



www.turkishstudies.net/turkishstudies

Turkish Studies

eISSN: 1308-2140

Research Article / Araştırma Makalesi



ANKARA SCIENCE
UNIVERSITY

Evaluation of Energy Efficiency in Large-Scale Indoor Pools in the Mediterranean Climate: A Case Study of Antalya Using the TS 825 Standard

*Akdeniz İkliminde Büyük Ölçekli Kapalı Havuzların Enerji Verimliliği Değerlendirmesi: TS 825
Standartı ile Antalya Örneği*

Setenay Ak* - İlknur Akiner** - Muhammed Ernur Akiner***

Abstract: Large scale buildings require significant energy for heating, cooling, lighting, and continuous ventilation. Overall energy efficiency can be significantly improved in these complex buildings by minimizing heat losses and proactively reducing energy demand. To minimize operational energy consumption, this study systematically analyzes key efficiency factors according to the Turkish TS 825 thermal insulation standard. Focusing specifically on the thermodynamic behavior of large-volume structures, a single-volume indoor pool in Antalya, Turkey (a typical Mediterranean climate) was examined as a case study. Results indicate that increased floor height significantly exacerbates total energy demand, particularly during the peak summer months. It has been found that proper insulation in both winter and summer months is the most critical feature in ensuring optimal energy efficiency. Specifically, optimizing insulation thickness resulted in substantial energy savings ranging from 68% to 89.5% depending on the material type used. Furthermore, reducing the floor height from 23 m to 10 m in winter decreased energy consumption by approximately 78% in adequately insulated structures. It should be noted that although these quantitative findings are specific to the microclimatic conditions of Antalya and single-volume pool structures, they strongly highlight the critical role of volume management and insulation in similar large-scale Mediterranean buildings.

Keywords: Wall window ratio (WWR), Energy efficient, Efficient Design Strategies, Energy Performance, TS 825

* Corresponding Author: Asst. Prof. Dr., Antalya Bilim University, Vocational School, Department of Construction
Sorumlu Yazar: Dr. Öğr. Üyesi, Antalya Bilim Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4206-6094>

setenay.ak@antalya.edu.tr

** Prof. Dr., Akdeniz University, Faculty of Architecture, Department of Architecture

Prof. Dr., Akdeniz Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9550-146X>

ilknurakiner@akdeniz.edu.tr

*** Assoc. Prof. Dr., Akdeniz University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Environmental Protection Technologies

Doç. Dr., Akdeniz Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5192-2473>

ernurakiner@akdeniz.edu.tr

Cite as/ Atıf: Ak, S., Akiner, İ. & Akiner, M. E. (2026). Evaluation of energy efficiency in large-scale indoor pools in the mediterranean climate: A case study of Antalya using the TS 825 standard / Akdeniz ikliminde büyük ölçekli kapalı havuzların enerji verimliliği değerlendirmesi: TS 825 standardı ile Antalya örneği. *Turkish Studies*, 21(Ö1), 31-80. [Special Issue Dedicated to Prof. Dr. Mahmut Özer]. Ankara Bilim University Publications. <https://dx.doi.org/10.7827/TurkishStudies.89714>

Received/Geliş: 06 February/Şubat 2026

Accepted/Kabul: 15 September/Eylül 2026

Published/Yayın: 20 September/Eylül 2026

Checked by plagiarism software



Öz: Büyük ölçekli yapılar ısıtma, soğutma, aydınlatma ve kesintisiz havalandırma için ciddi miktarda enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Bu karmaşık binalarda genel enerji verimliliği, ısı kayıplarının asgariye indirilmesi ve enerji talebinin proaktif olarak düşürülmesiyle önemli ölçüde iyileştirilebilir. İşletme dönemi enerji tüketimini en aza indirmek amacıyla bu çalışmada, temel verimlilik faktörleri TS 825 Isı Yalıtım Kuralları standardına uygun olarak sistematik bir biçimde analiz edilmiştir. Doğrudan büyük ölçekli yapıların termodinamik davranışına odaklanılarak, tipik bir Akdeniz iklimine sahip Antalya'daki büyük hacimli bir kapalı yüzme havuzu örnek bir vaka çalışması olarak incelenmiştir. Sonuçlar kat yüksekliğindeki artışın, özellikle sıcakların en fazla olduğu yaz aylarında toplam enerji talebini belirgin şekilde artırdığını göstermektedir. Hem kış hem de yaz aylarında doğru yalıtım uygulamalarının, optimum enerji verimliliğini sağlamada en kritik unsur olduğu tespit edilmiştir. Spesifik olarak, yalıtım kalınlığının optimize edilmesi, kullanılan malzeme türüne bağlı olarak %68 ila %89,5 arasında değişen önemli enerji tasarrufları sağlamıştır. Ek olarak yeterli yalıtıma sahip yapılarda kat yüksekliğinin kış aylarında 23 metreden 10 metreye düşürülmesinin, enerji tüketimini yaklaşık %78 oranında azalttığı görülmüştür. Bu nicel bulguların Antalya'nın iklim koşullarına ve büyük ölçekli havuz yapılarına özgü olduğu dikkate alınmalıdır. Bununla birlikte elde edilen sonuçlar, benzer büyük ölçekli Akdeniz binalarında hacim yönetimi ile yalıtımın önemli olan rolünü güçlü bir biçimde vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Pencere-duvar oranı (PDO), Enerji verimliliği, Enerji Etkin Yapı Tasarımı, Enerji performansı, TS 825

Structured Abstract:

This study aims to evaluate and optimise energy efficiency in large-scale, single-volume indoor pools located in the Mediterranean climate by systematically analysing key efficiency factors according to the TS 825 thermal insulation standard. Energy consumption continues to escalate globally due to population growth and technological advancement, driving increases in CO₂ emissions, global warming, and climate change. The building sector is a major contributor to this ecological strain, accounting for 20% to 40% of total energy consumption in developing countries and up to 40% in developed nations. While extensive research focuses on residential energy efficiency or building retrofits within the framework of Nearly Zero-Energy Buildings (NZEB), there remains a critical gap in the current literature regarding the specific thermodynamic challenges of large-volume indoor pools. In such complex, large-scale structures, significant operational energy is required for continuous heating, cooling, lighting, and ventilation. The concept of structural volume management and its interplay with building envelope insulation in hot climates is often overlooked or addressed only superficially. Therefore, this study proposes a systematic parametric evaluation model to document and analyse the specific impacts of spatial dimensions and material choices, aiming to dramatically reduce operational energy consumption and highlight efficient design strategies for sustainable public architecture.

The research methodology is grounded in an empirical case study of the Muratpaşa Municipality's Süleyman Erol Olympic Swimming Pool located in Antalya, Turkey. Antalya exhibits a characteristic Mediterranean climate and is officially classified as the 1st Degree-Day Region under the TS 825 standard, featuring an average annual outdoor temperature of 17.7°C, while indoor pool environments require constant temperatures between 24°C and 28°C. The selected reference building features a total indoor construction area of approximately 9,000 m², with a clear floor-to-ceiling height varying between 7 and 15 metres depending on its specific roof truss structure. Its existing envelope heavily relies on a main daylight source from the south-facing facade with a window-to-wall ratio (WWR) of roughly 85%, while the east and west facades maintain a 15% WWR. The baseline structure currently lacks any specific thermal insulation. Using this geometry as a foundational baseline, the study extrapolates various hypothetical scenarios to comprehensively assess the thermodynamic behaviour of varying building scales and proportions.

To generate robust comparative data, the parametric study tested multiple independent variables in isolation. Instead of analysing a single fixed geometry, the computational model tested three distinct floor areas—8,000 m², 4,800 m², and 2,800 m²—to represent large, medium, and small-scale Olympic pool typologies. Concurrently, to analyse the critical impact of vertical volume on heat accumulation and thermal stratification, three uniform clear heights were systematically tested: 23 metres, 15 metres, and 10 metres. Furthermore, two primary building envelope scenarios were established: "Good Insulation" and "Poor Insulation". The "Good Insulation" scenario represents a highly optimised envelope aligning with Passive House standards, utilising 20 cm thick expanded polystyrene (EPS), extruded polystyrene (XPS), and polyurethane (PUR) to aggressively reduce the thermal transmittance (U-value) of external walls and roofs to approximately 0.11 - 0.14 W/m²K. Conversely, the "Poor Insulation" baseline represents uninsulated conventional construction typical of older public buildings in the region, exhibiting significantly higher U-values of around 1.80 - 2.00 W/m²K for walls and 1.50 - 1.80 W/m²K for roofs. The steady-state energy efficiency calculations were executed using a custom parametric computational model developed in Microsoft Excel and MATLAB. Rather than employing commercial dynamic thermal simulation software, the energy demands were calculated strictly based on the mathematical formulations and thermal resistance principles dictated by the 2013 revision of the TS 825 standard. Heat flow densities, average thermal resistances, and annual heating energy needs were calculated using established steady-state equations. The climate and monthly average outdoor temperature data were directly extracted from the generic meteorological tables provided in the TS 825 Annexes. During the computational process, external climate data, building orientation, and the indoor set temperature (maintained at 26°C) were held constant as control variables, allowing the model to clearly identify the individual thermodynamic impact of clear floor height, total floor area, insulation quality, and window-to-wall ratio on the overall thermal load.

The findings of the research are grouped into distinct comparative categories, the first of which addresses the relationship between insulation use and floor height. The data reveals that thermal insulation is the most critical factor in mitigating energy consumption, capable of reducing annual fuel consumption and emissions by 68% to 89.5% depending on the specific insulation material applied. When evaluating floor heights in winter months, reducing the height from 23 metres to 10 metres in an adequately insulated structure

decreased energy consumption by approximately 78%. Notably, the synergy between vertical volume and insulation is profound; a space with a 10-metre height utilising good insulation consumes 4.5 times less energy than an uninsulated counterpart. This ratio shifts to 3.7 times lower for 15-metre heights and 3.1 times lower for 23-metre heights, demonstrating that increased floor height significantly exacerbates the total energy demand. The highest energy requirements were universally observed in January, while May presented the lowest demand due to naturally balanced indoor and outdoor temperatures. The second category of findings examines the relationship between insulation and total spatial area. By keeping the floor area constant at 8,000 m², transitioning from poor to good insulation leads to a consistent decrease in annual energy demand by approximately 75%. Conversely, when keeping insulation constant at a highly optimised level, reducing the floor area from 8,000 m² to 2,800 m² results in a 40% decrease in heating load. In winter, the energy need of an 8,000 m² space decreases by approximately 62% when upgrading from poor to good building element insulation, and this reduction reaches 63.2% for a smaller 2,800 m² space. The data proves that while spatial reduction provides linear and significant efficiency gains, optimising thermal insulation remains the primary driver of total energy savings, bearing the most substantial impact on seasonal performance variations. The third and fourth categories address the window-to-wall ratio and the thermodynamic properties of different glazing types. The findings show that decreasing the WWR yields only marginal efficiency improvements compared to structural changes. For example, in a building with a 23-metre floor height, shifting from a 90% WWR to a 10% WWR improves energy efficiency by approximately 5.8%. This efficiency difference further diminishes as the floor height decreases, dropping to 5.4% for a 15-metre height and 4.9% for a 10-metre height. Regarding glazing properties, changing from single to double glazing on a minimal 10% WWR facade impacts energy needs by a mere 0.7%, whereas on an expansive 90% WWR facade, the difference jumps to 5.8%. Comparing double to triple glazing yields even smaller performance margins: a 0.3% difference for small windows and a 2.7% difference for large windows. Consequently, while single-glazing on a 90% facade causes the most severe heat loss in winter, architectural volume optimisation proves to be a far more powerful strategy than minimising window ratios in this specific climate zone.

Ultimately, the results of the research reveal that transferring systematic, standard-based ecological and thermodynamic data into the architectural design phase provides crucial contributions to large-scale facility planning. The study demonstrates that while decreasing WWR provides marginal gains, aggressive volume reduction strategies and the integration of robust thermal insulation are strictly imperative for large public buildings in the Mediterranean. Unlike traditional residential structures, the "shape factor" or vertical volume in large sports facilities acts as a highly competitive variable against material thermal resistance. Although the steady-state analysis inherently faces limitations by omitting latent heat loads, water evaporation dynamics, and dynamic HVAC efficiencies, it firmly establishes a foundational methodological framework for achieving Net-Zero Energy Building (NZEB) objectives. By prioritising optimised insulation and strategically maintaining floor heights around 10 to 15 metres, future projects can achieve maximum operational cost reductions, limit greenhouse gas emissions, and maintain superior user comfort throughout the building's lifecycle.

Keywords: Wall window ratio (WWR), energy-efficient, efficient design strategies, energy performance, TS 825.

ملخص منظم:

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم وتحسين كفاءة الطاقة في حمامات السباحة الداخلية واسعة النطاق ذات الحجم الواحد والواقعة TS 825 في المناطق ذات المناخ المتوسطي، وذلك من خلال التحليل المنهجي لعوامل الكفاءة الرئيسية وفقاً لمعيار العزل الحراري. يستمر استهلاك الطاقة في الارتفاع على الصعيد العالمي بسبب النمو السكاني والتقدم التكنولوجي، مما يؤدي إلى زيادة انبعاثات ثاني أكسيد الكربون والاحتباس الحراري وتغير المناخ. ويُعد قطاع البناء أحد المساهمين الرئيسيين في هذا الضغط البيئي، حيث يمثل ما بين 20% و 40% من إجمالي استهلاك الطاقة في البلدان النامية وما يصل إلى 40% في الدول المتقدمة. وفي حين تركز (NZEB) «الأبحاث المكثفة على كفاءة الطاقة السكنية أو عمليات تحديث المباني في إطار مفهوم «المباني شبه الخالية من الطاقة لا تزال هناك فجوة كبيرة في الأدبيات الحالية فيما يتعلق بالتحديات الديناميكية الحرارية المحددة التي تواجهها حمامات السباحة الداخلية ذات الحجم الكبير. في مثل هذه الهياكل المعقدة والواسعة النطاق، يتطلب الأمر طاقة تشغيلية كبيرة للتدفئة والتبريد والإضاءة والتهوية المستمرة. غالباً ما يتم تجاهل مفهوم إدارة الحجم الهيكلي وتفاعله مع عزل غلاف المبنى في المناخات الحارة، أو يتم تناوله بشكل سطحي فقط. لذلك، تقترح هذه الدراسة نموذجاً تقييمياً بارامترياً منهجياً لتوثيق وتحليل الآثار المحددة للأبعاد المكانية

واختيارات المواد، بهدف خفض استهلاك الطاقة التشغيلية بشكل كبير وإبراز استراتيجيات التصميم الفعالة للهندسة المعمارية العامة المستدامة.

