



Comprehensive Explanation of the Applications of Additive Manufacturing Technology in the Automotive Industry with a Meta-Synthesis Review Approach

Alireza Abbasi^{*}

M.Sc. Student, Industrial Management – Production and Operations, University of Tehran, Tehran, Iran.
Abbasi.alireza79@ut.ac.ir

Rohollah Ghasemi

Assistant Professor, Department of Operations Management and Decision Sciences, School of Industrial Management and Technology, Faculty of Management, University of Tehran, Tehran, Iran.

ghasemir@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:

Research Full Paper

Article history:

Received: 2025-06-02

Revised: 2025-07-27

Accepted: 2025-08-25

Keywords:

Additive Manufacturing;

3D Printing;

Automotive Industry;

Environmental

Sustainability.

EXTENDED ABSTRACT

Background and Objectives: Additive manufacturing, as one of the advanced production technologies, has gained a prominent place in the automotive industry in recent years. This method, by gradually adding materials and eliminating the need for traditional machining or molding processes, enables the production of parts with complex geometries, low weight, high strength, and customized designs. Reduced consumption of raw materials, minimized waste, improved technical performance, enhanced fuel efficiency, and achievement of environmental sustainability goals are among its most important advantages. The aim of the present study is to systematically identify and analyse the applications of additive manufacturing in the automotive industry and to present an integrated picture of the capacities, opportunities, and achievements of this technology.

Materials and Methods: This study was conducted with a qualitative approach using the meta-synthesis method. Data were collected from the Web of Science database within the time span of 2015 to 2025, using the keywords “additive manufacturing,” “automotive industry,” and “applications of additive manufacturing.” After the initial search and screening, 214 articles were identified, which were reduced to 28 final articles based on inclusion and exclusion criteria, abstract reviews, and full-text evaluation. Validation and quality control were performed using the Critical Appraisal Skills Programme (CASP) checklist, and only articles with a quality score of 7 out of 10 or higher were selected. Agreement between the two reviewers was confirmed with a Cohen’s kappa coefficient of 0.82, indicating a strong consensus in coding and data analysis.

* Corresponding author.

E-mail: abbasi.alireza79@ut.ac.ir

<https://orcid.org/0009-0009-0862-1390>

Results: Based on the analysis of the selected articles, the most important applications of additive manufacturing in the automotive industry include: reducing vehicle weight to improve fuel efficiency, dynamic performance, and the range of electric vehicles; accelerating and reducing the cost of prototype production by up to 80% and eliminating the need for expensive molds; manufacturing complex and customized parts with advanced geometries; on-site and on-demand production of spare parts to reduce inventory costs and supply time; improving engine cooling and ventilation systems by creating complex channels and optimizing heat transfer; using composite materials and carbon fibre for lightweighting and enhancing aerodynamic stability; reducing waste and improving environmental indicators through the use of recycled materials; manufacturing parts and bodies in concept cars with high flexibility in design; and producing advanced molds to lower costs and shorten mass-production timelines.

Conclusion: Additive manufacturing, with its ability to reduce material and energy consumption, increase production quality and speed, and realize innovative designs, has gained a strategic position within the automotive supply chain. This technology not only contributes to optimizing technical components and reducing environmental impacts but also facilitates the achievement of sustainable development goals. To fully exploit its potential, the adoption of practical approaches by automakers and policymakers is essential—including establishing sustainable collaborations between industry and academia, providing financial and legal support, developing innovation networks, and implementing technical standards and frameworks. Continuation of this trend could define a sustainable and competitive model for the global automotive industry.

Cite this article:

Abbasi, A. & Ghasemi, R. (2025). Comprehensive Explanation of the Applications of Additive Manufacturing Technology in the Automotive Industry with a Meta-Synthesis Review Approach. *Managerial Modelling in Sustainable Development*, 1(1), 103-125.

DOI: <https://doi.org/10.22075/mmsd.2025.37910.1000>

© 2025 authors retain the copyright and full publishing rights. Journal of Managerial Modelling in Sustainable Development Published by **Semnan University Press**.

This is an open access article under the CC-BY-4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



تبیین جامع کاربردهای فناوری تولید افزایشی در صنعت خودروسازی با رویکرد مروری فرا ترکیب

علیرضا عباسی*

دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد، مدیریت صنعتی گرایش تولید و عملیات، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

Abbasi.alireza79@ut.ac.ir

روح الله قاسمی

استادیار، گروه مدیریت عملیات و علوم تصمیم، دانشکده مدیریت صنعتی و فناوری، دانشکدگان مدیریت، دانشگاه

تهران، تهران، ایران.

ghasemir@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: تولید افزایشی به عنوان یکی از فناوری‌های پیشرفته تولید، در سال‌های اخیر جایگاهی ویژه در صنعت خودروسازی به دست آورده است. این روش با افزودن تدریجی مواد و حذف نیاز به فرآیندهای ماشین‌کاری یا قالب‌سازی سنتی، امکان ساخت قطعاتی با هندسه پیچیده، وزن کم، استحکام بالا و طراحی سفارشی را فراهم می‌کند. کاهش مصرف مواد خام، کاهش ضایعات، بهبود عملکرد فنی، ارتقاء راندمان سوخت و تحقق اهداف پایداری زیست‌محیطی از مهم‌ترین مزایای آن است. هدف پژوهش حاضر، شناسایی و تحلیل نظام‌مند کاربردهای تولید افزایشی در صنعت خودروسازی، و ترسیم تصویری یکپارچه از ظرفیت‌ها، فرصت‌ها و دستاوردهای این فناوری است.
واژه‌های کلیدی: تولید افزایشی؛ چاپ سه بعدی؛ صنعت خودروسازی؛ پایداری محیط‌زیست.	روش: مطالعه حاضر با رویکرد کیفی و به روش فراترکیب انجام شد. داده‌ها از پایگاه اطلاعاتی وب آو سانیس در بازه سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ و با استفاده از کلیدواژه‌های «تولید افزایشی»، «صنعت خودروسازی» و «کاربردهای تولید افزایشی» جمع‌آوری گردید. پس از جست‌وجو و غربالگری اولیه، ۲۱۴ مقاله شناسایی شد که بر اساس معیارهای ورود و خروج، بررسی چکیده‌ها و ارزیابی محتوای کامل، به ۲۸ مقاله نهایی کاهش یافت. اعتبارسنجی و کنترل کیفیت با چک‌لیست مهارت‌های ارزیابی حیاتی انجام شد و تنها مقالات دارای امتیاز کیفی ۷ از ۱۰ یا بالاتر انتخاب شدند. توافق میان دو ارزیاب با شاخص کاپای کوهن ۰.۸۲ تأیید گردید که بیانگر توافق قوی در کدگذاری و تحلیل داده‌ها است.

یافته‌ها: بر اساس تحلیل مقالات منتخب، مهم‌ترین کاربردهای تولید افزایشی در صنعت خودروسازی شامل موارد زیر است: کاهش وزن خودرو برای بهبود بهره‌وری سوخت، عملکرد دینامیکی و افزایش برد خودروهای برقی؛ تسریع و کاهش هزینه ساخت نمونه‌های اولیه تا ۸۰ درصد و حذف نیاز به قالب‌های پرهزینه؛ ساخت قطعات پیچیده و سفارشی با هندسه‌های پیشرفته؛ تولید قطعات یدکی در محل و به‌صورت درخواستی برای کاهش هزینه انبارداری و زمان تأمین؛ بهبود سامانه‌های خنک‌کننده و تهویه موتور با ایجاد کانال‌های پیچیده و بهینه‌سازی انتقال حرارت؛ استفاده از مواد کامپوزیتی و فیبر کربن برای سبک‌سازی و افزایش پایداری آپرودینامیکی؛ کاهش ضایعات و ارتقاء شاخص‌های زیست‌محیطی با استفاده از مواد بازیافتی؛ ساخت قطعات و بدنه در خودروهای مفهومی با انعطاف‌پذیری بالا در طراحی؛ و تولید قالب‌های پیشرفته برای کاهش هزینه‌ها و زمان تولید انبوه.

نتیجه‌گیری: تولید افزایشی، با توانمندی در کاهش مصرف مواد و انرژی، افزایش کیفیت و سرعت تولید، و امکان تحقق طرح‌های نوآورانه، جایگاهی راهبردی در زنجیره تأمین صنعت خودرو یافته است. این فناوری نه تنها به بهینه‌سازی اجزای فنی و کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک کرده، بلکه مسیر دستیابی به اهداف توسعه پایدار را نیز هموار می‌سازد. برای بهره‌برداری کامل از ظرفیت‌های آن، اتخاذ رویکردهای اجرایی از سوی خودروسازان و سیاست‌گذاران ضروری است؛ از جمله ایجاد همکاری‌های پایدار میان صنعت و دانشگاه، حمایت‌های مالی و قانونی، توسعه شبکه‌های نوآوری و به‌کارگیری استانداردها و چارچوب‌های فنی. استمرار این روند می‌تواند الگویی پایدار و رقابتی برای صنعت خودروسازی جهان ترسیم کند.

استناد: عباسی، علیرضا و قاسمی، روح الله. (۱۴۰۴). تبیین جامع کاربردهای فناوری تولید افزایشی در صنعت خودروسازی با رویکرد مروری فراترکیب. *مدل‌سازی مدیریتی در توسعه پایدار*، ۱(۱)، ۱۰۳-۱۲۵.

DOI: <https://doi.org/10.22075/mmsd.2025.37951.1001>

ناشر: دانشگاه سمنان

۱. مقدمه

صنعت خودروسازی به عنوان یکی از صنایع پیشرو و رقابتی در سطح جهان، با چالش‌های متعددی همچون کاهش هزینه‌ها، ارتقای کیفیت، کاهش مدت زمان تولید و کاهش آثار منفی زیست‌محیطی روبروست. همزمان با این مسائل، انتظارات روزافزون مشتریان برای نوآوری بیشتر و ارائه خودروهایی با طراحی‌های پیچیده و مدرن، تولیدکنندگان خودرو را به سمت بهره‌گیری از فناوری‌های نوین سوق داده است. در این زمینه، فناوری‌های تولید افزایشی^۱ به خاطر انعطاف‌پذیری بالا، قابلیت ساخت قطعات با پیچیدگی زیاد، کاهش ضایعات و نقش مؤثر در طراحی‌های نوین، به طور چشمگیری مورد توجه قرار گرفته‌اند.

