

Post-decarbonizzazione e Intelligenza Artificiale Generativa. Verso una possibile metodologia operativa

Just Accepted: December 20, 2024 Published: July 25, 2025

SAGGI E PUNTI
DI VISTA/
ESSAYS AND
VIEWPOINT

Angelo Figliola¹, <https://orcid.org/0000-0001-8862-6582>

Maurizio Barberio², <https://orcid.org/0000-0001-8714-5306>

¹ Dipartimento di Pianificazione, Design, Tecnologia dell'Architettura, La Sapienza Università di Roma, Italia

² Dipartimento di Meccanica, Matematica e Management, Politecnico di Bari, Italia

angelo.figliola@uniroma1.it
maurizio.barberio@poliba.it

Abstract. La recente introduzione degli strumenti di Intelligenza Artificiale Generativa nella progettazione architettonica ha aperto al contempo nuove possibilità e sollevato interrogativi riguardo al loro uso appropriato in processi progettuali olistici, come quelli legati alla progettazione ambientale. In un contesto di post-decarbonizzazione, dove l'obiettivo è ridurre drasticamente le emissioni di CO₂ e promuovere pratiche rigenerative, è necessario evitare l'adozione acritica di questi strumenti. Pertanto, il contributo propone una metodologia operativa che integra tali strumenti all'interno del *Sustainable-Aided Design*, un approccio olistico che mira a colmare il divario tra progettazione architettonica e progettazione ambientale fin dalla fase *early stage* della progettazione.

Parole chiave: *Generative artificial intelligence; Sustainable-Aided Design; Data-Driven; Decarbonization; Methodology.*

Introduzione

Il settore delle costruzioni (AEC) nella sua intera filiera, dalla progettazione alla costruzione, è responsabile di una quota rilevante delle emissioni globali di anidride carbonica contribuendo in maniera significativa al cambiamento climatico antropogenico (Yahaya *et al.*, 2022). All'interno di questo scenario, sono state definite nuove politiche comunitarie europee per la decarbonizzazione, tra le quali la recente approvazione della direttiva sulla prestazione energetica nell'edilizia (EPBD), il *Green Deal europeo* e il *Fit for 55* che mirano a ridurre le emissioni di gas serra del 55% entro il 2030. Per quanto riguarda la Progettazione Ambientale (PA) uno degli obiettivi principali consiste nel ridurre l'impatto ambientale attraverso un approccio *performance-based* fin dalle prime fasi del processo progettuale, grazie all'interoperabilità dei software che consentono di effettuare analisi appropriate nelle diverse fasi progettuali. A riguardo, è neces-

sario che i progettisti dispongano di strumenti adeguati a supportarli nelle scelte, in particolare nella fase *early-stage* della progettazione, sin dall'elaborazione del concept, in quanto questa fase del processo progettuale ha un'influenza significativa sulla decarbonizzazione del patrimonio. I recenti progressi tecnologici hanno accelerato in modo significativo lo sviluppo di diversi strumenti di Intelligenza Artificiale (AI) trasformando profondamente un'ampia gamma di discipline, tra cui l'architettura. Conversare con l'AI, generare immagini da prompt testuali utilizzando reti neurali e modelli predittivi: questa abbondanza tecnologica segna la nuova frontiera delle professioni creative e tecniche creando uno step ulteriore rispetto ai processi computazionali *data-driven* e *performance-based*, oramai realtà consolidate nell'ambito della PA. L'abbondanza tecnologica, da un lato favorisce la creatività promuovendo un approccio transdisciplinare e olistico, mentre dall'altro potrebbe fornire soluzioni efficaci a questioni spinose legate alla transizione digitale ed ecologica. È quindi fondamentale indagare la possibilità di impiegare tali strumenti nella fase *early-stage* della progettazione e valutare la loro efficacia nell'ambito della *Sustainable-Aided Design* (SADE). A riguardo, il saggio esamina le potenzialità e le sfide dell'impiego di recenti strumenti di *Generative Artificial Intelligence* (GenAI), come chatbot e *text-to-image*, nel contesto della SADE, con l'intento di fornire una metodologia operativa e una valutazione critica della loro applicabilità nell'affrontare questioni concrete come la decarbonizzazione.

Post-decarbonisation and Generative Artificial Intelligence. Towards a possible methodology

Abstract. The recent introduction of Generative Artificial Intelligence tools in architectural design has simultaneously opened new possibilities and raised questions about their appropriate use in holistic design processes, such as those related to environmental design. Avoiding the uncritical adoption of these tools is essential in a post-decarbonisation context, where the goal is to drastically reduce CO₂ emissions and promote regenerative practices. Therefore, this paper proposes an operational methodology that integrates such tools within Sustainable-Aided Design, a holistic approach aimed at bridging the gap between architectural design and environmental design from the ultra-early stage of the design process.

Keywords: *Generative artificial intelligence; Sustainable-Aided Design; Data-Driven; Decarbonisation; Methodology.*

Introduction

The entire supply chain of the construction sector (AEC), from design to construction, is responsible for a significant share of global carbon dioxide emissions, contributing substantially to anthropogenic climate change (Yahaya *et al.*, 2022). New community policies for decarbonisation have been defined within this scenario, including the recent approval of the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), the European Green Deal, and the Fit for 55 packages, which aims to reduce greenhouse gas emissions by 55% by 2030. Regarding Environmental Design (ED), one of the main approaches consists in reducing environmental impact through a performance-based approach from the early stages of the design process thanks to the interoperability of software that allows for appropriate analy-

ses at different design phases. In this regard, designers need adequate tools to support their choices, particularly in the early stage design phase from concept development onwards, as these have a significant influence on decarbonisation of built heritage. Recent technological advancements have significantly accelerated the development of various Artificial Intelligence (AI) tools, profoundly transforming a wide range of disciplines, including architecture. Conversing with AI, generating images from textual prompts using neural networks, and training predictive models: this technological abundance marks the new frontier of creative professions, defining a further step beyond the data-driven and performance-based computational processes that now represent established realities in the field of ED. This technological abundance fosters crea-

