journal for the History of Science
Print issn: 1735-0573 ● Online issn: 2717-1965
University of Tehran

From Marvel to Automation: A Re-reading of Badīʿ al-Zamān al-Jazarī's Ingenious Mechanisms and Their Conceptual Links to Contemporary Robotics

Hanieh Hashemi[1] ✉, Abdulhossein Hashemi[2]

1. Department of Mathematics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Email: hanieh.hashemi@iau.ac.ir

2. Department of Law, Payam Noor University, Shahr-e Ray Branch, Iran. Email: hashemiabdulhossein@gmail.com

Article Info

Article type:
Review Article

Article history:
Received: 23 October 2025
Revised: 01 January 2026
Accepted: 23 January 2026
Published: 11 April 2026

Keywords:
Automata, Automation, Crank-Slider, Level Control (Float-Valve), Mechanism, Robotics.

ABSTRACT

Badīʿ al-Zamān al-Jazarī (6th century AH/12th century CE), in his seminal work titled 'al-Jāmiʿ bayn al-ʿilm wa-l-ʿamal al-nāfiʿ fī ṣināʿat al-ḥiyal' (A Compendium of Theory and Practical Useful Mechanical Devices), presents a collection of hydraulic and automated mechanisms, accompanied by precise workshop instructions. Relying on the Topkapı manuscript and a techno-codicological analysis of its illustrations, this article demonstrates that three fundamental functional ideas are systematically embedded within al-Jazarī's systems: 1) motion conversion via the crank-slider mechanism, 2) simple level/flow feedback through floats and valves, and 3) mechanical sequencing using cams and peg-drums. Our research methodology involves a close re-examination of the textual descriptions, the extraction of kinematic chains, and a comparative analysis with later historical specimens. Case studies of the double-acting piston pump, water clocks, and automated display devices reveal that al-Jazarī's text is not merely a catalog of "marvels" but rather a presentation of reproducible mechanical logic. Consequently, the relationship between his work and contemporary robotics and automation is more conceptual than genealogical. That is, some of the principles of conversion, feedback, and sequencing that are employed in contemporary systems were formulated in a preliminary and workshop-oriented manner in his work. This reading bridges the gap between narratives of "wondrous devices" (ḥiyal) and "functional engineering," providing a framework for a dialogue between the history of technology and contemporary engineering.

Cite this article: Hashemi, H. & Hashemi, A. (2025). From Marvel to Automation: A Re-reading of Badīʿ al-Zamān al-Jazarī's Ingenious Mechanisms and Their Conceptual Links to Contemporary Robotics. *Journal for the History of Science*. 23 (2), 163-184. DOI: http//doi.org/10.22059/jihs.2026.404875.371858

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.

تاریخ علم
شاپا الکترونیکی: ۱۹۶۵-۲۷۱۷ ● شاپا چاپی: ۰۵۷۳-۱۷۳۵

از شگفتی تا اتوماسیون: بازخوانی سازوکارهای بدیع‌الزمان جَزَری و پیوندهای مفهومی با رباتیک معاصر

هانیه هاشمی[۱]✉، عبدالحسین هاشمی[۲]

۱. گروه ریاضی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.رایانامه: hanieh.hashemi@iau.ac.ir

۲. گروه حقوق، دانشگاه پیام نور، واحد شهرری. رایانامه: hashemiabdulhossein@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: ترویجی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۱

تاریخ بازنگری: ..۱۴۰۴/۱۰/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۲۲

کلیدواژه‌ها: اتوماسیون، رباتیک، کنترل سطح (شناور-ولو)، ماشین‌های خودکار، میل‌لنگ-شاتون.

چکیده

بدیع‌الزمان جَزَری (سده ششم هجری/دوازدهم میلادی) در اثر برجسته خود با عنوان «الجامِعُ بَیْنَ الْعِلْمِ وَالْعَمَلِ النَّافِعِ فِی صِنَاعَةِ الْحِیَلِ»، مجموعه‌ای از سازوکارهای هیدرولیک و خودکار را ارائه کرده که همراه با دستورالعمل‌های دقیق کارگاهی است. این مقاله، با اتکا بر نسخه خطی توپکاپی و تحلیلی فنی–نسخه‌شناختی از تصاویر آن، نشان می‌دهد که سه ایده کارکردی بنیادین به صورتی نظام‌مند در سیستم‌های جَزَری جای گرفته‌اند: ۱) تبدیل حرکت به‌واسطه میل‌لنگ–شاتون، ۲) بازخورد ساده سطح/جریان از طریق شناور و ولو، ۳) توالی‌سازی مکانیکی با بادامک و درامِ میخ‌دار، روش تحقیق ما شامل بازبینی دقیق توصیف‌های متنی، استخراج زنجیره‌های سینماتیکی و تحلیل تطبیقی با نمونه‌های تاریخی متأخر است. مطالعات موردی روی پمپ پیستونی دوطرفه، ساعت‌های آبی و دستگاه‌های نمایشی خودکار آشکار می‌سازد که متن جَزَری صرفاً فهرستی از «شگفتی‌ها» نیست، بلکه ارائه‌ای از منطق مکانیکی قابل تکثیر است. در نتیجه، رابطه بین اثر او و رباتیک و اتوماسیون معاصر، بیشتر مفهومی است تا اینکه تبارشناختی باشد. یعنی برخی اصول تبدیل، بازخورد و توالی‌سازی که در سامانه‌های معاصر نیز به‌کار می‌روند، در آثار او به‌نحوی مقدماتی و کارگاهی صورت‌بندی شده‌اند. این خوانش شکاف میان روایت‌های «حِیَلِ شگفت‌انگیز» و «مهندسی کارکردی» را پر می‌کند و چارچوبی برای گفت‌وگو میان تاریخ فناوری و مهندسی امروز فراهم می‌آورد.

استناد: هاشمی، هانیه و هاشمی، عبدالحسین. (۱۴۰۴). از شگفتی تا اتوماسیون: بازخوانی سازوکارهای بدیع‌الزمان جَزَری و پیوندهای مفهومی با رباتیک معاصر. تاریخ علم، ۲۳ (۲)، ۱۶۳-۱۸۴. DOI: http//doi.org/10.22059/jihs.2026.404875.371858

...

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران. © نویسندگان.

مقدمه

بدیع‌الزمان ابوالعزّ اسماعیل بن رزاز جَزَری (۵۳۱–۶۰۲ق/۱۱۳۶–۱۲۰۶م)، مهندس برجسته دربار اَرتوقیان دیاربکر، از چهره‌های تأثیرگذار در سنت «صناعة‌الحیل» به‌شمار می‌رود. این سنت که تلفیقی از هنر صنعتگری، مکانیک تجربی و خلق شگفتی‌های درباری بود، در امتداد دستاوردهای پیشگامانی مانند بنوموسی در جهان اسلام و نیز سنتِ کِتسیبیوس[1] و هِرون شکل گرفت (الجزری، ۱۹۷۹؛ نیک‌سرشت و نظری، ۱۴۰۱؛ Hill, 1996). نقطه کانونی شناخت این نابغه مکانیک، کتاب گرانسنگ او با عنوان کتاب الجامِعُ بَیْنَ العِلْمِ وَالعَمَلِ النَّافِعِ فِي صِنَاعَةِ الحِیَلِ (۶۰۲ق/۱۲۰۶م) است. این اثر که به‌درستی «مبانی نظری و عملی مهندسی مکانیک در تمدن اسلامی» نامیده می‌شود، تنها یک فهرست از دستگاه‌ها نیست، بلکه با ارائه دستورالعمل‌های گام‌به‌گام ساخت، استفاده هوشمندانه از اجزای استاندارد قابل مونتاژ (مانند شیرهای یک‌طرفه،[2] بادامک و چرخ‌دنده[3])، و درنظرگرفتن ملاحظات کاربردی، به یک «دفترچه راهنمای مهندسی» پیشامدرن تبدیل شده است (الجزری، ۱۹۷۹؛ al-Hassan & Hill, 1986). تحلیل حاضر بر پایه متن این کتاب استوار است که صحت آن با نسخه معتبر خطی کتابخانه توپکاپی و ترجمه انتقادی دونالد هیل[4] (۱۹۷۴) مطابقت داده شده است. ترجمه و شرح انتقادی دونالد هیل (۱۹۷۴) بر درک نظام‌مند جَزَری از اصول تبدیل حرکت و زمان‌سنجی هیدرولیک تأکید دارد (al-Jazari, 1974; Hill, 1996)، همچنین پژوهش‌های تطبیقی معاصر مانند مطالعه دیریک[5] (۲۰۲۳)، به بررسی قابلیت‌های فنی دستگاه‌های او و ارتباط آن با اصول مهندسی و طراحی امروز پرداخته‌اند. در فضای پژوهشی داخلی نیز، مطالعاتی به ریشه‌یابی اندیشه وی (مانند پژوهش نیک‌سرشت و نظری، ۱۴۰۱، در باره تأثیرپذیری از بنوموسی) یا تحلیل ابعاد هنری اثرش (همچون مطالعه کامیار و اسدی، ۱۴۰۲، در باره سنت تصویری کتاب) پرداخته‌اند. با این حال، شکاف آشکاری در ارائه یک تحلیل ساختاریافته و مفهومی که به‌طور هم‌زمان پیوندهای نظری میان معماری مکانیکی جَزَری با مفاهیم بنیادین رباتیک و اتوماسیون معاصر را کاوش کند، احساس می‌شود. پرسش محوری ما این است که چگونه می‌توان با اتکا به متن اصلی جَزَری و با بهره‌گیری از یک چارچوب تحلیلی سه‌بعدی، خط سیر مفهومی از «شگفتی‌آفرینی» در سنت حیل تا

1. Ctesibius

۲. شیر یک‌طرفه(Check Valve) ، شیری مکانیکی که فقط اجازه می‌دهد جریان سیال (مانند آب یا هوا) در یک جهت مشخص حرکت کند و از بازگشت آن در جهت مخالف جلوگیری می‌نماید. این قطعه برای حفظ جهت جریان و کارایی سیستم در دستگاه‌هایی مانند پمپ‌ها ضروری است (Ceccarelli, 2007).