این فناوری تنها به دگرگونی روش‌های سنتی تولید نینجامیده، بلکه رویکرد نوینی در فرآیند ساخت قطعات خودرو ارائه کرده است. به واسطه بهره‌گیری از قابلیت‌های طراحی دیجیتال و امکان تولید مستقیم اشیای سه‌بعدی، تولید افزایشی موجب شده خودروسازان فراتر از محدودیت‌های مرسوم طراحی رفته و قطعاتی با اشکال پیچیده و به صورت سفارشی بسازند (موخاراجه و وو^۲، ۲۰۲۵). این نوآوری به ویژه در بخش‌هایی نظیر خودروهای الکتریکی، ماشین‌های مسابقه‌ای و مدل‌های مفهومی اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است؛ جایی که فاکتورهایی مانند وزن، استحکام و بهره‌وری انرژی از اولویت‌های اصلی به شمار می‌آیند (واسکو^۳، ۲۰۲۱).

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در توسعه مواد مورد استفاده در تولید افزایشی، همچنان دامنه مواد قابل استفاده در این فناوری نسبت به روش‌های سنتی محدودتر است. به طور نمونه، برخی آلیاژهای پیشرفته و کامپوزیت‌های خاص همچنان در مرحله تحقیق و توسعه قرار دارند (راجا اسکار و همکاران^۴، ۲۰۲۵) علاوه بر این، هزینه بالای چاپگرهای صنعتی، به ویژه برای ساخت قطعات فلزی، موجب شده است تا شرکت‌های کوچک‌تر نتوانند به راحتی از این فناوری بهره‌مند شوند (راج^۵، ۲۰۲۵) یکی دیگر از چالش‌های اصلی تولید افزایشی، اطمینان از کیفیت قطعات تولیدی است؛ چرا که گاهی قطعات ساخته‌شده با این روش دچار نقص‌های داخلی یا ضعف در استحکام می‌شوند و این امر به نیاز برای کنترل کیفیت پیشرفته منجر می‌گردد (گالیب و همکاران^۶، ۲۰۲۵).

پیش‌بینی می‌شود که با پیشرفت فناوری‌های نوین و بهبود روندهای تولید افزایشی، این روش جایگاه مهم‌تری در صنعت خودرو پیدا کند. مطالعات اخیر نشان می‌دهد ادغام هوش مصنوعی و تحلیل داده‌های کلان با فناوری تولید افزایشی، زمینه بهینه‌سازی طراحی و ارتقای دقت ساخت را فراهم می‌سازد (چینچانیکار و شایخ^۷، ۲۰۲۲). همچنین انتظار می‌رود در آینده، استفاده از مواد زیست‌تجزیه‌پذیر و پایدار در فرایند تولید افزایشی گسترش یابد و این موضوع به کاهش آثار زیست‌محیطی صنعت خودروسازی کمک کند (ویلانی و همکاران^۸، ۲۰۲۵).

در سوی دیگر، ضرورت دارد که مطالعات مرتبط با این فناوری از طریق روش‌های فراترکیب به‌طور جامع مورد بررسی قرار گیرد تا کاربردها و فرصت‌های موجود در صنعت خودرو به‌شکل نظام‌مند شناسایی شود. انجام چنین

1 Additive Manufacturing

2 Mukherjee & Wu

3 Vasco

4 Rajasekar et al.

5 Raj

6 Galib et al.

7 Chinchani & Shaikh

8 Villani et al.

پژوهش‌هایی، تلاشی ساختاریافته برای تلفیق یافته‌های علمی و تعیین مسیرهای کاربرد عملی این فناوری در عرصه خودروسازی است. بنابراین، دستاوردهای این مقاله می‌تواند زمینه‌ساز گسترش تحقیقات آینده و تسریع روند پذیرش فناوری تولید افزایشی در این صنعت شود.

شایان ذکر است که در ادبیات علمی و استانداردهای بین‌المللی، "تولید افزایشی" عنوان فراگیر و رسمی برای کلیه روش‌ها و فناوری‌هایی است که با افزودن تدریجی مواد، ساخت قطعات سه‌بعدی را ممکن می‌سازند. هرچند عبارت "چاپ سه‌بعدی" نیز به صورت گسترده و به ویژه در سطح عمومی استفاده می‌شود، اما این واژه عمدتاً به فناوری‌های مصرف‌کننده محور یا نمونه‌سازی سریع اشاره دارد و خود زیرمجموعه‌ای از تولید افزایشی محسوب می‌شود. در این مقاله، برای حفظ سازگاری با منابع استاندارد و دقت علمی، اصطلاح "تولید افزایشی" به کار گرفته شده و در صورت لزوم، معادل "چاپ سه‌بعدی" نیز برای رفع ابهام ذکر شده است.

۲. پیشینه پژوهش

تولید افزایشی به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین و اثرگذارترین فناوری‌های تولیدی طی سال‌های اخیر، رشد قابل توجهی را در صنایع گوناگونی مانند هوافضا، پزشکی، خودروسازی و ساخت تجهیزات صنعتی تجربه کرده است (موخاراجه و وو، ۲۰۲۵). این فناوری که نخستین بار در اواخر دهه ۱۹۸۰ معرفی شد، امروزه به یکی از روش‌های اصلی برای ساخت قطعات دقیق و پیچیده بدل شده است. برخلاف شیوه‌های سنتی نظیر ماشین‌کاری، ریخته‌گری یا قالب‌گیری تزریقی که با حذف مواد کار می‌کنند، تولید افزایشی، قطعات را با افزودن لایه‌های متوالی ماده به صورت سه‌بعدی شکل می‌دهد (تراووتا و همکاران^۱، ۲۰۲۵). این ویژگی امکان ساخت هندسه‌های پیچیده، طرح‌های سفارشی و قطعاتی با ساختارهای سبک اما مقاوم را به شکل ساده‌تر فراهم می‌کند. امروزه بسیاری از خودروسازان بزرگ از این فناوری برای تولید قطعات اختصاصی، بهبود عملکرد خودروها و حتی ساخت اجزای داخلی و خارجی بدنه بهره می‌برند (پریارون و همکاران^۲، ۲۰۲۳).

در روش‌های سنتی تولید مانند فرز‌کاری، تراشکاری و ریخته‌گری، بخش زیادی از مواد اولیه به صورت ضایعات دفع می‌شود که این امر نه تنها هزینه مواد را افزایش داده، بلکه پیامدهای زیست‌محیطی نیز به همراه دارد (ویلانی و همکاران، ۲۰۲۵). در مقابل، تولید افزایشی به عنوان روشی پایدارتر و بهینه‌تر شناخته می‌شود، چرا که فقط مقدار لازمی از مواد برای ساخت محصول مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فناوری می‌تواند مصرف مواد خام را تا ۵۰ درصد کاهش داده و میزان ضایعات را به طور محسوسی پایین بیاورد (جاواید و همکاران^۳، ۲۰۲۱). علاوه بر این، یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های روش‌های مرسوم این است که تولید برخی طراحی‌های پیچیده مانند ساختارهای مشبک داخلی یا کانال‌های خنک‌کننده غیرخطی بسیار دشوار یا حتی غیرممکن است؛ در حالی که تولید افزایشی امکان ساخت چنین طراحی‌هایی را که پیش‌تر غیرقابل اجرا یا به شدت پرهزینه بودند، به سادگی و با محدودیت حداقلی فراهم کرده است (نفدووا^۴، ۲۰۲۵). این فناوری با فرایند لایه‌لایه‌سازی مواد کار می‌کند؛ بدین صورت که مدل دیجیتال قطعه مورد نظر توسط نرم‌افزارهای کد^۵ (طراحی بوسیله کامپیوتر) طراحی و به فرمت مناسب چاپ سه‌بعدی تبدیل می‌شود. سپس این مدل به چاپگر سه‌بعدی منتقل شده و

1 Trovato et al.

2 Priarone et al.

3 Javaid et al.

4 Nefedova

5 CAD

قطعه نهایی با استفاده از موادی مانند فلز، پلاستیک، رزین، سرامیک و کامپوزیت ساخته می‌شود (گونزالس و همکاران^۱، ۲۰۲۱).

فناوری‌های گوناگونی برای تولید افزایشی مورد استفاده قرار می‌گیرند که انتخاب هر یک به نوع ماده اولیه و کاربرد مدنظر در صنعت خودروسازی بستگی دارد. از مهم‌ترین روش‌های تولید افزایشی در این صنعت می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

ذوب لیزری انتخابی^۲: در این روش، پودر فلزی با استفاده از لیزرهای قدرتمند ذوب شده و قطعه نهایی به صورت لایه به لایه ایجاد می‌شود. این فناوری عمدتاً برای ساخت قطعات با استحکام بالا و وزن کم از موادی مانند آلومینیوم، تیتانیوم و فولاد ضدزنگ به کار می‌رود (گو و همکاران^۳، ۲۰۱۲).

رسوب مواد مذاب^۴: در این متد، مواد پلیمری به شکل رشته‌ای ذوب شده و لایه به لایه بر روی سطح قرار می‌گیرند؛ روشی که عمدتاً برای ساخت قطعات پلاستیکی سبک و نمونه‌سازی سریع کاربرد دارد (وراس و تاناسه^۵، ۲۰۲۵).

چاپ سه‌بعدی با پرتو الکترونی^۶: عملکردی مشابه روش ذوب لیزری انتخابی دارد، اما به جای لیزر، از پرتو الکترونی جهت ذوب فلز استفاده می‌شود و بیشتر در تولید قطعات دقیق برای موتور خودرو به کار گرفته می‌شود (یوکاک و همکاران^۷، ۲۰۲۲).

ساخت افزایشی با پلیمرها و کامپوزیت‌های پیشرفته: برخی قطعات داخلی خودرو - نظیر داشبورد و صندلی - به کمک این فناوری و از طریق چاپ سه‌بعدی انواع مواد کامپوزیتی تقویت‌شده تولید می‌شوند (خان و همکاران^۸، ۲۰۲۴).

