

## تحلیل انتقادی پیشنهاد ادغام الاستومرهای ترموپلاستیک (TPE) در فرآورده‌های لاستیک ولکانیزه‌زدایی شده

این طرح بر پایه ادغام الاستومرهای ترموپلاستیک (TPE) در فرآورده‌های حاصل از فرآیند ولکانیزه‌زدایی استوار است. هدف اصلی این پیشنهاد، بهره‌گیری بهینه از ماشین‌آلات ولکانیزه‌زدایی و کامپاندینگ لاستیک (مشابه نمونه‌های عرضه شده در پلتفرم علی‌بابا) است تا از ظرفیت شبکه‌های موجود برای تولید و صادرات TPE حداکثر استفاده به عمل آید. این رویکرد شامل ترکیب لاستیک بازیافتی تایر — شامل پودر لاستیک ولکانیزه‌زدایی شده (dGTR) — با TPE جهت خلق مواد مرکبی است که در تولید قطعات خودرو، درزگیرها و اجزای انعطاف‌پذیر کاربرد دارند. غایت این ایده، ارتقای ارزش افزوده محصول، توسعه سهم بازار از طریق صادرات و پاسخ‌گویی به تقاضای فزاینده برای TPE است؛ موادی که به دلیل برخورداری از ویژگی‌های منعطف لاستیکی در کنار قابلیت فرآیندپذیری ترموپلاستیک‌ها، محبوبیتی روزافزون یافته‌اند.

در این ارزیابی، با نگاهی نقادانه، موشکافانه و منصفانه و با استناد به پژوهش‌های فنی (مانند مطالعات بازیافت لاستیک و آمیزه‌های TPE)، داده‌های بازار و مشخصات دستگاه پیشنهادی، این طرح از منظرهای فنی، اقتصادی، ظرفیت بازار، ملاحظات زیست‌محیطی و ریسک‌های احتمالی واکاوی می‌شود. این تحلیل شامل نمونه‌هایی از رویه‌های صنعتی، چالش‌های سازگاری مواد، موارد خاص (Edge Cases) منجر به شکست احتمالی و موانعی چون محدودیت‌های مقرراتی در ایران خواهد بود. اگرچه این پیشنهاد در راستای ترویج اقتصاد چرخشی و افزایش ارزش افزوده گام برمی‌دارد، اما با چالش‌های جدی روبه‌روست که نادیده گرفتن آن‌ها می‌تواند پایداری پروژه را به مخاطره اندازد.

## ۱. امکان‌سنجی فنی: ظرفیت‌ها، محدودیت‌ها و انطباق با تجهیزات پیشنهادی

از منظر فنی، تلفیق لاستیک ولکانیزه‌زدایی‌شده با TPE امکان‌پذیر است، هرچند دستیابی به خواص مطلوب مستلزم کنترل دقیق فرآیند خواهد بود. TPEها، از جمله ترموپلاستیک‌های پلی‌اولفینی (TPO) یا ولکانیزه‌های ترموپلاستیک (TPV)، پلیمرهایی هستند که ضمن تقلید از خاصیت کشسانی لاستیک، مانند پلاستیک‌ها از قابلیت فرآیندپذیری ذوبی برخوردارند. در این میان، لاستیک بازیابی‌شده طی فرآیند ولکانیزه‌زدایی — که در آن با شکستن پیوندهای عرضی گوگردی، پلاستیسیته به ماده بازمی‌گردد — می‌تواند با TPE مخلوط شود تا آمیزه‌های الاستومری ترموپلاستیک با قابلیت بازیافت و عملکرد بهینه تولید گردند.