۳. بادامک(Cam) وچرخ‌دنده (Gear) یک چرخ یا محور با پروفایل (شکل سطح مقطع) غیردایره‌ای. هنگامی که می‌چرخد، این شکل غیرمتقارن، حرکت دورانی پیوسته را به حرکت خطی متناوب یا از پیش‌تعریف‌شده تبدیل می‌کند. از بادامک برای کنترل زمان‌بندی و دنباله حرکات در ماشین‌آلات استفاده می‌شود. چرخ‌دنده ، چرخی دندانه‌دار که با درگیر شدن با دنده‌های یک چرخ دیگر، گشتاور و سرعت را بین محورها منتقل می‌کند. چرخ‌دنده‌ها می‌توانند سرعت را افزایش یا کاهش دهند، جهت حرکت را تغییر دهند یا حرکت را بین محورهای غیرهم‌خط منتقل نمایند (Ceccarelli, 2007).

4. Donald R. Hill
5. Dirik

«خودکارسازی» در مهندسی نوین را ترسیم کرد؟ چارچوب نظری پیشنهادی این پژوهش، دستاوردهای جَزَری را در سه محور به هم‌پیوسته بررسی می‌کند:

۱. هیدرولیک کارا و منطق کنترل جریان (در دستگاه‌هایی مانند پمپ‌های رفت‌وبرگشتی و ساعت‌های آبی).

۲. معماری مکانیزم و تبدیل حرکت (در نمونه‌های اولیه‌ای مانند سازوکار میل‌لنگ–شاتون).

۳. خودکارسازی نمایشی–کاربردی (در خودکارهای انسان‌نما و دستگاه‌های سرو).

این تحلیل با بازمهندسی مفهومی نمونه‌های شاخص کتاب و با استناد به تصاویر فنی موجود در نسخه‌های معتبر خطی (همچون نسخه کتابخانه توپکاپی) و نیز با اتکا به مهم‌ترین منابع اولیه (چاپ عربی الجامع) و تحقیقات ثانویه (همچون آثار هیل، الحسن، و پژوهش‌های معاصر فارسی و انگلیسی) پیش خواهد رفت. در نهایت، این مقاله در آن است نشان دهد که چگونه اصولی مانند تبدیل حرکت، منطقِ ولو[۱]/کنترل جریان و مدولاریتی اجزا،[۲]که در کار جَزَری متبلور شده، نه‌تنها نشان‌دهنده نبوغ فنی اوست بلکه بیانگر صورت‌بندی اولیه‌ای از تفکر سیستمی و خودکارسازی است که قرن‌ها بعد در رباتیک معاصر به کمال رسید.

روش تحقیق

این پژوهش از نوع «تاریخی–تحلیلی» است و با هدف بازخوانی مفهومی سازوکارهای جزری و واکاوی پیوندهای آن با رباتیک معاصر انجام شده است. برای دستیابی به این هدف، از تلفیق «روش اسنادی» و «تحلیل محتوای کیفی» بهره گرفته شده است. رویکرد تحلیلی مقاله، مبتنی بر مطالعه‌ی عمیق منابع دست اول (متن اصلی اثر جزری) در کنار منابع دست دوم معتبر (ترجمه‌های انتقادی و پژوهش‌های نوین) است

منابع و شیوه تحلیل

داده‌های اولیه این تحقیق را متن عربی الجامِعُ بَيْنَ الْعِلْمِ وَالْعَمَلِ النَّافِعِ فِي صِنَاعَةِ الْحِيَلِ (الجزری، ۱۹۷۹) و نگاره‌های فنی آن تشکیل می‌دهند. برای اطمینان از دقت، این داده‌ها با نسخه خطی معتبر توپکاپی (MS A.III 3472) و نیز با ترجمه و شرح انتقادی دونالد هیل (۱۹۷۴) مطابقت داده شدند. افزون بر این،به‌منظور تحلیل در بستر پژوهشی روز، از مهم‌ترین مطالعات معاصر فارسی (مانند نیک‌سرشت و نظری، ۱۴۰۱؛ کامیار و اسدی، ۱۴۰۲) و انگلیسی (همچون Dirik, 2023) نیز بهره برده شده است، روش کار به این شرح بود: نگاره‌ها و توصیفات متنی دستگاه‌های منتخب جَزَری (شامل پمپ دوپیستونه، ساعت فیل و اتمات‌های نمایشی)

---

۱. منطق ولو/کنترل جریان (Valve/Flow Control Logic)، اصول و مکانیزم‌هایی که جهت، دبی یا فشار جریان سیال (آب، هوا یا روغن) را در یک سیستم هیدرولیک یا پنوماتیک مدیریت می‌کنند. این منطق در دستگاه‌های جَزَری عمدتاً از طریق شیرهای یک‌طرفه و ترکیب شناور–ولو محقق می‌شده و امکان ساخت سیستم‌های خودکار مبتنی بر زمان‌بندی هیدرولیک را فراهم می‌کرده است(Ceccarelli, 2007) .

۲. مدولاریتی اجزا (Component Modularity)، رویکرد مهندسی که در آن یک مجموعه از اجزای استاندارد (مانند بادامک، چرخ‌دنده، ولو و شناور) به صورت مکرر در دستگاه‌های مختلف به کار می‌روند. این اصل امکان طراحی، ساخت، تعمیر و توسعه‌ی ساده‌تر سیستم‌های پیچیده را فراهم می‌سازد. جَزَری با به کارگیری این رویکرد، امکان ترکیب و تطبیق اجزا برای دستیابی به کارکردهای گوناگون را نشان داده است (Ceccarelli, 2007).

به‌طور نظام‌مند بررسی شد. این مطالعه با هدف شناسایی اجزای کلیدی، چگونگی تعامل آن‌ها و درک منطق حاکم بر کارکرد هر دستگاه انجام شد. بر این اساس، سه الگوی کارکردی تکرارشونده «تبدیل حرکت»، «بازخورد سطح/جریان» و «توالی‌سازی مکانیکی» استخراج و صورت‌بندی شد. در گام بعد، این ایده‌های استخراج‌شده در بستر سنت «حیل» تحلیل شده‌اند و پیوند مفهومی آن‌ها با مفاهیم مدرن در حوزه‌ی رباتیک و اتوماسیون صرف نظر از تبارشناسی تاریخی تبیین شد.

مرور پیشینه پژوهش

مطالعات مربوط به جَزَری را در دو سنت پژوهشی اصلی می‌توان بررسی کرد: پژوهش‌های «کلاسیک و بنیادین» که عمدتاً بر تحلیل فنی، ترجمه و نسخه‌شناسی متمرکزند، و پژوهش‌های «معاصر و تطبیقی» که به بررسی ارتباط ایده‌های او با علوم جدید می‌پردازند.

در دسته نخست، کارهای دونالد هیل سنگ بنای پژوهش‌های غربی است. ترجمه انتقادی او از کتاب جزری (Hill, 1974) همراه با تحلیل‌های نسخه‌شناختی (Hill, 1991)، دسترسی به این متن را ممکن ساخته و چارچوبی برای درک جایگاه جزری در تاریخ فناوری فراهم آورده است. مطالعات نظری‌تر مانند کار مایر[1] در *تاریخ کنترل بازخورد* و سزارلی[2] در *تاریخ مکانیزم‌ها*، بستری برای فهم سیستماتیک نوآوری‌های او ایجاد کرده‌اند (Mayr, 1970; Ceccarelli, 2007). در پژوهش‌های داخلی نیز، آثار تحلیلی مانند مطالعه نیک‌سرشت و نظری (۱۴۰۱) به واکاوی تأثیرپذیری جزری از پیشینیان به ویژه در طراحی فواره‌های خودکار پرداخته‌اند.

در سنت دوم، پژوهش‌های معاصر با نگاهی میان‌رشته‌ای، به دنبال کشف پیوندهای مفهومی با مهندسی امروزند. برای نمونه، مطالعه دیریک (۲۰۲۳) به بررسی قابلیت‌های فنی دستگاه‌های جزری و ارتباط آن با مهندسی و طراحی معاصر می‌پردازد. همچنین، پژوهش‌هایی مانند کامیار و اسدی (۱۴۰۲) از نظر هنری و سنت تصویری کتاب، جنبه‌های فرهنگی و نمایشی این آثار را برجسته می‌سازند. با این حال، مرور این پیشینه نشان می‌دهد که شکاف مهمی در ارائه یک تحلیل ساختاریافته مفهومی که سه هدف همزمان را دنبال کند، وجود دارد: نخست، استخراج و صورتبندی ایده‌های کارکردی پایه‌ای به عنوان یک چارچوب تحلیلی یکپارچه؛ دوم، تبیین پیوندهای این ایده‌ها با مفاهیم بنیادین رباتیک و اتوماسیون معاصر؛ و سوم، تحلیل همزمان بُعد فرهنگی–نمایشی و کارکرد فنی دستگاه‌ها برای درک جامع‌تری از منطق حاکم بر آثار جزری.

بدیع‌الزمان جَزَری و اختراعات او

بر مبنای متن اصلی کتاب جَزَری، دستگاه‌های طراحی‌شده توسط او را می‌توان در چند رده کارکردی اصلی دسته‌بندی کرد: (۱) زمان‌سنج‌ها (ساعت‌های آبی و شمعی)، (۲) فواره‌ها و آب‌نماهای خودکار، (۳) اتماتون‌ها یا «خادم»های خودکار نمایشی، (۴) قفل‌ها و درهای مکانیکی پیچیده، و (۵) ماشین‌های بالابری آب (پمپ‌ها و

1. Mayr
2. Ceccarelli

ساقیه‌ها) (الجزری، ۱۹۷۹؛ Hill, 1996). اگرچه این دستگاه‌ها در ظاهر و کاربرد نهایی متفاوتند، تحلیل مهندسی آن‌ها منطق مشترک و نظام‌مندی را آشکار می‌سازد. این منطق در صورت‌بندی سه مؤلفه کارکردی بنیادین تجلی یافته است که در سراسر اثر تکرار می‌شوند:

الف) تبدیل حرکت به‌واسطه سازوکارهایی چون میل‌لنگ–شاتون و چرخ‌دنده و اهرم‌بندی‌های مختلف؛

ب) کنترل جریان و بازخورد ساده از طریق ترکیب شناور (حس‌گر سطح) و ولو (شیر) برای ایجاد سیستم‌های زمان‌سنجی و تنظیم خودکار؛

ج) توالی‌سازی مکانیکی با استفاده از بادامک و درام‌میخ‌دار[1] برای برنامه‌ریزی دنباله‌ای از کنش‌ها (الجزری، ۱۹۷۹؛ al-Hassan & Hill, 1986).