امروزه بسیاری از خودروسازان نه فقط در مراحل طراحی و توسعه، بلکه برای ساخت قطعات نهایی و عملکردی نیز به طور گسترده از تولید افزایشی بهره می‌گیرند. برای نمونه، تولید قطعات پیچیده موتور، اجزای سامانه‌های خنک‌کننده، بخش‌های داخلی خودرو و حتی برخی اجزای سازه‌ای خودروهای مسابقه‌ای و برقی از طریق فناوری تولید افزایشی انجام می‌شود (وراس و تاناسه، ۲۰۲۵).

۳. روش

در این تحقیق، گردآوری و تحلیل داده‌ها با استفاده از روش فراترکیب انجام پذیرفته است؛ چرا که به منظور دستیابی به شناخت همه‌جانبه و جامع از موضوع مورد بررسی، بهره‌گیری از رویکرد کیفی ضروری بود. فراترکیب به عنوان یکی از رویکردهای فرامطالعه، فرآیند مقایسه، تحلیل و تلفیق یافته‌های مطالعات مختلف پیرامون یک موضوع خاص را امکان‌پذیر می‌سازد. این روش، تجزیه و تحلیل عمیقی از ادبیات پژوهشی ارائه می‌دهد و به تفسیر یکپارچه نتایج چندین تحقیق با هدف دستیابی به تصویری جامع و تحلیلی می‌پردازد. فراترکیب روشی اکتشافی است که در جهت استخراج و خلق یک چارچوب مرجع مشترک از نتایج پژوهش‌های پیشین به کار می‌رود (یزدانی و همکاران، ۱۴۰۰) اجرای این رویکرد مستلزم مرور

1 Arias-González et al.

2 Selective Laser Melting - SLM

3 Gu et al.

4 Fused Deposition Modeling - FDM

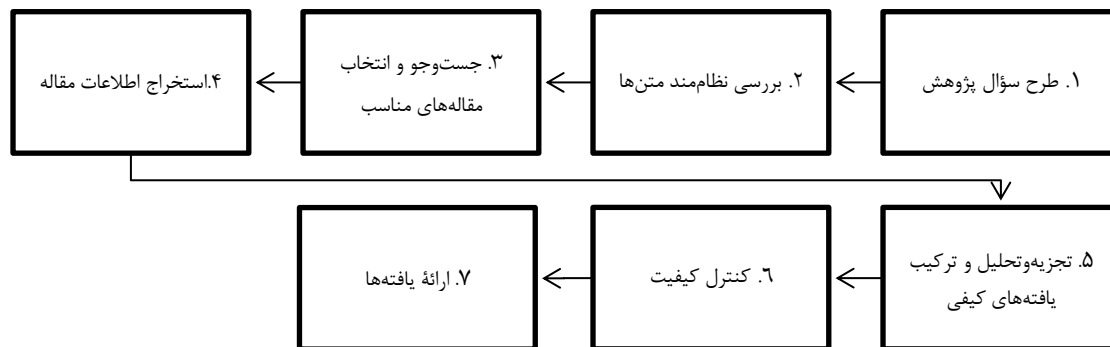
5 Veres and Tănase

6 Electron Beam Melting - EBM

7 Uçak et al.

8 Khan et al.

نظام‌مند ادبیات مرتبط برای شناسایی عوامل کلیدی مطابق با اهداف پژوهش است. در مطالعه حاضر نیز، با پیروی از گام‌های مرسوم این روش، مرور جامع منابع و داده‌های مرتبط با استفاده از جست‌وجو در پایگاه‌های معتبر و تحلیل نتیجه‌های مطالعات منتخب صورت گرفته است. از میان رویکردهای مختلف فراترکیب، این پژوهش از مدل باروسو و ساندلوسکی (۲۰۰۷) بهره گرفته است که مراحل اجرایی آن در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱. فرآیند انجام فراترکیب

اقدام‌های انجام‌شده در هر یک از گام‌های اجرای روش فراترکیب، طبق الگوی ارائه شده در شکل ۱ به شرح است:
گام نخست) طرح سؤال تحقیق:

در این مرحله به چند پرسش اساسی که در جدول ۱ نمایش داده شده است، پاسخ داده می‌شود. این پرسش‌ها بنیان ادامه فرایند فراترکیب را تشکیل می‌دهد.

جدول ۱. پارامترهای مرتبط با طرح سؤال پژوهش

پرسش‌های کلیدی	پاسخ در این پژوهش
چه چیزی	تعیین موضوع محوری مطالعه آغاز حرکت در مسیر رویکرد فراترکیب است. در این پژوهش این گام با سؤال زیر آغاز شده است: ۱. کاربردهای تولید افزایشی در صنعت خودروسازی کدامند؟
جامعه در دست مطالعه	در این پژوهش پایگاه‌اطلاعات علمی معتبر وب آو ساینس بررسی شده است.
چه زمانی	بازه زمانی که طی آن مدارک و مستندات جست‌وجو و بررسی شده‌اند از سال ۲۰۱۵ تا سال ۲۰۲۵ بوده است.
چگونگی	روشی است که برای فراهم کردن مطالعات استفاده می‌شود. در این پژوهش، روش «تحلیل مضمون» که نوعی تحلیل داده‌های ثانویه استفاده شده است. محقق با در نظر گرفتن معیارهایی، مقاله‌های مناسبی را که به فرایند فراترکیب وارد یا از فرایند خارج می‌شوند، شناسایی و مشخص می‌کند.

گام دوم) بررسی نظام‌مند متن‌ها:

در این پژوهش، پایگاه وب آو ساینس بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ بررسی شده است. رشته جست‌وجو، مرور مطالعات قبلی است که در آنها کاربرد تولید افزایشی در صنعت خودروسازی بررسی شده است. کلمات کلیدی مدنظر برای جست‌وجو «تولید افزایشی»، «صنعت خودروسازی»، و «کاربردهای تولید افزایشی» بوده است. همچنین برای اطمینان از پوشش کامل مطالعات، جست‌جو فقط به مقالات داوری‌شده و چاپ‌شده در ژورنال‌های علمی معتبر محدود گردید. در نتیجه جست‌وجو و بررسی پایگاه داده و با استفاده از کلمات کلیدی یادشده، ۲۱۴ مقاله یافت شد.

گام سوم) جست‌وجو و انتخاب مقاله‌ها:

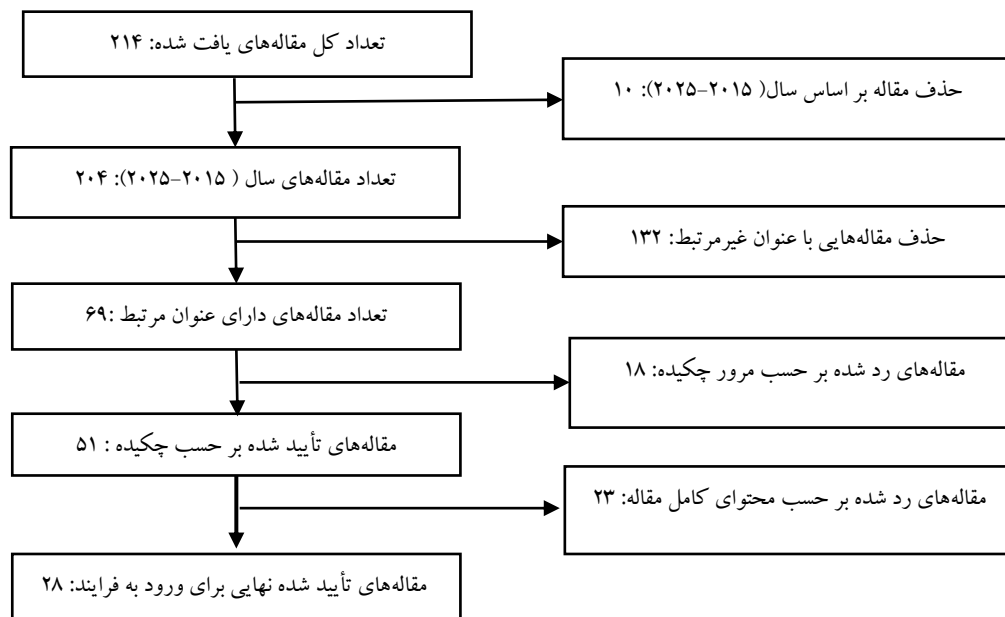
هدف از انجام این مرحله، شناسایی مقاله‌هایی است که از کفایت لازم برای ورود به فرایند تحلیل برخوردارند. معیارهای پذیرش یا رد مقاله‌ها در جدول ۲ بیان شده است.

جدول ۲. معیارهای پذیرش یا رد مقاله‌ها برای ورود به فرایند فراترکیب

عوامل	معیار پذیرش مقاله	معیار رد مقاله
محدوده جغرافیایی	کل مطالعات	
زبان تحقیقات	انگلیسی	غیر انگلیسی
زمان مطالعات	۲۰۲۵-۲۰۱۵	پیش از سال ۲۰۱۵
روش به کار گرفته شده در سند	روش‌های کیفی و کمی	مطالعات غیر روشمند
شرایط مورد مطالعه	موارد در بردارنده: تولید افزایشی - صنعت خودروسازی - کاربردهای تولید افزایشی	موارد غیر از مطالعه تولید افزایشی
نوع مطالعه	مقاله‌های چاپ شده در ژورنال‌ها	نظرهای شخصی، سایت‌های شخصی، گزارش‌ها و کنفرانس‌ها

پس از جست‌جو، تعداد اولیه ۲۱۴ مقاله به دست آمد. در مرحله غربال‌گری اولیه، مقالاتی که خارج از بازه زمانی مورد نظر (۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵) بودند حذف شدند. مرحله بعد با بررسی عناوین، مقالات غیرمرتبط کنار گذاشته شد. سپس چکیده مقالات باقیمانده توسط دو پژوهشگر به طور مستقل مطالعه شد و مقالاتی که به موضوع اصلی ارتباط مستقیم نداشتند حذف شدند.

در نهایت، متن کامل ۵۱ مقاله بررسی و با توجه به معیارهای پذیرش (بیان‌شده در جدول ۲) تنها ۲۸ مقاله نهایی که به طور تخصصی و با روش علمی به کاربردهای تولید افزایشی در خودروسازی پرداخته بودند انتخاب شد. روند و تعداد مقالات حذف یا انتخاب‌شده، در نمودار غربال‌گری (شکل ۲) نیز ارائه شده است.