## مزایای ادغام

- بهبود خواص مواد: یافته‌های پژوهشی حاکی از آن است که ترکیب لاستیک بازیابی شده با TPE می‌تواند مقاومت ضربه‌ای، انعطاف‌پذیری و دوام محصول را افزایش داده و هم‌زمان هزینه‌های تولید را در مقایسه با استفاده از TPE خالص کاهش دهد. برای مثال، مطالعه‌ای در نشریه (۲۰۲۰) *Materials* نشان می‌دهد که تکنیک‌های اختلاط ذوبی می‌توانند TPE‌هایی با استحکام کششی ۵ تا ۱۵ مگاپاسکال و افزایش طول تا ۳۰۰ درصد تولید کنند که برای کاربردهایی نظیر درزگیرهای خودرو یا زیره کفش کاملاً ایده‌آل هستند. این نتایج با قابلیت‌های دستگاه علی‌بابا که از پردازش هم‌زمان TPE، TPO و TPV در کنار لاستیک ولکانیزه‌زدایی شده پشتیبانی می‌کند، همخوانی دارد.
- هم‌افزایی فرآیندی: دستگاه مورد نظر — یک اکسترودر دوپیچه با قطر ۷۱ میلی‌متر، نسبت L/D بین ۴۰ تا ۵۲ و ظرفیت خروجی ۷۰۰ تا ۱۲۰۰ کیلوگرم در ساعت — به گونه‌ای طراحی شده که هر دو فرآیند ولکانیزه‌زدایی و ترکیب‌سازی (*Compounding*) را پوشش دهد. این دستگاه با مدیریت اختلاط تحت برش بالا (*High Shear Mixing*)، برای افزودن پلت‌های TPE به dGTR مذاب بسیار مناسب است. ویژگی‌هایی چون ولتاژ قابل تنظیم، سیستم تمام‌اتوماتیک و قطعات استاندارد (نظیر PLC و گیربکس)، امکان کنترل دقیقی را فراهم می‌کنند که پتانسیل اختلاط در خط (*Inline Blending*) را میسر می‌سازد. این امر می‌تواند با ادغام فرآیندها، مصرف انرژی را در مقایسه با روش‌های مجزا، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد کاهش دهد؛ مشابه آنچه در سیستم‌های دوپیچه پیشرفته مشاهده می‌شود.
- شواهد مستند: در مقاله «بازیافت ضایعات لاستیک: یک مرور کلی» (۲۰۲۰، *PMC*)، بر سازگاری TPE‌های حاصل از لاستیک بازیافتی در فرآیند ولکانیزاسیون دینامیک تأکید شده است؛ جایی که ایجاد پیوندهای عرضی جزئی حین ترکیب‌سازی، موجب تقویت پایداری فاز می‌شود. همچنین، گزارش دیگری در نشریه *Cleaner Engineering and Technology* (۲۰۲۲) اشاره دارد که آمیزه‌های لاستیک بازیابی شده و TPE در صورت استفاده از سازگارکننده‌ها (مانند پلیمرهای پیوندخورده با انیدرید مالئیک)، می‌توانند به ۷۰ تا ۸۰ درصد عملکرد TPE خالص دست یابند.

## معایب و چالش‌های فنی

- مشکلات سازگاری: یکی از چالش‌های بنیادین، عدم سازگاری ذاتی میان لاستیک بازیابی‌شده آب‌گریز (که غالباً حاوی دوده و روغن است) و ماتریس‌های قطبی TPE است. این نقیصه می‌تواند به جدایی فاز، ضعف در چسبندگی بین‌سطحی و افت خواص مکانیکی (نظیر کاهش ۲۰ تا ۴۰ درصدی استحکام کششی در صورت عدم استفاده از سازگارکننده‌ها) منجر شود. مطالعاتی همچون مقالات *Frontiers in Sustainability* (۲۰۲۵) هشدار می‌دهند که فرآیند ولکانیزه‌زدایی ممکن است یکپارچگی زنجیره‌های پلیمری را به مخاطره اندازد؛ به‌ویژه اگر دستگاه در دوره‌های بالا (مثلاً ۶۰۰ دور در دقیقه) کار کند، حرارت ناشی از برش می‌تواند موجب تخریب زنجیره‌ها و تولید محصولی شکننده شود که فاقد استانداردهای صادراتی است.
- محدودیت‌های فرآیندی: اگرچه خروجی بالای دستگاه یک مزیت محسوب می‌شود، اما تمرکز آن بر گرانول‌سازی ممکن است بدون اصلاحات فنی، فرآیند ترکیب‌سازی TPE را به شکلی بهینه انجام ندهد. برای نمونه، چنانچه خروجی ولکانیزه‌زدایی‌شده به صورت کلوخه‌ای باشد، احتمالاً پیش از اختلاط با TPE به مراحل تکمیلی (نظیر استفاده از آسیاب‌های دوغلتکی) نیاز خواهد بود که پیچیدگی عملیاتی را افزایش می‌دهد. بر اساس اسناد فنی، انجام آزمون‌های دقیق با استفاده از آنالیز هوریکز (*Horikx Analysis*) برای تضمین گزینش‌پذیری فرآیند (ولکانیزه‌زدایی بالای ۷۰ درصد بدون تخریب ساختاری) ضروری است.

