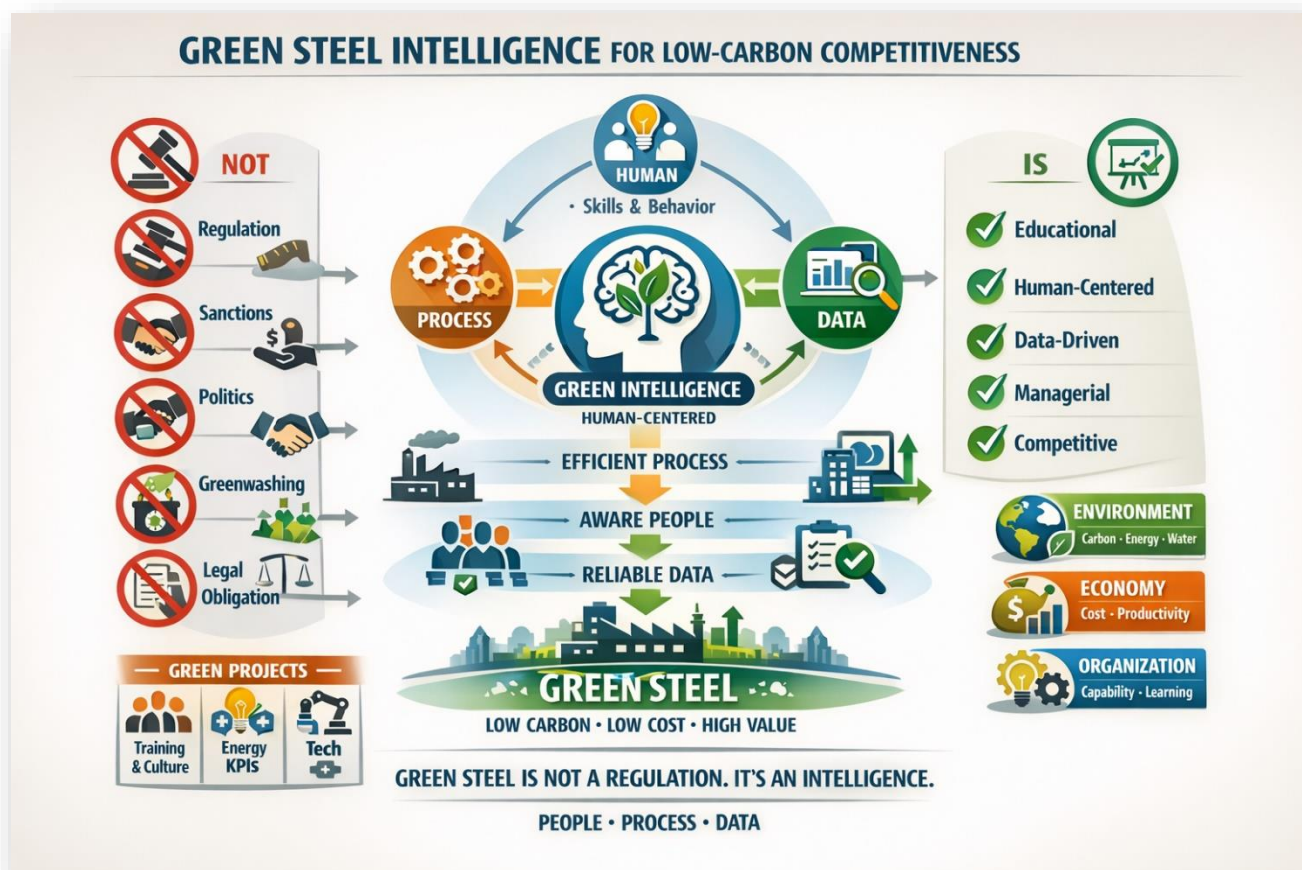
محتوای آموزشی

کارگاه تخصصی (مجازی) تولید فولاد سبز

مبتنی بر نسل چهارم دانش مدیریت و مهندسی سبز (Green Intelligence)

از درک مفهومی تا طراحی پروژه‌های عملیاتی

محیط‌زیست محرک اقتصادی صنعت فولاد



مدرس: دکتر محمدحسن امامی

- رئیس انجمن مدیریت سبز ایران
- نایب رئیس جامعه جهانی مدیریت سبز
- پژوهشگر زیباشناسی و تغییرات اقلیمی
- مولف و مترجم هندبوک دانش سبز (نسل چهارم دانش مدیریت و مهندسی سبز)

مولف و مترجم هندبوک دانش سبز (نسل چهارم دانش مدیریت و مهندسی سبز)




کارگاه تخصصی (مجازی) تولید فولاد سبز

نسل چهارم دانش مدیریت و مهندسی سبز
(Green Intelligence)
از درک مفهومی تا طراحی پروژه‌های عملیاتی




محیط زیست محرک اقتصادی صنعت فولاد

محتوای آموزشی	
نقطه عزیمت دانش تولید فولاد سبز	
• محرک‌های اصلی جهانی: از محیط‌زیست تا تجارت و سرمایه	
• از رقبای تا واقعیت: چرا هیدروژن سبز به‌تنهایی فولاد را کرین‌زدایی نمی‌کند.	
• هیدروژن سبز بدون مدیریت سبز؟ چرا فناوری تنها شکست می‌خورد؟	
بخش اول	
چرخه مدیریتی تولید فولاد سبز	
چکلیست مدیریتی تولید فولاد سبز	
مطالعه موردی مدیریت تولید فولاد سبز	
بخش دوم	
اقدامات فنی و مهندسی در تولید فولاد سبز	
چکلیست مهندسی در تولید فولاد سبز	
محاسبه "یک نمونه"	
بخش سوم	
طرحنامه تسل چهارم دانش مدیریت و مهندسی سبز	
"تولید فولاد سبز"	
مراجع علمی و مقالات مرتبط	
بخش چهارم	
محاسبه ردپای کرین	در صنعت فولاد
• گزارش دهنی CBAM	
• فتون خودممیزی ۱۴۰۶۴-۱۴۰۶۷ ISO	
محاسبه ردپای آب	در صنعت فولاد
فرمول‌های ممیزی انرژی	در صنعت فولاد
بخش پنجم	
گزارش تحلیلی از	
چالش‌های زیست‌محیطی انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت فولاد	

✓

۱۴ و ۱۵ دی ماه

ساعت ۱۶:۰۰ - ۲۰:۰۰



۰۲۱ ۸۸ ۵۱ ۵۳ ۲۸

۰۹۳۷ ۰۸۹ ۳۶۰۳



www.Iran-gma.com



تهران-سهروردی شمالی ک موزه پ۱۵



@Green_management

فهرست:

موضوع	صفحه
مقدمه	۳
• ضرورت عبور از کیفیت‌گرایی در صنعت فولاد • محرک‌های اصلی جهانی: از محیط‌زیست تا تجارت و سرمایه • از رؤیا تا واقعیت: چرا هیدروژن سبز به‌تنهایی فولاد را کربن‌زدایی نمی‌کند. • هیدروژن سبز بدون مدیریت سبز؟ چرا فناوری تنها شکست می‌خورد؟	
بخش اول	
چرخه مدیریتی تولید فولاد سبز	۵
چکلیست مدیریتی تولید فولاد سبز	۷
مطالعه موردی مدیریت تولید فولاد سبز	۱۴
بخش دوم	
اقدامات فنی و مهندسی در تولید فولاد سبز	۱۸
چکلیست مهندسی در تولید فولاد سبز	۲۳
محاسبه "یک نمونه"	۲۷
بخش سوم	
طرح‌نامه نسل چهارم دانش مدیریت و مهندسی سبز "تولید فولاد سبز"	۲۹
مراجعه علمی و مقالات مرتبط	۴۲
بخش چهارم	
محاسبه ردپای کربن در صنعت فولاد	۴۴
• گزارش دهی CBAM • فنون خودممیزی ۱۴۰۶۴-۱۴۰۶۷ ISO	
محاسبه ردپای آب در صنعت فولاد	۵۸
فرمول‌های ممیزی انرژی در صنعت فولاد	۶۵
بخش پنجم	
گزارش تحلیلی از چالش‌های زیست‌محیطی انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت فولاد	۷۳



مقدمه

ضرورت عبور از کیفیت‌گرایی در صنعت فولاد

فرض مسئله: فولاد با کیفیت‌گرایی کلاسیک تولید می‌شود

- کیفیت = محصول بی‌عیب و منطبق با مشخصات فنی
- هدف اصلی = رضایت مشتری
- ابزار غالب = کنترل، استاندارد، چک‌لیست، ممیزی
- منطق حاکم = کاهش خطا و افزایش بهره‌وری تولید

چالش‌های زیست‌محیطی پنهان فولاد «کیفیت‌گرا»

افزایش مصرف منابع به‌نام کاهش خطا

در منطق کیفیت‌گرایی:

- برای جلوگیری از خطا → کنترل بیشتر
- کنترل بیشتر → تجهیزات بیشتر، آزمون بیشتر، مصرف بیشتر

پیامد زیست‌محیطی در فولاد:

- مصرف بالاتر انرژی (آزمون‌ها، توقف/راه‌اندازی مجدد)
- مصرف بیشتر آب در خنک‌کاری و شست‌وشو
- افزایش مصرف مواد نسوز، الکتروود، آهک و مواد کمکی

این همان «بهبود کارایی موضعی» است که منجر به افزایش مصرف کل منابع می‌شود.

آلودگی مدیریت‌شده، نه آلودگی کاهش‌یافته

- محیط‌زیست در کیفیت‌گرایی:
 - در انتهای خط تولید دیده می‌شود
 - در قالب پساب، پسماند، فیلتر دودکش

در فولاد یعنی: آلودگی تولید می‌شود، اما فیلتر می‌شود، مستندسازی می‌شود و گزارش می‌شود. اما آلودگی کاهش نمی‌یابد، فقط مستند می‌شود.



تشدید ردپای کربن از مسیر افزایش تولید

کیفیت‌گرایی موفق یعنی: کاهش ضایعات-افزایش راندمان-کاهش هزینه واحد محصول

- کاهش هزینه → افزایش تولید
- افزایش تولید → افزایش انتشار کل CO₂

در فولاد:

- حتی اگر kgCO₂/ton بهتر شود،
- مجموع ton CO₂/year ممکن است بیشتر شود.

نتیجه: کیفیت‌گرایی بدون سقف منابع = تشدید بحران اقلیمی

بی‌توجهی به ردپای آب و Grey Water

در کیفیت‌گرایی کلاسیک: آب = «سیال فرآیندی» و معیار = در دسترس بودن، نه پایداری

پیامد در فولاد:

- برداشت پایدار بررسی نمی‌شود
- پساب «در حد مجاز» تخلیه می‌شود
- Grey Water Footprint محاسبه نمی‌شود

در حالی که طبق منطق نسل جدید: استاندارد بودن تخلیه ≠ بی‌اثر بودن زیست‌محیطی

افزایش پسماند صنعتی به واسطه منطق کنترل

- کیفیت‌گرایی = تجهیزات ایمنی، ابزار کنترلی، اقلام مصرفی بیشتر

در فولاد: PPE حجیم – فیلترها- لجن تصفیه‌خانه- نسوزهای تعویض‌شده زودهنگام. این‌ها «پسماند کیفیت‌محور» هستند، نه پسماند ناشی از خطا.



جمع‌بندی تحلیلی

آنچه در محیط زیست فولاد رخ می‌دهد	آنچه کیفیت‌گرایی وعده می‌دهد
مصرف بیشتر منابع	محصول بدون خطا
آلودگی مدیریت‌شده، نه حذف‌شده	کنترل فرآیند
افزایش تولید و CO_2 کل	بهره‌وری بالاتر
تشدید مصرف‌گرایی	رضایت مشتری
غفلت از چرخه عمر	انطباق با استاندارد

چرا این وضعیت ما را مجبور به «عبور از کیفیت‌گرایی» می‌کند؟

کیفیت‌گرایی کلاسیک، در خدمت مصرف‌گرایی ساختاری است، نه پایداری. به همین دلیل:

- فولاد «با کیفیت» لزوماً فولاد «سبز» نیست
- فولاد بدون خطا، می‌تواند پرخطرترین اثر زیست‌محیطی را داشته باشد

ما فولاد را بدون خطا تولید کردیم، اما فراموش کردیم پیرسیم: این فولاد با زمین، آب و هوا چه می‌کند؟

فولاد کیفیت‌گرا در برابر فولاد سبز

فولاد سبز (4th-Gen Green Steel)	فولاد کیفیت‌گرا (Classical Quality-Oriented Steel)	محور مقایسه
کاهش اثرات زیست‌محیطی + تاب‌آوری اقتصادی	محصول بدون عیب، مطابق مشخصات	تعریف موفقیت
رضایت مشتری + جامعه + نسل آینده	رضایت مشتری	هدف اصلی
پیشگیری، بازطراحی، کاهش مصرف	کنترل خطا و انطباق	منطق تولید
(Built-in) داخل فرایند	(End-of-Pipe) انتهای خط	نگاه به محیط‌زیست
کاهش شدت و مصرف مطلق انرژی	افزایش راندمان برای تولید بیشتر	انرژی
$kgCO_2/year$ و $kgCO_2/ton$ مدیریت	$kgCO_2/ton$ بهبود	کربن
Water Footprint + Water Stress	تأمین پایدار فرض می‌شود	آب
بازچرخانی + Grey Water کاهش	تخلیه در حد مجاز	پساب
متغیر طراحی و تصمیم مهندسی	نتیجه جانبی کنترل‌ها	پسماند
عامل تغییر رفتار و بهره‌وری	مجری دستورالعمل	نقش انسان
(Carbon/Water/Energy) داده تصمیم‌ساز	داده کنترلی	داده
میان‌مدت و بلندمدت (تاب‌آوری)	کوتاه‌مدت (کیفیت امروز)	افق زمانی
شناسایی‌شده و مدیریت‌شده	پنهان و انباشته	ریسک آینده

فولاد کیفیت‌گرا می‌پرسد: «چطور بی‌عیب تولید کنیم؟» و فولاد سبز می‌پرسد: «چطور کمتر مصرف کنیم و کمتر آسیب بزنیم؟»

مصرف منابع و آلودگی

به ازای ۱ تن فولاد خام (Crude Steel)

مصرف منابع اصلی (Resource Consumption)

انرژی

منبع	مقدار معمول	توضیح زیست محیطی
برق	400–500 kWh	CO ₂ وابسته به شبکه برق → انتشار غیرمستقیم
گاز طبیعی	9–11 GJ	CO ₂ منبع اصلی انتشار مستقیم
اکسیژن صنعتی	30–40 Nm ³	(Scope 3) انتشار غیرمستقیم

حتی با راندمان بالا، انرژی مصرف می شود و اثر اقلیمی دارد.

آب

نوع مصرف	مقدار معمول	توضیح
برداشت آب (Blue Water)	3–6 m ³	از چاه/سد/شبکه
مصرف خالص (تبخیر + تلفات)	1.5–3 m ³	از چرخه طبیعی خارج می شود
پساب تولیدی	1–3 m ³	منبع Grey Water

آب «در حد مجاز» تخلیه می شود، اما از نظر اکولوژیک همچنان اثر گذار است.

مواد مصرفی

ماده	مقدار معمول
آهک و دولومیت	30–40 kg
الکتروود گرافیتی	1.5–2.5 kg
نسوزها	2–5 kg

تولید همین مواد در زنجیره بالادست خود آلاینده است.



آلودگی هوا (Air Emissions)

منبع	مقدار معمول	آلاینده
گاز + برق	1.6–2.2 tCO ₂ / t steel	کل CO ₂
احتراق	1–3 kg	NO _x
سوخت/مواد	0.5–2 kg	SO ₂
برش، غبارگیر EAF	1–5 kg	(PM) ذرات معلق

حتی با فیلترها: آلودگی کاهش می یابد، اما حذف نمی شود.

آلودگی آب (Water Pollution – Grey Water)

اثر	مقدار نمونه	شاخص
بار آلی	50–300 mg/L	COD
کدورت	100–500 mg/L	TSS
آلودگی پایدار	10–50 mg/L	Oil & Grease
ریسک اکوسیستم	ppm-level	فلزات سنگین

نتیجه: حجم قابل توجه **Grey Water Footprint** حتی با تصفیه استاندارد.

پسماند جامد

مقدار	نوع پسماند
100–150 kg	سرباره
10–20 kg	غبار EAF
5–15 kg	لجن تصفیه خانه
چند kg	نسوز مصرف شده

بخشی بازیافت می شود، اما همه بدون اثر نیستند.



الف) تجارت: مرزهای جدید صادرات با «کربن»

اروپا با CBAM عملاً پیام داده است: «کربن پنهان در کالا» هم مثل خود کالا مهم است. طبق اعلام رسمی کمیسیون اروپا، دوره نهایی CBAM از ۱ ژانویه ۲۰۲۶ آغاز می‌شود. ([Taxation and Customs Union](#)) و طبق منابع معتبر، دوره گذار از ۱ اکتبر ۲۰۲۳ تا پایان ۲۰۲۵ همراه با الزام گزارش‌دهی انتشارهای نهفته است. ([ICAP Carbon Action](#)) نتیجه روشن است: فولاد بدون داده و بدون کاهش شدت کربن، در بازارهای هدف «گران‌تر» یا «غیرقابلی» می‌شود.

ب) گزارش‌دهی اجباری و شفافیت: شرکت‌ها باید «قابل راستی‌آزمایی» شوند

در اروپا، CSRD گزارش‌دهی پایداری را از حالت انتخابی خارج کرده؛ و مطابق صفحه رسمی کمیسیون اروپا، اولین گروه شرکت‌ها باید برای سال مالی ۲۰۲۴ گزارش دهند (انتشار گزارش در ۲۰۲۵). در سطح جهانی هم استانداردهای ISSB یعنی IFRS S1 و IFRS S2 برای دوره‌های گزارشگری از ۱ ژانویه ۲۰۲۴ مؤثر شده‌اند. پس فولاد سبز فقط «کاهش انتشار» نیست؛ زبان مشترک گزارش‌دهی، داده، و قابلیت ممیزی است. - ([Finance](#)) (IFRS)

ج) استانداردهای داوطلبانه‌ای که عملاً شرط بازار می‌شوند

استانداردهایی مثل Responsible Steel با اصول ESG و الزامات ممیزی سایت‌های فولادی، به تدریج تبدیل به «امتیاز ورود» به برخی زنجیره‌های تأمین جهانی می‌شوند. ([ResponsibleSteel](#))

۲) چرا «فناوری محوری صرف» دیگر کافی نیست؟

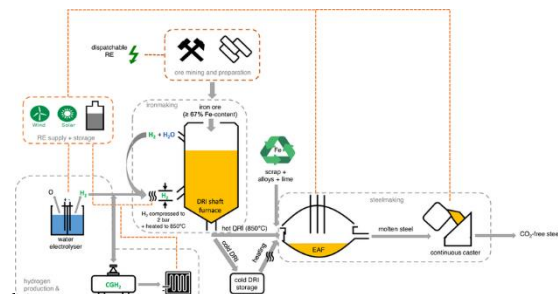
مدتی تمرکز اصلی جهان روی «نسل سوم» بود: فناوری‌های پاک‌تر، محصول سبزتر، و نوآوری فنی. اما تجربه نشان داد اگر فقط فناوری را عوض کنیم و انسان، فرایند، داده و حکمرانی مصرف منابع را جدی نگیریم، سه اتفاق می‌افتد: ۱- فناوری درست نصب می‌شود، اما درست استفاده نمی‌شود (رفتار و نگهداشت ضعیف). ۲- بهبودها مقطعی می‌شوند (پروژه‌ای، نه سیستمی). ۳- کاهش واقعی شدت کربن و انرژی در مقیاس پایدار رخ نمی‌دهد. این همان نقطه‌ای است که رویکرد «نسل چهارم» وارد می‌شود: عبور از تکنولوژی به «هوش سبز»؛ یعنی بازطراحی فرایند با محوریت انسان + داده + سیستم. همین منطق تاکید می‌شود:

- انسان عامل تغییر است، نه صرفاً اجراکننده؛
- فرایند نقطه مداخله است، نه فقط تجهیزات؛
- تصمیم‌گیری باید داده‌محور باشد، نه صرفاً واکنش به الزام.



۳) «هیدروژن سبز در احیا» چرا مطرح شد؟^۱

چون در احیای مستقیم سنگ آهن، اگر عامل احیا کربن باشد، ذاتاً CO₂ تولید می‌شود؛ اما اگر عامل احیا هیدروژن باشد، محصول جانبی می‌تواند آب باشد. بنابراین مسیر H₂-DRI + EAF (احیای مستقیم با هیدروژن + کوره قوس الکتریکی با برق کم کربن) از نظر فنی یک پاسخ جدی به «کربن فرایندی» است، نه فقط کربن انرژی. اما همین جا یک نکته کلیدی نسل چهارمی شروع می‌شود: هیدروژن «جادو» نیست. اگر:



برق تولید هیدروژن فسیلی باشد،

• آب و زمین و زیرساخت دیده نشود،

• نیروی انسانی و نظام نگهداشت و بهره‌برداری آماده نباشد،

ممکن است پروژه از نظر اقتصادی/زیست‌محیطی شکست بخورد یا اثر خالص کم شود. پس جهان به این جمع‌بندی رسیده که کنار فناوری، باید تحلیل جریان حرکت و مصرف منابع و همچنین نقش انسان و سیستم در کنترل، نگهداشت، فرهنگ مصرف و بهره‌وری وارد قلب تولید شود.

¹ ۱- «هیدروژن سبز در احیا» چرا مطرح شد؟ و چرا بدون نسل چهارم، می‌تواند به بن‌بست برسد. (منطق فنی و اقلیمی: حل مسئله «کربن فرایندی» در احیای مستقیم سنگ آهن، مسئله فقط مصرف انرژی نیست، بلکه ماهیت شیمیایی فرایند است. وقتی عامل احیا کربن یا CO باشد: $Fe_2O_3 + CO \rightarrow Fe + CO_2$ تولید CO₂ اجتناب‌ناپذیر است؛ حتی اگر انرژی ورودی پاک باشد. به همین دلیل، فولادسازی از دید اقلیم جزو صنایع Hard-to-Abate طبقه‌بندی می‌شود. در مقابل، اگر عامل احیا هیدروژن باشد: $Fe_2O_3 + H_2 \rightarrow Fe + H_2O$

از نظر تئوریک، محصول جانبی می‌تواند آب باشد. به همین دلیل مسیر H₂-DRI + EAF با برق کم کربن به‌عنوان تنها مسیر صنعتی شناخته‌شده برای حذف «کربن فرایندی» فولاد مطرح شد؛ نه فقط کاهش کربن انرژی. این یک تغییر پارادایم است: از «کاهش انتشار» → به «حذف منبع انتشار».

۲- اما چالش‌های زیست‌محیطی: هیدروژن واقعاً سبز است؟ اینجا همان جایی است که نگاه نسل چهارمی آغاز می‌شود. هیدروژن به‌خودی‌خود سبز یا ناپاک نیست؛ روش تولید آن تعیین‌کننده است. چالش‌های زیست‌محیطی کلیدی: اگر برق الکترولیز فسیلی باشد → انتشار فقط جابه‌جا شده است. تولید هیدروژن سبز نیازمند برق تجدیدپذیر عظیم است. مصرف آب در الکترولیز قابل چشم‌پوشی نیست، به‌ویژه در مناطق خشک. کاربری زمین برای انرژی‌های تجدیدپذیر مسئله‌ساز می‌شود. نتیجه: بدون تحلیل جامع جریان انرژی، آب و زمین، «H₂-DRI» می‌تواند فقط ظاهر سبز داشته باشد.

۳- چالش‌های اقتصادی: هیدروژن گران است، خطا گران‌تر. از نظر اقتصادی، هیدروژن سبز هنوز: هزینه سرمایه‌ای بالا (CAPEX) دارد. به زیرساخت جدید نیاز دارد (الکترولیزر، ذخیره‌سازی، ایمنی). به قیمت برق بسیار حساس است. ریسک بازار و نوسان هزینه دارد. اما چالش بزرگ‌تر این است: اگر بهره‌برداری، نگهداشت و فرهنگ مصرف اصلاح نشود، حتی فناوری درست هم غیرقابل‌استی می‌شود. نمونه‌های جهانی نشان داده‌اند که پروژه‌هایی با فناوری پیشرفته، به‌دلیل نبودن سازمان و سیستم بهره‌برداری، بازده واقعی پایینی داشته‌اند.

۴- چالش‌های مهندسی: هیدروژن با فولاد شوخی ندارد. از منظر مهندسی ساخت و بهره‌برداری: (چالش‌های فنی-مهندسی). رفتار متفاوت H₂ در کوره (سینتیک، دما، انتقال جرم). نیاز به بازطراحی مشعل‌ها و نوسازها. مسائل ایمنی (نشت، انفجار، نفوذپذیری). تأثیر کیفیت DRI هیدروژنی بر EAF. نیاز به کنترل بسیار دقیق فرایند. این‌ها فقط با تجهیزات حل نمی‌شوند؛ با انسان آموزش‌دیده، داده دقیق و کنترل سیستمی حل می‌شوند.

۵- چرا «نسل چهارم» اجتناب‌ناپذیر است؟ در نسل‌های قبلی: نسل اول: حفاظت و کنترل انتهایی. نسل دوم: بهبود فرایند. نسل سوم: فناوری سبز. اما هیدروژن سبز پروژه‌ای نیست که با منطق نسل سوم موفق شود.

نسل چهارم یعنی: فناوری + انسان + سیستم + داده. تصمیم‌گیری مبتنی بر تحلیل جریان منابع. یکپارچگی محیط‌زیست با تولید و اقتصاد. توجه هم‌زمان به بهره‌وری، ایمنی، فرهنگ و نگهداشت. پیام کلیدی: در پروژه H₂-DRI، اگر انسان و سیستم آماده نباشند، فناوری نه تنها نجات‌بخش نیست، بلکه پریسک است.

۴) «محیط زیست وارد فرایند تولید شده است» یعنی چه؟

یعنی محیط زیست دیگر یک واحد حاشیه‌ای نیست که آخر کار گزارش بنویسد؛ بلکه در فولاد سبز:

- مرز سیستم تعریف می‌شود (از معدن تا محصول، یا حداقل Cradle-to-Gate)
- داده‌ها جمع‌آوری و قابل ممیزی می‌شوند (MRV)
- KPI های شدت انرژی/کربن به زبان مدیریت و مالی ترجمه می‌شوند
- پروژه‌های بهبود در سه محور «انسان‌محور، سیستم‌محور، فناوری‌محور» طراحی می‌شوند

این همان جایی است که «محیط زیست = اقتصاد» معنا پیدا می‌کند: مدیریت منابع یعنی کاهش هزینه تمام‌شده، کاهش ریسک بازار، و حفظ امکان صادرات. بنابراین، فولاد سبز در جهان مطرح شد چون ترکیب هم‌زمان این سه فشار شکل گرفت:

۲) فشار اقلیمی و (Net-Zero کاهش واقعی انتشار در صنایع سخت)

۳) فشار تجاری و مقررات مرزی مثل CBAM (از ۲۰۲۶ وارد فاز نهایی می‌شود) ([Taxation and Customs Union](#))

۴) فشار شفافیت و گزارش‌دهی (CSRD/IFRS S1,S2 و استانداردهای ممیزی پذیر) ([Finance](#))

و پاسخ دنیا فقط «تکنولوژی» نبود؛ بلکه حرکت به سمت نسل چهارم/هوش سبز بود: فناوری (مثل هیدروژن) لازم است، اما کافی نیست؛ موتور واقعی پایداری، انسان + داده + سیستم + بازطراحی فرایند است.



چارچوب کلان:

چرخه مدیریتی تولید فولاد سبز



فرایند مدیریتی فولاد سبز را می توان در قالب یک چرخه پیوسته دید:

هدف گذاری → راهبرد → توانمندسازی → فرایندها → کنترل → ارزیابی → بهبود

این چرخه دائماً تکرار می شود و هر بار «شدت مصرف منابع و انتشار» را کاهش می دهد.

(1) برنامه ریزی و هدف گذاری (Planning & Target Setting)

پرسش مدیریتی کلیدی: «می خواهیم فولاد ما تا چه سطحی سبز شود و در چه بازه ای؟»

اجزای اصلی:

- تعریف مرز سیستم (معدن تا شمش؟ DRI تا محصول نهایی؟ Cradle-to-Gate یا Gate-to-Gate)
- خط مبنا (Baseline)
 - شدت مصرف انرژی، آب، مواد، و شدت کربن فعلی
- هدف گذاری کمی و زمان مند
 - کاهش شدت CO_2 (مثلاً ۲۰٪ در ۳ سال)
 - کاهش مصرف انرژی ویژه (GJ/ton)
 - افزایش سهم انرژی کم کربن
- هم راستایی با بازار و مقررات (صادرات، زنجیره تأمین، الزامات گزارش دهی)

نکته نسل چهارمی: هدف فقط «کاهش انتشار» نیست؛ هدف باید به زبان تصمیم مدیریتی و مالی قابل ترجمه باشد.



۲) راهبرد (Strategy)

پرسش مدیریتی کلیدی: «از چه مسیرهایی به هدف می‌رسیم؟»

راهبرد فولاد سبز همیشه ترکیبی است، نه تک‌بعدی:

الف) راهبرد فناوری

- بهینه‌سازی فرایندهای موجود
- استفاده تدریجی از فناوری‌های کم‌کربن (EAF, DRI, بازیافت حرارت)

ب) راهبرد فرایندی

- کاهش تلفات
- افزایش راندمان
- مدیریت جریان مواد و انرژی

ج) راهبرد انسانی و سازمانی

- تغییر رفتار مصرف انرژی
- افزایش مشارکت کارکنان در بهبود

د) راهبرد داده و گزارش‌دهی

- (MRV اندازه‌گیری، گزارش‌دهی، راستی‌آزمایی)
- تصمیم‌گیری مبتنی بر داده واقعی

تفاوت فولاد سبز با فولاد «کم‌مصرف»: در فولاد سبز، راهبرد انسانی و داده‌ای هم‌وزن فناوری است.

۳) توانمندسازی منابع انسانی (Human Capital Enablement)

پرسش مدیریتی کلیدی: «چه کسی این تحول را اجرا می‌کند؟»

محورهای توانمندسازی:

- آموزش هدفمند. (مدیران، سرپرستان، اپراتورها – هرکدام با زبان خودشان)
- تعریف نقش‌ها و مسئولیت‌ها. فولاد سبز بدون مالک فرایند، شکست می‌خورد
- انگیزش و مشارکت. پیوند بهره‌وری، ایمنی و محیط‌زیست
- فرهنگ سازمانی. «کاهش مصرف = ارزش سازمانی»

نکته کلیدی: بیشترین صرفه‌جویی‌ها معمولاً از رفتار و تصمیم روزمره انسان‌ها می‌آید، نه از تجهیزات گران‌قیمت.



۴) تبیین و بازطراحی فرایندها (Process Definition & Redesign)

پرسش مدیریتی کلیدی: «در کجا منابع تلف می‌شوند؟»

اقدامات اصلی:

- ترسیم نقشه فرایند (Process Mapping)
- شناسایی نقاط:
 - اتلاف انرژی
 - اتلاف مواد
 - تولید آلاینده
- تعریف KPI های سبز برای هر فرایند
- یکپارچه‌سازی محیط‌زیست با تولید، نگهداشت و HSE

فولاد سبز یعنی: محیط‌زیست «داخل» فرایند است، نه گزارش انتهای سال.

۵) کنترل‌ها (Operational & Management Controls)

پرسش مدیریتی کلیدی: «چطور مطمئن شویم مسیر درست را می‌رویم؟»

کنترل‌ها شامل:

- کنترل‌های عملیاتی (مصرف انرژی، آب، مواد، راندمان)
- کنترل‌های مدیریتی (تحلیل روند، انحراف از هدف)
- کنترل‌های رفتاری (انضباط فرایندی، نگهداشت)
- کنترل‌های مستندسازی (داده‌های قابل ممیزی)

اصل مهم: آنچه اندازه‌گیری نشود، مدیریت نمی‌شود.

۶) ارزیابی‌های مدیریتی (Management Evaluation)

پرسش مدیریتی کلیدی: «آیا اقدامات ما واقعاً مؤثر بوده‌اند؟»

سطوح ارزیابی:

- ارزیابی عملکرد. تحقق اهداف کمی
- ارزیابی. اثربخشی. کاهش واقعی شدت‌ها



- ارزیابی اقتصادی. CAPEX / OPEX بازگشت سرمایه
- ارزیابی ریسک. بازار، مقررات، تأمین انرژی

فولاد سبز موفق: کسی است که هم انتشار را کاهش دهد، هم تاب‌آوری اقتصادی را افزایش دهد.

۷) بهبود مستمر (Continuous Improvement)

چرخه با ارزیابی تمام نمی‌شود؛ بلکه:

- بازنگری اهداف
- اصلاح راهبرد
- ارتقای مهارت‌ها
- سرمایه‌گذاری هوشمندانه‌تر

این همان نقطه‌ای است که فولاد سبز از «پروژه» به سیستم پایدار مدیریتی تبدیل می‌شود.