شکل ۲. فرایند غربالگری و انتخاب مقاله های مناسب برای ورود به فرایند

روایی و پایایی روش فراترکیب. برای ارزیابی روایی روش فراترکیب از روش برنامه مهارت های ارزیابی حیاتی^۱ استفاده گردید. این روش به ارزیابی کیفی مقالات در قالب ۱۰ پرسش می پردازد. این چک لیست مشتمل بر ۱۰ سؤال کلیدی جهت سنجش روش شناسی، شفافیت اهداف، میزان تطابق نتایج و استحکام استنتاج هاست. دو ارزیاب مستقل مقالات را امتیازدهی کردند و اختلاف نظر ها، با بحث تا حصول اجماع برطرف شد. تنها مقالاتی که حداقل امتیاز ۷ از ۱۰ را کسب نمودند، واجد شرایط ورود به تحلیل نهایی تلقی گردیدند.

گام چهارم) استخراج نتایج:

در این مرحله، محقق به طور پیوسته مقاله های منتخب و نهایی را به منظور دستیابی به یافته های درون محتوایی چند بار مرور می کند.

گام پنجم) کنترل کیفیت:

در این مطالعه به منظور پایش کدها و مفاهیم استخراج شده، از نظر خبرگان استفاده شده است. برای محاسبه توافق نظر بین خبرگان، هنگام ارزیابی مفاهیم پژوهش، می توان از شاخص کاپای کوهن بهره برد. مقدار این شاخص در بازه بین صفر تا یک قرار می گیرد. نزدیک بودن این شاخص به عدد یک، گویای بیشترین اتفاق نظر بین دو کدگذار است و برعکس نزدیک بودن این عدد به صفر، بیانگر عدم توافق نظر آنها در این خصوص است. نتایج این پژوهش و بهره گیری توأمان از تجربه مرتبط با حوزه در دست مطالعه، از طریق ضریب توافق بین این دو نفر با شاخص کاپا و به کمک نرم افزار اسپس اس^۲ ارزیابی شد. مقدار شاخص کاپا در این پژوهش ۰/۸۲ به دست آمد. با توجه به اینکه مقدار این ضریب نزدیک به عدد ۱ و سطح معناداری کمتر از ۰/۰۵ است، می توان گفت که بین دو تحلیلگر، توافق نظر اتکا پذیری روی یافته های پژوهش وجود دارد.

1 Critical Appraisal Skills Program (CASP)

2 SPSS

جدول ۳. ضریب کاپای محاسبه شده

مقدار	انحراف استاندارد	عدد معناداری
کاپای توافق شده	۰.۸۲	۰/۰۰۱

گام ششم) ارائه یافته‌ها: در این گام، نتایج پردازش شده حاصل از داده‌های استخراج شده از ادبیات منتخب ارائه می‌شود. شیوه ارائه گزارش باید منطقی، روشن و معتبر باشد.

۴. یافته‌ها

پس از انجام مراحل ذکر شده در قسمت روش پژوهش کاربردهای زیر از مقالات استخراج گردید که به تفصیل به توضیح هریک خواهیم پرداخت.

تولید قطعات سبک‌تر برای کاهش وزن خودرو:

کاهش وزن خودرو همواره از اساسی‌ترین اهداف صنعت خودروسازی به شمار می‌رود، چرا که این عامل تأثیر مستقیمی بر بهبود بهره‌وری سوخت، عملکرد دینامیکی، سطح آلایندگی و دوام قطعات خودرو دارد. کاهش وزن منجر به مصرف سوخت کمتر و افزایش بازدهی موتور می‌شود. در خودروهای برقی، این موضوع از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و کاهش وزن می‌تواند برد حرکتی را افزایش داده و نیاز به باتری‌های حجیم را کاهش دهد (گو و همکاران، ۲۰۱۲). در پاسخ به این پرسش که چرا کاهش وزن خودرو اهمیت دارد، باید گفت وزن پایین‌تر به معنای نیاز کمتر به انرژی برای جابجایی وسیله نقلیه است؛ خودروهای سبک‌تر نه تنها انتشار دی‌اکسید کربن کمتری دارند و به استانداردهای محیط‌زیست نزدیک‌تر هستند، بلکه فشار کمتری را نیز بر قطعات مکانیکی وارد می‌کنند که در نهایت به کاهش سایش و افزایش طول عمر مفید خودرو می‌انجامد. علاوه بر این، وزن کم‌تر موجب کنترل‌پذیری بهتر و شتاب‌گیری سریع‌تر خودرو می‌شود. باتوجه به ظرفیت محدود باتری‌ها در خودروهای برقی نیز، حمل و نقل وزن کمتر مستقیماً به افزایش برد حرکتی منجر می‌گردد (روچی و همکاران، ۲۰۲۵).

کاهش هزینه و زمان تولید قطعات نمونه اولیه ۲:

به کارگیری چاپ سه‌بعدی به خودروسازان این امکان را می‌دهد که نمونه‌های اولیه قطعات را با سرعت و هزینه به مراتب کمتر تولید و آزمایش کنند، بدون آن که نیازی به ساخت قالب‌های پرهزینه باشد. فناوری چاپ سه‌بعدی زمینه تولید سریع‌تر نمونه‌ها، کاهش هزینه‌ها و افزایش انعطاف‌پذیری در فرآیند طراحی را فراهم ساخته است (گیسون و همکاران، ۲۰۱۰).

در فرآیند توسعه و تولید خودرو، ساخت نمونه‌های اولیه از مراحل حساس و زمان‌بر محسوب می‌شود که نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت نهایی محصول، سرعت عرضه به بازار و هزینه‌های توسعه دارد. روش‌های سنتی ساخت نمونه معمولاً مبتنی بر ماشین‌کاری^۴، قالب‌گیری یا ریخته‌گری است که هزینه‌ها و زمان انجام فرآیند را افزایش می‌دهد. فناوری تولید افزایشی، انقلابی در این عرصه ایجاد کرده و شرکت‌های خودروسازی را قادر ساخته است تا نمونه‌های اولیه مورد

1 Roohi et al.

2 Prototyping

3 Gibson et al.

4 CNC

نیاز را بدون احتیاج به قالب های پیچیده و با صرف هزینه و زمان بسیار کمتر تهیه کنند. در این رویکرد، مدل سه بعدی قطعه در نرم افزارهای طراحی رایانه ای آماده و مستقیماً توسط چاپگر سه بعدی ساخته می شود؛ این روش حتی می تواند زمان طراحی و تست قطعات را تا ۸۰ درصد کاهش دهد (موخاراجه و وو، ۲۰۲۵).

برای نمونه، شرکت فورد با بهره گیری از چاپ سه بعدی در طراحی و آزمایش قطعات موتور، مدت زمان تولید نمونه ها را از چهار ماه به کمتر از چهار هفته تقلیل داده است. سرعت بالای نمونه سازی سبب می شود خودروسازان با شناسایی سریع تر ایرادات طراحی، امکان اصلاحات مطلوب و تسریع ورود محصول نهایی به بازار را داشته باشند (عطاران^۱، ۲۰۱۷).

تولید قطعات پیچیده و طراحی های سفارشی:

یکی از مزایای اساسی فناوری تولید افزایشی در صنعت خودروسازی، قابلیت ساخت قطعات پیچیده با طراحی های اختصاصی است. این فناوری به مهندسان امکان می دهد قطعاتی را تولید کنند که در گذشته با روش های مرسوم یا غیر قابل ساخت بوده اند یا مستلزم هزینه های بسیار بالا بوده اند (گیسون و همکاران، ۲۰۱۰).

قطعات پیچیده ای که در روش های سنتی نیازمند تولید جداگانه بخش ها و سپس مونتاژ آن ها بودند، اکنون به کمک تولید افزایشی می توانند به شکل یکپارچه ساخته شوند. علاوه بر این، با برداشته شدن محدودیت های مرسوم ابزارسازی، امکان طراحی هندسه های متنوع و خلاقانه به وجود آمده است. تولید افزایشی شرایطی را فراهم کرده که قطعات با مسیرهای خنک کننده داخلی، ساختارهای مستحکم و سبک و فرم های آیرودینامیکی پیشرفته تولید شوند (الاکاد^۲، ۲۰۱۹).

تولید قطعات یدکی در محل و به صورت درخواستی^۳:

یکی از مهم ترین چالش های صنعت خودروسازی مدیریت موجودی قطعات یدکی و حفظ زنجیره تأمین کارآمد است. در روش های سنتی، قطعات یدکی باید در انبارهای بزرگ ذخیره شوند و در صورت نیاز به مشتریان ارسال شوند. اما این روش دارای چندین مشکل اساسی است:

الف) هزینه بالای نگهداری موجودی در انبارها

ب) زمان طولانی تحویل قطعات یدکی، به ویژه برای خودروهای قدیمی

ج) محدودیت در تأمین قطعات نادر یا سفارشی

د) ضایعات ناشی از قطعاتی که به مرور زمان مستهلک شده و استفاده نمی شوند.

یکی از دستاوردهای مهم فناوری تولید افزایشی در صنعت خودروسازی، امکان ساخت قطعات یدکی به صورت در محل و دقیقاً هنگام نیاز است. این رویکرد به خودروسازان و مراکز خدمات پس از فروش این امکان را می دهد تا به جای ذخیره سازی انبوه قطعات، آن ها را مستقیماً در محل تولید و سریعاً نصب کنند. تولید قطعات یدکی به صورت درخواستی، هزینه های انبارداری و مدیریت موجودی را به طور چشمگیری کاهش می دهد، دسترسی به قطعات کمیاب یا قدیمی را

1 Attaran

2 Elakkad

3 On-Demand Spare Parts

بهبود می‌بخشد، زمان تأمین و ارسال قطعات از چند هفته به چند ساعت تقلیل می‌یابد و همچنین موجب تقویت پایداری زنجیره تأمین و کاهش وابستگی به تأمین کنندگان خارجی می‌شود (فورد و دسپیس^۱، ۲۰۱۶).

نمونه‌ای شاخص از این قابلیت، استفاده ارتش ایالات متحده از فناوری تولید افزایشی برای تولید قطعات یدکی مورد نیاز در محل و در شرایط عملیاتی است. در خودروهای نظامی و کامیون‌های سنگین تجاری، سرعت تأمین قطعات یدکی اهمیت بالایی دارد و پرینت سه‌بعدی توانسته این چالش را مرتفع سازد (دن بویر و همکاران^۲، ۲۰۲۰). جدول ۴ فناوری‌های اصلی تولید افزایشی و انواع قطعات یدکی قابل ساخت در محل را به تفکیک نشان می‌دهد.