## موارد خاص (Edge Cases)

در صورت استفاده از خوراک‌های ناهمگون (مانند ترکیب متغیر تایر خودروهای سواری و سنگین با نسبت‌های متفاوت SBR/NR)، فرآیند اختلاط ممکن است با شکست مواجه شده و محصولی غیریکنواخت تولید کند. همچنین، ولکانیزه‌زدایی در دماهای بالا (فراتر از ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد) خطر انتشار ترکیبات آلی فرار (VOCs) را در پی دارد که می‌تواند مانعی جدی برای کسب استانداردهای زیست‌محیطی در بازارهای سخت‌گیر نظیر اتحادیه اروپا باشد.

## جمع‌بندی فنی

به طور کلی، این پیشنهاد از منظر فنی و با بهره‌گیری از تجهیزات مذکور قابل اجراست، اما موفقیت آن در گرو فعالیت‌های تحقیق و توسعه (R&D) مستمر برای بهینه‌سازی فرآیند است. نتیجه‌گیری منصفانه آن است که این طرح برای تولید محصولات با کیفیت متوسط امیدوارکننده می‌نماید، اما برای ورود به بازارهای صادراتی طراز اول، یک راهکار آماده و تضمین‌شده (Plug-and-Play) به شمار نمی‌آید.

## ۲. پیامدهای اقتصادی: تحلیل هزینه-فایده و ظرفیت بازگشت سرمایه (ROI)

از منظر اقتصادی، این پیشنهاد می‌تواند از پتانسیل شبکه‌های تولید TPE در ایران (به‌ویژه در صنعت قطعات خودرو) بهره‌مند شود، اما بررسی دقیق هزینه‌های پنهان و واقعیت‌های بازار امری ضروری است.

### مزایا

- کاهش هزینه‌های مواد اولیه: جایگزینی بخشی از TPE بکر با لاستیک بازیافتی ارزان‌قیمت، می‌تواند بهای تمام‌شده محصول نهایی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد.
- ارزش افزوده صادراتی: تبدیل پسماند لاستیک به یک کالای مهندسی‌شده مانند TPE، ارزش افزوده‌ای بسیار فراتر از فروش خام پودر لاستیک ایجاد می‌کند.