ویژگی ممتاز کتاب جَزَری، نه در معرفی این اجزای منفرد، که در رویکرد عملی و کارگاهی او نهفته است. او برای هر دستگاه، فهرست کاملی از اجزا، اندازه‌های دقیق و دستورالعمل‌های گام‌به‌گام مونتاژ ارائه می‌دهد (الجزری، ۱۹۷۹). این رویکرد، متن را از یک فهرست توصیفی صرف به یک راهنمای کاربردی و قابل بازتولید تبدیل می‌کند که امکان بازمهندسی و تحلیل کارکردی را برای محققان فراهم می‌سازد (Hill, 1991). در این چارچوب، پژوهش‌های متأخر نشان می‌دهند که جَزَری با به‌کارگیری نظام‌مند و ترکیبی اجزای کلیدی پیشین (مانند بادامک، ولو، چرخ‌دنده) و توسعه ابداعاتی مانند کاربرد عملی مکانیزم میل‌لنگ–شاتون، در واقع به سمت ایجاد یک سیستم مهندسی با رویکرد مدولار (پیمانه‌ای) حرکت کرده است (نیک‌سرشت و نظری، ۱۴۰۱؛ Hill, 1991). این مدولاریتی عملی یعنی استفاده مکرر از مجموعه‌ای از اجزای استاندارد در دستگاه‌های مختلف نه تنها کارایی طراحی را افزایش می‌داد، بلکه یکی از نقاط پیوند مفهومی مهم با اصول مهندسی و طراحی معاصر، از جمله رباتیک، محسوب می‌شود (Dirik, 2023؛ al-Hassan & Hill, 1986).

تأثیرات اختراعاتِ جَزَری بر مهندسیِ معاصر

رباتیک و سیستم‌های خودکار (اتوماسیون)

توالی‌سازی مکانیکی و «برنامه‌پذیری محدود»

در دستگاه‌های خودکار جَزَری، به‌ویژه در نمونه‌ای شاخص مانند «قایق نوازندگان»، از ترکیب اهرم‌ها، بادامک و درام میخ‌دار برای اجرای توالی‌های حرکتی و صوتی ازپیش‌تعریف‌شده استفاده شده است (الجزری، ۱۹۷۹). در این سازوکار، با جابه‌جایی میخ‌ها بر سطح استوانه، الگوی ضرب و ترتیب کنش‌های مکانیکی تغییر می‌یابد (شکل ۱). این قابلیت، امکان تنظیم مجدد ساده برنامه حرکتی دستگاه را فراهم می‌ساخت. از این منظر، می‌توان این سیستم را نمونه‌ی اولیه‌ای از یک «برنامه‌پذیری محدود» مکانیکی دانست که در آن دنباله عملیات، به‌صورت فیزیکی و از طریق آرایش میخ‌ها «کدگذاری» می‌شده است (Sharkey, 2007).

1. Peg Drum

این تحلیل که مبتنی بر بازخوانی کارکردی خود متن و تصاویر جَزَری است، نشان می‌دهد که منطق بنیادین برنامه‌ریزی یک توالی کنش اگرچه با فناوری‌ای کاملاً مکانیکی در کار او حضور داشته است. این همسانی مفهومی با اصل «ذخیره‌سازی برنامه» در رباتیک و اتوماسیون امروزی معنادار است، بی‌آنکه لازم باشد ادعای یک تأثیر تاریخی مستقیم نمود (نیک‌سرشت و نظری، ۱۴۰۱).

شکل۱. قایق نوازندگان (اتمات نمایشی): درام میخ‌دار و سامانه انتقال نیرو که توالی حرکات ازپیش‌تنظیم‌شده را اجرا می‌کند.[۱]

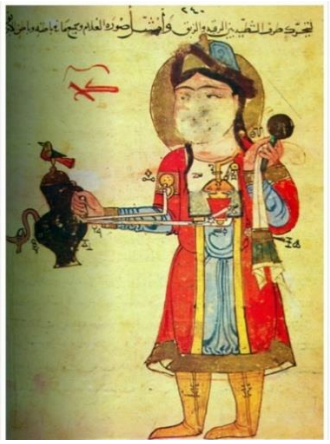
حس‌گر سطح و کنترل روشن/خاموش[۲]

در شماری از ساعت‌ها و فواره‌های خودکار جَزَری، یکشناور[۳] به‌طور هم‌زمان نقش حس‌گر سطح و عامل کنترل را ایفا می‌کند (الجزری، ۱۹۷۹). با تغییر تدریجی سطح آب در یک محفظه، موقعیت شناور جابه‌جا شده و این جابه‌جایی، از طریق یک سازوکار اهرمی، موجب باز یا بسته شدن یک شیر (ولو)، رهاسازی یک وزنه در مسیر، یا چرخش یک صفحه‌ی نشان‌گر می‌شود (شکل ۲). این زنجیره‌ی کنش‌وواکنش، در نهایت یک چرخه‌ی زمانی کامل را به پایان می‌رساند یا یک رویداد نمایشی را راه می‌اندازد. از منظر مهندسی کنترل، این سازوکار نمونه‌ی اولیه‌ای از یک سیستم کنترل رویداد–محور با الگوی کنترلی روشن/خاموش[۴] محسوب می‌شود (Mayr, 1970). در این الگو، یک متغیر فیزیکی پیوسته (سطح سیال) هنگام رسیدن به یک آستانه[۵] از پیش‌تعیین‌شده،

۱. منبع: کتابخانه موزه کاخ توپکاپی، نسخه خطی A.III 3472 (احمد سوم ۳۴۷۲).

2. bang–bang
3. float
4. on-off
5. threshold

یک کنش گسسته و قطعی را فعال می‌سازد. این اصل که در دستگاه‌هایی مانند «ساعت فیل» و «خادم آب‌ریز» جَزَری به وضوح دیده می‌شود (Hill, 1991) ، همان منطق بنیادینی است که امروزه در بسیاری از کنترل‌کننده‌های سطح ساده (مانند کلید شناور مخازن) و به‌طور گسترده‌تر در معماری سیستم‌های کنترل صنعتی وجود دارد. بنابراین، این بخش از کار جَزَری نیز نه به‌عنوان یک پیش‌درآمد تاریخی مستقیم، بلکه به‌عنوان بیانی کاربردی و مستقل از یک اصل جهانی کنترل، با مهندسی معاصر پیوند مفهومی برقرار می‌کند (نیک‌سرشت و نظری، ۱۴۰۱؛ Ceccarelli, 2007).



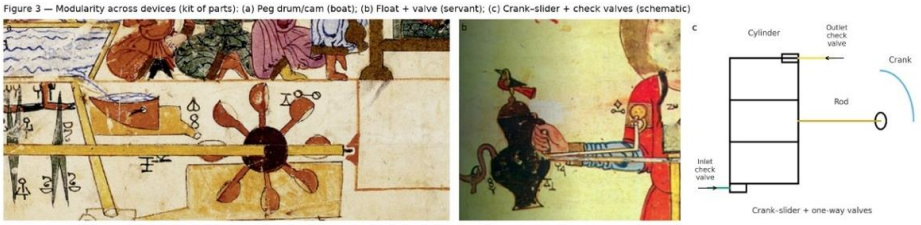
شکل ۲. خدمت‌کار آب‌ریز (اتمات درباری): نمونه‌ای از پیوند شناور (حس گر سطح) با یک عملگر و سامانه اعلان مکانیکی[۱]

مدولاریتی اجزا و «طراحی مبتنی بر کیت استاندارد»

یکی از جنبه‌های برجسته‌ی روش مهندسی جَزَری که در متن کتاب او به وضوح قابل ردیابی است، رویکرد مدولار (پیمانه‌ای) به طراحی است (الجزری، ۱۹۷۹). بررسی دستگاه‌های متنوع او از ساعت‌های آبی و پمپ‌ها تا خودکارهای نمایشی نشان می‌دهد که او از مجموعه‌ای محدود از اجزای کلیدی استانداردشده در طرح‌های گوناگون بهره می‌برده است. اجزایی مانند بادامک (کَم) و محور بادامکی، میل‌لنگ–شاتون، شیر (ولو)، شناور، و چرخ‌دنده‌ها، در قالب‌های مشابهی در دستگاه‌های مختلف «تکرار و ترکیب» می‌شوند (شکل ۳). این رویکرد، در واقع ایجاد یک «کیت اولیه اجزای استاندارد» را محقق می‌ساخته که امکان انتقال راه‌حل‌های مهندسی بین حوزه‌های کارکردی متفاوت (مثلاً از زمان‌سنجی به آب‌برداری) و نیز بهینه‌سازی تدریجی هر جزء را فراهم می‌کرد .(al-Hassan & Hill, 1986) چنین مدولاریتی عملی دست کم دو پیامد مهم داشته است: نخست، سهولت و قابلیت اطمینان بیشتر در ساخت و تعمیر دستگاه‌های پیچیده؛ و دوم، امکان بازتولیدپذیری دستورالعمل‌ها که ماهیت کتاب او را به یک راهنمای کارگاهی مؤثر تبدیل می‌کند.

۱. منبع: کتابخانه موزه کاخ توپکاپی، نسخه خطی MS A.III 3472 (احمد سوم ۳۴۷۲).

از منظر تاریخ مهندسی، این نگرش را می‌توان صورت ابتدایی و کاربردی از مفاهیم مدرن «طراحی مدولار» و «استانداردسازی اجزا دانست (Ceccarelli, 2007). درک این جنبه از کار جَزَری، پیوند مفهومی دیگری با مهندسی معاصر، به ویژه فلسفه‌ی طراحی در رباتیک و اتوماسیون برقرار می‌سازد، جایی که استفاده از ماژول‌ها، درایورها و قطعات استاندارد برای ساخت سیستم‌های پیچیده‌تر، یک اصل اساسی است (Dirik, 2023). این تشابه، مجدداً بر همگرایی در راه‌حل‌های مهندسی پایه در طول تاریخ صحه می‌گذارد، بی‌آنکه نیاز به اثبات یک تبارشناسی خطی باشد (نیک‌سرشت و نظری، ۱۴۰۱).