AI per la post-decarbonizzazione

L'AI è una tecnologia emergente basata sull'impiego di algoritmi e istruzioni automatizzate, che simulano i processi di apprendimento e processo decisionale del cervello umano. Metodi e strumenti correlati con l'AI sono diventati parte integrante delle tecnologie digitali impiegate per la progettazione di architetture sostenibili e resilienti (Ferrante and Romagnoli, 2023). Il termine generico AI ingloba un'ampia gamma di tecnologie con un grado di complessità crescente, tra le quali troviamo il *Machine Learning* (ML), algoritmi con capacità di autoapprendimento senza una programmazione specifica, *Deep Learning* (DL), *Reinforcement Learning* (RL) e di reti neurali convoluzionali (CNN) ovvero di algoritmi che impiegano reti neurali artificiali per adattarsi e apprendere da vaste quantità di dati senza istruzioni specifiche (Vissers-Similon *et al.*, 2024). Algoritmi di ML vengono attualmente impiegati per integrare la progettazione architettonica, a diverse scale, e l'analisi delle prestazioni ambientali, sfruttando la capacità degli stessi di analizzare una vasta quantità di dati e utilizzare questi ultimi per predire le prestazioni evitando processi di simulazione complessi e *time-consuming* (Galanos, 2019) aprendo, di fatto, alla democratizzazione dei processi *data-driven* e *performance-based*. Attualmente sono presenti innumerevoli soluzioni sul mercato che permettono di esplorare diverse varianti progettuali, grazie all'integrazione con i principali software di modellazione tridimensionale in commercio, per poi compararle sulla base di *Key Performance Indicators* (KPI) specifici definiti dal progettista. Processi di ML vengono utilizzati per valutare in maniera speditiva benchmark progettuali quali *daylighting*, radiazione solare, consumi energetici, comfort

tivity by promoting a transdisciplinary and holistic approach. It could also provide effective solutions to thorny issues related to digital and ecological transition. It is, therefore, crucial to investigate the possibility of employing such tools in the early stage design phase, and to evaluate their effectiveness in the context of Sustainable-Aided Design (SADE). In this regard, the paper examines the potential and challenges of using recent Generative Artificial Intelligence (GenAI) tools, such as chatbots and text-to-image, in the context of SADE, to provide an operational methodology and a critical evaluation of their applicability in addressing concrete issues such as decarbonisation of built heritage.

AI for post-decarbonisation

AI is an emerging technology based on algorithms – automated instructions

– that simulate the learning and decision-making processes of the human brain. Methods and tools related to AI have become an integral part of the digital technologies used for designing sustainable and resilient architectures (Ferrante and Romagnoli, 2023). The general term AI encompasses a wide range of technologies with increasing complexity, including Machine Learning (ML), algorithms with self-learning capabilities without specific programming, Deep Learning (DL), Reinforcement Learning (RL), and Convolutional Neural Networks (CNN), which use artificial neural networks to adapt and learn from vast amounts of data without explicit instructions (Vissers-Similon *et al.*, 2024). ML algorithms are currently being used to integrate architectural design at various scales, and to analyse environmental performance, leveraging their ability to analyse large

outdoor, al variare dei parametri che descrivono una specifica soluzione progettuale (Płoszaj-Mazurek and Rynska, 2024). Alla base di tali processi c'è un modello digitale parametrico attraverso cui generare le varianti da esplorare e quindi un controllo del progettista per quello che concerne layout funzionale, geometria e materiali. L'integrazione di DL e RL nella progettazione architettonica offre vantaggi significativi nell'ottimizzazione dell'efficienza energetica degli edifici. Attraverso la generazione automatica e la simulazione di diversi layout progettuali uniti alla valutazione delle prestazioni, è possibile esplorare diverse soluzioni al fine di selezionare quella in grado di ottimizzare l'efficienza energetica senza aumentare i costi di costruzione (Karimi *et al.*, 2024). L'impiego estensivo di algoritmi di DL su vaste quantità di dati multimodali è alla base dello sviluppo dei *Large Language Models* (LLM), ampiamente utilizzati in diversi ambiti professionali e di ricerca (Rane, 2023), e della GenAI. I LLM sono alla base dello sviluppo di software commerciali come ChatGPT e Gemini, garantendo il funzionamento di varie applicazioni di elaborazione del linguaggio naturale. Numerose ricerche impiegano tali modelli per espletare una serie di operazioni volte all'automazione dei processi e a coadiuvare il *data-driven decision-making* quali: interrogazione ed esplorazione di dataset e database esterni, strutturazione di dati e generazione di parametri attraverso apposite funzioni. A differenza dei LLM, la GenAI impiega modelli di DL in grado di creare autonomamente contenuti originali su richiesta, come testi, immagini, video, audio o codice software, in risposta al prompt o alla richiesta di un utente. Tale tecnologia è alla base dello sviluppo di *software* quali *Midjourney*, *DALL-E*, *Adobe Firefly*, *Flux* (Krea.ai) e *ComfyUI*, che permettono di generare im-

amounts of data and use them to predict performance, thus avoiding complex and time-consuming simulation processes (Galanos, 2019). This effectively democratises data-driven and performance-based processes. There are currently numerous solutions on the market, which allow the exploration of different design variants through integration with major 3D modelling software, and comparison based on specific Key Performance Indicators (KPIs) defined by the designer. ML processes are used to quickly evaluate design benchmarks such as daylighting, solar radiation, energy consumption, and outdoor comfort, varying the parameters that describe a specific design solution (Płoszaj-Mazurek and Rynska, 2024). These processes are underpinned by a parametric digital model through which design variants are generated, providing the designer

control over functional layout, geometry, and materials. The integration of DL and RL in architectural design offers significant advantages in optimising the energy efficiency of buildings. Automatic generation and simulation of various design layouts combined with performance evaluation allow to explore different solutions to select the one that optimises energy efficiency without increasing construction costs (Karimi *et al.*, 2024). The extensive use of DL algorithms on vast amounts of multimodal data underpins the development of Large Language Models (LLMs), which are widely used in various professional and research fields (Rane, 2023), and GenAI. LLMs are crucial for the development of commercial software like ChatGPT and Gemini, powering various natural language processing applications. Numerous studies employ these models

magini da prompt testuali. L'introduzione della GenAI nel *conceptual design* consente di esplorare soluzioni innovative, supportare decisioni informate con simulazioni e analisi predittive e automatizzare compiti ripetitivi, lasciando più spazio alla fase ideativa e configurandosi come strumento fondamentale per raggiungere la neutralità climatica (Choi and Yoon, 2024). Inoltre, la capacità dell'AI di analizzare e aggregare dati complessi facilita l'ideazione di progetti che integrano diverse esigenze funzionali favorendo la collaborazione multidisciplinare e alimentando l'intelligenza collettiva con apprendimento continuo (Guarini *et al.*, 2024). Ciò garantisce che i progetti siano co-creati e rispondano alle esigenze di tutte le figure coinvolte. A riguardo, l'AI può facilitare la co-creazione di progetti pilota attraverso appalti innovativi e piattaforme di apprendimento collaborativo, promuovendo la collaborazione tra enti pubblici, privati e comunità locali.