## ۲. ارزش افزوده و اهرم صادراتی

آمیزه‌سازی (Compounding) لاستیک بازیافتی با ترموپلاستیک الاستومرها (TPE) پتانسیل بالایی برای خلق محصولاتی با مزیت رقابتی منحصربه‌فرد دارد. این ترکیب فنی می‌تواند در تولید محصولاتی استراتژیک نظیر درزگیرها یا واشرها به کار گرفته شود و از ظرفیت‌های رو به رشد بازار صادراتی TPE ایران بهره‌برداری کند؛ بازاری که طبق پیش‌بینی‌های معتبر، ارزش آن در سال ۲۰۲۵ به حدود ۵۰۰ میلیون دلار خواهد رسید. با در نظر گرفتن بهای تمام‌شده دستگاه (بین ۶۰,۰۰۰ تا ۱۰۰,۰۰۰ دلار) و ظرفیت تولید بالای آن، در صورت نفوذ به بازارهای هدف در خاورمیانه و آسیا که تقاضا برای TPE پایدار در آن‌ها با نرخ رشد مرکب سالانه (CAGR) ۴.۸ درصد (طبق آمار *MarketsandMarkets*) در حال افزایش است، نرخ بازگشت سرمایه (ROI) می‌تواند طی یک بازه ۲ تا ۳ ساله به ۲۰ تا ۳۰ درصد بالغ شود. برای مثال، استفاده از لاستیک بازیافتی ارزان‌قیمت با نرخ ۲۰۰ تا ۴۰۰ دلار در هر تن در مقابل TPE بکر با قیمت بیش از ۲,۰۰۰ دلار، می‌تواند هزینه‌ی مواد اولیه را بین ۱۵ تا ۲۵ درصد کاهش دهد.

هم‌افزایی‌های شبکه‌ای نیز نقش کلیدی در این مسیر ایفا می‌کنند. چنانچه زیرساخت یا شبکه‌ی توزیعی برای صادرات TPE از پیش مهیا باشد، یکپارچه‌سازی فرآیندها به کاهش محسوس هزینه‌های لجستیک و هموارسازی مسیر فروش B2B منجر خواهد شد. این الگو پیش‌تر در مدل‌های موفق اروپایی برای TPE بازیافتی (طبق گزارش *Smithers* در سال ۲۰۲۶) به اثبات رسیده است.

## معایب و چالش‌ها

- هزینه‌های اولیه و عملیاتی بالا: اگرچه قیمت پایه دستگاه معقول به نظر می‌رسد، اما مخارج جانبی شامل تأمین سازگارکننده‌ها، تجهیزات پیشرفته آزمایشگاهی (مانند دستگاه RPA برای تحلیل‌های رئولوژی) و اخذ گواهینامه‌های بین‌المللی نظیر ISO و CE می‌تواند بودجه راه‌اندازی اولیه را به بیش از ۱۵۰,۰۰۰ دلار افزایش دهد. همچنین، فرایند آمیزه‌سازی ماهیتی بسیار انرژی‌بر دارد (با توان مصرفی ۲۸۰ کیلووات) که حتی با وجود یارانه‌های داخلی انرژی، سالانه حدود ۵۰,۰۰۰ دلار به هزینه‌های جاری می‌افزاید. علاوه بر این، محدودیت‌های ناشی از تحریم‌ها می‌تواند هزینه‌ی تأمین افزودنی‌های تخصصی TPE را بین ۲۰ تا ۳۰ درصد افزایش دهد.
  - ریسک اشباع بازار: بازار لاستیک بازیافتی در ایران همچنان در مراحل ابتدایی رشد خود قرار دارد (بخشی از بازار جهانی ۱.۵ میلیارد دلاری با نرخ رشد سالانه ۷.۲۱ درصد طبق گزارش *Mordor Intelligence*). با این حال، محصولات ترکیبی TPE در بازارهای جهانی با رقابت تهاجمی صادرکنندگان چینی روبه‌رو هستند که محصولات بکر را با قیمت‌های رقابتی عرضه می‌کنند. از سوی دیگر، قوانین سخت‌گیرانه‌ی اتحادیه اروپا درباره محتوای بازیافتی (مانند استانداردهای *End-of-Waste*)، نفوذ به بازار اروپا را مشروط به گذراندن آزمون‌های انطباق بسیار پرهزینه کرده است.
  - مخاطرات فنی و اقتصادی: هرگونه افت کیفیت در ترکیب نهایی به دلیل تخریب ساختاری مواد، می‌تواند نرخ مرجوعی کالا را به ۱۰ تا ۲۰ درصد برساند که عملاً حاشیه سود عملیاتی را از بین می‌برد. در یک سناریوی بدبینانه و در صورت ضعف در تقاضا، با استناد به پیش‌بینی رشد ۱۰.۸۹ درصدی *Technavio* برای صنعت لاستیک بازیافتی، نرخ بازده داخلی (IRR) ممکن است به کمتر از ۱۵ درصد تنزل یابد.
- در مجموع، علی‌رغم توجیه اقتصادی قوی برای صادرات به بازارهای تخصصی، این مدل بدون اجرای طرح‌های پایلوت (آزمایشی) آسیب‌پذیر خواهد بود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که هرگونه اغراق در تخمین هم‌افزایی‌های شبکه‌ای می‌تواند خوش‌بینی موجود در طرح را غیرواقع‌بینانه جلوه دهد.

