

*The Valuation of Energy Retrofit Measures
in Public Housing: a Hierarchical Approach*

LA VALUTAZIONE DI MISURE DI RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA NELL'EDILIZIA RESIDENZIALE PUBBLICA: UN APPROCCIO GERARCHICO

Chiara D'Alpaos, Paolo Bragolusi

Dipartimento ICEA, Università degli Studi di Padova, via Francesco Marzolo, 9 - 35131, Padova, Italia

chiara.dalpaos@unipd.it; paolo.bragolusi@dicea.unipd.it

Abstract

In this paper we provide a multiple criteria model, based on the Analytic Hierarchy Process (AHP), to rank alternative packages of energy retrofit measures (ERMs). Following the AHP methodology, a hierarchy was created and a group of experts ranked all the elements of the hierarchy at each level. The prioritization of ERMs was set as the goal at the top of the hierarchy, three families of criteria (i.e., economic, environmental and social) and a set of sub-criteria were identified, whereas at the lower level of the hierarchy alternative packages of implementable ERMs are positioned. We found that Economic criteria play a major role in the achievement of the goal, in addition the Life Cycle Cost (LCC) of the building emerged as the most important sub-criterion. Thermal insulation of the building envelope resulted as the most important alternative: it contributes to minimization of management and maintenance costs and ensures thermal comfort throughout the useful life of the building. Specifically, the cost-effectiveness of this ERM may significantly contribute to reduce fuel poverty.

KEY WORDS: Buildings Energy Retrofit, Public Housing, AHP

1. Introduzione

Il settore edilizio in Europa è responsabile di circa il 40% del consumo totale di energia primaria e di circa il 20% delle emissioni di gas serra, prevalentemente associate al consumo di energia per il riscaldamento e il raffrescamento [1-3]. Le città ospitano la quota parte maggiore della popolazione mondiale e del patrimonio edilizio e [3-4] rappresentano, quindi, uno dei target primari per l'implementazione di politiche volte alla mitigazione degli effetti dei cambiamenti climatici e al miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici.

Sebbene, oggi, i nuovi edifici siano progettati secondo criteri di alta efficienza energetica e siano perciò caratterizzati da un consumo energetico quasi nullo (Nearly Zero Energy Buildings, NZEBs), la vera sfida a livello mondiale risulta essere quella della riqualificazione energetica del patrimonio immobiliare esistente, che rappre-

senta la larga maggioranza del patrimonio immobiliare complessivo ed è responsabile di oltre il 60% dei consumi di energia primaria e del 75% delle emissioni di CO₂ [5-10].

Il Quadro 2030 per il Clima e l'Energia, la Strategia Energetica Nazionale (SEN) e il Piano Nazionale per l'Efficienza Energetica [11] individuano il settore edilizio come un settore chiave per il raggiungimento degli obiettivi 2030 e 2050 fissati dal Governo in ottemperanza alle direttive europee. Il patrimonio immobiliare italiano è tra i più vecchi d'Europa e risulta essere uno dei meno efficienti dal punto di vista energetico. In Italia, il settore residenziale è responsabile, infatti, di oltre il 30% del consumo complessivo di energia primaria, essendo il 76% delle abitazioni stato costruito prima del 1981: quasi il 90% del patrimonio edilizio italiano manifesta un'eccessiva domanda di energia [12].

L'individuazione e l'implementazione di misure di riqualifi-

cazione energetica degli edifici è un processo complesso, nel quale sono coinvolti molteplici attori e numerose variabili decisionali. Tale complessità aumenta nel caso di interventi di riqualificazione di edilizia residenziale pubblica [13-19] ed è esacerbata, in particolar modo in Italia, per la presenza di stringenti vincoli di bilancio e la mancanza di risorse finanziarie pubbliche [20-22].