GenAI per la progettazione architettonica

Esaminando la recente ricerca in ambito accademico e professionale, è possibile affermare che l'integrazione della GenAI nei processi di progettazione architettonica possiede un potenziale per lo più inesplorato in grado di impattare in modo deciso la pratica architettonica. Il suo utilizzo come strumento di assistenza alla progettazione la trasforma in una forma di "*augmented intelligence*", potenziando le capacità degli architetti di indagare nuovi concept progettuali. Inoltre, la capacità dell'AI di generare in modo semi-autonomo metaprogetti architettonici determina nuove opportunità per innovare il processo creativo, stimolando di conseguenza il dibattito critico all'interno della disciplina (del Campo and Leach,

2022). Prima dell'avvento della GenAI, i progettisti hanno utilizzato tecniche di AI per districarsi tra requisiti variabili e potenziali soluzioni differenti, favorendo creatività e innovazione. Con l'introduzione di tecniche di AI generativa, come *text-to-image* e *text-to-3D*, si è verificato un cambiamento di paradigma nel design architettonico: queste tecnologie permettono un approccio altamente esplorativo, superando per certi versi la progettazione computazionale generativa tradizionale. La GenAI introduce infatti una maggiore componente di casualità nella risposta agli input del progettista, che può portare a risultati inattesi e innovativi, aggiungendo un livello di imprevedibilità al processo creativo. Ricerche come quella di Matias del Campo sulla *Neural Architecture* (del Campo, 2022) sottolineano il potenziale che è possibile esplicitare unendo la pratica architettonica tradizionale con i progressi dell'AI, favorendo un'interazione dinamica tra materialità ed espressione simbolica, accentuata dall'utilizzo di istruzioni testuali come strumento progettuale. Questa convergenza permette agli architetti di interrogare l'AI come strumento di progettazione, ampliando il campo delle possibilità pur mantenendo i valori umanistici essenziali per il progresso della disciplina architettonica. Abbracciando l'AI nel *conceptual design*, gli architetti possono sfruttare la potenza computazionale per generare design maggiormente intricati, ottimizzare le configurazioni spaziali e semplificare processi complessi, migliorando sia gli aspetti estetici che funzionali dei progetti. Inoltre, questo sforzo interdisciplinare, spinge i confini del design e stimola una riflessione critica sulla relazione in evoluzione tra tecnologia, cultura ed etica nell'ambiente costruito. Combinando creatività ed efficienza algoritmica, l'AI può fornire al progettista molti strumenti utili per il processo di progetta-

to perform a range of operations aimed at automating processes and supporting data-driven decision-making, such as querying and exploring datasets and external databases, structuring unstructured data, and generating parameters through specific functions. Unlike LLMs, GenAI uses DL models capable of autonomously creating original content on demand, such as text, images, videos, audio, or software code, in response to a user's prompt or request. This technology is at the core of software development like Midjourney, DALL-E, Adobe Firefly, Flux (Krea.ai), and ComfyUI, which allow the generation of images from textual prompts. The introduction of GenAI in conceptual design allows the exploration of innovative solutions, supports informed decisions with simulations and predictive analysis, and automates repetitive tasks, leaving more space

for the ideation phase, configuring itself as a fundamental tool to achieve climate neutrality (Choi and Yoon, 2024). Furthermore, the ability of AI to analyse and aggregate complex data facilitates the conception of projects that integrate different functional needs, favouring multidisciplinary collaboration and fuelling collective intelligence with continuous learning (Guarini *et al.*, 2024). This ensures that projects are co-created and respond to the needs of all the figures involved. In this regard, AI can facilitate the co-creation of pilot projects through innovative procurement and collaborative learning platforms, promoting collaboration between public and private entities and local communities.

GenAI for Architectural Design

Recent academic and professional research suggests that integrating GenAI

into architectural design processes has a largely unexplored potential to significantly impact architectural practice. Its use as a design assistance tool transforms it into a form of "*augmented intelligence*", enhancing architects' abilities to investigate new design concepts. Moreover, AI's capacity to semi-autonomously generate architectural meta-projects creates new opportunities to innovate the creative process, stimulating critical debate within the discipline (del Campo and Leach, 2022). Before the advent of GenAI, designers used AI techniques to navigate variable requirements and different potential solutions, fostering creativity and innovation. With the introduction of generative AI techniques, such as *text-to-image* and *text-to-3D*, a paradigm shift has occurred in architectural design. These technologies allow for a highly exploratory approach, in some ways surpassing

traditional generative computational design. GenAI introduces a greater element of randomness in responding to the designer's inputs, which can lead to unexpected and innovative results, adding a level of unpredictability to the creative process. Research such as Matias del Campo's on *Neural Architecture* (del Campo, 2022) highlights the potential of combining traditional architectural practice with AI advancements, fostering a dynamic interaction between materiality and symbolic expression, enhanced using textual instructions as a design tool. This convergence allows architects to interrogate AI as a design tool, expanding the field of possibilities while maintaining the humanistic values essential for the progress of the architectural discipline. By embracing AI in conceptual design, architects can harness computational power to generate more intricate de-

zione (Fig. 1): partendo da un processo di *text-to-image*, è possibile successivamente creare modelli tridimensionali attraverso tecniche tradizionali, modellando manualmente forme che riproducono il concept sviluppato dall'intelligenza artificiale. D'altro canto, quando le tecniche di *text-to-image* vengono integrate in un processo progettuale basato su modellazione parametrica, la GenAI può essere impiegata per facilitare la visualizzazione architettonica. Questo consente una valutazione più rapida ed efficiente dell'impatto architettonico di diverse soluzioni progettuali all'interno del contesto di riferimento. Tuttavia, è importante sottolineare che l'avvento della GenAI presenta sia opportunità che sfide per il design sostenibile. Da un lato, la GenAI permette di generare concept progettuali in modo più rapido e con minor sforzo. Dall'altro lato, è importante sottolineare che attualmente non sono stati sviluppati processi o strumenti capaci di generare progetti intrinsecamente sostenibili utilizzando la GenAI a partire da semplici istruzioni testuali. Di conseguenza, l'uso della GenAI potrebbe complicare l'integrazione di pratiche di progettazione sostenibile snelle nella prassi progettuale corrente, come quelle proposte dal metodo SADE.