شکل ۳. مدولاریتی اجزا در دستگاه‌های جَزَری: (a) درام میخ‌دار/بادامک (قایق نوازندگان)، (b) شناور و ولو [۱](خدمت‌کار آب‌ریز)، (c) میل‌لنگ–شاتون با شیرهای یک‌طرفه (بازترسیم شماتیک).[۲]

نمونه کانونی: «ساعت فیل» به مثابه یک سامانه کنترل خودکار

معماری «ساعت فیل» جَزَری، که بر پایه متن اصلی او توصیف شده است (الجزری، ۱۹۷۹)، نمونه‌ای عالی از یک سامانه خودکار هیدرولیکی–مکانیکی یکپارچه است که کارکردهای سنجش زمان، آستانه‌گذاری، و اعلان نمایشی را در یک کل منسجم ادغام می‌کند. زنجیره عملکرد آن را می‌توان به این صورت ترسیم کرد: مخزن آب (در کالبد فیل) ⟵ ظرف/شناور دارای روزنه کالیبره‌شده ⟵آستانه/رهاساز مکانیکی ⟵ مجموعه عملگرهای اعلان (حرکت پیکره‌ها و ضرب طبل). این معماری نشان می‌دهد که جَزَری چگونه چندین مؤلفه پایه را در قالب یک سیستم مدولار کنار هم قرار داده است(al-Hassan & Hill, 1986; Hill, 1991) .

مسیر حسگر تا عملگر،[۳] با عبور تدریجی آب از یک روزنه تنظیم‌شده، سطح سیال در ظرف شناور تغییر کرده و باعث جابه‌جایی تدریجی آن می‌شود. رسیدن شناور به یک ارتفاع آستانه از پیش تعیین‌شده، یک ضامن مکانیکی را آزاد می‌کند. این رهاسازی، انرژی ذخیره‌شده در یک وزنه یا مکانیزم فنری را آزاد کرده و به یک توالی اعلان (مانند ضرب طبل یا حرکت مجسمه‌ها) می‌انجامد. بنابراین، یک متغیر فیزیکی پیوسته (سطح آب)

۱. شناور و ولو(Float and Valve) ، سیستم کنترل بازخورد ساده که در آن شناور به عنوان حس گر سطح مایع و ولو (شیر) به عنوان عملگر کنترل جریان عمل می‌کند. این ترکیب نمونه‌ای اولیه از کنترل خودکار در سیستم‌های هیدرولیک باستانی محسوب می‌شود (Ceccarelli, 2007).

۲. منبع پنل‌های a و b: کتابخانه موزه کاخ توپکاپی، نسخه خطی MS A.III 3472 (احمد سوم ۳۴۷۲)، برگه‌های مربوطه. منبع پنل c: بازترسیم شماتیک نویسنده بر پایه الجَزَری (۱۹۷۴).

3. Sensor-to-Actuator

به یک سری رخداد گسسته تبدیل می‌شود که نمونه‌ای روشن از کنترل رویداد–محور با منطق دوحالته (روشن/خاموش) است(Hill, 1996) .

تنظیم دوره زمانی،[1] دوره تناوب کار ساعت (مثلاً ۳۰ دقیقه) تابع حجم ظرف شناور و قطر مؤثر روزنه است. این کالیبراسیون دقیق روزنه اساس دقت زمان‌سنجی دستگاه را شکل می‌دهد(Hill, 1991 ؛ الجزری، ۱۹۷۹). جَزَری در متن خود به عوامل ایجاد خطا (مانند رسوب‌گیری روزنه یا نشتی) و راهکارهای عملی مقابله با آنها (مانند صیقل کاری سطوح و آب‌بندی) نیز اشاره کرده است که نشان‌دهنده توجه او به قابلیت اطمینان و نگهداشت عملی سامانه است (al-Hassan & Hill, 1986) .

ارزش تاریخی ساعت فیل در «نمایش» صرف خلاصه نمی‌شود. این دستگاه یک الگوی سامانه‌ای قابل تعمیم ارائه می‌دهد، حسگر سطح← آستانه/ماشه ← عملگر ← اعلان ←بازتنظیم .این الگوی عام، هسته مفهومی بسیاری از زمان‌سنج‌ها و سامانه‌های کنترل خودکار متأخر را تشکیل می‌دهد و پیوندی روشن بین منطق حاکم بر سنت «حیل» و اصول کنترل و اتوماسیون در مهندسی جدید برقرار می‌سازد(al-Hassan & Hill, 1986; Hill, 1996).

بر پایه این تحلیل، سه مؤلفه کلیدی قابل تعمیم به مهندسی امروز در کار جَزَری استخراج می‌شود که در ساعت فیل و سایر دستگاه‌های او متجلی هستند: ۱) توالی‌سازی مکانیکی و برنامه‌پذیری محدود (با بادامک و درام میخ‌دار)، ۲) حس‌گری ساده و کنترل بازخورد (با شناور و ولو)، و ۳) مدولاریتی و استانداردسازی اجزا. این مؤلفه‌ها، عناصر مفهومی مشترکی هستند که در معماری سیستم‌های خودکار معاصر، از ربات‌های صنعتی تا سیستم‌های کنترل فرآیند، نیز حضور دارند (Dirik, 2023 ؛ نیک‌سرشت و نظری، ۱۴۰۱). تأکید نهایی این است که این پیوند، بر پایه همسانی در منطق مهندسی و حل مسأله استوار است و مقاله حاضر با استناد به متن اصلی جَزَری در پی نمایش این همگرایی مفهومی است، نه اثبات یک تأثیر تاریخی خطی و مستقیم.

1. Calibration

شکل ۴. ساعت فیل: ادغام زمان‌بندی هیدرولیکی (شناور/روزنه) با نمایش و اعلان مکانیکی.[۱]

نمونه‌های هم‌خانواده خودکارها

- خدمت‌کار آب‌ریز: ترکیبِ شناور+ولو برای آغاز/توقف جریان و یک مکانیسمِ اعلان مکانیکی؛ نمونه روشنِ کنترلِ رویداد–محور.
- قایق نوازندگان: برنامه‌ریزیِ حرکت با درامِ میخ‌دار/کَم؛ نمونه «برنامه‌پذیریِ محدود» با امکان تغییر الگو از طریق جابجایی میخ‌ها.
- ساعت‌های آبی دیگر: تغییر نسبتِ حجم/اوریفیس برای دوره‌های متفاوت و الحاقِ شمارشگرهای گسسته (رَچت/چرخ‌دنده بخشی) برای اعلان‌های مرحله‌ای.

سازوکارهای هیدرولیک و تبدیل حرکت: از پمپ رفت‌وبرگشتی تا میل‌لنگ–شاتون

پمپ دو سیلندر مکشی–دهشی

جَزَری، که در فصل مربوط به ماشین‌های آب‌بر در کتاب الجامِعُ بَيْنَ الْعِلْمِ وَالْعَمَلِ النَّافِعِ فِي صِنَاعَةِ الْحِيَلِ به تفصیل شرح داده شده است (الجزری، ۱۹۷۹)، نمونه‌ای شاخص از بلوغ مهندسی کاربردی در تمدن اسلامی به شمار می‌رود. این دستگاه با بهره‌گیری از مکانیزم **میل‌لنگ–شاتون** (کرنک–شاتون)، حرکت دورانی حاصل از چرخاب یا محرک حیوانی را به حرکت خطی رفت‌وبرگشتی همزمان دو پیستون تبدیل می‌کند. از منظر تاریخ مکانیزم، این اثر حاوی **اولین شرح مصور و کاربردی کامل** از یک سامانه کرنک–شاتون در

۱. منبع، کتابخانه موزه کاخ توپکاپی، نسخه خطی MS A.III 3472 (احمد سوم ۳۴۷۲)، برگه‌های مربوطه.

یک ماشین عملیاتی است (Hill, 1991; Romdhane & Zeghloul, 2009) . پژوهش‌های مرجع تأکید دارند که این توصیف چندین سده پیش از صورت‌بندی‌های مشابه در دوران رنسانس اروپا پدید آمده و با یکپارچه‌سازی مؤلفه‌هایی چون شیرهای یک‌طرفه، جعبه‌دنده و خود مکانیزم تبدیل حرکت، راه‌حلی مهندسی‌شده و کامل ارائه می‌دهد (al-Hassan & Hill, 1986). تحلیل این پمپ از دو منظر حائز اهمیت است: نخست، به عنوان یک دستاورد مهندسی مستقل در سنت اسلامی که در آن اصول مکانیکی به نحو مؤثری برای حل یک مسئله عملی (بالابری آب) به کار گرفته شده‌اند (نیک‌سرشت و نظری، ۱۴۰۱). دوم، از منظر **همسانی مفهومی** با اصول مهندسی معاصر. معماری این پمپ شامل مبدل حرکت (کرنک–شاتون)، سیستم کنترل جریان (شیرهای یک‌طرفه) و عملکرد دوکنشی[1] الگویی اولیه را ارائه می‌کند که در هسته بسیاری از محرک‌های هیدرولیک، پنوماتیک و سیستم‌های رفت‌وبرگشتی صنعتی امروزی نیز قابل شناسایی است (Ceccarelli, 2007; Dirik, 2023).بنا بر این، این بخش از کار جَزَری نیز مؤید آن است که **تشابه ساختاری و کارکردی** در حل مسائل مهندسی پایه می‌تواند در بسترهای تاریخی و فرهنگی متفاوت ظهور یابد، بی‌آنکه الزاماً بیانگر یک انتقال تاریخی مستقیم باشد.

تحلیل کارکردی و بازمهندسی

بازسازی‌های تحلیلی و مدل‌سازی‌های دیجیتال نوین نشان می‌دهند که پمپ جَزَری نمونه‌ای روشن از عملکرد دوکنشی[2] است: در حالی که یک پیستون در مرحله مکش است، پیستون دیگر در مرحله دهش قرار دارد. این ویژگی، به همراه استفاده از شیرهای یک‌طرفه که از بازگشت جریان جلوگیری می‌کنند، جریان آب پیوسته و نسبتاً یکنواختی را ایجاد می‌کند (Al-Hassan & Hill, 1986). چنین معماری‌ای متشکل از مبدل حرکت،[3] سیستم کنترل جریان[4]و عملکرد دوکنشی همچنان به عنوان شالوده بسیاری از محرک‌های هیدرولیک و پنوماتیک و همچنین اکچویتورهای رفت و برگشتی در خطوط تولید صنعتی مدرن باقی مانده است (Bennett, 1986; Ceccarelli, 2007). با این حال، باید تأکید کرد که پیوند این تشابهات، بیشتر مفهومی است تا یک تأثیر تاریخی مستقیم و مستند (Hill, 1996).