Importanti studi a livello Europeo hanno dimostrato l'importanza dell'utilizzo di approcci integrati nell'ambito della progettazione e della realizzazione di investimenti in riqualificazione e ristrutturazione dello stock residenziale pubblico, che devono avere come obiettivi cardine da raggiungere la sostenibilità ambientale, la creazione di identità urbana e la diminuzione del disagio sociale, offrendo allo stesso tempo standard abitativi di alta qualità di [4, 23-24]. In un siffatto contesto, in cui il processo decisionale inerente l'individuazione di strategie ottimali di riqualificazione energetica degli edifici deve contemperare molteplici obiettivi (in primis il risparmio energetico, il comfort termico dell'abitazione e la compatibilità dell'intervento con la struttura esistente), gli approcci di valutazione multicriteriali risultano essere uno strumento efficace per risolvere problemi complessi in cui vanno considerati non solo gli aspetti tecnici ed economici, ma anche quelli di carattere sociale e ambientale.

Nel presente lavoro, vengono analizzate diverse misure di retrofit energetico che possono essere implementate nell'ambito dell'edilizia residenziale pubblica e viene proposto un modello di analisi gerarchica basato sull'Analytic Hierarchy Process [25] per ordinare tali alternative, dalla migliore alla peggiore, in ragione di un insieme di criteri individuati sulla base della letteratura e dei giudizi di un panel di esperti.

Il contributo si articola come segue. Nel paragrafo 2 sono illustrati i fondamenti teorico-metodologici dell'Analytic Hierarchy Process; nel paragrafo 3 è presentato il modello e sono discussi i risultati; le considerazioni conclusive sono riportate nel paragrafo 4.

2. L'Analytic Hierarchy Process

La riqualificazione energetica degli edifici esistenti gioca un ruolo primario nella mitigazione degli impatti negativi dei cambiamenti climatici. L'efficienza energetica del patrimonio edilizio può essere migliorata attraverso l'implementazione di differenti strategie di intervento, che consistono essenzialmente nell'adozione di misure atte a ridurre i consumi e di tecnologie a bassa emissione di carbonio. Il relativo processo di selezione può risultare, tuttavia, molto complesso [26, 10].

In particolare, le decisioni relative all'implementazione di strategie di retrofit energetico nel campo nell'edilizia residenziale pubblica implicano la necessità di prendere in considerazione obiettivi e criteri tra loro spesso conflit-

tuali. Approcci di valutazione multicriteriali sono stati ampiamente proposti in letteratura per la selezione di tecnologie verdi e per supportare le scelte progettuali relative alla realizzazione di edifici a basse emissioni di carbonio [27-29]. Tra le differenti metodologie di analisi multicriteriale, l'Analytic Hierarchy Process (AHP), proposta da Saaty negli anni Ottanta [25], si è rivelata una metodologia ampiamente consolidata e utilizzata nella soluzione di problemi decisionali complessi, che generalmente richiede conoscenze diverse e multidisciplinari in numerosi ambiti di ricerca [30-33].

L'AHP consente di misurare e valutare criteri e fattori tangibili e/o intangibili, assumendo che il decisore (decision-maker) sia sempre in grado di esprimere una preferenza e dare un giudizio sulla base dell'importanza relativa (o preferenza) dei parametri di valutazione, che caratterizzano e descrivono il problema decisionale.

L'AHP consente di decomporre il problema decisionale iniziale in sotto-problemi attraverso la definizione di una gerarchia, una struttura ad albero, costituita da più livelli, tra i quali vi è una relazione gerarchica unidirezionale. Il vertice della gerarchia è rappresentato dall'obiettivo (goal), ai livelli inferiori sono collocati i criteri e i sotto-criteri (attributi) che contribuiscono al raggiungimento dell'obiettivo, mentre al livello più basso della struttura ad albero sono collocate le alternative da valutare [34, 10]. Una volta definiti i criteri e raccolti i dati di input della matrice di valutazione per ciascuna alternativa, è possibile creare un ordinamento delle alternative (dalla migliore alla peggiore), che vengono valutate rispetto agli attributi, i sotto-criteri e i criteri che definiscono la gerarchia.