Sustainable Aided Design (SADE)

SADE è una metodologia di progettazione ambientale orientata alla "tutela", con l'obiettivo di ridurre, sin dalla fase *early-stage*, il tasso di fallimento di una proposta progettuale attraverso un uso efficiente delle risorse energetiche e materiali, e di aumentare la probabilità di integrazione del progetto nel contesto specifico. Il framework su cui si basa la metodologia SADE comprende diverse fasi chiave. Inizialmente, si procede con l'analisi dei requisiti progettuali e la

definizione dei KPI. Successivamente, si conduce un'analisi climatica preliminare, accompagnata dalla creazione di scenari climatici futuri, utili per ispirare e orientare le scelte progettuali iniziali. Un'altra fase fondamentale è l'analisi delle architetture vernacolari, volta a estrarre i principi che le caratterizzano. Dopo aver raccolto i dati preliminari, si passa a un'analisi critica dei risultati, che porta all'identificazione dei KPI correlati alla funzione dell'edificio. In questa fase, si sviluppano anche ipotesi meta-progettuali attraverso la creazione di concept 2D e 3D semplificati, tenendo in considerazione il diagramma psicrometrico e le principali strategie passive. I concept progettuali vengono quindi valutati utilizzando software parametrici, con un focus particolare sulla sostenibilità ambientale del progetto in relazione agli scenari climatici attuali e futuri, mediante un approccio *data-driven* e *performance-based*. Infine, il metaprogetto selezionato viene ulteriormente sviluppato qualificando gli aspetti tecnologici e dei materiali. Eventualmente, si procede anche al perfezionamento degli aspetti progettuali, ambientali e tecnologici. La progettazione basata su principi rigenerativi pone solide basi nello sviluppo del concept e nella lettura critica del contesto ambientale e socioculturale presente e futuro. Pertanto, è fondamentale adottare strumenti di analisi delle prestazioni integrati in software di modellazione tridimensionale per avere il pieno controllo del processo e utilizzare efficacemente le analisi come guida nello sviluppo del concept per aumentare sia le prestazioni quantitative che qualitative. A riguardo, le dirompenti innovazioni tecnologiche come la GenAI e LLM richiedono lo studio di nuove metodologie per garantire che le proposte progettuali generate attraverso quest'ultime rispondano ai principi di SADE.

signs, optimise spatial configurations, and simplify complex processes, improving both aesthetic and functional aspects of architectural projects. Furthermore, this interdisciplinary effort pushes the boundaries of design and stimulates critical reflection on the evolving relationship between technology, culture, and ethics in the built environment. Combining creativity and algorithmic efficiency, AI can provide the designer with many useful tools for the design process (Fig. 1). Indeed, starting from a text-to-image process, it is subsequently possible to create three-dimensional models by using traditional techniques, manually modelling shapes that reproduce the concept developed by AI. Conversely, when text-to-image techniques are integrated into a design process based on parametric modelling, GenAI can be used to facilitate architectural visualisation. This

allows for a quicker and more efficient evaluation of the architectural impact of different design solutions within the reference context. However, it must be said that the advent of GenAI presents both opportunities and challenges for sustainable design. While GenAI allows for faster and less effortful generation of design concepts, it is important to note that currently, neither processes nor tools have been developed capable of generating inherently sustainable projects using GenAI from simple textual instructions. Consequently, the use of GenAI could complicate the integration of lean sustainable design practices into current design practices, such as those proposed by the SADE methodology.

Sustainable Aided Design (SADE)

SADE is an environmentally oriented design methodology focused on "protection" to reduce, from the early-stage

phase, the failure rate of a design proposal through the efficient use of energy and material resources, and by increasing the likelihood of the project's integration into the specific context. The framework on which the SADE methodology is based comprises several key phases. Initially, the process begins with the analysis of design requirements and the definition of KPIs. Then, a preliminary climate analysis is conducted, accompanied by the creation of future climate scenarios to inspire and guide early design choices. Another fundamental phase is the analysis of vernacular architectures aimed at extracting the principles that characterise them. After collecting the preliminary data, a critical analysis of the results is carried out, leading to the identification of KPIs related to the building's function. In this phase, meta-design hypotheses are also developed through the creation

of simplified 2D and 3D concepts, considering the psychrometric chart and the main passive strategies. The design concepts are then evaluated using parametric software, with particular focus on the project's environmental sustainability concerning current and future climate scenarios through a data-driven and performance-based approach. Finally, the selected meta-project is further developed, qualifying the technological and material aspects. The design, environmental, and technological aspects are also refined, if necessary. Design based on regenerative principles lays a solid foundation for both concept development and critical reading of the present and future environmental and sociocultural context. Therefore, it is essential to adopt performance analysis tools integrated into three-dimensional modelling software to have full control over the process and effectively use the

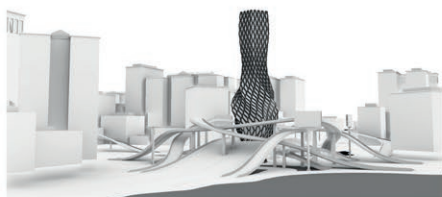
Text Prompt

Prompt: "Create a sustainable residential building for a triangular plot in **Athens, Greece**. The building should blend traditional Athenian architecture with modern sustainability practices. Optimize the building's shape for the plot and ensure it maximizes natural light and ventilation. Use local materials like stone, wood, and clay for the facades. Balance the windows-to-wall ratio to enhance energy efficiency. Integrate shading devices like deep overhangs, pergolas, and shutters to protect against the sun. Include extensive green roofs, vertical gardens, and terraces with Mediterranean plants to provide insulation and enhance biodiversity. Orient the building to optimize sunlight exposure and natural cooling. Design for natural ventilation with operable windows and ventilation shafts. Adapt the design to future climate scenarios to ensure long-term resilience and sustainability."



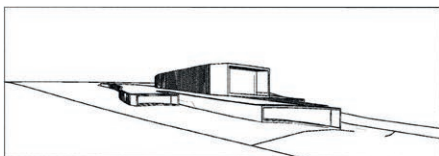
text-to-image

3D model



3D model-to-image

Sketch



sketch-to-render

Image



image-to-3D

analyses as a guide in concept development to enhance both quantitative and qualitative performance. In this regard, disruptive technological innovations such as GenAI and LLMs require the study of new methodologies to ensure that design proposals generated

through them adhere to the principles of SADE.