جمع‌بندی: فولاد سبز یعنی مدیریت آگاهانه جریان مواد، انرژی و انسان؛ فناوری مهم است، اما مدیریت هوشمند و انسان‌محور تعیین‌کننده است.



چک لیست مدیریتی تولید فولاد سبز

(قابل استفاده برای خودارزیابی، ممیزی داخلی و برنامه ریزی بهبود)

۱- برنامه ریزی و هدف گذاری

آیا کارخانه می داند دقیقاً چه می خواهد؟

□ مرز سیستم تولید فولاد مشخص شده است.

(Cradle-to-Gate ذوب → نورد | یا $\rightarrow$ DRI: مثلاً)

□ خط مبنای مصرف و انتشار تعریف شده است



• انرژی ویژه (GJ/ton)

• آب ویژه (m³/ton)

• شدت کربن (tCO₂/ton steel)

□ اهداف کمی، زمان مند و قابل پایش تعیین شده اند (نه صرفاً «کاهش مصرف» به صورت کلی)

□ اهداف فولاد سبز با اهداف تولید و مالی تضاد ندارند (هم راستایی استراتژیک)

۲- راهبرد فولاد سبز

آیا مسیر رسیدن به اهداف روشن است؟

□ راهبرد فقط فناورانه نیست (ترکیبی است)

□ سهم هر یک از این محورها مشخص است:

- بهبود فرایند
- فناوری کم کربن
- تغییر رفتار و فرهنگ
- داده و پایش

□ راهبرد با شرایط بومی کارخانه (انرژی، آب، نیروی انسانی) سازگار است

□ ریسک های راهبرد (بازار، انرژی، مقررات) شناسایی شده اند



۳- توانمندسازی منابع انسانی

آیا انسان‌ها آماده اجرای فولاد سبز هستند؟

- ☐ نقش‌ها و مسئولیت‌ها در فولاد سبز مشخص است (مالک انرژی، مالک آب، مالک داده)
- ☐ مدیران ارشد آموزش مفهومی دیده‌اند (چرا فولاد سبز مهم است)
- ☐ سرپرستان و اپراتورها آموزش عملی دیده‌اند (چگونه مصرف را کاهش دهند)
- ☐ سازوکار انگیزشی وجود دارد. (صرفه‌جویی دیده و تشویق می‌شود)
- ☐ فرهنگ «کاهش اتلاف» در سازمان تقویت شده است

۴- تبیین و بازطراحی فرایندها

آیا فرایندها برای سبز شدن طراحی شده‌اند؟

- ☐ نقشه فرایندهای اصلی تولید ترسیم شده است
- ☐ نقاط اتلاف انرژی، آب و مواد شناسایی شده‌اند
- ☐ KPI سبز برای هر فرایند تعریف شده است (نه فقط KPI تولید)
- ☐ محیط‌زیست در کنار تولید و نگهداشت دیده می‌شود (نه واحدی جداگانه)

۵- کنترل‌ها و پایش

آیا آنچه مهم است، واقعاً کنترل می‌شود؟

- ☐ داده‌های مصرف و انتشار به‌صورت منظم جمع‌آوری می‌شوند
- ☐ پایش‌ها قابل اتکا و قابل ممیزی هستند
- ☐ داشبورد مدیریتی وجود دارد (روند، انحراف، مقایسه با هدف)
- ☐ کنترل‌ها فقط فنی نیستند. (کنترل رفتاری و انضباط فرایندی هم هست)
- ☐ مستندسازی مناسب انجام می‌شود

۶- ارزیابی مدیریتی

آیا مدیریت می‌داند فولاد سبز چقدر موفق بوده است؟

- ☐ تحقق اهداف کمی بررسی می‌شود



- ☐ کاهش واقعی شدت مصرف و انتشار سنجیده می شود
- ☐ هزینه ها و منافع اقتصادی تحلیل می شوند. (/ OPEX / CAPEX صرفه جویی)
- ☐ ریسک ها بازنگری می شوند. (قیمت انرژی، صادرات، مقررات)
- ☐ نتایج به مدیریت ارشد گزارش می شود

۷- بهبود مستمر

آیا فولاد سبز یک پروژه است یا یک سیستم زنده؟

- ☐ نتایج ارزیابی منجر به اقدام اصلاحی می شود
- ☐ اهداف و راهبردها به روز می شوند
- ☐ آموزش ها تکرار و تکمیل می شوند
- ☐ پروژه های کوچک اما پیوسته تعریف می شوند
- ☐ یادگیری سازمانی شکل گرفته است



مطالعه موردی فرضی

استقرار نظام مدیریتی فولاد سبز در یک کارخانه فولاد ایران

(تحلیل «قبل» و «بعد» از استقرار)

۱- معرفی کارخانه (سناریوی فرضی)

نام فرضی: شرکت فولاد آریا

ظرفیت: 1.2 میلیون تن فولاد خام در سال

فناوری: احیای مستقیم گازمحور + (DRI) کوره قوس الکتریکی (EAF)

موقعیت: منطقه مرکزی ایران (تنش آبی متوسط، گاز در دسترس)

بازار هدف: داخل + صادرات منطقه‌ای



۲- وضعیت «قبل» از استقرار فولاد سبز

❖ رویکرد مدیریتی قبل

- تمرکز اصلی: افزایش تولید
- محیط زیست: واحد جانبی، گزارش محور
- انرژی و آب: «هزینه ثابت و اجتناب ناپذیر»
- تصمیم‌گیری: تجربه محور، داده ناقص

❖ شاخص‌های عملکرد (Baseline)

شاخص	وضعیت قبل
شدت انرژی	22 GJ / ton steel
شدت مصرف آب	4.2 m ³ / ton
شدت کربن	1.9 tCO ₂ / ton
نرخ توقفات انرژی محور	بالا
آمادگی صادرات سبز	پایین
مشارکت کارکنان	محدود

مسائل کلیدی

- ❖ اتلاف انرژی در DRI و EAF
- ❖ مصرف آب بدون بازیافت مؤثر
- ❖ داده‌ها پراکنده و غیرقابل ممیزی
- ❖ مقاومت انسانی در برابر تغییر

۳- تصمیم مدیریتی برای ورود به فولاد سبز

محرك‌ها:

- ❖ ریسک صادرات در آینده (CBAM و مشتریان خارجی)
- ❖ افزایش هزینه انرژی
- ❖ فشار اجتماعی و زیست‌محیطی
- ❖ کاهش بهره‌وری پنهان

تصمیم: «فولاد سبز را نه به‌عنوان پروژه، بلکه به‌عنوان نظام مدیریتی پیاده‌سازی کنیم.»

۴- اقدامات کلیدی استقرار فولاد سبز

گام ۱: برنامه‌ریزی و هدف‌گذاری

- تعریف مرز سیستم: $EAF \rightarrow DRI$ ریخته‌گری
- تعیین خط مبنا (انرژی، آب، کربن)
- اهداف ۳ ساله:

○ 20% ▼ کاهش شدت انرژی

○ 25% ▼ کاهش مصرف آب

○ 18% ▼ کاهش شدت کربن



گام ۲: راهبرد ترکیبی

- ❖ فرایندی: کاهش تلفات حرارتی
- ❖ فناوریانه: بهینه‌سازی مشعل‌ها، بازیافت حرارت
- ❖ انسانی: آموزش اپراتورها و سرپرستان
- ❖ داده‌ای: استقرار پایش مستمر مصرف

گام ۳: توانمندسازی منابع انسانی

- ❖ آموزش مدیران: «اقتصاد فولاد سبز»
- ❖ آموزش اپراتورها: «رفتار مصرف انرژی»
- ❖ تعریف مالک انرژی و آب در هر واحد
- ❖ پیوند صرفه‌جویی با ارزیابی عملکرد

گام ۴: بازطراحی فرایندها

- ❖ نقشه‌برداری مصرف انرژی و آب
- ❖ شناسایی نقاط اتلاف
- ❖ تعریف KPI سبز برای هر واحد
- ❖ ادغام محیط‌زیست با تولید و نگهداشت

گام ۵: کنترل و پایش

- داشبورد مدیریتی انرژی و آب
- تحلیل انحراف از هدف
- مستندسازی داده‌ها (قابل ممیزی)
- پایش رفتار عملیاتی



۵- وضعیت «بعد» از استقرار فولاد سبز

شاخص‌های عملکرد جدید

شاخص	قبل	بعد	بهبود
شدت انرژی	22	17.5 GJ/ton	▼ 20%
شدت آب	4.2	3.1 m ³ /ton	▼ 26%
شدت کربن	1.9	1.55 tCO ₂ /ton	▼ 18%
توقفات	بالا	کاهش یافته	↓
آمادگی صادرات	پایین	بالا	↑
مشارکت کارکنان	کم	بالا	↑

۶- دستاوردهای مدیریتی (فراتر از عدد)

زیست‌محیطی

- کاهش واقعی مصرف منابع
- بهبود تصویر اجتماعی کارخانه

اقتصادی

- کاهش OPEX انرژی و آب
- افزایش تاب‌آوری در برابر مقررات آینده
- آمادگی برای بازارهای صادراتی سبز

انسانی و سازمانی

- افزایش مسئولیت‌پذیری
- بهبود فرهنگ بهره‌وری
- تصمیم‌گیری داده‌محور

۷- درس‌های کلیدی

پیام‌های آموزشی:

۱. فولاد سبز بدون انسان توانمند شکست می‌خورد
۲. داده، زبان مشترک مدیر، محیط‌زیست و بازار است
۳. بهبودهای کوچک پیوسته، اثر بزرگ می‌سازند
۴. فولاد سبز یک سفر مدیریتی است، نه یک پروژه فنی



اقدامات فنی و مهندسی لازم در خط تولید فولاد سبز

(از سنگ آهن تا شمش - نگاه مهندسی عملیاتی)

۱- مهندسی ورودی مواد اولیه (Material Engineering)

اقدامات فنی لازم:

- کنترل کیفی دقیق سنگ آهن / گندله
 - یکنواختی ترکیب شیمیایی
 - (SiO_2, Al_2O_3) کاهش ناخالصی ها
- بهینه سازی دانه بندی
 - جلوگیری از افت فشار و اتلاف انرژی در DRI
- کاهش رطوبت مواد ورودی
- پیش خشک سازی (کاهش مصرف انرژی غیرمستقیم)



اثر سبز:

- کاهش مصرف گاز
- افزایش راندمان احیا
- کاهش تولید CO_2 فرایندی

۲- مهندسی فرایند احیای مستقیم (DRI Engineering)

اقدامات کلیدی در واحد DRI:

- کنترل دقیق نسبت گاز احیاکننده
 - بهینه سازی H_2 / CO
- کاهش گازهای برگشتی (Recycle Gas Optimization)
- بازیافت حرارت گازهای خروجی
- افزایش درجه متالیزاسیون با مصرف انرژی کمتر



گام‌های فولاد سبز:

- آماده‌سازی تدریجی سیستم برای افزایش سهم هیدروژن
- طراحی مشعل‌ها و نسوزها برای شرایط دمایی جدید

اثر سبز:

- کاهش شدت انرژی
- کاهش CO_2 ناشی از احیا
- افزایش آمادگی برای $\text{H}_2\text{-DRI}$

۳- مهندسی مصرف انرژی (Energy Engineering)

اقدامات فنی:

- آنالیز جریان انرژی (Energy Flow Analysis)

- نصب کنتورهای دقیق و تفکیکی
- بازیافت حرارت:

- گازهای داغ DRI
- دود کوره قوس

- بهینه‌سازی بار الکتریکی EAF

- کاهش پیک مصرف
- بهبود Power Factor

اثر سبز:

- کاهش مصرف انرژی ویژه (GJ/ton)
- کاهش هزینه OPEX
- کاهش فشار شبکه برق



۴- مهندسی کوره قوس الکتریکی (EAF Engineering)

اقدامات مهندسی ضروری:

- کنترل دقیق ترکیب شارژ
 - DRI + Scrap
- بهینه‌سازی زمان ذوب
- استفاده بهینه از اکسیژن
- کاهش تلفات حرارتی نسوزها
- کنترل سرباره برای کاهش مصرف انرژی

نگاه سبز:

- افزایش سهم Scrap = کاهش کربن
- کاهش = Overheating = کاهش انرژی

اثر سبز:

- کاهش شدت کربن
- افزایش عمر تجهیزات
- کاهش توقفات

۵- مهندسی آب و خنک‌کاری (Water Engineering)

اقدامات فنی:

- طراحی سیستم‌های مدار بسته
- بازیافت آب خنک‌کاری
- کاهش Blowdown
- پایش کیفیت آب برای جلوگیری از خوردگی و رسوب

شرط ایران:

- آب = محدودیت راهبردی
- هر m^3 صرفه‌جویی = مزیت رقابتی



اثر سبز:

- کاهش شدت مصرف آب
- افزایش تاب آوری زیست محیطی

۶- مهندسی نگهداشت و قابلیت اطمینان (Maintenance Engineering)

اقدامات فنی:

- نگهداشت پیشگیرانه و پیش بینانه
- پایش وضعیت تجهیزات پرمصرف
- کاهش نشتی ها (گاز، هوا، آب)
- افزایش عمر نسوزها

نکته مهم: بسیاری از اتلاف های انرژی، نه به طراحی بد، بلکه به نگهداشت ضعیف مربوط اند.

اثر سبز:

- کاهش مصرف منابع
- افزایش پایداری تولید

۷- مهندسی داده و پایش (Digital & Data Engineering)

اقدامات فنی:

- جمع آوری داده های واقعی خط تولید
- تحلیل روند مصرف
- تشخیص انحراف از حالت بهینه
- مستندسازی قابل ممیزی

اثر سبز:

- تصمیم گیری دقیق
- اثبات کاهش انتشار
- آمادگی گزارش دهی



۸- مهندسی ایمنی و محیط زیست یکپارچه

اقدامات:

- کنترل آلاینده های هوا (غبار،) Nox
- مدیریت سرباره و پسماند
- هم راستایی ایمنی، تولید و محیط زیست

فولاد سبز: ایمنی، بهره وری و محیط زیست را با هم می بیند.

جمع بندی مهندسی

فولاد سبز در خط تولید یعنی:

- انرژی کمتر
- اتلاف کمتر
- داده بیشتر
- انسان آگاه تر

نه الزاماً تجهیزات گران تر.



چک لیست مهندسی فولاد سبز

واحد احیای مستقیم (DRI) و کوره قوس الکتریکی (EAF)

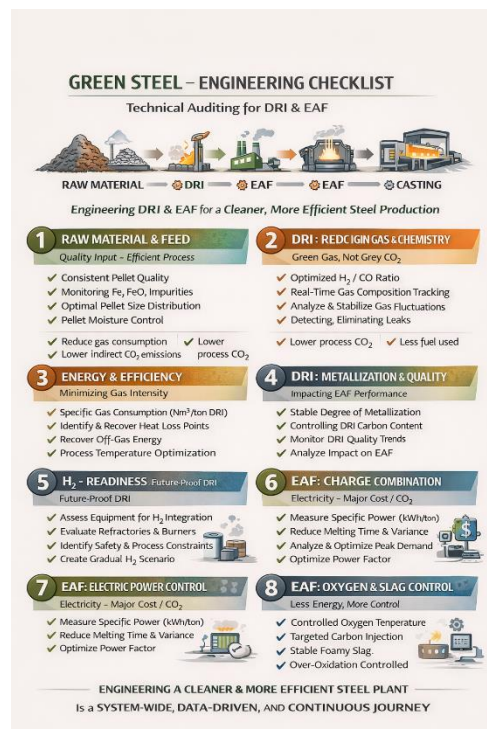
بخش اول: چک لیست مهندسی واحد احیای مستقیم (DRI)

۱- مواد اولیه و خوراک

- ☐ کیفیت گندله پایدار و یکنواخت است.
- ☐ FeO، Fe، و ناخالصی‌ها پایش می‌شوند
- ☐ دانه‌بندی مناسب برای کاهش افت فشار رعایت شده.
- ☐ رطوبت گندله کنترل و حداقل شده است
- اثر سبز: کاهش مصرف گاز، افزایش راندمان احیا

۲- گاز احیاکننده و ترکیب شیمیایی

- ☐ نسبت H_2/CO بهینه‌سازی شده است
- ☐ ترکیب گاز به‌صورت آنلاین پایش می‌شود
- ☐ آنوسانات ترکیب گاز ثبت و تحلیل می‌شوند
- ☐ ناشی‌های گاز شناسایی و حذف شده‌اند
- اثر سبز: کاهش CO_2 فرایندی، کاهش مصرف سوخت



۳- مصرف انرژی و راندمان حرارتی

- ☐ مصرف گاز ویژه ($Nm^3/ton\ DRI$) مشخص است
- ☐ نقاط اتلاف حرارتی شناسایی شده‌اند
- ☐ باز یافت حرارت گازهای خروجی انجام می‌شود
- ☐ دمای فرایند در محدوده بهینه نگه داشته می‌شود
- اثر سبز: کاهش شدت انرژی (GJ/ton)

۴- متالیزاسیون و کیفیت DRI

- ☐ درجه متالیزاسیون پایدار است
 - ☐ کربن DRI کنترل می شود
 - ☐ نوسانات کیفیت DRI ثبت می شوند
 - ☐ اثر کیفیت DRI بر EAF تحلیل شده است
- اثر سبز: کاهش انرژی مصرفی در EAF

۵- آمادگی برای هیدروژن (H₂-Readiness)

- ☐ تجهیزات برای افزایش سهم H₂ بررسی شده اند
 - ☐ نسوزها و مشعل ها ارزیابی شده اند
 - ☐ محدودیت های ایمنی شناسایی شده اند
 - ☐ سناریوی تدریجی افزایش H₂ تعریف شده است
- اثر سبز: آمادگی آینده بدون شوک سرمایه ای

بخش دوم: چک لیست مهندسی کوره قوس الکتریکی (EAF)

۶- ترکیب شارژ و مواد ورودی

- ☐ نسبت Scrap / DRI بهینه شده است
 - ☐ کیفیت Scrap پایدار است
 - ☐ شارژ یکنواخت و برنامه ریزی شده انجام می شود
 - ☐ اثر ترکیب شارژ بر انرژی پایش می شود
- اثر سبز: کاهش مصرف برق و کربن



۷- مصرف برق و بهره‌وری الکتریکی

- ☐ مصرف برق ویژه (kWh/ton) اندازه‌گیری می‌شود
- ☐ پیک مصرف و نوسانات تحلیل می‌شوند.
- ☐ Power Factor بهینه‌سازی شده است
- ☐ زمان ذوب کاهش یافته است
- اثر سبز: کاهش شدت انرژی و فشار شبکه

۸- اکسیژن، تزریق و سرباره

- ☐ مصرف اکسیژن کنترل شده و بهینه است
- ☐ تزریق کربن هدفمند انجام می‌شود
- ☐ سرباره کف‌ساز پایدار است.

☐ Over-oxidation کنترل می‌شود

اثر سبز: کاهش مصرف انرژی و الکترو

۹- نسوزها و تلفات حرارتی

- ☐ وضعیت نسوزها پایش می‌شود
- ☐ نقاط داغ و تلفات شناسایی شده‌اند
- ☐ عمر نسوزها تحلیل و بهبود یافته است
- ☐ توقفات ناشی از نسوز کاهش یافته‌اند
- اثر سبز: کاهش اتلاف انرژی، افزایش پایداری

۱۰- گازهای خروجی و بازیافت انرژی

- ☐ دمای گازهای خروجی پایش می‌شود
- ☐ امکان بازیافت حرارت بررسی شده است
- ☐ غبارگیری مؤثر انجام می‌شود
- ☐ انتشار آلاینده‌ها کنترل می‌شود

اثر سبز: کاهش آلودگی و بازیابی انرژی



بخش مشترک (DRI + EAF سیستمی)

نگهداشت و قابلیت اطمینان

- ☐ برنامه PM و PdM اجرا می شود
- ☐ تجهیزات پرمصرف پایش وضعیت دارند
- ☐ ناشتی های انرژی و آب کنترل می شوند
- ☐ توقفات غیرضروری کاهش یافته اند

داده، پایش و مستندسازی

- ☐ داده ها واقعی و تفکیک شده هستند
- ☐ داشبورد انرژی و کربن وجود دارد
- ☐ انحراف از شرایط بهینه تحلیل می شود
- ☐ داده ها قابل ممیزی هستند

نحوه امتیازدهی

برای هر بند امتیاز دهید:

۰ = وجود ندارد | ۱ = ضعیف | ۲ = متوسط | ۳ = خوب | ۴ = عالی

خروجی:

- نقشه نقاط اتلاف
- اولویت پروژه های بهبود
- پایه فنی فولاد سبز کارخانه

پیام کلیدی. فولاد سبز در خط تولید یعنی مهندسی دقیق، پایش مداوم، و تصمیم مبتنی بر داده؛ نه الزاماً تجهیزات جدید.



محاسبه "یک نمونه"

برای یک خط گاز محور **DRI + EAF** «به‌ازای هر تن فولاد» و «سالانه»^۲

تعریف سناریو (خط واقعی متداول در ایران)

مسیر تولید : **EAF + (گاز طبیعی) DRI**

محصول : **(Crude steel) فولاد خام**

داده‌های پایه — **(Baseline)** نمونه

- مصرف گاز در **DRI: 10.4 GJ / ton DRI** (عدد متداول گزارش شده) blog.cabaro-group.com+1
- مصرف برق در **EAF: 450 kWh / ton steel** (در بازه‌های رایج ۳۰۰-۵۰۰) nemag.com+1
- نسبت مصرف DRI به فولاد: **1.05 ton DRI / ton steel** فرض مهندسی برای تلفات و بازده؛ در کارخانه واقعی از بالانس جرم می‌آید

ضرایب انتشار — **(Emission Factors)** نمونه

- گاز طبیعی: **56.1 kgCO₂ / GJ** ضریب پیش‌فرض IPCC که در مراجع صنعتی هم به آن ارجاع می‌شود cement-co2-protocol.org+1
- برق شبکه ایران (نمونه): **0.7033 kgCO₂e / kWh** عامل انتشار نمونه برای ایران در دیتاست GHG Protocol/Climatiq؛ سال ۲۰۱۶ (Climatiq)

اقدامات بهبود (Before → After)

بهبودهای مهندسی در **DRI** (نمونه)

- بازیافت حرارت/بهینه‌سازی مشعل‌ها/کاهش ناشی و بهبود کنترل فرایند
- نتیجه: کاهش مصرف گاز از **(9.6 GJ/ton DRI → 10.4 کاهش ۰.۸ GJ/ton DRI)**

بهبودهای مهندسی در **EAF** (نمونه)

- بهینه‌سازی کنترل قوس، بهبود سرباره کف‌ساز، کاهش زمان ذوب، پیش‌گرم شارژ/اسکراپ (در حد عملیاتی)
- نتیجه: کاهش برق از **(400 kWh/ton steel → 450 کاهش ۵۰ kWh/ton)**

۳- محاسبه قدم‌به‌قدم (به‌ازای ۱ تن فولاد)

۳-۱ صرفه‌جویی انرژی و **CO₂** در **DRI**

صرفه‌جویی گاز به‌ازای ۱ تن فولاد:

^۲ نکته مهم: اعداد «نمونه» هستند و برای خط واقعی شما باید با داده‌های کنتور/داده فرایندی جایگزین شوند. اما روش محاسبه دقیقاً همان است.



$$\text{GJ/ton DRI} \times 1.05 \text{ ton DRI/ton steel} = 0.84 \text{ GJ / ton steel}$$

گاز = ۰.۸ صرفه جویی

کاهش CO₂ از گاز:

$$0.84 \text{ GJ} \times 56.1 \text{ kgCO}_2/\text{GJ} = 47.1 \text{ kgCO}_2 / \text{ton steel}$$

cement-co2-protocol.org+1

۲-۳ صرفه جویی انرژی و CO₂ در EAF

صرفه جویی برق:

$$50 \text{ kWh / ton steel}$$

کاهش CO₂ از برق:

$$50 \text{ kWh} \times 0.7033 \text{ kgCO}_2\text{e/kWh} = 35.2 \text{ kgCO}_2\text{e / ton steel}$$

Climatig

۳-۳ جمع بندی کاهش ها (در هر تن فولاد)

کاهش CO₂ کل:

$$47.1 + 35.2 = 82.3 \text{ kgCO}_2\text{e / ton steel} = 0.082 \text{ tCO}_2\text{e / ton steel}$$

صرفه جویی انرژی کل:

$$\text{GJ} \cdot 0.84$$

صرفه جویی گاز:

$$\text{GJ: } 50 \text{ kWh} \times 0.0036 = 0.18 \text{ GJ}$$

تبدیل برق به GJ:

$$1.02 \text{ GJ / ton steel}$$

جمع:

۴- مقیاس کردن سالانه (مثال کارخانه ۱.۲ میلیون تن/سال)

اگر تولید سالانه 1.2 Mt steel/year = باشد:

$$82.3 \text{ kgCO}_2\text{e / ton steel} \times 1.2 \times 10^6 = 98,760 \text{ tCO}_2\text{e / year}$$

(هزار تن 99 حدود)

۵- قالب آماده برای «خط واقعی» (فقط عددها را جایگزین گردد)

ورودی های لازم از کارخانه

۱. مصرف گاز (GJ/ton DRI) قبل/بعد

۲. مصرف برق (kWh/ton steel) EAF قبل/بعد



۳. نسبت DRI به فولاد (ton DRI/ton steel)

۴. عامل انتشار برق (kgCO₂/kWh) و گاز (kgCO₂/GJ)

فرمول‌ها

- $\Delta \text{Gas_per_steel} = (\text{Gas_before} - \text{Gas_after}) \times (\text{DRI/steel})$
- $\Delta \text{CO}_2\text{_gas} = \Delta \text{Gas_per_steel} \times \text{EF_gas}$
- $\Delta \text{CO}_2\text{_elec} = (\text{kWh_before} - \text{kWh_after}) \times \text{EF_elec}$
- $\Delta \text{CO}_2\text{_total} = \Delta \text{CO}_2\text{_gas} + \Delta \text{CO}_2\text{_elec}$



طرحنامه نسل چهارم
دانش مدیریت و مهندسی سبز
"تولید فولاد سبز"



معرفی نسل چهارم از دانش مدیریت و مهندسی سبز

پاسخ به چالش‌های سه‌گانه صنعت‌های استراتژیک با رویکرد آینده‌ساز

در دهه‌های اخیر، صنایع بزرگی مانند فولاد به‌رغم نقش کلیدی خود در رشد اقتصادی، با سه چالش بنیادین و هم‌افزا مواجه شده‌اند که استمرار مسیر فعلی را پرهزینه، پرریسک و در مواردی ناپایدار کرده است. این سه چالش عبارتند از:

۱. چالش‌های اقتصادی (افزایش هزینه منابع، محدودیت‌های صادراتی، فشار سرمایه‌گذاران)
۲. چالش‌های اجتماعی (نارضایتی محلی، ضعف در مسئولیت‌پذیری اجتماعی، فرهنگ سازمانی ناکارآمد)
۳. چالش‌های زیست‌محیطی (انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی منابع، فشارهای قانونی و اقلیمی)

نسل چهارم از دانش مدیریت و مهندسی سبز، پاسخی نظام‌مند، داده‌محور و بین‌رشته‌ای به این چالش‌هاست. این نسل، نه تنها یک چارچوب مفهومی، بلکه یک سامانه اجرایی برای تحول پایدار در صنایع بزرگ است و شامل سه محور عملیاتی کلیدی زیر می‌شود:

۱- تحلیل جریان حرکت و مصرف منابع

این محور با استفاده از ابزارهایی چون LCA (ارزیابی چرخه عمر) و متدولوژی‌های مهندسی سیستم، به شناسایی نشت منابع، تلفات انرژی، ناکارآمدی در حلقه‌های تأمین و مصرف می‌پردازد. هدف اصلی، افزایش بهره‌وری هم‌زمان با کاهش مصرف در منابع استراتژیک مانند آب، انرژی و مواد اولیه.

۲- محاسبه و کاهش ردپای زیست‌محیطی (کربن، آب، پسماند)

در این رویکرد، با محاسبه دقیق ردپای کربن (Carbon Footprint) و ردپای آب (Water Footprint) محصولات و فرآیندها، امکان تصمیم‌سازی بر مبنای داده و شفافیت در انطباق با الزامات داخلی و بین‌المللی (مانند EPD، مرز کربنی اتحادیه اروپا، ISO 14067) فراهم می‌شود.

۳- یکپارچه‌سازی منافع اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی

در نسل چهارم، برخلاف رویکردهای قدیمی، کاهش آلودگی و هزینه نه در تضاد، بلکه در هم‌افزایی قرار دارند. با تغییر زاویه نگاه از کنترل صرف به "بهینه‌سازی سیستمی"، امکان خلق مزیت رقابتی بر مبنای کیفیت + اقتصاد + محیط‌زیست فراهم می‌شود.

نسل چهارم دانش سبز: از الزامات تا مزیت رقابتی

در شرایطی که فولاد ساز نیز همچون بسیاری از صنایع بزرگ در معرض فشارهای مالی، الزامات محیط‌زیستی، تقاضای بازارهای صادراتی، و نیاز به نوسازی فرهنگ سازمانی قرار دارد، ورود به نسل چهارم دانش سبز یک انتخاب اختیاری نیست؛ بلکه یک ضرورت راهبردی برای حفظ بقا و ساخت آینده است.



پیاده‌سازی این رویکرد می‌تواند فولاد ساز را در مسیرهای زیر توانمند سازد:

- کاهش هزینه‌های عملیاتی و انرژی
- افزایش شفافیت عملکرد برای بازارهای صادراتی
- ارتقای برند و مسئولیت‌پذیری اجتماعی
- جذب سرمایه و همراهی با شبکه‌های بین‌المللی توسعه پایدار
- آماده‌سازی برای تحولات فناورانه و زیست‌محیطی پیش رو

ضرورت همگرایی اقتصاد، محیط‌زیست و کیفیت در صنعت فولاد

از مسیر تحلیل جریان حرکت و مصرف منابع – با هدف عبور از چالش‌های چندوجهی

برخلاف دیدگاه‌های سنتی که میان سه حوزه‌ی عملکرد اقتصادی، کیفیت محصول و الزامات زیست‌محیطی تضاد قائل می‌شوند، تجربه صنایع پیشرو و مطالعات روز دنیا نشان می‌دهد که این سه محور نه متضاد، بلکه بشدت وابسته و هم‌افزا هستند. نقطه‌ی تلاقی این سه حوزه، چیزی نیست جز:

تحلیل جریان حرکت و مصرف منابع در زنجیره تولید

در صنعت فولاد – به‌ویژه در مقیاس عملیاتی فولاد ساز – هر واحد از منابع مصرفی (اعم از انرژی، آب، آلیاژ، نسوز، افزودنی یا حتی زمان منابع انسانی) اثر سه‌گانه دارد:

۱. هزینه اقتصادی (تأثیر مستقیم بر بهای تمام‌شده محصول)
۲. کیفیت محصول نهایی (تکرارپذیری خواص مکانیکی، پایداری فرآیند، کاهش نوسان‌های کیفی)
۳. پیامد زیست‌محیطی (میزان گازهای گلخانه‌ای، پسماند جامد، پساب و گرد و غبار صنعتی)

برای مثال، ناکارآمدی در مصرف انرژی نه تنها هزینه تولید را بالا می‌برد، بلکه موجب ناپایداری در فرآیند حرارتی نورد و ذوب شده و در نهایت باعث کاهش کیفیت ورق‌های خروجی می‌گردد. در عین حال، این وضعیت به افزایش ردپای کربن و فشارهای قانونی داخلی و بین‌المللی نیز دامن می‌زند. بنابراین، بهینه‌سازی مصرف منابع، راهبردی است که به‌طور هم‌زمان موجب بهبود کیفیت، افزایش سودآوری و کاهش اثرات زیست‌محیطی خواهد شد. این هم‌افزایی، اساس رویکرد نسل چهارم از دانش مدیریت و مهندسی سبز را شکل می‌دهد. در این نسل، مصرف منابع به‌عنوان زبان مشترک اقتصاد، کیفیت و محیط‌زیست شناخته می‌شود.

این رویکرد در صنعت فولاد چگونه قابل پیاده‌سازی است؟

- طراحی چرخه‌های تولید با حداقل مصرف انرژی و کاهش تلفات حرارتی
- مدیریت آب صنعتی با رویکرد بازچرخانی و کاهش هزینه‌های تصفیه
- ارزیابی چرخه عمر محصول (LCA) برای ارتقاء فرمولاسیون و کاهش آلودگی
- جایگزینی مواد مصرفی با نمونه‌های ایمن‌تر، کارا تر یا کم‌خطرتر
- توانمندسازی مهندسان تولید و پرسنل بهره‌برداری برای شناسایی گلوگاه‌های مصرف منابع در خطوط نورد، احیا و فولادسازی



در چنین الگویی، شرکت‌هایی مانند فولاد ساز می‌توانند با اتکا بر نگاه یکپارچه به تحلیل جریان منابع، مسیر نوینی برای تحول در بهره‌وری، کاهش هزینه، و ارتقای عملکرد محیط‌زیستی در کل زنجیره ارزش خود ترسیم کنند — مسیری که از آن، «فولاد سبز» متولد می‌شود.