جدول ۴. کاربردهای تولید افزایشی در تولید قطعات یدکی در محل

کاربرد	نوع قطعات یدکی قابل تولید	فناوری مورد استفاده
تولید قطعات مقاوم و سبک	قطعات فلزی موتور و سیستم تعلیق	ذوب لیزری انتخابی
داشبورد، کنسول و قطعات تزئینی	قطعات پلاستیکی داخلی خودرو	مدل سازی رسوب ذوب شده ^۳
قطعات خودروهای نظامی و تجاری	قطعات آلایزی سنگین	ذوب پرتو الکترونی
قطعات غیرسازه‌ای و اجزای تزئینی	قطعات سرامیکی و فلزی کم‌هزینه	بایندر جتینگ ^۴

همان‌گونه که جدول ۴ نشان می‌دهد، فناوری‌هایی مانند ذوب لیزری انتخابی و رسوب مواد مذاب هر کدام برای ساخت قطعاتی با جنس و ماهیت متفاوت به کار می‌روند. استفاده از این فناوری‌ها منجر به کاهش زمان انتظار مشتری و افزایش انعطاف‌پذیری در تأمین قطعات نادر شده است. این داده‌ها اهمیت استراتژیک تولید افزایشی در مدیریت موجودی و افزایش تاب‌آوری زنجیره تأمین قطعات را تایید می‌کند.

افزایش بازدهی سیستم‌های خنک‌کننده و تهویه موتور:

سیستم‌های خنک‌کننده و تهویه موتور از اجزای کلیدی عملکرد خودرو محسوب می‌شوند؛ زیرا نقش اساسی در جلوگیری از افزایش دمای بیش از حد موتور و بهبود بازدهی آن دارند. ارتقاء بهره‌وری این سامانه‌ها نه تنها منجر به کاهش مصرف سوخت و افزایش عمر موتور می‌شود، بلکه کارایی کلی خودرو را نیز بهبود می‌بخشد. روش‌های سنتی تولید، نظیر ریخته‌گری و ماشین‌کاری، در ساخت مجاری خنک‌کننده و سامانه‌های تهویه موتور با محدودیت‌هایی روبه‌رو هستند: نخست این که تولید آن‌ها فرآیندی هزینه‌بر و دشوار است؛ دوم این که امکان طراحی‌های پیچیده برای ارتقای سطح انتقال حرارت وجود ندارد؛ و سوم، مجاری ساده سنتی کارایی خنک‌کنندگی را کاهش داده و مصرف انرژی را افزایش می‌دهند. فناوری تولید افزایشی با فراهم کردن امکان ساخت اشکال هندسی پیچیده، مجاری داخلی پیشرفته و بهره‌گیری از مواد بهینه، این محدودیت‌ها را مرتفع ساخته است (گری و دپیکیک^۵، ۲۰۲۰).

برای نمونه، شرکت بی‌ام‌و با استفاده از فناوری ذوب لیزری انتخابی، اقدام به تولید منی‌فولدهای خنک‌کننده موتور نموده که این قطعات کاهش ۲۰ درصدی مصرف انرژی پمپ‌های خنک‌کننده و افزایش دوام قطعات موتور را به همراه داشته‌اند (گری و دپیکیک، ۲۰۲۰). همچنین شرکت آئودی از چاپ سه‌بعدی جهت ساخت پره‌های خنک‌شونده ویژه

1 Ford and Despeisse

2 Den Boer et al.,

3 Fused Deposition Modeling (FDM)

4 Binder Jetting (BJ)

5 Gray and Depcik

توربوشارژرهای خود بهره برده است که نتیجه آن، افزایش ۱۵ درصدی بازدهی توربوشارژر و کاهش تا ۱۰ درصدی دمای عملکردی سامانه بوده است (گونکالوس و همکاران^۱، ۲۰۲۳).

جدول ۵. کاربردهای تولید افزایشی در افزایش بازدهی سیستم های خنک کننده موتور

ویژگی کلیدی	نوع قطعات قابل تولید	فناوری مورد استفاده
دقت بالا و امکان تولید با آلیاژهای مقاوم در برابر حرارت	مبدل های حرارتی و مجاری خنک کننده موتور	ذوب لیزری انتخابی
افزایش استحکام و کاهش وزن قطعات	پره های توربوشارژر و قطعات موتور	ذوب پرتو الکترونی
امکان تولید مجاری داخلی پیچیده برای بهبود جریان سیال	سیستم های خنک کننده روغن و سیالات خودرو	جوش مستقیم لیزری فلزات ^۲
کاهش هزینه تولید و افزایش بازدهی انرژی	اجزای سبک و کم هزینه برای خودروهای برقی	بایندر جتینگ

تحلیل جدول ۵ بیان گر این است که انتخاب فناوری تولید افزایشی با توجه به نوع قطعه و الزامات عملکردی صورت می گیرد. برای مثال، قطعات مقاوم به حرارت و مجاری پیچیده موتور عمدتاً با ذوب لیزری انتخابی ساخته می شوند، در حالی که قطعات سبک و کم هزینه محور خودروهای برقی با بایندر جتینگ تولید می شوند. این رویکرد به طور مستقیم موجب افزایش بازدهی مصرف سوخت و کاهش نرخ خرابی قطعات شده است. استفاده در خودروهای مسابقه ای و فرمول یک^۳

در خودروهای مسابقه ای به ویژه فرمول یک، استفاده از فناوری های پیشرفته برای دستیابی به حداکثر سرعت، استحکام و کارایی آیرودینامیکی اهمیت ویژه ای دارد. کاهش حتی یک گرم وزن یا افزایش اندک راندمان می تواند تاثیر چشمگیری بر عملکرد و نتایج رقابتی خودرو داشته باشد. طی دهه اخیر، تولید افزایشی به یکی از فناوری های کلیدی مورد استفاده در تیم های فرمول یک و خودروهای با عملکرد بالا تبدیل شده است. این فناوری امکان ساخت قطعاتی را فراهم کرده که در عین سبکی، استحکام بالا و ویژگی های آیرودینامیکی مطلوب دارند (پرادا و همکاران^۴، ۲۰۱۶).

به عنوان مثال، تیم فرمول یک مک لارن^۵ از چاپ سه بعدی برای تولید قطعات فیبر کربنی سبک و مقاوم در بدنه خودروهای مسابقه ای خود استفاده کرده است. این رویکرد منجر به کاهش وزن کلی خودرو تا ۵ کیلوگرم، افزایش انعطاف پذیری طراحی و بهبود عملکرد خودرو در عبور از پیچ ها شده است (نواک و همکاران^۶، ۲۰۲۱).

جدول ۶. کاربردهای تولید افزایشی در در خودروهای مسابقه ای و فرمول یک

ویژگی کلیدی	نوع قطعات قابل تولید	فناوری مورد استفاده
دقت بالا، کاهش وزن	قطعات آیرودینامیکی و باله های خودرو	ذوب لیزری انتخابی
استحکام بالا و مقاومت در برابر دمای زیاد	پره های توربوشارژر و قطعات موتور	ذوب پرتو الکترونی
کاهش هزینه و افزایش انعطاف پذیری طراحی	قطعات داخلی و داشبورد	رسوب مواد مذاب
استحکام بالا و وزن کم	قطعات فیبر کربنی	چاپ فیبری پیوسته ^۷

1 Afonso Gonçalves et al.

2 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

3 F1 Cars & High-Performance Vehicle

4 Prada et al.

5 McLaren Racing

6 Novak et al.,

7 Continuous Fiber Printing (CFP)

بررسی جدول ۶ نشان می‌دهد که بیشترین تمرکز تولید افزایشی در خودروهای مسابقه‌ای بر ساخت قطعاتی با نیاز به دقت بالا و قابلیت طراحی منحصر به فرد است. کاهش وزن قطعات فیبر کربنی و باله‌های آیرودینامیک، نمونه‌های بارز موفقیت این فناوری در این حوزه محسوب می‌شود.

تولید قطعات کامپوزیتی برای داشبورد و بدنه خودرو:

در صنعت خودروسازی، استفاده از مواد کامپوزیتی به ویژه برای داشبورد و پانل‌های بدنه با استقبال فزاینده‌ای مواجه شده است. این مواد نسبت به فلزات رایج، وزن کمتری داشته، از استحکام و دوام بالاتری برخوردارند و موجب بهبود بازده سوخت، کاهش انتشار کربن و ارتقاء عملکرد خودرو می‌شوند. تولید افزایشی مواد کامپوزیتی امکان ساخت داشبورد و بدنه خودرو با طراحی‌های پیشرفته، وزن پایین‌تر و مقاومت بیشتر را فراهم ساخته است (خان و همکاران، ۲۰۲۴).

از جمله مزایای استفاده از مواد کامپوزیتی در داشبورد و بدنه می‌توان به کاهش وزن خودرو تا ۵۰ درصد نسبت به فلزات سنتی، افزایش چشمگیر استحکام و مقاومت در برابر ضربه، ارتقای پایداری آیرودینامیکی از طریق طراحی‌های سفارشی، کاهش هزینه‌های تولید و حذف فرآیندهای پیچیده قالب‌گیری اشاره کرد (وازی و همکاران^۱، ۲۰۲۲).

فیبر کربن به عنوان یکی از متداول‌ترین مواد مورد استفاده در چاپ سه‌بعدی قطعات بدنه خودرو شناخته می‌شود. این ماده حدود ۴۰ درصد سبک‌تر از آلومینیوم و ۵۰ درصد سبک‌تر از فولاد است و علاوه بر استحکام بالا، مقاومت قابل توجهی در برابر سایش و خم‌شدگی از خود نشان می‌دهد. بهره‌گیری از فیبر کربن همچنین امکان تحقق طراحی‌های آیرودینامیکی بهینه‌تر را فراهم می‌کند (دالپادولو و همکاران^۲، ۲۰۲۲). جدول ۷ نشان می‌دهد که چه فناوری‌هایی مناسب‌ترین گزینه برای هر نوع ماده و قطعه در این بخش هستند.