GenAI and SADE: a possible methodology

Considering the above, this paper proposes a methodology within the SADE

framework that employs tools based on GenAI and LLMs, such as chatbots and text-to-image technologies. Specifically, software like Midjourney V.6 and DALL-E can be used to generate images from textual prompts. At the same time, ChatGPT 4.0, as an LLM, allows

for uploading and analysing external files and directly generating images using DALL-E technology. The combination of GenAI and LLM aims to create a correlation between site-specific climate analysis and the generation of concepts from textual prompts, acquir-

GenAI e SADE: una possibile metodologia operativa

ols basati su GenAI e LLMs come chatbot e tecnologie *text-to-image*. Nello specifico, software come *Midjourney V.6* e *DALL-E* possono essere impiegati per generare immagini da prompt testuali, mentre *ChatGPT 4.0* come LLM in quanto consente di caricare e analizzare file esterni e generare direttamente immagini utilizzando la tecnologia *DALL-E*. La combinazione tra GenAI e LLM è volta a creare una correlazione tra l'analisi climatica *site-specific* e la produzione di concept da prompt testuali acquisendo istruzioni specifiche necessarie ad informare le diverse soluzioni progettuali. In tal modo è possibile fondere dati qualitativi con parametri quantitativi concentrandosi in particolare su strategie passive per le quali le scelte fatte nella fase ultra-iniziale della progettazione sono fondamentali. Per addestrare l'IA su dati climatici specifici è possibile configurare un chatbot personalizzato, basato su *ChatGPT 4*, al fine di leggere e analizzare i dati ambientali dai file climatici, fornire indicazioni per migliorare la resilienza climatica e ottimizzare le prestazioni, creare immagini e concept progettuali *site-specific* a partire da prompt, analizzare le immagini generate dall'IA per ulteriori approfondimenti contestuali. A riguardo, risulta fondamentale categorizzare domande/istruzioni specifiche che un progettista potrebbe porre quando stabilisce una relazione

tra il progetto e le condizioni climatiche del sito durante la fase iniziale della progettazione. Le istruzioni testuali fornite dai *chatbot* possono essere trasformate in prompt da utilizzare nel processo *text-to-image*, per elaborare un concept progettuale basato sulle immagini (Fig. 2). Utilizzando la modellazione 3D tradizionale e anche tecnologie avanzate di *Text-to-3D*, possono essere creati 3D volumetrici concettuali per stabilire una corrispondenza tra i suggerimenti testuali e le immagini generate dal software. Il processo metodologico, descritto nella Fig. 3, riassume i passaggi dalla generazione fino alla valutazione dei concept generati tramite GenAI e LLM. Il primo step consiste nella configurazione e training del *chatbot*, seguito dall'analisi dei file climatici (*EnergyPlus EPW*) per i siti pilota, sia attuali che proiettati per gli anni 2030, 2050 e 2080. Questo passaggio è essenziale per identificare le potenziali sfide climatiche e valutare l'impatto sulle prestazioni dell'edificio. Successivamente, si procede con la valutazione del sito progettuale e del contesto urbano attraverso un'analisi delle immagini, che permette di estrarre informazioni specifiche del sito, fondamentali per lo sviluppo del concept progettuale. A questo punto, vengono definiti i criteri di progettazione sostenibile in relazione ai dati climatici e al contesto urbano, considerando fattori come l'orientamento ottimale, il rapporto *glazing-to-wall* (WWR), la forma dell'edificio, i dispositivi di ombreggiatura, *nature-based solutions* e l'integrazione delle fonti energetiche rinnovabili. In seguito, si integrano le caratteristiche geometriche e le strategie