چهار نسل دانش مدیریت و مهندسی سبز؛ از تقابل تا هم‌افزایی

در طول دهه‌های گذشته، رویکردهای مرتبط با مدیریت زیست‌محیطی و توسعه پایدار در صنایع، از جمله صنعت فولاد، تکامل مفهومی و عملیاتی قابل توجهی داشته‌اند این تحولات را می‌توان در قالب چهار نسل از دانش مدیریت و مهندسی سبز دسته‌بندی کرد هر نسل، بازتابی از درک عمیق‌تر نسبت به ارتباط میان صنعت، جامعه و محیط‌زیست است:

نسل اول: حفاظت‌محور (Environmentalism Stage)

رویکرد: محیط‌زیست به‌عنوان ارزش مستقل، در تقابل با توسعه صنعتی
تمرکز: توقف یا کاهش آسیب به طبیعت، حفاظت از منابع طبیعی و گونه‌های زیستی
مشکل اصلی: غفلت از نیازهای اقتصادی، توسعه و رقابت صنعتی
نتیجه: صنعت به عنوان تهدیدی برای محیط‌زیست تلقی شد؛ تعامل کم با بخش تولید

نسل دوم: صنعت سبز (Clean End-of-Pipe Stage)

رویکرد: تمرکز بر کنترل خروجی آلودگی در انتهای فرایند
تمرکز: نصب فیلتر، تصفیه‌خانه، بازیافت ضایعات، کاهش آلودگی پس از تولید
مشکل اصلی: واکنشی بودن؛ ناتوانی در پیشگیری ساختاری، پرهزینه و جزیره‌ای
نتیجه: کاهش نسبی آلودگی اما بدون تغییر در منطق مصرف منابع یا طراحی سیستم‌ها

نسل سوم: فناوری و محصول سبز (Eco-Design & Innovation Stage)

رویکرد: ارتقاء کیفیت و پاکی محصول از طریق نوآوری
تمرکز: تولید محصولات پاک‌تر، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، طراحی اکولوژیک
مشکل اصلی: نگاه فناوری‌محور، بدون توجه کافی به فرایندها و نقش منابع انسانی و پیامدهای فناوری در چرخه عمرشان
نتیجه: نوآوری فنی بدون تغییر رفتار سازمانی و مشارکت ساختاری منابع انسانی

نسل چهارم: رویکرد هوش سبز (Integrated Human-Centered Green Management or Green Intelligence)

رویکرد: هم‌افزایی اقتصاد، محیط‌زیست و کیفیت از طریق بازطراحی فرایندها و توانمندسازی منابع انسانی
تمرکز: تحلیل مصرف منابع، بهینه‌سازی فرایندها، آموزش و مشارکت منابع انسانی، مدل‌سازی سیستماتیک



ویژگی متمایز:

- انسان به عنوان عامل تغییر، نه صرفاً اجراکننده
- فرایند به عنوان نقطه مداخله، نه فقط تجهیزات
- تصمیم‌گیری بر اساس داده و تحلیل، نه صرفاً الزامات قانونی

نتیجه: ایجاد سازمان‌هایی با مزیت رقابتی پایدار، انعطاف‌پذیر در برابر ریسک‌ها، همسو با استانداردهای بین‌المللی و مطلوب برای سرمایه‌گذاران و بازارهای هدف

امروز صنعت فولاد نیازمند عبور از نگاه فنی صرف و ورود به مدیریت جامع منابع با محوریت سرمایه انسانی است تنها نسل چهارم می‌تواند به چالش‌های سه‌گانه‌ی اقتصاد، کیفیت و محیط‌زیست پاسخ واقعی و پایدار بدهد

مزیت‌های نسل چهارم دانش سبز برای صنعت فولاد

از تطبیق با قوانین تا رهبری در پایداری

نسل چهارم از دانش مدیریت و مهندسی سبز، برخلاف رویکردهای سنتی که غالباً فناوری محور، قانون‌مدار یا واکنشی بودند، یک رویکرد سیستمی، داده‌محور و آینده‌نگر است. در این نسل، پایداری به عنوان هسته‌ی عملکرد سازمان تعریف می‌شود و ابزارهای تحلیل سیستمی، تحول فرهنگی، و بهینه‌سازی منابع به صورت هم‌زمان در طراحی و اجرای استراتژی‌ها به کار گرفته می‌شوند.

برای شرکت فولاد ساز که در سطح ملی و بین‌المللی به عنوان پیشران صنعت فولاد شناخته می‌شود، پیاده‌سازی نسل چهارم می‌تواند مزیت‌های چندلایه و راهبردی به همراه داشته باشد:

کاهش هزینه‌های عملیاتی با مدیریت دقیق منابع

- تحلیل داده‌محور جریان مصرف آب، انرژی، آلیاژ، نسوز و نیروی انسانی
- کاهش نیاز به سرمایه‌گذاری‌های پرهزینه در کنترل آلاینده‌ها در انتهای خط
- پیشگیری از هزینه‌های ناشی از توقف خط، اتلاف مواد، و ریسک‌های زیست‌محیطی

افزایش پایداری و بهره‌وری در تولید فولاد

- تثبیت کیفیت محصول نهایی از طریق طراحی فرآیندهای منابع‌محور
- کاهش نوسانات عملیاتی در خطوط نورد، احیا، ذوب و ریخته‌گری
- امکان اجرای پروژه‌های بهبود با بازگشت سرمایه واقعی، مستند و قابل سنجش

پاسخ فعال به الزامات داخلی و بین‌المللی محیط‌زیست

- آمادگی برای پذیرش استانداردهایی نظیر ISO 14067، EPD و مرزهای کربنی اتحادیه اروپا
- انطباق با سیاست‌های ملی توسعه پایدار، نظیر اسناد پایداری وزارت صمت و محیط‌زیست
- کاهش ریسک‌های حقوقی و اجتماعی در تعامل با جوامع محلی، نهادهای نظارتی و بازارهای صادراتی



افزایش اعتبار برند و جذب سرمایه‌گذاری مسئولانه

- ارتقاء برند فولاد ساز به عنوان الگوی "فولاد سبز ملی"
- جذابیت برای نهادهای مالی، بیمه‌ای و سرمایه‌گذاران دارای معیارهای ESG
- خلق تصویر یک سازمان پیشرو و مسئول در قبال توسعه پایدار صنعتی ایران

توانمندسازی سرمایه انسانی برای آینده صنعت فولاد

- تقویت فرهنگ مشارکت زیست‌محیطی در سطوح مدیریتی و عملیاتی
- شناسایی، پرورش و بهره‌برداری از شایستگی‌های منابع انسانی سبز
- معنادار شدن نقش کارکنان در آینده سازمان و ارتقاء رضایت و تعلق سازمانی

این مجموعه مزیت‌ها، می‌تواند فولاد ساز را از سطح «تطبیق با الزامات محیط‌زیستی» به سطح «رهبری در پایداری صنعتی کشور» ارتقا دهد — جایگاهی که در آن، پایداری نه هزینه، بلکه منبع خلق ارزش خواهد بود.

تمایز کیفیت‌گرایی کلاسیک و رویکرد سبز در صنعت فولاد

کیفیت کافی نیست؛ پایداری شرط بقاست

در شرکت‌هایی چون فولاد ساز که کیفیت، دقت و انطباق فنی همواره اصول بنیادین تولید بوده‌اند، پرداختن به کیفیت‌گرایی کلاسیک امری پذیرفته‌شده است. با این حال، در دوران جدیدی که الزامات توسعه پایدار، فشارهای اقلیمی، و مسئولیت‌های اجتماعی به چالش‌های اجتناب‌ناپذیر صنعت تبدیل شده‌اند، ضروری است میان دو رویکرد زیر تفاوت قائل شویم:

کیفیت‌گرایی کلاسیک:

- تمرکز بر انطباق محصول با مشخصات فنی و عملکردی
- ابزارها: کنترل فرآیند، تست محصول، کایزن، استانداردهای ISO 9001 و SPC
- هدف: کاهش خطا، رضایت مشتری و بهبود مستمر کیفیت
- نگاه درون‌سازمانی و خطی از مواد اولیه تا محصول نهایی
- معیار موفقیت: محصول «بی‌عیب و نقص»، مشتری «راضی»

رویکرد سبز:

- تمرکز بر کاهش اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی در کل چرخه عمر محصول
- ابزارها: LCA، محاسبه ردپای کربن و آب، طراحی پایدار، آموزش سبز
- هدف: پایداری منابع، کاهش هزینه‌های پنهان، حفظ عدالت بین‌نسلی
- نگاه چرخه‌ای و فراسازمانی: از استخراج مواد اولیه تا بازیافت و دفع
- معیار موفقیت: محصول «پایدار»، جامعه و محیط‌زیست «سالم‌تر»



جدول مقایسه‌ای:

رویکرد سبز	کیفیت‌گرایی کلاسیک	وجه تمایز
اثرات محیط‌زیستی و اجتماعی	عملکرد و رضایت مشتری	تمرکز اصلی
بهینه‌سازی مصرف منابع در کل چرخه عمر	کاهش ضایعات در تولید	نگاه به منابع
از استخراج تا دفع و بازیافت	فرآیند تولید	دامنه ارزیابی
EPD, ISO 14067, LCA, محاسبه ردپای کربن و آب	SPC, تست محصول, ISO 9001	ابزار سنجش
درون‌گرا + برون‌گرا	درون‌گرا	جهت‌گیری سازمانی

بنابراین، اگرچه کیفیت‌گرایی بخشی جدایی‌ناپذیر از مسیر سبز است، اما رویکرد سبز افقی گسترده‌تر و آینده‌نگرتر دارد.

سازمانی مانند فولاد ساز ممکن است محصولی با مشخصات کاملاً فنی تولید کند، اما اگر آن محصول دارای ردپای کربن بالا، مصرف غیر بهینه آب یا مخاطرات اجتماعی در زنجیره تأمین باشد، از منظر توسعه پایدار دچار کاستی خواهد بود. تنها با ترکیب سه‌گانه کیفیت + اقتصاد + محیط‌زیست در چارچوب مدیریت منابع است که می‌توان به یک سازمان واقعاً پایدار و آینده‌ساز در صنعت فولاد دست یافت.

استقرار نسل چهارم دانش سبز در صنعت فولاد

بر پایه منابع انسانی، سیستم‌ها و فناوری سبز

نسل چهارم از دانش مدیریت و مهندسی سبز، تنها یک تغییر تکنولوژیک یا ابزار مدیریتی نیست، بلکه تحولی ساختاری و فرهنگ‌ساز در نحوه اندیشیدن، تصمیم‌گیری و عملکرد سازمانی است. در صنایع پیچیده و راهبردی همچون فولاد، تحقق این تحول تنها از مسیر استقرار هم‌زمان و هم‌افزای سه محور کلیدی ممکن می‌شود:

۱- منابع انسانی سبز (Green Human Capital)

منابع انسانی، نقطه آغاز و عامل پیشران در حرکت به سوی فولاد سبز است. در فولاد ساز، تغییر رفتار مصرفی، اصلاح فرآیندها و مدیریت آلودگی‌ها بدون مشارکت آگاهانه و توانمندانه منابع انسانی، ممکن نیست.

اقدامات کلیدی:

- طراحی مدل‌های توانمندسازی با رویکرد سبز
- توسعه مهارت‌های:
 - تحلیل مصرف انرژی و مواد
 - درک چرخه عمر محصول فولادی
 - انگیزش و فرهنگ مشارکت در بهبود زیست‌محیطی
- استقرار:
 - ارزیابی عملکرد سبز منابع انسانی
 - نظام انگیزشی برای کارکنان سبز
 - تربیت کارشناسان محیط‌زیست درون‌سازمانی (Green Champions)



۲- سیستم‌های سبز (Green Systems & Processes)

برای هم‌راستاسازی اهداف زیست‌محیطی، اقتصادی و عملیاتی، بازطراحی و یکپارچه‌سازی سیستم‌ها ضروری است.

اقدامات کلیدی:

- بازطراحی فرآیندهای تولیدی و پشتیبانی با هدف کاهش مصرف منابع
- استقرار سیستم‌هایی چون:
 - مدیریت انرژی (EnMS)
 - حسابداری منابع و آلاینده‌ها
 - محاسبه ردپای کربن و آب
 - LCA محور برای محصولات فولادی
 - تلفیق سیستم‌های کیفی (ISO 9001) با استانداردهای پایداری
- توسعه داشبوردهای داده‌محور برای:
 - پایش مستمر مصرف منابع
 - ارزیابی ریسک زیست‌محیطی و اقتصادی تصمیمات عملیاتی

۳- فناوری سبز (Green Technology)

فناوری‌هایی که کارایی منابع را افزایش داده، آلاینده‌ها را کاهش دهند و با اهداف پایداری هماهنگ باشند، باید محور سرمایه‌گذاری‌های آینده قرار گیرند.

اقدامات کلیدی:

- انتخاب و بومی‌سازی تجهیزاتی با کارایی بالاتر در مصرف انرژی، آب، نسوز و گازهای صنعتی
- فناوری‌هایی با قابلیت بازچرخانی، تصفیه، بازیافت یا حذف پاک
- ارزیابی فناوری‌ها با مدل چرخه عمر (LCT) و ردپای زیست‌محیطی
- پیوند فناوری سبز با فناوری اطلاعات (IoT)، هوش مصنوعی، اتوماسیون (برای خلق زیرساخت «فولاد هوشمند و پایدار»

جمع‌بندی: هم‌افزایی سه‌لایه برای تحول پایدار

ابزار اصلی	هدف نهایی	بُعد کلیدی
آموزش، ارزیابی عملکرد، مشوق‌های سبز	تغییر رفتار و انگیزش درونی	منابع انسانی سبز
استانداردها، داشبوردهای منابع و آلاینده‌ها	یکپارچه‌سازی تصمیمات و فرآیندها	سیستم‌های سبز
تجهیزات، اتوماسیون، LCA، هوش مصنوعی	کاهش مصرف و آلودگی در عملیات تولید	فناوری سبز





تنها با استقرار هم‌زمان این سه رکن می‌توان از اصلاحات سطحی عبور کرد و به سمت تحول پایدار و جایگاه رهبری در پایداری صنعتی حرکت نمود. نسل چهارم دانش سبز، با این معماری سه‌گانه، به فولاد ساز این توان را می‌دهد که میان عملکرد مالی، کیفیت محصول و پایداری محیط‌زیست، تعادل راهبردی ایجاد کرده و در رقابت جهانی، جایگاه متمایز و پیشرو خود را حفظ و تقویت کند.

برنامه زمان‌بندی یک‌ماهه برای تربیت سفیران سبز در فولاد ساز

الگوی چابک برای استقرار نسل چهارم دانش سبز در سطح نیروی انسانی عملیاتی

هفته	عنوان مرحله	اقدامات کلیدی
هفته اول	گزینش و شناسایی افراد مناسب	• تعیین معیارهای انتخاب: علاقه‌مندی به محیط‌زیست، سابقه عملیاتی، تعامل خوب با همکاران • اطلاع‌رسانی داخلی (از طریق بنر، ایمیل اداری، جلسات واحدی) • دریافت فرم ثبت‌نام و بررسی اولیه صلاحیت‌ها • تأیید فهرست منتخبین (حدود ۱۰-۱۵ نفر) • صدور معرفی‌نامه رسمی به‌عنوان «سفیر سبز منتخب»
هفته دوم	آموزش مفهومی و کاربردی سفیران سبز	• طراحی محتوای آموزشی فشرده، تصویری و مناسب محیط عملیاتی • برگزاری حداقل دو کارگاه: مدیریت مصرف انرژی، آب، مواد اولیه- مدیریت پسماند، پساب، رد پای کربن • ایجاد گروه پشتیبانی (واتس‌آپ/پلتفرم داخلی LMS) • صدور گواهی پایان دوره آموزشی • فعال‌سازی شبکه «سفیران سبز» درون‌سازمانی
هفته سوم	اقدام میدانی توسط هر سفیر سبز	• هر سفیر یک پروژه مشخص "Green Action" را انتخاب و اجرا کند نمونه اقدامات: حذف بطری پلاستیکی در بخش، پایش پسماند، اصلاح مصرف روشنایی یا هوا • مستندسازی اقدام سبز در قالب فرم یک‌صفحه‌ای • دریافت مشاوره از مسئول داخلی یا نماینده انجمن • جمع‌آوری گزارش‌های مستند و واقعی از هر نفر
هفته چهارم	ارزیابی نهایی، الگوسازی و گواهی‌نامه رسمی	• گردهمایی نهایی (ارائه شفاهی ۳-۵ دقیقه‌ای از اقدام هر سفیر) • ارزیابی عملکرد (براساس خلاقیت، مشارکت، اثربخشی) • صدور و اعطای گواهی‌نامه رسمی با عنوان «سفیر سبز نسل چهارم» از طرف ایران • تهیه عکس، گزارش نهایی و انتشار در خبرنامه داخلی یا سایت • ثبت سفیران سبز به عنوان الگوی درون‌سازمانی

مدت زمان کل اجرا: ۴ هفته (۱ ماه). قابل اجرا به صورت پایلوت در یک ناحیه یا واحد مشخص (مثلاً واحد نورد گرم)، سپس توسعه یافته به سطح سازمانی

الزامات اجرایی:

- هماهنگی بین واحدهای منابع انسانی، HSE، آموزش و روابط عمومی
- تعیین یک مربی آموزشی (داخلی یا از ایران)
- فایل‌های آموزشی دیجیتال (PDF، ویدئو، اسلاید)
- فرم ساده مستندسازی اقدامات سبز (۱ صفحه‌ای)
- قالب رسمی گواهی‌نامه قابل چاپ



نمونه عملی اجرای نسل چهارم دانش سبز در رستوران مجتمع فولاد ساز الف

موضوع: اصلاح فرایند مصرف منابع در رستوران صنعتی مجتمع

چالش اولیه:

- ✓ بالا بودن مصرف انرژی (آب گرم، برق برای سرمایش و پخت و پز)
 - ✓ تولید بالای ضایعات غذایی و پسماندهای پلاستیکی
 - ✓ هزینه بالای تأمین مواد اولیه
 - ✓ نارضایتی منابع انسانی از کیفیت غذای سرو شده
 - ✓ فقدان ارتباط میان منابع انسانی آشپزخانه و سیاست‌های پایداری سازمان
- اقدامات انجام‌شده بر اساس نسل چهارم دانش سبز:

۱- منابع انسانی سبز:

- ✓ آموزش منابع انسانی آشپزخانه درباره تأثیرات محیط‌زیستی ضایعات غذایی و مصرف انرژی
- ✓ مشارکت منابع انسانی در طراحی «دستورالعمل سبز آشپزی» (مانند استفاده از مواد اولیه فصلی و محلی، کاهش ضایعات)
- ✓ ایجاد نظام پیشنهادهای سبز و انتخاب "سفیر سبز آشپزخانه" هر ماه

۲- سیستم سبز:

- ✓ طراحی و پیاده‌سازی شاخص‌های مصرف منابع (بر حسب تعداد غذای سرو شده)
- ✓ مانیتورینگ هفتگی مصرف آب، برق، گاز و ضایعات غذایی
- ✓ تنظیم منوی هفتگی بر اساس موجودی انبار برای کاهش پرت مواد
- ✓ تعریف یک پروژه سبز برای "کاهش ۱۵٪ ضایعات غذایی طی ۳ ماه"

۳- فناوری سبز:

- ✓ جایگزینی دستگاه‌های پخت پرمصرف با تجهیزات با راندمان انرژی بالاتر
- ✓ نصب تایمرهای خودکار خاموشی تجهیزات غیرضروری
- ✓ استفاده از ظروف چندبار مصرف و حذف ظروف یکبار مصرف پلاستیکی
- ✓ راه‌اندازی سیستم خردکن پسماند و ارسال آن به واحد کمپوست مجتمع

نتایج به‌دست آمده:

- ✓ کاهش ۲۲٪ مصرف برق و ۱۸٪ مصرف آب در ۶ ماه
- ✓ کاهش ۴۰٪ پسماند غذایی و حذف کامل ظروف پلاستیکی
- ✓ بهبود رضایت منابع انسانی از کیفیت غذا و تنوع سالم
- ✓ ارتقاء در ارزیابی داخلی HSE مجتمع و کسب گواهینامه داخلی "رستوران سبز"

درس آموخته:





اجرای رویکرد نسل چهارم حتی در بخش‌هایی مانند آشپزخانه صنعتی، نیازمند فناوری گران قیمت یا طرح‌های پیچیده نیست، بلکه با اتکا به مشارکت منابع انسانی، سیستماتیک‌سازی مصرف منابع و اتخاذ راهکارهای ساده فناورانه، می‌توان به کاهش هزینه، ارتقاء کیفیت و حفاظت از محیط‌زیست به صورت هم‌زمان دست یافت

برنامه زمان‌بندی استقرار نسل چهارم دانش سبز - واحد رستوران صنعتی مجتمع

مسئول اجرا	مدت زمان	فعالیت‌های کلیدی	عنوان مرحله	فاز
		بازدید میدانی از رستوران	آماده‌سازی و تحلیل وضعیت موجود	اول

- ✓ جمع‌آوری داده‌های مصرف (آب، برق، گاز، مواد غذایی)
- ✓ بررسی نوع و حجم پسماند
- ✓ مصاحبه با پرسنل و سرآشپز | ۱ هفته | واحد + HSE پشتیبانی + مدیریت رستوران | 2 | آموزش و آگاهی‌سازی منابع انسانی
- ✓ برگزاری جلسات آموزشی در مورد اثرات محیط‌زیستی
- ✓ معرفی مفاهیم نسل چهارم دانش سبز
- ✓ انتخاب نماینده "سفیر سبز آشپزخانه" | ۱ هفته | منابع انسانی + تسهیل‌گر آموزشی انجمن | 3 | طراحی سیستم پایش و شاخص‌ها
- ✓ تعریف شاخص‌های کلیدی مصرف (KPI)
- ✓ تهیه فرم‌های ثبت داده (دستی یا نرم‌افزاری)
- ✓ ایجاد روال گزارش‌گیری هفتگی | ۱ هفته | تیم داده‌برداری + HSE دفتر فنی | 4 |
- ✓ شناسایی و اجرای اقدامات اصلاحی سریع | (Quick Wins) تعویض چراغ‌ها با LED
- ✓ تنظیم تایمر تجهیزات
- ✓ اصلاح منو برای کاهش ضایعات
- ✓ حذف ظروف یکبار مصرف | ۲ هفته | تدارکات + فنی + آشپزخانه | 5 | تعریف و اجرای پروژه‌های بهبود سبز
- ✓ پروژه "کاهش ۱۵٪ ضایعات غذایی" (Green Projects)
- ✓ پروژه "بهینه‌سازی مصرف گاز پخت‌وپز"
- ✓ پروژه "استفاده از مواد اولیه محلی" | ۲ ماه | تیم سبز + نماینده تولید + سرآشپز
- ✓ | 6 | پایش و تحلیل داده‌ها - (Monitoring & Feedback) مقایسه داده‌های قبل و بعد
- ✓ برگزاری جلسات مرور ماهانه
- ✓ اصلاح فرآیندها بر اساس داده‌ها | ماهانه (در طول پروژه) + HSE | دفتر بهره‌وری |
- ✓ | 7 | ارزیابی نهایی و صدور گواهی‌نامه داخلی رستوران سبز - خودارزیابی
- ✓ ممیزی داخلی و ارزیابی توسط انجمن
- ✓ صدور گواهی‌نامه یا تقدیرنامه | در ماه سوم |

مجموع زمان پیشنهادی: ۳ ماه

قابل تطبیق برای سایر واحدها نگهداری، تولید، HSE با افزودن فازهای تخصصی





فاز	عنوان مرحله	فعالیت‌های کلیدی	مدت زمان	مسئول اجرا
1	تحلیل منابع مصرفی و خرابی‌ها	بررسی داده‌های انرژی مصرفی تجهیزات، تعداد خرابی‌ها، تکرار تعمیرات	1 هفته	دفتر فنی + تعمیرات
2	آموزش تعمیرات سبز	آموزش مفاهیم "Green Maintenance"، پیشگیرانه و پایش وضعیت	1 هفته	آموزش + مشاور
3	استقرار CMMS سبز	طراحی سیستم نگهداری با معیار مصرف منابع، زمان توقف، مصرف قطعات	2 هفته	IT + دفتر فنی
4	اجرای پروژه‌های بهبود	نصب سنسورهای پایش لرزش/دما، اصلاح سیکل روانکاری، استفاده از قطعات کم‌مصرف	15 ماه	تعمیرات + بهره‌برداری
5	ممیزی نهایی و تحلیل نتایج	مقایسه داده‌ها، گزارش‌گیری عملکرد سبز تجهیزات	2 هفته	تیم سبز + HSE

مدت کل: ۳ ماه

واحد (HSE (Health, Safety & Environment)

فاز	عنوان مرحله	فعالیت‌های کلیدی	مدت زمان	مسئول اجرا
1	تحلیل شکاف HSE سنتی با HSE سبز	بررسی ساختار فعلی، نبود پیوند با منابع انسانی و محیط‌زیست سیستمی	1 هفته	HSE
2	آموزش HSE نسل چهارم	تمرکز بر نقش تحلیل داده، فرهنگ ایمنی مشارکتی، شاخص‌های زیست‌محیطی پویا	1 هفته	آموزش + مشاور
3	بازطراحی KPI ها	تعریف شاخص‌های جدید شامل ردپای منابع، نرخ مشارکت سبز منابع انسانی	1 هفته	HSE + سیستم‌های مدیریتی
4	پروژه‌های اصلاحی	پروژه "کاهش ردپای PPE"، پروژه "کاهش مصرف آب در عملیات شستشو"	15 ماه	HSE + عملیات
5	گزارش‌دهی و انتشار شفاف	طراحی داشبورد سبز، انتشار گزارش عملکرد زیست‌محیطی واحد	2 هفته	روابط عمومی + HSE

مدت کل: ۲ ماه



نسخه منطبق با نسل چهارم دانش مدیریت سبز | Water & Steam Utilities

مسئول اجرا	مدت زمان	فعالیت‌های کلیدی	عنوان مرحله	فاز
مهندسی انرژی + واحد بهره‌برداری	۲ هفته	- ثبت مصرف روزانه آب، بخار، کندانس - شناسایی نقاط اتلاف انرژی، نشتی و ناپایداری فشار در مدارها	پایش منابع و مصارف	1
منابع انسانی + واحد بهره‌برداری	۱ هفته	- آموزش رفتار بهره‌برداری سبز، بهینه‌سازی مسیرها، مصرف - هوشمند بخار و آب - ایجاد فرهنگ مشارکت سبز	آموزش منابع انسانی بهره‌بردار	2
واحد برق + اتوماسیون صنعتی	۳ هفته	- نصب کنتورهای دیجیتال/هوشمند در نقاط کلیدی - طراحی داشبورد پایش لحظه‌ای مصرف منابع (SCADA, HMI)	طراحی سیستم مانیتورینگ	3
واحد عملیات + مهندسی انرژی	۱.۵ ماه	- پروژه «افزایش نرخ بازیابی کندانس» - پروژه «تغییر فشار عملیاتی برای مصرف بهینه» - مستندسازی نتایج	اجرای پروژه‌های بهبود سبز	4
تیم ممیزی داخلی	۲ هفته	- تحلیل داده‌های ثبت شده - ثبت کاهش مصرف آب و بخار - بررسی شاخص‌های کیفی (TDS، فشار، بازیابی کندانس) - صدور گواهی "واحد سبز نسل چهارم"	ارزیابی نهایی و صدور گواهی‌نامه	5

مجموع زمان اجرای برنامه: حدود ۳ ماه

اهداف راهبردی برنامه:

- کاهش اتلاف منابع استراتژیک (آب، انرژی حرارتی)
- ارتقاء شفافیت داده‌محور در عملکرد واحد Utilities
- توانمندسازی نیروی انسانی برای بهبود مستمر سبز
- کسب گواهی‌نامه واحد سبز نسل چهارم و الگوسازی در سطح شرکت

جمع‌بندی:

تمرکز اصلی	مدت زمان اجرای پروژه سبز	واحد
نگهداری مبتنی بر منابع و پایش هوشمند	3 ماه	تعمیرات
شاخص‌های مشارکت‌محور و محیط‌زیستی نوین	2 ماه	HSE
کاهش مصرف و ارتقاء بازده مدار انرژی	3 ماه	آب و بخار

مراجع علمی

1. Zafar, M W, Shahbaz, M, Hou, F, Sinha, A, & Qin, Q (2021)
"From Nonrenewable to Renewable Energy and its Impact on Economic Growth: The Role of Research and Development and Institutional Quality in South Asia"
Renewable Energy, 174, 1235–1245
[DOI: 101016/j.renene.2021.04.071]

تأکید بر نقش هم‌زمان R&D، مصرف انرژی و بهره‌وری در رشد اقتصادی و کیفیت محیط‌زیست

2. Sun, H, Edziah, B K, Koduah, M, & Sarkodie, S A (2021)
"Trade openness, eco-innovation, and environmental performance: Empirical evidence from OECD countries"
Environmental Science and Pollution Research, 28, 48053–48068
[DOI: 101007/s11356-021-14572-w]

نشان می‌دهد چگونه نوآوری زیست‌محیطی و بهره‌وری منابع بهبود عملکرد اقتصادی و زیست‌محیطی را تسهیل می‌کند

3. Ekins, P, Hughes, N, & Zaman, R (2020)
"Resource efficiency and the circular economy: Concepts, economic benefits, barriers and policy solutions"
OECD Green Growth Papers No 2020/04
[<https://doi.org/101787/3f6d62b5-en>]

تحلیل جامع OECD از نقش بهره‌وری منابع در افزایش سودآوری، کاهش آلودگی و بهبود رقابت‌پذیری صنعتی

4. Ali, W, Abdullah, A, & Azam, M (2021)
"Revisiting the Environmental Kuznets Curve in the Context of Export Diversification and Technological Innovation"
Environmental Impact Assessment Review, 89, 106589
[DOI: 101016/j.eiar.2021.106589]

تأکید بر نقش نوآوری فناورانه در کاهش آلودگی بدون افت کیفیت یا اقتصاد، از مسیر مدیریت مصرف منابع

5. International Resource Panel (IRP), UNEP (2020)
"Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future"
[<https://www.resourcepanel.org/reports/resource-efficiency-and-climate-change>]

گزارش کلیدی که پیوند بین مصرف مواد، انرژی، کیفیت زیرساخت‌ها، و کاهش انتشار را مستند می‌کند

- 6- Porter, M E, & Kramer, M R (2020, updated framework)
"Creating Shared Value: Competitive Advantage Through Social and Environmental Responsibility"
Harvard Business Review

نسخه به‌روزشده دیدگاه معروف "Shared Value" که تعامل اقتصاد، اجتماع و محیط‌زیست را در زنجیره تأمین صنعتی تبیین می‌کند.

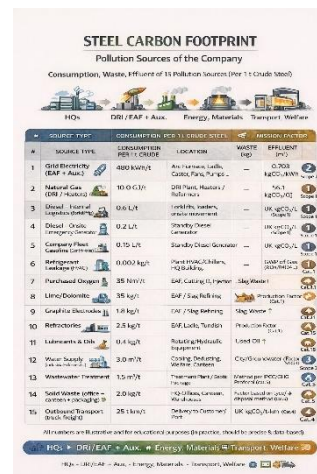


محاسبه ردپای کربن

در یک شرکت فولاد (از ستاد تا خط تولید تا آشپزخانه و حمل و نقل و رستوران)

نکته خیلی مهم: «مقادیر مصرف» در این جدول نمونه/فرضی برای آموزش اس. در محاسبه واقعی باید با داده کنتورها، قبضه‌ها، باسکول‌ها، ERP و لاگ‌های تولید جایگزین شود. «ضریب انتشار» هم باید طبق پروتکل انجمن مدیریت سبز ایران و یا IPCC/DEFRA/GHG Protocol/IEA و عامل شبکه برق و سوخت‌های محلی نهایی‌سازی شود.