جدول ۷. کاربردهای تولید افزایشی در تولید قطعات کامپوزیتی برای داشبورد و بدنه خودرو

کاربرد اصلی	نوع مواد قابل استفاده	فناوری مورد استفاده
بدنه و داشبورد سبک‌وزن	فیبر کربنی، فیبر شیشه‌ای	چاپ فیبری پیوسته
اجزای داخلی داشبورد	پلیمرهای تقویت‌شده	رسوب مواد مذاب
پنل‌های داخلی خودرو	پلیمرهای مقاوم به حرارت	جوش لیزری انتخابی
تولید قطعات داشبورد با دقت بالا	کامپوزیت‌های تقویت‌شده	چاپ سه‌بعدی مبتنی بر رزین ^۳

داده‌های جدول ۷ گویای آن است که تولید افزایشی نه تنها فرایند ساخت قطعات کامپوزیتی را تسهیل کرده، بلکه امکان استفاده از مواد پیشرفته‌ای مانند فیبر کربن و چاپ سه‌بعدی رزین را فراهم نموده است. این امر باعث کاهش وزن بدنه تا ۵۰ درصد و بهبود پایداری آیرودینامیک شده است.

کاهش ضایعات و بهبود پایداری زیست‌محیطی:

صنعت خودروسازی به عنوان یکی از بزرگ‌ترین منابع تولید پسماند صنعتی و انتشار گازهای گلخانه‌ای شناخته می‌شود. فرآیندهای مرسوم ساخت قطعات خودرو نظیر ماشین‌کاری، ریخته‌گری و قالب‌گیری تزریقی اغلب سبب اسراف قابل توجه مواد خام و افزایش میزان انتشار دی‌اکسید کربن می‌شوند. این روش‌های تولیدی با ایجاد ضایعات گسترده فلزی و

1 Wazeer., et al.

2 Dalpadulo, E., et al.

3 Resin-based 3D Printing (SLA & DLP)

پلیمری در فرآیند ماشین‌کاری، مصرف بالای انرژی در عملیات ریخته‌گری و پرس، و انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تکیه بر سوخت‌های فسیلی در ساخت قطعات همراه هستند. در مقابل، فناوری تولید افزایشی به عنوان رویکردی پایدارتر و با اتلاف مواد کمتر مطرح است؛ این فناوری مصرف مواد اولیه را بهینه می‌کند، نیاز به ابزارآلات فلزی را کاهش داده و امکان بازیافت مواد را تسهیل می‌نماید (جاوید و همکاران، ۲۰۲۱).

جدول ۸. کاربردهای تولید افزایشی در کاهش ضایعات و بهبود پایداری زیست‌محیطی

مزایای زیست محیطی	نوع مواد قابل استفاده	فناوری مورد استفاده
کاهش ضایعات پلاستیکی و امکان بازیافت	پلیمرهای زیست تخریب پذیر مانند PLA	ذوب لیزری انتخابی
کاهش مصرف مواد خام و بهینه‌سازی تولید	فلزات بازیافتی مانند آلومینیوم	بایندر جتینگ
کاهش نیاز به مواد نو و بهبود پایداری	فیبرهای کربنی بازیافتی	مدل سازی رسوب ذوب شده
کاهش مصرف انرژی و انتشار CO ₂	پودرهای تیتانیومی بازیافتی	ذوب پرتو الکترونی

طبق جدول ۸، تولید افزایشی با استفاده از پلیمرها و فلزات قابل بازیافت و مصرف انرژی کمتر نسبت به روش‌های سنتی، نقش مؤثری در کاهش ردپای زیست‌محیطی صنعت خودرو ایفا می‌کند. بخصوص مصرف مواد زیست تخریب پذیر مانند PLA و کاهش مواد خام اولیه نقطه قوت اساسی این فناوری است. استفاده در طراحی و تولید خودروهای مفهومی^۱:

خودروهای مفهومی، نمونه‌هایی ابتکاری و پیشرفته هستند که با هدف نمایش فناوری‌های آینده‌نگر، عرضه طراحی‌های نوین و آزمودن ایده‌های خلاقانه توسعه می‌یابند. برخلاف مدل‌های تولید انبوه، توسعه این خودروها مستلزم انعطاف‌پذیری بالایی در فرآیندهای طراحی و ساخت است؛ موضوعی که سبب شده تولید افزایشی (چاپ سه‌بعدی) به یکی از فناوری‌های اساسی و کلیدی در فرایند تولید خودروهای مفهومی بدل شود (شیلر و همکاران^۲، ۲۰۲۴).

ساخت نمونه‌های اولیه با روش‌های سنتی علاوه بر زمان‌بر بودن، هزینه‌های بالایی را برای تهیه قالب‌ها و ابزارهای اختصاصی در پی دارد. در مقابل، فناوری تولید افزایشی امکان تولید قطعات پیچیده، سفارشی و سبک‌وزن را با صرف زمان و هزینه کمتر فراهم می‌کند (چارلز و همکاران^۳، ۲۰۲۱).

برای نمونه، شرکت لامبورگینی^۴ در توسعه یکی از مدل‌های مفهومی خود، از چاپ سه‌بعدی فلز و کامپوزیت جهت تولید بدنه و سیستم تعلیق بهره گرفته است. این اقدام هم ضمن ارتقاء ۲۰ درصدی مقاومت بدنه در برابر ضربه، امکان طراحی ساختارهای بیونیک با هدف بهبود جریان هوا را فراهم آورده است (سدلاک و همکاران^۵، ۲۰۱۶).

علاوه بر این، شرکت رنو در مدل مفهومی ترزور^۶ با به کارگیری چاپ سه‌بعدی برای اجزایی نظیر داشبورد، صندلی‌ها و قطعات آیرودینامیکی توانسته است به طراحی ارگونومیک و سفارشی‌تر برای افزایش راحتی سرنشینان دست یابد و

1 Concept Cars

2 Schiller et al.

3 Charles et al.

4 Lamborghini

5 SEDLAK et al.

6 Renault Trezo

همچنین با استفاده از کامپوزیت‌های پیشرفته، مقاومت خودرو در تصادفات را افزایش دهد (پرابهو و همکاران^۱، ۲۰۲۳). جدول ۹ به طور خلاصه کاربرد فناوری‌های تولید افزایشی در ساخت اجزا و قطعات این خودروها را نمایش می‌دهد.

جدول ۹. کاربردهای تولید افزایشی در طراحی و تولید خودروهای مفهومی

مزایا	کاربرد در خودروهای مفهومی	فناوری مورد استفاده
سبکی و قابلیت تولید قطعات ارگونومیک	قطعات داخلی مانند داشبورد و صندلی‌ها	ذوب لیزری انتخابی
مقاومت بالا و طراحی سبک‌تر	قطعات فلزی بدنه و سیستم تعلیق	ذوب پرتو الکترونی
کاهش وزن و افزایش استحکام	پنل‌های بدنه و ساختارهای بیونیک	چاپ فیبری پیوسته
دقت بالا و امکان طراحی‌های منحصر به فرد	قطعات تزئینی و پنل‌های نمایشگر	چاپ سه بعدی مبتنی بر رزین

استفاده در ساخت قالب‌های پیشرفته برای تولید انبوه:

قالب‌سازی از مراحل اساسی و پرهزینه در فرآیند تولید انبوه در صنعت خودروسازی به شمار می‌رود. قالب‌ها نقش کلیدی در ساخت قطعات فلزی و پلیمری از طریق فرایندهایی چون ریخته‌گری، تزریق پلاستیک و پرس کاری ایفا می‌کنند. در روش‌های مرسوم، تولید قالب مستلزم ماشین‌کاری دقیق، انجام عملیات جوشکاری و پرداخت نهایی بوده و اغلب با صرف زمان و هزینه قابل توجهی همراه است. تولید افزایشی به عنوان روشی نوآورانه، امکان ساخت سریع‌تر، مقرون به صرفه‌تر و بهینه‌تر قالب‌های فلزی را مهیا ساخته است (وانگ و همکاران^۲، ۲۰۲۴). همچنین تولید افزایشی با بهره‌گیری از آلایژهای ویژه طراحی‌شده برای چاپ سه‌بعدی، طول عمر قالب‌ها را افزایش داده است (گائوب^۳، ۲۰۱۶). جدول ۱۰ نشان می‌دهد که تولید افزایشی این امکان را فراهم آورده تا قالب‌های پیچیده، با دوام بالا و هزینه توسعه بسیار کمتر ساخته شوند.

جدول ۱۰. کاربردهای تولید افزایشی در ساخت قالب‌های پیشرفته برای تولید انبوه

مزایا	کاربرد اصلی	فناوری مورد استفاده
افزایش عمر قالب و کاهش هزینه	قالب‌های فلزی مقاوم به حرارت	ذوب لیزری انتخابی
افزایش استحکام و دقت قالب‌ها	قالب‌های آلایژی پیچیده	ذوب پرتو الکترونی
کاهش مصرف مواد اولیه	قالب‌های ماسه‌ای برای ریخته‌گری	بایندر جتینگ
کاهش هزینه توسعه و طراحی سریع‌تر	قالب‌های نمونه‌سازی اولیه	مدل سازی رسوب ذوب شده

می‌توان خلاصه کاربردهای استخراج شده از مقالات را در شکل زیر نشان داد.

1 Prabhu et al.

2 Wang et al.

3 Gaub



شکل ۳. خلاصه کاربردهای تولید افزایشی در صنعت خودروسازی

۵. بحث و نتیجه گیری

در سال‌های اخیر، چاپ سه بعدی به عنوان یکی از فناوری‌های تحول‌آفرین، نقش برجسته‌ای در صنعت خودروسازی ایفا کرده است. این فناوری با تولید لایه به لایه قطعات، منجر به کاهش ضایعات تولید و مصرف انرژی شده و در عین حال انعطاف پذیری و سرعت فرآیند تولید را به طور چشمگیری افزایش داده است. بهره گیری از مواد پیشرفته و سبک وزن مانند فیبر کربن و آلایزهای آلومینیومی سبب کاهش وزن خودروها و ارتقاء رانندمان سوخت شده است. افزون بر این، چاپ سه بعدی تاثیر قابل توجهی در تسریع ساخت نمونه‌های اولیه و تولید قطعات یدکی در محل داشته و زمینه را برای ارائه طراحی‌های پیچیده و ساخت قطعات تخصصی در خودروهای مسابقه‌ای و مفهومی فراهم آورده است. استفاده از مواد جدید و کامپوزیت‌ها در قطعاتی چون داشبورد و بدنه خودرو تحولاتی اساسی در سبک‌سازی و افزایش قابلیت‌های طراحی رقم زده است.