L'importanza relativa degli attributi è determinata attraverso la compilazione di una serie di matrici (una per ogni nodo decisionale) dei confronti a coppie, espressi attraverso giudizi semantici, che vengono convertiti in valori numerici in accordo con la scala fondamentale di Saaty [25]. Nei confronti a coppie, gli esperti esprimono le loro preferenze sulla base dell'importanza relativa di un criterio rispetto ad un altro ai fini del raggiungimento dell'obiettivo o, più in generale, di un elemento rispetto ad un altro nei confronti del rispettivo nodo genitore.

I risultati della procedura di confronto a coppie sono sintetizzati nella matrice quadrata dei confronti a coppie, che rappresenta le preferenze e il grado di preferenza espressi dagli esperti. Il generico elemento a_{ij} di tale matrice esprime l'importanza relativa della componente sulla riga i -esima rispetto alla componente della colonna j -esima [25, 35-36].

A differenza di altre metodologie multicriteriali, il metodo AHP accetta una certa soglia di inconsistenza nei giudizi degli esperti. In particolare, la consistenza delle matrici di confronto a coppie viene verificata determinando l'indice di inconsistenza IC, così definito:

$$IC = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad [1]$$

dove λ_{max} è l'autovalore massimo della matrice di confronto a coppie e n è la dimensione della matrice, che coincide con il suo rango, essendo la matrice definita positiva. Sono usualmente considerati accettabili valori di IC minori di 0.1 [25]. L'ordinamento finale delle alternative è ottenuto attraverso una procedura di aggregazione di somma pesata per tutti i livelli della gerarchia [10]. Più specificatamente, le priorità locali dei criteri in un nodo sono moltiplicate per le priorità locali del nodo genitore corrispondente [25]. Infine, per validare la soluzione ottenuta e testare la soluzione nei confronti dei problemi di rovesciamento dell'ordinamento (rank reversal), viene effettuata un'analisi di sensitività.

3. Modello e risultati

In Italia, lo stock dell'edilizia residenziale pubblica è generalmente caratterizzato dalla mancanza o dalla inadeguatezza dell'isolamento termico dell'involucro esterno e da impianti di riscaldamento e di produzione di acqua calda sanitaria (ACS) obsoleti e poco efficienti [4, 37]. Per definire un ordine di priorità delle strategie di retrofit energetico, è stata preliminarmente condotta un'analisi estensiva della letteratura ed è stato selezionato un pool di sette esperti, che hanno identificato i fattori chiave e definito la gerarchia [36, 38-41] nell'ambito dei focus group, organizzati per definire l'insieme dei criteri, dei sotto-criteri e per effettuare la validazione della gerarchia. Il panel di esperti ha quindi strutturato il problema decisionale e lo ha disaggregato in sotto-problemi, identificando tre livelli gerarchici (obiettivo, criteri e sotto-criteri) e quattro nodi decisionali (vedi Fig. 1). Gli esperti hanno definito tre famiglie di criteri: Economici, Tecnici e Socio-Ambientali. Hanno inoltre identificato dieci sotto-criteri: Costi Indiretti (ad es. costi derivanti dalla chiusura di parti dell'edificio, dallo stato di inagibilità, ecc.);