جدول منابع، مصرف، محل مصرف، پسماند/پساب و ضریب انتشار (به ازای ۱ تن فولاد خام)



#	نوع منبع (Activity Data)	میزان مصرف به ازای ۱ تن فولاد	محل مصرف	پسماند حاصل	پساب حاصل	ضریب انتشار + دامنه (Scope)
1	Grid Electricity (EAF + Aux.)	480 kWh/t	کوره قوس، پاتیل، ریخته‌گری، فن‌ها، پمپ‌ها	—	—	0.703 kgCO ₂ e/kWh (Scope 2) (Climatiq)
2	Natural Gas (DRI/Heaters)	10.0 GJ/t	احیا مستقیم/هیترها/اریفورمر	—	—	56.1 kgCO ₂ /GJ (Scope 1) (IPCC)
3	Diesel – Internal logistics (forklifts, loaders)	0.6 L/t	لیفتراک‌ها، لودر، حمل داخلی	—	—	UK GHG Conversion Factors (Scope 1) (GOV.UK)
4	Diesel – Onsite emergency generator	0.2 L/t	دیزل ژنراتور اضطراری	—	—	UK GHG Conversion Factors (Scope 1) (GOV.UK)
5	Company Fleet Gasoline (staff/visits)	0.15 L/t	خودروهای سازمانی/استاد	—	—	UK GHG Conversion Factors (Scope 1) (GOV.UK)
6	Refrigerant leakage (HVAC)	0.002 kg/t	چیلر/اسپلیت ستاد و ساختمان‌ها	—	—	GWP وابسته به نوع گاز (R134a/R410A...) (Scope 1)

#	نوع منبع (Activity Data)	میزان مصرف به ازای ۱ تن فولاد	محل مصرف	پسماند حاصل	پساب حاصل	ضریب انتشار + دامنه (Scope)
7	Purchased Oxygen	35 Nm ³ /t	EAF، برشکاری، اکسیژن دمی	—	—	فاکتور تولید اکسیژن (Scope 3 Cat.1)
8	Lime/Dolomite Flux	35 kg/t	EAF / تصفیه سرباره	سرباره ↑	—	فاکتور تولید آهک (Scope 3 Cat.1)
9	Graphite Electrodes	1.8 kg/t	EAF	ضایعات الکترو	—	فاکتور تولید الکترو (Scope 3 Cat.1)
10	Refractories (gunning/bricks)	2.5 kg/t	EAF، پاتیل، تاندیش	پسماند نسوز	—	فاکتور تولید نسوز (Scope 3 Cat.1)
11	Lubricants & Oils	0.4 kg/t	تجهیزات دوار/هیدرولیک	روغن سوخته	—	فاکتور تولید روغن + دفع (Scope 3 Cat.1/5)
12	Water supply (industrial + domestic)	3.0 m ³ /t	خنک کاری، غبارگیر، سرویس ها، آشپزخانه	—	پساب ↑	فاکتور آب شهری/صنعتی (Scope 3) dera.ioe.ac.uk
13	Wastewater treatment	1.5 m ³ /t	تصفیه خانه/سپتیک/پکیج	لجن ↑	پساب تصفیه شده	روش محاسبه طبق IPCC/GHG Protocol (Scope 3 Cat.5) GHG Protocol
14	Solid waste (office+canteen+ packaging)	2.0 kg/t	ستاد، رستوران، انبارها	پسماند جامد ↑	—	روش فاکتوردهی برحسب نوع و روش دفع (Scope 3 Cat.5) GHG Protocol
15	Outbound transport (truck freight)	25 t·km/t	حمل محصول به مشتری/بندر	—	—	فاکتور حمل و نقل جاده ای (Scope 3 Cat.4) UK Factors (GOV.UK)

توضیح کوتاه برای ستون‌های «پسماند» و «پساب»

- در فولاد، عمده پسماندهای خط تولید معمولاً شامل سرباره، غبار غبارگیر (EAF dust)، نسوز مصرف‌شده، روغن سوخته است.
- برای هر کدام باید «مسیر مدیریت» مشخص باشد: بازیافت/فروش/دفن/محا چون ضریب انتشار با مسیر دفع تغییر می‌کند. (GHG Protocol)

نکته کلیدی برای «ضریب انتشار و دامنه‌گذاری»

- سوخت‌های احتراقی در محل (Scope 1 → مثل گاز، دیزل)
- برق خریداری‌شده Scope 2 →
- خرید مواد، حمل‌ونقل، آب، پسماند، خدمات Scope 3 → (دسته‌های ۱، ۴، ۵، ۷ ...)
- طبق راهنمای GHG Protocol (GHG Protocol)

محاسبه انتشار CO₂e به ازای هر منبع

جدول محاسبات ردپای کربن فولاد (نمونه آموزشی)

#	منبع	مصرف	ضریب انتشار	CO ₂ e انتشار (kg/t steel)	Scope
1	Grid Electricity (EAF + Aux.)	480 kWh	0.703 kgCO ₂ /kWh	337.4	Scope 2
2	Natural Gas (DRI / Heaters)	10.0 GJ	56.1 kgCO ₂ /GJ	561.0	Scope 1
3	Diesel – Internal logistics	0.6 L	2.68 kgCO ₂ /L	1.6	Scope 1
4	Diesel – Emergency generator	0.2 L	2.68 kgCO ₂ /L	0.5	Scope 1
5	Company fleet (gasoline)	0.15 L	2.31 kgCO ₂ /L	0.35	Scope 1
6	Refrigerant leakage (HVAC)	0.002 kg	GWP≈1430	2.9	Scope 1
7	Purchased Oxygen	35 Nm ³	0.5 kgCO ₂ /Nm ³	17.5	Scope 3 (Cat.1)
8	Lime / Dolomite	35 kg	0.75 kgCO ₂ /kg	26.3	Scope 3 (Cat.1)

#	منبع	مصرف	ضریب انتشار	CO ₂ e انتشار (kg/t steel)	Scope
9	Graphite Electrodes	1.8 kg	5.5 kgCO ₂ /kg	9.9	Scope 3 (Cat.1)
10	Refractories	2.5 kg	1.2 kgCO ₂ /kg	3.0	Scope 3 (Cat.1)
11	Lubricants & oils	0.4 kg	2.9 kgCO ₂ /kg	1.2	Scope 3
12	Water supply	3.0 m ³	0.4 kgCO ₂ /m ³	1.2	Scope 3
13	Wastewater treatment	1.5 m ³	0.7 kgCO ₂ /m ³	1.1	Scope 3
14	Solid waste (office/canteen)	2.0 kg	0.6 kgCO ₂ /kg	1.2	Scope 3
15	Outbound transport (truck)	25 t·km	0.09 kgCO ₂ /t·km	2.3	Scope 3 (Cat.4)

جمع‌بندی انتشار به تفکیک دامنه‌ها

انتشار مستقیم – Scope 1

- Natural Gas: 561.0
- Diesel & Fleet: 2.45
- Refrigerants: 2.9

جمع Scope 1 ≈ 566 kgCO₂e / t steel

برق خریداری شده – Scope 2

- Electricity: 337 kgCO₂e / t steel

زنجیره ارزش – Scope 3

- ...مواد، آب، پسماند، حمل‌ونقل، اکسیژن و

جمع Scope 3 ≈ 67 kgCO₂e / t steel



ردپای کربن کل (نمونه)

 $\approx 970 \text{ kgCO}_2\text{e} / \text{t crude steel}$ عدد آموزشی است؛ در خطوط واقعی ایران معمولاً ۱.۶-۲.۰ tCO_2/t گزارش می‌شود چون مصرف گاز/برق بالاتر است

تعریف پروژه‌های بهبود کاهش انتشار

تفکیک شده برای 1 / 2 / 3 Scope

پروژه‌های کاهش 1 Scope (سوخت و فرایند)

Project S1-1 | DRI Gas Optimization Program

• بهینه‌سازی نسبت H_2/CO

• کاهش مصرف گاز ۸-۱۲٪

• پتانسیل کاهش: 45-70 kgCO_2/t

Project S1-2 | Hydrogen Blending (5-10%)

• جایگزینی تدریجی H_2 با گاز طبیعی• پتانسیل کاهش: 30-60 kgCO_2/t

Project S1-3 | Refrigerant Management

• نشت‌یابی، جایگزینی با گاز کم GWP-

• پتانسیل کاهش: 80-90٪ انتشار HVAC

1077

(برق) Scope 2 پروژه‌های کاهش

Project S2-1 | EAF Energy Efficiency Package

- Foamy slag
- Power factor correction
- Shorter melting time



- کاهش برق: 50–80 kWh/t
- کاهش CO₂: 35–55 kgCO₂/t

Project S2-2 | Onsite Solar / Green PPA

- تأمین ۲۰–۳۰٪ برق کم کربن

- کاهش CO₂: 70–100 kgCO₂/t

(زنجیره ارزش) Scope 3 پروژه‌های کاهش

Project S3-1 | Low-Carbon Lime & Electrodes

- خرید مواد با EPD
- کاهش: 20–30٪ انتشار مواد

Project S3-2 | Water Circularity Program

- Closed-loop cooling
- کاهش آب و پساب
- کاهش: کوچک ولی استراتژیک (CBAM/ESG)

Project S3-3 | Green Logistics

- افزایش بهره‌وری بار
- سوخت کم کربن
- کاهش: 20–40٪ حمل و نقل

جمع‌بندی مدیریتی: در فولاد، بیش از ۹۰٪ ردپای کربن در Scope 1 و ۲ شکل می‌گیرد. اما Scope 3 تعیین‌کننده بازار، CBAM و اعتبار ESG است. فولاد سبز یعنی: کاهش واقعی + Scope 1 برق پاک + Scope 2 مدیریت هوشمند Scope 3



GREENHOUSE GAS INVENTORY REPORT

ISO 14064-1 & CBAM-Ready واحد محصول مشخص

تفکیک 1 Scope و ۲ - داده‌های قابل ممیزی - روش محاسبه شفاف - شدت انتشار محصول (kgCO₂/t)

Steel Manufacturing Company (Sample)

1. GENERAL INFORMATION

Reporting

Steel Manufacturing Company (Sample – Iran)

Organization:

Reporting Standard:

- ISO 14064-1
- EU CBAM – Embedded Emissions Requirements

Reporting Year:

2024 (Sample)

Reporting Period:

1 January 2024 – 31 December 2024

Functional Unit:

1 metric ton of crude steel (t crude steel)

Production Route:

Natural Gas-based DRI + Electric Arc Furnace (EAF)

2. ORGANIZATIONAL & OPERATIONAL BOUNDARIES

2.1 Organizational Boundary

Approach: Operational Control

Included facilities:

- Headquarters & offices
- DRI plant





- EAF steelmaking
- Casting & auxiliaries
- Utilities, canteen, internal transport

2.2 Operational Boundary

Scope	Included Emissions
Scope 1	Natural gas combustion, diesel, gasoline, refrigerant leakage
Scope 2	Purchased grid electricity
Scope 3	Purchased materials, water, waste, transport

3. METHODOLOGY & DATA QUALITY

3.1 Quantification Method

GHG emissions calculated as:

GHG Emissions = Activity Data × Emission Factor

- Activity data: meters, invoices, production logs
- Emission factors: IPCC / UK DEFRA / grid factor (Iran)
- GWPs: IPCC AR5 (100-year)

3.2 Data Quality Statement

- Electricity & gas: **High accuracy (metered)**
- Materials & logistics: **Medium (supplier data / factors)**
- Waste & wastewater: **Estimated, conservative**

4. GHG EMISSIONS INVENTORY RESULTS

(per 1 ton crude steel – sample values)

4.1 Scope 1 – Direct Emissions



Source	Emissions (kgCO ₂ e/t)
Natural gas (DRI/heaters)	561
Diesel & gasoline	2.5
Refrigerant leakage	2.9
Total Scope 1	566

4.2 Scope 2 – Energy Indirect Emissions

Source	Emissions (kgCO ₂ e/t)
Grid electricity (EAF + Aux.)	337
Total Scope 2	337

4.3 Scope 3 – Other Indirect Emissions

Category	Emissions (kgCO ₂ e/t)
Purchased materials (lime, electrodes, refractories)	39
Purchased oxygen	17.5
Water & wastewater	2.3
Solid waste	1.2
Transport (outbound)	2.3
Total Scope 3	67

1081

TOTAL CARBON FOOTPRINT

Total GHG Emissions = 970 kgCO₂e / t crude steel

5. CBAM-READY DISCLOSURE (EMBEDDED EMISSIONS)

5.1 Direct Embedded Emissions



- Scope 1 emissions directly attributable to steel production
- **566 kgCO₂e / t steel**

5.2 Indirect Embedded Emissions

- Electricity-related emissions (Scope 2)
- **337 kgCO₂e / t steel**

5.3 Methodological Alignment

- Activity-based calculation
 - Conservative emission factors
 - Traceable & auditable data
- ✓ CBAM-compatible structure
- ✓ Product-level emission intensity provided

6. EMISSION REDUCTION PROJECTS (SUMMARY)

Scope 1

- DRI gas optimization
- Hydrogen blending (5–10%)
- Refrigerant management

Scope 2

- EAF energy efficiency package
- Renewable electricity (PPA / onsite solar)

Scope 3

- Low-carbon materials procurement
- Water circularity
- Green logistics

7. UNCERTAINTY & LIMITATIONS

- Some Scope 3 factors based on secondary data
- National grid factor subject to annual update



- Hydrogen not yet implemented (baseline fossil)

8. VERIFICATION STATEMENT (OPTIONAL)

This report is prepared in accordance with ISO 14064-1 and is **ready for third-party verification** by an accredited verifier.

9. MANAGEMENT DECLARATION

We confirm that the data and information presented in this report are accurate to the best of our knowledge and prepared in good faith for compliance, transparency, and continuous improvement.

Authorized

Managing

Director

/

Sustainability

Date: _____

Signatory:

Manager



Checkpoint های استاندارد ISO 14064-1

مبنای ممیزی داخلی - چکلیست ممیز شخص ثالث و پیوست رسمی گزارش / CBAM / ESG / پایداری

ISO 14064-1

Audit-Ready Checklist & Verification Checkpoints

(Steel Industry – DRI + EAF)

ISO 14064-1

GENERAL REQUIREMENTS (Clause 4)

Checkpoint	Requirement (ISO 14064-1)	Evidence Required	Status
4.1	Defined reporting organization	Legal documents, org chart	☐
4.2	Defined reporting period	Reporting year statement	☐
4.3	Defined functional unit	"1 t crude steel" documented	☐
4.4	GHG inventory responsibility assigned	Appointment letter / role	☐

ORGANIZATIONAL BOUNDARY (Clause 5.1)

Checkpoint	Requirement	Evidence	Status
5.1.1	Boundary approach selected (Operational control)	Boundary statement	☐
5.1.2	Included facilities listed	Site list, process map	☐
5.1.3	Excluded facilities justified	Justification note	☐

✓ **Auditor focus:** consistency with company control



OPERATIONAL BOUNDARY (Clause 5.2)

Checkpoint	Requirement	Evidence	Status
5.2.1	Scope 1 sources identified	Source register	☐
5.2.2	Scope 2 sources identified	Electricity bills, meters	☐
5.2.3	Scope 3 categories defined	Scope 3 matrix	☐
5.2.4	Justification for exclusions	Scope 3 rationale	☐

✓ **CBAM-critical:** Scope 1 & 2 clearly separated

GHG SOURCE IDENTIFICATION (Clause 5.3)

Checkpoint	Requirement	Evidence	Status
5.3.1	All relevant sources identified	Source inventory table	☐
5.3.2	DRI & EAF emissions mapped	Process flow diagram	☐
5.3.3	Non-production sources included (HQ, canteen, transport)	Activity list	☐

QUANTIFICATION METHODOLOGY (Clause 5.4)

Checkpoint	Requirement	Evidence	Status
5.4.1	Calculation method documented	Methodology section	☐
5.4.2	Formula applied correctly	Calculation sheets	☐
5.4.3	Emission factors referenced	IPCC / DEFRA sources	☐
5.4.4	GWPs defined (100-yr)	IPCC AR5/AR6	☐

Formula:

Emissions = Activity Data × Emission Factor

1085



ACTIVITY DATA MANAGEMENT (Clause 5.5)

Checkpoint	Requirement	Evidence	Status
5.5.1	Data sources identified	Meter list, invoices	☐
5.5.2	Data collection frequency defined	Procedures	☐
5.5.3	Data gaps addressed conservatively	Gap log	☐
5.5.4	Unit consistency ensured	Conversion sheet	☐

✓ **Auditor focus:** traceability to raw data

BASE YEAR & CONSISTENCY (Clause 6)

Checkpoint	Requirement	Evidence	Status
6.1	Base year defined	Base year statement	☐
6.2	Structural changes addressed	Change log	☐
6.3	Recalculation policy defined	Recalc procedure	☐

UNCERTAINTY & QUALITY MANAGEMENT (Clause 7)

Checkpoint	Requirement	Evidence	Status
7.1	Data uncertainty assessed	Uncertainty table	☐
7.2	Data quality approach defined	QA/QC procedure	☐
7.3	Conservative assumptions justified	Assumption register	☐

REPORTING & DISCLOSURE (Clause 8)

Checkpoint	Requirement	Evidence	Status
8.1	Scope 1, 2, 3 separately reported	Inventory tables	☐
8.2	Product intensity disclosed	kgCO ₂ /t steel	☐
8.3	Methodology transparently stated	Report section	☐
8.4	Limitations disclosed	Limitations note	☐

✓ **CBAM-ready:** product-level embedded emissions available

VERIFICATION READINESS (Clause 9)

Checkpoint	Requirement	Evidence	Status
9.1	Internal review completed	Review minutes	☐
9.2	Evidence archived & accessible	Evidence folder	☐
9.3	Management declaration signed	Signed statement	☐

SUMMARY PAGE (for Auditors)

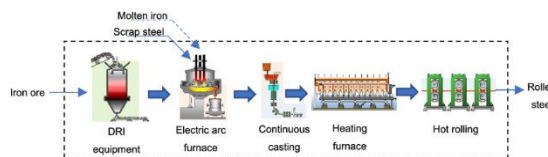
- ✓ Functional Unit defined
- ✓ Scope 1 & 2 CBAM-aligned
- ✓ Data traceable to meters & invoices
- ✓ Conservative & transparent assumptions
- ✓ Ready for third-party verification

Based on the review of documentation, calculations, and evidence provided, the GHG inventory has been prepared in accordance with ISO 14064-1 and is suitable for external verification and CBAM disclosure.



ردپای آب در صنعت فولاد

ردپای آب (Water Footprint) شاخصی است که نشان می‌دهد: برای تولید یک واحد محصول فولادی، چه مقدار آب مصرف، آلوده یا از دسترس خارج می‌شود، و این مصرف در کجا و با چه اثری رخ می‌دهد. در صنعت فولاد، آب فقط «مصرف‌شده» نیست؛ بلکه:



- بخشی تبخیر می‌شود
 - بخشی آلوده می‌شود
 - بخشی در مدار می‌چرخد
 - و بخشی از نظر اکولوژیک «از دسترس» خارج می‌شود
- به همین دلیل، ردپای آب فقط حجم نیست؛ اثر است.
- انواع ردپای آب (چارچوب پذیرفته‌شده جهانی)

1. Blue Water Footprint

آب برداشت‌شده از منابع سطحی و زیرزمینی:

- خنک‌کاری DRI و EAF
- غبارگیرها
- تولید بخار
- مصارف بهداشتی و رفاهی

2. Green Water Footprint

آب باران جذب‌شده در زنجیره بالادست:

- معدن سنگ آهن
- تولید آهک و مواد اولیه

(در فولاد کمتر، ولی در زنجیره تأمین مهم است)

3. Grey Water Footprint

حجم آبی که برای رقیق‌سازی آلودگی تا حد استاندارد لازم است:

- پساب خنک‌کاری
- پساب شیمیایی
- فلزات سنگین، TDS، روغن و گریس

در فولاد، Grey Water معمولاً از نظر ریسک زیست‌محیطی مهم‌ترین بخش است.

ردپای آب در فولاد «کجا» شکل می‌گیرد

در مسیر معمول DRI + EAF:

- آب خنک‌کاری کوره‌ها و تجهیزات
- سیستم‌های غبارگیری
- ریخته‌گری مداوم
- تصفیه‌خانه و Blowdown
- مصارف رفاهی، آشپزخانه، فضای سبز
- زنجیره بالادست (معدن، آهک، الکتروود)

چگونگی محاسبه ردپای آب در صنعت فولاد

واحد عملکردی (Functional Unit)

1 تن فولاد خام (1 t crude steel) یا

1 تن محصول نهایی نوردشده

گام‌های اصلی محاسبه:

گام ۱: تعیین مرز سیستم

- Gate-to-Gate (داخل کارخانه)
- Cradle-to-Gate (زنجیره بالادست)



گام ۲: شناسایی جریان‌های آب

- ورودی‌ها (برداشت آب)
- خروجی‌ها (پساب، تبخیر، آب برگشتی)

گام ۳: تفکیک Blue / Grey

- آب برداشت‌شده واقعی
- بار آلودگی و نیاز به رقیق‌سازی

گام ۴: محاسبه شاخص‌ها

- آب / تن فولاد m^3
- تن فولاد / m^3 Grey Water
- Water Stress-weighted footprint (در نسخه پیشرفته)

چارچوب مرجع بین‌المللی: ISO 14046

چرا ردپای آب برای صنعت فولاد «حیاتی» است؟

اهمیت اقتصادی

- آب در مناطق خشک = هزینه پنهان بزرگ
- ریسک توقف تولید در بحران آب
- افزایش هزینه تصفیه، پمپاژ و انرژی
- کاهش جذابیت سرمایه‌گذاری

در بسیاری از پروژه‌ها، بحران آب زودتر از بحران کربن تولید را تهدید می‌کند.

اهمیت زیست‌محیطی

- رقابت صنعت با شرب و کشاورزی
- افت سفره‌های زیرزمینی
- شور شدن خاک و منابع
- تنش اجتماعی و مجوز اجتماعی فعالیت (Social License)

اهمیت قوانین و الزامات بین‌المللی

- الزامات افشای آب در ESG / CSRD
- توجه سرمایه‌گذاران به Water Risk
- هم‌راستایی با گزارش‌های CDP Water
- در آینده نزدیک: اتصال آب به تجارت و تأمین مالی

پیام جهانی روشن است: صنعتی که آب را نبیند، در زنجیره ارزش آینده جایی نخواهد داشت.

پیوند ردپای آب با «نسل چهارم فولاد سبز»

در نسل‌های قبلی:

- تمرکز بر تجهیزات
- تمرکز بر مصرف لحظه‌ای

در نسل چهارم:

- تحلیل جریان آب
- توجه به مکان (Water Stress)
- نقش انسان در بهره‌برداری
- بازچرخانی، رفتار، داده و حکمرانی آب

ردپای آب فقط عدد نیست؛ بیانگر رابطه صنعت با سرزمین است.



فرم گردآوری داده ردپای آب برای کارخانه فولاد (DRI+EAF)

فرم ۱: شناسنامه محاسبه

مقدار	فیلد
(یا محصول نهایی) 1 ton crude steel	واحد عملکردی (Functional Unit)
ماهانه / فصلی / سالانه	دوره گزارش
Gate-to-Gate / Cradle-to-Gate	مرز سیستم
نام سایت + استان/شهر	سایت/کارخانه
Blue + Grey (Stress-weighted: و اختیاری)	روش محاسبه
نام/واحد	مستول داده
v1.0	نسخه فرم



WATER FOOTPRINT DATA COLLECTION IN STEEL PLANT
Framework, Principles & Sample Tables for Measuring and Auditing

Framework

- 1 Set Boundary
- 2 Identify Flows (In/Out/Recirc)
- 3 Special + Grey Footprint

ISO 14046

Key Questions

- How much raw water was withdrawn/recirculated?
- How much wastewater was produced?
- How to calculate Grey Water Footprint (WF_{grey})?

Operational Principles

- Segregated metering + water balance
- Indicator parameter selection (COD/TDS...)
- Evidence: log, test, meter reading, receipt

What data is needed to quantify water footprint in a steel plant?

Water Flow Data Collection Table at Steel Plant: Water Flows

#	Unit / Process	Flow Type	Water Type	Meter / ID	Amount	Discharge / Receiving Area
1	Raw Water Inlet	Blue	Blue	M-OI	1,200 m³	Gathered internally
2	DRI	Blue	Grey/Blue	M-DRI-BD	80 m³	Blowdown Channel
3	EAF	Blue	Blue	M-EAF-CL	350 m³	Recirculated internally
4	Admin	Blue	Blue	M-ADM-1	100 m³	Septic system / treatment
5	Wastewater Treatment Plant	Grey	Grey (TDS)	M-WW-OUT	400 m³	Discharged to environment

Grey Water Footprint Data Table for Steel Plant

Wastewater Output	Key Parameter	Concentration (mg/L)	Max. Limit (mg/L)	Substance	Pollution Standard (mg/L)	Frequency
Blowdown Channel	COD	320	320	5.0	Intermittent	Monthly
EAF	COD	Inf	150	5.0	Sub-acute risk	Monthly
Sanitary	Blue	Inf	100	PBM	Blowdown Sample	Monthly
Wastewater	WF _{grey}	780 m³	780 m³	400 m³	Septic system / plant	Monthly

Sample Conversion Table "Per Unit of Product"

#	Indicator	Quantity in Period	Special Quantity (m³ / ton)	Explanation
1	Total water withdrawn	1,750 m³	525 m³	Direct
2	Net water use	525 m³	390 m³	From covers / process
3	Evaporation	400 m³	400 m³	From covers / process
4	Wastewater output	780 m³	WF _{grey} = (6846/30-5) 780 m³	22chg (150-5+5)

Success Guarantee: Accurate water balance; auditable data & smart water management

Blue = Freshwater Withdrawn / Green = Rain Absorbed / Grey = Wastewater With Pollutants

فرم ۲: جدول گردآوری داده جریان های آب (Water Balance + Water Footprint)

هر ردیف = یک «نقطه مصرف/تخلیه/بازچرخانی» در کارخانه

واحد اندازه گیری	مقدار (m ³) در دوره	کنترلر/کد	منبع آب	نوع آب	نوع جریان	نقطه/تجهیز	واحد/فرایند	ردیف
m ³		M-01	چاه/سد/آبفا	Blue	ورودی	ورودی آب خام سایت	Utilities	1
m ³		M-DRI-1	آب خام/برج	Blue	ورودی	خنک کاری مدار باز	DRI	2
m ³		M-DRI-BD	—	Grey/Blue	خروجی	بلودان برج	DRI	3
m ³		M-EAF-CL	آب تصفیه/بازچرخانی	Blue	ورودی	خنک کاری مدار بسته	EAF	4
m ³		M-EAF-SCR	آب صنعتی	Blue	ورودی	غبارگیر/اسکرابر	EAF	5
m ³		M-CCM-1	برج/مدار بسته	Blue	ورودی	خنک کاری ریخته گری	CCM	6
m ³		M-PKL-1	آب صنعتی	Blue	ورودی	شستشو/اسیدشویی (اگر هست)	Workshop	7
m ³		M-YRD-1	آب خام/پساب تصفیه	Blue	ورودی	آبیاشی محوطه/کنترل گردوغبار	Yard	8
m ³		M-ADM-1	آبفا	Blue	ورودی	سرویس های بهداشتی	Admin	9
m ³		M-CAN-1	آبفا	Blue	ورودی	آشپزخانه/رستوران	Canteen	10
m ³		M-WW-IN	جمع پساب	—	ورودی	ورودی تصفیه خانه	WWTP	11
m ³		M-WW-OUT	—	Grey	خروجی	خروجی تصفیه خانه	WWTP	12
kg/ton		—	—	—	پسماند	لجن تصفیه خانه	Sludge	13
m ³		M-REU-1	پساب تصفیه	Blue (کاهش برداشت)	ورودی	آب بازچرخانی به فرایند	Reuse	14
m ³		—	—	Blue	خروجی	نشتی/سرریز/اتلافات	Losses	15

ادامه جدول

مسئول	مدیرک/شاهد	روش نمونه برداری/آزمایش	پارامترهای کیفیت لازم	محل تخلیه/دریافت	نرخ بازچرخانی %	سرنوشت آب	تناوب ثبت
آب/تأسیسات	قبض/فراشت	—	—	—	—	توزیع داخلی	روزانه/ماهانه
تولید+آب	لاگ برج/آزمایش	دورهای	TDS, pH, Temp	کانال بلودان	تبخیر+بلودان	تبخیر+بلودان	شیفتی/روزانه
HSE	نتایج آزمایشگاه	ماهانه	TDS, COD, Oil&Grease	تصفیه خانه	تصفیه/تخلیه	تصفیه/تخلیه	روزانه
نگهداشت	لاگ سیستم	دورهای	Conductivity, Temp	—	بازگشت	بازگشت	روزانه
HSE	آزمایشگاه	ماهانه	TSS, pH, Metals	تصفیه خانه	پساب	پساب	روزانه
تولید	لاگ/آزمایش	ماهانه	TDS, Temp	بلودان	تبخیر/بلودان	تبخیر/بلودان	—
HSE	ISOP+آزمایش	هفتگی	pH, COD, Metals	واحد خنثی سازی	پساب ویژه	پساب ویژه	—
خدمات	لاگ	فصلی	TSS	محوطه	تبخیر/نفوذ	تبخیر/نفوذ	—
اداری	قبض/آزمایش	ماهانه	BOD, COD	سپتیک/تصفیه	فاضلاب	فاضلاب	—
خدمات	گزارش چربی گیر	ماهانه	Oil&Grease, BOD	چربی گیر/تصفیه	فاضلاب چرب	فاضلاب چرب	—
HSE	لاگ	هفتگی	BOD, COD, TSS	تصفیه خانه	تصفیه	تصفیه	—
HSE	آزمایش	ماهانه	استاندارد تخلیه	محل تخلیه/مصرف	تخلیه/بازاستفاده	تخلیه/بازاستفاده	—
HSE	باسکول	دورهای	رطوبت/فلزات	انبار لجن	دفع/باز یافت	دفع/باز یافت	—
آب/تولید	لاگ	ماهانه	TDS, TSS	مصرف کننده	مصرف مجدد	مصرف مجدد	—
نگهداشت	گزارش نشت یابی	—	—	نقاط مختلف	اتلاف	اتلاف	—

راهنما (ستون "نوع جریان": (ورودی / خروجی / بازچرخانی / اتلاف راهنما (ستون "نوع آب": Grey (Blue / Green / Grey) بیشتر برای خروجی های آلوده و محاسبه بار آلودگی استفاده می شود)

فرم ۳: جدول داده‌های کیفیت برای محاسبه Grey Water Footprint

برای هر خروجی پساب باید حداقل یک «پارامتر شاخص» تعریف شود (مثل COD یا TDS یا یک فلز)

مدرک	تناوب	محل نمونه‌برداری	منبع استاندارد حد مجاز	بار آلودگی Load (kg/دوره)	غلظت طبیعی Cnatural (mg/L)	حد مجاز Cmax (mg/L)	غلظت Cactual (mg/L)	پارامتر شاخص	دبی پساب (دوره/m³)	خروجی پساب
------	-------	------------------	------------------------	---------------------------	----------------------------	---------------------	---------------------	--------------	--------------------	------------

فرمول‌ها (برای کاربرگ محاسبه):

- $Load (kg) = Q(m^3) \times C(mg/L) \times 0.001$
- $WF_{grey} (m^3) = Load / (C_{max} - C_{natural})$

فرم ۴: تبدیل داده به "به ازای واحد محصول"

توضیح	(m³/t) مقدار ویژه	(t steel) تولید دوره	مقدار در دوره	شاخص
				برداشت آب (Blue)
برداشت - بازگشت				مصرف خالص آب (Blue net)
از برج‌ها/فرایند				تبخیر
				پساب خروجی
برای پارامتر شاخص				WFgrey

نکات اجرایی خیلی مهم برای فولاد (برای اینکه فرم واقعاً جواب بدهد)

- کنترل‌گذاری تفکیکی: حداقل ورودی سایت + هر واحد اصلی (DRI/EGF/CCM/WWTP/Canteen)
- بستن تراز آب: (Water Balance) اختلاف ورودی و خروجی‌ها را به "تبخیر/تلاف" ببندید
- برای Grey، یک یا دو پارامتر شاخص انتخاب کنید:
 - (بسته به سیستم شما) فلزات / TSS / Oil&Grease / COD / TDS: صنعتی
- مدرک برای ممیزی: عکس کنترل، لاگ روزانه، نتایج آزمایشگاه، قبض آب/برق پمپ‌ها



فرمول کلی ممیزی انرژی

محاسبه انتشار گازهای گلخانه‌ای (CO₂e)

۱) تبدیل گازهای گلخانه‌ای به CO₂e

$$\{ \dots, \text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{N}_2\text{O} \} \ni i, (i, 100 m_i \times \text{GWP}) \sum_i = \text{CO}_2\text{e}$$

۲) انتشار ناشی از احتراق سوخت (سوخت‌های فسیلی)

$$\begin{aligned} \frac{44}{12} \times F \times \text{NCV} \times \text{EF}_C \times \text{OXID} &= {}_2\text{CO}E \\ {}_4\text{CH}F \times \text{NCV} \times \text{EF} &= {}_4\text{CH}E \\ \text{N}_2\text{O}F \times \text{NCV} \times \text{EF} &= \text{N}_2\text{O}E \\ \text{N}_2\text{O}E {}_2\text{CO} + E {}_4\text{CH} \times \text{GWP} {}_4\text{CH} + E \text{N}_2\text{O} \times \text{GWP} &= \text{CO}_2\text{e} \end{aligned}$$

- F : مقدار سوخت (t یا m³ یا L)
- NCV : ارزش حرارتی خالص (TJ/واحد)
- $\text{EF}_C, \text{EF}_{{}_4\text{CH}}, \text{EF}_{\text{N}_2\text{O}}$ (kg/TJ)
- OXID : ضریب اکسیداسیون (۰-۱)

۳) برق خریداری شده (Scope 2)

$$\text{gridEF} \times \text{grid}E = \text{CO}_2\text{e}_{\text{برق}}$$

- $\text{grid}E$: برق مصرفی (MWh)
- gridEF : ضریب انتشار شبکه (tCO₂e/MWh)



۴) حرارت/بخار خریداری شده (Scope 2)

$$CO_2e \text{ حرارت} = Q_{\text{steam/heat}} \times EF_{\text{steam/heat}}$$

• Q : انرژی خریداری شده (MWh یا GJ)

۵) حمل و نقل (Scope 1/3)

بر مبنای سوخت:

$$CO_2e = V_{\text{fuel}} \times EF_{\text{fuel}}$$

بر مبنای مسافت:

$$CO_2e = d \times EF_{\text{km}}$$

۶) فعالیت‌های غیرانرژی بر (نمونه‌ها)

- اقامت: $CO_2e = N_{\text{شب}} \times EF_{\text{هتل}}$
- پرواز: $CO_2e = P \times d \times EF_{\text{پرواز}}$ یا $CO_2e = P \times EF_{\text{segment}}$
- مواد/غذا/آب/کاغذ: $CO_2e = \text{Activity} \times EF_{\text{مربوط}}$

۷) جمع کل ردپای کربن

$$CF_{\text{کل}} = \sum_j (A_j \times EF_j)$$

- A_j : مقدار فعالیت j
- EF_j : ضریب انتشار فعالیت j



۸) شدت انتشار (Carbon Intensity)

$$CI = \frac{CF_{\text{کل}}}{\text{خروجی تولید}} \quad (tCO_2e/\text{تن محصول})$$

۹) ممیزی انرژی — شاخص‌ها

مصرف ویژه انرژی (SEC):

$$SEC = \frac{E_{\text{کل}}}{\text{خروجی تولید}} \quad (MJ/\text{تن یا kWh/واحد})$$

شاخص عملکرد انرژی (EnPI):

$$EnPI = \frac{E}{\text{عامل نرمال سازی}}$$

(عامل نرمال سازی: تولید، درجه روز، ساعت کارکرد، رطوبت بار و ...)