علاوه بر بهینه‌سازی اجزای عملکردی خودرو و امکان ساخت قالب‌های دقیق با صرفه جویی در زمان و هزینه، یکی از مهم‌ترین و راهبردی‌ترین دستاوردهای فناوری تولید افزایشی در صنعت خودروسازی، ارتقای شاخص‌های پایداری زیست محیطی است. این فناوری با کاهش چشمگیر ضایعات مواد اولیه و افزایش قابلیت بازیافت قطعات، نقش مهمی در مدیریت بهینه منابع طبیعی ایفا می‌کند. چاپ سه بعدی به دلیل تولید دقیق در ابعاد مورد نیاز، از اتلاف مواد جلوگیری نموده و سبب کاهش مصرف فلزات و پلیمرها در مقایسه با فرایندهای سنتی می‌شود؛ این امر نه تنها کاهش هزینه‌های تولید را به دنبال دارد بلکه موجب کاهش آثار منفی زیست محیطی صنعت خودرو نیز می‌گردد.

از سوی دیگر، تولید افزایشی وابستگی به قالب‌سازی‌های بزرگ و فرآیندهای انرژی بر سنتی را به حداقل رسانده و از طریق حذف یا تسهیل بسیاری از مراحل پرمصرف، به شکل ملموسی موجب کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار

آلاینده‌های جوی از جمله گازهای گلخانه‌ای می‌شود. این موضوع برای شرکت‌هایی همچون تسلا، بی‌ام‌و، مرسدس و فورد، نه تنها به معنای بهبود کیفیت و کاهش هزینه‌های ساخت بوده، بلکه دستاوردی استراتژیک در زمینه تحقق تعهدات زیست‌محیطی و مسئولیت‌پذیری اجتماعی آن‌ها محسوب می‌شود.

جایگاه ویژه تولید افزایشی در زنجیره تأمین خودروسازی از آن جهت برجسته است که این فناوری، بستری عملی و مؤثر برای تحقق اهداف توسعه پایدار فراهم می‌آورد؛ مسیری که از یک سو بهره‌وری تولید و انعطاف‌پذیری فرآیندها را افزایش می‌دهد و از سوی دیگر به تحقق هدف حیاتی کاهش اثرات زیست‌محیطی صنعت خودرو کمک می‌کند. تداوم گسترش کاربرد این فناوری می‌تواند الگوی نوین و سبزتری برای تأمین و تولید در صنعت خودروسازی جهان تعریف نماید.

از منظر کاربردی، نتایج مطالعه حاضر تأکید می‌کند که تحقق کامل ظرفیت‌های فناوری تولید افزایشی در صنعت خودروسازی، نیازمند اتخاذ رویکردهای اجرایی و سیاست‌گذاری مشخص از سوی مدیران و سیاست‌گذاران است. در وهله اول، توصیه می‌شود مدیران صنعت نسبت به برقراری روابط استراتژیک و پایدار با دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی اقدام کنند تا هم‌افزایی علمی و انتقال دانش فنی روزآمد عملیاتی شود. این همکاری‌ها می‌تواند به صورت پروژه‌های تحقیق و توسعه مشترک، کارآموزی تخصصی یا حتی ایجاد آزمایشگاه‌های مشترک صنعت و دانشگاه دنبال گردد و با حل مسائل فنی و نوآوری در مواد، بهینه‌سازی فرآیندها و ارتقاء مهارت نیروی انسانی کمک کند. در سطح کلان‌تر، پیشنهاد می‌شود سیاست‌گذاران دولتی، بسته‌های حمایتی مانند مشوق‌های مالیاتی، تسهیلات بانکی ویژه، تأمین یارانه برای خرید ماشین‌آلات و مواد اولیه پایدار و همچنین قوانین تسهیل‌گر برای ورود فناوری‌های نوین را طراحی و اجرا کنند. ایجاد بسترهای آزمایشی^۱ و شتاب‌دهنده‌های تخصصی حوزه تولید افزایشی، مشاوره و آموزش مدیران در سطوح مختلف، حمایت از توسعه استانداردها و چارچوب‌های فنی ملی و منطقه‌ای از دیگر راهکارهای مهم است. به علاوه، توسعه شبکه همکاری بین شرکت‌های خودروساز و استارت‌آپ‌های فناور، می‌تواند به شناسایی سریع فرصت‌ها، رفع موانع اجرایی و تسریع تجاری‌سازی دستاوردهای تولید افزایشی بیانجامد. اتخاذ چنین رویکردهایی نه تنها زمینه‌ساز توسعه پایدارتر، رقابتی‌تر و نوآورتر صنعت خودروسازی خواهد شد، بلکه موقعیت کشور را در زنجیره ارزش بین‌المللی ارتقاء خواهد بخشید.

با در نظر گرفتن تحولات فناوری تولید افزایشی در صنایع مختلف، مقایسه تجربیات کاربردی این فناوری در بخش خودروسازی با حوزه‌هایی چون هوافضا و پزشکی، نکات حائز اهمیت را آشکار می‌سازد. اگرچه فلسفه به کارگیری تولید افزایشی در هر یک از این صنایع بر پایه توسعه محصولات نوآورانه و افزایش کیفیت انجام می‌شود، اما نوع چالش‌ها و ارزش افزوده حاصل شده در هر زمینه متفاوت است. در صنعت هوافضا، اولویت اصلی کاهش وزن و بهینه‌سازی عملکرد قطعاتی با اشکال فوق پیچیده است که حتی کوچک‌ترین کاهش وزن می‌تواند سبب صرفه‌جویی چشمگیر در مصرف سوخت و افزایش ضریب ایمنی شود؛ به همین دلیل، موضوع انتخاب مواد فلزی پیشرفته، کنترل کیفی دقیق و پایداری ساختاری به شکل ویژه‌ای دنبال می‌شود. در مقابل، حوزه پزشکی با محوریت شخصی‌سازی درمان و تطابق کامل محصول با ویژگی بیولوژیک هر بیمار، بیشترین بهره را از قابلیت چاپ سه‌بعدی قطعات سفارشی، ایمپلنت‌ها و ابزارهای جراحی می‌برد و گذر از محدودیت‌های تولید سنتی سبب بهبود کیفیت درمان و کاهش زمان بازیابی شده است. در صنعت خودروسازی اما، کاربرد تولید افزایشی علاوه بر ساخت قطعات سبک‌وزن و نمونه‌سازی سریع، منجر به افزایش

1 pilot plants

انعطاف‌پذیری خطوط تولید، کاهش نیاز به انبار قطعات یدکی، امکان تولید به‌هنگام بر اساس نیاز و بهبود شاخص‌های زیست‌محیطی شده است. بنابراین، در شرایطی که تولید افزایشی در هوافضا بر پایداری ساختاری و ایمنی، در پزشکی بر شخصی‌سازی و در خودروسازی بر تولید انبوه منعطف و پایداری محیط‌زیستی تمرکز دارد، این فناوری با تطبیق مناسب قابلیت‌هایش در هر صنعت، نقشی متفاوت و ارزش‌افزا ایفا می‌کند. این مقایسه نشان می‌دهد که توسعه و پیاده‌سازی موفق تولید افزایشی، به میزان شناخت صحیح از نیازها و اولویت‌های هر صنعت وابسته است.

با وجودی که فناوری تولید افزایشی، نویدبخش ایجاد انقلاب در کاهش ضایعات مواد و مصرف انرژی در خودروسازی است، تحقق پایداری محیط‌زیستی به دلایلی همچنان با موانع متعدد روبه‌رو است. یکی از چالش‌های جدی، “اثر پنهان انرژی”^۱ دستگاه‌های چاپ سه‌بعدی صنعتی است که علی‌رغم کاهش اتلاف مواد، در فرآیند کاری خود به میزان قابل ملاحظه‌ای انرژی الکتریکی نیاز دارند؛ موضوعی که گاه منجر به جابجایی بار آلودگی از ضایعات فیزیکی به انتشار غیرمستقیم گازهای گلخانه‌ای می‌شود. چالش دیگر، عدم تنوع کافی در مواد اولیه پایدار است؛ بسیاری از پودرهای فلزی یا پلیمرهای ویژه مورد استفاده، یا غیرقابل بازیافت هستند یا بازیافت آن‌ها در مقیاس صنعتی هنوز اقتصادی نشده است. افزون بر این، توسعه و عرضه مواد زیست‌تجزیه‌پذیر با خواص فنی مناسب صنعت خودرو همچنان در مراحل اولیه تحقیقاتی است و هنوز عملاً به تولید انبوه نرسیده است. بررسی چرخه عمر محصولات^۲ که با روش افزایشی ساخته می‌شوند نیز نقطه ضعف دیگری است؛ چراکه اغلب مدل‌های ارزیابی چرخه عمر برای این فناوری بومی‌سازی نشده و نمی‌توان تصویر دقیقی از منافع و مضرات زیست‌محیطی آن ارائه داد. افزون بر این، مدیریت پسماندهای فرآیندی، شامل ذرات ریز گردوغبار فلزات سنگین یا رزین‌های پلیمری مصرف‌شده، خود به تهدیدی برای محیط زیست بدل می‌شود، اگر برنامه تفکیک و دفع هدفمند برای آن‌ها اجرا نشود. از این رو، تا زمانی که استانداردسازی مواد اولیه پایدار، بهینه‌سازی مصرف انرژی چاپگرها، توسعه فناوری بازیافت و تدوین مقررات سخت‌گیرانه‌تر زیست‌محیطی برای این حوزه صورت نگیرد، تحقق اهداف توسعه پایدار از مسیر تولید افزایشی با موانعی جدی همراه خواهد بود.