02 |

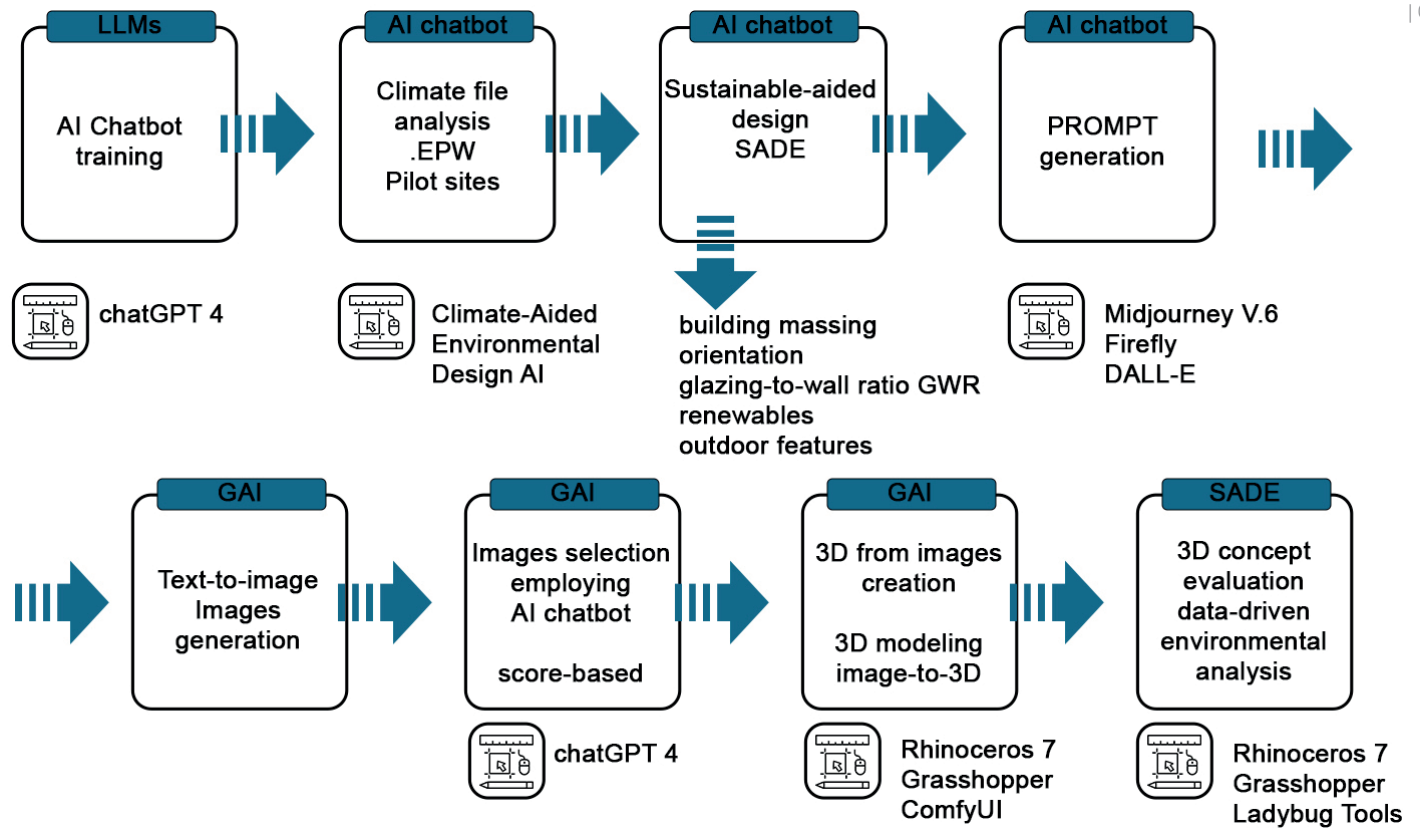


Text-to-image - Midjourney

Prompt: "Create a modern, sustainable residential building for the Eiranpuisto site in Helsinki. The design should include large south-facing windows with shading devices, moderate north-facing windows with high-performance glazing, and minimal east and west-facing windows with internal and vertical shading devices. Incorporate green roofs, green walls, courtyards, solar panels, and permeable surfaces. The building should be oriented along a north-south axis and feature extensive landscaping."

Text-to-image - Midjourney

Prompt: "Create a sustainable residential building for a triangular plot in Athens, Greece. The building should blend traditional Athenian architecture with modern sustainability practices. Optimize the building's shape for the plot and ensure it maximizes natural light and ventilation. Use local materials like stone, wood, and clay for the facades. Balance the windows-to-wall ratio to enhance energy efficiency. Integrate shading devices like deep overhangs, pergolas, and shutters to protect against the sun. Include extensive green roofs, vertical gardens, and terraces with Mediterranean plants to provide insulation and enhance biodiversity. Orient the building to optimize sunlight exposure and natural cooling. Design for natural ventilation with operable windows and ventilation shafts. Adapt the design to future climate scenarios to ensure long-term resilience and sustainability."



passive nel progetto. I dati raccolti e le analisi svolte vengono utilizzati per generare prompt testuali da impiegare nella creazione di immagini in *Midjourney* e *DALL-E*. Ogni immagine generata da prompt viene poi valutata in base ai criteri di progettazione sostenibile precedentemente definiti, assegnando un punteggio su una scala da 1 a 10 per ciascun criterio. Le imma-

gini migliori, selezionate in base allo score ottenuto, vengono trasformate in modelli 3D utilizzando tecniche di modellazione convenzionali e avanzate come l'*image-to-3D*. I modelli 3D vengono inseriti nel contesto e ulteriormente valutati dal chatbot AI per selezionare le due migliori opzioni, che verranno analizzate attraverso un processo *data-driven* (Fig. 4). Infine, si ese-

ing the specific instructions needed to inform various design solutions. It is thus possible to merge qualitative data with quantitative parameters, focusing particularly on passive strategies for which choices made in the ultra-early design phase are crucial. To train AI on specific climate data, a custom chatbot, based on ChatGPT 4, can be configured to read and analyse environmental data from EPW files, provide guidance on improving climate resilience, optimise performance, create site-specific images and design concepts from prompts, and analyse AI-generated images for further contextual insights. In this regard, it is essential to categorise specific questions/instructions that a designer might ask when establishing a relationship between the project and the site's climate conditions during the early design phase. The textual instructions provided by chatbots can be

transformed into prompts to be used in the text-to-image process, elaborating a design concept based on the images (Fig. 2). Using traditional 3D modelling and advanced Text-to-3D technologies, volumetric conceptual 3D models can be created to match the textual suggestions, and the images generated by the software. The methodological process, described in Fig. 3, summarises the steps from concept generation to the evaluation of concepts created using GenAI and LLM. The first step involves configuring and training the chatbot, followed by the analysis of climate files (EnergyPlus EPW) for pilot sites, both current and projected for the years 2030, 2050, and 2080. This step is essential to identify potential climate challenges and assess their impact on building performance. Next, the design site and urban context are evaluated through image analysis, allowing for