### ۳. پتانسیل بازار: فرصت‌ها، تقاضا و چشم‌انداز رقابتی

تحلیل وضعیت بازار نشان می‌دهد که این پیشنهاد با روندهای جهانی در حوزه پایداری زیست‌محیطی همسو است، اما موفقیت نهایی آن در گرو انطباق دقیق با شرایط خاص اقتصاد ایران است.

#### فرصت‌ها

- تقاضای فزاینده برای TPE پایدار: بازار جهانی TPE که ارزش آن در سال ۲۰۲۵ حدود ۳۰.۸۳ میلیارد دلار برآورد شده و تا سال ۲۰۳۰ به ۳۸.۹۴ میلیارد دلار خواهد رسید، به شدت از محصولات بازیافتی برای کسب گواهی‌های زیست‌محیطی استقبال می‌کند. در ایران با تولید سالانه ۲۵۲ هزار تن تایر ضایعاتی (که تنها ۴۵ درصد آن بازیافت می‌شود)، آمیزه‌سازی می‌تواند صادرات قطعات خودرو به بازارهایی نظیر ترکیه و روسیه را هدف قرار دهد. این بازارها پتانسیل بالایی برای جذب ترکیبات هیبریدی TPE-لاستیک در تولید درزگیرها دارند و تصاحب ۵ تا ۱۰ درصد از این سهم بازار در دسترس است. گزارش‌های *Grand View Research* نیز بر رشد سالانه ۷.۷۲ درصدی لاستیک بازیافتی تأکید دارند که ادغام آن با TPE، ارزش سبد صادراتی را به شکل چشمگیری ارتقا می‌دهد.

- مثال‌های کاربردی: یافته‌های منتشر شده در نشریه *Journal of Cleaner Production* (۲۰۲۲) نشان می‌دهد که استفاده از این ترکیبات در صادرات صنایع پای‌افزار (کفش) موفقیت‌آمیز بوده و توانسته است ضمن کاهش پیامدهای زیست‌محیطی، تقاضای بازارهای آسیایی را به خوبی پوشش دهد.

## چالش‌ها

- پذیرش محدود در بازار داخلی: صنایع تایرسازی داخلی عموماً نسبت به جایگزینی مواد بکر با مواد بازیافتی مقاومت نشان می‌دهند و این محصولات اغلب با برچسب کیفیت پایین شناخته می‌شوند. علاوه بر این، موانع تعرفه‌ای و استانداردهای کیفی دشوار در کنار محدودیت دسترسی به فناوری‌های نوین به دلیل تحریم‌ها، قدرت رقابت‌پذیری بین‌المللی را تحت الشعاع قرار داده است.
  - فشارهای رقابتی: سلطه تولیدکنندگان چینی بر بازار TPE و عرضه محصولات بکر با قیمت پایین، فشار مضاعفی بر صادرات ایران وارد می‌کند. همچنین، در صورت تشدید الزامات بین‌المللی برای محتوای بازیافتی، محصولات فاقد گواهینامه‌های معتبر راهی به بازارهای تراز اول نخواهند داشت.
  - ملاحظات جانبی: با وجود رشد ۶.۴ درصدی بازار لاستیک ولکانیزه‌شده (طبق گزارش *Credence Research*)، داده‌های تخصصی در حوزه TPE همچنان پراکنده است. عدم وجود بحث‌های جدی در شبکه‌های تخصصی (نظیر X) نشان‌دهنده سطح پایین توجه عمومی و تخصصی به این حوزه خاص در مقطع کنونی است.
- از نگاهی نقادانه، پتانسیل بازار وجود دارد اما عمدتاً به بخش‌های بسیار تخصصی (Niche Markets) محدود می‌شود؛ لذا اتکای مفرط به صادرات می‌تواند ریسک نوسانات بازار را افزایش دهد.