استانداردسازی اجزا و انتقال‌پذیری آنها

یکی از درخشان‌ترین وجوه روش مهندسی جَزَری، رویکرد مدولار او است. متن او به وضوح نشان می‌دهد که اجزای کلیدی مانند بادامک، محور بادامکی، [5] شیر، شناور[6] و چرخ‌دنده نه به عنوان قطعاتی منحصربه‌فرد برای یک دستگاه، بلکه به عنوان المان‌های استانداردی در نظر گرفته شده‌اند که در ماشین‌آلات گوناگون از

1. Double-acting
2. Double-Acting
3. Motion Converter
4. Flow Control System
5. Camshaft
6. Float

ساعت‌های آبی گرفته تا پمپ‌ها و اتماتون‌های نمایشی تکرار و ترکیب می‌شوند (al-Jazari, 1974; Hill, 1996). این «کیت اجزای استاندارد» امکان انتقال راه‌حل‌ها، تسهیل فرآیند ساخت و تعمیر، و در نهایت، تکامل کارآمدتر طراحی‌ها را فراهم می‌ساخت. این اصل مدولاریتی و استانداردسازی، [1] که امروزه از ارکان اساسی مهندسی سیستم‌ها و طراحی صنعتی محسوب می‌شود، در کارهای جَزَری به صورتی ابتدایی اما کاملاً کاربردی پیش‌بینی شده بود (al-Hassan& Hill, 1986). پژوهش‌های جدید در حوزه تاریخ مهندسی نیز بر اهمیت این رویکرد مدولار در توسعه آموزش مهندسی و حفظ میراث فنی تأکید دارند (Ceccarelli, 2007).

مطالعه موردی افزوده: قفل‌های مکانیکی

قفل‌های چندبولته و ترکیبی توصیف‌شده در آثار جَزَری، نمونه‌ای گویا از تعمیم‌پذیری سه ایده کارکردی به حوزه‌های دیگر است. این قفل‌ها از زنجیره‌ای از منطق‌های مکانیکی تشکیل شده‌اند که به صورت گسسته و مرحله‌ای عمل می‌کنند(al-Jazari, 1974). از این منظر، معماری قفل‌های جَزَری را می‌توان صورت مکانیکی شمارش و اعتبارسنجی ورودی دانست. تحلیل این سازوکار نشان می‌دهد اصول سه‌گانه مقاله در «منطق ایمنی و قفل‌گذاری» نیز عینیت دارد:

- تبدیل حرکت تبدیل چرخش/لغزش کلید به جابه‌جایی خطی بولت‌ها
- توالی‌سازی: الزام اجرای گام‌ها در ترتیب درست برای رسیدن به وضعیت «گشوده»
- بازخورد/آستانه: رسیدن بولت‌ها به موقعیت‌های معین که رهاساز را فعال می‌کند.

نسبت تاریخی: «الهام مفهومی» در برابر «تأثیر مستقیم»

ادبیات پژوهشی معتبر بر اهمیت بی‌بدیل جَزَری در تاریخ مهندسی تأکید دارد(Hill, 1996; Rashed, 1996; AlHassan&Hill, 1986) . با این حال، تمایز قائل شدن میان شباهت‌های مفهومی/مکانیکی با سامانه‌های مدرن و تبارشناسی تاریخی مستقیم اهمیت بسیاری دارد. شواهد قطعی از خط انتقال مستقیم دانش جَزَری به مهندسی اروپای رنسانس اندک است(Ceccarelli, 2007) . با این وجود، هم‌ارزی‌های سازوکارهای او از جمله مکانیزم کرنک–شاتون، شیرهای کنترل جریان، حس‌گرهای سطح و زمان‌سنجی هیدرولیک که مستقیماً از متن کتابش استخراج می‌شوند (الجزری، ۱۹۷۹). از منظر تاریخ ایده‌ها، پیوندی معنادار با مبانی اتوماسیون مدرن ایجاد می‌کنند(Hill, 1996; Al-Hassan & Hill, 1986). این تفکیک، استدلال مقاله حاضر در باره تأثیرات مفهومی بر مهندسی معاصر را از مبالغه در علّیت تاریخی[2] علّیت تاریخیِ مستقیم مصون می‌دارد (Sharkey, 2007; Hill, 1991). به عبارت دیگر، سهم جَزَری را می‌توان بیشتر در قالب

1. Standardization
2. Causalité

*منظور از «علّیت تاریخی» در اینجا، ادعای یک رابطه‌ی مستقیم و زنجیره‌وار علت و معلولی بین اختراعات جَزَری و فناوری‌های مدرن است. مقاله با این تفکیک، از چنین ادعای اغراق‌آمیزی اجتناب می‌ورزد و در عوض بر «الهام مفهومی» تأکید می‌کند.

«پیش‌تکوین مفهومی[1]» اصول مهندسی سیستم‌های خودکار دانست، تا یک «تأثیر مستقیم تاریخی». [2]این خوانش، که با تحلیل منابع اولیه و پژوهش‌های تطبیقی داخلی نیز همسو است (نیک‌سرشت و نظری، ۱۴۰۱)، بر همگرایی در منطق مهندسی پایه در فرهنگ‌های مختلف تأکید می‌ورزد. کار او نه به عنوان یک سرچشمه اثبات‌شده برای فناوری متأخر، که به مثابه بیان مستقل و پیشرفته‌ای از همان اصول جهانی در نظر گرفته می‌شود که بعدها در مهندسی مدرن صورتبندی نظری یافت و توسعه فناورانه گسترده‌تری را تجربه کرد(Ceccarelli, 2007؛Dirik, 2023) .

جدول ۱. نمودار تطبیقی سازوکارهای جَزَری و همتای مدرن

نمونه‌های کاربردی معاصر	مفهوم مهندسی مدرن معادل	کارکرد در دستگاه‌های جَزَری	مؤلفه/مکانیزم در آثار جَزَری
کلید فلوتر در پمپ‌ها و مخازن فرآیندی (Al-Jazari, ۱۹۷۴; Hill, ۱۹۹۱)	حس گر سطح + کنترل روشن/خاموش	سنجش و تنظیم سطح و زمان‌بندی جریان	شناور + اوریفیس
ماشین‌های بافندگی و سیستم‌های کامفالوِر (Sharkey, ۲۰۰۷; Ceccarelli, ۲۰۲۰)	برنامه‌ریز مکانیکی/پروفایل کَم	تعریف توالی حرکت و ضرب	درام میخ‌دار/کَم
کمپرسورهای رفت و برگشتی و موتورهای احتراقی (Al-Jazari, ۱۹۷۴; Hill, ۱۹۹۱)	مبدل حرکت (Crank-Slider)	تبدیل حرکت دورانی به رفت و برگشتی	میل‌لنگ–شاتون
شیرهای یک‌طرفه در پمپ‌های پیستونی (Hassan & Hill, ۱۹۸۶)	منطق کنترل جریان و یک‌سوسازی	جهت‌دهی جریان و جلوگیری از برگشت	ولو/شیر یک‌طرفه
شمارنده‌های دیجیتال اولیه و مکانیزم‌های ایمنی (Hill, ۱۹۹۶)	شمارنده مکانیکی/سیستم قفل‌گذاری	شمارش و گسسته‌سازی حرکت	چرخ‌دنده بخشی/رَچت
پلتفرم‌های رباتیک و سیستم‌های ساخت استاندارد (Al-Jazari, ۱۹۷۴; Ceccarelli, ۲۰۰۷)	طراحی مدولار و استانداردسازی	انتقال‌پذیری بین دستگاه‌ها	پیوندهای مدولار اجزا

1. Conceptual Prototyping
2. Direct Historical Influence

اتوماتیک‌سازی: از خودکارهای نمایشی تا منطقِ اتوماسیون

دستگاه‌های جَزَری، از جمله «ساعت فیل»، «خادمِ آب‌بر» و «قایقِ نوازندگان»، نمونه‌های اولیه‌ای از سیستم‌های خودکار پیشاصنعتی به شمار می‌روند. در این سازوکارها، حس گر سطح (شناور)، منطق کنترل جریان (ولو) و توالی‌ساز مکانیکی (بادامک/درام میخ‌دار) در یک زنجیره عملیاتی ترکیب می‌شوند تا رشته‌ای از کنش‌ها را بدون نیاز به دخالت مستقیم انسان به اجرا درآورند (al-Jazari, 1974; Hill, 1996). این معماری، در واقع، الگوی پایه‌ای «اتوماسیون رویداد–محور[1]» را تشکیل می‌دهد (Al-Hassan & Hill, 1986).

اصل «تبدیل حرکت» و «مدولاریتی اجزا» به مثابه زیرساخت خط تولید

در پمپ دوپیستونه جَزَری، میل‌لنگ–شاتون نقش یک مبدل حرکت[2] را ایفا می‌کند که حرکت دورانی محرک اولیه را به حرکت خطی رفت‌وبرگشتی پیستون‌ها تبدیل می‌نماید. این فرآیند، به‌طور همزمان، توسط شیرهای یک‌طرفه مدیریت می‌شود که جریان سیال را هدایت و از برگشت آن جلوگیری می‌کنند (Al-Hassan & Hill, 1986). ترکیب این دو عنصریعنی "مبدل حرکت + کنترل جریان" همان معماری بنیادینی است که امروزه در قلب بسیاری از ماشین‌های صنعتی قرار دارد (Hill, 1991).

پل نظری به اتوماسیون صنعتی: از بازخورد تا کنترل فرایند

گزارش‌های جَزَری در مورد استفاده از حس گر سطح و مکانیزم‌های زمان‌سنجی در ساعت‌ها و فواره‌ها، با ساده‌ترین شکل کنترل بازخورد،[3] یعنی کنترل روشن/خاموش، مطابقت دارد (Mayr, 1970). تکامل تاریخی همین مفهوم بازخورد در متون کلاسیک تاریخ مهندسی کنترل به تفصیل ثبت شده است (Bennett, 1986). این چارچوب نظری توضیح می‌دهد که چرا ایده‌های مکانیکی جَزَری برای درک مفهومی از معماری مدرن سیستم‌های خودکار الهام‌بخش هستند (Hill, 1991; Al-Hassan & Hill, 1986).