تستند منهجية البحث إلى دراسة حالة تجريبية لمسبح «سليمان إيرول» الأولمبي التابع لبلدية مرادباشا، الواقع في أنطاليا حيث TS 825 تركيا. تتميز أنطاليا بمناخ متوسطي مميز، وهي مصنفة رسمياً على أنها منطقة من الدرجة الأولى وفقاً لمعيار يبلغ متوسط درجة الحرارة السنوية في الهواء الطلق 17.7 درجة مئوية، في حين تتطلب بيانات المسابح الداخلية درجات حرارة ثابتة تتراوح بين 24 و28 درجة مئوية. يتميز المبنى المرجعي المختار بمساحة بناء داخلية إجمالية تبلغ حوالي 9,000 متر مربع مع ارتفاع خالٍ من العوائق من الأرض إلى السقف يتراوح بين 7 و15 متراً اعتماداً على هيكل دعائم السقف الخاصة به. يعتمد غلاف المبنى الحالي بشكل كبير على مصدر رئيسي للضوء الطبيعي من الواجهة المواجهة للجنوب بنسبة النوافذ إلى الجدران تبلغ 15٪. يفقر الهيكل الأساسي حالياً WWR تبلغ حوالي 85٪، في حين تحافظ الواجهتان الشرقية والغربية على نسبة (WWR) إلى أي عزل حراري محدد. وباستخدام هذه الهندسة كأساس مرجعي، تستنبط الدراسة سيناريوهات افتراضية متنوعة لتقييم السلوك الديناميكي الحراري لمقاييس ونسب المباني المختلفة بشكل شامل.

ولإنتاج بيانات مقارنة موثوقة، اختبرت الدراسة البارامترية متغيرات مستقلة متعددة بشكل منفصل. وبدلاً من تحليل هندسة ثابتة واحدة، اختبر النموذج الحسابي ثلاث مساحات أرضية متميزة — 8,000 م²، و4,800 م²، و2,800 م² — لتمثيل أنماط حمامات السباحة الأولمبية الكبيرة والمتوسطة والصغيرة الحجم. وفي الوقت نفسه، لتحليل التأثير الحاسم للحجم الرأسي على تراكم الحرارة والتقسيم الحراري، تم اختبار ثلاثة ارتفاعات داخلية موحدة بشكل منهجي: 23 متراً، و15 متراً، و10 أمتار. علاوة على ذلك، تم وضع سيناريوهين أساسيين لغلاف المبنى: «عزل جيد» و«عزل ضعيف». يمثل سيناريو «العزل الجيد» غلاًفاً مبنياً بسمك 20 (EPS) حيث يستخدم البوليسترين الموسع (Passive House) «ومُحسناً للغاية يتوافق مع معايير «المنزل السلبي للجدران الخارجية والأسقف بشكل (U قيمة) لتقليل النفاذية الحرارية (PUR) والبولي يوريثان (XPS) سم، والبوليسترين الميثوق كبير إلى ما يقارب 0.11 - 0.14 واط/م²كلفن. وعلى العكس من ذلك، يمثل خط الأساس «العزل الضعيف» البناء التقليدي غير أعلى بكثير تتراوح بين حوالي 1.80 و2.00 U المعزول الذي يُعد نموذجياً للمباني العامة القديمة في المنطقة، حيث يُظهر قيم واط/م²كلفن للجدران و1.50 و1.80 واط/م²كلفن للأسطح. تم تنفيذ حسابات كفاءة الطاقة في حالة الاستقرار باستخدام نموذج حسابي وبدلاً من استخدام برامج المحاكاة الحرارية الديناميكية. MATLAB و Microsoft Excel بارامترية مخصص تم تطويره في التجارية، تم حساب احتياجات الطاقة بشكل صارم استناداً إلى الصيغ الرياضية ومبادئ المقاومة الحرارية التي تنص عليها النسخة وتم حساب كثافات تدفق الحرارة، ومتوسط المقاومة الحرارية، واحتياجات الطاقة السنوية TS 825 المعدلة لعام 2013 من معيار للتدفئة باستخدام معادلات حالة الاستقرار المعمول بها. تم استخراج بيانات المناخ ومتوسط درجة الحرارة الخارجية الشهرية مباشرة وأثناء عملية الحساب، تم الحفاظ على ثبات البيانات المناخية TS 825 من الجداول الأرصادية العامة الواردة في ملاحق المعيار الخارجية واتجاه المبنى ودرجة الحرارة المحددة داخلياً (التي تم الحفاظ عليها عند 26 درجة مئوية) كمتغيرات تحكم، مما سمح للنموذج بتحديد التأثير الديناميكي الحراري الفردي لكل من ارتفاع الأرضية الصافية، ومساحة الأرضية الإجمالية، وجودة العزل ونسبة النوافذ إلى الجدران على الحمل الحراري الإجمالي.

تم تجميع نتائج البحث في فئات مقارنة متميزة، تتناول الفئة الأولى منها العلاقة بين استخدام العزل وارتفاع الأرضية وتكشف البيانات أن العزل الحراري هو العامل الأكثر أهمية في الحد من استهلاك الطاقة، حيث إنه قادر على خفض استهلاك الوقود السنوي والانبعاثات بنسبة تتراوح بين 68٪ و89.5٪ اعتماداً على مادة العزل المحددة المستخدمة. وعند تقييم ارتفاعات الأرضيات في أشهر الشتاء، أدى خفض الارتفاع من 23 متراً إلى 10 أمتار في مبنى معزول بشكل كافٍ إلى خفض استهلاك الطاقة بنسبة 78٪ تقريباً. والجدير بالذكر أن التآزر بين الحجم الرأسي والعزل كبير للغاية؛ فالمساحة التي يبلغ ارتفاعها 10 أمتار وتستخدم عزلاً جيداً تستهلك طاقة أقل بـ 4.5 أضعاف من نظيرتها غير المعزولة. وتتغير هذه النسبة لتصبح أقل بـ 3.7 مرة بالنسبة لارتفاعات تبلغ 15 متراً، وأقل بـ 3.1 مرة بالنسبة لارتفاعات تبلغ 23 متراً، مما يدل على أن زيادة ارتفاع الأرضية تؤدي إلى تفاقم الطلب الإجمالي على الطاقة بشكل كبير. وقد لوحظت أعلى مستويات الطلب على الطاقة بشكل عام في شهر يناير، في حين سجل شهر مايو أدنى مستوى للطلب بسبب التوازن الطبيعي بين درجات الحرارة الداخلية والخارجية. تتناول الفئة الثانية من النتائج العلاقة بين العزل والمساحة الإجمالية. عند الحفاظ على مساحة الأرضية ثابتة عند 8,000 م²، يؤدي الانتقال من العزل الضعيف إلى العزل الجيد إلى انخفاض ثابت في الطلب السنوي على الطاقة بنسبة 75٪ تقريباً. وعلى العكس من ذلك، عند الحفاظ على العزل ثابتاً عند مستوى مُحسّن للغاية، يؤدي تقليل مساحة الأرضية من 8,000 م² إلى 2,800 م² إلى انخفاض بنسبة 40٪ في حمل التدفئة في فصل الشتاء، تنخفض احتياجات الطاقة لمساحة تبلغ 8,000 م² بنسبة 62٪ تقريباً عند تحسين عزل عناصر المبنى من مستوى ضعيف إلى جيد، وتصل هذه النسبة إلى 63.2٪ بالنسبة لمساحة أصغر تبلغ 2,800 م². تثبت البيانات أنه في حين أن تقليل المساحة يوفر مكاسب خطية وهامة في الكفاءة، فإن تحسين العزل الحراري يظل المحرك الرئيسي لتوفير الطاقة الإجمالي، وله التأثير الأكبر على التغيرات الموسمية في الأداء. تتناول الفئتان الثالثة والرابعة نسبة النفاذة إلى الجدار والخصائص الديناميكية الحرارية لأنواع لا يؤدي إلا إلى تحسينات هامشية في الكفاءة مقارنة (WWR) الزجاج المختلفة. تظهر النتائج أن خفض نسبة النفاذة إلى الجدار 9٪ بالتغييرات الهيكلية. على سبيل المثال، في مبنى يبلغ ارتفاع الطابق فيه 23 متراً، يؤدي الانتقال من نسبة نفاذة إلى جدار تبلغ 90 إلى 10٪ إلى تحسين كفاءة الطاقة بنسبة 5.8٪ تقريباً. ويتضاءل هذا الفارق في الكفاءة بشكل أكبر مع انخفاض ارتفاع الطابق حيث ينخفض إلى 5.4٪ عند ارتفاع 15 متراً وإلى 4.9٪ عند ارتفاع 10 أمتار. وفيما يتعلق بخصائص الزجاج، فإن التغيير من

، لا تتجاوز 10% يؤثر على احتياجات الطاقة بنسبة 0.7% فقط WWR الزجاج الأحادي إلى الزجاج المزدوج في واجهة ذات نسبة تبلغ 90%، يقفز الفرق إلى 5.8%. وتُظهر المقارنة بين الزجاج المزدوج والثلاثي هوامش WWR بينما في واجهة واسعة بنسبة أداء أقل: فرق بنسبة 0.3% للنوافذ الصغيرة و2.7% للنوافذ الكبيرة. وبالتالي، في حين أن استخدام الزجاج الأحادي في واجهة بنسبة 90% يتسبب في أشد حالات فقدان الحرارة في فصل الشتاء، فإن تحسين الحجم المعماري يثبت أنه استراتيجية أقوى بكثير من تقليل نسب النوافذ في هذه المنطقة المناخية المحددة

وفي النهاية، تكشف نتائج البحث أن نقل البيانات الإيكولوجية والحرارية المنهجية والقائمة على المعايير إلى مرحلة WWR التصميم المعماري يقدم مساهمات حاسمة في تخطيط المنشآت واسعة النطاق. وتُظهر الدراسة أنه في حين أن خفض نسبة يوفر مكاسب هامشية، فإن استراتيجيات تخفيض الحجم الجذرية ودمج العزل الحراري القوي أمران ضروريان للغاية للمباني العامة الكبيرة في منطقة البحر الأبيض المتوسط. وعلى عكس المباني السكنية التقليدية، فإن «عامل الشكل» أو الحجم الرأسي في المنشآت الرياضية الكبيرة يعمل كمتغير تنافسي للغاية مقابل المقاومة الحرارية للمواد. على الرغم من أن تحليل الحالة المستقرة يواجه بطبيعته قيودًا نتيجة إغفال أحمال الحرارة الكامنة، وديناميكيات تبخر الماء، وكفاءات أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء (NZEB). الديناميكية، فإنه يرسخ بإحكام إطارًا منهجيًا أساسيًا لتحقيق أهداف المباني ذات الطاقة الصافية الصفرية (HVAC)، ومن خلال إعطاء الأولوية للعزل المُحسن والحفاظ بشكل استراتيجي على ارتفاعات الأرضيات في نطاق 10 إلى 15 مترًا، يمكن للمشاريع المستقبلية تحقيق أقصى قدر من خفض التكاليف التشغيلية، والحد من انبعاثات غازات الدفيئة، والحفاظ على راحة فائقة للمستخدمين طوال دورة حياة المبنى

TS ، كفاءة الطاقة، استراتيجيات التصميم الفعالة، أداء الطاقة، (WWR) الكلمات المفتاحية: نسبة الجدران إلى النوافذ

825.

Résumé Structuré:

Cette étude vise à évaluer et à optimiser l'efficacité énergétique des piscines couvertes à grand volume situées dans des régions au climat méditerranéen, en analysant systématiquement les facteurs clés d'efficacité conformément à la norme d'isolation thermique TS 825. La consommation d'énergie continue d'augmenter à l'échelle mondiale en raison de la croissance démographique et des progrès technologiques, ce qui entraîne une hausse des émissions de CO₂, le réchauffement climatique et le changement climatique. Le secteur du bâtiment contribue fortement à cette pression écologique, représentant entre 20 % et 40 % de la consommation totale d'énergie dans les pays en développement et jusqu'à 40 % dans les pays développés. Alors que de nombreuses recherches se concentrent sur l'efficacité énergétique résidentielle ou la rénovation des bâtiments dans le cadre des bâtiments à consommation d'énergie quasi nulle (NZEB), il subsiste une lacune importante dans la littérature actuelle concernant les défis thermodynamiques spécifiques aux piscines couvertes de grand volume. Dans ces structures complexes et de grande envergure, une énergie d'exploitation importante est nécessaire pour assurer en continu le chauffage, le refroidissement, l'éclairage et la ventilation. Le concept de gestion du volume structurel et son interaction avec l'isolation de l'enveloppe du bâtiment dans les climats chauds est souvent négligé ou abordé de manière superficielle. Par conséquent, cette étude propose un modèle d'évaluation paramétrique systématique visant à documenter et à analyser les impacts spécifiques des dimensions spatiales et des choix de matériaux, dans le but de réduire considérablement la consommation d'énergie d'exploitation et de mettre en évidence des stratégies de conception efficaces pour une architecture publique durable.

La méthodologie de recherche s'appuie sur une étude de cas empirique portant sur la piscine olympique Süleyman Erol de la municipalité de Muratpaşa, située à Antalya, en Turquie. Antalya présente un climat méditerranéen caractéristique et est officiellement classée dans la région de 1er degré-jour selon la norme TS 825, avec une température extérieure annuelle moyenne de 17,7 °C, tandis que les environnements des piscines couvertes nécessitent des températures constantes comprises entre 24 °C et 28 °C. Le bâtiment de référence sélectionné présente une surface de construction intérieure totale d'environ 9 000 m², avec une hauteur libre au sol variant entre 7 et 15 mètres en fonction de la structure spécifique de sa charpente. Son enveloppe existante repose largement sur une source principale de lumière naturelle provenant de la façade orientée au sud, avec un rapport fenêtre/mur (WWR) d'environ 85 %, tandis que les façades est et ouest présentent un WWR de 15 %. La structure de référence ne dispose actuellement d'aucune isolation thermique spécifique. En utilisant cette géométrie comme base de référence, l'étude extrapole divers scénarios hypothétiques afin d'évaluer de manière exhaustive le comportement thermodynamique de bâtiments de différentes échelles et proportions.

Afin de générer des données comparatives fiables, l'étude paramétrique a testé plusieurs variables indépendantes de manière isolée. Au lieu d'analyser une seule géométrie fixe, le modèle de calcul a testé trois surfaces au sol distinctes — 8 000 m², 4 800 m² et 2 800 m² — pour représenter des typologies de piscines olympiques à grande, moyenne et petite échelle. Parallèlement, afin d'analyser l'impact déterminant du volume vertical sur l'accumulation de chaleur et la stratification thermique, trois hauteurs libres uniformes ont été systématiquement testées : 23 mètres, 15 mètres et 10 mètres. De plus, deux scénarios principaux d'enveloppe du bâtiment ont été définis : « Bonne isolation » et « Mauvaise isolation ». Le scénario « Bonne isolation » correspond à une enveloppe hautement optimisée, conforme aux normes « Maison passive », utilisant du polystyrène expansé (EPS), du polystyrène extrudé (XPS) et du polyuréthane (PUR) d'une épaisseur de 20 cm afin de réduire de manière significative la transmittance thermique (valeur U) des murs extérieurs et des toitures à environ 0,11 - 0,14 W/m²K. À l'inverse, le scénario de référence « Mauvaise isolation » correspond à une construction conventionnelle non isolée, typique des anciens bâtiments publics de la région, présentant des valeurs U nettement plus élevées, comprises entre environ 1,80 et 2,00 W/m²K pour les murs et entre 1,50 et 1,80 W/m²K pour les toitures. Les calculs d'efficacité énergétique en régime permanent ont été effectués à l'aide d'un modèle de calcul paramétrique sur mesure développé sous Microsoft Excel et MATLAB. Plutôt que d'utiliser un logiciel commercial de simulation thermique dynamique, les besoins énergétiques ont été calculés strictement sur la base des formulations mathématiques et des principes de résistance thermique dictés par la révision de 2013 de la norme TS 825. Les densités de flux thermique, les résistances thermiques moyennes et les besoins annuels en énergie de chauffage ont été calculés à l'aide d'équations établies en régime permanent. Les données climatiques et les températures extérieures moyennes mensuelles ont été directement extraites des tableaux météorologiques génériques fournis dans les annexes de la norme TS 825. Au cours du processus de calcul, les données climatiques externes, l'orientation du bâtiment et la température intérieure de consigne (maintenue à 26 °C) ont été maintenues constantes en tant que variables de contrôle, ce qui a permis au modèle d'identifier clairement l'impact thermodynamique individuel de la hauteur libre sous plafond, de la surface totale au sol, de la qualité de l'isolation et du rapport fenêtre/mur sur la charge thermique globale.