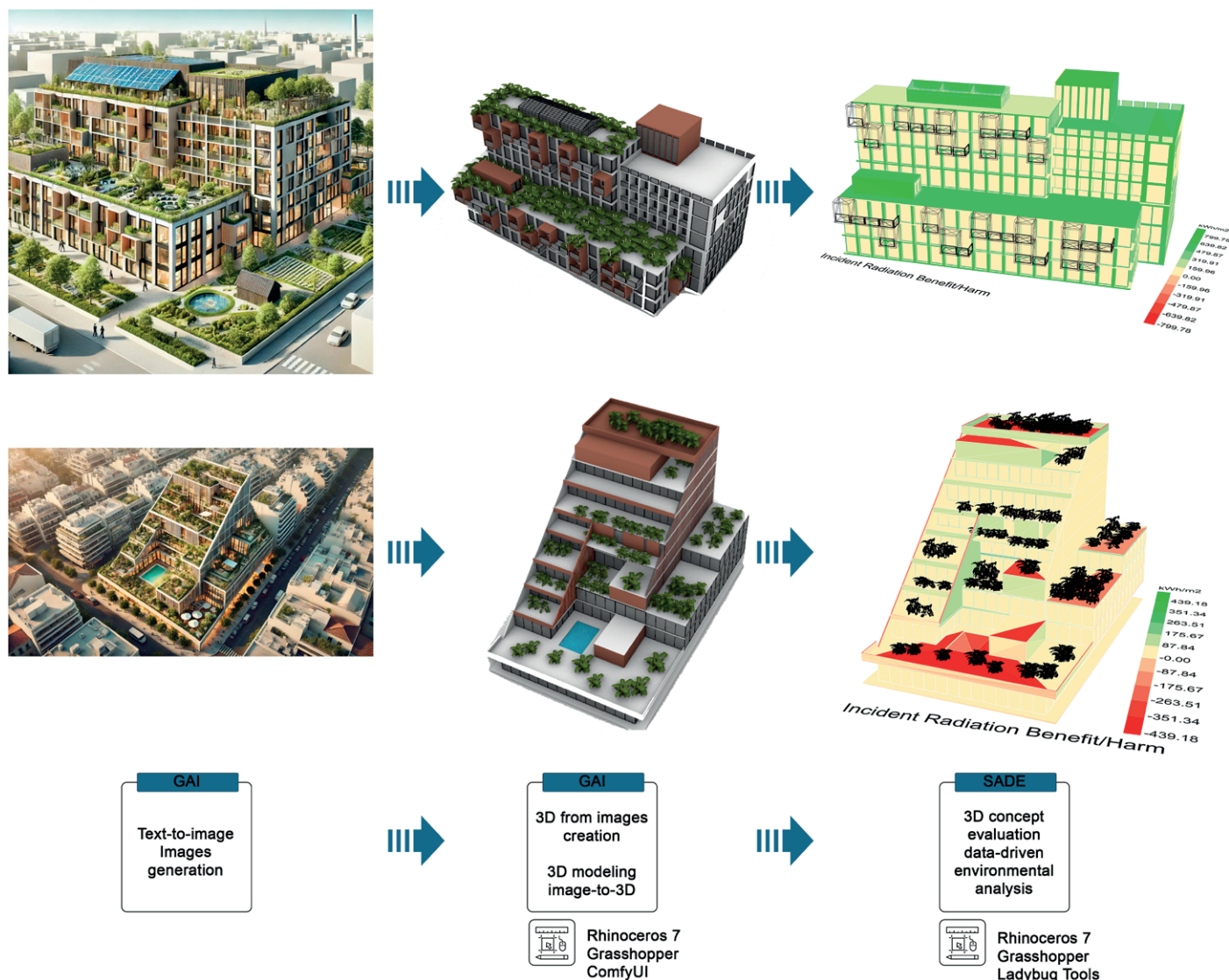
the extraction of site-specific information that is crucial for concept development. At this stage, sustainable design criteria are defined about the climate data and urban context, considering factors such as optimal orientation, glazing-to-wall ratio (WWR), building shape, shading devices, nature-based solutions, and the integration of renewable energy sources. Subsequently, geometric features and passive strategies are integrated into the design. The collected data and analyses are used to generate textual prompts to be employed in creating images in *Midjourney* and *DALL-E*. Each image generated from prompts is then evaluated based on the previously defined sustainable design criteria, assigning a score on a scale of 1 to 10 for each criterion. The best images, selected based on the score obtained, are transformed into 3D models using conventional

modelling techniques and advanced methods such as *image-to-3D*. The 3D models are placed in context and further evaluated by the AI chatbot to select the two best options, which will be analysed through a data-driven process (Fig. 4). Finally, environmental analysis is conducted using intuitive benchmarks, such as beneficial/harmful solar radiation, to further refine the selection of the concepts.

Conclusions

The integration of GenAI in architectural and environmental design, with particular emphasis on text-to-image technologies, is redefining how we conceive and develop built spaces. While these tools open new creative perspectives, they raise important questions regarding their effectiveness in providing adequate responses to issues such as decarbonisation and

04 |



environmental design. The adoption of GenAI in this field, starting with the formation of specialised chatbots, is still in its initial stages, with substantial challenges to overcome. One of the critical issues concerns GenAI's ability to fully comprehend the historical, cultural, environmental, and material context that characterises each urban environment. Architectural and environmental design are not limited to creating aesthetically pleasing forms but require a deep understanding of architectural heritage, local building traditions, and sociocultural dynamics that shape a place's identity. Despite advancements in GenAI technology, fundamental limitations persist in generating 3D images that can provide convincing responses within the SADE framework. To overcome these weaknesses, new methodologies, such as the one proposed by the authors

of this paper, are being developed to combine GenAI and SADE into a single process. The use of chatbots trained not only on site-specific climate data but also on detailed information related to local architectural heritage aims to integrate established environmental design methodologies into text-to-image generative processes. Hence, the challenge is to ensure that GenAI can both generate interesting concepts and propose solutions that are environmentally consistent, energy-efficient, and harmoniously integrated with the surrounding environment and existing architectural context. Looking to the future, the development of self-analysis procedures for projects generated by GenAI processes could lead to self-learning algorithms capable of assimilating and interpreting the unique characteristics of various urban contexts. Integrating GenAI into SADE

processes requires a careful and scientifically robust approach, capable of balancing the creative possibilities offered by AI with the rigorous requirements of sustainable architecture, with solutions that can enhance the peculiarities of each specific local context. In conclusion, the objective remains to ensure that technological advancements make a significant contribution to creating more sustainable, efficient, and culturally relevant built environments. This process must generate a holistic framework that embraces various areas of knowledge in architectural and urban design, balancing technological innovation with human expertise, sustainability principles, and respect for the cultural and material heritage of places. The integration of AI in context-sensitive architectural design is a promising frontier, but it requires a balanced approach that considers both

the potential and the ethical, practical, and cultural challenges involved. A great responsibility is entrusted to universities, which need to face the dual challenge of integrating GenAI into sustainable design practices through research, and of developing students' critical thinking to effectively apply such innovations in addressing contemporary architectural challenges.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are designated as first and co-first authors in the preparation of the article: Conceptualisation, A.F. and M.B.; methodology, A.F. and M.B.; investigation, A.F. and M.B.; writing, review and editing, A.F. and M.B.

gue un'analisi ambientale utilizzando benchmark intuitivi, come la radiazione solare *benefit / harmful*, per affinare ulteriormente la selezione dei concept.