یافته‌های این پژوهش می‌تواند نقشی تعیین‌کننده در بهبود مدل‌سازی مدیریتی زنجیره تأمین و سیاست‌گذاری‌های توسعه پایدار در صنعت خودروسازی ایفا کند. مزایای عملیاتی فناوری تولید افزایشی مانند کاهش زمان تولید نمونه‌های اولیه، امکان تولید قطعات یدکی در محل و کاهش وابستگی به انبارش گسترده قطعات، به مدیران این امکان را می‌دهد که مدل‌های تصمیم‌گیری و شبیه‌سازی زنجیره تأمین را بر پایه ساخت سریع و منعطف، سامان‌دهی کنند. در نتیجه، راهکارهایی مانند مدل‌سازی شبکه زنجیره تأمین ناب^۲ یا به‌کارگیری روش‌های بهینه‌سازی برای حداقل‌سازی سطح موجودی و کاهش هزینه‌های لجستیک می‌تواند با تکیه بر قابلیت‌های تولید افزایشی، نتایج دقیق‌تر و کاربردی‌تری ارائه دهد. به علاوه، کاهش قابل توجه ضایعات مواد اولیه و مصرف انرژی در فرآیند تولید، زمینه‌ساز دستیابی به شاخص‌های کلیدی توسعه پایدار شامل کاهش کربن، مدیریت بهتر منابع و ارتقای مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها خواهد شد. تجربه موفق برخی خودروسازان پیشرو نیز نشان می‌دهد که تلفیق سیاست‌های پایدار تولید افزایشی با ابزارهای مدل‌سازی مدیریتی (مانند شبیه‌سازی سناریوهای عرضه و تقاضا یا تحلیل هزینه-منفعت)، نه تنها عملکرد مالی شرکت را بهبود می‌بخشد، بلکه مزیت رقابتی و

1 Hidden Energy Footprint

2 Lean Supply Chain

جایگاه زیست محیطی آن‌ها را در بازار جهانی تقویت می‌کند. در مجموع، شواهد پژوهش حاضر می‌تواند الهام‌بخش تدوین مدل‌ها و سیاست‌گذاری‌های جدید مدیریتی با رویکرد پایداری برای آینده صنعت خودرو باشد.

با این وجود، انجام مطالعات بیشتر در زمینه توسعه مواد نوین مانند کامپوزیت‌های پیشرفته و آلیاژهای سبک برای ارتقای فرآیند تولید افزایشی در قطعات خودرو ضروری به نظر می‌رسد؛ چرا که چنین موادی می‌توانند محدودیت‌های فعلی تنوع مواد مورد استفاده را مرتفع سازند. تضمین کیفیت محصولات تولیدشده نیز از چالش‌های اصلی فناوری تولید افزایشی محسوب می‌شود. از این رو، پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده بر توسعه فناوری‌های پیشرفته کنترل کیفیت، از جمله بهره‌گیری از هوش مصنوعی و روش‌های تصویربرداری دیجیتال برای شناسایی نقص‌های احتمالی در قطعات متمرکز گردد.

تعارض منافع:

این مقاله تعارض منافع ندارد.

ORCID

Alireza Abbasi



<https://orcid.org/0009-0009-0862-1390>

Rohollah Ghasemi



<https://orcid.org/0000-0002-1793-3988>

منابع

یزدانی، حمید رضا؛ زارع، حمید؛ حدپور سراج، مرضیه (۱۴۰۰). ارائه چارچوبی برای مدیریت برون‌سپاری فرایندهای منابع انسانی: پژوهش فراترکیب. *فصلنامه علمی مطالعات منابع انسانی*، ۱۱(۱)، ۲۶-۵۳.

References

- Arias-González, F., Barro, O., Del Val, J., Lusquiños, F., Fernández-Arias, M., Comesaña, R., & Pou, J. (2021). Laser-directed energy deposition: principles and applications. In *Additive Manufacturing* (pp. 121–157). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818411-0.00003-3>
- Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*, 60(5), 677–688. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>
- Charles, A., Hofer, A., Elkaseer, A., & Scholz, S.G. (2021). Additive manufacturing in the automotive industry and the potential for driving the green and electric transition. In *Proceedings of the International Conference on Sustainable Design and Manufacturing* (pp. 339–346). Springer. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-16-6128-0_32
- Chinchanikar, S., & Shaikh, A.A. (2022). A review on machine learning, big data analytics, and design for additive manufacturing for aerospace applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(8), 6112–6130. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07125-4>
- Dalpadulo, E., Petruccioli, A., Gherardini, F., & Leali, F. (2022). A review of automotive spare-part reconstruction based on additive manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 6(6), 133. <https://doi.org/10.3390/jmmp6060133>
- Den Boer, J., Lambrechts, W., & Krikke, H. (2020). Additive manufacturing in military and humanitarian missions: Advantages and challenges in the spare parts supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120301. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120301>
- Elakkad, A.S. (2019). 3D technology in the automotive industry. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 8(11), 110–122. <http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV8IS110122>
- Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573–1587. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>

- Galib, G., Silva, F.J., Pedroso, A.F., Campilho, R.D., Lucas, R., & Sales-Contini, R. (2025). A Comprehensive Review of Additive Manufacturing Technologies for Composite Materials. *Journal of Mechanical Engineering and Manufacturing*, 2–2. <https://doi.org/10.53941/jmem.2025.100002>
- Gaub, H. (2016). Customization of mass-produced parts by combining injection molding and additive manufacturing with Industry 4.0 technologies. *Reinforced Plastics*, 60(6), 401–404. <https://doi.org/10.1016/j.repl.2015.09.004>
- Gibson, I., Goenka, G., Narasimhan, R., & Bhat, N. (2010). Design rules for additive manufacture. *SFF 2010 Symposium* (pp. 705–716). <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/15234>
- Gonçalves, A., Ferreira, B., Leite, M., & Ribeiro, I. (2023). Environmental and economic sustainability impacts of metal additive manufacturing. *Sustainable Production and Consumption*, 42, 292–308. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.10.004>
- Gray, J., & Depcik, C. (2020). Review of additive manufacturing for internal combustion engine components. *SAE International Journal of Engines*, 13(5), 617–632. <https://doi.org/10.4271/03-13-05-0039>
- Gu, D.D., Meiners, W., Wissenbach, K., & Poprawe, R. (2012). Laser additive manufacturing of metallic components. *International Materials Reviews*, 57(3), 133–164. <https://doi.org/10.1179/1743280411Y.00000000014>
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R.P., Suman, R., & Rab, S. (2021). Role of additive manufacturing applications towards environmental sustainability. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4(4), 312–322. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.07.005>
- Khan, F., Hossain, N., Mim, J.J., Rahman, S.M., Iqbal, M.J., Billah, M., & Chowdhury, M.A. (2024). Advances of composite materials in automobile applications – A review. *Journal of Engineering Research*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jer.2024.02.017>
- Mukherjee, T., & Wu, Q. (2025). Recent Progress in Computational and Data Sciences for Additive Manufacturing. *Materials*, 18(5), 1177. <https://doi.org/10.3390/ma18051177>
- Nefedova, L. (2025). Modelling the Effect of Additive Technologies: Logistic Aspect. In *Digital Systems and Information Technologies* (pp. 139–153). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80710-7_11
- Novak, J.I., & Novak, A.R. (2021). Is additive manufacturing improving performance in sports? *Journal of Sports Engineering and Technology*, 235(3), 163–175. <http://dx.doi.org/10.1177/1754337120971521>
- Patel, M., Pardhi, B., Chopara, S., & Pal, M. (2018). Lightweight composite materials for automotive—a review. *Carbon*, 1(2500), 151. <https://doi.org/10.1016/j.geits.2022.100043>
- Prabhu, L., Krishnamoorthi, S., Joseph, J., George, J.K., & P, N. (2023). Development of advanced 3D printing technology in automotive industry. *AIP Conference Proceedings*, 2523(1), 020101. <http://dx.doi.org/10.1063/5.0110513>
- Prada, J.G., Cazón, A., Carda, J., & Aseguinolaza, A. (2016). Direct digital manufacturing of an accelerator pedal. *Rapid Prototyping Journal*, 22, 311–321. <https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2014-0065>
- Priarone, P.C., Catalano, A.R., & Settineri, L. (2023). Additive manufacturing for the automotive industry. *Progress in Additive Manufacturing*, 8(6), 1229–1240. <https://doi.org/10.1007/s40964-023-00395-x>
- Raj, S.A. (2025). Quality control in additive manufacturing. *Engineering Research Express*. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/adbc47>
- Rajasekar, R., Mostafaei, A., Priya, C.M., & Kumar, P.S. (2025). *Metal Additive Manufacturing: Principles, Techniques and Applications*. Wiley. ISBN 978-1-394-28763-5
- Roohi, A.H., Sadooghi, A., Nourian, A., Hashemi, S.J., Dashti, B., & Rahmani, K. (2025). Enhancing additive manufacturing for multi-layer samples. *Discover Applied Sciences*, 7(4), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06690-2>

- Schiller, M., Frohn-Sörensen, P., Schreiber, F., Morez, D., Manns, M., & Engel, B. (2024). Smart design and additive manufacturing of bending tools. *Manufacturing Letters*, 41, 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2024.09.013>
- Sedlak, J., Bachorik, P., Jaros, A., Polzer, A., & Kalivoda, M. (2016). Application of modern technologies in production design of car component prototype. *MM Science Journal*. http://doi.org/10.17973/MMSJ.2016_11_2016128
- Trovato, M., Belluomo, L., Bici, M., Prist, M., Campana, F., & Cicconi, P. (2025). Machine learning in design for additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1–24. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15273-9>
- Uçak, N., Çiçek, A., & Aslantas, K. (2022). Machinability of 3D printed metallic materials. *Journal of Manufacturing Processes*, 80, 414–457. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.023>
- Vasco, J.C. (2021). Additive manufacturing for the automotive industry. In *Additive Manufacturing* (pp. 505–530). Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-818411-0.00010-0>
- Veres, C., & Tănase, M. (2025). A bibliometric review of 3D-printed functionally graded materials. *Machines*, 13(3), 232. <https://doi.org/10.3390/machines13030232>
- Villani, V., Scuderi, A., Ponticelli, G.S., & Guarino, S. (2025). Enhanced mechanical performance of laser sintered lattice structures. *Progress in Additive Manufacturing*, 1–21. <https://doi.org/10.1007/s40964-025-01150-0>
- Wang, H., Han, Y., Lu, J., Tang, S., Fan, H., Xia, Y., Xiang, Z., Gong, C., Wang, R., Chen, S., & Tang, L. (2024). Additive manufacturing of continuous fiber reinforced composites. *Composites Part A*, 187, 108504. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108504>