Les résultats de la recherche sont regroupés en différentes catégories comparatives, dont la première porte sur la relation entre l'utilisation de l'isolation et la hauteur sous plafond. Les données révèlent que l'isolation thermique est le facteur le plus déterminant pour réduire la consommation d'énergie, puisqu'elle permet de diminuer la consommation annuelle de combustible et les émissions de 68 % à 89,5 % selon le matériau isolant utilisé. Lors de l'évaluation des hauteurs sous plafond pendant les mois d'hiver, la réduction de la hauteur de 23 mètres à 10 mètres dans une structure correctement isolée a permis de diminuer la consommation d'énergie d'environ 78 %. Il convient de noter que la synergie entre le volume vertical et l'isolation est considérable : un espace de 10 mètres de hauteur bénéficiant d'une bonne isolation consomme 4,5 fois moins d'énergie qu'un espace équivalent non isolé. Ce rapport passe à 3,7 fois moins pour une hauteur de 15 mètres et à 3,1 fois moins pour une hauteur de 23 mètres, ce qui démontre qu'une hauteur de plafond plus importante augmente considérablement la demande énergétique totale. Les besoins énergétiques les plus élevés ont été observés de manière générale en janvier, tandis que le mois de mai a présenté la demande la plus faible en raison d'un équilibre naturel entre les températures intérieures et extérieures. La deuxième catégorie de résultats examine la relation entre l'isolation et la surface totale. En maintenant la surface au sol constante à 8 000 m², le passage d'une isolation médiocre à une bonne isolation entraîne une diminution constante de la demande énergétique annuelle d'environ 75 %. À l'inverse, en conservant l'isolation à un niveau hautement optimisé, la réduction de la surface au sol de 8 000 m² à 2 800 m² se traduit par une diminution de 40 % de la charge de chauffage. En hiver, les besoins énergétiques d'un espace de 8 000 m² diminuent d'environ 62 % lorsque l'isolation des éléments de construction passe de médiocre à bonne, et cette réduction atteint 63,2 % pour un espace plus petit de 2 800 m². Les données démontrent que, si la réduction de la surface offre des gains d'efficacité linéaires et significatifs, l'optimisation de l'isolation thermique reste le principal facteur de économies d'énergie totales, avec l'impact le plus important sur les variations saisonnières de performance. Les troisième et quatrième catégories portent sur le rapport fenêtre/mur et les propriétés thermodynamiques des différents types de vitrages. Les résultats montrent que la diminution du rapport fenêtre/mur n'apporte que des améliorations marginales en termes d'efficacité par rapport aux modifications structurelles. Par exemple, dans un bâtiment d'une hauteur sous plafond de 23 mètres, le passage d'un rapport fenêtres/murs de 90 % à 10 % améliore l'efficacité énergétique d'environ 5,8 %. Cette différence d'efficacité diminue encore à mesure que la hauteur sous plafond diminue, tombant à 5,4 % pour une hauteur de 15 mètres et à 4,9 % pour une hauteur de 10 mètres. En ce qui concerne les propriétés du vitrage, le passage du simple au double vitrage sur une façade présentant un WWR minimal de 10 % n'a qu'un impact de 0,7 % sur les besoins énergétiques, tandis

que sur une façade à WWR élevé de 90 %, la différence grimpe à 5,8 %. La comparaison entre le double et le triple vitrage révèle des écarts de performance encore plus faibles : une différence de 0,3 % pour les petites fenêtres et de 2,7 % pour les grandes fenêtres. Par conséquent, alors que le simple vitrage sur une façade à 90 % de WWR entraîne les pertes thermiques les plus importantes en hiver, l'optimisation du volume architectural s'avère être une stratégie bien plus efficace que la réduction du rapport de vitrage dans cette zone climatique spécifique.

En fin de compte, les résultats de cette recherche révèlent que l'intégration de données écologiques et thermodynamiques systématiques et fondées sur des normes dès la phase de conception architecturale apporte une contribution cruciale à la planification d'installations à grande échelle. L'étude démontre que, si la réduction du WWR n'apporte que des gains marginaux, des stratégies agressives de réduction de volume et l'intégration d'une isolation thermique robuste sont absolument indispensables pour les grands bâtiments publics en Méditerranée. Contrairement aux structures résidentielles traditionnelles, le « facteur de forme », c'est-à-dire le volume vertical, dans les grandes installations sportives agit comme une variable hautement compétitive face à la résistance thermique des matériaux. Bien que l'analyse en régime permanent soit intrinsèquement limitée par l'omission des charges de chaleur latente, de la dynamique d'évaporation de l'eau et des rendements dynamiques des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC), elle établit fermement un cadre méthodologique fondamental pour atteindre les objectifs des bâtiments à consommation énergétique nette zéro (NZEB). En privilégiant une isolation optimisée et en maintenant stratégiquement les hauteurs sous plafond entre 10 et 15 mètres, les futurs projets pourront réduire au maximum les coûts d'exploitation, limiter les émissions de gaz à effet de serre et garantir un confort optimal aux utilisateurs tout au long du cycle de vie du bâtiment.

Mots-clés : rapport mur/fenêtre (WWR), efficacité énergétique, stratégies de conception efficaces, performance énergétique, TS 825.

Resumen Estructurado:

El objetivo de este estudio es evaluar y optimizar la eficiencia energética en piscinas cubiertas de gran tamaño y de un solo volumen situadas en zonas de clima mediterráneo, mediante el análisis sistemático de los factores clave de eficiencia según la norma de aislamiento térmico TS 825. El consumo energético sigue aumentando a nivel mundial debido al crecimiento demográfico y al avance tecnológico, lo que provoca un incremento de las emisiones de CO₂, el calentamiento global y el cambio climático. El sector de la construcción es uno de los principales responsables de esta presión ecológica, ya que representa entre el 20 % y el 40 % del consumo energético total en los países en desarrollo y hasta el 40 % en los países desarrollados. Si bien numerosas investigaciones se centran en la eficiencia energética residencial o en la rehabilitación de edificios en el marco de los edificios de consumo energético casi nulo (NZEB), sigue existiendo una laguna importante en la bibliografía actual en lo que respecta a los retos termodinámicos específicos de las piscinas cubiertas de gran volumen. En estructuras tan complejas y a gran escala, se requiere una cantidad significativa de energía operativa para la calefacción, la refrigeración, la iluminación y la ventilación continuas. El concepto de gestión del volumen estructural y su interacción con el aislamiento de la envolvente del edificio en climas cálidos suele pasarse por alto o abordarse solo de forma superficial. Por lo tanto, este estudio propone un modelo de evaluación paramétrica sistemática para documentar y analizar los impactos específicos de las dimensiones espaciales y la elección de materiales, con el objetivo de reducir drásticamente el consumo de energía operativa y destacar estrategias de diseño eficientes para una arquitectura pública sostenible.

La metodología de investigación se basa en un estudio de caso empírico de la piscina olímpica Süleyman Erol, del municipio de Muratpaşa, situada en Antalya (Turquía). Antalya presenta un clima mediterráneo característico y está clasificada oficialmente como región de primer grado-día según la norma TS 825, con una temperatura media anual exterior de 17,7 °C, mientras que los entornos de las piscinas cubiertas requieren temperaturas constantes entre 24 °C y 28 °C. El edificio de referencia seleccionado cuenta con una superficie total construida interior de aproximadamente 9 000 m², con una altura libre entre el suelo y el techo que varía entre 7 y 15 metros, dependiendo de la estructura específica de las vigas del tejado. Su envolvente actual depende en gran medida de una fuente principal de luz natural procedente de la fachada orientada al sur, con una relación ventana-pared (WWR) de aproximadamente el 85 %, mientras que las fachadas este y oeste mantienen una WWR del 15 %. La estructura de referencia carece actualmente de cualquier aislamiento térmico

específico. Utilizando esta geometría como base de referencia, el estudio extrapola diversos escenarios hipotéticos para evaluar de forma exhaustiva el comportamiento termodinámico de diferentes escalas y proporciones del edificio.

Para generar datos comparativos sólidos, el estudio paramétrico analizó múltiples variables independientes de forma aislada. En lugar de analizar una única geometría fija, el modelo computacional evaluó tres superficies de planta distintas —8 000 m², 4 800 m² y 2 800 m²— para representar tipologías de piscinas olímpicas a gran, mediana y pequeña escala. Al mismo tiempo, para analizar el impacto crítico del volumen vertical en la acumulación de calor y la estratificación térmica, se probaron sistemáticamente tres alturas libres uniformes: 23 metros, 15 metros y 10 metros. Además, se establecieron dos escenarios principales para la envolvente del edificio: «Buen aislamiento» y «Mal aislamiento». El escenario de «buen aislamiento» representa una envolvente altamente optimizada que se ajusta a los estándares de Casa Pasiva, utilizando poliestireno expandido (EPS), poliestireno extruido (XPS) y poliuretano (PUR) de 20 cm de espesor para reducir drásticamente la transmitancia térmica (valor U) de las paredes exteriores y los tejados hasta aproximadamente 0,11-0,14 W/m²K. Por el contrario, la referencia de «aislamiento deficiente» representa una construcción convencional sin aislamiento, típica de los edificios públicos más antiguos de la región, que presenta valores U significativamente más elevados, de entre 1,80 y 2,00 W/m²K para las paredes y de entre 1,50 y 1,80 W/m²K para los tejados. Los cálculos de eficiencia energética en régimen estacionario se realizaron utilizando un modelo computacional paramétrico personalizado desarrollado en Microsoft Excel y MATLAB. En lugar de emplear software comercial de simulación térmica dinámica, las demandas energéticas se calcularon basándose estrictamente en las formulaciones matemáticas y los principios de resistencia térmica establecidos por la revisión de 2013 de la norma TS 825. Las densidades de flujo de calor, las resistencias térmicas medias y las necesidades anuales de energía para calefacción se calcularon utilizando ecuaciones establecidas para el régimen estacionario. Los datos climáticos y de temperatura exterior media mensual se extrajeron directamente de las tablas meteorológicas genéricas proporcionadas en los anexos de la norma TS 825. Durante el proceso de cálculo, los datos climáticos externos, la orientación del edificio y la temperatura interior fijada (mantenida a 26 °C) se mantuvieron constantes como variables de control, lo que permitió al modelo identificar claramente el impacto termodinámico individual de la altura libre del suelo, la superficie total de suelo, la calidad del aislamiento y la relación ventana-pared sobre la carga térmica global.

Los resultados de la investigación se agrupan en distintas categorías comparativas, la primera de las cuales aborda la relación entre el uso del aislamiento y la altura del forjado. Los datos revelan que el aislamiento térmico es el factor más determinante a la hora de mitigar el consumo energético, ya que es capaz de reducir el consumo anual de combustible y las emisiones entre un 68 % y un 89,5 %, dependiendo del material aislante específico aplicado. Al evaluar las alturas de los forjados en los meses de invierno, reducir la altura de 23 a 10 metros en una estructura adecuadamente aislada disminuyó el consumo de energía en aproximadamente un 78 %. Cabe destacar que la sinergia entre el volumen vertical y el aislamiento es profunda; un espacio de 10 metros de altura que utilice un buen aislamiento consume 4,5 veces menos energía que uno sin aislar. Esta relación se reduce a 3,7 veces menos para alturas de 15 metros y a 3,1 veces menos para alturas de 23 metros, lo que demuestra que el aumento de la altura del suelo agrava significativamente la demanda energética total. Las mayores necesidades energéticas se observaron de forma generalizada en enero, mientras que mayo presentó la menor demanda debido al equilibrio natural entre las temperaturas interiores y exteriores. La segunda categoría de resultados examina la relación entre el aislamiento y la superficie total. Manteniendo la superficie constante en 8 000 m², pasar de un aislamiento deficiente a uno adecuado conlleva una disminución constante de la demanda energética anual de aproximadamente el 75 %. Por el contrario, cuando se mantiene el aislamiento constante a un nivel altamente optimizado, reducir la superficie de 8 000 m² a 2 800 m² da lugar a una disminución del 40 % en la carga de calefacción. En invierno, la necesidad energética de un espacio de 8 000 m² disminuye en aproximadamente un 62 % al pasar de un aislamiento deficiente a uno adecuado de los elementos constructivos, y esta reducción alcanza el 63,2 % en un espacio más pequeño de 2 800 m². Los datos demuestran que, si bien la reducción de la superficie proporciona mejoras lineales y significativas en la eficiencia, la optimización del aislamiento térmico sigue siendo el principal factor de ahorro energético total, ya que es lo que tiene un impacto más sustancial en las variaciones estacionales del rendimiento. La tercera y cuarta categorías abordan la relación ventana-pared y las propiedades termodinámicas de los diferentes tipos de acristalamiento. Los resultados muestran que la disminución de la relación ventana-pared (WWR) solo aporta mejoras marginales en la eficiencia en comparación con los cambios estructurales. Por ejemplo, en un edificio con una altura de planta de 23 metros, pasar de una relación ventana-pared del 90 % a una del 10 %

mejora la eficiencia energética en aproximadamente un 5,8 %. Esta diferencia de eficiencia se reduce aún más a medida que disminuye la altura de planta, cayendo al 5,4 % para una altura de 15 metros y al 4,9 % para una altura de 10 metros. En cuanto a las propiedades del acristalamiento, pasar de un acristalamiento simple a uno doble en una fachada con un WWR mínimo del 10 % influye en las necesidades energéticas en apenas un 0,7 %, mientras que en una fachada extensa con un WWR del 90 %, la diferencia se eleva al 5,8 %. La comparación entre el acristalamiento doble y el triple arroja márgenes de rendimiento aún menores: una diferencia del 0,3 % para ventanas pequeñas y del 2,7 % para ventanas grandes. En consecuencia, aunque el acristalamiento simple en una fachada con un 90 % de WWR provoca la pérdida de calor más grave en invierno, la optimización del volumen arquitectónico resulta ser una estrategia mucho más eficaz que minimizar la proporción de ventanas en esta zona climática específica.