کاربست‌های معاصر و صنایع ساخت: مثال‌های تطبیقی

اصول مهندسی به‌کاررفته در دستگاه‌های جَزَری، اگرچه در قالبی پیشاصنعتی و با اهدافی عمدتاً نمایشی یا کاربردی محدود طراحی شده بودند، اما از پایداری مفهومی برخوردارند که آن‌ها را در قیاس با فناوری‌های معاصر معنادار می‌سازد. برای نمونه، در خطوط مدرن بسته‌بندی و فرآوری مایعات، کنترل سطح مبتنی بر شناور همچنان به‌عنوان یک راه‌حل کنترل مستقیم، کم‌هزینه و بسیار مطمئن به‌کار می‌رود (Bennett, 1986). به‌طور همزمان، معماری مکانیکی کرنک–شاتون در ترکیب با شیرهای یک‌طرفه، هنوز هم شالوده‌ی مکانیکی بسیاری از پمپ‌ها و کمپرسورهای رفت‌وبرگشتی صنعتی را تشکیل می‌دهد (Ceccarelli, 2007). همچنین،

1. Event-Driven Automation
2. Motion Converter
3. Feedback Control

اصل توالی‌سازی مکانیکی جَزَری با بادامک (کَم) و درام‌های میخ‌دار محقق می‌ساخت، در ماشین‌آلاتی با سیکل‌های ثابت از ماشین‌های بافندگی قدیمی تا مکانیزم‌های تغذیه و برش در برخی خطوط تولید کماکان به‌عنوان یک «برنامه‌ریز مکانیکی» غیرالکترونیک مورد استفاده قرار می‌گیرد (Al-Hassan & Hill, 1986; Hill, 1991).

در عرصه‌ی پیشرفته‌تر، مانند کارخانه‌های خودروسازی مدرن، این منطق بنیادین توالی‌سازی و بازخورد دیگر نه با بادامک و اهرم، که با ربات‌های شش‌محوره، سروو درایوها و کنترلرهای دیجیتال[1] پیاده‌سازی می‌شود (Siciliano & Khatib, 2016). با این حال، ایده‌ی مرکزی سیستم، یعنی «تعریف یک توالی از کنش‌ها بر مبنای ورودی حس گرها و اجرای آن توسط عملگرها»، کمابیش همان است. این تشابه، درک ما را از تداوم مسائل مهندسی در طول تاریخ، صرف‌نظر از تغییر فناوری‌های پاسخگو، عمق می‌بخشد. تأکید نهایی این است که این مقایسه بر پایه‌ی هم‌ارزی مفهومی و تداوم مسائل مهندسی استوار است، نه یک تأثیر تاریخی مستقیم و زنجیره‌ای از جَزَری تا صنعت رباتیک امروز.

دربار اَرتُقی به عنوان محرک نوآوری مهندسی: پشتیبانی، قدرت و عملکرد

ما عمدتاً به منطق مکانیکی دستگاه‌های جَزَری می‌نگریم، اما برای درک واقعی کار او، لازم است آن را در بافت اجتماعی و فرهنگی دربار اَرتُقی در دیاربکر بررسی کنیم. اَرتُقیان (سده‌های ۱۱ تا ۱۵ میلادی)، سلسله‌ای ترکمان که بر منطقه‌ای مرزی و مورد مناقشه حکومت می‌کردند، به طور پیوسته برای کسب مشروعیت در برابر نیروهای مسلط‌تری مانند سلجوقیان و ایوبیان در رقابت بودند. در این بستر، پشتیبانی درباری از علم و مهندسی تنها برای نمایش نبود؛ بلکه ابزاری قدرتمند در عرصه سیاست نیز محسوب می‌شد. فرمانروای اَرتُقی، ناصر الدین محمود (حک. ۱۲۰۰–۱۲۲۲ میلادی)، با سفارش نگارش کتاب «الجامع بین العلم و العمل النافع فی صناعة الحیل» به جَزَری، در پی کسب «قدرت نرم» بود. دستگاه‌های تشریح‌شده در این رساله، به مثابه ابزارهای پیشرفته حکمرانی عمل می‌کردند. «ساعت فیل» و دیگر ساعت‌های آبی پیچیده، همچنین خدمتکاران خودکار، صرفاً اشیای حیرت‌آوری نبودند، بلکه اجزای مهمی از تشریفات درباری و وظایف دیپلماتیک محسوب می‌شدند. این ابزارها نشان می‌دادند که حاکم تنها بر قلمرو زمینی فرمانروایی نمی‌کند، بلکه بر زمان، نیروهای طبیعی و حتی بر پندار زندگی نیز مسلط است. این نمایش «عَجَب» (شگفتی) در دربارهای اسلامی دوره میانه، گونه‌ای شناخته‌شده از بیان سیاسی بود که برای حیرتزده کردن سفیران خارجی، تحت تأثیر قرار دادن نخبگان محلی و بیان تصویری حکمت و توانایی فناورانه حاکم – که از ویژگی‌های کلیدی حکمرانی عادلانه و کارآمد بود به کار می‌رفت. دستگاه‌های جَزَری صرفاً پاسخ‌های ابزاری به نیازهای عملی نبودند، بلکه در پیکربندی فرهنگی–نمایشی دربار آرتوقیان معنا می‌یافتند (al-Hassan & Hill, 1986). توصیف‌های تاریخی نشان می‌دهد که خودکارها، ساعت‌ها و فواره‌ها نقش نمایش اقتدار و ذوق فنی را برای شگفت‌زده کردن مهمانان بر عهده داشتند (Hill, 2019). این کارکرد نمایشی، پیشینه‌ای طولانی در سنت‌های پیشین مانند «عجایب

1. programmable logic controller (PLC)

معابد» یونانی دارد (Murphy, 1995). پرسیس برلکمپ[1](۲۰۱۱) نشان داده است که نمایش «عَجَب» در این مورد، فراتر از یک تئاتر سیاسی صرف بود؛ بلکه راهی برای نمایش شگفتی‌های پنهان جهان و همسو کردن دربار حاکم با یک نظم طبیعی مقدر الهی به شمار می‌رفت. پس، «نمایش» حاصل از دستگاه‌های خودکار جَزَری تنها برای نمایش نبود؛ بلکه دقیقاً دلیلی برای پیچیدگی عمدی در ساخت آن‌ها محسوب می‌شد. تقاضای فزایندهٔ دربار برای خلق شگفتی‌هایی حیرت‌انگیزتر و مکانیزم‌هایی پیچیده‌تر، مستقیماً محرک نوآوری در حوزهٔ طراحی مکانیکی، سامانه‌های هیدرولیک و منطق ترتیبی بود. برای مثال، نیاز به دستگاهی برای اعلام گذر زمان به شیوه‌ای تماشایی، به خلق ساختار یکپارچه «حسگر–محرک–توالی‌گذار» در ساعت فیل انجامید. به همین ترتیب، نیاز به پیکره‌های متحرک برای سرو نوشیدنی یا نواختن موسیقی، موجب توسعه محورهای بادامک قابل اطمینان و استوانه‌های میخ‌دار برنامه‌پذیر شد. این بستر نمایشی–آیینی، تأثیری شگرف بر «الگوی مهندسی»ای گذاشت که جَزَری طرح‌ریزی کرد. دستورالعملهای کارگاهی او به دلیل شرایط درباری که در آن یک دستگاه معیوب میتوانست به جای حیرت‌آور بودن، ضعف محسوب شود، با دقتی کمّی تنظیم شده است. در چنین فضایی، قابلیت اطمینان و ثبات عملکرد، به یک ابرقدرت عملکر تبدیل می‌شد. تأکید او بر ماژولاریتی و استفاده از قطعات استاندارد را می‌توان هم به عنوان یک مزیت مهندسی و هم رویکردی عملگرا برای حفظ و تکثیر این ابزار پیچیده درباری در نظر گرفت. از همین رو، کار جَزَری نمونه درخشان «علم سفارشی» است؛ جایی که نیاز به نمایش شکوه، مستقیماً به پیشرفت در مکانیک کاربردی و دانش مهندسی نظام‌مند منجر شد. این پیوند ناگسستنی، مرز میان کارگاه، دربار و صحنه نمایش قدرت را کمرنگ کرد (Hill, 1974; Işık, 2019).

تحلیل تطبیقی با سنت‌های غیراسلامی: جایگاه پارادایم مهندسی جَزَری

برای درک جایگاه دستاوردهای جَزَری در تاریخ گسترده‌تر فناوری و پرهیز از دیدگاه‌های قوم‌محور، انجام مقایسه‌ای تطبیقی با دیگر سنت‌های مهندسی پیشاصنعتی ضروری است. این مقایسه، وجود «تکامل همگرا» را برای یافتن راه‌حل‌هایی برای مسائل بنیادین، در کنار تضادهای آشکار در فلسفه و کاربرد مهندسی نشان می‌دهد. مدل تحلیلی مبتنی بر «تبدیل حرکت، بازخورد و توالی‌بندی» چارچوبی دقیق برای این مقایسهٔ فرافرهنگی فراهم می‌آورد. نخستین نمونه‌های دستگاه‌های خودکار و ماشین‌آلات در سنت هلنیستی[2]، به‌ویژه در نوشته‌های هرون اسکندری (فعال در حدود ۱۰ تا ۷۰ میلادی) یافت می‌شود. دستگاه‌های هرون، مانند درهای خودکار معابد و فواره‌های هوشمند، از سامانه‌های هیدرولیک و پنوماتیک استفاده می‌کردند. با این حال،

1. Persis Berlekamp

۲. (Hellenistic period) به دوره‌ای از تاریخ و فرهنگ یونانی اشاره دارد که پس از فتوحات اسکندر مقدونی (۳۲۳–۳۱ پیش از میلاد) آغاز شد و در طی آن دانش و فرهنگ یونانی در سراسر خاورمیانه، از جمله مراکز علمی مهمی مانند اسکندریه و انطاکیه، گسترش یافت. مهندسان و دانشمندان این سنت، مانند کِتسیبیوس، فیلون بیزانسی و هِرون اسکندرانی، پایه‌های مکانیک نظری و عملی (از جمله پنوماتیک و ساخت خودکارهای نمایشی) را بنا نهادند. آثار این سنت، چه به‌طور مستقیم و چه غیرمستقیم، تأثیر شگرفی بر تکوین سنت «حیل» در تمدن اسلامی گذاشت.