۱۰) صرفه جویی انرژی و کربن پس از پروژه

$$\Delta E = E - E_{\text{پایه}} \quad \text{پس از اجرا}$$

$$\% \text{کاهش انرژی} = \left(\frac{EnPI_{\text{پس از}}}{EnPI_{\text{پایه}}} - 1 \right) \times 100$$

$$\Delta E \times EF = CO_2e \text{ صرفه جویی}$$

۱۱) تنظیم خط مبنا (نرمال سازی)

$$E_{\text{پایه، تنظیم شده}} = EnPI_{\text{پایه}} \times \text{عامل نرمال سازی دوره مقایسه}$$



۱۲) تجميع بر اساس Scope

$$\begin{aligned} \sum (A \times EF)_{\text{انتشار مستقيم}} &= s_1 CF \\ \sum (E \times EF)_{\text{برق/حرارت خريداري شده}} &= s_2 CF \\ \sum (A \times EF)_{\text{ساير غير مستقيم}} &= s_3 CF \\ s_1 CF + s_2 CF + s_3 CF &= CF_{\text{كل}} \end{aligned}$$

۱۳) عدم قطعیت ساده (اختیاری)

$$\sqrt{\sum_k \left(u_k \frac{f}{\partial} \right)^2} \approx U_{\text{نتیجه}}$$

(برای تابع f از ورودی‌های u_k با عدم قطعیت u_k)

۱۴) بازگشت سرمایه پروژه انرژی (ساده)

$$SPP = \frac{\text{هزینه سرمایه‌گذاری}}{\text{صرفه‌جویی سالانه ریالی}}$$

نکته واحدها:

$1000 \times \text{tCO}_2\text{e} = \text{kgCO}_2\text{e}$ ، $1 \text{ MWh} = 3.6 \text{ GJ}$ ، استفاده از EF در واحد سازگار با فعالیت.



ممیزی انرژی صنعتی تجهیزات اصلی مصرف کننده انرژی

ممیزی انرژی در صنعت براساس تجهیزات

۱. دیگ بخار (Boiler)

• شاخص‌ها:

- راندمان دیگ = $\frac{\dot{Q}_{\text{بخار مفید}}}{\dot{Q}_{\text{سوخت ورودی}}}$
- تلفات دودکش = محاسبه بر اساس دود و ترکیب گازهای خروجی.
- فرمول کلیدی:

$$\frac{m_{\text{steam}} \times (h_{\text{steam}} - h_{\text{feedwater}})}{m_{\text{fuel}} \times \text{NCV}} = \text{Boiler} \eta$$

- فرصت‌های بهبود: عایق کاری، کنترل O_2 ، بازیافت حرارت دودکش، بهبود کیفیت آب تغذیه.

۲. سیستم هوای فشرده (Compressed Air)

• شاخص‌ها:

- انرژی مصرفی کمپرسور بر حسب kWh/m^3 هوای فشرده.
- نشتی سیستم (% حجم).

• فرمول کلیدی:

$$\frac{P_{\text{هوا}} (\text{kW})}{P_{\text{ورودی}} (\text{kW})} = \text{Compressor} \eta$$

- فرصت‌های بهبود: کاهش نشتی، تنظیم فشار، استفاده از VSD (درایو دور متغیر)، بازیافت حرارت از کمپرسور.

۳. موتورهای الکتریکی (Electric Motors)

• شاخص‌ها:

- راندمان موتور = $\frac{P_{\text{خروجی}}}{P_{\text{ورودی}}}$
- ضریب بار (Load Factor).
- فرمول کلیدی:

$$\frac{P_{\text{واقعی}}}{P_{\text{نامی}}} = \text{Load Factor}$$

- فرصت‌های بهبود: جایگزینی موتورهای راندمان بالا (IE3/IE4)، نصب اینورتر، نگهداری منظم.



۴. سیستم روشنایی (Lighting)

• شاخص‌ها:

- شدت روشنایی (Lux) در مقابل توان مصرفی (W).
- LPD (Lighting Power Density) = وات بر مترمربع.

• فرمول کلیدی:

$$\frac{\text{Lighting } P}{\text{Floor } A} = \text{LPD}$$

- فرصت‌های بهبود: جایگزینی LED، نصب سنسور حضور و نور طبیعی (Daylight Control).

۵. سیستم HVAC (گرمایش، سرمایش و تهویه)

• شاخص‌ها:

$$\frac{\text{Cooling/Heating } Q}{\text{Input } W} = \text{COP (Coefficient of Performance)}$$

• فرمول کلیدی:

$$\frac{Q}{W} = \text{COP}$$

- فرصت‌های بهبود: نگهداری منظم چیلرها، بازیافت حرارت، بهبود عایق‌کاری، استفاده از BMS (سیستم مدیریت ساختمان).

۶. کوره‌ها و فرآیندهای حرارتی (Furnaces & Kilns)

• شاخص‌ها:

- مصرف ویژه انرژی (SEC) = MJ/تن محصول.

• فرمول کلیدی:

$$\frac{E_{\text{کل}}}{\text{تناژ محصول}} = \text{SEC}$$

- فرصت‌های بهبود: عایق‌کاری نسوزها، کنترل دقیق احتراق، بازیافت حرارت از گازهای خروجی.



۷. پمپ‌ها و فن‌ها

• شاخص‌ها:

• راندمان $\frac{Q \times H}{P}$ (برای پمپ).

• راندمان $\frac{Q \times \Delta P}{P}$ (برای فن).

• فرمول کلیدی:

$$\frac{Q \times H \times \rho \times g}{P_{\text{input}}} = \eta$$

• فرصت‌های بهبود: تنظیم پره‌ها، نصب VSD، حذف افت فشارهای غیرضروری.

جمع‌بندی

- در ممیزی انرژی صنعتی، هر تجهیز یک مرجع جداگانه برای محاسبه راندمان و فرصت بهبود دارد.
- داده‌های ممیزی معمولاً شامل: توان ورودی، محصول خروجی، وضعیت بهره‌برداری، و شرایط محیطی است.
- با استفاده از این شاخص‌ها، می‌توان پروفایل انرژی کارخانه را ترسیم و پروژه‌های کاهش مصرف را اولویت‌بندی کرد.

جدول ممیزی انرژی در یک نگاه

Equipment	Key Indicator	Main Formula	Improvement Opportunities
Boiler	Boiler efficiency, flue losses	$\eta = (\text{msteam} \times (\text{hsteam} - \text{hfeed})) / (\text{mfuel} \times \text{NCV})$	Insulation, O ₂ control, heat recovery
Compressed Air System	Compressor efficiency, leakage rate	$\eta = P_{\text{air}} / P_{\text{in}}$	Leak reduction, VSD, heat recovery
Electric Motors	Motor efficiency, Load Factor	Load Factor = Pactual / Prated	High efficiency motors, VSD, maintenance
Lighting System	Illuminance, LPD (W/m ²)	LPD = PLighting / A	LED, occupancy/daylight sensors
HVAC System	COP (Coefficient of Performance)	COP = Q / W	Chiller maintenance, BMS, heat recovery
Furnaces & Kilns	SEC (MJ/ton of product)	SEC = Etotal / Product output	Insulation, combustion control, heat recovery
Pumps & Fans	Hydraulic/Aerodynamic efficiency	$\eta = (Q \times H \times \rho \times g) / P_{\text{input}}$	VSD, impeller optimization, pressure drop reduction



جدول مرجع سریع ممیزی انرژی براساس تجهیزات

	فرمول اصلی	شاخص کلیدی	تجهیز	فرصت‌های بهبود
1	$\eta = (m_{\text{steam}} \times (h_{\text{steam}} - h_{\text{feed}})) / (m_{\text{fuel}} \times \text{NCV})$	راندمان دیگ، تلفات دودکش	دیگ بخار (Boiler)	عایق کاری، کنترل O_2 ، بازیافت حرارت
2	$\eta = P_{\text{هوای}} / P_{\text{ورودی}}$	راندمان کمپرسور، درصد نشتی	سیستم هوای فشرده	کاهش نشتی، VSD، بازیافت حرارت
3	Load Factor = $P_{\text{نامی}} / P_{\text{واقعی}}$	راندمان موتور، Load Factor	موتورهای الکتریکی	موتور راندمان بالا، اینورتر، نگهداری
4	$\text{LPD} = P_{\text{Lighting}} / A$	شدت روشنایی، LPD (W/m^2)	سیستم روشنایی	سنسور حضور و LED، نور طبیعی
5	$\text{COP} = Q / W$	(ضریب عملکرد) COP	سیستم HVAC	نگهداری چیلر، BMS، بازیافت حرارت
6	$\text{SEC} = E_{\text{تناژ}} / \text{محصول}$	SEC (MJ/ton محصول)	کوره‌ها و فرآیندهای حرارتی	عایق کاری، کنترل احتراق، بازیافت حرارت
7	$\eta = (Q \times H \times \rho \times g) / P_{\text{input}}$	راندمان هیدرولیکی/آیرودینامیکی	پمپ‌ها و فن‌ها	VSD، بهینه‌سازی پره‌ها، کاهش افت فشار



"فن آوری انرژی خورشیدی"

چالش‌های زیست‌محیطی و رویکرد سبز در مدیریت چرخه عمر آن



محتوای بسته آموزشی و توجیهی:

صفحه	پیوست‌ها	صفحه	عنوان
۲۱	اول: تحلیل اثرات زیست‌محیطی نیروگاه‌های خورشیدی بر منابع طبیعی/چالش‌ها و راهکارها	۲	مقدمه و ضرورت موضوع
۲۴	دوم: مراجع علمی معتبر درباره نرخ کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی	۳	فرآیند تولید و نصب انرژی خورشیدی از زبان محیط‌زیست
۲۵	سوم: پنل‌های خورشیدی در پایان عمر مفید	۵	معرفی فناوری خورشیدی و مفاهیم ناترازی
۲۷	چهارم: بازیافت پنل‌های خورشیدی و چالش‌های آن	۸	تحلیل محیط‌زیستی نصب پنل فتوولتائیک
۲۹	مراجع علمی برای چالش‌های بازیافت پنل‌های خورشیدی	۱۰	نقد علمی و زیست‌محیطی
۳۰	پنجم: مراحل مختلف تولید، نصب، و نگهداری نیروگاه خورشیدی/مراجع علمی	۱۱	منابع علمی و گزارش‌های معتبر
۳۴	ششم: زمین زراعی و تعداد پنل‌های خورشیدی	۱۳	کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی در گذر زمان
۳۶	هفتم: استانداردهای واردات پنل خورشیدی	۱۷	مراجع علمی اثبات کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی
۳۸	نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای واردات پنل خورشیدی به ایران و مراجع علمی	۱۸	مثال‌های بین‌المللی و وضعیت ایران
۳۹	هشتم: راندمان پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک	۲۰	چگونه کشورهای پیشرفته چالش‌های زیست‌محیطی را مدیریت می‌کنند؟
۴۱	نهم: روش‌های تست راندمان پنل‌های فتوولتائیک		

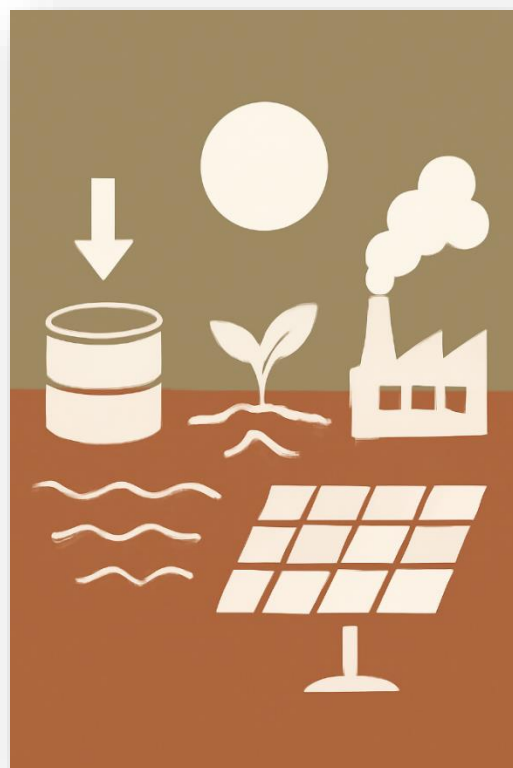
مقدمه و ضرورت موضوع

در دهه‌های اخیر، جهان با چالش‌های فزاینده‌ای در مدیریت منابع حیاتی چون آب، خاک و انرژی مواجه شده است؛ چالش‌هایی که در ادبیات محیط‌زیستی تحت عنوان «ناترازی منابع» شناخته می‌شوند. ناترازی به معنای عدم تعادل میان مصرف و ظرفیت بازسازی منابع طبیعی است و پیامدهای آن، از کمبود آب‌های زیرزمینی تا آلودگی گسترده خاک و هوا، امروزه گریبان‌گیر بسیاری از جوامع به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک شده است.

در چنین شرایطی، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه انرژی خورشیدی، به عنوان راهکاری برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و مقابله با تغییرات اقلیمی مطرح شده است. اما در کنار این مزایا، گسترش سریع و گسترده فناوری خورشیدی بدون ارزیابی دقیق پیامدهای جانبی آن، می‌تواند خود به‌عنوان عاملی برای تعمیق **ناترازی‌های جدید** مطرح شود. مصرف آب برای شست‌وشوی پنل‌ها، اشغال اراضی کشاورزی، اختلال در ریزاقلیم خاک، کاهش تنوع زیستی، و تولید پسماندهای صنعتی در پایان عمر پنل‌ها، تنها بخشی از این چالش‌هاست.

از این‌رو، پرداختن به انرژی خورشیدی نباید صرفاً از دریچه تولید انرژی پاک نگریسته شود، بلکه نیازمند یک نگاه چندبعدی و بین‌رشته‌ای است؛ نگاهی که در آن «**پایداری**» نه‌تنها به معنای کاهش گازهای گلخانه‌ای، بلکه به معنای حفظ تعادل اکولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی در سطح محلی و ملی تعریف شود.

ضرورت این بسته آموزشی و توجیهی از همین نیاز نشأت می‌گیرد: توانمندسازی مدیران، کارشناسان و تصمیم‌گیران برای درک عمیق‌تر و جامع‌تر از چالش‌ها، فرصت‌ها و مسئولیت‌های ناشی از توسعه فناوری‌های خورشیدی در ایران. **این بسته برای** مدیران پروژه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر- کارشناسان محیط‌زیست، آب و خاک-مشاوران توسعه پایدار-فعالان بخش خصوصی حوزه انرژی خورشیدی-سازمان‌های دولتی و NGO ها و غیره کاربردی است.



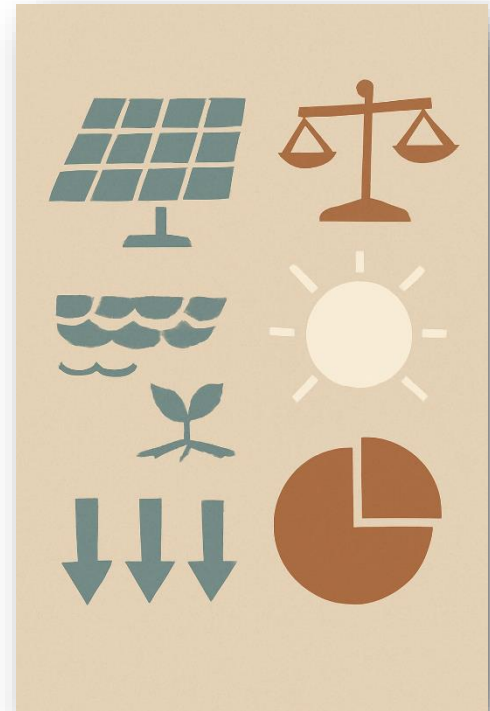
فرآیند تولید و نصب انرژی خورشیدی از زبان محیط زیست

تولید و نصب سیستم‌های خورشیدی شامل مراحل است که در هر کدام می‌توان با انواع مختلف پسماندها، پساب‌ها و گازهای گلخانه‌ای مواجه شد. برای درک بهتر این موضوع، فرایند تولید و نصب پنل‌های خورشیدی و چالش‌های مرتبط با آن به‌ویژه برای یک نیروگاه خورشیدی یک مگاواتی توضیح داده می‌شود.

۱- فرآیند تولید پنل‌های خورشیدی

اولین گام در تولید انرژی خورشیدی، تولید پنل‌های خورشیدی است که از سیلیکون به‌عنوان ماده اصلی استفاده می‌کنند. در این فرآیند، به‌ویژه در تولید پنل‌های فتوولتائیک سیلیکونی، مواد مختلفی مصرف می‌شود که باعث تولید پسماند، پساب و گازهای گلخانه‌ای می‌شود.

پسماندها و پساب‌ها در فرآیند تولید:



- **پسماندهای سیلیکونی:** تولید سیلیکون از مواد اولیه مانند سیلیکات‌های فلزی نیازمند فرآیندهای انرژی‌بر و تولید مواد زائد است. در این فرآیند، مواد شیمیایی سمی و فلزات سنگین مانند **کادمیوم** ممکن است به محیط زیست وارد شوند.

- **پساب‌های شیمیایی:** در تولید سلول‌های خورشیدی، استفاده از مواد شیمیایی خاص برای تمیزکاری و آماده‌سازی پنل‌ها ضروری است که این مواد در صورت مدیریت نشدن صحیح می‌توانند به آب‌های زیرزمینی نشت کرده و به آلودگی منابع آبی منجر شوند.
- **گازهای گلخانه‌ای:** تولید پنل‌های خورشیدی به انرژی زیادی نیاز دارد، و در صورتی که از منابع انرژی فسیلی برای تأمین این انرژی استفاده شود، می‌تواند به تولید گازهای گلخانه‌ای مانند **دی‌اکسید کربن (CO₂)** و **مونوکسید کربن** منجر شود.

مقدار گازهای گلخانه‌ای تولیدی در فرآیند تولید:

- براساس برخی مطالعات، تولید هر کیلووات ساعت برق از انرژی خورشیدی در مراحل تولید پنل‌ها به‌طور متوسط ۲۰۰ تا ۳۰۰ گرم CO₂ تولید می‌کند. بنابراین برای تولید ۱ مگاوات ظرفیت خورشیدی (که معادل ۱۰۰۰ کیلووات است)، در مجموع ممکن است حدود ۲۰۰,۰۰۰ تا ۳۰۰,۰۰۰ کیلوگرم CO₂ در فرآیند تولید پنل‌ها تولید شود.

۲- نصب نیروگاه خورشیدی

مرحله بعدی نصب پنل‌های خورشیدی است. این مرحله خود شامل نصب پنل‌ها، سیم‌کشی، ساختارهای نگهدارنده و تجهیزات جانبی است.





پسماندها و پساب‌ها در نصب:

- **پسماند ساخت‌وساز:** در نصب پنل‌ها و ساخت زیرساخت‌های مربوطه، پسماندهایی مانند قطعات فلزی و پلاستیکی، جعبه‌های بسته‌بندی و باقی‌مانده‌های مواد مصرفی تولید می‌شود.
- **آلودگی‌های ناشی از حمل و نقل:** حمل و نقل پنل‌ها از کارخانه به محل نصب نیز باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود، به‌ویژه اگر از وسایل نقلیه آلاینده استفاده شود.

۳- بهره‌برداری و تولید انرژی خورشیدی

پس از نصب سیستم‌های خورشیدی، این سیستم‌ها برق تولید می‌کنند و به شبکه توزیع انرژی وارد می‌شود. این مرحله به‌طور کلی تقریباً هیچ پسماند و گاز گلخانه‌ای تولید نمی‌کند و به همین دلیل، یکی از مزایای بزرگ انرژی خورشیدی نسبت به سایر منابع انرژی است.

پسماندها و پساب‌ها در بهره‌برداری:

- **پسماندهای نگهداری:** با گذر زمان، پنل‌ها ممکن است نیاز به تعمیرات یا نگهداری داشته باشند که می‌تواند منجر به تولید پسماندهای شیمیایی خاص مانند روغن‌ها، روان‌سازها و دیگر مواد مصرفی شود.
- **پساب‌های شست‌وشو:** در برخی مناطق، شست‌وشوی پنل‌ها برای حفظ عملکرد آن‌ها ضروری است. این فرآیند ممکن است به مصرف آب و تولید پساب‌های آلوده منتهی شود، به‌ویژه اگر مواد شیمیایی برای شست‌وشو استفاده شوند.

۴- پایان عمر پنل‌های خورشیدی

پنل‌های خورشیدی معمولاً عمر مفیدی بین ۲۰ تا ۳۰ سال دارند. پس از پایان عمر، پنل‌ها باید بازیافت یا دفع شوند.

پسماندها و پساب‌ها در پایان عمر:

- **پسماندهای شیمیایی:** در صورت عدم بازیافت صحیح پنل‌های خورشیدی، مواد شیمیایی سمی مانند **کادمیوم**، سرب و سایر فلزات سنگین می‌توانند وارد محیط زیست شوند.
- **فرآیند بازیافت:** بازیافت پنل‌های خورشیدی به‌ویژه پنل‌های سیلیکونی نیازمند فناوری‌های خاص است که خود ممکن است باعث تولید گازهای گلخانه‌ای و پسماند شود. اگر بازیافت به درستی انجام نشود، این پسماندها می‌توانند به آلودگی محیط‌زیست منجر شوند.

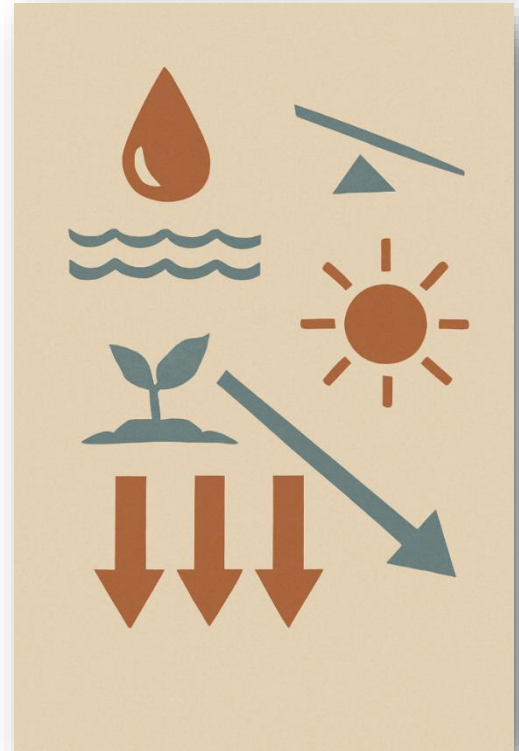
نتیجه‌گیری: در مجموع، تولید و نصب یک نیروگاه خورشیدی با ظرفیت ۱ مگاوات ممکن است به تولید پسماند، پساب، و گازهای گلخانه‌ای منجر شود. البته، پس از نصب، پنل‌های خورشیدی در طول بهره‌برداری خود تقریباً بدون آلودگی و گاز گلخانه‌ای هستند. به همین دلیل، نیاز به توسعه فناوری‌های بهتر برای کاهش اثرات منفی مراحل تولید، نصب و بازیافت پنل‌ها داریم. این تکنولوژی در مجموع به کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و کاهش آلودگی در بلندمدت کمک می‌کند، اما باید به مدیریت مناسب چرخه عمر آن‌ها توجه کنیم.



معرفی فناوری خورشیدی و مفاهیم ناترازی

۱- انواع پنل‌ها و فناوری‌های فتوولتائیک

(Solar Photovoltaic Technologies)



پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک (PV) یکی از مهم‌ترین فناوری‌های تولید برق از انرژی خورشیدی هستند. این پنل‌ها از سلول‌های فتوولتائیک ساخته شده‌اند که با دریافت تابش نور خورشید، انرژی خورشیدی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. انواع مختلفی از پنل‌های خورشیدی وجود دارند که به لحاظ فناوری، عملکرد و کاربری تفاوت‌هایی دارند:

- **پنل‌های سیلیکونی مونوکریستالی (Monocrystalline Silicon Panels):** این پنل‌ها از سیلیکون خالص ساخته می‌شوند و به دلیل ساختار یکنواخت و کارایی بالا، بیشترین بازده را دارند. این پنل‌ها معمولاً در پروژه‌های بزرگ و سیستم‌های خانگی استفاده می‌شوند.

- **پنل‌های سیلیکونی پلی‌کریستالی (Polycrystalline Silicon Panels):** این پنل‌ها از سیلیکون ذوب‌شده ساخته می‌شوند و به نسبت پنل‌های مونوکریستالی هزینه کمتری دارند، اما بازده انرژی آن‌ها کمی پایین‌تر است. این پنل‌ها بیشتر برای کاربردهای وسیع و پروژه‌های بزرگ مناسب هستند.

- **پنل‌های فیلم نازک (Thin-Film Panels):**

این پنل‌ها به دلیل وزن سبک و انعطاف‌پذیری بالا، در شرایط خاص مانند سقف‌های منحنی یا فضاهای با محدودیت‌های ساختاری مفید هستند. اما معمولاً بازده کمتری دارند.

- **پنل‌های هتروژنی (Heterojunction Cells, HJT):**

فناوری نوینی که در آن از لایه‌های مختلف مواد استفاده می‌شود تا عملکرد بهتری را در جذب نور و تبدیل آن به انرژی الکتریکی فراهم کند.

- **پنل‌های با کارایی بالا (Bifacial Panels):**

این پنل‌ها قادر به جذب نور از هر دو طرف هستند و می‌توانند نور منعطف از زمین یا سطوح اطراف را نیز جذب کنند. این ویژگی باعث افزایش بازده در فضاهای خاص می‌شود.

در کنار این‌ها، پنل‌های خورشیدی متمرکز (CSP) برای استفاده در مناطق با تابش خورشید زیاد، طراحی شده‌اند که از آینه‌ها یا لنزهای مخصوص برای متمرکز کردن نور خورشید و تولید برق استفاده می‌کنند.

۲- ناترازی منابع انرژی، آب، خاک و تبعات آن

ناترازی منابع به معنای ناتوانی یا عدم تعادل میان مصرف منابع طبیعی و ظرفیت محیط زیست برای بازسازی یا جذب آنهاست. این بحران‌ها نه تنها منجر به فشار بر منابع طبیعی می‌شود، بلکه می‌تواند به مشکلات عمده زیست‌محیطی و اجتماعی منجر گردد. در زمینه انرژی خورشیدی، ناترازی‌ها در چهار بخش اصلی زیر مشاهده می‌شود:

• ناترازی منابع انرژی:

با افزایش مصرف جهانی انرژی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، فشار بر منابع انرژی فسیلی افزایش یافته است. برای مقابله با این فشار، انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر انرژی خورشیدی به‌عنوان یک راه‌حل پایدار پیشنهاد می‌شود. با این حال، توسعه بی‌رویه نیروگاه‌های خورشیدی بدون ارزیابی دقیق، می‌تواند مشکلات جدیدی در تأمین منابع آب و خاک ایجاد کند.

در راستای اثبات مفهوم «ناترازی منابع انرژی»، مراجع علمی و گزارش‌های معتبر بین‌المللی به وضوح نشان می‌دهند که افزایش تقاضای جهانی انرژی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، در کنار کاهش منابع فسیلی و چالش‌های زیرساختی، منجر به بحران‌های انرژی و ناترازی در تأمین آن شده است. در ادامه، برخی از این منابع معتبر ارائه می‌شود:

• ناترازی منابع آب:

تولید و نصب پنل‌های خورشیدی در بسیاری از مناطق نیازمند مصرف زیاد آب برای شست‌وشو و تمیزکاری پنل‌ها است. در مناطقی با منابع آب محدود، این مسئله می‌تواند فشار بیشتری بر منابع آبی وارد کند. همچنین، در فرآیند تولید پنل‌ها، به‌ویژه در بخش‌های شیشه و مواد اولیه، مصرف آب زیاد است.

• ناترازی منابع خاک:

نصب پنل‌های خورشیدی به‌ویژه در زمین‌های کشاورزی یا مناطق طبیعی می‌تواند به تغییرات قابل توجهی در ریزاقلیم خاک (microclimate) و کاهش تنوع زیستی منجر شود. این تغییرات به‌ویژه در مناطقی با کمبود منابع آب یا زمین‌های حساس می‌تواند اثرات منفی جدی داشته باشد. در مناطق خشک، تغییرات در رطوبت خاک، دما و حتی کیفیت خاک می‌تواند به فرسایش و کاهش تولیدات کشاورزی منتهی شود.

توضیح تکمیلی: یکی از پیامدهای نصب پنل‌های فتوولتائیک (خورشیدی) در زمین‌های کشاورزی یا مناطق طبیعی، ایجاد تغییرات در ریزاقلیم (microclimate) زیر پنل‌ها است. این تغییرات ممکن است باعث رشد گیاهانی مثل گلسنگ، خزه یا حتی علف‌های مقاوم به سایه و رطوبت شود — اما بستگی به شرایط محلی و نوع نصب دارد.

جزئیات فنی و دلایل:

پنل‌های خورشیدی هنگام نصب بر روی زمین، بسته به زاویه و ارتفاع‌شان، شرایط متفاوتی را در زیر خود ایجاد می‌کنند:

۱- تغییر الگوی نور:

- زیر پنل‌ها نور کمتری دریافت می‌شود، اما این نور صفر نیست. نور پخش‌شده یا منعکس‌شده از خاک و سطح پنل همچنان وجود دارد.
- این نور می‌تواند برای گیاهان سایه‌پسند مناسب باشد.

۲- افزایش رطوبت نسبی زیر پنل‌ها:

- کاهش تابش مستقیم و تبخیر باعث نگه‌داشت بیشتر رطوبت خاک در زیر پنل‌ها می‌شود.
- این شرایط باعث رشد خزه‌ها، قارچ‌ها یا حتی جلبک‌ها در برخی مناطق می‌شود.

۳- تغییر دمای سطحی:

- سطح پنل‌ها گرم می‌شود، اما زیر آن‌ها دمای خاک ممکن است خنک‌تر بماند، مگر اینکه جریان هوای مناسبی نباشد.
 - بسته به شرایط نصب، ممکن است دمای نقطه‌ای در زیر پنل‌ها بالاتر برود، اما معمولاً به دلیل سایه، میانگین دما کمتر از مناطق آفتابی است.
- نتیجه‌گیری: افزایش رشد گیاهان خاص یا "گل‌سنگ"‌ها زیر پنل‌های خورشیدی ممکن است رخ دهد، اما علت اصلی آن معمولاً افزایش رطوبت و کاهش نور مستقیم است، نه گرمای تابشی پنل‌ها.