En última instancia, los resultados de la investigación revelan que la incorporación de datos ecológicos y termodinámicos sistemáticos y basados en normas a la fase de diseño arquitectónico aporta contribuciones cruciales a la planificación de instalaciones a gran escala. El estudio demuestra que, si bien la reducción de la relación ventana-pared (WWR) proporciona beneficios marginales, las estrategias agresivas de reducción de volumen y la integración de un aislamiento térmico robusto son estrictamente imprescindibles para los grandes edificios públicos en el Mediterráneo. A diferencia de las estructuras residenciales tradicionales, el «factor de forma» o volumen vertical en las grandes instalaciones deportivas actúa como una variable altamente competitiva frente a la resistencia térmica de los materiales. Aunque el análisis en estado estacionario se enfrenta inherentemente a limitaciones al omitir las cargas de calor latente, la dinámica de la evaporación del agua y las eficiencias dinámicas de los sistemas de climatización, establece firmemente un marco metodológico fundamental para alcanzar los objetivos de los edificios de energía neta cero (NZEB). Al dar prioridad a un aislamiento optimizado y mantener estratégicamente las alturas de los forjados entre 10 y 15 metros, los proyectos futuros podrán lograr la máxima reducción de los costes operativos, limitar las emisiones de gases de efecto invernadero y mantener un confort superior para los usuarios a lo largo de todo el ciclo de vida del edificio.

Palabras clave: Relación pared-ventana (WWR), eficiencia energética, estrategias de diseño eficientes, rendimiento energético, TS 825.

结构化摘要:

本研究旨在通过根据TS 825隔热标准系统分析关键能效因素,评估和优化位于地中海气候区的大型单体室内游泳池的能源效率。由于人口增长和技术进步,全球能源消耗持续攀升,从而导致二氧化碳排放量增加、全球变暖及气候变化加剧。建筑行业是造成这一生态压力的主要因素之一,在发展中国家占能源总消耗量的20%至40%,在发达国家则高达40%。尽管大量研究聚焦于住宅能效或在“近零能耗建筑”(NZEB)框架下的建筑改造,但现有文献中关于大体积室内游泳池所面临的具体热力学挑战仍存在重大空白。在此类复杂的大型建筑中,持续的供暖、制冷、照明和通风需要消耗大量运行能耗。在炎热气候条件下,建筑体量管理概念及其与建筑围护结构保温的相互作用往往被忽视,或仅被浅显地提及。因此,本研究提出了一种系统性的参数化评估模型,用于记录和分析空间尺寸与材料选择的具体影响,旨在大幅降低运行能耗,并为可持续公共建筑提出高效的设计策略。

本研究方法基于对位于土耳其安塔利亚的穆拉特帕沙市苏莱曼·埃罗尔奥林匹克游泳馆的实证案例研究。安塔利亚具有典型的地中海气候,根据TS 825标准被正式划分为一级供暖度日区,年平均室外温度为17.7°C,而室内泳池环境则需要保持24°C至28°C之间的恒定温度。所选参考建筑的室内总建筑面积约为9,000平方米,净层高根据具体的屋顶桁架结构在7至15米之间变化。其现有建筑围护结构主要依赖朝南立面的自然采光,窗墙比(WWR)约为85%,而东、西立面的窗墙比则维持在15%。基准结构目前未采取任何特定的隔热措施。以该几何形状为基础基准,本研究推演了多种假设情景,以全面评估不同建筑规模和比例下的热力学行为。

为了生成可靠的比较数据,该参数化研究对多个独立变量进行了单独测试。计算模型并未分析单一固定几何形状,而是测试了三种不同的建筑面积——8,000平方米、4,800平方米和2,800平方米——以代表大、中、小规模奥运游泳池类型。同时,为分析垂直体量对热量积聚和热分层的关

键影响，系统性地测试了三种统一的净高：23米、15米和10米。此外，还建立了两种主要的建筑围护结构情景：“良好隔热”和“隔热不良”。“良好隔热”方案代表符合被动房标准的高度优化建筑围护结构，采用20厘米厚的膨胀聚苯乙烯（EPS）、挤塑聚苯乙烯（XPS）和聚氨酯（PUR）材料，将外墙和屋顶的热传导率（U值）大幅降低至约0.11–0.14 W/m²K。相反，“隔热效果差”基准方案代表该地区老旧公共建筑中典型的未隔热传统建筑结构，其U值显著更高，外墙约为1.80–2.00 W/m²K，屋顶约为1.50–1.80 W/m²K。稳态能效计算采用在Microsoft Excel和MATLAB中开发的定制参数化计算模型进行。未采用商用动态热模拟软件，而是严格依据2013年修订版TS 825标准规定的数学公式和热阻原理计算能源需求。热流密度、平均热阻及年度供暖能耗均通过公认的稳态方程计算得出。气候数据及月平均室外温度数据直接提取自TS 825附录中提供的通用气象表。在计算过程中，外部气候数据、建筑朝向以及室内设定温度（维持在26°C）被作为控制变量保持恒定，从而使模型能够清晰地识别净层高、总建筑面积、隔热质量以及窗墙比对总体热负荷的各自热力学影响。

研究结果被划分为不同的比较类别，其中第一类探讨了隔热措施与楼层高度之间的关系。数据表明，隔热是降低能耗的最关键因素，根据所采用的具体隔热材料不同，可将年度燃料消耗和排放量减少68%至89.5%。在评估冬季楼层高度时，对于隔热措施充分的建筑，将楼层高度从23米降低至10米，可使能耗降低约78%。值得注意的是，垂直体积与隔热措施之间的协同效应十分显著：一个采用优质隔热措施、高度为10米的空间，其能耗仅为未隔热空间的1/4.5。对于15米高的空间，这一能耗比降至3.7倍；对于23米高的空间，则降至3.1倍，这表明楼层高度的增加会显著加剧总能耗需求。普遍观察到，1月份的能耗需求最高，而5月份由于室内外温度自然平衡，能耗需求最低。第二类研究结果探讨了隔热性能与总空间面积之间的关系。在建筑面积保持恒定为8,000平方米的情况下，将隔热性能从较差提升至良好，可使年能源需求持续降低约75%。相反，当隔热性能保持在高度优化的水平时，将建筑面积从8,000平方米缩减至2,800平方米，供暖负荷将减少40%。冬季，当8,000平方米空间的建筑构件保温性能从较差提升至良好时，其能源需求减少约62%；而对于较小的2,800平方米空间，这一降幅可达63.2%。数据证明，虽然缩小空间面积能带来线性且显著的能效提升，但优化隔热性能仍是实现总能耗节约的主要驱动力，对季节性性能波动的影响最为显著。第三和第四类研究分别涉及窗墙比以及不同玻璃类型的热力学特性。研究结果表明，与结构改造相比，降低窗墙比仅能带来微乎其微的能效提升。例如，在一栋层高为23米的建筑中，将窗墙比从90%降至10%，能源效率可提高约5.8%。随着层高的降低，这一效率差异进一步缩小：层高为15米时降至5.4%，层高为10米时降至4.9%。就玻璃性能而言，在窗墙比最低为10%的外立面上，将单层玻璃更换为双层玻璃对能耗的影响仅为0.7%；而在窗墙比高达90%的外立面上，这一差异则跃升至5.8%。将双层玻璃与三层玻璃进行比较时，性能差距更小：小窗户的差异为0.3%，大窗户的差异为2.7%。因此，尽管在90%窗墙比的外立面上采用单层玻璃会导致冬季最严重的热量损失，但在该特定气候区，建筑体量优化被证明比降低窗墙比要有效得多。

最终，研究结果表明，将系统化、基于标准的生态与热力学数据引入建筑设计阶段，对大规模设施规划具有关键意义。该研究证明，虽然降低窗墙比能带来微小收益，但对于地中海地区的大型公共建筑而言，采取激进的体量缩减策略并整合高效隔热措施是绝对必要的。与传统住宅建筑不同，大型体育设施中的“形状因子”（即垂直体量）是与材料热阻相抗衡的关键变量。尽管稳态分析因忽略潜热负荷、水蒸发动力学以及暖通空调系统的动态效率而存在固有局限，但它为实现净零能耗建筑（NZEB）目标确立了坚实的方法论框架。通过优先优化隔热措施，并战略性地将楼层高度维持在10至15米左右，未来项目可在建筑全生命周期内最大限度地降低运营成本、限制温室气体排放，并保持卓越的使用舒适度。

关键词： 墙窗比（WWR）、节能、高效设计策略、能源性能、TS 825。

Структурированное Резюме:

Целью данного исследования является оценка и оптимизация энергоэффективности крупномасштабных однообъемных крытых бассейнов, расположенных в регионах со

средиземноморским климатом, путем систематического анализа ключевых факторов эффективности в соответствии со стандартом теплоизоляции TS 825. Потребление энергии во всем мире продолжает расти вследствие роста населения и технологического прогресса, что приводит к увеличению выбросов CO₂, глобальному потеплению и изменению климата. Строительный сектор вносит значительный вклад в эту экологическую нагрузку, на его долю приходится от 20 % до 40 % общего энергопотребления в развивающихся странах и до 40 % в развитых странах. Хотя обширные исследования сосредоточены на энергоэффективности жилых зданий или модернизации зданий в рамках концепции зданий с практически нулевым энергопотреблением (NZEB), в современной литературе по-прежнему существует серьезный пробел в отношении специфических термодинамических проблем, связанных с крытыми бассейнами большого объема. В таких сложных крупномасштабных сооружениях для непрерывного отопления, охлаждения, освещения и вентиляции требуется значительный объем энергии на эксплуатацию. Концепция управления объемом сооружения и ее взаимодействие с теплоизоляцией ограждающих конструкций в жарком климате часто упускается из виду или рассматривается лишь поверхностно. Поэтому в данном исследовании предлагается систематическая модель параметрической оценки для документирования и анализа конкретного влияния пространственных размеров и выбора материалов с целью радикального сокращения энергопотребления при эксплуатации и выделения эффективных стратегий проектирования для устойчивой общественной архитектуры.

Методология исследования основана на эмпирическом случае — олимпийском плавательном бассейне имени Сулеймана Эрола муниципалитета Муратпаша, расположенном в Анталии, Турция. Анталия отличается характерным средиземноморским климатом и официально классифицируется как регион 1-й степени по стандарту TS 825, с среднегодовой температурой наружного воздуха 17,7 °C, в то время как условия внутри крытых бассейнов требуют поддержания постоянной температуры в диапазоне от 24 °C до 28 °C. Выбранное здание-объект исследования имеет общую внутреннюю площадь около 9 000 м², а высота от пола до потолка варьируется от 7 до 15 метров в зависимости от конкретной конструкции кровельных ферм. Существующая оболочка здания в значительной степени зависит от основного источника дневного света, поступающего через фасад, обращенный на юг, с соотношением «окно/стена» (WWR) примерно 85 %, в то время как восточный и западный фасады имеют соотношение WWR 15 %. В базовой конструкции в настоящее время отсутствует какая-либо специальная теплоизоляция. Используя эту геометрию в качестве исходной базы, в рамках исследования экстраполируются различные гипотетические сценарии для всесторонней оценки термодинамического поведения зданий разных масштабов и пропорций.

Для получения надёжных сравнительных данных в рамках параметрического исследования были по отдельности протестированы несколько независимых переменных. Вместо анализа одной фиксированной геометрии в расчётной модели были протестированы три различных площади пола — 8 000 м², 4 800 м² и 2 800 м² — для представления типологий олимпийских бассейнов большого, среднего и малого масштаба. Одновременно, для анализа критического влияния вертикального объема на накопление тепла и термическую стратификацию были систематически протестированы три одинаковые высоты потолка: 23 метра, 15 метров и 10 метров. Кроме того, были разработаны два основных сценария ограждающих конструкций: «Хорошая теплоизоляция» и «Плохая теплоизоляция». Сценарий «Хорошая теплоизоляция» представляет собой высокооптимизированную оболочку, соответствующую стандартам «Пассивного дома», с использованием пенополистирола (EPS), экструдированного полистирола (XPS) и полиуретана (PUR) толщиной 20 см для значительного снижения коэффициента теплопередачи (коэффициента U) наружных стен и крыш до примерно 0,11–0,14 Вт/м²К. Напротив, базовый сценарий «Плохая теплоизоляция» представляет собой неизолированное традиционное строительство, типичное для старых общественных зданий в регионе, характеризующееся значительно более высокими значениями коэффициента U — около 1,80–2,00 Вт/м²К для стен и 1,50–1,80 Вт/м²К для крыш. Расчеты энергоэффективности в стационарном режиме были выполнены с использованием специальной параметрической вычислительной модели, разработанной в Microsoft Excel и MATLAB. Вместо использования коммерческого программного обеспечения для динамического теплового моделирования потребности в энергии рассчитывались строго на основе математических формул и принципов теплового сопротивления, предписанных редакцией стандарта TS 825 от 2013 года. Плотность тепловых потоков, среднее тепловое сопротивление и годовая потребность в энергии для отопления рассчитывались с использованием

установленных уравнений стационарного режима. Данные о климате и среднемесячной температуре наружного воздуха были непосредственно взяты из типовых метеорологических таблиц, приведенных в приложениях к стандарту TS 825. В ходе расчетов данные о внешних климатических условиях, ориентация здания и заданная температура внутри помещения (поддерживаемая на уровне 26 °C) оставались постоянными в качестве контрольных переменных, что позволило модели четко определить индивидуальное термодинамическое влияние высоты чистой перекрытия, общей площади пола, качества теплоизоляции и соотношения площади окон к площади стен на общую тепловую нагрузку.

Результаты исследования сгруппированы по отдельным сравнительным категориям, первая из которых посвящена взаимосвязи между использованием теплоизоляции и высотой перекрытия. Данные показывают, что теплоизоляция является наиболее важным фактором снижения энергопотребления, способным сократить годовой расход топлива и выбросы на 68–89,5 % в зависимости от конкретного примененного теплоизоляционного материала. При оценке высоты потолка в зимние месяцы снижение высоты с 23 до 10 метров в здании с надлежащей теплоизоляцией позволило сократить энергопотребление примерно на 78 %. Примечательно, что синергетический эффект между вертикальным объемом и теплоизоляцией весьма значителен: помещение высотой 10 метров с качественной теплоизоляцией потребляет в 4,5 раза меньше энергии, чем аналогичное помещение без теплоизоляции. Этот коэффициент снижается до 3,7 раза при высоте 15 метров и до 3,1 раза при высоте 23 метра, что свидетельствует о том, что увеличение высоты перекрытия значительно усугубляет общую потребность в энергии. Наибольшая потребность в энергии повсеместно наблюдалась в январе, тогда как в мае она была самой низкой благодаря естественному равновесию между температурой внутри и снаружи здания. Вторая группа результатов посвящена изучению взаимосвязи между теплоизоляцией и общей площадью помещений. При постоянной площади 8 000 м² переход от плохой к хорошей теплоизоляции приводит к стабильному снижению годовой потребности в энергии примерно на 75 %. И наоборот, при постоянном уровне теплоизоляции, оптимизированном до максимальной степени, уменьшение площади с 8 000 м² до 2 800 м² приводит к снижению тепловой нагрузки на 40 %. Зимой потребность в энергии для помещения площадью 8 000 м² снижается примерно на 62 % при переходе от плохой к хорошей теплоизоляции строительных элементов, а для меньшего помещения площадью 2 800 м² это снижение достигает 63,2 %. Данные доказывают, что, хотя уменьшение площади обеспечивает линейное и значительное повышение эффективности, оптимизация теплоизоляции остается основным фактором общей экономии энергии, оказывая наиболее существенное влияние на сезонные колебания эксплуатационных показателей. Третья и четвертая категории касаются соотношения «окно/стена» и термодинамических свойств различных типов остекления. Результаты показывают, что снижение соотношения «окно/стена» приводит лишь к незначительному повышению эффективности по сравнению с конструктивными изменениями. Например, в здании с высотой этажа 23 метра переход от соотношения «окна к стене» (WWR) 90 % к 10 % повышает энергоэффективность примерно на 5,8 %. Эта разница в эффективности далее уменьшается по мере снижения высоты этажа, опускаясь до 5,4 % при высоте 15 метров и до 4,9 % при высоте 10 метров. Что касается характеристик остекления, то переход с одинарного на двойное остекление на фасаде с минимальной долей остекления (10 %) влияет на энергопотребление всего на 0,7 %, тогда как на фасаде с большой долей остекления (90 %) эта разница возрастает до 5,8 %. Сравнение двойного и тройного остекления показывает еще меньшие различия в характеристиках: разница составляет 0,3 % для небольших окон и 2,7 % для больших окон. Следовательно, хотя одинарное остекление на фасаде с WWR 90 % приводит к наиболее значительным тепловым потерям зимой, оптимизация архитектурного объема оказывается гораздо более эффективной стратегией, чем минимизация доли остекления в данной климатической зоне.