Conclusioni

L'integrazione della GenAI nella progettazione architettonica e ambientale, con particolare enfasi sulle tecnologie *text-to-image*, sta ridefinendo il modo in cui concepiamo e sviluppiamo lo spazio costruito. Questi strumenti, pur aprendo nuove prospettive creative, sollevano importanti questioni in base alla loro efficacia nel fornire risposte adeguate in relazione a temi come la decarbonizzazione e la progettazione ambientale. L'adozione della GenAI in questo campo, a partire dalla formazione di chatbot specializzati, si trova ancora nelle fasi iniziali, con sfide sostanziali da superare. Una delle criticità riguarda la capacità della GenAI di comprendere appieno il contesto storico, culturale, ambientale e materiale che caratterizza ogni ambiente urbano. La progettazione architettonica e ambientale non si limitano alla creazione di forme esteticamente gradevoli, ma richiedono una profonda comprensione del patrimonio architettonico, delle tradizioni costruttive locali e delle dinamiche socioculturali che plasmano l'identità di un luogo. Nonostante i progressi nella tecnologia della GenAI, persistono limitazioni fondamentali nella generazione di immagini 3D che possano fornire risposte convincenti nell'ambito della SADE. Per superare queste debolezze, nuove metodologie come quella proposta dagli autori del presente contributo sono in fase di sviluppo, con l'obiettivo di coniugare GenAI e SADE in unico processo. L'uso di chatbot addestrati non solo su dati climatici specifici del sito, ma anche su informazioni dettagliate relative al patrimonio architettonico locale, mira a integrare le metodologie consolidate di progettazione ambientale nei processi generativi di tipo text-to-image. La sfida consiste dunque nel garantire che la GenAI possa non solo generare concept interessanti, ma anche proporre soluzioni che siano consistenti dal punto di vista ambientale, efficienti dal punto di vista energetico, e che si integrino armoniosamente con l'ambiente circostante e il contesto architettonico esistente. Guardando al futuro, lo sviluppo di procedure di autoanalisi per progetti generati da processi di GenAI potrebbero portare ad algoritmi di autoapprendimento capaci di assimilare e interpretare le caratteristiche uniche di diversi contesti urbani. L'integrazione della GenAI nei processi SADE richiede un approccio attento e solido scientificamente, in grado di bilanciare le possibilità creative offerte dall'AI con i rigorosi requisiti dell'architettura sostenibile, con soluzioni che possano esaltare le peculiarità di ogni specifico contesto locale. In conclusione, l'obiettivo rimane quello di garantire che i progressi tecnologici apportino un contributo significativo alla creazione di ambienti costruiti più sostenibili, efficienti e cultural-

mente rilevanti. Questo processo deve generare un quadro olistico che abbracci diverse aree di conoscenza nell'ambito della progettazione architettonica e urbana, bilanciando l'innovazione tecnologica con l'expertise umana, i principi di sostenibilità e il rispetto per il patrimonio culturale e materiale dei luoghi. L'integrazione dell'IA nella progettazione architettonica *site-specific* rappresenta una frontiera promettente, ma richiede un approccio equilibrato che consideri tanto le potenzialità quanto le sfide etiche, pratiche e culturali che essa comporta. Una grande responsabilità è affidata agli istituti universitari, che hanno al contempo il compito di portare avanti ricerche significative volte ad incorporare la GenAI nelle prassi di progettazione esistenti e di guidare gli allievi nello sviluppo modo di pensare critico, in grado di governare le innovazioni tecnologiche al fine di permettere alla disciplina architettonica di fornire risposte significative alle sfide della società contemporanea.

ATTRIBUZIONE E RICONOSCIMENTI

Gli autori si configurano come primo e co-primo nella redazione dell'articolo: Concettualizzazione, A.F. e M.B.; metodologia, A.F. e M.B.; indagine, A.F. e M.B.; scrittura, revisione ed editing, A.F. e M.B.

REFERENCES

- Choi, S. and Yoon, S. (2024), "GPT-based data-driven urban building energy modelling (GPT-UBEM): Concept, methodology, and case studies", *Energy and Buildings*, Vol. 325, p. 115042. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115042> (Accessed on 18/11/2024).
- del Campo, M. (2022), *Neural Architecture: Design and Artificial Intelligence*, Applied Research and Design Publishing.
- del Campo, M. and Leach, N. (2022), *Machine Hallucinations: Architecture and Artificial Intelligence*, John Wiley & Sons. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/toc/15542769/2022/92/3> (Accessed on 06/09/2024).
- Ferrante, T. and Romagnoli, F. (2023), "Support or automation in decision-making: the role of artificial intelligence for the project", *TECHNE – Journal of Technology for Architecture and Environment*, Vol. 25, pp. 68-77. Available at: <https://doi.org/10.36253/techne-13713> (Accessed on 06/09/2024).
- Galanos, T. (2019), "Machine-Learned Regenerative Design", in Naboni, E. and Havinga, L. (Eds.), *Regenerative Design in Digital Practice*, Eurac Research, Bolzano, Italy, pp. 95-99. Available at: https://buildup.ec.europa.eu/sites/default/files/content/regenerative_design_in_digital_practice_small.pdf (Accessed on 06/09/2024).
- Guarini, M.R., Sica, F., Segura, A. (2024), "Artificial Intelligence (AI) Integration in Urban Decision-Making Processes: Convergence and Divergence with the Multi-Criteria Analysis (MCA)", *Information*, Vol. 15, n. 11, pp. 678. Available at: <https://doi.org/10.3390/info15110678> (Accessed on 18/11/2024).
- Karimi, H., Adibhesami, M.A., Hoseinzadeh, S., Salehi, A., Groppi, D. and Astiaso Garcia, D. (2024), "Harnessing Deep Learning and Reinforcement Learning Synergy as a Form of Strategic Energy Optimization in Architectural Design: A Case Study in Famagusta, North Cyprus", *Buildings*, Vol.

14, n. 5, p. 1342. Available at: <https://doi.org/10.3390/buildings14051342> (Accessed on 06/09/2024).

Płoszaj-Mazurek, M., Rynska, E. (2024), "Artificial Intelligence and Digital Tools for Assisting Low-Carbon Architectural Design: Merging the Use of Machine Learning, Large Language Models, and Building Information Modeling for Life Cycle Assessment Tool Development", *Energies*, Vol. 17, n.12, p. 2997. Available at: <https://doi.org/10.3390/en17122997> (Accessed on 06/09/2024).

Rane, N. (2023), "ChatGPT and similar generative artificial intelligence (AI) for building and construction industry: Contribution, opportunities and challenges of large language models for Industry 4.0, Industry 5.0, and Society 5.0", *SSRN*. Available at: 10.2139/ssrn.4603221 (Accessed on 06/09/2024).

Vissers-Similon, E., Dounas, T. and De Walsche, J. (2024), "Classification of artificial intelligence techniques for early architectural design stages", *International Journal of Architectural Computing*. Available at: <https://doi.org/10.1177/14780771241260> (Accessed on 06/09/2024).

Yahaya, H.L., Vivek, S.M., Shehu, U.M. and Auwal, A.M. (2022), "Carbon footprint management: A review of construction industry", *Clean. Eng. Technol.*, Vol. 9, p. 100531. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100531> (Accessed on 06/09/2024).