Life Cycle Cost; Tempo di recupero dell'investimento; Compatibilità; Efficienza; Affidabilità; Reputazione; Inquinamento dell'aria; Aspetto estetico; Benessere degli occupanti. La Tabella (vedi Tab.1) riassume i criteri e i sotto-criteri definiti dagli esperti. Le alternative, individuate e discusse dagli esperti, prevedono l'installazione di un insieme di misure di retrofit, atte a ridurre il consumo energetico dell'edificio. Il panel di esperti ha definito sette pacchetti di misure, costituiti da tre misure elementari e dalle loro combinazioni: a) installazione di caldaie a condensazione (Alternativa 1); b) installazione di infissi con vetrocamera (Alternativa 2); c) realizzazione di isolamento termico sulle murature esterne e sulla copertura (Alternativa 3); d) installazione di caldaie a condensazione e installazione di infissi con vetrocamera (Alternativa 4); e) installazione di caldaie a condensazione e installazione dell'isolante termico sulle murature esterne e sulla copertura (Alternativa 5); f) installazione di infissi con vetrocamera e installazione dell'isolante termico sulle murature esterne e sul tetto (Alternativa 6); g) installazione di caldaie a condensazione, installazione di infissi con vetrocamera e installazione dell'isolante termico sulle murature esterne e sulla copertura (Alternativa 7). Ogni esperto ha compilato quattordici matrici di confronti a coppie; i giudizi individuali sono stati poi calcolati aggregando la media geometrica di tutti gli elementi delle matrici compilate dagli esperti, al fine di ottenere un giudizio rappresentativo dell'intero gruppo [42, 43]. Successivamente, sono stati calcolati gli indici di inconsistenza IC delle matrici aggregate dei confronti a coppie, che sono risultati ricadere entro la soglia di accettabilità ($IC < 0.1$), consentendo così di validare i risultati ottenuti. Alla fine del processo decisionale, perfezionato dal gruppo di esperti, è stata ottenuta la classifica delle priorità dei criteri e dei sotto-criteri (vettori di priorità), nonché la classifica delle priorità delle alternative (vedi Tab. 2 e Tab. 3).

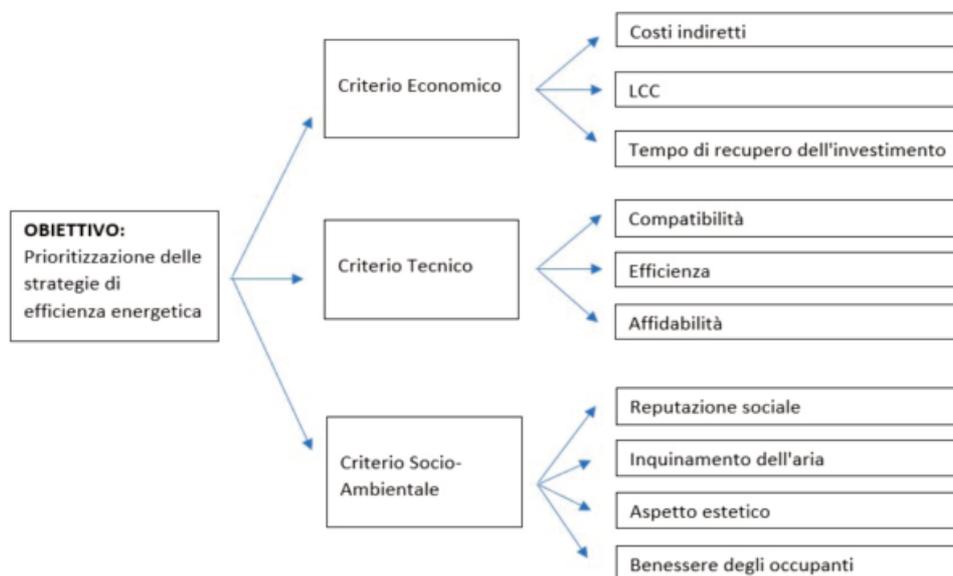


Fig.1 - Gerarchia
(Fonte: D'Alpaos and Bragolusi, 2019)