برخلاف جَزَری که بر قابلیت تولید مجدد و دستورالعمل‌های کارگاهی دقیق تأکید داشت، آثار هرون اغلب به عنوان مفاهیم نظری یا اشیای تجملی توصیف شده‌اند که فاقد جزئیات فنی لازم برای ساخت توسط صنعتگران هستند (Keyser & Irby-Massie, 2006).

در مقایسه با سنت مهندسی چین باستان، به‌ویژه اختراعات افرادی چون ژانگ هنگ [1](۷۸–۱۳۹ میلادی) در سلسلهٔ هان، شباهت‌هایی در استفاده از نیروی آب و چرخ‌دنده برای ساخت دستگاه‌های نجومی مانند «ساعت آبی و کره آسمان‌نما» دیده می‌شود. با این حال، تمرکز جَزَری بر مستندسازی فرآیند ساخت و استفاده از قطعات استانداردشده، رویکردی متمایز و نظام‌مند را در مقایسه با توصیف‌های غالباً شاعرانه و استعاری منابع چینی نشان می‌دهد (Needham, 1965).

آثار هرون از جمله «پنوماتیکا» و «دربارهٔ ساخت دستگاه‌های خودکار» شامل ماشین‌هایی می‌شود که به صورت متوالی حرکت کرده و از بخار، آب و وزنه‌های تعادل برای تبدیل انرژی به شکل‌های هوشمندانه بهره می‌برند. برای نمونه، تئاتر خودکار او از یک «چرخ برنامهٔ وزنه‌ای» متشکل از ده‌ها طناب و محور استفاده می‌کرد تا یک نمایش کامل را اجرا کند. این امر نشان‌دهندهٔ سطح پیچیدگی‌ای است که توالی‌بندی مکانیکی قادر به دستیابی به آن بوده است (Murphy, 1995). دستگاه آیولیپایل [2] او نیز نشان می‌دهد که چگونه از فشار بخار برای تولید حرکت دورانی می‌توان استفاده کرد.

با این حال، تمایز اصلی در هدف نهایی و شیوهٔ مستندسازی نهفته است. دستگاه‌های هرون بیشتر در جهت اثبات مفاهیم نظری و تحریک فکر افراد ساخته شده بودند، در حالی که کتاب جَزَری بیش‌تر به یک «راهنمای کارگاهی» شبیه است که می‌توان بارها به آن مراجعه کرد. هرون به توضیح رویدادها و ساختارها می‌پرداخت، اما جَزَری دستورالعمل‌های دقیق گام‌به‌گام برای مونتاژ قطعات همراه با مشخصات مواد اولیه و روش‌های عیب‌یابی ارائه می‌داد. این رویکرد، روشی نظام‌مندتر را در انتقال دانش فنی نشان می‌دهد که بیش‌تر به ساخت عملی توجه دارد تا صرفاً نمایش یا توصیف نظری.

در مقابل، سنت فناوری چین به مهندسی در ابعاد کلان و ابزارهای پیچیده نجومی توجه داشت. مهندسان دوره‌های هان (۲۰۶ ق.م – ۲۲۰ ب.م) و سونگ (۹۶۰–۱۲۷۹ ب.م) مانند ژانگ هنگ و سو سونگ، دستگاه‌های پیچیده‌ای مانند «ساعت نجومی» و «لرزه‌نگار» را توسعه دادند. ساعت آبی سو سونگ با ارتفاع ۱۲ متر، از یک زنجیرهٔ مکانیکی پیچیده با استفاده از چرخ‌دنده‌های فرار و مکانیزم فرار استفاده می‌کرد که از بسیاری از نمونه‌های معاصر اروپایی پیشرفته‌تر بود (Needham, 1965). اگرچه این دستگاه‌ها از نظر مقیاس و پیچیدگی قابل توجه بودند، اما مستندات برجای‌مانده از آنها اغلب فاقد جزئیات فنی دقیق برای بازسازی کامل است.

برج «کره سماوی و اربیله (اسطرلاب) آب‌محور» که توسط سو سونگ (۱۰۲۰–۱۱۰۱ میلادی) طراحی شد، نمونه درخشان دیگری است. این برج عظیم ساعت از یک مکانیزم «فرار» اولیه برای کنترل زمان‌بندی

1. Zhang Hong
2. Aeolipile

یک چرخ آب‌محور استفاده می‌کرد که آن را به روشی بسیار دقیق برای محاسبه زمان نجومی تبدیل می‌کرد (Needham, 1965). این راه‌حلی متفاوت اما قابل قیاس برای مسئلهٔ «زمان‌بندی هیدرولیک» است که جَزَری با سیستم‌های شناور–شیر–اوریفیس خود به آن دست یافت. دستگاه عظیم سو سونگ با بودجهٔ دولتی ساخته شد تا عموم مردم بتوانند از آن برای امور تقویم و ستاره‌بینی استفاده کنند. در مقابل، ساعت‌های جَزَری به عنوان ابزارهایی مستقل و درباری طراحی شده بودند که زمان‌سنجی و عملکرد نمایشی را در هم می‌آمیختند. علاوه بر این، مهارت چینی‌ها در به‌کارگیری دمنده‌های پیستونی دوطرفه برای تولید آهن از دوره هان، نشان می‌دهد که آنان نیز بر روی حرکت رفت و برگشتی مؤثر برای مصارف صنعتی کار می‌کرده‌اند. این مورد، با کاربرد اصول مشابه توسط جَزَری در پمپ دوطرفه خود برای انتقال آب، متفاوت است (Needham, 1965). این تحلیل تطبیقی دو پیامد مهم دارد:

نخست آنکه نشان می‌دهد مسائل اصلی مهندسی در همه جا یکسان است. نیاز به تبدیل حرکت، کنترل فرآیندها و خودکارسازی توالی‌ها، به صورت مستقل در فرهنگ‌های مختلف و با انگیزه‌ای ترکیبی از ضرورت‌های عملی، علایق فلسفی و خواست اشرافی پدیدار شد. پیامد دوم، تمایز در الگوی اندیشهٔ مهندسی است. آنچه سنتز جَزَری را متمایز می‌کند، گردآوری دانش عملی در قالب یک ساختار منسجم، استفاده از طراحی ماژولار برای قطعات، و تلفیق عملکرد دقیق فنی در یک سامانهٔ نمایشی حیرت‌انگیز بود. هدف این مقایسه نه تعیین تقدم تاریخی، بلکه نشان دادن این است که کار جَزَری، یک گره گسسته و منظم در شبکهٔ جهانی نوآوری‌های مکانیکی پیش از انقلاب صنعتی به شمار می‌رود.

بحث: جَزَری و صورت‌بندی یک پارادایم مهندسی پیشاصنعتی

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که دستگاه‌های جَزَری را نمی‌توان صرفاً به عنوان اوج سنت «حِیَل» درباری یا گردآوری‌ای منفرد از شگفتی‌های مکانیکی فهمید. بلکه، آنچه در کتاب *الجامع بین العلم و العمل النافع* شاهد آنیم، صورتبندی یک «پارادایم مهندسی» متمایز است که سه ویژگی بنیادین دارد:

۱) **جهان‌شمولی اصول پایه :**تحلیل ما نشان داد که اصولی مانند تبدیل حرکت، کنترل بازخورد و توالی‌سازی—که امروزه زیرساخت رباتیک و اتوماسیون هستند—در کار جَزَری نه به صورت تصادفی، که به شکلی نظام‌مند و کاربردی حاضرند. این همسانی مفهومی، از جهان‌شمولی مسائل مهندسی پایه (مانند چگونگی انتقال نیرو، کنترل یک فرآیند یا برنامه‌ریزی یک دنباله کنش) حکایت دارد. جَزَری این مسائل را در بستر فناوری و فرهنگی خودش پاسخ گفت، همان‌گونه که مهندسان رنسانس یا عصر صنعتی در بستر خود. این امر، تاریخ فناوری را نه به عنوان خطی از اکتشافات منفرد، بلکه به عنوان عرصه‌ای از «کشف مکرر» اصول پایه در بسترهای گوناگون نشان می‌دهد (Ceccarelli, 2007; Mayr, 1970).

۲) **دانش عملی در مقام نظریه:** رویکرد جَزَری در ارائه دستورالعمل‌های کارگاهی دقیق، حاکی از نوعی «نظریه پردازی از طریق عمل» است. متن او تنها به توصیف «چه چیزی» بسنده نکرده، بلکه

«چگونگی» بازتولید این دانش عملی را با تمام جزئیات فنی و ملاحظات اجرایی توضیح می‌دهد. این امر، مرز میان «علم» و «فن» در سنت او را کمرنگ می‌کند و نشان می‌دهد که چگونه دانش مهندسی نظام‌مند می‌تواند مستقل از فرمول‌بندی‌های نظری صرف، در قالب یک پروتکل تجربی–عملی تثبیت و انتقال یابد. این یافته، با دیدگاه‌های جدید در تاریخ علم که بر اهمیت «دانش عملی» و «فرهنگ کارگاهی» تأکید می‌ورزند، هم‌خوانی کامل دارد (Smith, 2004).

۳) **تلفیق کارکرد و نمایش:** اگرچه بعد نمایشی دستگاه‌های جَزَری انکارناپذیر است، اما تحلیل ما نشان می‌دهد که این نمایش، دشمن کارکرد نبوده، بلکه حامی آن بوده است. تقاضای دربار برای شگفتی‌آفرینی، محرکی برای مهندسی خلاقانه و پیچیده‌تر شدن سامانه‌ها بود. «ساعت فیل» تنها یک شیء تزئینی نیست؛ بلکه یک دستگاه کاربردی زمان‌سنج است که کارکرد خود را در پوششی نمایشی و پیچیده ارائه می‌کند. این تلفیق، ما را از یک دوگانه‌سازی ساده‌انگارانه که فناوری را صرفاً در خدمت نیازهای عملی یا صرفاً در خدمت تجمل می‌داند، فراتر می‌برد و نشان می‌دهد که چگونه بافتارهای فرهنگی می‌توانند به عنوان موتور محرک نوآوری فنی عمل کنند. در مقایسه با پژوهش‌های پیشین، این مقاله از کار هیل (۱۹۷۴، ۱۹۹۱) که پایه‌های فنی تحقیق حاضر را بنا نهاد، فراتر رفته است. ما با استخراج یک چارچوب تحلیلی یکپارچه (سه ایده تبدیل، بازخورد و توالی‌سازی)، ابزاری مفهومی برای درک نظام‌مند دستاورد جَزَری فراهم کرده‌ایم. این چارچوب، برخلاف روایت‌های پراکنده‌تر پیشین، امکان ردیابی تداوم مفاهیم مهندسی در طول تاریخ را فراهم می‌سازد. همچنین، تأکید ما بر «الهام مفهومی» در مقابل «تأثیر تاریخی مستقیم»—پاسخ محتاطانه‌ای است به پرسش دشوار تبادلات فناوری بین تمدن‌ها، و بر اهمیت تاریخ ایده‌ها در کنار تاریخ انتشارات تأکید می‌ورزد (Edgerton, 2007).