اگر بررسی اثرات محیط‌زیستی نصب پنل‌های فتوولتائیک است، می‌توان به موارد زیر هم اشاره کرد:

- بهبود نگهداری رطوبت خاک
- امکان ترکیب با کشت خورشیدی (agrivoltaics)
- کاهش فرسایش خاک
- اما در مقابل، احتمال تغییر ترکیب اکولوژیک منطقه نیز وجود دارد



تحلیل محیط‌زیستی نصب پنل فتوولتائیک

۱. موقعیت جغرافیایی (استان، شهرستان یا مختصات حدودی):
 - برای تعیین اقلیم، شدت تابش خورشید، میزان بارندگی و دمای میانگین.
۲. نوع زمین (کشاورزی، بیابانی، مرتعی، صنعتی و ...):
 - آیا قبلاً زیر کشت بوده یا کاربری طبیعی داشته است؟
۳. نوع نصب پنل‌ها:
 - ثابت (fixed) یا گردان (tracking)
 - زاویه و ارتفاع پنل‌ها از سطح زمین چقدر است؟
۴. اندازه سطح تحت پوشش پنل‌ها:
 - در هکتار یا مترمربع.
۵. نوع خاک و پوشش گیاهی موجود قبل از نصب:
 - مثلاً خاک رسی، شنی، قهوه‌ای و ... + آیا گیاهی وجود داشته؟



۶. آب‌وهوای عمومی منطقه:

- خشک، نیمه‌خشک، مرطوب یا کوهستانی؟

۷. هدف شما از نصب:

- فقط تولید برق؟
- یا ترکیب با کشاورزی (agrivoltaics)؟

یک مثال و نمونه:

در منطقه فولادشهر (استان اصفهان، محدوده فولاد مبارکه) که اقلیمی نیمه خشک تا خشک دارد، نصب پنل‌های فتوولتائیک احتمالاً باعث افزایش نگهداشت رطوبت در خاک زیر پنل‌ها، کاهش دمای سطحی خاک، و تغییر ترکیب پوشش گیاهی موضعی می‌شود. همچنین ممکن است زمینه‌ای برای رشد گیاهان سایه‌پسند و مقاوم به خشکی فراهم شود.

تحلیل دقیق بر اساس مشخصات منطقه فولادشهر:

۱- اقلیم:

- نیمه خشک، بارش کم، تبخیر بالا، تابش خورشید زیاد.
- خاک‌ها اغلب آهکی یا رسی با زهکشی متوسط تا ضعیف.

۲- تأثیر نصب پنل‌ها بر خاک:

مورد	اثر
رطوبت خاک	سایه پنل‌ها تبخیر را کاهش می‌دهد → خاک زیر پنل‌ها رطوبت بیشتری نگه می‌دارد. در مناطق کم‌باران مثل فولادشهر، این رطوبت نسبی می‌تواند محسوس باشد.
دما	دمای خاک زیر پنل‌ها در روز کمتر می‌شود (به دلیل سایه)، اما در شب ممکن است اختلاف دمای شدیدتری با اطراف ایجاد شود.
فرسایش بادی	پنل‌ها می‌توانند تا حدودی جلوی فرسایش بادی سطح خاک را بگیرند، مخصوصاً اگر زمین برهنه باشد.
پوشش گیاهی جدید	گیاهانی که نیاز به نور زیاد ندارند یا به رطوبت حساس نیستند (مثل برخی علف‌های مقاوم یا خزه‌ها) ممکن است زیر پنل‌ها ظاهر شوند. در مناطق صنعتی، گل‌سنگ‌ها و جلبک‌های خاکی هم ممکن است رشد کنند.
آلودگی حرارتی یا شیمیایی؟	اگر پنل‌ها در نزدیکی فعالیت‌های صنعتی فولاد باشند، گرد و غبار صنعتی یا آلودگی‌های هوا ممکن است به مرور زمان بر خاک بنشینند، اما این اثر مستقیم نصب پنل نیست، بلکه اثر مجاورت با صنعت است.

نکات مهم:

- در منطقه‌ای مثل فولادشهر، استفاده از پنل‌ها به عنوان سایه‌ساز برای پوشش گیاهی خاص یا کشت خورشیدی (agrivoltaics) می‌تواند کاربردی باشد.
- برای جلوگیری از رشد گیاهان ناخواسته زیر پنل‌ها (که ممکن است در سیستم‌های صنعتی مشکل ساز شوند)، معمولاً از آستر ژئوتکستایل یا شن‌ریزی کف استفاده می‌شود.
- نصب پنل‌های بلندتر از ۱ متر از سطح زمین، باعث جریان بهتر هوا و کاهش تجمع گرما و رطوبت می‌شود.



نقد علمی و زیست محیطی

۱- رشد گیاه زیر پنل ≠ احیای اکوسیستم

- پنل خورشیدی با ایجاد سایه، فقط شرایط رطوبتی و نوری جدیدی فراهم می کند. بله، گیاهانی مثل خزه، گل سنگ، یا علف های سایه پسند ممکن است رشد کنند، اما این ها:

- تنوع زیستی پایین تری دارند نسبت به پوشش طبیعی بومی منطقه.
- معمولاً گیاهان فرصت طلب هستند که جایگزین اکوسیستم اصلی نمی شوند.
- ممکن است تهاجمی یا بی مصرف از نظر اکولوژیک باشند.

۲- قطع ارتباط خاک با اکوسیستم طبیعی

- نصب پنل ها در سطح وسیع باعث:
- قطع چرخه های طبیعی نوری و آبی خاک
- کاهش فعالیت میکروبی خاک
- اختلال در زیستگاه جانوران کوچک (حشرات، خزندگان، پرندگان زمینی) می شود.



۳- اثر جزیره گرمایی معکوس (Reverse heat island)

- در روز، سایه باعث کاهش دمای سطح خاک می شود.
- اما در شب، ساختار فلزی پنل ها گرما را آزاد می کند → تغییر در ریتم دمایی طبیعی خاک و هوا که می تواند برای گونه های بومی مضر باشد.

۴- استفاده از مصالح مهندسی شده برای کنترل رشد گیاه

- در بسیاری از سایت های صنعتی، برای کنترل رشد گیاه از مواردی مثل:
- ژئوتکستایل ها
- مواد شیمیایی ضد علف
- شن ریزی و آسفالت جزئی
- استفاده می شود → این باعث مرگ کامل پوشش گیاهی طبیعی و تبدیل خاک به زیست ناپذیر می شود.

۵- آثار غیرمستقیم بر تنوع زیستی منطقه

- وقتی زمین به انرژی خورشیدی اختصاص می یابد:
 - مسیر عبور حیات وحش قطع می شود.
 - محیط ناهمخوان با نیاز پرندگان یا حشرات گرده افشان ایجاد می شود.
 - تشکیل اکوسیستم مصنوعی کم تنوع و ناپایدار رخ می دهد.
- نتیجه گیری انتقادی: رشد گیاه زیر پنل لزوماً نشانه بازگشت طبیعت نیست، بلکه گاهی نشانه یک اکوسیستم مصنوعی و ناقص است که توان پشتیبانی از چرخه های زیستی طبیعی را ندارد.



منابع علمی و گزارش‌های معتبر

برای اثبات مفهوم «ناترازی منابع آب»، مراجع علمی و گزارش‌های معتبر بین‌المللی به وضوح نشان می‌دهند که افزایش تقاضای جهانی آب، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، در کنار کاهش منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، منجر به بحران‌های آب و ناترازی در تأمین آن شده است. در ادامه، برخی از این منابع معتبر ارائه می‌شود:

1. IEA (International Energy Agency) – Solar PV and the Environment

این گزارش از آژانس بین‌المللی انرژی به بررسی تأثیرات زیست‌محیطی انرژی خورشیدی می‌پردازد و اشاره دارد که توسعه بی‌رویه نیروگاه‌های خورشیدی بدون ارزیابی مناسب می‌تواند به مشکلات جدیدی در زمینه مصرف آب و استفاده از اراضی کشاورزی منتهی شود.

- لینک به گزارش: [IEA - Solar PV and the Environment](#)

2. UCS (Union of Concerned Scientists) – Environmental Impacts of Solar Power

گزارش UCS نشان می‌دهد که اگرچه انرژی خورشیدی از لحاظ تولید انرژی پاک است، اما نصب نیروگاه‌های خورشیدی در مناطق خاص مانند زمین‌های کشاورزی می‌تواند منجر به تغییرات اکولوژیکی، کاهش تنوع زیستی، و آسیب به خاک و منابع آبی شود.

- لینک به گزارش: [UCS - Environmental Impacts of Solar Power](#)

3. Paper by M. S. Islam et al. (2020) – Environmental impacts of large-scale solar photovoltaic power plants in arid regions: A review

این مقاله علمی اثرات زیست‌محیطی نصب نیروگاه‌های خورشیدی در مناطق خشک و نیمه‌خشک را بررسی کرده و به چالش‌هایی مانند تغییرات در ریزاقلیم و فشار بر منابع آبی اشاره می‌کند.

- لینک به مقاله: [Environmental impacts of large-scale solar photovoltaic power plants](#)

4. Journal of Environmental Management (2019) – The impact of solar energy development on the environment and land use

این مقاله اثرات توسعه انرژی خورشیدی بر محیط‌زیست و استفاده از زمین را بررسی کرده و به خطرات بالقوه در مورد تغییرات اکولوژیکی و رقابت با زمین‌های کشاورزی اشاره می‌کند.

- لینک به مقاله: [The impact of solar energy development on the environment and land use](#)

5. ResearchGate – Environmental implications of solar PV installations on agricultural land

این مطالعه بررسی می‌کند که چگونه نصب پنل‌های خورشیدی بر اراضی کشاورزی می‌تواند اثرات متفاوتی بر خاک و آب داشته باشد، از جمله کاهش توان تولیدی خاک و افزایش نیاز به منابع آبی برای نگهداری نیروگاه‌ها.

- لینک به مقاله: [Environmental implications of solar PV installations](#)

6. National Renewable Energy Laboratory (NREL) – Land Use in the Development of Solar Energy

این گزارش از NREL بر چالش‌های مرتبط با استفاده از زمین برای نصب پنل‌های خورشیدی تأکید دارد و اینکه چگونه باید از اراضی کشاورزی یا زیست‌محیطی برای چنین پروژه‌هایی به‌طور بهینه استفاده کرد.

- لینک به گزارش: [NREL - Land Use in the Development of Solar Energy](#)



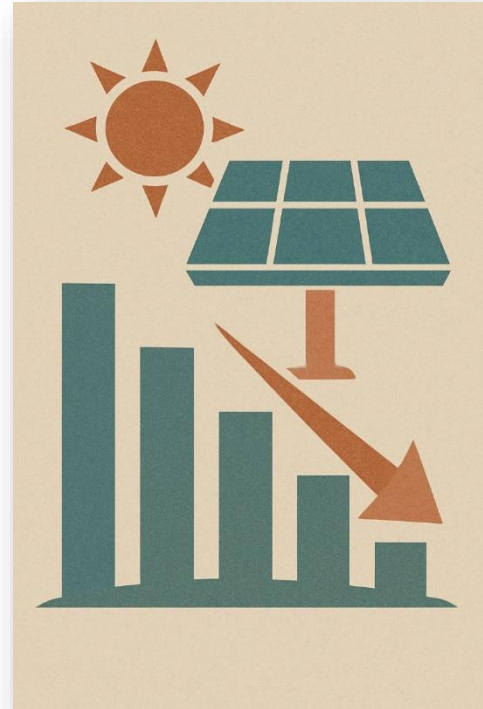
کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی در گذر زمان

پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک (PV) به‌طور کلی به مدت طولانی قادر به تولید انرژی هستند، اما میزان راندمان آن‌ها با گذر زمان کاهش می‌یابد. این کاهش راندمان به‌طور معمول به‌صورت تدریجی است و تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرد. کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی به عوامل مختلفی از جمله پیرشدگی، آسیب‌های فیزیکی، تغییرات دمایی، و تأثیرات محیطی بستگی دارد.

دلایل کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی:

مقدار کاهش راندمان:

مطالعات مختلف نشان می‌دهند که میانگین کاهش راندمان در پنل‌های خورشیدی بین ۰.۵٪ تا ۱٪ (در برخی از مراجع ۰.۳ تا ۰.۸ درصد و در برخی مراجع ۱/۵ تا ۲ درصد قید شده است. دلیل این اختلافها در کیفیت پنل‌های خورشیدی است) تا در سال است. برای مثال، در یک دوره ۲۰ ساله، ممکن است راندمان یک پنل خورشیدی حدود ۱۰٪ تا ۲۰٪ و حتی برخی از پنل‌ها تا ۴۰ درصد کاهش یابد، بسته به کیفیت پنل و شرایط محیطی.



۱. پیرشدگی طبیعی:

پنل‌های خورشیدی به‌طور طبیعی تحت تأثیر تابش UV، گرما، و تنش‌های حرارتی قرار می‌گیرند. این عوامل موجب تغییرات شیمیایی در مواد تشکیل‌دهنده پنل‌ها می‌شود که به کاهش عملکرد آن‌ها منجر می‌شود. به‌طور معمول، راندمان پنل‌ها به‌طور متوسط سالانه بین ۰.۵٪ تا ۱٪ کاهش می‌یابد.

۲. تغییرات دمایی و شوک‌های حرارتی:

تغییرات دمایی ناگهانی می‌تواند به‌ویژه در مناطق گرمسیری یا با نوسانات دمایی شدید موجب ترک‌خوردگی مواد پنل و آسیب به سلول‌ها شود. همچنین، این نوسانات می‌توانند باعث شکستن اتصالات درون پنل یا ایجاد شکاف‌هایی در شیشه پنل‌ها شوند.

۳. آسیب فیزیکی:

عوامل محیطی مانند گرد و غبار، باران‌های اسیدی، یا حتی تگرگ می‌توانند به سطح پنل آسیب برسانند و به کاهش عملکرد آن‌ها کمک کنند.

۴. آسیب ناشی از رطوبت:

نفوذ رطوبت به پنل‌ها، به‌ویژه در مناطق مرطوب، می‌تواند باعث خوردگی اجزای داخلی پنل و کاهش طول عمر آن‌ها شود. این امر به‌ویژه در شرایطی که کیفیت مواد اولیه پایین باشد، خطرناک‌تر است.

۵. پدیده (PID) (Potential Induced Degradation):

این پدیده که معمولاً در پنل‌های خورشیدی با ولتاژ بالاتر اتفاق می‌افتد، می‌تواند موجب کاهش کارایی پنل‌ها شود. در این پدیده، اختلاف پتانسیل میان قاب و سلول‌ها باعث افت کارایی در طول زمان می‌شود.

⚠️ دلایل آسیب دیدگی یا کاهش عملکرد پنل‌ها

علت	توضیح
پیرشدگی طبیعی	افت تدریجی عملکرد به دلیل تابش UV، گرما و تنش‌های حرارتی؛ معمولاً سالیانه ۰.۵٪ تا ۱٪ کاهش.
رطوبت و نفوذ آب	نفوذ آب در مناطق مرطوب باعث خوردگی داخلی و کاهش ایمنی می‌شود.
گرمای بیش از حد و شوک حرارتی	تغییرات دمایی ناگهانی موجب ترک خوردگی یا از بین رفتن اتصالات می‌شود.
آسیب فیزیکی	تگرگ، باد یا سقوط اشیاء می‌تواند شیشه پنل را بشکند.
نقص در اتصالات یا اینورتر	اتصالات اکسید یا شل می‌شوند؛ خرابی اینورترها نیز عملکرد کلی را مختل می‌کند.
پدیده PID	افت ناگهانی کارایی ناشی از ولتاژ بالا و اختلاف پتانسیل بین سلول و قاب پنل.

پیامدهای زیست‌محیطی انرژی خورشیدی در مناطق خشک

ردیف	محور	توضیحات	چالش و اثرات منفی
۱	پساب و مدیریت آب	شست‌وشوی دوره‌ای پنل‌ها نیازمند آب فراوان است، مخصوصاً در مناطق خشک.	فشار بر منابع آب زیرزمینی، افزایش برداشت غیرمجاز آب، تخلیه پساب با ذرات ریز روی خاک
۲	انتشار گازهای گلخانه‌ای غیرمستقیم	تولید، حمل‌ونقل و نصب پنل‌ها با مصرف انرژی بالا همراه است.	انتشار CO ₂ در زنجیره تأمین، وابستگی به معادن کمیاب با آلاینده‌گی بالا
۳	اثر بر خاک و ریزاقلیم Microclimate	سایه‌سازی موضعی باعث افزایش رطوبت نسبی، کاهش دمای روز و اختلال در ریتم دمایی طبیعی خاک می‌شود.	رشد پوشش گیاهی ناسازگار، توقف چرخه تنفس خاک، کاهش تنوع میکروارگانیسم‌های خاک
۴	تنوع زیستی و حیات وحش	نصب پنل‌ها باعث قطع مسیرهای زیستی می‌شود.	کاهش گونه‌های گرده‌افشان، اختلال در مسیر کوچ پرندگان، ایجاد اکوسیستم مصنوعی کم‌تنوع
۵	مواد و پسماندهای صنعتی	پنل‌ها عمر محدودی دارند و بازیافت‌شان دشوار و گران است.	تولید زباله الکترونیکی، فلزات سنگین، تهدید خاک در پایان عمر پنل‌ها



پیامدهای زیست‌محیطی انرژی خورشیدی در مناطق مرطوب

ردیف	محور	توضیحات	چالش و اثرات منفی
۱	پساب و آب مازاد	بارش‌های مکرر نیاز به شست‌وشو را کم می‌کند، اما زهکشی ناکافی در محل نصب پنل می‌تواند مشکل‌ساز شود	تجمع آب، فرسایش موضعی خاک، گندیدگی ریشه گیاهان بومی
۲	تأثیر بر پوشش گیاهی بومی	سایه‌سازی باعث حذف یا تضعیف گونه‌های بومی نورپسند می‌شود.	رقابت گونه‌های فرصت‌طلب، کاهش تنوع گیاهی، تخریب گیاهان جنگلی
۳	تغییر در زیستگاه‌ها	نصب پنل باعث تغییر ریزاقلیم و دمای سطحی خاک می‌شود.	فرار پرندگان و دوزیستان، قطع مسیر حرکت حیات وحش، کاهش گرده‌افشانی طبیعی
۴	اثر بر میکرو ارگانیسم‌های خاک	خاک مرطوب و سایه‌دار مستعد تغییر بافت زیستی است.	رشد قارچ‌ها و میکروبیوم غیرمفید، افت کیفیت خاک کشاورزی
۵	تضاد با کاربری جنگلی	زمین‌های کشاورزی یا جنگلی به کاربری انرژی تبدیل می‌شوند.	از دست رفتن قابلیت کشاورزی، تهدید گونه‌های وابسته به اکوسیستم طبیعی

چه زمانی تعویض پنل ضروری است؟

نشانه	توضیح
افت شدید بازده	وقتی عملکرد به زیر ۷۰٪ برسد، دیگر از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست.
ترک یا شکست فیزیکی	باعث ورود رطوبت و خطر برق‌گرفتگی می‌شود.
دفرمه شدن قاب یا اتصالات	باعث اختلال در چینش یا نایمینی سازه‌ای می‌شود.
افزایش هزینه نگهداری	زمانی که تعمیرات بیش از تولید اقتصادی ارزش داشته باشد.



مراجع علمی اثبات کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی:

1. National Renewable Energy Laboratory (NREL) – Long-term Performance of Photovoltaic Systems

- در این گزارش، NREL به بررسی کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی در گذر زمان پرداخته است و نتیجه گرفته است که پنل‌ها به‌طور متوسط در هر سال ۰.۵٪ تا ۱٪ کاهش راندمان دارند. این کاهش به دلیل تأثیرات طولانی‌مدت تابش خورشیدی، گرما، و آسیب‌های محیطی است.

- لینک به گزارش: [NREL - Long-term Performance](#)

2. Journal of Renewable and Sustainable Energy – Degradation Rates of Photovoltaic Modules

- این مقاله به بررسی نرخ‌های تخریب پنل‌های خورشیدی و علل مختلف کاهش راندمان آن‌ها پرداخته است. یافته‌ها نشان می‌دهد که علل مختلفی از جمله شرایط محیطی و تغییرات دمایی می‌توانند به کاهش راندمان در گذر زمان منجر شوند.

- لینک به مقاله: [Degradation Rates of Photovoltaic Modules](#)

3. Solar Energy – Degradation of Solar Modules

- در این مقاله علمی که در مجله "Solar Energy" منتشر شده است، به ارزیابی کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی و عوامل مختلف مؤثر در آن پرداخته شده است. نویسندگان این مقاله به تأثیرات طولانی‌مدت نور خورشید و دما بر مواد پنل‌ها اشاره کرده‌اند.

- لینک به مقاله: [Degradation of Solar Modules](#)

۴. Renewable Energy World – Photovoltaic Module Degradation

- در این مقاله، نویسندگان به جزئیات پیرامون پدیده PID و تأثیرات آن بر کاهش راندمان پنل‌ها پرداخته‌اند. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که در شرایط خاص، کاهش راندمان می‌تواند بیشتر از ۱٪ در سال باشد.

- لینک به مقاله: [Photovoltaic Module Degradation](#)

۵. SolarPower Europe – Annual Photovoltaic Report

- این گزارش به طور کلی به روند توسعه انرژی خورشیدی و تأثیرات آن بر محیط‌زیست و بهره‌وری اقتصادی پرداخته است. این گزارش نیز به کاهش راندمان پنل‌ها در گذر زمان به‌ویژه در پروژه‌های بزرگ اشاره می‌کند.

- لینک به گزارش: [SolarPower Europe - Annual Report](#)

نتیجه‌گیری: کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی در گذر زمان یک پدیده طبیعی است که به عوامل مختلفی از جمله تابش UV، گرما، آسیب‌های فیزیکی و رطوبت بستگی دارد. بر اساس گزارش‌های علمی معتبر، این کاهش راندمان به‌طور متوسط سالانه بین ۰.۵٪ تا ۱٪ (اختلاف در نوع پنلهایی است که بررسی شده اند) است. برای جلوگیری از تأثیرات منفی آن، نگهداری مناسب و ارزیابی‌های منظم سیستم‌های خورشیدی ضروری است.



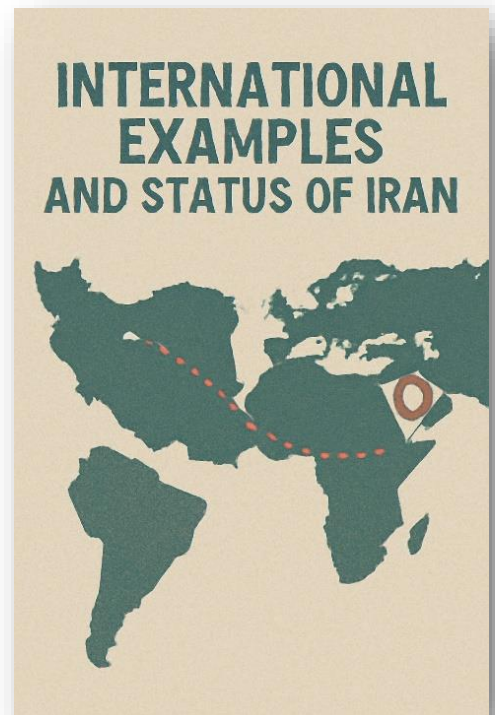
مثال‌های بین‌المللی و وضعیت ایران

مثال‌های بین‌المللی:

- در آلمان، یکی از پیشگامان در استفاده از انرژی خورشیدی، به دلیل ظرفیت بالای نصب پنل‌ها، نگرانی‌هایی در مورد اثرات آن‌ها بر تنوع زیستی و منابع آب ایجاد شده است. این کشور با به‌کارگیری فناوری‌های جدید و راه‌حل‌های ابتکاری مانند کشت خورشیدی (Agrivoltaics)، در تلاش است تا این چالش‌ها را کاهش دهد.
- در چین، با توجه به سرعت بالای رشد پروژه‌های خورشیدی، به ویژه در مناطق بیابانی، نگرانی‌هایی در مورد تأثیرات زیست‌محیطی از جمله تغییرات اکولوژیک و تهدید تنوع زیستی وجود دارد. پروژه‌های مختلفی برای کاهش این اثرات و استفاده از زمین‌های بی‌استفاده در حال انجام است.

وضعیت ایران:

ایران با دارا بودن تابش خورشیدی بسیار بالا در بسیاری از مناطق، پتانسیل زیادی برای توسعه انرژی خورشیدی دارد. اما استفاده گسترده از این انرژی می‌تواند به **ناترازی‌های جدید** در منابع آب، خاک و کشاورزی منتهی شود. در مناطقی مانند **سیستان و بلوچستان** یا **خوزستان**، که با کمبود منابع آبی مواجه هستند، توسعه بی‌ملاحظه نیروگاه‌های خورشیدی می‌تواند فشار بیشتری به منابع آبی وارد کند. همچنین، مشکلاتی مانند **فرسایش خاک** در مناطق خشک و بیابانی نیز ممکن است تشدید شود.



درک دقیقی از اهمیت فناوری خورشیدی، چالش‌های مرتبط با ناترازی منابع و ضرورت ارزیابی همه‌جانبه اثرات جانبی نصب نیروگاه‌های خورشیدی بدهد. به‌عنوان پایه‌ای برای آشنایی با راهکارهای عملیاتی و فن‌آوری‌های نوین در زمینه مدیریت منابع طبیعی و انرژی خورشیدی عمل کند. کشورهای پیشرفته با وجود سرمایه‌گذاری‌های کلان در حوزه انرژی خورشیدی، به خوبی از چالش‌ها و مشکلات این تکنولوژی آگاه هستند و در حال مدیریت و حل آن‌ها به روش‌های مختلف هستند. در اینجا به تفصیل توضیح می‌دهیم که چگونه این کشورها این چالش‌ها را مدیریت می‌کنند:

۱. کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی در گذر زمان:

یکی از چالش‌های اصلی انرژی خورشیدی کاهش تدریجی راندمان پنل‌ها در گذر زمان است. معمولاً راندمان پنل‌های خورشیدی به طور متوسط سالانه بین ۰.۳٪ تا ۰.۸٪ کاهش (توضیحات در قبل آمده است که چرا اعداد همسان نیستند) می‌یابد. کشورهای پیشرفته و شرکت‌های بزرگ انرژی در حال اتخاذ رویکردهایی برای کاهش این نرخ کاهش راندمان و افزایش طول عمر پنل‌ها هستند:

- پیشرفت‌های فناوری: کشورهای پیشرفته به طور مداوم در حال سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه (R&D) برای بهبود فناوری‌های پنل‌های خورشیدی هستند. این شامل ارتقای مواد سلول‌های خورشیدی مانند سیلیکون، بهبود ساختار پنل‌ها، و استفاده از تکنولوژی‌های نوین برای کاهش اثرات محیطی و افزایش طول عمر پنل‌ها است.
- ارزیابی و نگهداری منظم: شرکت‌های فعال در این حوزه در کشورهای پیشرفته، سیستم‌های نظارت و ارزیابی دقیقی را برای شناسایی مشکلات و انجام تعمیرات و نگهداری‌های لازم روی پنل‌ها پیاده‌سازی کرده‌اند. این اقدامات می‌تواند به طور قابل توجهی کاهش راندمان را کند کند.

۲. مدیریت پسماند و پساب:

یکی از چالش‌های اصلی دیگر در صنعت انرژی خورشیدی، مدیریت پسماندها و پساب‌هایی است که در فرآیند تولید پنل‌های خورشیدی ایجاد می‌شود. تولید پنل‌های خورشیدی، به‌ویژه پنل‌های سیلیکونی، شامل استخراج مواد معدنی، انرژی بر، و تولید پسماند است. این پسماندها می‌توانند شامل گازهای گلخانه‌ای و مواد شیمیایی خطرناک باشند.

چگونه کشورهای پیشرفته این چالش‌ها را حل می‌کنند؟

- بازیافت پنل‌های خورشیدی: یکی از رویکردهای مهم برای کاهش اثرات منفی پسماندهای پنل‌های خورشیدی، ایجاد فرآیندهای بازیافت به‌ویژه برای پنل‌های قدیمی و فرسوده است. در بسیاری از کشورهای پیشرفته، قوانینی برای بازیافت پنل‌های خورشیدی وضع شده است که به‌طور ویژه بر بازیافت مواد شیمیایی، فلزات سنگین و شیشه پنل‌ها تأکید دارد.
 - به عنوان مثال، در اتحادیه اروپا، سیستم **WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment)** برای بازیافت پنل‌های خورشیدی طراحی شده است.
- استفاده از تکنولوژی‌های سبز در فرآیند تولید: کشورهای پیشرفته به سمت استفاده از تکنولوژی‌های تولید پاک و کم‌پسماند حرکت کرده‌اند. این شامل استفاده از مواد بازیافتی برای ساخت پنل‌ها و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در فرآیند تولید است تا کاهش اثرات زیست‌محیطی را به حداقل برساند.

۳. انتشار گازهای گلخانه‌ای در فرایند تولید:

همانطور که می‌دانیم، تولید پنل‌های خورشیدی نیز گازهای گلخانه‌ای مانند CO₂ تولید می‌کند. این چالش برای تولید و فرآیندهای مرتبط با انرژی خورشیدی وجود دارد، به‌ویژه در مراحل اولیه تولید پنل‌ها.



چگونه کشورهای پیشرفته این چالش را مدیریت می‌کنند؟

- کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در فرایند تولید: یکی از راه‌های حل این مشکل، بهینه‌سازی فرآیندهای تولید پنل‌های خورشیدی است. بسیاری از کشورها به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در مراحل مختلف تولید پنل‌ها (از جمله کارخانه‌های تولید پنل‌های خورشیدی) حرکت کرده‌اند. این به کاهش میزان گازهای گلخانه‌ای در فرآیند تولید کمک می‌کند.
- به‌عنوان مثال، چین، که بزرگ‌ترین تولیدکننده پنل‌های خورشیدی جهان است، به‌طور فزاینده‌ای به استفاده از انرژی خورشیدی و بادی برای تأمین انرژی کارخانه‌های خود روی آورده است.

- استانداردها و سیاست‌های زیست‌محیطی: کشورهای پیشرفته برای کاهش اثرات منفی تولید انرژی خورشیدی، استانداردهای زیست‌محیطی خاصی را در نظر گرفته‌اند. این استانداردها به طور خاص بر انتشار گازهای گلخانه‌ای، استفاده از مواد کم‌اثر و بهبود بهره‌وری انرژی در کارخانه‌ها تأکید دارند.
- برای مثال، آلمان از تکنولوژی‌های نوینی مانند سلیکون‌های پایدار و روش‌های جدید تولید پنل خورشیدی به‌طور خاص استفاده می‌کند.

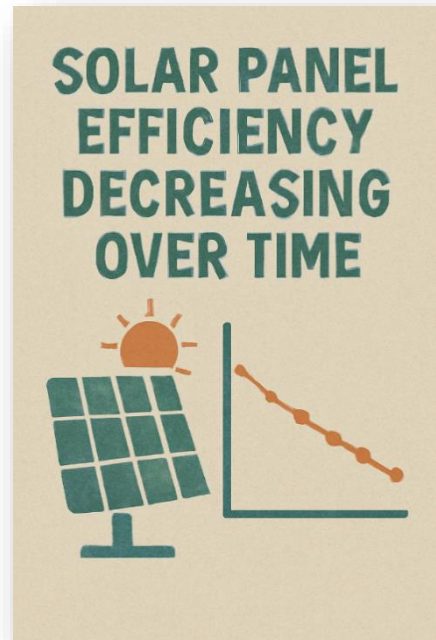
۴. مدیریت چرخه عمر پنل‌های خورشیدی:

چرخه عمر پنل‌های خورشیدی به طور کلی از مراحل مختلفی شامل تولید، نصب، بهره‌برداری و بازیافت تشکیل می‌شود. کشورهای پیشرفته برای مدیریت این چرخه عمر و کاهش اثرات زیست‌محیطی آن، اقدامات مختلفی انجام می‌دهند.

چگونه کشورهای پیشرفته این فرآیند را مدیریت می‌کنند؟

- مدیریت کامل چرخه عمر: کشورهای پیشرفته به دنبال مدیریت کامل چرخه عمر پنل‌های خورشیدی هستند. این شامل بازیافت پنل‌ها در انتهای عمر مفید آن‌ها، طراحی برای تعمیر و نگهداری آسان، و به‌کارگیری فن‌آوری‌های نوین برای افزایش طول عمر و کاهش اثرات زیست‌محیطی است.
- طراحی پنل‌های قابل بازیافت: برخی از کشورها، مانند آلمان و سوئیس، در حال طراحی پنل‌های خورشیدی هستند که تماماً قابل بازیافت باشند. این طراحی‌ها باعث می‌شود که در پایان عمر پنل‌ها، بتوان مواد خام را دوباره استخراج کرد و استفاده مجدد از آن‌ها در فرآیندهای تولید پنل‌های جدید ممکن شود.