Ambiente, Energia, Paesaggio

Criteri	Sotto-criteri	Descrizione
Economico	Costi indiretti	Costi relativi al disagio degli occupanti in fase di realizzazione Life Cycle Cost a 30 anni
	LCC	
	Tempo di recupero dell'investimento	Tempo necessario per ripagare l'investimento
Tecnico	Compatibilità	Compatibilità del nuovo intervento con la struttura esistente
	Efficienza	Miglioramento delle performance tecniche ed energetiche
	Affidabilità	Frequenza di guasti e rotture e affidabilità del sistema
Socio-Ambientale	Reputazione sociale	Miglioramento della reputazione a livello sociale
	Inquinamento dell'aria	Riduzione delle emissioni di CO ₂ Miglioramento dell'aspetto estetico delle facciate
	Aspetto estetico	Miglioramento del comfort interno
	Benessere degli occupanti	

Tab. 1 - Descrizione dei criteri e sotto-criteri
(Fonte: D'Alpaos e Bragolusi, 2019)

Criteri	Vettore priorità	Sotto-criteri	Vettore priorità
Economico	0.637	Costi indiretti	0.105
		LCC	0.636
		Tempo di recupero dell'investimento	0.259
Tecnico	0.105	Compatibilità	0.143
		Efficienza	0.715
		Affidabilità	0.142
Socio-ambientale	0.258	Reputazione sociale	0.260
		Inquinamento dell'aria	0.381
		Aspetto estetico	0.232
		Benessere degli occupanti	0.127

Tab. 2 - Risultati ottenuti dei vettori delle priorità dei criteri e dei sotto-criteri
(Fonte: D'Alpaos e Bragolusi, 2019)

Alternative	Normale	Ideale
1	0.100	0.370
2	0.162	0.600
3	0.270	1.000
4	0.057	0.212
5	0.105	0.389
6	0.188	0.694
7	0.118	0.435

Tab. 3 - Ranking delle alternative e relativi vettori di priorità (normali e ideali)
(Fonte: D'Alpaos e Bragolusi, 2019)

Sulla base dei risultati ottenuti dall'implementazione del modello e riportati in Tabella (vedi Tab. 2), la famiglia dei criteri di matrice economica risulta essere la più importante ai fini del raggiungimento dell'obiettivo, in quanto ha un peso relativo di 0.637, che risulta essere superiore a quello delle altre due famiglie di criteri.

La famiglia dei criteri socio-ambientali risulta essere seconda in termini di importanza relativa (la relativa componente del vettore delle priorità risulta pari a 0.258), mentre la famiglia dei criteri di natura tecnica è emerso essere la meno importante (la relativa componente del vettore delle priorità risulta pari a 0.105). Per quanto riguarda le alternative, da un'analisi della Tabella (vedi Tab. 3), si evidenzia come la realizzazione di un sistema di isolamento termico risulti essere la misura di retrofit che si connota, tra tutte, per avere l'importanza relativa maggiore (la relativa componente del vettore delle priorità risulta pari a 0.270), mentre l'alternativa che prevede l'installazione di infissi con vetrocamera e la realizzazione di un sistema di isolamento dei muri esterni e della copertura è risultata essere seconda in termini di priorità relative (la relativa componente del vettore delle priorità risulta pari a 0.188). I risultati ottenuti rivelano infine che l'Alternativa 1, che consiste nell'installazione di caldaie a condensazione, è stata valutata essere meno importante rispetto alle altre due misure elementari, che sono rappresentate rispettivamente dall'intervento di realizzazione del sistema di isolamento dell'involucro dell'edificio (Alternativa 3) e dall'intervento di installazione degli infissi con vetrocamera (Alternativa 2).

4. Considerazioni conclusive

Le decisioni di investimento relative all'implementazione di misure di riqualificazione energetica degli edifici esistenti, che siano efficaci rispetto al costo, richiedono l'attenta valutazione di una serie di problematiche che coinvolgono molteplici criteri e obiettivi, spesso tra loro conflittuali. Il presente lavoro propone e sviluppa un modello di analisi gerarchica à la Saaty per la prioritizzazione di strategie alternative di retrofit energetico di un fabbricato di edilizia residenziale pubblica, i cui risultati possono avere importanti implicazioni per l'individuazione e l'implementazione di politiche di incentivazione del retrofit energetico degli edifici. Sulla base dei giudizi espressi dagli esperti, la realizzazione di un sistema di isolamento termico dell'involucro esterno dell'edificio risulta essere la misura più importante. Tale misura riduce significativamente i consumi energetici, consente di ripagare il costo iniziale di investimento in un numero limitato di anni, garantisce di mantenere durante il ciclo di vita dell'edificio elevate prestazioni tecniche e termiche ed è caratterizzata da costi di manutenzione e di gestione pressoché nulli. Un'efficace progettazione degli interventi di riqualifi-

cazione energetica degli edifici può essere un fattore chiave nel raggiungimento degli obiettivi Europei 20-20-20 e 2030 sull'efficienza energetica e sulla riduzione delle emissioni inquinanti. Il retrofit energetico degli edifici può, inoltre, giocare un ruolo fondamentale per la soluzione del problema della povertà energetica (*fuel poverty*), che è attualmente un target prioritario per le politiche energetiche a livello sia nazionale, che Europeo. Quello della povertà energetica è, infatti, un problema che riguarda un numero elevato di persone e famiglie, ed è causato principalmente dalla concomitanza di tre fattori: a) prezzi energetici elevati, che non consentono alle famiglie a basso reddito di riscaldare adeguatamente le proprie abitazioni; b) scarsa efficienza energetica degli edifici, caratterizzati da bassi livelli di isolamento termico dell'involucro (spesso del tutto assente); c) e presenza di sistemi di riscaldamento obsoleti o inefficienti. L'efficientamento energetico del patrimonio edilizio esistente, attraverso l'implementazione di misure efficaci rispetto al costo, potrebbe quindi contribuire sia a risolvere il problema della povertà energetica, sia a ridurre, al contempo, il livello di emissioni di CO₂.

Bibliografia

- [1] Lucon O., Ürge-Vorsatz D., Zain Ahmed A., Akbari H., Bertoldi P., Cabeza L.F., Eyre N., Gadgil A., Harvey L. D.D., Jiang Y., Liphoto E., Mirasgedis S., Murakami S., Parikh J., Pyke C., Vilariño M.V., *Buildings*. In: Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Farahani E., Kadner S., Seyboth K., Adler A., Baum I., Brunner S., Eickemeier P., Kriemann B., Savolainen J., Schlömer S., von Stechow C., Zwickel T., Minx J.C. (eds), *Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Climate Change 2014. Cambridge, United Kingdom, 2014
- [2] BPIE (Building Performance Institute Europe), The BPIE data hub for the energy performance of buildings. In: BPIE data hub, 2015. Informazioni su: <https://www.buildingsdata.eu/>
- [3] UNEP, 2015. Why Buildings? Buildings Day at COP21, 3 December 2015, Paris, France. Informazioni su: <http://web.unep.org/climatechange/cop21?page=7>, 0
- [4] Beccali M., Ciulla G., Lo Brano V., Galatioto A., Bonomolo M., *Artificial neural network decision support tool for assessment of the energy performance and the refurbishment actions for the non-residential building stock in Southern Italy*. In: *Energy*, n. 137, pp. 1201 - 1218, 2017
- [5] Machairas V., Tsangrassoulis A., Axarl K. *Algorithms for optimization of building design: A review*. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n. 31, pp. 101 - 112, 2014
- [6] Si J., Marjanovic-Halburda L., Nasirib F., Bell S., *Assessment of building-integrated green technologies: A review and case study on applications of Multi-Criteria Decision Making (MCDM) method*. In: *Sustainable Cities and Society*, n. 27, pp. 106 - 115, 2016
- [7] Visscher H., Sartori I., Dascalaki E., *Towards an energy efficient European housing stock: monitoring, mapping and modelling retrofitting processes*. In: *Energy and Buildings*, n. 79, pp. 1 - 3, 2016
- [8] Becchio C., Corgnati S.P., Delmastro C., Fabi V., Lombardi P., *The role of nearly-zero energy buildings in the transition towards Post-Carbon Cities*. In: *Sustainable Cities and Society*, n. 27, pp. 324 - 337,