در مجموع، جَزَری را باید در جایگاه یک «نظریه‌پرداز عملی» دید که پارادایمی مهندسی را صورتبندی کرد که در آن، اصول مکانیکی جهان‌شمول، از طریق دانش نظام‌مند کارگاهی و در پاسخ به تقاضای یک بافتار فرهنگی خاص، به منصه ظهور رسیدند. این درک، نه تنها جایگاه او را در تاریخ فناوری اسلامی تثبیت می‌کند، بلکه الگویی برای بررسی سایر سنت‌های فناورانه پیشاصنعتی در یک چارچوب تحلیل مفهومی فراهم می‌آورد.

نتیجه‌گیری

بدیع‌الزمان جَزَری را می‌توان نماد بارز «مهندسی سازنده» در سنت پربار «حِیَل» دانست. اثر ماندگار او، کتاب الجامِعُ بَيْنَ العِلْمِ وَالعَمَلِ النَّافِعِ فِي صِنَاعَةِ الحِيَلِ ، با تلفیق دقیق اجزای مکانیکی، منطق ترکیب سازوکارها و دستورالعمل‌های ساخت گام‌به‌گام، تنها به خلق شگفتی‌های درباری بسنده نکرده، بلکه به سطحی از کارکرد مهندسی نظام‌مند ارتقا یافته است(al-Jazari, 1974; Hill, 1991) . این مقاله با استناد به متن اصلی و نگاره‌های نسخه خطی توپکاپی نشان داد که سه ایده بنیادین مهندسی تبدیل حرکت (با نمونه شاخص میل‌لنگ–شاتون)، منطق کنترل جریان و بازخورد ساده (با به‌کارگیری شناور سطح و ولو)، و توالی‌سازی

مکانیکی (با استفاده از بادامک و درام میخ‌دار) به‌شکلی کاربردی و مؤثر در دستگاه‌های او حضور دارند. این سه مؤلفه، با گذر از فاصله تاریخی و در قالب «الهام مفهومی»، با منطق حاکم بر رباتیک و اتوماسیون معاصر هم‌نوا می‌شوند(Hill, 1996; Al-Hassan & Hill, 1986).

در ارزیابی این دستاوردها، باید به دو محدودیت مهم توجه کرد: نخست، پیشینه برخی از این سازوکارها در سنت‌های پیشین؛ برای نمونه، کاربرد سازوکارهایی مشابه کرنک در آثار بنوموسی (Hill, 1991) و هرون اسکندرانی (Murphy, 1995) و نیز نمونه کهن آسیاب هیراپولیس[1] (Ritti et al., 2007). دوم، محدودیت‌های نسخه‌شناختی و کیفی بودن تحلیل حاضر که هرگونه ادعای کمّی دقیق را با چالش مواجه می‌سازد (al-Jazari, 1974) . بر این اساس، تأکید این مقاله بر «نخستین شرح کارگاهیِ کامل» و «تبیین همسانی مفهومی» است، نه بر «اولین بودن مطلق».

نمونه‌های برجسته‌ای همچون پمپ دوپیستونه مکشی–دهشی با شرح صریح مکانیزم میل‌لنگ–شاتون و ساعت‌های آبی مجهز به حسگر سطح گویای آن است که جَزَری صرفاً به فهرست کردن قطعات منفرد نپرداخته، بلکه به صورت‌بندی منطق سامانه‌ای و کهن‌الگویی برای معماری سنسور–عملگر–توالی‌ساز دست یافته است (Yassi, 2017; Hill, 1991). این مقاله بر تفکیک دقیق میان «شباهت‌های مفهومی–مکانیکی» و «تبارشناسی مستقیم تاریخی» تأکید می‌ورزد. اگرچه شواهد قطعی از انتقال مستقیم دانش جَزَری به اروپای متأخر اندک است، اما از منظر تاریخ ایده‌ها، هم‌ارزی سازوکارهای او با اصول مدرن اتوماسیون کاملاً معنادار است(Mayr, 1970; Bennett, 1986) .

بر این اساس، می‌توان سهم تاریخی جَزَری را پیش‌انگاره‌سازی سامانه‌ای[2] دانست که امروزه در قالب‌های بالیده خطوط تولید خودکار، ربات‌های صنعتی و سامانه‌های هوشمند اعلان متجلی شده است. خوانش حاضر، نه تنها جایگاه جَزَری را به‌عنوان مهندسی سازنده تثبیت می‌کند، بلکه چارچوبی برای بررسی تبادلات مفهومی در تاریخ فناوری ارائه می‌دهد.

1. Hierapolis
2. Systematic Prototyping

منابع

الجزری، بدیع‌الزمان ابوالعز اسماعیل بن رزاز. (۱۹۷۹). الجامع بین العلم والعمل النافع فی صناعة الحیل (تحقیق: أحمد یوسف الحسن). حلب: معهد التراث العلمی العربی، جامعة حلب.

کامیار، مریم و اسدی، زهره. (۱۴۰۲). سنت تصویری سازه‌های مهندسی در تمدن و هنر اسلامی. *پژوهش‌های علم و دین*، ۱۴(۲)، ۸۱–۹۹، doi: ۱۰.۳۰۴۶۵/srs.۲۰۲۴.۴۹۱۴۵.۲۱۵۶

نیک سرشت, ایرج و نظری, سعید. (۱۴۰۱). بررسی میزان تأثیرپذیری ابوالعز جزری (د. ۶۰۲ق/۱۲۰۵م) از ایده‌های بنی موسی بن شاکر (قرن ۳ق/۹م) در طراحی فواره‌های خودکار. تاریخ *علم*، ۲۰ (۱)، ۱۴۱۱۶۵، doi: ۱۰.۲۲۰۵۹/jihs.۲۰۲۲.۳۴۸۹۹۴.۳۷۱۷۰۴

Al-Hassan, A. Y., & Hill, D. R. (1986). *Islamic technology: An illustrated history*. Paris, France: UNESCO; Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Al-Jazari, Ismāʿīl ibn al-Razzāz. (1974). *The book of knowledge of ingenious mechanical devices (Kitāb fī maʿrifat al-ḥiyal al-handasiyya)* (D. R. Hill, Trans. & Ed.). Dordrecht, Netherlands: D. Reidel.

Bennett, S. (1986). *A history of control engineering, 1800–1930*. London, UK: Peter Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers.

Ceccarelli, M. (2007). *History of mechanism and machine science*. Berlin, Germany: Springer.

Dirik, M. (2023). The technical ingenuity of al-Jazari and its relevance to contemporary engineering and design. *Indonesian Journal of Islamic History and Culture*, 4(1), 24-42. https://doi.org/10.22373/ijihc.v4i1.2482

Edgerton, D. (2007). *The shock of the old: Technology and global history since 1900*. Oxford University Press.

Hill, D. R. (1991). Mechanical engineering in the medieval Near East. *Scientific American, 264*(5), 64–69.

Hill, D. R. (1996). Engineering. In R. Rashed (Ed.), *Encyclopedia of the history of Arabic science* (Vol. 3). London, UK: Routledge.

Hill, D. R. (2019). *Islamic science and engineering*. Edinburgh University Press.

Işık, F. S. (2019). *Byzantine Heritage Depicted: The Aqueduct of Valens in the Historical Topography of Istanbul* (Master's thesis, Middle East Technical University (Turkey)).

ISMI (Islamic Scientific Manuscripts Initiative). (n.d.). *Entry for Topkapı Sarayı, Ahmet III 3472 (al-Jāmiʿ bayn al-ʿilm wa-l-ʿamal…)*. Berlin, Germany: Max Planck Institute for the History of Science.

Keyser, P. T., & Irby-Massie, G. L. (2008). *Encyclopedia of ancient natural scientists: the Greek tradition and its many heirs*. Routledge.

Mayr, O. (1970). *The origins of feedback control*. Cambridge, MA: MIT Press.

Murphy, S. (1995). Heron of Alexandria's on automaton-making. *History of Technology*, *17*, 1-44.

Needham, J. (1974). *Science and civilisation in China* (Vol. 5). Cambridge University Press.

Rashed, R. (Ed.). (1996). *Encyclopedia of the History of Arabic Science* (Vol. 3, "Engineering," D. R. Hill). London: Routledge.

Ritti, T., Grewe, K., & Kessener, P. (2007). A relief of a water-powered stone saw mill on a sarcophagus at Hierapolis and its implications. *Journal of Roman Archaeology*, *20*, 139-163.

Romdhane, L., & Zeghloul, S. (2009). AL-JAZARI (1136–1206). In *Distinguished Figures in Mechanism and Machine Science: Their Contributions and Legacies, Part 2* (pp. 1-21). Dordrecht: Springer Netherlands.

Rosheim, M. E. (1994). Robot evolution: the development of anthrobotics.

Sharkey, N. (2007). I ropebot. *New Scientist*, *195*(2611), 32-35.

Siciliano, B., Khatib, O., & Kröger, T. (Eds.). (2008). *Springer handbook of robotics* (Vol. 200, p. 1). Berlin: springer.

Smith, P. H. (2024). *The body of the artisan: Art and experience in the scientific revolution*. University of Chicago Press.

Topkapi Palace Museum Library. (n.d.).** *MS A.III 3472 (Ahmed III 3472) [Manuscript].* Istanbul, Turkey.

Woodcroft, B. (Ed.). (1851). *The pneumatics of Hero of Alexandria: From the original Greek*. Charles Whittingham.

Yassi, Y. (2017). Al-Jazari's Water Clocks: An Archaeological Reconstruction and Comparative Analysis of the Peacock Clock and the Dragon Clock. *Nuncius*, *32*(1), 1-24.