В конечном итоге результаты исследования показывают, что использование систематизированных, основанных на стандартах экологических и термодинамических данных на этапе архитектурного проектирования вносит решающий вклад в планирование крупномасштабных объектов. Исследование демонстрирует, что, хотя снижение WWR дает лишь незначительный выигрыш, агрессивные стратегии сокращения объема и интеграция надежной теплоизоляции являются абсолютно необходимыми для крупных общественных зданий в Средиземноморье. В отличие от традиционных жилых зданий, «коэффициент формы» или вертикальный объем в крупных спортивных сооружениях выступает в качестве крайне значимой переменной по сравнению с тепловым сопротивлением материалов. Хотя анализ в стационарном режиме по своей сути сталкивается с

ограничениями из-за исключения скрытых тепловых нагрузок, динамики испарения воды и динамической эффективности систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (ОВКВ), он прочно закрепляет основополагающую методологическую основу для достижения целей по созданию зданий с нулевым энергопотреблением (NZEB). Отдавая приоритет оптимизированной теплоизоляции и стратегически поддерживая высоту этажей на уровне от 10 до 15 метров, будущие проекты смогут добиться максимального сокращения эксплуатационных затрат, ограничить выбросы парниковых газов и обеспечить высокий уровень комфорта пользователей на протяжении всего жизненного цикла здания.

Ключевые слова: соотношение «стена-окно» (WWR), энергоэффективность, эффективные стратегии проектирования, энергетические показатели, TS 825.

संरचित सारांश:

इस अध्ययन का उद्देश्य TS 825 थर्मल इंसुलेशन मानक के अनुसार प्रमुख दक्षता कारकों का व्यवस्थित रूप से विश्लेषण करके भूमध्यसागरीय जलवायु में स्थित बड़े पैमाने के, एकल-आयतन वाले इनडोर पूलों में ऊर्जा दक्षता का मूल्यांकन और अनुकूलन करना है। जनसंख्या वृद्धि और तकनीकी प्रगति के कारण वैश्विक स्तर पर ऊर्जा की खपत लगातार बढ़ रही है, जिससे CO₂ उत्सर्जन, ग्लोबल वार्मिंग और जलवायु परिवर्तन में वृद्धि हो रही है।

निर्माण क्षेत्र इस पारिस्थितिक तनाव में एक प्रमुख योगदानकर्ता है, जो विकासशील देशों में कुल ऊर्जा खपत का 20% से 40% और विकसित राष्ट्रों में 40% तक का हिस्सा है। हालांकि व्यापक शोध आवासीय ऊर्जा दक्षता या लगभग शून्य-ऊर्जा भवनों (NZEB) के ढांचे के भीतर भवन पुनर्निर्माण पर केंद्रित है, फिर भी बड़े आयतन वाले इनडोर पूलों की विशिष्ट थर्मोडायनामिक चुनौतियों के संबंध में वर्तमान साहित्य में एक महत्वपूर्ण अंतर बना हुआ है। इस तरह की जटिल, बड़े पैमाने की संरचनाओं में निरंतर हीटिंग, कूलिंग, लाइटिंग और वेंटिलेशन के लिए महत्वपूर्ण परिचालन ऊर्जा की आवश्यकता होती है। संरचनात्मक आयतन प्रबंधन की अवधारणा और गर्म जलवायु में भवन आवरण इन्सुलेशन के साथ इसके अंतर्संबंध को अक्सर अनदेखा किया जाता है या केवल सतही तौर पर संबोधित किया जाता है। इसलिए, यह अध्ययन स्थानिक आयामों और सामग्री विकल्पों के विशिष्ट प्रभावों को प्रलेखित और विश्लेषित करने के लिए एक व्यवस्थित पैरामीट्रिक मूल्यांकन मॉडल का प्रस्ताव करता है, जिसका उद्देश्य परिचालन ऊर्जा की खपत को नाटकीय रूप से कम करना और टिकाऊ सार्वजनिक वास्तुकला के लिए कुशल डिजाइन रणनीतियों को उजागर करना है।

शोध पद्धति तुर्की के अन्ताल्या में स्थित मुरात्पाशा नगर पालिका के सुलेमान एरोल ओलंपिक स्विमिंग पूल के एक अनुभवजन्य केस स्टडी पर आधारित है। अन्ताल्या में भूमध्यसागरीय जलवायु पाई जाती है और इसे TS 825 मानक के तहत आधिकारिक तौर पर प्रथम डिग्री-डे क्षेत्र के रूप में वर्गीकृत किया गया है, जहाँ औसत वार्षिक बाहरी तापमान 17.7°C है, जबकि इनडोर पूल के वातावरण के लिए 24°C से 28°C के बीच निरंतर तापमान की आवश्यकता होती है। चुनी गई संदर्भ-भवन में कुल लगभग 9,000 वर्ग मीटर का आंतरिक निर्माण क्षेत्र है, जिसमें मंजिल से छत तक की स्पष्ट ऊंचाई इसकी विशिष्ट रूफ टूस संरचना के आधार पर 7 से 15 मीटर के बीच भिन्न होती है। इसका मौजूदा आवरण मुख्य रूप से दक्षिण-मुखी मुखौटे से दिन के प्रकाश के मुख्य स्रोत पर निर्भर करता है, जिसमें खिड़की-से-दीवार अनुपात (WWR) लगभग 85% है, जबकि पूर्व और पश्चिम मुखौटों में 15% WWR बना रहता है। मौजूदा ढांचे में वर्तमान में कोई विशिष्ट थर्मल इन्सुलेशन नहीं है। इस ज्यामिति को एक आधारभूत मानक के रूप में उपयोग करते हुए, यह अध्ययन विभिन्न काल्पनिक परिदृश्यों का अनुमान लगाता है ताकि बदलते भवन पैमानों और अनुपातों के थर्मोडायनामिक व्यवहार का व्यापक रूप से आकलन किया जा सके।

मजबूत तुलनात्मक डेटा उत्पन्न करने के लिए, पैरामीट्रिक अध्ययन ने कई स्वतंत्र चरों का अलग से परीक्षण किया। एक ही निश्चित ज्यामिति का विश्लेषण करने के बजाय, कंप्यूटेशनल मॉडल ने बड़े, मध्यम और छोटे पैमाने की ओलंपिक पूल प्रकारों का प्रतिनिधित्व करने के लिए तीन अलग-अलग फर्श क्षेत्रों—8,000 वर्ग मीटर, 4,800 वर्ग मीटर और 2,800 वर्ग मीटर—का परीक्षण किया। साथ ही, ऊष्मा संचय और तापीय परतबद्धता पर ऊर्ध्वाधर आयतन के महत्वपूर्ण प्रभाव का विश्लेषण करने के लिए, तीन समान स्पष्ट ऊंचाइयों का व्यवस्थित रूप से परीक्षण किया गया: 23 मीटर, 15 मीटर और 10 मीटर। इसके अलावा, दो प्राथमिक भवन आवरण परिदृश्य स्थापित किए गए: "अच्छी इन्सुलेशन" और "खराब इन्सुलेशन"। "अच्छी इन्सुलेशन" परिदृश्य पैसिव हाउस मानकों के अनुरूप एक अत्यधिक अनुकूलित आवरण का प्रतिनिधित्व करता है, जिसमें बाहरी दीवारों और छतों के थर्मल ट्रांसमिटेंस (यू-मूल्य) को लगभग 0.11 - 0.14 W/m²K तक आक्रामक रूप से कम करने के लिए 20 सेमी मोटी एक्सपैंडेड पॉलीस्टाइन (ईपीएस), एक्सट्रूडेड पॉलीस्टाइन (एक्सपीएस),

और पॉलीयूरेथेन (पीयूआर) का उपयोग किया जाता है। इसके विपरीत, "खराब इन्सुलेशन" आधाररेखा इस क्षेत्र की पुरानी सार्वजनिक इमारतों के समान बिना इन्सुलेशन वाली पारंपरिक निर्माण का प्रतिनिधित्व करती है, जिसमें बाहरी दीवारों के लिए लगभग $1.80 - 2.00 \text{ W/m}^2\text{K}$ और छतों के लिए $1.50 - 1.80 \text{ W/m}^2\text{K}$ के आसपास काफी उच्च यू-मूल्य (U-values) होते हैं।

स्थिर-स्थिति ऊर्जा दक्षता की गणनाएँ माइक्रोसॉफ्ट एक्सेल और मैटलैब में विकसित एक कस्टम पैरामीट्रिक कम्प्यूटेशनल मॉडल का उपयोग करके की गई। वाणिज्यिक डायनामिक थर्मल सिमुलेशन सॉफ्टवेयर का उपयोग करने के बजाय, ऊर्जा की मांगों की गणना TS 825 मानक के 2013 संशोधन द्वारा निर्धारित गणितीय सूत्रों और थर्मल प्रतिरोध सिद्धांतों के आधार पर सख्ती से की गई। स्थापित स्थिर-स्थिति समीकरणों का उपयोग करके ऊष्मा प्रवाह घनता, औसत थर्मल प्रतिरोध और वार्षिक हीटिंग ऊर्जा की आवश्यकता की गणना की गई। जलवायु और मासिक औसत बाहरी तापमान का डेटा सीधे टीएस 825 परिशिष्टों में दिए गए सामान्य मौसम विज्ञान तालिकाओं से निकाला गया था। संगणकीय प्रक्रिया के दौरान, बाहरी जलवायु डेटा, भवन की दिशा, और इनडोर सेट तापमान (26°C पर बनाए रखा गया) को नियंत्रण चर के रूप में स्थिर रखा गया था, जिससे मॉडल को समग्र थर्मल लोड पर स्पष्ट मंजिल की ऊँचाई, कुल मंजिल क्षेत्र, इन्सुलेशन की गुणवत्ता, और खिड़की-से-दीवार अनुपात के व्यक्तिगत थर्मोडायनामिक प्रभाव को स्पष्ट रूप से पहचानने में सक्षम बनाया गया।

अनुसंधान के निष्कर्षों को विशिष्ट तुलनात्मक श्रेणियों में समूहित किया गया है, जिनमें से पहली श्रेणी इन्सुलेशन के उपयोग और फर्श की ऊँचाई के बीच संबंध को संबोधित करती है। डेटा से पता चलता है कि ऊर्जा खपत को कम करने में थर्मल इन्सुलेशन सबसे महत्वपूर्ण कारक है, जो लागू किए गए विशिष्ट इन्सुलेशन सामग्री के आधार पर वार्षिक ईंधन खपत और उत्सर्जन को 68% से 89.5% तक कम करने में सक्षम है। सर्दियों के महीनों में मंजिल की ऊँचाई का मूल्यांकन करते समय, पर्याप्त रूप से इन्सुलेट की गई संरचना में 23 मीटर से ऊँचाई को 10 मीटर तक कम करने से ऊर्जा की खपत में लगभग 78% की कमी आई। विशेष रूप से, ऊर्ध्वाधर आयतन और इन्सुलेशन के बीच तालमेल गहरा है; 10 मीटर ऊँचाई वाली जगह जिसमें अच्छा इन्सुलेशन उपयोग किया गया हो, वह बिना इन्सुलेशन वाली जगह की तुलना में 4.5 गुना कम ऊर्जा की खपत करती है। यह अनुपात 15-मीटर ऊँचाई के लिए 3.7 गुना और 23-मीटर ऊँचाई के लिए 3.1 गुना कम हो जाता है, जो दर्शाता है कि फर्श की ऊँचाई में वृद्धि कुल ऊर्जा की मांग को काफी बढ़ा देती है। सबसे अधिक ऊर्जा की आवश्यकता सार्वभौमिक रूप से जनवरी में देखी गई, जबकि मई में स्वाभाविक रूप से संतुलित आंतरिक और बाहरी तापमान के कारण सबसे कम मांग देखी गई। निष्कर्षों की दूसरी श्रेणी इन्सुलेशन और कुल स्थानिक क्षेत्र के बीच संबंध की जांच करती है। फर्श के क्षेत्र को $8,000 \text{ m}^2$ पर स्थिर रखते हुए, खराब से अच्छे इन्सुलेशन में जाने पर वार्षिक ऊर्जा मांग में लगभग 75% की लगातार कमी आती है। इसके विपरीत, जब इन्सुलेशन को एक अत्यधिक अनुकूलित स्तर पर स्थिर रखा जाता है, तो फर्श के क्षेत्र को $8,000 \text{ m}^2$ से घटाकर $2,800 \text{ m}^2$ करने पर हीटिंग लोड में 40% की कमी आती है। सर्दियों में, $8,000 \text{ m}^2$ की जगह की ऊर्जा आवश्यकता खराब से अच्छे भवन तत्व इन्सुलेशन में उन्नयन करने पर लगभग 62% तक कम हो जाती है, और यह कमी एक छोटी $2,800 \text{ m}^2$ की जगह के लिए 63.2% तक पहुँच जाती है। डेटा यह साबित करता है कि जबकि स्थानिक कमी रैखिक और महत्वपूर्ण दक्षता लाभ प्रदान करती है, थर्मल इन्सुलेशन का अनुकूलन कुल ऊर्जा बचत का प्राथमिक चालक बना हुआ है, जिसका मौसमी प्रदर्शन भिन्नताओं पर सबसे महत्वपूर्ण प्रभाव पड़ता है। तीसरी और चौथी श्रेणियाँ विंडो-टू-वॉल अनुपात और विभिन्न ग्लेज़िंग प्रकारों के थर्मोडायनामिक गुणों को संबोधित करती हैं। निष्कर्ष दिखाते हैं कि संरचनात्मक परिवर्तनों की तुलना में WWR को कम करने से केवल मामूली दक्षता सुधार होते हैं। उदाहरण के लिए, 23 मीटर फर्श की ऊँचाई वाली एक इमारत में, 90% WWR से 10% WWR पर जाने पर ऊर्जा दक्षता में लगभग 5.8% की सुधार होती है। फर्श की ऊँचाई कम होने पर यह दक्षता अंतर और भी कम हो जाता है, जो 15 मीटर ऊँचाई पर 5.4% और 10 मीटर ऊँचाई पर 4.9% तक गिर जाता है। ग्लेज़िंग गुणों के संबंध में, न्यूनतम 10% WWR वाले अग्रभाग पर सिंगल ग्लेज़िंग से डबल ग्लेज़िंग में बदलने से ऊर्जा की ज़रूरतों पर महज़ 0.7% का प्रभाव पड़ता है, जबकि एक विस्तृत 90% WWR वाले अग्रभाग पर, यह अंतर बढ़कर 5.8% हो जाता है। डबल और ट्रिपल ग्लेज़िंग की तुलना करने पर प्रदर्शन का अंतर और भी कम हो जाता है: छोटे खिड़कियों के लिए 0.3% का अंतर और बड़ी खिड़कियों के लिए 2.7% का अंतर। परिणामस्वरूप, जबकि 90% की फसाड पर सिंगल-ग्लेज़िंग सर्दियों में सबसे अधिक गर्मी की हानि का कारण बनती है, इस विशिष्ट जलवायु क्षेत्र में खिड़की अनुपात को कम करने की तुलना में वास्तुशिल्प आयतन का अनुकूलन एक कहीं अधिक शक्तिशाली रणनीति साबित होती है।

अंततः, शोध के परिणाम यह प्रकट करते हैं कि व्यवस्थित, मानक-आधारित पारिस्थितिक और थर्मोडायनामिक डेटा को वास्तुशिल्प डिजाइन चरण में स्थानांतरित करना बड़े पैमाने पर सुविधा योजना में महत्वपूर्ण योगदान देता है। अध्ययन यह प्रदर्शित करता है कि जबकि WWR को कम करने से मामूली लाभ मिलता है, भूमध्यसागरीय क्षेत्र में बड़ी सार्वजनिक इमारतों के लिए आक्रामक आयतन कमी रणनीतियाँ और मजबूत थर्मल इन्सुलेशन का एकीकरण सख्त रूप

se anıvarıy h  . Par  perık Aavaasııy s  r  naO     e vıperı  , b      el suvı  aO   m   "A  kar karak" ya O      r Aayatan sam  rı k   t    l pr  t  ro  k  ta   e   ı  af   k at  y  k pr  t  sp         r   e r  p m     ar  y karata h  .   ala  k     r-    t   vı         m              r  p se            O                r,   l v         k   g  t      ta,    r g  t      HVAC d    taO     o        ne   e   ar  n   s  k   s  ma    h  , y   n  t-    y O          n (NZEB)   e O          o pr    t   r  ne   e            k p                 d    ta se s      t   r  ta h  .   n      t   n  s      n   o pr        ta d    r    r r  n      k r  p se       k            o 10 se 15 m    r   e Aaspas b  na   r     r,   vı    k   pr                   pr       n   ag  t m          as  l   r s       h  ,   r      s    s O      n   o s     t   r s       h  ,    r     n   e pr  e             e d    n b     r O           r   ar  m b  na   r    s       h  .

      : d  var-          n    t (WWR), O    -     ,       d     n r  n       , O     pr      n, TS 825.

Yapılandırılmış   zet:

Bu   alı  ma, temel verimlilik fakt  r  lerini TS 825 ısı yalıtım standardına göre sistematik olarak analiz ederek, Akdeniz ikliminde yer alan büyük     ekli ve tek hacimli kapalı havuzlarda enerji verimlili    nı değerlendirmeyi ve optimize etmeyi amaçlamaktadır. Nüfus artı  ı ve teknolojik gelişmeler nedeniyle küresel     ekte artmaya devam eden enerji tüketimi CO2 emisyonlarında, küresel ısınmada ve iklim değişikliğinde artışa yol açmaktadır. Yapı sektörü, gelişmekte olan ülkelerde toplam enerji tüketiminin %20 ila %40'ından, gelişmiş ülkelerde ise %40'ına kadarından sorumlu olarak bu ekolojik tahribata büyük      de katkıda bulunmaktadır. Mevcut literatürdeki kapsamlı araştırmalar genellikle konutlarda enerji verimlili    ne veya Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar   er  evesindeki bina yenileme uygulamalarına odaklansa da, büyük     ekli kapalı havuzların   z   l termodinamik zorluklarına ilişkin kritik bir boşluk bulunmaktadır. Bu tür karmaşık ve büyük     ekli yapılarda kesintisiz ısıtma, soğutma, aydınlatma ve havalandırma için ciddi miktarda işletme enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. Sıcak iklimlerde yapısal hacim yönetimi kavramı ve bunun bina kabuğu yalıtımı ile olan etkileşimi çoğunlukla göz ardı edilmekte veya yalnızca yüzeysel olarak ele alınmaktadır. Bu nedenle, bu çalışma, mekansal boyutların ve malzeme seçimlerinin spesifik etkilerini belgeleyip analiz etmek için sistematik bir parametrik değerlendirme modeli önermekte, böylece işletme dönemi enerji tüketimini büyük      de azaltmayı ve sürdürülebilir kamusal mimari için verimli tasarım stratejilerini vurgulamayı hedeflemektedir.

Araştırma metodolo  isi, Türkiye'nin Antalya ilinde bulunan Muratpaşa Belediyesi Süleyman Erol Olimpik Yüzme Havuzu'nun vaka çalışmasına dayanmaktadır. Karakteristik bir Akdeniz iklimi sergileyen ve TS 825 standardı kapsamında resmi olarak 1. Derece Gün Bölgesi olarak sınıflandırılan Antalya, 17,7  C'lik yıllık ortalama dış ortam sıcaklığına sahipken, kapalı havuz ortamlarının sürekli olarak 24  C ile 28  C arasında tutulması gerekmektedir. Seçilen referans bina, yaklaşık 9.000 m  'lik toplam kapalı inşaat alanına sahip olup, net kat yüksekliği çatı makası yapısına bağlı olarak 7 ile 15 metre arasında değişmektedir. Mevcut bina kabuğu, ana gün ışığı kaynağı olarak güney cephesinde yaklaşık %85'lik bir pencere-duvar oranına (PDO) dayanırken, doğu ve batı cepheleri %15'lik bir PDO'yu korumaktadır. Referans alınan mevcut yapıda herhangi bir ısı yalıtımı bulunmamaktadır. Çalışma, bu geometriyi temel bir referans noktası olarak kullanarak, farklı yapısal        r  n ve oranların termodinamik davranışını kapsamlı bir şekilde değerlendirmek amacıyla        li varsayım  sal senaryolar üretmektedir.

G      karşılaştırmalı veriler elde etmek amacıyla, parametrik çalışmada çok sayıda bağımsız de  i    en izole edilerek test edilmiştir. Hesaplamalı model, tek bir sabit geometriyi analiz etmek yerine, büyük, orta ve küçük     ekli olimpik havuz tipolojilerini temsil etmek üzere sırasıyla 8.000 m  , 4.800 m   ve 2.800 m   olmak üzere     farklı taban alanını test etmiştir. E   zamanlı olarak, dikey hacmin ısı birikimi ve ısıl tabakalaşma üzerindeki kritik etkisini analiz etmek için 23 metre, 15 metre ve 10 metre olmak üzere     standart net kat yüksekliği sistematik olarak incelenmiştir. Ayrıca, "  yi Yalıtım" ve "Zayıf Yalıtım" olmak üzere iki temel bina kabuğu senaryosu oluşturulmuştur. "  yi Yalıtım" senaryosu, dış duvarların ve çatıların ısıl geçirgenlik değerini (U-değeri) yaklaşık 0,11 - 0,14 W/m  K seviyelerine d    r  mek için 20 cm kalınlığında Genleştirilmiş Polistiren (EPS), Ek   r  de Polistiren (XPS) ve Poliüretan (PUR) kullanan, Pasif Ev standartlarıyla uyumlu ve yüksek oranda optimize edilmiş bir kabuğu temsil etmektedir. Buna kar   ın, "Zayıf Yalıtım" referans modeli, bölgedeki eski kamu binalarının tipik bir özelliği olan, duvarlar için 1,80 - 2,00 W/m  K ve çatılar için 1,50 - 1,80 W/m  K gibi önemli      de yüksek U-değerleri sergileyen yalıtımsız geleneksel yapıyı ifade etmektedir. Kararlı durum enerji verimliliği hesaplamaları, Microsoft Excel ve MATLAB'de geliştirilen özel bir parametrik hesaplamalı

model kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ticari dinamik termal simülasyon yazılımları kullanmak yerine, enerji talepleri kesinlikle TS 825 standardının 2013 revizyonunda belirtilen matematiksel formülasyonlara ve ısı direnç prensiplerine dayalı olarak hesaplanmıştır. Isı akısı yoğunlukları, ortalama ısıl geçirgenlik dirençleri ve yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı, yerleşik kararlı durum denklemleri kullanılarak bulunmuştur. İklim verileri ve aylık ortalama dış ortam sıcaklık değerleri, doğrudan TS 825 eklerinde sağlanan jenerik meteorolojik tablolardan elde edilmiştir. Hesaplama süreci boyunca dış iklim verileri, bina yönelimi ve 26°C'de tutulan iç mekan ayar sıcaklığı kontrol değişkenleri olarak sabit tutulmuş; bu sayede modelin net kat yüksekliği, toplam taban alanı, yalıtım kalitesi ve pencere-duvar oranının toplam ısı yük üzerindeki bireysel termodinamik etkilerini net bir şekilde tanımlamasına olanak sağlanmıştır.

Araştırmanın bulguları belirli karşılaştırmalı kategoriler altında toplanmış olup, bunlardan ilki yalıtım kullanımı ile kat yüksekliği arasındaki ilişkiyi ele almaktadır. Veriler, ısı yalıtımının enerji tüketimini azaltmada en kritik faktör olduğunu ve uygulanan belirli yalıtım malzemesine bağlı olarak yıllık yakıt tüketimini ve emisyonları %68 ila %89,5 oranında azaltabildiğini ortaya koymaktadır. Kış aylarında kat yükseklikleri değerlendirildiğinde, yeterli yalıtıma sahip bir yapıda yüksekliğin 23 metreden 10 metreye düşürülmesi, enerji tüketimini yaklaşık %78 oranında azaltmıştır. Özellikle dikey hacim ve yalıtım arasındaki sinerji oldukça derindir, iyi yalıtım kullanan 10 metre yüksekliğindeki bir mekan, yalıtımsız muadiline göre 4,5 kat daha az enerji tüketmektedir. Bu oranın 15 metrelik yüksekliklerde 3,7 kata ve 23 metrelik yüksekliklerde 3,1 kata düştüğü gözlemlenmiş olup, artan kat yüksekliğinin toplam enerji talebini önemli ölçüde şiddetlendirdiği kanıtlanmıştır. En yüksek enerji gereksinimleri istisnasız olarak Ocak ayında görülürken, Mayıs ayı iç ve dış sıcaklıkların doğal olarak dengelenmesi nedeniyle en düşük talebi sunmuştur. İkinci bulgu kategorisi, yalıtım ile toplam mekansal alan arasındaki ilişkiyi incelemektedir. Taban alanı 8.000 m²'de sabit tutulduğunda, zayıf yalıtımdan iyi yalıtıma geçiş, yıllık enerji talebinde tutarlı bir biçimde yaklaşık %75'lik bir azalmaya yol açmaktadır. Diğer taraftan, yalıtım yüksek oranda optimize edilmiş bir seviyede sabit tutulduğunda, taban alanının 8.000 m²'den 2.800 m²'ye düşürülmesi ısıtma yükünde %40'lık bir düşüşle sonuçlanmaktadır. Kışın, 8.000 m²'lik bir alanın enerji ihtiyacı, yapı elemanlarında zayıf yalıtımdan iyi yalıtıma geçildiğinde yaklaşık %62 oranında azalmakta ve bu azalma 2.800 m²'lik daha küçük bir alan için %63,2'ye ulaşmaktadır. Veriler, mekansal küçülmenin doğrusal ve önemli verimlilik kazanımları sağlamasına rağmen, ısı yalıtım optimizasyonunun toplam enerji tasarrufunun temel itici gücü olmaya devam ettiğini ve mevsimsel performans varyasyonları üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Üçüncü ve dördüncü kategoriler, PDO ve farklı cam tiplerinin termodinamik özelliklerini ele almaktadır. Bulgular, PDO'nun düşürülmesinin yapısal değişikliklere kıyasla sadece marjinal verimlilik artışları sağladığını göstermektedir. Örneğin, 23 metrelik kat yüksekliğine sahip bir binada, %90 PDO'dan %10 PDO'ya geçiş, enerji verimliliğini yaklaşık %5,8 oranında iyileştirmektedir. Bu verimlilik farkı, kat yüksekliği azaldıkça daha da düşerek 15 metrelik yükseklikte %5,4'e ve 10 metrelik yükseklikte %4,9'a gerilemektedir. Cam özelliklerine ilişkin olarak, minimum %10 PDO'ya sahip bir cephede tek camdan çift cama geçiş enerji ihtiyacını yalnızca %0,7 oranında etkilerken, %90 PDO'ya sahip geniş bir cephede bu fark %5,8'e sıçramaktadır. Çift cam ile üçlü cam karşılaştırıldığında daha da küçük performans oranlarını elde edilmektedir. Örneğin; küçük pencereler için %0,3'lük ve büyük pencereler için %2,7'lik bir fark görülmektedir. Sonuç olarak, %90 oranındaki bir cephede tek cam kullanılması kışın en ciddi ısı kaybına neden olsa da, mimari hacim optimizasyonunun bu belirli iklim kuşağında pencere oranlarını en aza indirmekten çok daha güçlü bir strateji olduğu kanıtlanmıştır.

Sonuç olarak, araştırma sonuçları standartlara dayalı sistematik ekolojik ve termodinamik verilerin mimari tasarım aşamasına aktarılmasının, büyük ölçekli tesis planlamasına hayati katkılar sağladığını ortaya koymaktadır. Çalışma, PDO'nun azaltılmasının marjinal kazanımlar sağlamasına karşılık, Akdeniz'deki büyük kamu binaları için agresif hacim küçültme stratejilerinin ve güçlü bir ısı yalıtımı entegrasyonunun kesinlikle zorunlu olduğunu göstermektedir. Geleneksel konut yapılarının aksine, büyük spor tesislerindeki şekil faktörü veya dikey hacim, malzemenin ısıl geçirgenliğine karşı oldukça rekabetçi bir değişken olarak işlev görmektedir. Kararlı durum analizi; gizli ısı yüklerini, su buharlaşma dinamiklerini ve dinamik HVAC verimliliklerini kapsam dışı bırakması nedeniyle doğası gereği bazı sınırlamalara sahip olsa da, Neredeyse Sıfır Enerjili Bina hedeflerine ulaşmak için sağlam bir metodolojik çerçeve kurmaktadır. Optimize edilmiş yalıtıma öncelik verilerek ve kat yüksekliklerinin stratejik olarak 10 ila 15 metre civarında tutulmasıyla, gelecekteki projelerde işletme maliyetlerinde maksimum düşüş sağlanabilir, sera gazı emisyonları sınırlandırılabilir ve binanın yaşam döngüsü boyunca üstün kullanıcı konforu sürdürülebilir.

Anahtar Kelimeler: Pencere-duvar oranı (PDO), Enerji verimliliği, Enerji Etkin Yapı Tasarımı, Enerji performansı, TS 825.

www.turkishstudies.net/turkishstudies**Turkish Studies**

eISSN: 1308-2140

**ANKARA SCIENCE
UNIVERSITY**

Evaluation of Energy Efficiency in Large-Scale Indoor Pools in the Mediterranean Climate: A Case Study of Antalya Using the TS 825 Standard

Introduction

Energy consumption has become a necessity that continues to increase with the increase in population and the development of technology, leading to reasons such as increased CO₂ emissions, global warming, and climate change, which have continued to increase since the Industrial Revolution. Reducing energy consumption or looking for sustainable solutions can help prevent excessive consumption. According to studies, the energy consumption of buildings in developing countries varies between 20% and 40%, and in developed countries, 40% of the total energy is consumed by buildings (Rana et al., 2022; Pérez-Lombard et al., 2008). Stephan et al. (2011) stated that the construction sector significantly impacts energy consumption compared to global consumption. Another study stated that buildings cause the highest energy consumption, which affects the economy (Alaidroos and Krarti 2015). The increase in energy consumption of buildings is the most damaging sector to the ecology. For this reason, using energy-efficient designs in buildings should be aimed at reducing consumption by producing functional structures to protect the environment and using sustainable solutions that will reduce emissions that may harm human health.

Achieving energy savings for sustainable buildings is an ecological step towards reducing operating costs in the construction industry after the construction process is completed. In this way, it is aimed to provide user comfort while at the same time reducing the energy need with ecological materials that do not cause carbon emissions throughout the usage process of the building. According to research in the literature, some methodologies have been developed to optimize the energy performance of buildings, but most of them are similar.

The TS 825 standard functions as a strong fundamental method while advanced analytical techniques reveal greater understanding through their detailed investigations. The researchers Caner et al. (2026) demonstrated the capabilities of Artificial Neural Networks (ANN) to assess energy-saving building improvements through their study of a hospital facility. The current research uses a steady-state approach that follows TS 825 requirements but upcoming studies will use dynamic methods to study complex energy interactions within extensive indoor environments that include hidden energy effects.

Ensuring energy efficiency in buildings is based on reducing energy consumption by arranging them in a way that aims to increase their functionality during the use phase and increase the comfort of the users (Tukhtamishva et al., 2020). In this context, it is necessary to find solutions that will reduce the need for energy consumption and to take measures to increase user satisfaction by reducing operating costs and preventing consumption that will harm the environment. Thermal insulation is widely recognized as the most effective method for reducing building energy loads. Thermal insulation in building walls is one of the most valuable tools to reduce energy consumption for space heating and cooling in buildings (Canbolat et al., 2020). Different methods can use

insulation materials to prevent heat escape in building walls, ceiling and roof applications, flooring applications, and doors and windows. The thickness of the insulation materials, which must have specific thicknesses to prevent these heat escapes and keep the temperature in the interior constant, varies depending on the climate characteristics and differences in the material properties.

Research and assessment of economic, technological, and practical opportunities and limitations are required to lower energy and greenhouse gas emissions and develop a more effective energy efficiency strategy. Instead of increasing energy consumption, buildings can minimize their energy demand by adopting alternative insulating materials and increasing the thickness of these layers. An adequate and appropriate amount of thermal insulation in the walls, windows, floors, and roof allows the building to be heated and cooled more efficiently, and the higher the energy efficiency standards, the cheaper the energy consumption costs. The requirements for energy efficiency range greatly between nations due to varying climatic conditions. For example, the extremely low temperatures in the Northern area have led to very high standards in those countries (Ding et al., 2022; Csiba et al., 2016). While insulation materials are not used in countries with Mediterranean climate characteristics, it has been proven by some studies in recent years that their use will create significant differences. According to Uçar (2023), when looking at the average thermal permeability of buildings where insulation was applied in Mediterranean countries between 2012 and 2022, it was concluded that the highest thermal resistance was in Portugal, and the lowest thermal resistance, that is, the structures that best ensure heat preservation, were applied in Italy (Uçar & Akıner, 2024). Since the heating load of Mediterranean countries is low and the effect of the cooling load is high, the low thermal resistance coefficient ensures that air conditioners, which cause energy consumption by retaining heat as well as cold air, are operated less. In addition, there are studies on the use of insulation materials and finding the appropriate insulation thickness in studies conducted for Qatar, a country with a hot climate (Al-Khawaja, 2004), and China, which has a monsoon climate (Aytaç and Aksoy, 2006). In a study conducted for Elazığ-Turkey, optimum insulation thicknesses for different insulation materials vary between 5.4 and 19.2 cm, energy savings between 86.26 and 146.05 \$/ m², and payback periods between 3.56 and 8.85 years.

The economic viability of energy efficiency measures is a key driver for their adoption. Aşıkoglu Metehan (2025) established in his study of building retrofitting in Izmir through the Nearly Zero-Energy Building (NZEB) framework that building envelope component optimization serves as the essential method to achieve both energy savings and cost reductions. The Turkish context requires energy and cost-effective designs to follow standards like TS 825 which serve as the main regulatory framework for all building projects including new constructions and essential building retrofits.

According to Dylewski and Adamczyk (2021), the selection of the ideal thickness for insulation is contingent upon several factors, including the type of material, its thermal qualities, its production process, and the climate zone in which it will be installed. Different basic materials and shapes are used to make different insulation materials. For instance, the material may be sprayed on, rolled, rigidly plate-shaped, or pumped into the structure as foam (Abu-Jdayil et al., 2019). 60% of the market for insulating materials in Europe is made up mostly of inorganic fiber insulation, such as rock and glass wool. Furthermore, with a more significant volume of 27% of the market, organic foams, specifically expanded (EPS) and extruded (XPS) polystyrene and polyurethane (PUR), are also represented (Domínguez-Muñoz et al., 2010).

The selection of wall system materials serves as a critical choice which determines various performance standards. Çavdar and Lakot Alemdağ (2025) conducted their research which examined all insulation options by performing multi-criteria optimization of cross-laminated timber (CLT) wall systems in different climate regions of Türkiye. The researchers examined energy and carbon and cost performance aspects to demonstrate how alternative construction methods can enhance energy efficiency. The current study uses TS 825 conventional wall assembly calculations, but research on

CLT innovative systems offers a valuable path forward for studying large-scale low-carbon building design.

Applying optimum insulation thickness on an uninsulated wall reduces annual fuel consumption and emissions by 68-89.5%, depending on the insulation material (Özel, 2012). In cold climates, as seen in buildings with passive house certificates, using insulation material and increasing the thickness has proven to provide energy savings of up to 10 times in buildings (Passipedia, 2021). However, increasing the thickness of the thermal insulation layer does not always yield positive results regarding building energy efficiency (Tukhtamishva et al., 2020). The reason for this is that it will cause excessive heat accumulation inside the space, especially in buildings with hot climates, so it is possible that some insulation thickness may differ compared to cold climates and may vary depending on the building space volume. Since there will not be a single correct solution for every building, building designs must be made by considering the space volume, climate values, and the functional characteristics of the space. As the volume of the space grows, the need for mechanical ventilation or electrical heating/cooling to keep the temperature constant in the interior will increase.

Another method is the window glass ratios and the properties of the glass used. The window size is an essential structural element in providing heat to the interior according to the interior's illumination and sun exposure time. As long as there is no heat escape in these windows, there will be an opportunity for the energy to be provided to the interior space, depending on the size of the window, not to be met by mechanical systems. Therefore, adjusting the size according to the function of the interior space and designing the appropriate size for energy efficiency can reduce the cost of the building while it is in use. According to a study conducted in 2013, Susorova et al. proved that the window-to-wall ratio is a factor affecting the energy consumption used in the building. According to Lee et al. (2013), window design is a critical component that affects energy efficiency. Likewise, according to research, it has been stated that in Norway, a northern country, at least 1% electricity savings can be achieved annually by changing the amount of light coming from the window (Wang, 2020; Mirza and Berglan, 2011). Thus, while changing window size changes the energy need of the interior even in cold climates, this rate is much higher in hot climates. In their study in 2020, Alsehail and Almhafdy stated that the type of window frame and material can significantly affect energy efficiency and provide energy savings from 39% to 59%. Because the window systems and thermal insulation found in the building envelope structure are the major components that allow the building to achieve energy efficiency, the building's envelope structure influences the total value of the building's input and operational energies (Pacheco and Martínez, 2012). The structure of the building acts as a barrier between the interior and exterior environments, which impacts how heat, light, and air circulate the building. As a result, meticulous architectural design is required to ensure the facility performs well (Rouchier, 2018).

The significance of holistic design, which considers both energy efficiency and occupant well-being, is further emphasized in post-disaster contexts. The study of permanent housing in Bingöl, Türkiye, by Varolgüneş et al. (2026) showed that achieving better thermal comfort and indoor air quality requires multiple solutions. The research shows that design methods which enhance user satisfaction need to be implemented because they determine how well buildings function and maintain their environmental sustainability, which applies to all building types including indoor pools where user comfort needs to be prioritized.

Insulating using insulation material is essential in designing near-zero energy buildings since it can minimize energy consumption and greenhouse gas emissions. When insulating a building, it is vital to determine the ideal thickness of the insulation material to balance the impact of increasing the thickness on energy, environmental, and economic factors (Huang et al., 2020). The thermal conductivity of building structural elements must be kept to a minimum to maximize building energy efficiency. This requirement is predicated on the primary building boundary elements' U-value, given

in $W/m^2 K$ (Buildings Performance Institute Europe, 2011). The insulating material can be applied to the outside wall or roof of the building, or it can be applied to a specific portion of the structure. By balancing and minimizing heat transmission through the building structure, insulation materials assist in reducing heat gain in the summer and, on the other hand, heat loss in the winter (Kumar et al., 2020). The building's boundary components, including the floor, wall, and roof, significantly impact how much energy it uses. Installation of thicker insulation material on the roof instead of the wall and floor is required to lower the building's heating requirements (Piselli et al., 2019; Braulio-Gonzalo & Bovea, 2017; Sadine et al., 2011). Since the roof accounts for up to 60% of heat losses, roof insulation has become more critical (Sadineni et al., 2011). Determining the optimal insulation material for the wall construction will help reduce heat transfer through the structure. The main element of the several layers comprising the outside wall's thermal insulation system is the thermal insulation material (Özturan and Seyhan, 2024).

In the study, the features that may affect energy saving stated in the literature will be compared among themselves, and the feature that will cause the most energy saving will be discussed by making calculations for Antalya province under the TS 825 thermal insulation standard in buildings. This study aims to ensure energy efficiency in areas with large-scale structures for all cities and countries with a Mediterranean climate and to highlight design principles that will cause the least energy need. With this study, the features considered necessary in energy saving in the literature were analyzed comparatively with the change in the structure design that would be obtained when it is desired to design for an indoor pool. Although there are numerous studies on residential energy efficiency in Mediterranean climates, research specifically focusing on the thermodynamic challenges of large-volume indoor pools—such as the interplay between high ceilings and envelope insulation—remains limited. This study fills this gap by quantifying the combined effects of floor height, window-to-wall ratio, and insulation specifically for large-scale sports facilities under TS 825 standards.

Materials and Methods

The study aims to make conscious design and produce environmentally friendly buildings by focusing on the healing properties of our buildings. Thanks to these results, some design factors need to be considered, and their differences are examined to reduce operating costs and increase energy efficiency by reducing the energy need in buildings with high operating expenses, such as indoor pools with large-scale single-volume buildings. The design was determined as a significant and single-volume building according to the TS 825 Thermal Insulation in Buildings standard, considering the average outdoor temperature of the Mediterranean Region of Turkey and taking an indoor pool structure that can be applied in Antalya. For the design to be an example for other indoor pool structures, it is aimed to discuss the effects of factors such as floor height, window size, insulation properties, and space size on energy efficiency with changes in the design. In this context, it is aimed to contribute to energy saving in large-scale buildings by changing specific parameters by keeping the insulation values of the TS 825 standard, the materials to be used, and the outside air temperature constant. Accordingly, parameters to save energy and material properties are determined and calculated to observe the changes for Muratpaşa Municipality Süleyman Erol Olympic Swimming Pool in Antalya.



Figure 1. Muratpaşa Municipality Süleyman Erol Olympic Swimming Pool, Antalya

The selected reference building, Süleyman Erol Olympic Indoor Swimming Pool, has a total indoor construction area of approximately 9,000 m². The clear floor-to-ceiling height varies between 7 and 15 meters depending on the roof truss structure. The main daylight source, the south facade, features a window-to-wall ratio of approximately 85%, while the east and west facades have a WWR of approximately 15%. Currently, the building envelope lacks any specific thermal insulation. To evaluate the thermodynamic behavior of varying building scales and to establish a robust parametric model, the geometry of this reference structure was used as a baseline to derive distinct hypothetical scenarios. Instead of analyzing a single fixed geometry, the parametric study tested three different floor areas (8,000 m², 4,800 m², and 2,800 m²) to represent large, medium, and small-scale Olympic pool typologies. Furthermore, to analyze the critical impact of vertical volume on heat accumulation and stratification, three uniform clear heights (23 m, 15 m, and 10 m) were tested for each area scenario. This matrix approach allows for a comprehensive understanding of how volumetric changes interact with insulation levels in a Mediterranean climate.

To ensure the reproducibility and verifiability of the steady-state thermal calculations in accordance with the TS 825 standard, the technical specifications of the building envelope components for the compared scenarios are explicitly defined in Table 1. The term 'Good Insulation' represents a highly optimized building envelope that aligns with Passive House standards for the Mediterranean climate. This scenario utilizes high-performance insulation materials such as Expanded Polystyrene (EPS), Extruded Polystyrene (XPS), and Polyurethane (PUR) with sufficient thicknesses to reduce thermal transmittance (U-value) to approximately 0.11 - 0.14 W/m²K. Conversely, the 'Poor Insulation' scenario represents a baseline, uninsulated conventional construction typical of older large-scale public buildings in the region, exhibiting significantly higher U-values.

Table 1. Technical Specifications and U-values of the Building Envelope Scenarios

Envelope Component	Scenario	Material Layers (Outside to Inside)	Insulation Thickness (cm)	Calculated U-Value (W/m ² K)
External Wall	Good Insulation	Paint + Plaster + PUR/EPS + Autoclaved Aerated Concrete + Plaster	20 cm	0.11 - 0.13
	Poor Insulation	Paint + Plaster + Standard Reinforced Concrete + Plaster	None	~ 1.80 - 2.00
Roof / Ceiling	Good Insulation	Roof Cover + PUR/EPS + Vapor Barrier + Concrete Slab + Plaster	20 cm	0.11
	Poor Insulation	Standard Roof Cover + Uninsulated Concrete Slab + Plaster	None	~ 1.50 - 1.80
Floor Slab	Good Insulation	Granite/Marble + Screed + XPS/Vacuum Panel + Concrete + Soil	12 cm	0.10 - 0.22
	Poor Insulation	Granite/Marble + Screed + Uninsulated Concrete + Soil	None	> 1.10
Windows	Good Insulation	Triple Glazing (Argon filled)	-	1.18 - 2.00
	Poor Insulation	Single Glazing (Uncoated)	-	5.20

The steady-state energy efficiency calculations were conducted using a custom parametric computational model developed in Microsoft Excel and MATLAB. Rather than employing a commercial dynamic thermal simulation software, the energy demands were calculated based strictly on the mathematical formulations (Equations 1-8) and thermal resistance principles dictated by the TS 825 standard (2013 revision). The climate and monthly average outdoor temperature data for the province of Antalya were directly extracted from the generic meteorological tables provided in the TS 825 Annexes for the 1st Degree-Day Region.