2016

- [9] D'Alpaos C., Bragolusi P., *Buildings energy retrofit valuation approaches: State of the art and future perspectives*. In: Valori e Valutazioni, vol. 20, pp. 79 - 94, 2018a
- [10] D'Alpaos C., Bragolusi P., *Prioritization of energy retrofit strategies in public housing: An AHP model*. In: Smart Innovation, Systems and Technologies, n. 101, pp. 534 - 541, 2019
- [11] Ministero dello Sviluppo Economico. Piano d'Azione Italiano per l'Efficienza Energetica (PAEE), 2017
- [12] ISTAT. 15° Censimento della popolazione e delle abitazioni. Informazioni su: <http://www.istat.it/it/censimento-popolazione/censimento-popolazione-2011>
- [13] Diakaki C., Grigoroudis E., Kolokotsa D., *Performance study of a multi-objective mathematical programming modelling approach for energy decision-making in buildings*. In: Energy, n. 59, pp. 534 - 542, 2013
- [14] Lizana J., Barrios-Padura A., Molina-Huelvab M., Chacartegui R., *Multi-criteria assessment for the effective decision management in residential energy retrofitting*. In: Energy and Buildings, n. 129, pp. 284 - 307, 2016
- [15] Marinakis V., Doukas H., Xidonas P., Zopounidis C., *Multicriteria decision support in local energy planning: An evaluation of alternative scenarios for the Sustainable Energy Action Plan*. In: Omega, n. 69, pp. 1 - 16, 2017
- [16] D'Alpaos C., Bragolusi P., *Multicriteria prioritization of policy instruments in buildings energy retrofit*. In: Valori e Valutazioni, n. 21, pp. 15 - 25, 2018b
- [17] Calabrò F., Della Spina L., *La fattibilità economica dei progetti nella pianificazione strategica, nella progettazione integrata, nel cultural planning, nei piani di gestione. Un modello sperimentale per la valorizzazione di immobili pubblici in Partenariato Pubblico Privato*. In: LaborEst, Inserto Speciale, n. 16, 2018
- [18] Zambotti S., Pezzutto S., Bisello A., *Cosa aspettarsi del risanamento energetico degli edifici? Uno sguardo ai benefici multipli dei progetti Smart City europei*. In: LaborEst, n. 17, pp. 59 - 63, 2018
- [19] Tajani F., Morano P., Di Liddo F., *Complementarietà dei ruoli dei soggetti coinvolti in procedure di partenariato pubblico privato per l'efficacia degli interventi e la diversificazione dei rischi di mercato: analisi di fattibilità di un progetto di valorizzazione nella città di Roma*. In: LaborEst, n.18, pp. 27 - 33, 2019
- [20] Ma Z., Cooper P., Daly D., Ledo L., *Existing building retrofits: methodology and state-of-the-art*. In: Energy Buildings, n. 55, pp. 889 - 902, 2012
- [21] Harvey L.D., *Recent advances in sustainable buildings: review of the energy and cost performance of the state of the art best practices from around the world*. In: Annual Review of Environment and Resources, n. 38, pp. 281 - 309, 2013
- [22] Tan B, Yavuz Y, Otay E.N., Çamlıbel E., *Optimal selection of energy efficiency measures for energy sustainability of existing buildings*. In: Computers and Operations Research, n. 66, pp. 258 - 271, 2016
- [23] D'Alpaos C., Dosi C., Moretto M., *Beccali M. Concession length and investment timing flexibility*. In: Water Resources Research, vol. 42(2), pp. 1 - 4, 2006
- [24] Gianfrate V, Piccardo C., Longo D., Giachetta A., *Rethinking social housing: Behavioural patterns and technological innovations*. In: Sustainable Cities and Society, n. 33, pp. 102 - 112, 2017
- [25] Saaty T., *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill, New York, 1980
- [26] Antonucci V., D'Alpaos C., Marella G., *Energy saving in tall buildings: From urban planning regulation to smart grid building solutions*. In: International Journal for Housing Science and Its Applications, n. 39, issue 2, pp. 101 - 110, 2015
- [27] Dawood S., Crosbie T., Dawood N., Lord R., *Designing low carbon buildings: a framework to reduce energy consumption and embed the use of renewables*. In: Sustainable Cities and Society, n. 8, pp. 63 - 71, 2013
- [28] Re Cecconi F., Tagliabue L.C., Maltese S., Zuccaro M., *A multi-criteria framework for decision process in retrofit optioneering through interactive data flow*. In: Procedia Engineering, n. 180, pp. 859 - 869, 2017
- [29] D'Alpaos C., *Methodological Approaches to the Valuation of Investments in Biogas Production Plants: Incentives vs. Market Prices in Italy*. In: Valori e Valutazioni, n. 19, pp. 53 - 64, 2017
- [30] De Felice F., Petrillo A., *Absolute measurement with analytic hierarchy process: a case study for Italian racecourse*. In: International Journal of Applied Decision Sciences, n. 6, issue 3, pp. 209 - 227, 2013
- [31] Ferreira F.A., Santos S.P., Dias V.M., *An AHP-based approach to credit risk evaluation of mortgage loans*. In: International Journal of Strategic Property Management, n. 18, issue 1, pp. 38 - 55, 2014
- [32] Grafakos S., Flamos A., Enseñado E.M., *Preferences matter: A constructive approach to incorporating local stakeholders' preferences in the sustainability evaluation of energy technologies*. In: Sustainability, n. 7, issue 8, pp. 10922 - 10960, 2015
- [33] Garbuzova-Schliftern M., Madlener R., *AHP based risk analysis of energy performance contracting projects in Russia*. In: Energy Policy, n. 97, pp. 559 - 581, 2016
- [34] Banzato D., Canesi R., D'Alpaos C., *Biogas and Biomethane Technologies: an AHP Model to Support the Policy Maker in Incentive Design in Italy*. In: Proceedings 2nd International Conference on "Smart and Sustainable Planning for Cities and Regions - SSPCR 2017", Bolzano March 22-24, 2017
- [35] Saaty T.L., *Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process*. RWS Publications, Pittsburgh, 2000
- [36] Saaty T.L., Peniwati K., *Group Decision Making: Drawing Out and Reconciling Differences*. RWS Publications, Pittsburgh, 2012
- [37] Ciulla G., Lo Brano V., D'Amico A., *Modelling relationship among energy demand, climate and office building features: a cluster analysis at European level*. In: Applied Energy, n. 183, pp. 1021 - 1034, 2016
- [38] Peniwati K., *Criteria for evaluating group decision-making methods*. In: International Series in Operations Research and Management Science, n. 95, pp. 251 - 273, 2006
- [39] Senge P.M., *The Fifth Discipline: The Art & Practice of the Learning Organization*. Currency Doubleday New York, 2006
- [40] D'Alpaos C., *The value of flexibility to switch between water supply sources*. In: Applied Mathematical Sciences, vol. 6, pp. 6381 - 6401, 2012
- [41] Bertolini M., D'Alpaos C., Moretto M., *Do Smart Grids boost investments in domestic PV plants? Evidence from the Italian electricity market*. In: Energy, vol. 149, pp. 890 - 902, 2018
- [42] Xu Z., *On consistency of the weighted geometric mean complex judgement matrix in AHP*. In: European Journal of Operational Research, pp. 126, issue 3, pp. 683 - 687, 2000
- [43] Grošelj P., Zadnik Stirn L., *Acceptable consistency of aggregated comparison matrices in analytic hierarchy process*. In: European Journal of Operational Research, n. 223, issue 2, pp. 417 - 420, 2012