نتیجه‌گیری: اگرچه انرژی خورشیدی با چالش‌هایی مانند کاهش راندمان، پسماندهای تولیدی و گازهای گلخانه‌ای همراه است، کشورهای پیشرفته با استفاده از فن‌آوری‌های نوین، استانداردهای زیست‌محیطی سختگیرانه و روش‌های بهینه تولید در حال مدیریت این مشکلات و کاهش اثرات منفی آن‌ها هستند. سرمایه‌گذاری‌های کلان در تحقیق و توسعه و تلاش برای ساخت یک چرخه عمر پایدار برای انرژی خورشیدی، کشورها را قادر می‌سازد تا به استفاده از این منبع انرژی تجدیدپذیر ادامه دهند و در عین حال اثرات منفی آن را به حداقل برسانند.



گزارشات تکمیلی:

۱. گزارش آژانس بین‌المللی انرژی - (IEA) بحران جهانی انرژی
این گزارش بیان می‌کند که بحران جهانی انرژی به دلیل افزایش تقاضای انرژی پس از پاندمی COVID-19 و جنگ‌ها، به‌ویژه جنگ اوکراین، به یک بحران جهانی تبدیل شده است. افزایش قیمت گاز طبیعی و نفت، کاهش تولید برق در برخی کشورها، و افزایش فقر انرژی از جمله پیامدهای این بحران هستند.
۲. گزارش - Sweco Group محدودیت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر
این گزارش به چالش‌های موجود در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر می‌پردازد و بر لزوم توسعه زیرساخت‌های انتقال برق و شبکه‌های هوشمند برای مقابله با ناترازی منابع انرژی تأکید می‌کند.
۳. مقاله Zeinalzadeh و همکاران - هزینه‌های عدم تعادل در بازار برق
این مقاله به بررسی هزینه‌های عدم تعادل در بازار برق می‌پردازد و نشان می‌دهد که افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند به افزایش قیمت‌های بازار برق و ایجاد عدم تعادل در تأمین انرژی منجر شود.
۴. گزارش - IEA محدودیت‌های مواد معدنی حیاتی در انتقال انرژی
این گزارش به محدودیت‌های موجود در تأمین مواد معدنی حیاتی برای فناوری‌های انرژی پاک اشاره می‌کند و بر لزوم تنوع منابع تأمین این مواد برای جلوگیری از بحران‌های تأمین انرژی تأکید دارد.

منابع علمی و گزارش‌های معتبر

۱. گزارش سازمان ملل متحد - بحران جهانی آب (2023)
این گزارش بیان می‌کند که بین دو تا سه میلیارد نفر در جهان حداقل یک ماه در سال با کمبود آب مواجه هستند که این کمبودها در دهه‌های آینده، به‌ویژه در شهرها، تشدید خواهد شد. همچنین، پیش‌بینی می‌شود که جمعیت شهری در معرض کمبود آب از ۹۳۰ میلیون نفر در سال ۲۰۱۶ به ۱.۷ تا ۲.۴ میلیارد نفر در سال ۲۰۵۰ افزایش یابد.
۲. گزارش سازمان جهانی هواشناسی - وضعیت منابع آب جهانی (2023)
این گزارش نشان می‌دهد که سال ۲۰۲۳ خشک‌ترین سال برای رودخانه‌های جهانی در ۳۳ سال گذشته بوده است. همچنین، یخچال‌ها بزرگ‌ترین کاهش جرم را در ۵۰ سال اخیر تجربه کرده‌اند و تغییرات اقلیمی باعث بی‌ثباتی چرخه هیدرولوژیکی شده است. در حال حاضر، ۳.۶ میلیارد نفر با کمبود آب مواجه هستند که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ به بیش از ۵ میلیارد نفر برسد.
۳. گزارش آژانس بین‌المللی انرژی - انرژی و بحران آب (2023)
این گزارش بیان می‌کند که در سال ۲۰۲۱، بخش انرژی حدود ۳۷۰ میلیارد مترمکعب از منابع آب شیرین جهانی را مصرف کرده است که تقریباً ۱۰٪ از کل برداشت جهانی آب شیرین را تشکیل می‌دهد. همچنین، پیش‌بینی می‌شود که تقاضای انرژی برای نمک‌زدایی آب تا سال ۲۰۳۰ دو برابر شود.
۴. گزارش سازمان ملل متحد - آب و بحران اقلیمی (2024)
این گزارش تأکید می‌کند که تغییرات اقلیمی باعث تغییر الگوهای بارش، کاهش برف در مناطق کوهستانی و افزایش دوره‌های خشکسالی شده است که این عوامل به بحران آب دامن می‌زنند. همچنین، فعالیت‌های انسانی مانند استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و استفاده ناکارآمد از منابع آب، وضعیت کمبود آب را تشدید کرده است.



پیوست اول:

عنوان: تحلیل اثرات زیست‌محیطی نیروگاه‌های خورشیدی بر منابع طبیعی چالش‌ها و راهکارها

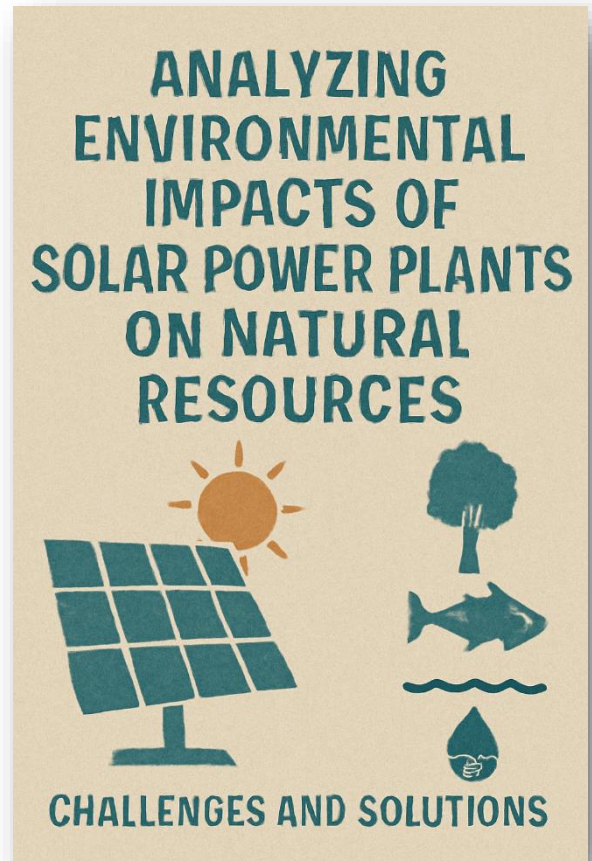
مقدمه:

با توجه به افزایش بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه انرژی خورشیدی، لازم است اثرات آن بر محیط‌زیست به‌ویژه بر منابع طبیعی مانند تنوع زیستی، خاک، و چرخه‌های اکولوژیکی منطقه به‌طور دقیق بررسی شود. در این تحلیل، سه محور اصلی مورد توجه قرار می‌گیرند: (۱) اثر بر تنوع زیستی، (۲) اثر بر سلامت خاک و ریزاقلیم، و (۳) اثر بلندمدت بر چرخه‌های اکولوژیکی منطقه.

۱. اثر بر تنوع زیستی:

موضوع:

توسعه نیروگاه‌های خورشیدی به‌ویژه در مناطق طبیعی و کشاورزی می‌تواند باعث تغییرات اکولوژیکی و تهدید تنوع زیستی شود. نصب پنل‌ها بر زمین‌های بکر، به‌ویژه در مناطق خشک و بیابانی، می‌تواند موجب قطع مسیرهای زیستی، ایجاد موانع فیزیکی برای حیات‌وحش و کاهش زیستگاه‌های طبیعی شود.



دلیل:

- کاهش و تکه‌تکه شدن زیستگاه‌ها باعث کاهش پراکندگی گونه‌های مختلف جانوری و گیاهی می‌شود.
- ایجاد سایه‌سازی شدید یا محدودیت در دسترسی به منابع طبیعی می‌تواند شرایط دشواری برای گونه‌های گیاهی و جانوری ایجاد کند.

راهکارها:

- در نظر گرفتن طرح‌های زیست‌محیطی مانند "agrivoltaics" که همزمان با تولید انرژی، شرایط زیستی منطقه را حفظ کند.
- ارزیابی دقیق اثرات اکولوژیکی قبل از شروع پروژه‌ها و استفاده از زمین‌های غیر کشاورزی یا زمین‌های بی‌استفاده.

۲. اثر بر سلامت خاک و ریزاقلیم:

موضوع:

نیروگاه‌های خورشیدی می‌توانند بر روی خاک و ریزاقلیم تأثیرات قابل توجهی بگذارند. تغییرات در دمای سطحی خاک، رطوبت و الگوی تبخیر ممکن است به کاهش کیفیت خاک و تغییرات منفی در روند رشد گیاهان منجر شود.



دلیل:

- سایه‌سازی ناشی از پنل‌ها می‌تواند باعث کاهش تبخیر آب از خاک و تغییر در میزان رطوبت در سطح خاک شود.
- تغییرات دما و شرایط نور می‌تواند الگوی رشد گیاهان را تغییر دهد، که به نوبه خود تأثیر منفی بر کشاورزی و اکوسیستم‌های طبیعی خواهد داشت.
- افزایش یا کاهش دما به‌ویژه در مناطق خشک می‌تواند موجب تغییر در میکروکلیمات‌های منطقه و کاهش کیفیت خاک شود.

راهکارها:

- طراحی و نصب پنل‌ها به گونه‌ای که کمترین تأثیر را بر روی خاک و ریزاقلیم منطقه داشته باشد.
- استفاده از خاک‌های بی‌استفاده یا زیرساخت‌های سبز برای نصب نیروگاه‌های خورشیدی.

۳. اثر بلندمدت بر چرخه‌های اکولوژیکی منطقه:**موضوع:**

نیروگاه‌های خورشیدی می‌توانند به طور بلندمدت بر چرخه‌های اکولوژیکی منطقه تأثیر بگذارند. این تأثیرات به‌ویژه در مناطق با اکوسیستم‌های حساس ممکن است منجر به کاهش تنوع زیستی و تغییر در روابط موجودات زنده با محیط‌زیست شود.

دلیل:

- قطع چرخه‌های طبیعی نوری و آبی خاک می‌تواند اثرات منفی بر گیاهان و جانوران بومی داشته باشد.
- بی‌توجهی به تنوع زیستی در طراحی و اجرای پروژه‌های انرژی خورشیدی می‌تواند باعث ایجاد اکوسیستم‌های مصنوعی و ناپایدار شود.
- تأثیرات بلندمدت بر روی حیوانات گرده‌افشان و دیگر موجودات زیستی ممکن است در درازمدت به بحران‌های زیست‌محیطی منجر شود.

راهکارها:

- توجه به چرخه‌های اکولوژیکی و شبیه‌سازی اثرات بلندمدت پروژه‌ها بر روی زیست‌محیط از ابتدا.
- استفاده از فن‌آوری‌های نوین برای کاهش تأثیرات زیست‌محیطی در درازمدت، مانند طراحی سیستم‌های بازیافت و مدیریت منابع به‌طور هوشمند.

نتیجه‌گیری: با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی که در پی توسعه نیروگاه‌های خورشیدی در برخی مناطق ممکن است بروز کند، اهمیت ارزیابی دقیق و مدیریت علمی و پایدار پروژه‌ها امری ضروری است. از این رو، پیشنهاد می‌شود که در تمامی پروژه‌های انرژی خورشیدی به‌ویژه در مناطق حساس اکولوژیکی، ملاحظات زیست‌محیطی به‌طور جامع و دقیق بررسی و به‌کار گرفته شوند.



پیوست دوم:

درباره نرخ کاهش راندمان سالانه پنل‌های خورشیدی، تحقیقات علمی مختلفی انجام شده است که نشان می‌دهند این نرخ بسته به نوع پنل، شرایط محیطی و کیفیت ساخت متفاوت است.

 مراجع علمی معتبر درباره نرخ کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی:

1. National Renewable Energy Laboratory (NREL) – Photovoltaic Degradation Rates: An Analytical Review

○ خلاصه: این گزارش تحلیلی از NREL به بررسی نرخ‌های کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی در شرایط مختلف می‌پردازد. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که نرخ کاهش راندمان سالانه پنل‌های مونوکریستالی سیلیکونی معمولاً کمتر از ۰.۵٪ است. با این حال، در شرایط خاص مانند آب و هوای گرم و مرطوب، این نرخ می‌تواند بالاتر باشد.

○ لینک: ([NREL](#))

2. Alafnan, H. (2024) – The Impact of PV Panel Degradation Rate, Initial System Efficiency, and Interest Rate on the Levelized Cost of Energy for PV Projects

○ خلاصه: این مطالعه نشان می‌دهد که نرخ کاهش راندمان سالانه پنل‌های خورشیدی می‌تواند بین ۰.۵٪ تا ۲.۵٪ متغیر باشد. این تفاوت‌ها بسته به کیفیت ساخت، نوع پنل و شرایط محیطی است.

○ لینک: ([MDPI](#))

3. Evaluation of degradation factor effect on solar panels performance

○ خلاصه: مطالعه‌ای که نرخ کاهش راندمان سالانه پنل‌های خورشیدی را بین ۰.۴۴۱٪ تا ۰.۸۵۰٪ گزارش کرده است. این نرخ‌ها بسته به شرایط عملیاتی و نگهداری سیستم متغیر هستند.

○ لینک: ([ResearchGate](#))

✓ نتیجه‌گیری: با توجه به مراجع علمی فوق، می‌توان نتیجه گرفت که نرخ کاهش راندمان سالانه پنل‌های خورشیدی معمولاً بین ۰.۳٪ تا ۰.۸٪ است، اما در شرایط خاص می‌تواند بالاتر حتی ۲/۵ درصد باشد. برای کاهش این نرخ و افزایش طول عمر پنل‌ها، انتخاب پنل‌های با کیفیت بالا، نصب صحیح، و نگهداری منظم سیستم توصیه می‌شود.



پیوست سوم:

پنل‌های خورشیدی در پایان عمر مفید

پسماندهای حاصل از پنل‌های خورشیدی به‌ویژه در پایان عمر مفید آن‌ها می‌تواند چالش‌های زیست‌محیطی قابل توجهی ایجاد کند. این پسماندها به‌ویژه وقتی که پنل‌های فتوولتائیک آسیب می‌بینند یا از رده خارج می‌شوند، می‌توانند مشکلاتی در زمینه بازیافت، آلودگی و مدیریت مواد شیمیایی ایجاد کنند. در ادامه به شرح چالش‌های اصلی مربوط به پسماند پنل‌های خورشیدی می‌پردازیم و منابع علمی مرتبط با آن را ارائه می‌دهیم.

چالش‌های پسماند پنل‌های خورشیدی در چرخه عمر

۱. مواد شیمیایی خطرناک در پنل‌ها

پنل‌های فتوولتائیک، به‌ویژه پنل‌های سیلیکونی، حاوی مواد شیمیایی و فلزات سنگین مانند کادمیوم، سرب، و سیلیکون هستند. این مواد می‌توانند در صورت تخریب یا عدم بازیافت صحیح، به محیط زیست آسیب برسانند. آسیب به پنل‌ها می‌تواند در اثر ضربه، حرارت، یا استفاده نامناسب اتفاق بیفتد و مواد شیمیایی در آن‌ها آزاد شوند.



- **چالش:** هنگامی که پنل‌ها آسیب می‌بینند، ممکن است مواد سمی مانند کادمیوم به خاک یا آب نشت کنند که این می‌تواند به آلودگی خاک و منابع آب منجر شود.

۲. فرآیند بازیافت پیچیده و گران‌قیمت

با توجه به پیچیدگی و تنوع مواد استفاده‌شده در پنل‌های خورشیدی، فرآیند بازیافت آن‌ها می‌تواند پیچیده و گران‌قیمت باشد. برای بازیافت پنل‌های خورشیدی، به ویژه آن‌هایی که از مواد مختلف مانند شیشه، پلاستیک، سیلیکون و فلزات ساخته شده‌اند، باید از روش‌های خاص و پیشرفته استفاده کرد.

- **چالش:** هزینه‌های بالا و عدم وجود زیرساخت‌های کافی برای بازیافت پنل‌های خورشیدی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، می‌تواند به انباشت پسماند منجر شود.

۳. اثر بر تنوع زیستی و محیط زیست

هنگامی که پنل‌های خورشیدی فرسوده یا آسیب دیده به درستی بازیافت نمی‌شوند، ممکن است پسماندهای آن‌ها در محیط‌های طبیعی دفن شوند و به‌ویژه در خاک و منابع آب منتشر شوند. این مواد می‌توانند بر تنوع زیستی منطقه تأثیر بگذارند.

- **چالش:** آلودگی مواد شیمیایی حاصل از پسماند پنل‌های خورشیدی می‌تواند به اکوسیستم‌های محلی آسیب برساند و باعث از بین رفتن تنوع زیستی شود.

۴. محاسبه طول عمر و مدیریت مؤثر

پنل‌های خورشیدی معمولاً عمر مفید ۲۰ تا ۳۰ سال دارند، اما با گذر زمان، عملکرد آن‌ها کاهش می‌یابد و ممکن است نیاز به تعویض پیدا کنند. این واقعیت که تعداد زیادی پنل خورشیدی در حال ورود به پایان عمر خود هستند، نیاز به سیستم‌های بازیافت مؤثر را افزایش می‌دهد.

- چالش: عدم برنامه‌ریزی و مدیریت مناسب برای بازیافت پنل‌های خورشیدی می‌تواند منجر به بحران پسماند در آینده نزدیک شود.

مراجع علمی برای چالش‌های پسماند پنل‌های خورشیدی

1. Golev, A., et al. (2020) – Environmental impacts of solar photovoltaic waste: a review
○ خلاصه: این مقاله به بررسی اثرات زیست‌محیطی پسماند پنل‌های خورشیدی و چالش‌های آن‌ها در فرآیندهای بازیافت پرداخته است. نویسندگان به مشکلاتی مانند انتشار مواد شیمیایی سمی و پیچیدگی‌های بازیافت اشاره کرده‌اند.
○ لینک به مقاله: [Environmental impacts of solar photovoltaic waste](#)
2. International Renewable Energy Agency (IRENA) – End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels
○ خلاصه: این گزارش از آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر به بررسی چالش‌های پسماندهای ناشی از پنل‌های خورشیدی و نیاز به روش‌های بازیافت مؤثر می‌پردازد. IRENA به‌ویژه بر لزوم گسترش فناوری‌های بازیافت و کاهش اثرات منفی محیطی تأکید کرده است.
○ لینک به گزارش: [IRENA - End-of-life management](#)
3. Solar Energy Industries Association (SEIA) – Recycling Solar Panels
○ خلاصه: این گزارش به بررسی وضعیت بازیافت پنل‌های خورشیدی در ایالات متحده و جهان می‌پردازد. همچنین، به چالش‌ها و راهکارهای بهینه‌سازی فرآیند بازیافت اشاره می‌کند.
○ لینک به گزارش: [SEIA - Recycling Solar Panels](#)
4. Müller, J., et al. (2021) – Solar Panel Waste: A Global Overview of the Challenges and Solutions
○ خلاصه: مقاله‌ای که چالش‌های جهانی مربوط به پسماندهای پنل‌های خورشیدی را بررسی کرده و راه‌حلی برای مدیریت و بازیافت این پسماندها پیشنهاد می‌دهد.
○ لینک به مقاله: [Solar Panel Waste: A Global Overview](#)

نتیجه‌گیری: پسماندهای پنل‌های خورشیدی و اثرات آن‌ها بر محیط‌زیست، به‌ویژه در صورت آسیب دیدن یا پایان عمر پنل‌ها، چالش‌های قابل توجهی را ایجاد می‌کند. این چالش‌ها شامل انتشار مواد سمی، پیچیدگی‌های بازیافت، و تهدیدات زیست‌محیطی است. کشورهای پیشرفته در حال کار بر روی سیستم‌های بازیافت و فناوری‌های بهبود یافته برای کاهش این اثرات هستند. استفاده از پنل‌های خورشیدی قابل بازیافت و ایجاد زیرساخت‌های مناسب برای مدیریت پسماند از اهمیت بالایی برخوردار است.



پیوست چهارم

بازیافت پنل‌های خورشیدی و چالش‌های آن

بازیافت پنل‌های خورشیدی، به‌ویژه پس از آسیب دیدن یا پایان عمر مفید آن‌ها، موضوعی پیچیده است که چالش‌های زیادی به همراه دارد. اما همچنان، با توجه به اهمیت بازیافت در کاهش اثرات زیست‌محیطی و تأمین منابع برای تولید پنل‌های جدید، این فرآیند در حال پیشرفت است. در اینجا به بررسی چالش‌های بازیافت، آلودگی‌ها و اثرات منفی آن‌ها می‌پردازیم.

۱. آیا پنل‌های خورشیدی قابل بازیافت هستند؟

بله، پنل‌های خورشیدی قابل بازیافت هستند، اما فرآیند بازیافت آن‌ها چالش‌های خاص خود را دارد. پنل‌های خورشیدی معمولاً از سیلیکون، شیشه، پلاستیک، و فلزات ساخته می‌شوند که هر کدام نیاز به فرآیندهای متفاوت برای بازیافت دارند.

• **سیلیکون:** این ماده یکی از اصلی‌ترین اجزای پنل‌های خورشیدی است که معمولاً از سیلیکون کریستالی (مونوکریستالی یا پلی کریستالی) ساخته می‌شود. بازیافت سیلیکون چالش‌برانگیز است، زیرا برای استخراج سیلیکون از پنل‌های خورشیدی آسیب دیده، نیاز به فرآیندهای خاصی است که به‌طور معمول شامل استفاده از **گرما و مواد شیمیایی** می‌شود.

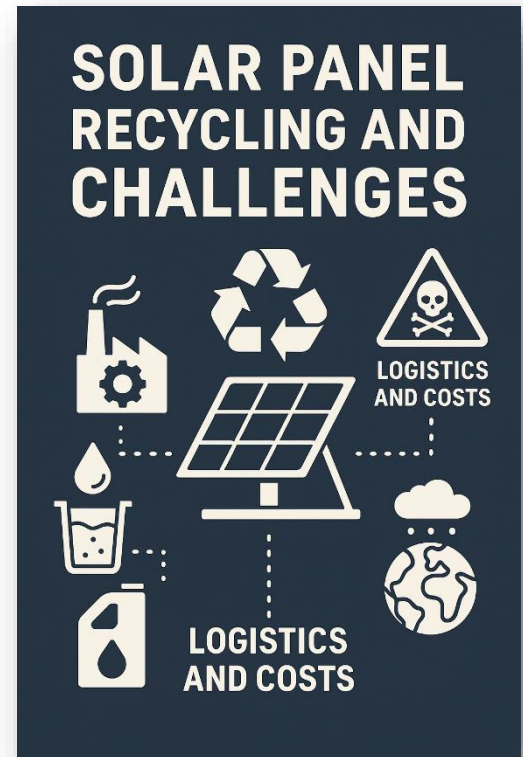
• **شیشه:** پنل‌های خورشیدی معمولاً حاوی شیشه‌های مقاوم هستند که بازیافت آن‌ها نسبتاً آسان‌تر از سیلیکون است. این شیشه‌ها می‌توانند پس از بازیافت به‌عنوان مواد اولیه در تولید محصولات جدید استفاده شوند.

• **فلزات:** پنل‌های خورشیدی معمولاً حاوی فلزاتی مانند **آلومینیوم، نقره، و مس** هستند که به راحتی می‌توانند بازیافت شوند و مجدداً به‌عنوان مواد اولیه در تولید محصولات دیگر مورد استفاده قرار گیرند.

۲. چالش‌های بازیافت پنل‌های خورشیدی

اگرچه پنل‌های خورشیدی قابل بازیافت هستند، فرآیند بازیافت آن‌ها همچنان با مشکلاتی همراه است:

- **پیچیدگی فرآیند بازیافت:** پنل‌های خورشیدی از مواد مختلفی تشکیل شده‌اند که هر کدام نیاز به فرآیندهای بازیافت متفاوت دارند. به‌ویژه جداسازی مواد مختلف مانند شیشه، سیلیکون و فلزات از یکدیگر نیاز به فناوری‌های خاص و هزینه‌بر دارد.
- **هزینه‌های بالا:** فرآیندهای بازیافت پنل‌های خورشیدی به‌ویژه در مقیاس وسیع هزینه‌های زیادی به دنبال دارند. این فرآیندها معمولاً به‌طور اقتصادی از نظر تجاری جذاب نیستند، زیرا بازیافت پنل‌ها هنوز نیاز به فناوری‌های پیشرفته دارد که در برخی موارد به سرمایه‌گذاری‌های سنگین نیاز دارند.



- **تعداد کم مراکز بازیافت:** در حال حاضر، تعداد مراکز بازیافت پنل‌های خورشیدی بسیار کم است و تنها تعداد محدودی از کشورها دارای زیرساخت‌های مناسب برای بازیافت این پنل‌ها هستند. این باعث می‌شود که بسیاری از پنل‌ها به‌جای بازیافت به محل‌های دفن زباله منتقل شوند.

۳. آلودگی‌های ناشی از بازیافت و پسماند پنل‌های خورشیدی

- اگر فرآیند بازیافت به درستی انجام نشود یا پنل‌ها در محل‌های دفن زباله قرار گیرند، می‌توانند آلودگی‌های جدی ایجاد کنند. این آلودگی‌ها شامل:
- **انتشار مواد سمی:** پنل‌های خورشیدی حاوی مواد شیمیایی خطرناکی مانند **کادمیوم** و **پلی‌سولفیدهای فلزی** هستند که در صورت عدم بازیافت صحیح می‌توانند وارد خاک و آب شوند. این مواد می‌توانند خطرات جدی برای محیط‌زیست و سلامت انسان‌ها ایجاد کنند.
 - **پسماندهای شیمیایی:** فرآیند تولید پنل‌های خورشیدی به‌ویژه در تولید سیلیکون، به مواد شیمیایی خاص نیاز دارد که در صورت نشت یا دفع نادرست، می‌توانند آلودگی شیمیایی ایجاد کنند.
 - **انتشار گازهای گلخانه‌ای:** فرآیند تولید و بازیافت پنل‌های خورشیدی نیز در برخی مراحل می‌تواند باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای شود. به‌ویژه در مرحله تولید پنل‌های خورشیدی، انرژی مصرفی بالا است که در صورتی که از منابع انرژی فسیلی تأمین شود، می‌تواند به انتشار دی‌اکسیدکربن (CO_2) منجر شود.

۴. مدیریت بهتر و راهکارهای مقابله با مشکلات بازیافت

چند راهکار برای بهبود فرآیند بازیافت و کاهش اثرات منفی آن وجود دارد:

- **توسعه فناوری‌های بازیافت پیشرفته:** با استفاده از فناوری‌های نوین، می‌توان فرآیندهای بازیافت را کارآمدتر کرد. به‌عنوان مثال، استفاده از فناوری‌هایی مانند **لیزینگ مواد** که مواد مختلف پنل‌ها را به‌طور کارآمدتر و با هزینه پایین‌تر جدا می‌کنند، می‌تواند به کاهش هزینه‌های بازیافت و افزایش بهره‌وری آن کمک کند.
- **استفاده از انرژی تجدیدپذیر در فرآیند تولید:** استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در فرآیند تولید پنل‌های خورشیدی و همچنین در فرآیند بازیافت می‌تواند به کاهش میزان گازهای گلخانه‌ای و آلودگی ناشی از تولید و بازیافت پنل‌ها کمک کند.
- **قوانین و مقررات بازیافت:** بسیاری از کشورها، به‌ویژه در اتحادیه اروپا، قوانین خاصی برای بازیافت پنل‌های خورشیدی وضع کرده‌اند. این قوانین به تولیدکنندگان پنل‌های خورشیدی ملزم می‌کنند که مسئولیت بازیافت محصولات خود را در پایان عمر آن‌ها بپذیرند. برای مثال، در اروپا، سیستم **WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment)** برای بازیافت پنل‌های خورشیدی وجود دارد.



مراجع علمی برای چالش‌های بازیافت پنل‌های خورشیدی

1. Golev, A., et al. (2020) – Environmental impacts of solar photovoltaic waste: a review
این مقاله به بررسی اثرات زیست‌محیطی پسماند پنل‌های خورشیدی و چالش‌های آن‌ها در فرآیندهای بازیافت پرداخته است.
○ لینک: [Environmental impacts of solar photovoltaic waste](#)
2. International Renewable Energy Agency (IRENA) – End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels
به بررسی چالش‌های پسماندهای پنل‌های خورشیدی و نیاز به روش‌های بازیافت مؤثر می‌پردازد IRENA گزارش.
○ لینک: [IRENA - End-of-life management](#)
3. Solar Energy Industries Association (SEIA) – Recycling Solar Panels
این گزارش به بررسی وضعیت بازیافت پنل‌های خورشیدی در ایالات متحده و جهان می‌پردازد.
○ لینک: [SEIA - Recycling Solar Panels](#)

نتیجه‌گیری: بازیافت پنل‌های خورشیدی پس از آسیب دیدن یا پایان عمر مفید آن‌ها چالش‌های زیادی به همراه دارد. فرآیند بازیافت می‌تواند به آلودگی‌های شیمیایی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و مشکلات زیست‌محیطی منجر شود. با این حال، با پیشرفت در فناوری‌های بازیافت، مدیریت بهتر و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در فرآیندهای تولید و بازیافت، می‌توان این مشکلات را کاهش داد و به پایداری بیشتری در صنعت انرژی خورشیدی دست یافت.



پیوست پنجم:

مراحل مختلف تولید، نصب، و نگهداری نیروگاه خورشیدی.

این مراحل شامل فرآیند تولید پنل‌ها، نصب سیستم، بهره‌برداری، و در نهایت بازیافت یا پایان عمر پنل‌ها است. در ادامه، به بررسی پسماندها، پساب‌ها و تولید گازهای گلخانه‌ای مرتبط با هر مرحله می‌پردازیم و همچنین اطلاعاتی برای یک مگاوات انرژی خورشیدی ارائه خواهیم داد.

۱. تولید پنل‌های خورشیدی

تولید پنل‌های خورشیدی، به‌ویژه پنل‌های فتوولتائیک سیلیکونی، شامل استفاده از مواد خام و فرآیندهای پیچیده‌ای است که می‌تواند پسماند، پساب و گازهای گلخانه‌ای زیادی تولید کند.

پسماندها در فرآیند تولید:

- **پسماندهای سیلیکونی:** تولید سیلیکون از مواد خام مانند سیلیکات‌های فلزی تولید پسماندهایی مانند سیلیکون اضافی و خاکستر می‌کند.
- **فلزات سنگین:** در پنل‌های خورشیدی، فلزات سنگینی مانند **کادمیوم** و **سرب** برای برخی از انواع پنل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند که در صورت عدم مدیریت مناسب می‌توانند به آلودگی محیطی منجر شوند.

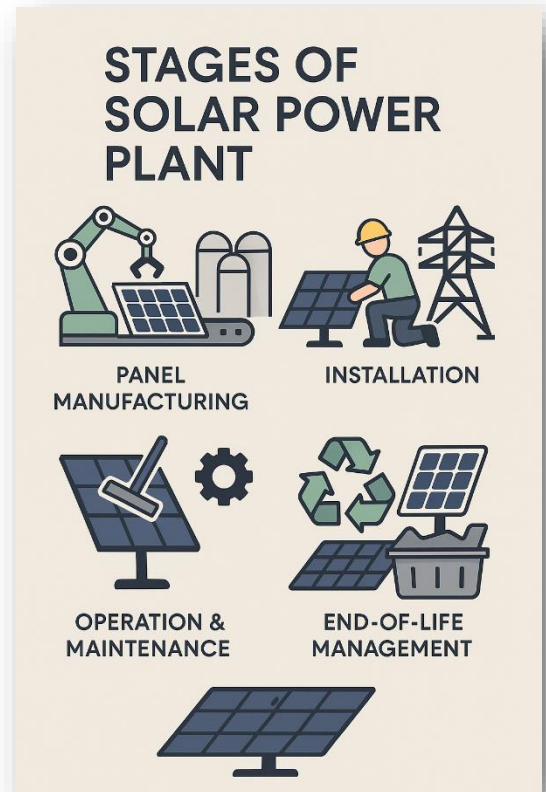
- **پسماند شیمیایی:** مواد شیمیایی مورد استفاده در فرآیندهای تمیزکاری و تولید سلول‌های خورشیدی ممکن است در محیط باقی بمانند و وارد پساب‌ها شوند.

پساب‌ها در فرآیند تولید:

- **پساب شیمیایی:** فرآیند تولید سیلیکون و سایر مواد مورد استفاده در تولید پنل‌ها می‌تواند پساب‌های شیمیایی تولید کند که ممکن است حاوی مواد سمی باشند.
- **پساب حلال‌ها:** در فرآیندهای تمیزکاری سلول‌ها، استفاده از حلال‌ها و مواد شیمیایی ممکن است به پساب‌های آلوده منتهی شود.

انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید:

- تولید پنل‌های خورشیدی به انرژی زیادی نیاز دارد. اگر این انرژی از منابع فسیلی تأمین شود، گازهای گلخانه‌ای مانند **CO₂** تولید می‌شود. به‌طور متوسط، تولید هر کیلووات ساعت برق از انرژی خورشیدی در مراحل تولید پنل‌ها به میزان ۲۰۰ تا ۳۰۰ گرم CO₂ تولید می‌کند.



برای تولید یک مگاوات نیروگاه خورشیدی (معادل ۱۰۰۰ کیلووات)، حدود ۲۰۰,۰۰۰ تا ۳۰۰,۰۰۰ کیلوگرم CO₂ در فرآیند تولید پنل‌ها تولید می‌شود.

۲. نصب سیستم‌های خورشیدی

در این مرحله، نصب پنل‌ها، ساختارهای نگهدارنده، سیم‌کشی و تجهیزات جانبی شامل فرآیندهایی است که به تولید پسماند و گازهای گلخانه‌ای منجر می‌شود.

پسماندها در مرحله نصب:

- پسماندهای ساخت و ساز: در این مرحله، به‌ویژه در هنگام نصب سیستم‌ها، پسماندهایی مانند فلزات اضافی، قطعات پلاستیکی، بسته‌بندی و مواد مصرفی تولید می‌شود.
- پسماندهای فلزی و پلاستیکی: در هنگام نصب، قطعات اضافی فلزی و پلاستیکی که در فرآیند نصب و ساخت ایجاد می‌شود، باید به‌طور صحیح مدیریت شود.

پساب‌ها و آلودگی ناشی از نصب:

- پساب ناشی از شست‌وشوی پنل‌ها: شست‌وشوی پنل‌ها در مرحله نصب یا نگهداری ممکن است به مصرف بالای آب و تولید پساب منجر شود.

انتشار گازهای گلخانه‌ای در مرحله نصب:

- انتشار CO₂: در صورتی که حمل و نقل و نصب پنل‌ها با وسایل نقلیه آلاینده یا از منابع انرژی فسیلی استفاده کنند، ممکن است به تولید CO₂ و گازهای دیگر منتهی شود.

۳. بهره‌برداری و تولید انرژی خورشیدی

پس از نصب، پنل‌های خورشیدی انرژی پاک تولید می‌کنند، که این مرحله تقریباً هیچ پسماند و گاز گلخانه‌ای تولید نمی‌کند. تنها پسماندهای کم‌حجم مانند پسماندهای نگهداری و تعمیرات یا آب و شست‌وشو وجود دارند.

پسماندها در بهره‌برداری:

- پسماندهای نگهداری: در این مرحله، به‌ویژه در صورت نیاز به تعمیر یا تعویض پنل‌ها، ممکن است پسماندهایی مانند روغن‌ها و مواد شیمیایی مصرفی تولید شود.

پساب‌ها و گازهای گلخانه‌ای در بهره‌برداری:

- در این مرحله تقریباً هیچ گاز گلخانه‌ای تولید نمی‌شود، زیرا پنل‌های خورشیدی انرژی پاک تولید می‌کنند.



۴. پایان عمر پنل‌های خورشیدی و بازیافت

پس از پایان عمر پنل‌های خورشیدی (معمولاً بعد از ۲۰ تا ۳۰ سال)، پنل‌ها باید بازیافت یا دفع شوند. این مرحله چالش‌های خود را در زمینه پسماند و پساب دارد.

پسماندها در پایان عمر:

- **پسماندهای شیمیایی و فلزی:** پنل‌های خورشیدی حاوی مواد شیمیایی مانند کادمیوم و فلزات سنگین هستند که در صورت عدم بازیافت صحیح، می‌توانند به محیط زیست آسیب برسانند.
- **پسماندهای شیشه‌ای:** شیشه پنل‌های خورشیدی در صورت عدم بازیافت مناسب می‌تواند به دفن زباله‌ها و آلودگی محیط زیست منتهی شود.

پساب‌ها و گازهای گلخانه‌ای در پایان عمر:

- فرآیند بازیافت پنل‌ها ممکن است نیاز به استفاده از انرژی داشته باشد و در صورتی که از منابع انرژی فسیلی برای این کار استفاده شود، گازهای گلخانه‌ای تولید می‌شود.

نتیجه‌گیری: در مجموع، برای تولید یک نیروگاه خورشیدی ۱ مگاوات، در مراحل مختلف تولید، نصب و بازیافت، با پسماندها و پساب‌های شیمیایی، فلزات سنگین و گازهای گلخانه‌ای روبه‌رو هستیم. اما نکته مهم این است که در طول بهره‌برداری، انرژی خورشیدی به‌طور عمده بدون تولید آلودگی عمل می‌کند و در بلندمدت می‌تواند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و وابستگی به سوخت‌های فسیلی کمک کند.

با این حال، مدیریت پسماند و توسعه فناوری‌های بازیافت می‌تواند به کاهش اثرات منفی در فرآیندهای تولید، نصب و بازیافت پنل‌های خورشیدی کمک کند.

مقایسه‌ای از میزان پسماند، پساب، و انتشار گازهای گلخانه‌ای در مراحل مختلف چرخه عمر یک نیروگاه خورشیدی ۱ مگاوات در جدول زیر ارائه شده است. این اطلاعات می‌تواند کمک کند تا چالش‌های زیست‌محیطی در هر مرحله از فرآیند انرژی خورشیدی بهتر درک شوند.

مقایسه پسماندها و اثرات زیست‌محیطی در مراحل مختلف

مرحله	پسماند تولید شده (کیلوگرم)	پساب‌های شیمیایی	آب مصرفی و پساب‌ها	انتشار گازهای گلخانه‌ای کیلوگرم CO2
تولید	۲۰۰,۰۰۰ تا ۳۰۰,۰۰۰ کیلوگرم CO2	پسماند سیلیکونی، فلزات سنگین (کادمیوم، سرب)	مصرف آب در تولید سیلیکون، پساب از شست‌وشو	۲۰۰-۳۰۰ گرم CO2 به ازای هر کیلووات ساعت تولید انرژی
نصب	پسماند ساخت و ساز اندک	مقادیر کمی از پسماند بسته‌بندی و مواد شیمیایی	آب برای شست‌وشوی پنل‌ها	انتشار CO2 ناشی از حمل و نقل و نصب
بهره‌برداری	پسماند حداقلی	حداقل (مواد شیمیایی برای شست‌وشو)	مصرف آب کم (بسته به نیاز شست‌وشو)	تقریباً صفر در طول عملیات
پایان عمر	پسماندهای بازیافت پنل‌ها (فلزات، شیشه)	مواد سمی از پنل‌ها (کادمیوم، سرب)	پساب‌های ناشی از شست‌وشوی پنل‌ها و دفع پسماندها	CO2 ناشی از بازیافت، حمل و نقل و دفن زباله

مراجع علمی برای ردیابی:

1. **International Renewable Energy Agency (IRENA) – End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels**
این گزارش به بررسی چالش‌های پسماندهای پنل‌های خورشیدی و نیاز به روش‌های بازیافت مؤثر می‌پردازد.
 - لینک به گزارش: [IRENA - End-of-life management](#)
2. **Golev, A., et al. (2020) – Environmental impacts of solar photovoltaic waste: a review**
این مقاله به بررسی اثرات زیست‌محیطی پسماند پنل‌های خورشیدی و چالش‌های آن‌ها در فرآیندهای بازیافت پرداخته است.
 - لینک به مقاله: [Environmental impacts of solar photovoltaic waste](#)
3. **Solar Energy Industries Association (SEIA) – Recycling Solar Panels**
این گزارش به بررسی وضعیت بازیافت پنل‌های خورشیدی در ایالات متحده و جهان می‌پردازد.
 - لینک به گزارش: [SEIA - Recycling Solar Panels](#)



پیوست ششم

زمین زراعی و تعداد پنل‌های خورشیدی

برای محاسبه نیاز به زمین زراعی و تعداد پنل‌های خورشیدی برای تولید **1 مگاوات انرژی خورشیدی (MW)**، باید به چند عامل مختلف توجه کنیم، از جمله نوع پنل‌های خورشیدی، کارایی پنل‌ها و میزان تابش نور خورشید در منطقه‌ای که نیروگاه نصب می‌شود.

۱- نیاز به زمین زراعی برای یک مگاوات انرژی خورشیدی

مساحت زمین مورد نیاز برای یک مگاوات نیروگاه خورشیدی بسته به نوع و کارایی پنل‌ها و شدت تابش خورشید متغیر است. در شرایط معمولی، برای نصب یک نیروگاه خورشیدی یک مگاوات، زمین مورد نیاز به شرح زیر است:

- به طور متوسط، **۲ تا ۴ هکتار زمین** برای نصب **۱ مگاوات** نیروگاه خورشیدی مورد نیاز است.

- این مقدار به شرایط محلی و شدت تابش خورشید بستگی دارد. در مناطق با تابش خورشید بیشتر (مثل مناطق خشک یا بیابانی)، این نیاز ممکن است کمتر باشد.

مثال:

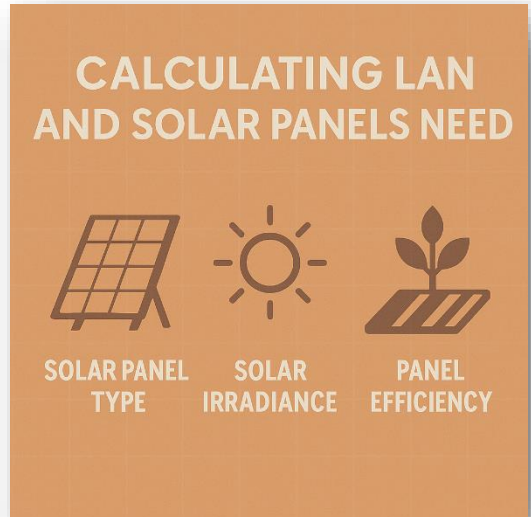
- برای تولید **1 مگاوات** برق خورشیدی، زمین مورد نیاز معمولاً حدود **2 هکتار** خواهد بود، البته بسته به فناوری و طراحی سیستم، ممکن است این مقدار متفاوت باشد.
- در مناطق با تابش خورشید بالا، این مقدار به **۱/۵ هکتار** هم کاهش می‌یابد.

۲- تعداد پنل‌های خورشیدی برای تولید ۱ مگاوات برق

برای محاسبه تعداد پنل‌های مورد نیاز، باید به کارایی پنل‌های خورشیدی و توان خروجی هر پنل توجه کنیم.

تعداد پنل‌ها:

- **توان هر پنل خورشیدی معمولاً بین ۳۰۰ وات تا ۴۰۰ وات** است.
 - با فرض اینکه هر پنل **۳۵۰ وات** تولید کند، می‌توان محاسبه کرد که به چه تعداد پنل نیاز داریم:
- پس برای تولید **1 مگاوات** برق خورشیدی، به حدود **۲۸۵۰ تا ۳۰۰۰ پنل** نیاز داریم.



مساحت هر پنل:

- هر پنل خورشیدی به طور متوسط ۱.۷ متر مربع مساحت دارد.
- بنابراین، برای نصب ۲۸۵۷ پنل به مساحت تقریباً ۴,۸۰۰ متر مربع یا ۰.۴۸ هکتار زمین برای پنل‌ها نیاز خواهید داشت.

۳. مراجع علمی برای ردیابی

برای اطلاعات دقیق‌تر و مرجع‌های معتبر در زمینه محاسبات زمین و تعداد پنل‌های خورشیدی، می‌توانید به این منابع علمی و گزارش‌ها مراجعه کنید:

1. International Renewable Energy Agency (IRENA) – Renewable Power Generation Costs 2020

این گزارش به هزینه‌ها و نیاز به زمین برای پروژه‌های انرژی خورشیدی پرداخته است.

- لینک به گزارش: [IRENA - Renewable Power Generation Costs 2020](#)

2. National Renewable Energy Laboratory (NREL) – Land Use for Solar Power

این گزارش به نیازهای زمین برای تولید انرژی خورشیدی در مناطق مختلف می‌پردازد.

- لینک به گزارش: [NREL - Land Use for Solar Power](#)

3. Solar Energy Industries Association (SEIA) – Solar Power Facts

این گزارش شامل اطلاعاتی درباره‌ی نیاز به زمین و توان خروجی پنل‌های خورشیدی است.

- لینک به گزارش: [SEIA - Solar Power Facts](#)

نتیجه‌گیری: برای تولید 1 مگاوات انرژی خورشیدی، به طور متوسط به حدود ۲ تا ۴ هکتار زمین و ۲۸۵۰ تا ۳۰۰۰ پنل خورشیدی نیاز داریم. البته این اعداد بسته به نوع پنل، منطقه نصب و شدت تابش خورشید می‌تواند تغییر کند. با توجه به استفاده بهینه از زمین‌های بایر یا بیابانی، می‌توان نیاز به زمین را کاهش داد.



پیوست هفتم

استانداردهای واردات پنل خورشیدی

برای واردات پنل‌های خورشیدی به ایران، باید طبق استانداردهای مشخصی عمل نمود. که به‌طور کلی شامل استانداردهای بین‌المللی و ملی برای کیفیت، بهره‌وری و ایمنی پنل‌های خورشیدی است. این استانداردها برای اطمینان از عملکرد بهینه، ایمنی و پایداری انرژی خورشیدی در کشور شما بسیار مهم هستند. در ادامه به شرح این استانداردها پرداخته‌ایم:

۱. استانداردهای بین‌المللی برای پنل‌های خورشیدی

برای واردات پنل‌های خورشیدی، رعایت استانداردهای جهانی ضروری است که معمولاً توسط سازمان‌های بین‌المللی مثل

IEC (International Electrotechnical Commission),

ISO (International Organization for Standardization) و

UL (Underwriters Laboratories)



تدوین می‌شود. برخی از مهم‌ترین استانداردهای بین‌المللی برای پنل‌های خورشیدی عبارتند از:

الف) استاندارد IEC 61215 :

- **تعریف:** این استاندارد برای ارزیابی و تست پنل‌های خورشیدی سیلیکونی (مونوکریستالی و پلی کریستالی) از نظر عملکرد و طول عمر به‌ویژه در شرایط سخت محیطی است.
- **چالش‌ها و تست‌ها:** پنل‌ها تحت آزمون‌هایی از جمله تست ضد آب، حرارت، یخبندان، باد، و شوک حرارتی قرار می‌گیرند. این استاندارد برای ارزیابی پایداری و کیفیت پنل‌های خورشیدی در بلندمدت بسیار مهم است.
- **اهمیت برای واردات:** پنل‌هایی که با این استاندارد مطابقت دارند، توانایی مقاومت در برابر شرایط اقلیمی مختلف (مانند گرمای شدید و سرمای شدید) را دارند.

ب) استاندارد IEC 61730 :

- **تعریف:** این استاندارد بر ایمنی پنل‌های خورشیدی در طول فرآیند تولید، حمل‌ونقل و نصب تأکید دارد. این استاندارد دو بخش دارد: ایمنی الکتریکی (IEC 61730-1) و ایمنی مکانیکی (IEC 61730-2).
- **اهمیت برای واردات:** رعایت این استاندارد باعث اطمینان از ایمنی پنل‌های خورشیدی می‌شود و از بروز مشکلاتی مانند خطرات آتش‌سوزی و شوک الکتریکی جلوگیری می‌کند.



ج) استاندارد UL 1703 :

- **تعریف:** این استاندارد به ارزیابی ایمنی پنل‌های خورشیدی در برابر آتش‌سوزی، ضربه و خطرات الکتریکی می‌پردازد.
- **اهمیت برای واردات:** پنل‌هایی که با این استاندارد مطابقت دارند، از نظر ایمنی بالا و قابل اعتماد هستند و می‌توانند در شرایط مختلف محیطی و کاربردی به‌خوبی عمل کنند.

۲. استانداردهای ملی ایران برای پنل‌های خورشیدی (تیم علمی شناسائی نموده است!)

در ایران، علاوه بر استانداردهای بین‌المللی، سازمان‌های ملی نیز برخی استانداردها برای واردات و نصب سیستم‌های انرژی خورشیدی دارند. برخی از استانداردهای ملی ایران که برای واردات پنل‌های خورشیدی باید رعایت شوند، به شرح زیر است:

الف) استاندارد ملی ایران شماره ۱۹۴۴ (سیستم‌های فتوولتائیک):

- **تعریف:** این استاندارد برای سیستم‌های فتوولتائیک و پنل‌های خورشیدی است که در آن مشخصات فنی، شرایط نصب، و روش‌های تست مشخص می‌شود.
- **اهمیت برای واردات:** این استاندارد شامل الزامات طراحی، نصب، و نگهداری سیستم‌های فتوولتائیک در ایران است. این استاندارد اطمینان می‌دهد که تجهیزات وارد شده به کشور از نظر فنی با نیازهای محیطی و اقلیمی ایران مطابقت داشته باشد.

ب) استاندارد ملی ایران شماره ۱۰۰۰۵ (خدمات انرژی خورشیدی):

- **تعریف:** این استاندارد به ارزیابی سیستم‌های انرژی خورشیدی از جمله بهره‌وری، راندمان، و سازگاری با شرایط محلی در ایران می‌پردازد.
- **اهمیت برای واردات:** به کمک این استاندارد، تجهیزات وارد شده باید با راندمان مناسب و بهره‌وری بالا برای تولید انرژی خورشیدی در شرایط ایرانی تطبیق داشته باشند.

ج) استانداردهای ایمنی ایران (شامل الزامات ایمنی نصب و سیم‌کشی):

- رعایت ایمنی نصب پنل‌ها و سیستم‌های برق‌گیر خورشیدی نیز در استانداردهای ایرانی ضروری است. به‌طور خاص، استفاده از تجهیزات مطابق با استانداردهای ایمنی در این زمینه حائز اهمیت است.

۳. راندمان پنل‌های خورشیدی و تاثیر آن بر واردات

در انتخاب پنل‌های خورشیدی برای واردات به ایران، راندمان یا بهره‌وری پنل‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. راندمان پنل‌ها نشان‌دهنده درصد انرژی است که پنل قادر به تبدیل تابش خورشید به انرژی الکتریکی است.

- **راندمان استاندارد پنل‌ها:** در حال حاضر، راندمان پنل‌های خورشیدی تجاری معمولاً بین ۱۵٪ تا ۲۲٪ است. این راندمان بستگی به نوع فناوری (مونوکریستالی، پلی کریستالی، یا نوار غیرکریستالی) و کیفیت پنل دارد.



- **راندمان و شرایط آب و هوایی:** در مناطق با تابش بالا مانند ایران، پنل‌های با راندمان بالا (حدود ۲۰٪ به بالا) می‌توانند کارایی بهتری ارائه دهند. این موضوع برای کاهش نیاز به زمین بیشتر و افزایش تولید انرژی اهمیت دارد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای واردات پنل خورشیدی به ایران

برای واردات پنل‌های خورشیدی به ایران، رعایت استانداردهای بین‌المللی مانند **IEC 61215**، **IEC 61730** و **UL 1703** به همراه استانداردهای ملی مانند **استاندارد ملی ایران شماره ۱۹۴۴** ضروری است. همچنین، توجه به **راندمان پنل‌ها** برای تطبیق با شرایط آب و هوایی ایران بسیار مهم است. از این رو، واردکنندگان باید از تولیدکنندگان پنل‌هایی با راندمان بالا و مطابق با این استانداردها انتخاب کنند. این رویکرد باعث می‌شود که هم از نظر فنی و هم از نظر زیست‌محیطی پنل‌های خورشیدی وارد شده به ایران با بهترین کیفیت و کارایی بالا باشند. مراجع برای ردیابی بیشتر:

1. **IEC 61215** - [IEC Standards](#)
2. **IEC 61730** - [IEC 61730 Safety Standards](#)
3. **ISO 9001** - [ISO Standards](#)
4. **SEIA Solar Energy Facts** - [SEIA](#)
5. **National Renewable Energy Laboratory (NREL)** - [NREL Standards](#)



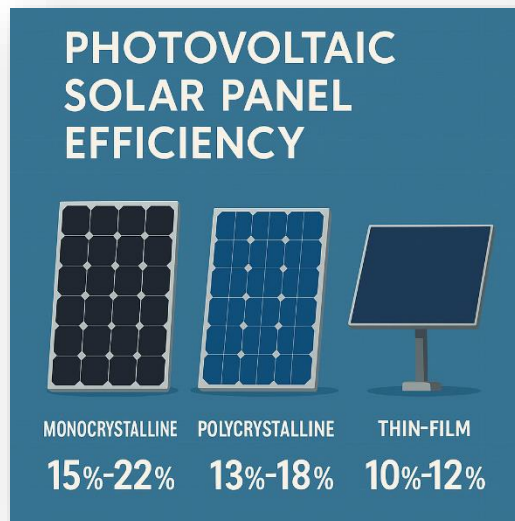
پیوست هشتم

راندمان پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک (PV) بسته به نوع پنل، فناوری مورد استفاده، و سازنده متفاوت است.

در زیر به راندمان انواع مختلف پنل‌های فتوولتائیک اشاره می‌کنم:

۱. پنل‌های مونوکریستالی (Monocrystalline):

- راندمان: معمولاً بین ۱۸٪ تا ۲۲٪.
- ویژگی‌ها: این پنل‌ها بالاترین راندمان را در بین انواع مختلف پنل‌های فتوولتائیک دارند. این پنل‌ها از سیلیکون خالص ساخته می‌شوند و به دلیل ساختار یکنواخت بلورهای سیلیکون، کارایی بالاتری دارند.
- کاربرد: پنل‌های مونوکریستالی بیشتر برای استفاده در فضاهای محدود و پروژه‌های تجاری و صنعتی که نیاز به راندمان بالاتری دارند، مناسب هستند.



۲. پنل‌های پلی کریستالی (Polycrystalline):

- راندمان: معمولاً بین ۱۵٪ تا ۱۸٪.
- ویژگی‌ها: این پنل‌ها از سیلیکون ذوب‌شده ساخته می‌شوند و به طور معمول راندمان کمتری نسبت به پنل‌های مونوکریستالی دارند. این پنل‌ها هزینه کمتری دارند اما به دلیل ساختار بلورهای غیر یکنواخت، کارایی آن‌ها پایین‌تر است.
- کاربرد: این نوع پنل‌ها بیشتر برای پروژه‌هایی که نیاز به هزینه اولیه کمتر دارند و فضای بیشتری برای نصب پنل‌ها در اختیار دارند، مناسب هستند.

۳. پنل‌های نوار غیر کریستالی یا آمورف (Thin-Film):

- راندمان: معمولاً بین ۱۰٪ تا ۱۲٪.
- ویژگی‌ها: پنل‌های نوار غیر کریستالی یا فیلم نازک به طور معمول از مواد شیمیایی مانند کادمیوم تلوراید (CdTe) یا سیلیکون آمورف ساخته می‌شوند. این پنل‌ها سبک‌تر هستند و انعطاف‌پذیری بیشتری دارند، اما راندمان کمتری دارند.
- کاربرد: این پنل‌ها برای پروژه‌هایی که وزن کم و انعطاف‌پذیری بالا را نیاز دارند، مناسب هستند. به‌ویژه در نصب‌هایی که از فضا و وزن محدود برخوردار هستند، استفاده می‌شوند.

۴. پنل‌های با راندمان بالا (Bifacial):

- راندمان: این پنل‌ها می‌توانند راندمانی تا ۲۵٪ نیز داشته باشند.

- ویژگی‌ها: این پنل‌ها از هر دو طرف قادر به جذب نور هستند. به‌طور کلی، این پنل‌ها می‌توانند انرژی بیشتری از منابع غیرمستقیم مانند نور منعطف از زمین یا محیط اطراف جذب کنند.
- کاربرد: این نوع پنل‌ها برای استفاده در پروژه‌های خاص مانند نیروگاه‌های خورشیدی بزرگ یا سیستم‌هایی که نیاز به جذب حداکثری نور دارند، مناسب هستند.

۵. پنل‌های با فناوری پیشرفته (Heterojunction – HJT) و (Tandem):

- راندمان: پنل‌های HJT می‌توانند راندمانی در حدود ۲۳٪ تا ۲۶٪ داشته باشند.
 - ویژگی‌ها: این پنل‌ها از ترکیب لایه‌های مختلف مواد برای جذب بیشتر نور استفاده می‌کنند و می‌توانند کارایی بسیار بالاتری نسبت به پنل‌های سیلیکونی معمولی داشته باشند.
 - کاربرد: این فناوری‌ها بیشتر در پروژه‌های تحقیقاتی و پیشرفته در حال توسعه هستند و به‌طور عمومی در دسترس نیستند، ولی در آینده احتمالاً شاهد استفاده گسترده‌تری از آن‌ها خواهیم بود.
- نتیجه‌گیری: در حال حاضر، راندمان پنل‌های فتوولتائیک در حال حاضر معمولاً بین ۱۵٪ تا ۲۵٪ متغیر است و این بستگی به نوع پنل و فناوری مورد استفاده دارد. پنل‌های مونوکریستالی به‌عنوان پرکاربردترین و بالاترین راندمان را دارند، اما پنل‌های پلی‌کریستالی و نوار غیرکریستالی هم با هزینه پایین‌تر کاربرد دارند. فناوری‌های جدید مانند پنل‌های HJT و Bifacial به‌ویژه در حال توسعه هستند و می‌توانند راندمان‌های بالاتری را ارائه دهند.



پیوست نهم

روش های تست راندمان پنل های فتوولتائیک

برای ارزیابی راندمان پنل های فتوولتائیک، چندین روش استاندارد و دقیق وجود دارد که توسط سازمان های بین المللی مانند **IEC (International Electrotechnical Commission)** و **UL** ارزیابی عملکرد آنها در شرایط مختلف و تأثیرات محیطی انجام می شود. در اینجا به روش های اصلی تست راندمان پنل های فتوولتائیک می پردازیم:

۱. تست عملکرد در شرایط استاندارد (STC - Standard Test Conditions)

تست راندمان پنل های خورشیدی معمولاً در شرایط استاندارد به نام **STC** انجام می شود. این شرایط به طور دقیق برای ارزیابی عملکرد پنل ها تعریف شده اند و شامل موارد زیر هستند:

شرایط تست استاندارد (STC):

- تابش نور خورشید: ۱۰۰۰ وات بر متر مربع (W/m^2) که مشابه تابش خورشید در یک روز صاف است.
- دمای سلول: ۲۵ درجه سانتی گراد (۷۷ درجه فارنهایت). این دما به عنوان دمای آزمایش برای سلول پنل خورشیدی در نظر گرفته می شود.

- طیف نور: طیف نور باید مشابه نور خورشید باشد (AM1.5)، که برای ارزیابی عملکرد پنل در شرایط معمولی استفاده می شود.

مراحل تست:

۱. اندازه گیری توان خروجی: در این تست، توان تولیدی پنل تحت تابش نور خورشید و در دمای استاندارد اندازه گیری می شود. توان اوج یا **Peak Power** که معمولاً با وات (W) اندازه گیری می شود، مشخص می کند که یک پنل در شرایط ایده آل چه میزان انرژی تولید می کند.

۲. محاسبه راندمان: راندمان پنل خورشیدی در این شرایط از فرمول زیر محاسبه می شود:

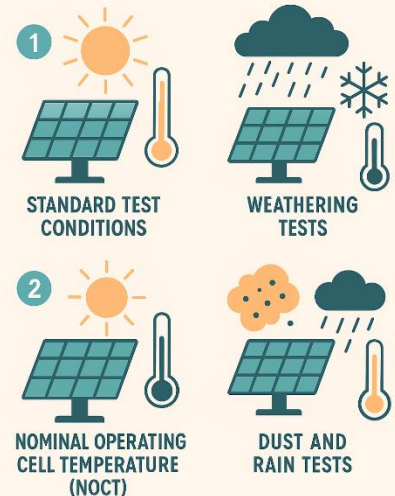
$$\text{راندمان} = \frac{\text{توان تابشی (۱۰۰۰ وات بر متر مربع)}}{\text{توان تولیدی پنل}} \times 100$$

معمولاً راندمان پنل های فتوولتائیک در این شرایط بین ۱۵٪ تا ۲۲٪ است.

۲. تست در شرایط واقعی محیطی (IEC 61215)

در شرایط واقعی، پنل ها تحت تأثیر دماهای بالا، رطوبت، باد و بارش قرار می گیرند که می توانند بر راندمان آنها تأثیر بگذارند. بنابراین، برای اطمینان از کارایی و دوام پنل ها، تست های **IEC 61215** انجام می شود که شرایط واقعی محیطی را شبیه سازی می کند.

METHODS OF TESTING PHOTOVOLTAIC PANEL EFFICIENCY



آزمون‌ها در این شرایط شامل:

- **تست دما و سرمایش:** پنل‌ها به دماهای بالا و پایین (حدود -۴۰ درجه سانتی‌گراد تا +۸۵ درجه سانتی‌گراد) تحت فشار قرار می‌گیرند تا مقاومت آن‌ها در برابر تغییرات دما و عملکرد آن‌ها بررسی شود.
- **تست بارندگی و رطوبت:** شبیه‌سازی شرایط رطوبتی و بارندگی برای بررسی تأثیرات آب بر عملکرد پنل‌ها و ارزیابی مقاومت آن‌ها در برابر خوردگی و آسیب‌های ناشی از رطوبت.
- **تست سایه‌اندازی:** ارزیابی عملکرد پنل‌ها در شرایطی که قسمتی از آن‌ها سایه می‌افتد و بررسی این که چگونه این شرایط بر راندمان کلی تأثیر می‌گذارد.

این تست‌ها معمولاً برای تعیین **طول عمر** پنل‌ها و تضمین عملکرد در طول سال‌ها استفاده می‌شوند.

۳. تست در شرایط عدم تابش (NOCT - Nominal Operating Cell Temperature)

تست **NOCT** برای ارزیابی عملکرد پنل‌ها در شرایطی است که تابش خورشید کمتر از حالت استاندارد باشد (مانند روزهای ابری). در این شرایط، پنل‌ها تحت تابش **۸۰۰ وات بر متر مربع** قرار می‌گیرند.

شرایط تست NOCT:

- **تابش نور خورشید:** ۸۰۰ وات بر متر مربع.
- **دمای محیط:** ۲۰ درجه سانتی‌گراد.
- **دمای سلول:** این تست به شبیه‌سازی عملکرد پنل‌ها در شرایط واقعی و معمولی بیشتر پرداخته و دمای سلول‌ها باید در حدود ۴۵ درجه سانتی‌گراد باشد.

مراحل تست NOCT:

- **اندازه‌گیری توان خروجی:** در این شرایط، میزان تولید انرژی پنل اندازه‌گیری می‌شود و مقایسه می‌شود با شرایط استاندارد (STC).
- **راندمان در شرایط واقعی:** در این تست، راندمان پنل‌ها در شرایط تابش کمتر و دمای بالاتر محیطی ارزیابی می‌شود.

۴. تست باران و گرد و غبار (Dust and Rain Tests)

این تست برای بررسی اثرات گرد و غبار و باران بر راندمان پنل‌ها انجام می‌شود. در مناطق خشک و بیابانی، تجمع گرد و غبار می‌تواند به‌طور قابل توجهی راندمان پنل‌ها را کاهش دهد.

شرایط تست گرد و غبار:

- **شبیه‌سازی گرد و غبار:** این تست‌ها با استفاده از گرد و غبار شبیه‌سازی شده بر سطح پنل‌ها، بررسی می‌کنند که چگونه تجمع گرد و غبار بر توان تولیدی پنل‌ها تأثیر می‌گذارد.

شرایط تست باران:

- شبیه‌سازی باران: بررسی می‌کند که چگونه بارش‌ها بر روی پنل‌ها تأثیر می‌گذارند و آیا شست‌وشوی پنل‌ها پس از بارش به بازگشت راندمان کمک می‌کند یا خیر.

۵. ارزیابی طول عمر پنل‌ها (Lifetime Testing)

یکی دیگر از تست‌های مهم برای پنل‌های خورشیدی، ارزیابی طول عمر آن‌ها است. این تست برای ارزیابی عملکرد پنل‌ها در طول زمان انجام می‌شود و بررسی می‌کند که چگونه شرایط مختلف محیطی بر کارایی آن‌ها تأثیر می‌گذارد.

مراحل تست طول عمر:

- شبیه‌سازی تغییرات طولانی‌مدت: پنل‌ها در معرض دماهای بالا، رطوبت، نور شدید و شرایط محیطی مختلف قرار می‌گیرند تا عملکرد آن‌ها در طول چندین سال بررسی شود.
- محاسبه کاهش راندمان: بررسی کاهش تدریجی راندمان پنل‌ها در طول زمان.

نتیجه‌گیری: در نهایت، تست راندمان پنل‌های فتوولتائیک با استفاده از استانداردهای مختلف مانند **STC**، **IEC 61215**، **NOCT** و سایر تست‌های محیطی انجام می‌شود. این تست‌ها به تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان کمک می‌کند تا از کیفیت و کارایی پنل‌ها در شرایط مختلف محیطی اطمینان حاصل کنند.



برگه یاد داشت:

