

ESG in the real estate valuations. A portfolio selection model for energy retrofit programs

Francesco Tajani¹, Francesco Sica^{1,*}, Carola Clemente¹, Eugenio Arbizzani¹

¹ Department of Architecture and Design, Sapienza University, St. Flaminia 359, 00196 Rome, Italy; francesco.tajani@uniroma1.it; francesco.sica@uniroma1.it; carola.clemente@uniroma1.it; eugenio.arbizzani@uniroma1.it

* corresponding author

Keywords

economic-financial
feasibility,
decarbonization,
portfolio selection model,
decision-support system

Abstract

European directives on sustainable finance identify binding guidelines in investment planning for the decarbonization of the real estate sector. The Sustainable Finance Disclosure Regulation regularizes the methods of economic evaluation of projects by identifying the pillars Environmental (E), Social (S) and Governance (G) as thematic reference stylistic features.

The ESG triptych constitutes inspiration in the scientific literature in the field for the proposal and testing of valuation algorithms aimed at the optimal structuring of investment portfolios. The paper proposes an ESG-based economic-financial analysis model for energy retrofit programs referring to the existing real estate sector. The model assumes the configuration of a multi-objective system built by borrowing algebraic formalisms of Operations Research, especially those of optimization algorithms. These algorithms make it possible to construct logical-functional relationships such as to represent the anatomy of the proposed evaluation model in terms of objective function and constraints, for example on the European decarbonization pathway target, or even on the available budget. The implementation of the proposed model, applied to a case study, returns a time priority list of assets to be energy efficient, balancing for each the investment costs, payback period and post-retrofit CO₂ production.

1. Introduction

European sustainable finance planning affects to date (2024) the investment evaluation mechanisms underlying the progress and development of production sectors. The Sustainable Finance Disclosure Regulation (SFDR) (EU Regulation 2019/2088), the Environmental Taxonomy Regulation 2020/852, and the Action Plan for Financing Sustainable Growth (COM (2018) 97 final) identify programmatic directions for financially sustainable initiatives, i.e. environmentally, economically, and socially responsible operations supporting the transition to climate neutrality (EUCO 29/19).

The environmental, economic, and social ethics that support sustainable investments become even more important when it concerns the building management and production. 75% of the current stock is inefficient (Leonhardt, 2022), and reducing climate-changing emissions of 55% by 2030 and zero by 2050 are difficult targets to achieve. The reduction in emissions links to a decrease in the use of fossil fuels for energy production, as well as the need for energy efficiency of the heritage in its durable (opaque and transparent envelope) and technological components (systems for energy production and storage, heating, cooling and ventilation, etc.). Therefore, planning models for

initiatives on real estate assets and regenerative processes of the existing heritage are necessary as part of the sustainability measures introduced at European level. These interventions aim to achieve a common decarbonisation path, minimise the impact on the environment and energy, and maximise the benefits (direct and indirect) on the economy, environment, and people's quality of life.

By defining environmental (E), social (S) and governance (G) targets, the European Parliament and the European Council establish guidelines for the kinds of actions that should be taken in order to implement sustainable investments (Zhai & Michael Helman, 2019; Al-Shetwi, 2022). Six environmental goals of sustainable investment are listed in Regulation 2020/852: 1) climate change mitigation; 2) climate change adaptation; 3) sustainable use and conservation of water and marine resources; 4) transition to a circular economy; 5) pollution prevention and reduction; 6) biodiversity and ecosystem protection/restoration. By establishing three macro-themes of reference – 1) respectable employment; 2) sufficient living conditions and end-user well-being; 3) inclusive and sustainable communities and societies – the EU platform on sustainable finance (2020) discards the social sustainability conceptualization as expressed in the European Economic and Social Committee's 2022 Opinion on «Social Taxonomy - Challenges and Opportunities» (2022/C 486/03).

In the construction industry, the reference environmental criteria for the real estate valuation in the ESG key pertain to the «Building-Plant» binomial, specifically to: i) guaranteeing the site's decarbonisation through local CO₂ emission reductions; ii) enhancing the building/plant system's overall energy performance. The urban neighbourhood's social structure, as a result of pursuing criteria i) and ii), is impacted by: i) improving users' quality of life (*indoor and outdoor comfort*); ii) increasing the built environment's safety and healthiness (*safe and healthy city*); iii) making individual assets as inclusive and accessible as possible.

The ESG renovation of the real estate sector thus defines a strategic option for the development of sustainability through environmental, social, and governance investment planning and design decisions. Asset upgrading strategies must highlight the competition between the three ESG dimensions while taking into account the sector's financial traits.

In the context of ESG property valuations, the majority of Decision-Support Systems (DSS) created thus far are intended to guide public and private organisations to adopt investment strategies that have a detrimental effect on the environment and energy, structuring asset portfolios with an eye towards climate neutrality. The reference literature contains DSS that show operational limitations in combining European decarbonisation targets with economic-financial ones in the valuation logics, and focus sectorially on the financial, environmental, and/or energy analysis of ESG initiatives (Aitziber et al., 2022; Guardigli et al., 2018; Esmat et al., 2023; Leone & Zuccaro, 2016; Matthew et al., 2023; Mensah, 2019).

For the purpose of planning investments (*portfolio selection model*) that aim to actively valorise real estate assets, this contribution suggests structuring an integrated DSS analysis algorithm that combines environmental, energy, and economic parameters relevant to the same ESG decision-making system. In addition to considering the decarbonisation target Carbon Risk Real Estate Monitor (CRREM) of the European Union, which each country has to pursue in own programmatic and strategic decision-making process of energy upgrading of assets (Tajani et al., 2024), the specific mathematical formalism of Operational Research is borrowed in the construction of the logical-functional relations among variables of study.

The contribution is structured as follows: Section 2 provides a summary of the state-of-the-art techniques for real estate asset portfolio optimisation from an ESG standpoint; Section 3 outlines the essential elements of the suggested ESG analysis algorithm; Section 4 shows how the algorithm is applied to a case of interest; Section 5 highlights the work's findings and future research pathways.

2. State-of-art ESG portfolio selection models

Following the basic framework mentioned above, the need to assure more sustainable investments necessitates the search for valuation models that may be applied for the optimal development of ESG portfolios.

In some examples from the literature of the field, established asset allocation models for optimising investment portfolios are tested for structuring ESG portfolios (Trenado et al, 2014), such as the Markowitz model (Markowitz, 1952), the Black & Litterman model (Black & Litterman, 1992), the optimisation model based on the naïve diversification approach (Oikonomou et al., 2018), the allocation strategy focusing on reward-to-risk timing (Anderson et al., 2012; Baker et al., 2011). Additionally, some Authors even propose «ESG-adjusted» models for capital asset pricing, like the sustainable CAPM model (Pedersen et al., 2021; Zerbib, 2022), which categorises ESG criteria as systematic risk factors that should be incorporated into factor analysis strategies (Kaiser, 2020; Halbritter & Dorfleitner, 2015; Derwall et al., 2005; Fan & Michalski, 2020; Alessi et al., 2021).

However, given the interdependence of multiple factors, the structure of multi-criteria portfolios meets the need for a selection output that encompasses a wide range of criteria, not just financial ones. Multi-criteria techniques have been used in the field of ESG portfolio selection since Lee and Lerro (1973). An updated review of the subject is provided by Aouni et al. (2018). Multi-criteria methods for optimising ESG portfolios include: the linear multi-criteria approach (Hallerbach et al., 2004; Sica et al., 2023); the two-stage multi-objective approach based on the hedonic pricing method with the implementation of fuzzy programming models and logic (Bilbao-Terol et al., 2012); multi-objective programming systems that borrow the game theory (Trenado et al., 2014); the three-factor Markowitz model (return, risk, and entrepreneurial social responsibility) (Gasser et al., 2017); multi-objective evolutionary algorithms (Liagkouras et al., 2020; Morano et al., 2024); Data Envelopment Analysis models to emphasise the interaction among environmental, social, and governance attributes in the study among the assets to be allocated and selected for the optimal portfolio construction (Chen et al., 2021).

Although some cases allow for the creation of investment portfolios based on statistical-probabilistic methodologies and/or independently taking environmental, social, and governance factors, there is a dearth of operational systems that combine financial and ESG aspects. This is especially true given the difficulties of generating standardised ESG measures and demonstrating functional linkages across (financial and non-financial) decision-making variables.

This study presents an ESG economic-financial analysis model targeted at creating portfolios for the decarbonisation of existing real estate assets. The model considers both financial variables (energy retrofit investment cost; investment payback period) and environmental variables (CO₂ emissions into the atmosphere as a result of energy efficiency measures; CRREM decarbonisation targets for the real estate industry). The functional interrelationships among the three variables of interest are formalised using the linear programming language.

3. Material and Method

An integrated approach to assess the economic and financial feasibility of initiatives focusing on real estate energy efficiency requires the preliminary determination of the overall cost of energy retrofitting on the single building (3.1), the payback period of energy projects (3.2), and the carbon footprint of the building before and after the retrofit programme (3.3). In addition to budgetary constraints, the building energy programme must measure the environmental impact in compliance with the European decarbonisation target (CREEM). Among the diverse financial criteria for investment evaluation, the Payback Period (PbP) was chosen, rather than the Net Present Value (NPV) or the Internal Rate of Return (IRR), because of the speed of estimation of this indicator, especially in contexts where it is required to make cost-effectiveness judgments related to short-term analysis periods. PbP can be also a useful performance indicator for comparing alternative projects. Although the overall profitability of a project is taken into account for the estimation of NPV and IRR, PbP is more straightforward for comparing the speed of return on investment costs in relation to project alternatives from which a choice must be made.

In order to prioritise buildings on the basis of financial availability, it is necessary to formalise a cost-benefit matrix of the initiatives with the implementation costs, payback period of the energy retrofit investment and environmental objectives. The latter should include the containment of the total CO₂ production of the building after the renewed intervention, in accordance with the CRREM

decarbonisation target. The total cost of the initiative programmes for each building and the energy-environmental impacts generated after the rehabilitation programme must be considered.

The components of the aforementioned matrices may be combined to establish both elementary and comprehensible mathematical connections, which serve to define the pivotal elements of the proposed optimisation algorithm (3.4). The following sections elucidate 3.1, 3.2, 3.3 and 3.4 from a methodological standpoint.

3.1. Cost analysis of energy retrofit initiatives

To assess the costs of energy retrofit projects for the assets to be renovated, it is necessary to apply the unit prices of the official reference lists to the characteristics and quantities of the project working categories. In instances where particular work is scheduled, the assessments will be augmented by market analysis. It is possible to estimate the cost of an energy retrofit project by means of a synthetic calculation, namely by determining a parametric item for each category of working contributing to the definition of the overall energy retrofit project. However, the most appropriate reference categories can be identified by carrying out a market survey on the main classes of energy retrofit projects applicable to similar building stocks.

In order to ascertain the accurate costs associated with energy retrofit projects on existing buildings, a reference was made to the data presented in legislative sources concerning the Italian market, to which the case study in question pertains. Initially, the costs published in the Decree of 14 February 2022 «*Definizione dei costi massimi specifici agevolabili, per alcune tipologie di beni, nell'ambito delle detrazioni fiscali per gli edifici*»; In the context of relamping interventions, the parametric costs are set forth in the Decree of 16 February 2016 «*Aggiornamento della disciplina per l'incentivazione di interventi di piccole dimensioni per l'incremento dell'efficienza energetica e per la produzione di energia termica da fonti rinnovabili*»; In relation to photovoltaic systems, the parametric cost is set out in Article 119 of the Relaunch Decree-Law 34/2020 (*Incentivi per l'efficientamento energetico, sismabonus, fotovoltaico e colonnine di ricarica di veicoli elettrici*), which has been updated in 2023. The homogenisation of data is a prerequisite for the comparison of cost items drawn from disparate legislative sources. In this instance, the work categories of interest are identified and the indirect items (such as Value Added Tax and professional fees) are excluded in order to standardise the estimation of the retrofitting costs.

The full construction cost of the energy-saving project for the asset is used as the basis for the production of the corresponding Technical-Economic Framework. This framework takes into account indirect charges, including professional fees, Value Added Tax (VAT), social security charges, and contingencies, which contribute to the definition of the total production cost of the energy retrofit investment.

3.2. Payback period of the investment

The Payback Period (PbP) is calculated according to the following formula:

$$\sum_{t=1}^{PbP} \frac{F_t}{(1+r)^t} = 0$$

where:

PbP = Payback Period of the investment;

F_t = cash flow at year t ;

r = discount rate of investment cash flows.

The valuation of PbP can be carried out by implementing a Discounted Cash Flow Analysis (DCF). For the case study that will be presented in Section 4, the following assumptions were considered for the PbP assessment:

- the owner party still perceives rent(s) from the tenant(s) during the energy enhancement works that, which also involve internal facilities, can be scheduled in such a way that they do not significantly restrict with the tenant's standard activities. For example, operations could be performed outside office hours or during periods when the space is less occupied, by reducing the impact on normal operations and ensuring that the tenant remains in receipt of the agreed rental sum;
- the costs of property management include the following items: the property tax, the insurance, the costs of the property management service itself, a provision for extraordinary expenses with reinstatement fees, commissions paid to agents for their activities in marketing the property, vacancy and uncollectability rates, and registration tax. The aforementioned expense items are determined on a percentage basis, based on the ordinary costs incurred by an owner of similar types of buildings within the specified reference context;
- the energy retrofit was fully implemented within the first year of the financial analysis;
- the period of analysis considered in the development of the DCFA for the determination of the PbP is twenty-four semesters (i.e., for a residential property, six years minimum with automatic renewal for a further six years, as required by law);
- the revenue generated from energy enhancement is equivalent to the current passing rent of the asset. The PbP is estimated irrespective of the terminal value, thereby verifying the return period of the investment associated with the mere receipt of rents.

3.3. Building carbon-footprint valuation

The Energy Performance of Buildings Directive (No. 2018/844/EU EPBD) establishes a framework for the decarbonisation of buildings in Europe. In order to pursue the goal of nearly zero-energy buildings between 2020 and 2050, Member States are required to draw up appropriate action programmes and allocate the necessary funds for the decarbonisation of the built environment. The European project CRREM (2018-2021) has resulted in the implementation of the Carbon Risk Real Estate Monitor. This tool indicates the Decarbonisation Targets (DT) for each EU country up to 2050, thereby guiding assessments of the economic and energy-environmental sustainability of energy retrofit initiatives.

The CRREM decarbonisation objective is to reduce the building's carbon emissions. This can be achieved by constructing an energy-efficient model of the building and subsequently requalifying it. Energy-environmental modelling can be implemented, for example, using the ENEA-SIRE tool (<https://sire.enea.it/>), which enables the restoration of the average energy performance of buildings before and after activities, alone or in combination, of requalification. In particular, the following aspects should be considered: i) the measurement of energy consumption for various purposes (such as indoor and outdoor climate control, seawater heating, and lighting), and ii) the assessment of total CO₂ emissions before and after the programme of energy retrofit initiatives.

The carbon footprint of the assets underlying the demonstration case in Section 4 is measured both before and after the energy retrofit programme through the ENEA-SIRE tool. The quantity of CO₂ released into the atmosphere is posited as a proxy variable for the building's environmental footprint.

3.4. Optimisation algorithm

The optimal investment portfolio is determined from an economic and energy-environmental standpoint. This involves the construction of a frame that illustrates the distribution of financial resources, which may be allocated in full or in part., to i -th asset (A_i , with $i = 1, \dots, n$) following the evaluation criteria on:

- the total cost (C_i) of the retrofit programme expressed in Euro;

- the Payback Period (PbP), measured in terms of the number of semesters, associated with the intervention programme for the i -th asset;
- the total production of CO_2 ($CO2$), with the unit of measurement being the kg/year, as a result of renewed initiatives on the building.

The logical interdependence among the criteria describing the investment in retrofitting requires the use of multi-criteria analysis methods capable of jointly balancing several and diverse aspects of the same decision system. In the proposed work, the methodological and instrumental apparatus of Operations Research has been used, based on the structuring of analytical algorithms aiming at maximising or minimising objective functions specific to the decision case to be solved.

The objective function to be considered with respect to the composition of an investment portfolio for energy retrofits is of the type:

$$\sum_{i=1}^n (w_C \cdot C_i + w_{PbP} \cdot PbP_i + w_{CO2} \cdot CO2_i) \cdot A_i \quad (1)$$

where C_i , PbP_i and $CO2_i$ criteria appear corresponding to each asset A_i , which can take an ordinal value from 1 to n in compliance with its energy character, depending on the size of the portfolio to be structured.

An appropriate weighting coefficient (w) is applied to each criterion. The underlying purpose of the decision system under consideration is to define, for a given investment budget, the optimal composition of assets to be prioritised over others, for which expression (1) gives the lowest possible numeric value.

Certain constraints of a different kind must be respected in the pursuit of the optimal asset combination. The linear algebraic formulation described below is assumed by those that underlie the analysis method suggested in the case of energy retrofit initiatives. Specifically, these constraints pertain to:

- a. the intervention program's financial resources (*Budget*) determined by the sum of costs (C_i) connected with each asset. This will assist identify which A_i works best in terms of economic and environmental performance:

$$\sum_{i=1}^n C_i \cdot A_i \leq Budget$$

- b. the environmental impact, expressed in terms of CO_2 production that the assets A_i , with surface SUP_i in square metres (sqm) generate as a result of the retrofit programme. The overall impact of A_i that the proposed analysis algorithm returns must be lower than, or equal to, the CREEM-DT, measured in kgCO₂e/sqm/year, that the real estate assets must achieve in the j -th year of reference:

$$\sum_{i=1}^n CO2_i \cdot A_i \leq DT_j \cdot \left(\sum_{i=1}^n SUP_i \cdot A_i \right)$$

- c. the size (G) of the investment portfolio, i.e. the minimum number of A_i assets that the customer can decide to invest according to personal interests, needs and financial availability:

$$\sum_{i=1}^n A_i \geq G$$

The objective function (1) and the constraints a., b. and c. find their place within the linear algebraic system (2), which formally substantiates the analysis algorithm for determining the

optimal investment portfolio in energy retrofit initiatives among real estate assets:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n (w_C \cdot C_i + w_{PbP} \cdot PbP_i + w_{CO2} \cdot CO2_i) \cdot A_i \\ \sum_{i=1}^n C_i \cdot A_i \leq Budget \\ \sum_{i=1}^n CO2_i \cdot A_i \leq DT_j \cdot \left(\sum_{i=1}^n SUP_i \cdot A_i \right) \\ \sum_{i=1}^n A_i \geq G \end{array} \right. \quad (2)$$

Asset combinations can be generated by the system (2) using the consistency G of the portfolio desired by the costumer, as well as the weighting coefficients associated with the criteria C_i , PbP_i , and $CO2_i$ of the objective function. The objective is to ascertain whether the model's weight of CO_2 emission reduction aligns with the situation before and after intervention. This will enable the identification of the most efficient asset in terms of CO_2 emission reduction through the algorithm's mathematical structure.

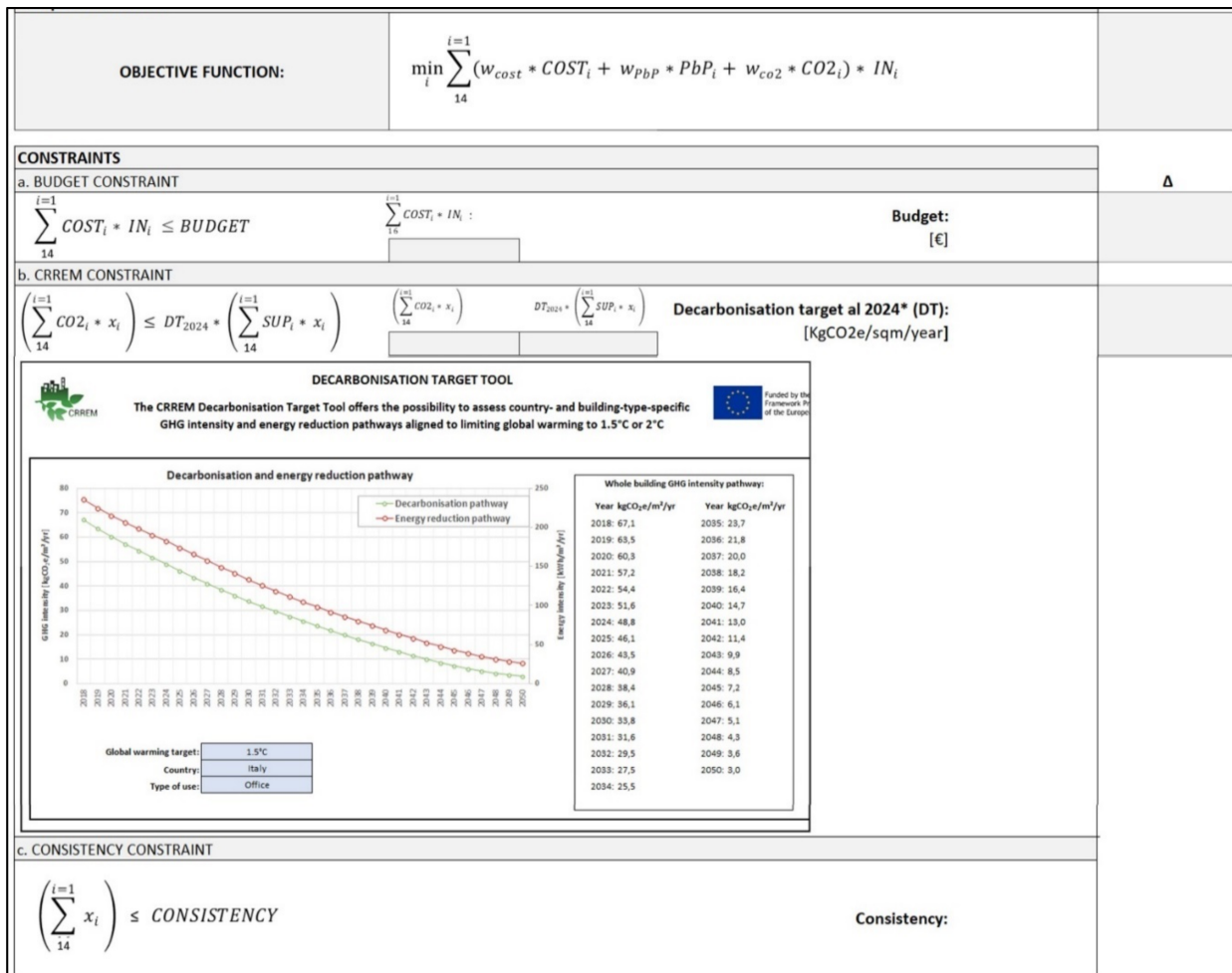


Figure 1. Operational interface of the optimization algorithm in Excel-

With respect to the mathematical formalism of the system (2), it is possible to build a decision support model with which time priority lists of assets to be retrofitted can be formalised. Figure 1 illustrates the user interface of the optimisation algorithm, designed in the Excel programming environment and structured according to the mathematical relationships of system (2).

4. Demonstration Case

Table 1 describes the analysis case, consisting of 16 structured office assets, showing, for each one, specifications on: total gross floor surface, occupancy rate, total CO₂ before energy retrofit intervention, passing rent. The 16 assets are part of a real estate fund whose manager is interested in identifying possible energy retrofit strategies, merging investment potential, feasibility of the retrofit and final valorisation. The asset specifics were gathered by desk consultation with the real estate fund manager.

Table 2 shows the Maximum (Max.), Minimum (Min.) as well as the estimated mean (Avg) and Standard Deviation (St. Dev.) of the corresponding numerical series for each of the above specifications. The results of the statistical-descriptive analysis carried out show that: the average gross floor surface is 11,976 sqm; the assets to be energetically upgraded are on average 90% occupied by tenants; in the absence of energy retrofit measures, the average CO₂ production of the real estate stock is 299,714 kg/year; the average passing rent of the study assets cluster is 25.32 €/sqm · month, i.e. 310.30 €/sqm · year.

Table 1. Real estate portfolio specifications

Asset	Total gross floor surface [sqm]	Occupancy rate [%]	Total CO ₂ before energy retrofit intervention [kg/ year]	Passing Rent [€/sqm · month]
1	16,100	100	948,865	17.15
2	14,700	100	174,091	39.71
3	2,100	100	98,543	31.56
4	2,400	77	11,268	57.40
5	5,100	100	38,344	32.25
6	11,300	100	775,830	36.44
7	12,800	81	353,771	21.47
8	12,000	93	97,337	30.82
9	30,000	100	550,322	8.24
10	8,200	100	439,524	20.37
11	10,122	8	89,503	10.49
12	7,200	100	155,864	25.18
13	33,000	100	687,643	10.50
14	9,900	100	83,020	20.34
15	8,500	100	152,233	31.62
16	8,200	82	139,267	11.52

Table 2. Statistical-descriptive analysis of the specifications characterising the study sample

	Total gross floor surface [sqm]	Occupancy rate [%]	Total CO ₂ before energy retrofit intervention [kg/ year]	Passing Rent [€/sqm • month]
Max.	33,000	100	948,865	57.40
Min.	2,100	8	11,268	8.2
Avg	11,976	90	299,714	25.32
St. Dev.	8,563.91	23	293,473.47	13.09

Tabella 3. Prospetto delle categorie d'intervento per ciascun asset

	Assets															
Work-categories	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Insulation roofing																
External					x			x			x	x	x	x	x	
Internal																
Ventilated roofs																
Insulation floors																
External												x				
Internal/ground								x					x			
Insulation of perimeter walls																
External								x				x	x			
Internal																
Ventilated roofs																
Replacement of transparent closures, including windows																
Curtain wall without shielding					x			x				x	x			
Continuous façade without street level screens (shop windows)			x					x				x	x			
Window								x							x	
Shuttering + blackout closure (shutter, shutters, dark)			x		x							x	x		x	
Installation of solar shading and/or mobile shading systems including any automatic adjustment mechanisms								x				x	x			
Solar collector systems																
Uncovered																
Glazed floors																
Insulation floors																

Follow **Table 3**. Prospetto delle categorie d'intervento per ciascun asset

Work-categories	Assets															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Heating systems with condensing water boilers and/or condensing air heaters																
$P_{nom} \leq 35$																
$P_{nom} > 35$																
Micro-cogenerator installations																
Endothermic engine / other																
Fuel cells																
Heat pump systems																
Electric or prime mover steam compression and absorption heat pumps																
Air/Air					x	x		x				x			x	
Other																
Geothermal heat pumps																
Installations with hybrid systems																
Systems with heat generators powered by biomass fuels																
$P_{nom} \leq 35\text{kWt}$																
$P_{nom} > 35\text{kWt}$																
DHW production systems with heat pump water heaters																
Storage ≤ 150 l			x	x	x	x		x			x	x	x	x	x	
Storage > 150 l								x								
Installation of building automation technologies	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Relamping	x	x	x	x	x	x		x	x		x	x	x	x	x	
Installation of a photovoltaic power plant		x			x	x		x		x	x	x	x	x	x	
Electric recharging columns																
Up to 8 columns		x	x						x					x		
More than 8 columns						x		x				x				

Downstream of the information system in Tables 1 and 3, the production costs, Payback Period (PbP) and total CO₂ production following the valorisation operation are estimated for each asset. Specifically:

- production costs per asset are estimated according to the intervention categories in Table 3;
- in order to estimate the PbP, both revenues and operating costs are updated using an appropriate inflation rate. This is calculated as follows: 5% in the second year, 3.5% in the

third year and 2% in subsequent years. The cash flows of the transaction have been discounted by a rate that reflects the specific riskiness of the investment. This riskiness is a function of the size, location, duration of the lease, as well as the inflationary outlook and real estate market expectations relative to the area of interest. In the logic of the Weighted Average Cost of Capital (WACC), we assume a financing structure of 40% equity and 60% debt, and we assume risk-free interest rates:

- 10-year BTP (moving average over the last 12 months): 3.946% (equity);
- 10-year EURIRS (moving average over the last 12 months): 2.609% (third party).

The discount rates used to estimate the PbP of each asset are summarised in Table 4;

- implementing the ENEA SIRE tool, the carbon footprint of the assets — that is the amount of CO₂ following the energy retrofit program — is measured.

The estimates of the three variables of interest (energy retrofit costs, PbP, post-intervention CO₂) are given, for each asset in the portfolio considered, in the cost-benefit matrix of Table 5.

Table 4. Discount rates applied in estimating the PbP of the 16 study assets

Assets	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Annual discount rate [%]	6.90	6.85	6.40	6.40	6.50	6.45	6.80	6.60	6.60	8.90	7.10	7.10	8.30	7.20	8.10	7.20

Table 5. Cost-benefit matrix of the energy retrofit programme for the analysis building stock

	Energy retrofit costs [€]	PbP [n. of semesters]	Total CO ₂ after energy retrofit intervention [kg/year]
1	1,618,628.80	2	895,224
2	1,776,468.03	2	106,674
3	580,999.69	2	87,312
4	181,934.27	1	10,469
5	727,673.79	1	32,682
6	6,127,404.87	3	586,539
7	4,063,662.82	5	213,039
8	610,952.77	1	91,246
9	12,825,684.03	13	302,180
10	1,291,840.86	2	377,415
11	980,560.35	2	82,016
12	1,092,042.87	2	121,796
13	20,431,006.34	18	447,253
14	4,424,128.41	6	47,744
15	1,195,265.12	2	122,019
16	5,400,240.16	18	83,732

The summarised elaborations in Table 5 represent the fundamental cognitive apparatus for the implementation of the proposed economic analysis algorithm. The time priority lists of the assets are formalised through the use of the operating system depicted in Figure 1, which was constructed in the Excel programming environment. The positioning of the asset within the low-high ranking segments of the list is contingent upon its capacity to pursue the pre-established objectives, namely: *i)* to minimise the total energy retrofit costs; *ii)* to limit the payback time of the investment as much as possible; *iii)* to guarantee a total CO₂ production per year as a result of the energy enhancement actions of the buildings according to the annual CRREM Decarbonisation Targets (DT).

In order to test the robustness of the proposed algorithm for the construction of green-based investment portfolios with low CO₂ production inside/outside, two examples of time priority lists are provided, respectively with DT referring to the year 2024 (DT = 48.8 kg CO₂e/sqm/year) and the year 2030 (DT = 33.8 kg CO₂e/sqm/year). The CRREM targets for the two aforementioned times (2024 and 2030) were defined with two objectives in mind. Firstly, to highlight the potential for using the proposed analytical tool. Secondly, to set priorities for useful analyses in the short-medium term. These analyses should align with sustainable development goals, such as energy and climate neutrality, which are to be achieved by 2030.

The outcomes of the model's application to the two case scenarios are presented in Table 6. The priority assets for energetic upgrading, which demonstrate optimal performance in achieving the aforementioned objectives (i), (ii) and (iii), are indicated by an increasing Roman cardinal number.

Table 7 illustrates the outputs generated by the application of the optimisation model, with consideration given to the importance of CO₂ reduction resulting from energy efficiency interventions for each asset. In particular, the post-intervention CO₂ outputs are multiplied by the complement to the unit of the respective percentage reductions in polluting emissions, thereby affording greater weight to the solutions that produce higher positive energy impacts in the processing aimed at the best environmental performance.

Table 6. The classification of assets in accordance with the CRREM decarbonisation pathway, with a view to achieving the 2024 and 2030 targets.

Priority asset (DT ₂₀₂₄ = 48.8 kg CO ₂ e/sqm/year)															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
III	II	IV	VI	IX	VII	V	XIV	VIII	X	XI	XVI	XV	XII	XIII	I

Priority asset (DT ₂₀₃₀ = 33.8 kg CO ₂ e/sqm/year)															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
II	I	III	V	IX	VII	VI	XIV	VIII	X	XI	XVI	XV	XII	XIII	IV

Table 7. Ordering the assets in relation to the 2024 and 2030 CRREM decarbonisation-pathway and balancing the weight of the percentage reduction of CO₂.

Priority asset (DT ₂₀₂₄ = 48.8 kg CO ₂ e/sqm/year)															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
XVI	IV	V	II	XIV	XI	VII	XII	XIII	VI	IX	XV	III	X	VIII	I

Priority asset (DT ₂₀₃₀ = 33.8 kg CO ₂ e/sqm/year)															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
XVI	IV	V	II	XIV	XI	VII	XII	XIII	VI	IX	XV	III	X	VIII	I

5. Conclusions

The current and widespread need to incorporate the three-dimensional ESG system into investment planning requires the development of valuation models designed to establish compromises between multiple aspects (environmental, social and governance) and financial interests. This is also the case when operating on the built environment, in view of the international CRREM decarbonisation and climate neutrality policy lines to be pursued by 2050.

The implementation of the developed algorithm allows for the identification of the optimal order of assets to be upgraded. This is based on three key factors: the investment costs, the payback period, and the total production of CO₂ as a result of the energy retrofit interventions compared with the emission targets set by CRREM. In particular, with respect to the CRREM 2024 targets, the algorithm rewards assets with lower investment costs and shorter payback periods. Conversely, when the more stringent CRREM 2030 targets are considered, it becomes evident that the algorithm should give greater importance to assets that can meet the decarbonisation targets. The elaboration, which involved balancing the weight of the CO₂ emission reduction between the *pre*- and *post*-intervention scenarios, showed that the algorithm's mathematical structure can capture the most relevant information in defining the final order, where the asset is distinguished by a superior reduction in CO₂ emissions.

The evolving preferences of investors and the fluctuating conditions of the market inevitably introduce further intricacies, underscoring constraints and opportunities for enhancing the proposed analytical algorithm to achieve the most optimal construction of investment portfolios. A potential avenue for future inquiry could be the pursuit of robust investment solutions within the domain of interactive multi-objective optimisation schemes. This approach would facilitate the integration of decision-makers' preferences, given the inherent complexity and unpredictability of decision-making conditions.

Author Contributions

The work is to be equally attributed to the Authors.

Bibliography

- Aitziber E., Tor B. & Jose Luis I. (2022). Incremental decision making for historic urban areas' energy retrofiting: EFFESUS DSS. *Journal of Cultural Heritage*, 54, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.01.011>
- Al-Shetwi A. (2022). Sustainable development of renewable energy integrated power sector: Trends, environmental impacts, and recent challenges. *Science of The Total Environment*, 822, 153645. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153645>
- Alessi L., Ossola E. & Panzica R. (2021). What greenium matters in the stock market? The role of greenhouse gas emissions and environmental disclosures. *Journal of Financial Stability*, 54, 100869. <https://doi.org/10.1016/j.jfs.2021.100869>
- Anderson R. M., Bianchi S.W. & Goldberg L.R. (2012). Will my risk parity strategy outperform? *Financial Analysts Journal*, 68(6), 75–93. <https://doi.org/10.2469/faj.v68.n6.7>
- Aouni B., Doumpos M., Perez-Gladish B. & Steuer R.E. (2018). On the increasing importance of multiple criteria decision aid methods for portfolio selection. *Journal of the Operational Research Society*, 69(10), 1525–1542. <https://doi.org/10.1080/01605682.2018.1475118>
- Baker M., Bradley B. & Wurgler J. (2011). Benchmarks as limits to arbitrage: Understanding the low-volatility anomaly. *Financial Analysts Journal*, 67(1), 40–54. <https://doi.org/10.2469/faj.v67.n1.4>
- Bilbao-Terol A., Arenas-Parra M. & Canal-Fernandez V. (2012). Selection of socially responsible portfolios using goal programming and fuzzy technology. *Information Sciences*, 189, 110–125. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2011.12.001>
- Black, F. & Litterman R. (1992). Global portfolio optimization. *Financial Analysts Journal*, 48(5), 28–43. <https://doi.org/10.2469/faj.v48.n5.28>
- Chen L., Zhang L., Huang J., Xiao H. & Zhou Z. (2021). Social responsibility portfolio optimization ESG in

- the real estate valuations. A portfolio selection model for energy retrofit programs incorporating ESG criteria. *Journal of Management Science and Engineering*, 6(1), 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.jmse.2021.02.005>
- COM. (2018). *Piano d'azione per finanziare la crescita sostenibile: EUR-Lex - 52018DC0097*. EUR-Lex. Retrieved July 30, 2024, from <https://eur-lex.europa.eu>
- Decreto del 14 Febbraio. (2022). *Definizione dei costi massimi specifici agevolabili, per alcune tipologie di beni, nell'ambito delle detrazioni fiscali per gli edifici*. Retrieved July 30, 2024, from <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2022/03/16/22A01629/sg>
- Decreto del 16 Febbraio. (2016). *Aggiornamento della disciplina per l'incentivazione di interventi di piccole dimensioni per l'incremento dell'efficienza energetica e per la produzione di energia termica da fonti rinnovabili*. Retrieved July 30, 2024, from <https://biblus.acca.it/download/art-119-del-decreto-rilancio-superbonus-110/>
- Decreto Legge Rilancio 34/2020. (2020). *Incentivi per l'efficientamento energetico, sismabonus, fotovoltaico e colonnine di ricarica di veicoli elettrici*. Retrieved July 30, 2024, from <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2016/03/02/16A01548/sg>
- Derwall J., Guenster N., Bauer R. & Koedijk K. (2005). The eco-efficiency premium puzzle. *Financial Analysts Journal*, 61(2), 51–63. <https://doi.org/10.2469/faj.v61.n2.2716>
- Directive (EU) 2018/844. (2018). *Directive 2018/844*. EUR-Lex. Retrieved May 10, 2024, from <https://eur-lex.europa.eu>
- EUCO 29/19. (2019). *European Council Document*. Retrieved July 30, 2024, from <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-29-2019-INIT/en/pdf>
- Esmat A., Ghiassi-Farrokhfal Y., Gunkel P.A. & Bergaentzlé C.M. (2023). A decision support system for green and economical individual heating resource planning. *Applied Energy*, 347, 121442. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121442>
- Fan J.H. & Michalski L. (2020). Sustainable factor investing: Where doing well meets doing good. *International Review of Economics & Finance*, 70, 230–256. <https://doi.org/10.1016/j.iref.2020.07.013>
- Gasser S.M., Rammerstorfer M. & Weinmayer K. (2017). Markowitz revisited: Social portfolio engineering. *European Journal of Operational Research*, 258(3), 1181–1190. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.10.043>
- Guardigli L., Bragadin M.A., Della Fornace F., Mazzoli C. & Prati D. (2018). Energy retrofit alternatives and cost-optimal analysis for large public housing stocks. *Energy & Buildings*, 166, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.003>
- Halbritter G. & Dorfleitner G. (2015). The wages of social responsibility—Where are they? A critical review of ESG investing. *Review of Financial Economics*, 26, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.rfe.2015.03.004>
- Hallerbach W., Ning H., Soppe A. & Spronk J. (2004). A framework for managing a portfolio of socially responsible investments. *European Journal of Operational Research*, 153(2), 517–529. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00172-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00172-3)
- Kaiser L. (2020). ESG integration: Value, growth and momentum. *Journal of Asset Management*, 21(1), 32–51. <https://doi.org/10.1057/s41260-019-00148-y>
- Lee S. M. & Lerro A. (1973). Optimizing the portfolio selection for mutual funds. *The Journal of Finance*, 28(5), 1087–1101. <https://doi.org/10.2307/2978750>
- Leone M. & Zuccaro G. (2016). Seismic and energy retrofitting of residential buildings: A simulation-based approach. *Journal of Urban Planning, Landscape and Environmental Design*, 1, 11–25. <https://doi.org/10.6093/2531-9906/5030>
- Leonhardt R., Noble B., Poelzer G., Fitzpatrick P., Belcher K. & Holdmann G. (2022). Advancing local energy transitions: A global review of government instruments supporting community energy. *Energy Research & Social Science*, 83, 102350. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102350>
- Liagkouras K., Metaxiotis K. & Tsihrintzis G. (2020). Incorporating environmental and social considerations into the portfolio optimization process. *Annals of Operations Research*, 316, 1–26. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03554-3>
- Matthew Q., Chunguang B., Amin M., Weihao H., Wei C. & Osayuwamen O. (2023). Designing a decision support tool for integrating ESG into the natural resource extraction industry for sustainable development using the ordinal priority approach. *Resources Policy*, 85, 103988. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103988>

- Markowitz H. (1952). Portfolio selection. *Journal of Finance*, 7, 77–91.
- Mensah J. (2019). Sustainable development: Meaning, history, principles, pillars, and implications for human action: Literature review. *Cogent Social Sciences*, 5, 1–21. <https://doi.org/10.1080/23311886.2019.1653531>
- Morano P., Tajani F., Di Liddo F. & Amoroso P. (2024). A feasibility analysis of energy retrofit initiatives aimed at the existing property assets decarbonisation. *Sustainability*, 16(8), 3204. <https://doi.org/10.3390/su16083204>
- Oikonomou I., Platanakis E. & Sutcliffe C. (2018). Socially responsible investment portfolios: Does the optimization process matter? *The British Accounting Review*, 50(4), 379–401. <https://doi.org/10.1016/j.bar.2017.10.003>
- Pedersen L.H., Fitzgibbons S. & Pomorski L. (2021). Responsible investing: The ESG-efficient frontier. *Journal of Financial Economics*, 142(2), 572–597. <https://doi.org/10.1016/j.jfineco.2020.11.001>
- Regulation (EU) 2019/2088. (2019). *On sustainability-related disclosures in the financial services sector*. Retrieved May 10, 2024, from <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/2088/oj>
- Regulation (EU) 2020/852. (2020). *Establishing a framework to facilitate sustainable investment and amending Regulation (EU) 2019/2088*. Retrieved May 10, 2024, from <http://data.europa.eu/eli/reg/2020/852/oj>
- Sica F., Tajani F., Sáez-Pérez M.P. & Marín-Nicolás J. (2023). Taxonomy and indicators for ESG investments. *Sustainability*, 15(22), 15979. <https://doi.org/10.3390/su152215979>
- Tajani F., Sica F., Morano P., Locurcio M. & Roma A. (2024). An evaluation method of the building decarbonization process at the international level. In Gervasi O., Murgante B., Garau C., Taniar D., Rocha C.A.M.A. & Faginas Lago M.N. (Eds.), *International Conference on Computational Science and Its Applications* (pp. 126–142). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65273-8_9
- Trenado M., Romero M., Cuadrado M.L. & Romero C. (2014). Corporate social responsibility in portfolio selection: A “goal games” against nature approach. *Computers & Industrial Engineering*, 75, 260–265. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.07.005>
- Zerbib O.D. (2022). A sustainable capital asset pricing model (S-CAPM): Evidence from environmental integration and sin stock exclusion. *Review of Finance*, 26(6), 1345–1388. <https://doi.org/10.1093/rof/rfac045>
- Zhai J. & Helman J.M. (2019). Implications of climate changes to building energy and design. *Sustainable Cities and Society*, 44, 511–519. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.043>

ESG nelle valutazioni immobiliari. Un modello di *portfolio selection* per programmi di retrofit energetico

Francesco Tajani¹, Francesco Sica^{1,*}, Carola Clemente¹, Eugenio Arbizzani¹

¹ Dipartimento di Architettura e Progetto, Università Sapienza, Via Flaminia 359, 00196 Roma, Italia; francesco.tajani@uniroma1.it; francesco.sica@uniroma1.it, carola.clemente@uniroma1.it; eugenio.arbizzani@uniroma1.it

* corresponding author

Parole chiave

fattibilità economico-finanziaria, decarbonizzazione, *Portfolio selection model*, sistema di supporto alle decisioni

Abstract

Le direttive europee sulla finanza sostenibile identificano linee di indirizzo cogenti nella programmazione degli investimenti per la decarbonizzazione del settore immobiliare. Il *Sustainable Finance Disclosure Regulation* regolarizza le modalità di valutazione economica dei progetti individuando i pilastri *Environmental* (E), *Social* (S) e *Governance* (G) quali stilemi tematici di riferimento.

Il tritico ESG costituisce ispirazione nella letteratura scientifica di settore per la proposta e sperimentazione di algoritmi valutativi volti alla costruzione ottimale di portafogli di investimenti. Il presente contributo propone un modello di analisi economico-finanziaria in chiave ESG per programmi di retrofit energetico riferiti al comparto immobiliare esistente. Tale modello assume la configurazione di sistema multi-obiettivo costruito mutuando i formalismi algebrici della Ricerca Operativa, in special modo quelli degli algoritmi di ottimizzazione. Questi algoritmi permettono di costruire relazioni logico-funzionali tali da connotare l'anatomia del modello valutativo sviluppato in termini di funzione obiettivo e vincoli, ad esempio sul target inerente il percorso di decarbonizzazione europeo, o anche sul budget disponibile. L'implementazione del modello ad un caso studio ha restituito una lista di priorità temporale degli asset da efficientare energeticamente, contemperando per ognuno i costi d'intervento, il tempo di ritorno dell'investimento e la produzione di CO₂ post-retrofit.

1. Introduzione

La programmazione europea in materia di finanza sostenibile condiziona ad oggi (2024) i meccanismi di valutazione degli investimenti che sottendono il progresso e lo sviluppo dei comparti merceologici della produzione. Il *Sustainable Finance Disclosure Regulation* (SFDR) (Regolamento EU 2019/2088), il Regolamento 2020/852 sulla Tassonomia Ambientale (Regolamento EU 2020/852), il Piano d'azione per finanziare la crescita sostenibile (COM (2018) 97 finale) individuano indirizzi programmatici per iniziative finanziariamente "sostenibili", ossia operazioni ambientalmente, economicamente e socialmente responsabili a supporto della transizione verso la neutralità climatica (EUCO 29/19).

Tali principi di etica ambientale, economica e sociale a base di investimenti sostenibili assumono ancor più significativa rilevanza nel settore della produzione e della gestione del patrimonio edilizio. Il 75% dello stock attuale non è efficiente dal punto di vista energetico-ambientale (Leonhardt, 2022), e la riduzione delle emissioni climalteranti del 55% entro il 2030 con il loro azzeramento nel 2050,

rappresenta obiettivo complesso da perseguire. Alla riduzione di emissioni corrisponde il minore utilizzo di fonti fossili per la produzione di energia, nonché la necessità di efficientare energeticamente il patrimonio nelle sue componenti durevoli (involucro opaco e trasparente) e tecnologiche (impianti per la produzione e lo stoccaggio di energia, per il riscaldamento, per il raffrescamento e la ventilazione, ecc.). Le misure di sostenibilità introdotte a livello europeo richiedono, dunque, modelli di programmazione degli interventi su asset immobiliari e processi rigenerativi del patrimonio esistente indirizzati ad un comune percorso di decarbonizzazione, volto alla minimizzazione dell'impatto ambientale ed energetico, e, al contempo, alla massimizzazione dei benefici (diretti ed indiretti) sulla qualità di vita della persone, sull'ambiente e sull'economia.

Il Parlamento ed il Consiglio Europeo tracciano le direttrici sulle tipologie di azione da attuare per la messa in atto di investimenti sostenibili delimitando, con il Regolamento 2020/852 sulla Tassonomia Ambientale, target ambientali (*Environmental*, E), ed, in secondo luogo, quelli sociali (*Social*, S) e di governance (*Governance*, G) (Zhai & Michael Helman, 2019; Al-Shetwi, 2022). Il Regolamento 2020/852 individua sei obiettivi ambientali di un investimento sostenibile: 1) mitigazione dei cambiamenti climatici; 2) adattamento ai cambiamenti climatici; 3) uso sostenibile e protezione delle acque e delle risorse marine; 4) transizione verso un'economia circolare; 5) prevenzione e riduzione dell'inquinamento; 6) protezione e ripristino della biodiversità e degli ecosistemi. La piattaforma UE sulla finanza sostenibile (2020) declina il concetto di sostenibilità sociale, comunicata nel 2022 dal Parere del Comitato economico e sociale europeo sul tema «Tassonomia sociale - Sfide e opportunità» (2022/C 486/03), individuando tre macro tematismi di riferimento: 1) lavoro dignitoso; 2) standard di vita e benessere adeguati per gli utenti finali; 3) comunità e società inclusive e sostenibili.

Nel settore delle costruzioni, i criteri ambientali di riferimento per la valorizzazione immobiliare in chiave ESG attengono al binomio "Edificio-Impianto", in particolare ad: i) assicurare la decarbonizzazione del sito riducendo le emissioni di CO₂ localmente; ii) migliorare le prestazioni energetiche complessive del sistema edificio/impianto. Il perseguimento dei criteri i) e ii) produce conseguentemente effetti sul sistema sociale dell'urbano di prossimità: i) potenziando le condizioni di qualità della vita degli utenti finali (*comfort indoor e outdoor*); ii) innalzando il livello di sicurezza e salubrità dell'ambiente costruito (*healthy and safe city*); iii) ottimizzando l'inclusività e accessibilità dei singoli asset.

La riqualificazione ESG del comparto immobiliare (asset) identifica, quindi, una scelta strategica per lo sviluppo della sostenibilità tramite decisioni programmatiche e progettuali degli investimenti in chiave ambientale, sociale e di governance. Le strategie di valorizzazione dell'asset devono risaltare la competizione tra le tre dimensioni ESG considerando, al contempo, l'investimento con le specifiche finanziarie di settore.

La maggior parte dei *Decision-Support System* (DSS) ad oggi sviluppati nell'ambito delle valutazioni immobiliari ESG risultano progettati per indirizzare istituzioni pubbliche e private ad implementare forme di investimento con impatto negativo sull'energia e l'ambiente, strutturando *portfolio* di azioni tra asset in prospettiva della neutralità climatica. La letteratura di riferimento contempera DSS che si concentrano settorialmente sull'analisi finanziaria, o ambientale e/o energetica d'iniziativa ESG, mostrando limiti operativi nel coniugare nelle logiche valutative i target di decarbonizzazione europei con quelli di stampo economico-finanziario (Aitziber et al., 2022; Guardigli et al., 2018; Esmat et al., 2023; Leone & Zuccaro, 2016; Matthew et al., 2023; Mensah, 2019).

Il presente contributo propone la strutturazione di un algoritmo di analisi - DSS integrato - in grado di coniugare parametri ambientali, energetici ed economici pertinenti il medesimo sistema decisionale ESG per la programmazione di investimenti (*portfolio selection model*) finalizzati a valorizzare energeticamente asset immobiliari. Il formalismo matematico specifico della Ricerca Operativa è mutuato nella costruzione delle relazioni logico-funzionali tra i parametri di studio, temperando anche il target di decarbonizzazione *Carbon Risk Real Estate Monitor* (CRREM) dell'Unione Europea che ciascun Paese deve perseguire nel proprio processo decisionale programmatico e strategico di riqualificazione energetica degli asset (Tajani et al., 2024).

Il lavoro è articolato come segue: nella Sezione 2 è proposta una panoramica dello stato dell'arte dei metodi per l'ottimizzazione dei portafogli di asset immobiliari in chiave ESG; la Sezione 3 descrive i componenti chiave dell'algoritmo di analisi ESG proposto; l'applicazione dell'algoritmo a un caso

d'interesse è illustrata nella Sezione 4; le conclusioni del lavoro e le prospettive di sviluppo della ricerca sono presentate nella Sezione 5.

2. Stato dell'arte sui *portfolio selection model* in chiave ESG

A valle del quadro introduttivo prima descritto, la cogenza di dover garantire investimenti sempre più sostenibili implica la ricerca di modelli valutativi da implementare per la costruzione ottimale di portafogli ESG.

In alcuni esempi della letteratura di settore, modelli di *asset allocation* consolidati per l'ottimizzazione di portafogli di investimenti vengono sperimentati per la strutturazione di portafogli ESG (Trenado et al., 2014), come, ad esempio, il modello di Markowitz (Markowitz, 1952), quello di Black & Litterman (Black & Litterman, 1992), il modello di ottimizzazione basato sull'approccio di diversificazione *naïve* (Oikonomou et al., 2018), la strategia di allocazione incentrata sul *timing reward-to-risk* (Anderson et al., 2012; Baker et al., 2011). Alcuni autori propongono anche modelli di *capital asset pricing* "corretti" in chiave ESG, come il modello CAPM sostenibile (Pedersen et al., 2021; Zerbib, 2022), classificando i criteri ESG come fattori di rischio sistematici da ricomprendere in strategie di analisi fattoriale (Kaiser, 2020; Halbritter & Dorfleitner, 2015; Derwall et al., 2005; Fan & Michalski, 2020; Alessi et al., 2021).

In considerazione, però, della concomitanza di aspetti molteplici, la costruzione e la strutturazione di portafogli multi-criterio soddisfa l'esigenza di un output di selezione che includa criteri di diversificata natura, non solo quelli di tipo finanziario. Metodi a criteri multipli vengono applicati nel campo della selezione di portafoglio ESG a partire da Lee & Lerro (1973). Aouni et al. (2018) offrono una review aggiornata al 2018 dell'argomento. Tra i metodi multi-criteriali per ottimizzare i portafogli ESG si riscontrano: l'approccio multi-criteriale lineare (Hallerbach et al., 2004; Sica et al., 2023); quello multi-obiettivo a due fasi basato sul metodo del prezzo edonico con l'implementazione di modelli di programmazione e logica *fuzzy* (Bilbao-Terol et al., 2012); sistemi di programmazione multi-obiettivo che mutuano le logiche della teoria dei giochi (Trenado et al., 2014); il modello di Markowitz a tre fattori (rendimento, rischio e responsabilità sociale imprenditoriale) (Gasser et al., 2017); algoritmi evolutivi multi-obiettivo (Liagkouras et al., 2020; Morano et al., 2024); modelli di *Data Envelopment Analysis* per evidenziare l'interazione tra gli attributi ambientali, sociali e di governance nello studio tra gli asset da allocare e selezionare per la costruzione del portafoglio ottimale (Chen et al., 2021).

Sebbene alcuni casi permettano di costruire portafogli di investimento - prediligendo approcci statistico-probabilistici e/o considerando separatamente aspetti ambientali, sociali e di governance -, si ravvede la mancanza di sistemi operativi basati sulla commistione di aspetti finanziari con quelli ESG. Questa contingenza è correlata, in special modo, alla difficoltà di individuare metriche ESG standardizzate, nonché di definire relazioni funzionali tra le variabili decisionali (finanziarie e non finanziarie).

Allo scopo di fornire uno strumento di supporto per una più efficace contabilizzazione e formalizzazione logico-funzionale, nella presente ricerca si propone un modello di analisi economico-finanziaria ESG finalizzato alla costruzione di portafogli per la decarbonizzazione del comparto immobiliare esistente. Nella definizione del modello sono considerate variabili finanziarie (costo d'investimento di retrofit energetico; tempo di ritorno dell'investimento) ed ambientali (emissioni di CO₂ in atmosfera a seguito delle iniziative di efficientamento energetico; target CRREM di decarbonizzazione per il settore immobiliare). La formalizzazione delle interrelazioni funzionali tra i cluster di variabili di interesse è condotta mutuando la sintassi della programmazione lineare.

3. Materiale e Metodo

Un approccio integrato per valutare la fattibilità economica e finanziaria delle iniziative immobiliari incentrate sull'efficientamento energetico richiede la preliminare determinazione del costo complessivo dell'adeguamento energetico di un singolo edificio (3.1), del periodo di ammortamento dei progetti energetici (3.2), della *carbon footprint* dell'edificio *ante* e *post* programma di retrofit (3.3). Oltre ai vincoli di bilancio, il programma di interventi energetici sugli edifici deve misurare l'impatto

ambientale rispetto all'obiettivo europeo di decarbonizzazione (CREEM). Tra i diversi criteri finanziari per la valutazione degli investimenti, è stato scelto il tempo di ritorno dell'investimento attualizzato (*Payback Period*, PbP), piuttosto che il Valore Attuale Netto (VAN) o il Tasso Interno di Rendimento (TIR), in ragione della rapidità di stima di tale indicatore, specialmente in contesti in cui è richiesto di formulare giudizi di convenienza relativi a periodi di analisi di breve periodo. Il PbP può, inoltre, essere un indicatore di performance utile per comparare progetti alternativi. Sebbene per la stima del VAN e del TIR si tenga conto della redditività complessiva di un progetto, il PbP risulta più immediato per comparare la rapidità di recupero dei costi di investimento in relazione ad alternative progettuali tra cui è necessario operare una scelta.

Per stabilire le priorità degli edifici in base alla disponibilità finanziaria, al costo totale dei programmi di intervento per ciascun compendio e agli impatti energetico-ambientali generati dopo il programma di riqualificazione, è necessario costruire una matrice costi-benefici degli interventi in base ai costi di realizzazione, al periodo di ammortamento dell'investimento di retrofit energetico ed agli obiettivi ambientali (contenimento della produzione totale di CO₂ dell'edificio dopo l'intervento di riqualificazione, in conformità con l'obiettivo di decarbonizzazione del CREEM). Le parti costitutive di queste matrici possono essere accoppiate vicendevolmente per creare connessioni matematiche che siano al contempo elementari ed intelligibili, definendole quindi come componenti centrali dell'algoritmo di ottimizzazione elaborato (3.4). I prossimi paragrafi illustrano i punti 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 dal punto di vista metodologico.

3.1. Analisi dei costi di iniziative di retrofit energetico

I prezzi unitari dei listini ufficiali di riferimento devono essere applicati alle caratteristiche e alle quantità delle categorie di opera del progetto, al fine di stimare il costo dei progetti di retrofit energetico per gli asset da rinnovare. Laddove siano previste lavorazioni specifiche, le valutazioni condotte saranno integrate da indagini di mercato. Mentre è possibile stimare il costo di un intervento di retrofit energetico in modo sintetico - cioè calcolando una voce parametrica per ogni categoria di lavoro che concorre a definire l'intervento complessivo di retrofit energetico - le categorie di riferimento possono essere individuate conducendo ricerche di mercato sulle principali classi di interventi di retrofit energetico per compendi immobiliari comparabili.

Per determinare i costi specifici relativi a progetti di retrofit energetico su edifici esistenti, si è fatto riferimento a quanto riportato in fonti legislative che riguardano la situazione del mercato italiano a cui si rivolge il caso studio considerato: *in primis*, sono stati mutuati i costi pubblicati nel Decreto del 14 febbraio 2022 sulla «Definizione dei costi massimi specifici agevolabili, per alcune tipologie di beni, nell'ambito delle detrazioni fiscali per gli edifici»; per gli interventi di *relamping*, i costi parametrici sono indicati nel Decreto del 16 febbraio 2016 recante «Aggiornamento della disciplina per l'incentivazione di interventi di piccole dimensioni per l'incremento dell'efficienza energetica e per la produzione di energia termica da fonti rinnovabili»; per gli impianti fotovoltaici il costo parametrico è stimato mediante il Decreto Legge Rilancio 34/2020, aggiornato al 2023, articolo 119 (Incentivi per l'efficientamento energetico, *sismabonus*, fotovoltaico e colonnine di ricarica di veicoli elettrici). L'omogenizzazione dei dati è necessaria per confrontare voci di spesa provenienti da fonti legislative diverse. Nella fattispecie, vengono identificate le categorie di lavorazioni d'interesse e rimosse le voci non necessarie (ad esempio, IVA e spese professionali), al fine di uniformare la stima del costo di *retrofitting*.

Partendo dall'intero costo di costruzione del progetto di risparmio energetico dell'asset, è stato costruito il corrispondente Quadro Tecnico-Economico, prendendo in considerazione gli oneri indiretti (onorari professionali, IVA, oneri previdenziali, imprevisti) che concorrono alla definizione del costo di produzione totale dell'investimento di retrofit energetico.

3.2. Tempo di ritorno dell'investimento

Il tempo di ritorno economico dell'investimento (*Payback Period*, PbP) è determinato mutuando la formula che segue:

$$\sum_{t=1}^{PbP} \frac{F_t}{(1+r)^t} = 0$$

in cui:

PbP = tempo di ritorno economico dell'investimento;

F_t = flusso di cassa all'anno t ;

r = saggio di attualizzazione dei flussi di cassa dell'investimento.

La valutazione del PbP può essere condotta mediante l'implementazione di una *Discounted-Cash Flow Analysis* (DCFA). Nella fattispecie, per il caso studio che sarà presentato nella Sezione 4, sono state considerate le seguenti assunzioni per la stima del PbP:

- durante le lavorazioni di valorizzazione energetica, la parte proprietaria continua a percepire canone/i di locazione dal/i *tenant*. Gli interventi di valorizzazione energetica, che coinvolgono anche le strutture interne, possono essere programmati in modo da non interferire significativamente con le attività ordinarie dei *tenant*. Ad esempio, le operazioni potrebbero essere eseguite fuori dagli orari di ufficio o durante i periodi in cui gli spazi sono meno utilizzati, riducendo l'impatto sulle normali attività e garantendo al proprietario la percezione del canone di locazione;
- i costi di gestione della proprietà sono costituiti da IMU, assicurazione, *property management*, accantonamento per spese straordinarie con le quote di reintegrazione, provvigioni per le attività di commercializzazione, aliquote di sfitto ed inesigibilità, imposta di registro. Tali voci di spesa sono determinate in misura percentuale, sulla base dell'ordinario costo sostenuto da un proprietario di tipologie edilizie analoghe ed ubicate nel contesto di riferimento;
- la realizzazione dell'intervento di retrofit energetico si esaurisce nell'ambito del primo anno dell'analisi finanziaria;
- il periodo di analisi considerato nello sviluppo della DCFA per la determinazione del PbP è pari a ventiquattro semestri (ovvero, per un immobile a destinazione residenziale, sei anni minimo con rinnovo automatico di altri sei anni, come per legge);
- i ricavi a seguito degli interventi di valorizzazione energetica sono pari all'attuale *passing rent* dell'*asset*. La stima del PbP è effettuata prescindendo dal *terminal value*, verificando quindi il tempo di ritorno dell'investimento connesso alla sola percezione dei canoni di locazione.

3.3. Stima della *carbon footprint* degli edifici

La Direttiva sul rendimento energetico degli edifici (No. 2018/844/UE EPBD) traccia linee guida per la costruzione di edifici decarbonizzati in Europa. Al fine di perseguire l'obiettivo di edifici a energia quasi zero tra il 2020 e il 2050, gli Stati membri redigono programmi d'azione appropriati, stanziando fondi necessari alla decarbonizzazione del costruito. Tramite il progetto europeo CRREM (2018-2021) è realizzato il *Carbon Risk Real Estate Monitor*, con indicazione per ciascun Paese dell'UE dei target di decarbonizzazione (*Decarbonization Target*, DT) fino al 2050, così da orientare le valutazioni sulla sostenibilità economica ed energetico-ambientale delle iniziative di retrofit energetico.

Il target di decarbonizzazione CRREM è da legare all'impronta di carbonio dell'edificio, che è possibile misurare costruendo un modello energetico dell'edificio da riqualificare. La modellistica energetico-ambientale può essere effettuata, ad esempio, con lo strumento ENEA-SIRE (<https://sire.enea.it/>), che restituisce la stima sommaria delle prestazioni energetiche degli edifici *ante e post* attività, singola o combinata, di riqualificazione. Lo strumento effettua, specificamente, i) la quantificazione dei consumi energetici per diversi usi (climatizzazione invernale; climatizzazione estiva; preparazione dell'acqua calda sanitaria; illuminazione), ii) la stima delle emissioni totali di

CO₂, *ante* e *post* il programma delle iniziative di retrofit energetico.

La misurazione della *carbon footprint* degli asset a base del caso dimostrativo di Sezione 4, sia *ante* sia *post* programma di retrofit energetico, è condotta tramite lo strumento ENEA-SIRE. L'ammontare di CO₂ rilasciata in atmosfera è assunto quale variabile *proxy* dell'impronta ambientale dell'edificio.

3.4. Algoritmo di ottimizzazione

La determinazione del *portfolio* di investimenti che risulti "ottimale" dal punto di vista economico ed energetico-ambientale e per cui allocare interamente, o quota parte, delle proprie disponibilità finanziarie passa attraverso la costruzione di un prospetto che illustri, per l'*i*-esimo asset (A_i , con $i = 1, \dots, n$) i seguenti criteri di valutazione:

- il costo totale del programma d'intervento di retrofit (C_i) espresso in euro;
- il tempo di ritorno economico, misurato in numero di semestri, riferito al programma di interventi sul singolo asset (PbP_i);
- la produzione totale di CO₂, con unità di misura il k/anno, per effetto delle iniziative di riqualificazione su ciascun immobile ($CO2_i$).

La mutua dipendenza logica tra i criteri che descrivono l'investimento di retrofit per *asset* impone il ricorso a metodologie di analisi multi-criteriale, in grado di contemperare congiuntamente molteplici e diversi aspetti del medesimo sistema decisionale. Nel lavoro proposto, si è ricorso all'apparato metodologico-strumentale della Ricerca Operativa, basato sulla strutturazione di algoritmi di analisi volti alla massimizzazione/minimizzazione di funzioni obiettivo specifiche del caso decisionale da risolvere.

Per quanto concerne la composizione di un portfolio di investimenti su interventi di retrofit energetico, la funzione obiettivo di cui tenere conto è del tipo:

$$\sum_{i=1}^n (w_C \cdot C_i + w_{PbP} \cdot PbP_i + w_{CO2} \cdot CO2_i) \cdot A_i \quad (1)$$

in cui compaiono i criteri C_i , PbP_i e $CO2_i$ in corrispondenza di ciascun *asset* A_i che, in base alla consistenza del portfolio da costruire, possono assumere un valore ordinale crescente da 1 a n a secondo del proprio carattere performativo energetico.

Ogni criterio è moltiplicato per un opportuno coefficiente di ponderazione (w). Lo scopo a base del sistema decisionale considerato si sostanzia, per uno specifico budget di investimento, nella definizione della composizione ottimale di *asset* da riqualificare prioritariamente rispetto ad altri e per cui l'espressione (1) restituisce il valore numerico più basso possibile.

La ricerca della combinazione migliore tra *asset* deve passare attraverso il rispetto di alcuni vincoli di diversa natura. Quelli assunti a base dell'algoritmo di analisi proposto nel caso di iniziative di retrofit energetico assumono la formulazione algebrica lineare esplicitata di seguito. In particolare, si tratta di vincoli su:

- le disponibilità finanziarie (*Budget*) da impiegare nella realizzazione del programma di interventi, caratterizzati da un costo totale pari alla sommatoria degli n costi C_i , ciascuno afferente ad uno specifico *asset* A_i , in maniera da individuare gli A_i maggiormente performanti in termini economici ed energetico-ambientali:

$$\sum_{i=1}^n C_i \cdot A_i \leq Budget$$

- l'impatto ambientale, espresso in termini di produzione di CO₂ che gli *asset* A_i , di superficie SUP_i , espressa in metri quadri (mq), generano a seguito del programma di interventi di retrofit. L'impatto complessivo degli A_i che l'algoritmo di analisi proposto restituisce deve ri-

sultare inferiore, o uguale, al target sul livello di decarbonizzazione (DT) del CREEM, misurato in $k\ CO_2e/m^2/anno$, che la destinazione d'uso di *asset* immobiliare d'interesse deve assicurare nell'anno j -esimo di riferimento:

$$\sum_{i=1}^n CO2_i \cdot A_i \leq DT_j \cdot \left(\sum_{i=1}^n SUP_i \cdot A_i \right)$$

- c. la consistenza (G) del portfolio di investimenti, ossia la numerosità minima di asset A_j che il Committente può decidere di voler riqualificare a fronte dei propri interessi, esigenze e disponibilità finanziarie:

$$\sum_{i=1}^n A_i \geq G$$

La funzione obiettivo (1) e i vincoli a , b e c trovano collocazione all'interno del sistema algebrico lineare (2), che sostanzia formalmente l'algoritmo di analisi per la determinazione del *portfolio* ottimale d'investimento in iniziative di retrofit energetico su asset immobiliari:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n (w_C \cdot C_i + w_{PbP} \cdot PbP_i + w_{CO2} \cdot CO2_i) \cdot A_i \\ \sum_{i=1}^n C_i \cdot A_i \leq Budget \\ \sum_{i=1}^n CO2_i \cdot A_i \leq DT_j \cdot \left(\sum_{i=1}^n SUP_i \cdot A_i \right) \\ \sum_{i=1}^n A_i \geq G \end{array} \right. \quad (2)$$

Dal sistema (2) è possibile generare una pleiadi di combinazioni di asset in funzione della consistenza G del *portfolio* desiderata dal Committente, nonché in base ai coefficienti di ponderazione associati ai criteri C_i , PbP_i e $CO2_i$ della funzione obiettivo. L'elaborazione sarà condotta contemporaneamente nel modello il "peso" della riduzione di emissioni di CO_2 tra situazione *ante* e *post* intervento, ponendo in risalto la possibilità di cogliere tramite la struttura matematica dell'algoritmo, l'asset maggiormente performante in termini ambientali.

Nel rispetto del formalismo matematico di sistema (2) è possibile costruire un modello di supporto alle decisioni con cui formalizzare liste di priorità temporale degli asset da riqualificare. La Figura 1 illustra l'interfaccia operativa dell'algoritmo di ottimizzazione, realizzata nell'ambiente di programmazione Excel e strutturata tenendo conto delle relazioni matematiche del sistema (2).

4. Caso dimostrativo

In Tabella 1 è descritto il caso d'analisi, costituito da 16 asset adibiti ad uffici strutturati, riportante, per ciascuno, specifiche su: superficie lorda commerciale totale, tasso di *occupancy*, CO_2 totale *ante*-intervento di retrofit energetico, *passing rent*. I 16 *asset* fanno parte di un fondo immobiliare il cui gestore è interessato ad individuare possibili strategie di retrofit energetico del compendio, conciliando potenzialità di investimento, praticabilità dell'intervento di riqualificazione e valorizzazione finale del bene. Le specifiche di ciascun *asset* sono state raccolte *by desk* tramite attività di consultazione con il gestore del fondo immobiliare di studio.

Per ciascuna delle specifiche suddette, in Tabella 2 si riporta il valore massimo (Max.), minimo

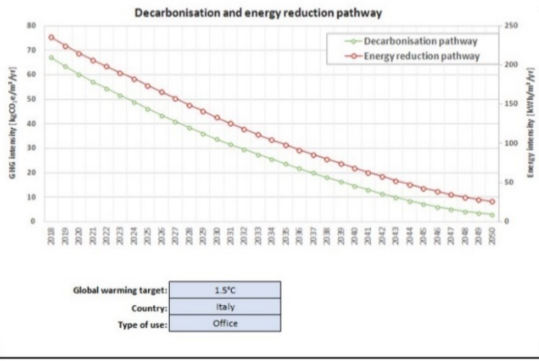
OBJECTIVE FUNCTION:	$\min \sum_{i=1}^{14} (w_{cost} * COST_i + w_{pbp} * PbP_i + w_{co2} * CO2_i) * IN_i$																																																																							
CONSTRAINTS																																																																								
a. BUDGET CONSTRAINT		Δ																																																																						
$\sum_{i=1}^{14} COST_i * IN_i \leq BUDGET$	$\sum_{i=1}^{14} COST_i * IN_i :$	Budget: [€]																																																																						
b. CRREM CONSTRAINT																																																																								
$\left(\sum_{i=1}^{14} CO2_i * x_i \right) \leq DT_{2024} * \left(\sum_{i=1}^{14} SUP_i * x_i \right)$	$\left(\sum_{i=1}^{14} CO2_i * x_i \right) \quad DT_{2024} * \left(\sum_{i=1}^{14} SUP_i * x_i \right)$	Decarbonisation target al 2024* (DT): [KgCO2e/sqm/year]																																																																						
 DECARBONISATION TARGET TOOL The CRREM Decarbonisation Target Tool offers the possibility to assess country- and building-type-specific GHG intensity and energy reduction pathways aligned to limiting global warming to 1.5°C or 2°C  Funded by the Framework PR of the Europe Decarbonisation and energy reduction pathway  Global warming target: 1.5°C Country: Italy Type of use: Office <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Whole building GHG intensity pathway:</th> </tr> <tr> <th>Year</th> <th>kgCO₂e/m²/yr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2018</td><td>67.1</td></tr> <tr><td>2019</td><td>63.5</td></tr> <tr><td>2020</td><td>60.3</td></tr> <tr><td>2021</td><td>57.2</td></tr> <tr><td>2022</td><td>54.4</td></tr> <tr><td>2023</td><td>51.6</td></tr> <tr><td>2024</td><td>48.8</td></tr> <tr><td>2025</td><td>46.1</td></tr> <tr><td>2026</td><td>43.5</td></tr> <tr><td>2027</td><td>40.9</td></tr> <tr><td>2028</td><td>38.4</td></tr> <tr><td>2029</td><td>36.1</td></tr> <tr><td>2030</td><td>33.8</td></tr> <tr><td>2031</td><td>31.6</td></tr> <tr><td>2032</td><td>29.5</td></tr> <tr><td>2033</td><td>27.5</td></tr> <tr><td>2034</td><td>25.5</td></tr> <tr><td>2035</td><td>23.7</td></tr> <tr><td>2036</td><td>21.8</td></tr> <tr><td>2037</td><td>20.0</td></tr> <tr><td>2038</td><td>18.2</td></tr> <tr><td>2039</td><td>16.4</td></tr> <tr><td>2040</td><td>14.7</td></tr> <tr><td>2041</td><td>13.0</td></tr> <tr><td>2042</td><td>11.4</td></tr> <tr><td>2043</td><td>9.9</td></tr> <tr><td>2044</td><td>8.5</td></tr> <tr><td>2045</td><td>7.2</td></tr> <tr><td>2046</td><td>6.1</td></tr> <tr><td>2047</td><td>5.1</td></tr> <tr><td>2048</td><td>4.3</td></tr> <tr><td>2049</td><td>3.6</td></tr> <tr><td>2050</td><td>3.0</td></tr> </tbody> </table>			Whole building GHG intensity pathway:		Year	kgCO ₂ e/m ² /yr	2018	67.1	2019	63.5	2020	60.3	2021	57.2	2022	54.4	2023	51.6	2024	48.8	2025	46.1	2026	43.5	2027	40.9	2028	38.4	2029	36.1	2030	33.8	2031	31.6	2032	29.5	2033	27.5	2034	25.5	2035	23.7	2036	21.8	2037	20.0	2038	18.2	2039	16.4	2040	14.7	2041	13.0	2042	11.4	2043	9.9	2044	8.5	2045	7.2	2046	6.1	2047	5.1	2048	4.3	2049	3.6	2050	3.0
Whole building GHG intensity pathway:																																																																								
Year	kgCO ₂ e/m ² /yr																																																																							
2018	67.1																																																																							
2019	63.5																																																																							
2020	60.3																																																																							
2021	57.2																																																																							
2022	54.4																																																																							
2023	51.6																																																																							
2024	48.8																																																																							
2025	46.1																																																																							
2026	43.5																																																																							
2027	40.9																																																																							
2028	38.4																																																																							
2029	36.1																																																																							
2030	33.8																																																																							
2031	31.6																																																																							
2032	29.5																																																																							
2033	27.5																																																																							
2034	25.5																																																																							
2035	23.7																																																																							
2036	21.8																																																																							
2037	20.0																																																																							
2038	18.2																																																																							
2039	16.4																																																																							
2040	14.7																																																																							
2041	13.0																																																																							
2042	11.4																																																																							
2043	9.9																																																																							
2044	8.5																																																																							
2045	7.2																																																																							
2046	6.1																																																																							
2047	5.1																																																																							
2048	4.3																																																																							
2049	3.6																																																																							
2050	3.0																																																																							
c. CONSISTENCY CONSTRAINT																																																																								
$\left(\sum_{i=1}^{14} x_i \right) \leq CONSISTENCY$		Consistency:																																																																						

Figura 1. Interfaccia operativa dell’algoritmo di ottimizzazione in Excel.

Tabella 1. Costi di restauro di dodici interventi nel Parco Archeologico di Pompei

Asset	Superficie lorda commerciale totale [m²]	Occupancy [%]	CO ₂ totale ante-intervento [k/ anno]	Passing Rent [€/m² • mese]
1	16.100	100	948.865	17,15
2	14.700	100	174.091	39,71
3	2.100	100	98.543	31,56
4	2.400	77	11.268	57,40
5	5.100	100	38.344	32,25
6	11.300	100	775.830	36,44
7	12.800	81	353.771	21,47
8	12.000	93	97.337	30,82
9	30.000	100	550.322	8,24
10	8.200	100	439.524	20,37
11	10.122	8	89.503	10,49
12	7.200	100	155.864	25,18
13	33.000	100	687.643	10,50
14	9.900	100	83.020	20,34
15	8.500	100	152.233	31,62
16	8.200	82	139.267	11,52

(Min.) nonché la stima della media (Media) e Deviazione Standard (Dev.St.) della serie numerica corrispondente. Dai risultati dell'analisi statistico-descrittiva effettuata si evince che: la superficie lorda commerciale media è pari a 11.976 m²; gli asset da riqualificare energeticamente sono mediamente occupati da tenant per il 90% della consistenza totale; in mancanza di interventi di retrofit energetico la produzione media di CO₂ dell'intero comparto immobiliare è pari a 299.714 k/anno; il *passing rent* medio del gruppo di asset di studio è pari a 25,32 €/m²•mese, ovvero 310,30 €/m²•anno

Tabella 2. Analisi statistico-descrittiva delle specifiche caratterizzanti il campione di studio

	Superficie lorda commerciale totale [m ²]	Occupancy [%]	CO ₂ totale ante-intervento [k/ anno]	Passing Rent [€/m ² • mese]
Max.	33.000	100	948.865	57,40
Min.	2.100	8	11.268	8,2
Media	11.976	90	299.714	25,32
Dev.St.	8.563,91	23	293.473,47	13,09

In Tabella 3 sono riportate, per ciascun asset, le categorie d'opera che concorrono a definire il programma di valorizzazione energetica da attuare.

Tabella 3. Prospetto delle categorie d'intervento per ciascun asset

	ASSET															
CATEGORIA D'INTERVENTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Isolamento coperture																
Esterno					x			x			x	x	x	x	x	
Interno																
Copertura ventilata																
Isolamento pavimenti																
Esterno												x				
Interno/terreno								x					x			
Isolamento pareti perimetrali																
Esterno/diffusa								x				x	x			
Interno																
Parete ventilata																
Sostituzione di chiusure trasparenti, comprensive di infissi																
Facciata continua senza schermature					x			x				x	x			
Facciata continua senza schermature piano strada (vetrine)			x					x				x	x			
Serramento								x							x	
Serramento + chiusura oscurante (persiana, tapparelle, scuro)			x		x							x	x		x	
Installazione di sistemi di schermature solari e/o ombreggiamenti mobili comprensivi di eventuali meccanismi automatici di regolazione								x				x	x			

Segue **Tabella 3**. Prospetto delle categorie d'intervento per ciascun asset

	ASSET															
CATEGORIA D'INTERVENTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Impianti a collettori solari																
Scoperti																
Piani vetrati																
Sottovuoto e a concentrazione																
Impianti di riscaldamento con caldaie ad acqua a condensazione e/o generatori di aria calda a condensazione																
$P_{nom} \leq 35$																
$P_{nom} > 35$																
Impianti con micro-cogeneratori																
Motore endotermico / altro																
Celle a combustibile																
Impianti con pompe di calore																
Compressione di vapore elettriche o azionate da motore primo e pompe di calore ad assorbimento																
Aria/Aria					x	x		x				x			x	
Altro																
Pompe di calore geotermiche																
Impianti con sistemi ibridi																
Impianti con generatori di calore alimentati a biomasse combustibili																
$P_{nom} \leq 35\text{kWt}$																
$P_{nom} > 35\text{kWt}$																
Impianti di produzione di acs con scaldacqua a pompa di calore																
Accumulo $\leq 150\text{ l}$			x	x	x	x		x			x	x	x	x	x	
Accumulo $> 150\text{ l}$								x								
Installazione di tecnologie di <i>building automation</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Relamping	x	x	x	x	x	x		x	x		x	x	x	x	x	
Installazione di impianto fotovoltaico		x			x	x		x		x	x	x	x	x	x	
Colonnine ricarica elettrica																
Fino a 8 colonnine		x	x						x					x		
Oltre 8 colonnine						x		x				x				

A valle del sistema informativo di Tabella 1 e Tabella 3, si procede alla stima dei costi di produzione, del *Payback Period* (*PbP*) e della produzione totale di CO_2 a seguito dell'intervento di valorizzazione per ciascun asset del caso studio. Nello specifico:

- i costi di produzione per asset vengono stimati in funzione delle categorie d'intervento di Tabella 3;
- per la stima del *PbP*, sia i ricavi sia i costi di gestione sono aggiornati mediante un opportuno tasso di inflazione (pari al 5% al secondo anno, al 3,5% al terzo anno ed al 2% negli anni

successivi), mentre i *cash flow* dell'operazione sono stati attualizzati mediante un tasso di sconto che riflette la rischio specificità dell'investimento, funzione delle consistenze, dell'ubicazione, della durata del contratto di locazione, nonché delle prospettive inflazionistiche e delle aspettative del mercato immobiliare relative alla zona d'interesse. Nella logica del *Weighted Average Cost of Capital* (WACC), si ipotizza una struttura finanziaria composta dal 40% di mezzi propri ed il 60% di mezzi di terzi e si assume, quali tassi "risk free":

- BTP a 10 anni (media mobile ultimi 12 mesi): 3,946% (mezzi propri);
- EURIRS a 10 anni (media mobile ultimi 12 mesi): 2,609% (mezzi terzi).

I tassi di attualizzazione impiegati nella stima del *PbP* di ciascun asset sono raccolti in Tabella 4;

- la misurazione della *carbon footprint* degli asset, ossia l'ammontare di CO₂ *post* intervento di retrofit energetico, è condotta per mezzo dello strumento ENEA-SIRE.

Le stime delle tre variabili di interesse (costi di retrofit energetico, *PbP*, CO₂ *post*-intervento) sono riportate, per ciascun asset del *portfolio* considerato, nella matrice costi-benefici di Tabella 5.

Tabella 4. Prospetto dei tassi di attualizzazione applicati nella stima del *PbP* dei 16 asset di studio

ASSET	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Tasso di attualizzazione annuo [%]	6,90	6,85	6,40	6,40	6,50	6,45	6,80	6,60	6,60	8,90	7,10	7,10	8,30	7,20	8,10	7,20

Tabella 5. Matrice costi-benefici del programma di retrofit energetico del comparto immobiliare di analisi

	Costi di retrofit energetico [€]	<i>PbP</i> [n. di semestri]	CO ₂ totale <i>post</i> intervento [k/anno]
1	1.618.628,80	2	895.224
2	1.776.468,03	2	106.674
3	580.999,69	2	87.312
4	181.934,27	1	10.469
5	727.673,79	1	32.682
6	6.127.404,87	3	586.539
7	4.063.662,82	5	213.039
8	610.952,77	1	91.246
9	12.825.684,03	13	302.180
10	1.291.840,86	2	377.415
11	980.560,35	2	82.016
12	1.092.042,87	2	121.796
13	20.431.006,34	18	447.253
14	4.424.128,41	6	47.744
15	1.195.265,12	2	122.019
16	5.400.240,16	18	83.732

Le elaborazioni riassunte in Tabella 5 costituiscono apparato conoscitivo basilare per l'implementazione dell'algoritmo di analisi multi-criteri. Per mezzo del sistema operativo di Figura 1 costruito nell'ambiente di programmazione di Excel vengono formalizzate le liste di priorità temporale degli asset da riqualificare. Il posizionamento dell'asset in comparti *low-high ranking* della lista è

funzione della propria capacità performante di perseguire gli obiettivi prestabiliti, che nel caso sono: *i)* minimizzare i costi totali di retrofit energetico; *ii)* limitare il tempo di ritorno dell'investimento ad un arco temporale il più basso e contenuto possibile; *iii)* garantire una produzione di CO₂ totale all'anno per effetto delle azioni di valorizzazione energetica degli edifici secondo i target annuali di decarbonizzazione immobiliare CRREM (*Decarbonization Target*, DT).

Al fine di testare la validità dell'algoritmo elaborato per la costruzione di *portfolio* di investimenti *green-based* a bassa produzione di CO₂ in ambiente *inside/outside*, sono forniti due esempi di liste di priorità temporale, rispettivamente con DT riferiti all'anno 2024 (DT = 48,8 k CO₂e/m²/anno) ed all'anno 2030 (DT = 33,8 k CO₂e/m²/anno). I target CRREM ai due momenti temporali citati (2024 e 2030) sono stati definiti, oltre che per evidenziare le potenzialità di utilizzo dello strumento analitico illustrato, al fine di stabilire priorità per analisi utili nel breve-medio periodo, in linea con gli obiettivi di sviluppo sostenibile, come la neutralità energetica e climatica da raggiungere entro il 2030.

I risultati ottenuti dall'implementazione del modello per i due casi prospettati sono riportati in Tabella 6. Gli asset prioritari da riqualificare energeticamente che performano all'*optimum* il raggiungimento degli obiettivi suddetti *i)*, *ii)* e *iii)* sono indicati con numero cardinale romano crescente.

In Tabella 7 sono riportati gli output generati dall'applicazione del modello di ottimizzazione, considerando, per ciascun asset, l'importanza della riduzione di CO₂ conseguente agli interventi di efficientamento energetico: in particolare, le produzioni di CO₂ *post* intervento sono moltiplicate per il complemento ad «1» delle rispettive riduzioni percentuali di emissioni inquinanti, in maniera che l'algoritmo pesi maggiormente, nell'elaborazione finalizzata alla migliore performance ambientale, le soluzioni che determinano impatti energetici positivi più elevati.

Tabella 6. Ordinamento degli asset in relazione al *decarbonization-pathway* CRREM del 2024 e 2030

ASSET prioritari (DT ₂₀₂₄ = 48,8 k CO ₂ e/m ² /anno)															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
III	II	IV	VI	IX	VII	V	XIV	VIII	X	XI	XVI	XV	XII	XIII	I

ASSET prioritari (DT ₂₀₃₀ = 33,8 k CO ₂ e/m ² /anno)															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
II	I	III	V	IX	VII	VI	XIV	VIII	X	XI	XVI	XV	XII	XIII	IV

Tabella 7. Ordinamento degli asset in relazione al *decarbonization-pathway* CRREM del 2024 e 2030 e contemperando il peso della riduzione percentuale di CO₂.

ASSET prioritari (DT ₂₀₂₄ = 48,8 k CO ₂ e/m ² /anno)															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
XVI	IV	V	II	XIV	XI	VII	XII	XIII	VI	IX	XV	III	X	VIII	I

ASSET prioritari (DT ₂₀₃₀ = 33,8 k CO ₂ e/m ² /anno)															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
XVI	IV	V	II	XIV	XI	VII	XII	XIII	VI	IX	XV	III	X	VIII	I

5. Conclusioni

L'attuale e diffusa esigenza di includere, nella programmazione degli investimenti, il sistema tri-dimensionale ESG impone la formulazione di modelli valutativi volti alla definizione di soluzioni di compromesso tra aspetti plurimi (ambientali, sociali e di governance) ed interessi finanziari. Tale obiettivo diventa inderogabile anche nel caso in cui ci si trovi ad operare sul costruito, in considerazione delle linee programmatiche internazionali in materia di decarbonizzazione CRREM e neutralità climatica da perseguire entro il 2050.

L'implementazione dell'algoritmo sviluppato consente di identificare l'ordinamento ottimale degli asset da riqualificare, in ragione dei costi di investimento, del tempo di ritorno dello stesso, della produzione totale di CO₂ a seguito degli interventi di retrofit energetico comparata con gli obiettivi di emissione previsti dal CRREM. In particolare, rispetto agli obiettivi CRREM 2024, si evince che l'algoritmo premia gli asset con costi di investimento e tempi di ritorno maggiormente contenuti, mentre se si considerano gli obiettivi più stringenti del CRREM al 2030, per l'algoritmo diventa cogente riconoscere una maggiore importanza agli asset in grado di soddisfare i target di decarbonizzazione. L'elaborazione condotta temperando nel modello il "peso" della riduzione di emissioni di CO₂ tra situazione *ante* e *post* intervento ha posto in risalto che la struttura matematica dell'algoritmo è in grado di cogliere le maggiori rilevanze nella definizione dell'ordinamento finale, laddove l'asset sia caratterizzato da una riduzione di emissioni di CO₂ maggiormente performante.

La natura mutevole delle preferenze degli investitori e delle condizioni di mercato configura senz'altro ulteriori livelli di complessità evidenziando limiti e potenzialità di sviluppo dell'algoritmo di analisi proposto per la costruzione ottimale di portafogli d'investimento. Possibili approfondimenti della ricerca potranno concernere lo studio di soluzioni di investimento "robuste" in schemi interattivi di ottimizzazione multi-obiettivo, che consentano progressivamente agli operatori coinvolti di fornire informazioni sulle loro preferenze, in ragione delle condizionalità dei contesti decisionali soggetti a repentini e spesso imprevedibili fluttuazioni delle variabili in gioco.

Contributo degli autori

Il lavoro va attribuito in parti uguali agli Autori.

Bibliografia

- Aitziber E., Tor B. & Jose Luis I. (2022). Incremental decision making for historic urban areas' energy retrofitting: EFFESUS DSS. *Journal of Cultural Heritage*, 54, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.01.011>
- Al-Shetwi A. (2022). Sustainable development of renewable energy integrated power sector: Trends, environmental impacts, and recent challenges. *Science of The Total Environment*, 822, 153645. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153645>
- Alessi L., Ossola E. & Panzica R. (2021). What greenium matters in the stock market? The role of greenhouse gas emissions and environmental disclosures. *Journal of Financial Stability*, 54, 100869. <https://doi.org/10.1016/j.jfs.2021.100869>
- Anderson R. M., Bianchi S.W. & Goldberg L.R. (2012). Will my risk parity strategy outperform? *Financial Analysts Journal*, 68(6), 75–93. <https://doi.org/10.2469/faj.v68.n6.7>
- Aouni B., Doumpos M., Perez-Gladish B. & Steuer R.E. (2018). On the increasing importance of multiple criteria decision aid methods for portfolio selection. *Journal of the Operational Research Society*, 69(10), 1525–1542. <https://doi.org/10.1080/01605682.2018.1475118>
- Baker M., Bradley B. & Wurgler J. (2011). Benchmarks as limits to arbitrage: Understanding the low-volatility anomaly. *Financial Analysts Journal*, 67(1), 40–54. <https://doi.org/10.2469/faj.v67.n1.4>
- Bilbao-Terol A., Arenas-Parra M. & Canal-Fernandez V. (2012). Selection of socially responsible portfolios using goal programming and fuzzy technology. *Information Sciences*, 189, 110–125. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2011.12.001>
- Black, F. & Litterman R. (1992). Global portfolio optimization. *Financial Analysts Journal*, 48(5), 28–43. <https://doi.org/10.2469/faj.v48.n5.28>

- Chen L., Zhang L., Huang J., Xiao H. & Zhou Z. (2021). Social responsibility portfolio optimization ESG in the real estate valuations. A portfolio selection model for energy retrofit programs incorporating ESG criteria. *Journal of Management Science and Engineering*, 6(1), 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.jmse.2021.02.005>
- COM. (2018). *Piano d'azione per finanziare la crescita sostenibile: EUR-Lex - 52018DC0097*. Disponibile su <https://eur-lex.europa.eu> (ultimo accesso: 10 maggio 2024).
- Decreto del 14 Febbraio. (2022). *Definizione dei costi massimi specifici agevolabili, per alcune tipologie di beni, nell'ambito delle detrazioni fiscali per gli edifici*. Disponibile su <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2022/03/16/22A01629/sg> (ultimo accesso: 10 maggio 2024).
- Decreto del 16 Febbraio. (2016). *Aggiornamento della disciplina per l'incentivazione di interventi di piccole dimensioni per l'incremento dell'efficienza energetica e per la produzione di energia termica da fonti rinnovabili*. Disponibile su <https://biblus.acca.it/download/art-119-del-decreto-rilancio-superbonus-110/> (ultimo accesso: 10 maggio 2024).
- Decreto Legge Rilancio 34/2020. (2020). *Incentivi per l'efficientamento energetico, sismabonus, fotovoltaico e colonnine di ricarica di veicoli elettrici*. Disponibile su <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2016/03/02/16A01548/sg> (ultimo accesso: 10 maggio 2024).
- Derwall J., Guenster N., Bauer R. & Koedijk K. (2005). The eco-efficiency premium puzzle. *Financial Analysts Journal*, 61(2), 51–63. <https://doi.org/10.2469/faj.v61.n2.2716>
- Direttiva (EU) 2018/844. (2018). *Direttiva 2018/844*. EUR-Lex. Disponibile su <https://eur-lex.europa.eu> (ultimo accesso: 10 maggio 2024).
- EUCO 29/19. (2019). *Documento del Consiglio Europeo*. Disponibile su <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-29-2019-INIT/en/pdf> (ultimo accesso: 10 maggio 2024).
- Esmat A., Ghiassi-Farrokhfal Y., Gunkel P.A. & Bergaentzlé C.M. (2023). A decision support system for green and economical individual heating resource planning. *Applied Energy*, 347, 121442. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121442>
- Fan J.H. & Michalski L. (2020). Sustainable factor investing: Where doing well meets doing good. *International Review of Economics & Finance*, 70, 230–256. <https://doi.org/10.1016/j.iref.2020.07.013>
- Gasser S.M., Rammerstorfer M. & Weinmayer K. (2017). Markowitz revisited: Social portfolio engineering. *European Journal of Operational Research*, 258(3), 1181–1190. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.10.043>
- Guardigli L., Bragadin M.A., Della Fornace F., Mazzoli C. & Prati D. (2018). Energy retrofit alternatives and cost-optimal analysis for large public housing stocks. *Energy & Buildings*, 166, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.003>
- Halbritter G. & Dorfleitner G. (2015). The wages of social responsibility—Where are they? A critical review of ESG investing. *Review of Financial Economics*, 26, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.rfe.2015.03.004>
- Hallerbach W., Ning H., Soppe A. & Spronk J. (2004). A framework for managing a portfolio of socially responsible investments. *European Journal of Operational Research*, 153(2), 517–529. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00172-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00172-3)
- Kaiser L. (2020). ESG integration: Value, growth and momentum. *Journal of Asset Management*, 21(1), 32–51. <https://doi.org/10.1057/s41260-019-00148-y>
- Lee S. M. & Lerro A. (1973). Optimizing the portfolio selection for mutual funds. *The Journal of Finance*, 28(5), 1087–1101. <https://doi.org/10.2307/2978750>
- Leone M. & Zuccaro G. (2016). Seismic and energy retrofitting of residential buildings: A simulation-based approach. *Journal of Urban Planning, Landscape and Environmental Design*, 1, 11–25. <https://doi.org/10.6093/2531-9906/5030>
- Leonhardt R., Noble B., Poelzer G., Fitzpatrick P., Belcher K. & Holdmann G. (2022). Advancing local energy transitions: A global review of government instruments supporting community energy. *Energy Research & Social Science*, 83, 102350. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102350>
- Liagkouras K., Metaxiotis K. & Tsihrintzis G. (2020). Incorporating environmental and social considerations into the portfolio optimization process. *Annals of Operations Research*, 316, 1–26. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03554-3>
- Matthew Q., Chunguang B., Amin M., Weihao H., Wei C. & Osayuwamen O. (2023). Designing a decision support tool for integrating ESG into the natural resource extraction industry for sustainable development using the ordinal priority approach. *Resources Policy*, 85, 103988.

- <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103988>
- Markowitz H. (1952). Portfolio selection. *Journal of Finance*, 7, 77–91.
- Mensah J. (2019). Sustainable development: Meaning, history, principles, pillars, and implications for human action: Literature review. *Cogent Social Sciences*, 5, 1–21. <https://doi.org/10.1080/23311886.2019.1653531>
- Morano P., Tajani F., Di Liddo F. & Amoruso P. (2024). A feasibility analysis of energy retrofit initiatives aimed at the existing property assets decarbonisation. *Sustainability*, 16(8), 3204. <https://doi.org/10.3390/su16083204>
- Oikonomou I., Platanakis E. & Sutcliffe C. (2018). Socially responsible investment portfolios: Does the optimization process matter? *The British Accounting Review*, 50(4), 379–401. <https://doi.org/10.1016/j.bar.2017.10.003>
- Pedersen L.H., Fitzgibbons S. & Pomorski L. (2021). Responsible investing: The ESG-efficient frontier. *Journal of Financial Economics*, 142(2), 572–597. <https://doi.org/10.1016/j.jfineco.2020.11.001>
- Regolamento (UE) 2019/2088. (2019). *Relativo all'informativa sulla sostenibilità nel settore dei servizi finanziari*. Disponibile su <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/2088/oj> (ultimo accesso: 10 maggio 2024).
- Regolamento (UE) 2020/852. (2020). *Istituzione di un quadro che favorisce gli investimenti sostenibili e recante modifica del regolamento (UE) 2019/2088*. Disponibile su <http://data.europa.eu/eli/reg/2020/852/oj> (ultimo accesso: 10 maggio 2024).
- Sica F., Tajani F., Sáez-Pérez M.P. & Marín-Nicolás J. (2023). Taxonomy and indicators for ESG investments. *Sustainability*, 15(22), 15979. <https://doi.org/10.3390/su152215979>
- Tajani F., Sica F., Morano P., Locurcio M. & Roma A. (2024). An evaluation method of the building decarbonization process at the international level. In Gervasi O., Murgante B., Garau C., Taniar D., Rocha C.A.M.A. & Faginas Lago M.N. (Eds.), *International Conference on Computational Science and Its Applications* (pp. 126–142). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65273-8_9
- Trenado M., Romero M., Cuadrado M.L. & Romero C. (2014). Corporate social responsibility in portfolio selection: A “goal games” against nature approach. *Computers & Industrial Engineering*, 75, 260–265. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.07.005>
- Zerbib O.D. (2022). A sustainable capital asset pricing model (S-CAPM): Evidence from environmental integration and sin stock exclusion. *Review of Finance*, 26(6), 1345–1388. <https://doi.org/10.1093/rof/rfac045>
- Zhai J. & Michael Helman J. (2019). Implications of climate changes to building energy and design. *Sustainable Cities and Society*, 44, 511–519. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.043>