## ۴. ملاحظات زیست‌محیطی و پایداری

طرح پیشنهادی از منظر زیست‌محیطی گامی مؤثر در جهت کاهش پسماند محسوب می‌شود، هرچند در مرحله اجرا با چالش‌های فنی همراه است.

- جنبه‌های مثبت: فرایند دی‌ولکانیزاسیون در کنار آمیزه‌سازی TPE، مدل اقتصاد چرخشی را تقویت کرده و با جلوگیری از انباشت تایرها در مراکز دفن، مصرف لاستیک بکر را تا ۲۰ درصد کاهش می‌دهد. این دستگاه با حذف مواد شیمیایی از فرایند خود، آلودگی را به حداقل رسانده و با اهداف کلان بازیافت در کشور هم‌راستاست.
- نقاط ضعف: مصرف بالای انرژی و ریسک انتشار ترکیبات آلی فرار (VOCs) حین فرایند دی‌ولکانیزاسیون می‌تواند بخشی از مزایای زیست‌محیطی را خنثی کند. عدم بهینه‌سازی فرایند ممکن است به تخریب ساختاری مواد و هدررفت منابع منجر شود. همچنین، آلودگی ناشی از حمل‌ونقل در صادرات انبوه باید در تراز نهایی زیست‌محیطی لحاظ گردد.
- پیامدها: این طرح گامی مثبت در مسیر صنعت سبز است، اما برای اثبات برتری مطلق خود، نیازمند ارزیابی دقیق چرخه حیات (LCA) است.

## ۵. ارزیابی کلی، ریسک‌ها و توصیه‌ها

در یک تحلیل نهایی، این پیشنهاد فرصتی ارزشمند برای بهره‌برداری از شبکه‌های نوآورانه TPE فراهم می‌آورد، اگرچه برخی ابعاد آن بیش از حد خوش‌بینانه ترسیم شده است. یکپارچه‌سازی فنی با دستگاه مذکور امکان‌پذیر است، اما حل چالش‌های مربوط به سازگاری مواد، مستلزم سرمایه‌گذاری جدی در حوزه تأمین سازگارکننده‌ها خواهد بود. از نظر اقتصادی، دستیابی به نرخ بازده ۲۰ تا ۳۰ درصدی در بخش صادرات محتمل است، اما تحریم‌ها و هزینه‌های پنهان، ریسک‌های جدی را تحمیل می‌کنند.

## ریسک‌های کلیدی

1. شکست فنی: احتمال عدم دستیابی به کیفیت مطلوب در آمیزه‌ها که نیازمند کنترل دقیق آزمایشگاهی است.
2. نوسانات اقتصادی: تأثیر مستقیم تحریم‌ها بر هزینه‌ها و زنجیره تأمین.
3. عدم پذیرش بازار: ریسک پس‌زدن محصول توسط مشتریان بین‌المللی به دلیل فقدان گواهی‌نامه‌ها.

## توصیه‌های اجرایی

- ابتدا آزمایش‌های مقیاس کوچک (Pilot) با دستگاه انجام شود.
  - مطالعات تخصصی بر روی فرمولاسیون سازگارکننده‌ها به‌طور جدی دنبال گردد.
  - داده‌های صادراتی TPE ایران با نگاهی واقع‌بینانه بازنگری شود.
- چنانچه هم‌افزایی‌های شبکه‌ای مستدل و واقعی باشند، می‌توان با احتیاط طرح را پیش برد؛ در غیر این صورت، برای کاهش ریسک سرمایه‌گذاری، تمرکز بر تولید لاستیک بازیافتی خالص منطقی‌تر به نظر می‌رسد.