In terms of the parametric scenario setup, the external climate data, the building orientation, and the indoor set temperature (maintained at 26 °C as per indoor pool standards) were held constant as control variables throughout the study. The independent variables systematically tested in the computational model were the clear floor height, total floor area, insulation quality (building envelope U-values), and window-to-wall ratio. This single-variable isolation approach allows for a clear understanding of each parameter's distinct impact on the overall thermal load.

First, information is collected about the determination and thickness of the materials used in the building. With this data, thermal resistance (R) was found.

As stated in the thermal resistance equation 1, the thickness (d) value of the building component is calculated according to the thermal conductivity calculation value (λ_h), which is calculated by division.

$$R = \frac{d}{\lambda_h} \quad (1)$$

Here;

R: Thermal resistance (m².K/W),

d: Thickness of the building component (m),

λ_h : Thermal conductivity calculation value is (W/mK).

Average thermal resistance of the building element to be used in heating energy calculation,

$$R = R_1 \cdot \frac{2 \cdot L_1 + 5L_3}{L} + R_2 \cdot \frac{6 \cdot L_2}{L} + R_3 \cdot \frac{L_4}{L} \quad (2)$$

L: Total width or length of the evaluated building component (m) is calculated using Equation 2.

The average thermal resistance (R) of a building component consisting of several adjacent layers is calculated with the total thermal permeability coefficient (U) according to equation 3.

$$R = \frac{1}{U} - (R_i + R_e) \quad (3)$$

A steady-state heat flux density (q) is calculated according to equation 4.

$$q = U \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (4)$$

Here;

q: Heat flow density (W/ m²),

θ_i : Indoor temperature (°C),

θ_e : Outdoor temperature (°C),

U: Total thermal transmittance of the building component (W/m².K).

The annual heating energy needed for a single building section is calculated using the following equation.

$$Q_{year} = \sum Q_{month} \quad (5)$$

$$Q_{month} = [H(\theta_i - \theta_e) - \eta_{month}(\phi_{i,month} + \phi_{s,month})] \cdot t \quad (6)$$

Here;

Q_{year} : Annual heating energy need (Joules),

Q_{month} : Monthly heating energy need (Joules),

H: Specific heat loss of the building (W/K),

θ_i : Monthly average indoor temperature (°C),

θ_e : Monthly average outside temperature (°C),

η_{month} : Average monthly usage factor for heat gains (unitless),

$\phi_{i,month}$: Average monthly heat gains(can be taken as constant) (W),

$\phi_{s,month}$: Monthly average solar energy gain (W),

t : Time (s) (assumed as 1 month = 86,400 x 30 seconds).

Heat loss through conduction and convection is calculated with equation (7). In this equation, the heat loss transmitted through thermal bridges, if any, is added to the heat loss transmitted through the building elements. A thermal bridge is a part where the composition is different compared to the adjacent surface, the heat loss is higher than the average heat loss of the building, and the internal surface temperature is lower for a steady state in winter.

$$H_T = \sum AU + l U_l \quad (7)$$

$$\sum AU = U_D A_D + U_P A_P + U_K A_K + 0.8 U_T A_T + 0.5 U_t A_t + U_d A_d + 0.5 U_{ds} A_{ds} \quad (8)$$

Here;

U_D : Thermal transmittance of the outer wall ($\text{W/m}^2 \text{ K}$),

U_P : Thermal transmittance of the window ($\text{W/m}^2 \text{ K}$),

U_k : Thermal transmittance of the external door ($\text{W/m}^2 \text{ K}$),

U_T : Thermal transmittance of the ceiling ($\text{W/m}^2 \text{ K}$),

U_i : Thermal transmittance of the base/slab sitting on the ground ($\text{W/m}^2 \text{ K}$),

U_d : Thermal transmittance of the base in contact with the outside air ($\text{W/m}^2 \text{ K}$),

U_{ds} : Thermal transmittance of the building elements that come into contact with internal environments at low temperatures ($\text{W/m}^2 \text{ K}$),

A_D : Area of the external wall (m^2),

A_P : Area of the window (m^2),

A_k : Area of the exterior door (m^2),

A_T : Area of the ceiling (m^2),

A_i : Area of the floor sitting on the ground (m^2),

A_d : Area of the floor in contact with the outside air (m^2),

A_{ds} : Area of the building elements in contact with low-temperature internal environments (m^2).

Antalya province, which has a Mediterranean climate, is considered as the 1st Region within TS 825. 1. Monthly average outdoor temperature values to be used in heat loss and condensation calculations for different degree day regions of the region are given in the table below;

Table 2. First region temperature values according to TS 825

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1st region (Antalya)	8.4	9.0	11.6	15.8	21.2	26.3	28.7	27.6	23.5	18.5	13.0	9.3

Antalya, characterized by an average annual temperature of 17.7°C , requires indoor pool temperatures to be maintained between $24\text{--}28^\circ\text{C}$.

Findings

Many factors can affect energy consumption in a space. This article comparatively analyzes which of these factors will most negatively affect the energy consumption of the space. The features to be compared are grouped under four headings as follows;

- 1- Relationship between insulation use and floor heights
- 2- The relationship between insulation use and space size
- 3- Relationship between window-to-wall ratio and floor height
- 4- The relationship between window-to-wall ratio and glass types in terms of insulation

When the data obtained in this way is examined monthly throughout the year, it is aimed to investigate which months of energy saving can be achieved and by which method it can be achieved. This study will contribute to pre-implementation design and the continuity of sustainable ecological buildings during building construction. Applying the comparison with TS 825 Thermal Insulation Rules in Buildings, which was implemented in Turkey and adapted to EU standards in 1998, will benefit constructions with large spaces produced in countries with a Mediterranean climate.

All operational energy reduction efforts lead to building energy reduction which supports the overall goal of transforming buildings into Net-Zero Energy Buildings (NZEB). Eksi et al. (2025)

established the essential function of optimized building envelopes for Mediterranean Region NZEB objectives through their techno-economic and environmental assessment. The study provides energy-saving potential results from optimized insulation which achieves 68-89.5% energy savings through volume management in Antalya. The study creates design principles which enable large public building projects in the region to achieve their transformation objectives.

The first comparison was made between a building with good insulation and a building with poor insulation due to differences in energy consumption due to different floor heights. The months with the highest and lowest energy consumption in these places, whose total floor heights will vary between 23 meters, 15 meters, and 10 meters, are shown in Chart 1.

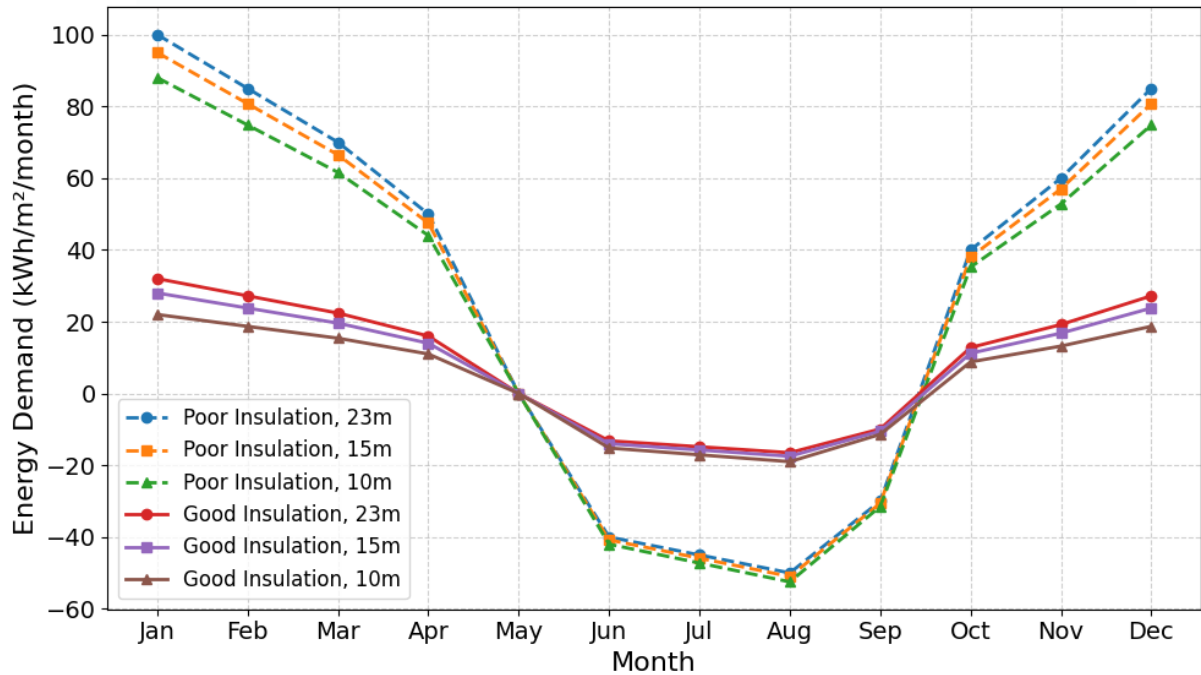


Chart 1. Monthly effect of the relationship between insulation use and floor heights on energy consumption.

Energy consumption is lowest in May, as mild temperatures balance indoor and outdoor conditions. However, as the floor height decreases in a building with good insulation, it is seen that the energy consumption in the interior increases as it causes heat accumulation. The highest consumption is in a building with less insulation and a floor height of 23 meters. The minimum consumption floor height is 10 meters in a building with good insulation, 15 meters in the second place, 23 meters in the third place, followed by 10 meters and 23 meters in a building with poor insulation.

When we look at all buildings with poor insulation, it is seen that the difference between them in terms of change in floor heights is relatively small compared to buildings with good insulation. While this difference creates a 15% difference in energy consumption between 15-meter floor height and 25-meter floor height in uninsulated buildings during the winter, this difference causes a 29.7% difference in the insulated building. In the summer, the difference increases to 36% in an insulated building. In the case of using an uninsulated building, energy consumption will always be high, regardless of the floor height. However, in an insulated building, changes in floor heights will significantly affect energy consumption, so it is necessary to find the most ideal one and apply it. Floor heights should also be preferred at ideal levels in solutions to prevent heat accumulation in

the interior and prevent heat escape. The highest energy requirement is January, and the lowest is May for all spaces and floor heights. When examined for the whole year, the difference between floor height changes;

- The floor height between 10 meters in an insulated building and 10 meters in an uninsulated building consumes 4.5 times less energy.
- Floor height between 15 meters in an insulated building and 15 meters in an uninsulated building consumes 3.7 times less energy.
- It was concluded that the floor height between 23 meters in an insulated building and 23 meters in an uninsulated building consumes 3.1 times less energy.

In this case, these data showed that insulation is an essential factor in using floor height in the building. It has been determined that if the insulation is very good and 23 meters of floor height is used, it will affect the energy efficiency by approximately 68% in the winter months, and if 10 meters is used, it will affect the efficiency by approximately 78%. It has been concluded that by using good insulation to prevent heat from accumulating inside during the summer months, the energy efficiency in the space with a floor height of 23 meters will increase by approximately 67%, and if 10 meters are used, the efficiency will increase by approximately 76%. It is seen that heat losses will occur the most in January and the least in May.

When the square-meter difference between the space with good insulation and the space with poor insulation is examined, the energy consumption increases as the space grows. As stated in Chart 2, which shows the monthly changes, insulation changes create significant differences.

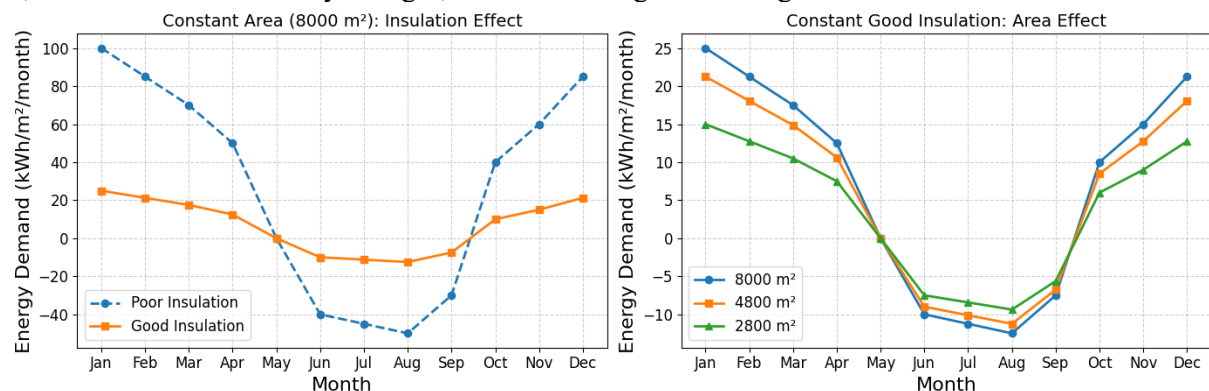


Chart 2. Monthly effect of the relationship between insulation use and space size on energy consumption.

To isolate the impact of insulation quality from the volumetric effects, the results were analyzed by keeping the floor area constant while varying insulation levels. As illustrated in Chart 2, when the floor area is held constant at 8,000 m², the transition from poor to well insulation leads to a consistent decrease in annual energy demand by approximately 75%. Similarly, when observing the impact of volumetric change independently (keeping insulation constant at the well level), a reduction in floor area from 8,000 m² to 2,800 m² results in a 40% decrease in heating load. This isolation confirms that while volume reduction provides linear efficiency gains, insulation optimization remains the primary driver of total energy savings, responsible for the most significant variance in the performance data.

In the winter, the heating load increases, and the cooling load decreases. The difference in energy needs increases between spaces with good and poor insulation. In the summer, the heating load decreases, and the cooling load increases. While May and October are the months with the lowest energy needs, it is seen that the difference between the months between April and November

increases depending on the square meter changes between well-insulated spaces and poorly insulated spaces. According to Chart 2, the effect of insulation has shown that it is an important factor affecting the energy need according to the size of the space.

The difference in heat loss rates between a well-insulated 8000 m² area and a poorly insulated 2800 m² area is very close. In this case, it is understood from the graph that the most critical factor to consider when deciding on the space size is insulation. It was determined that the highest heat loss rate was in January, and the lowest was in October. The results from the graph show that the areas with 2800 m² of space with good insulation have the lowest heat loss rate compared to all months.

In winter, the energy need of the place, which has a usable area of 8000 m², decreases by approximately 62% between good and bad insulation of the building elements. When the space is 2800 m², this rate is approximately 63.2%. In the spring months, the energy need of the place, which has a usable area of 8000 m², decreases by approximately 71.46% between the good and bad insulation of the building elements. When the space is used as 2800 m², the energy requirement decreases by at least 70.5% and at most 100%. Since insulation causes heat accumulation in the interior after April, the need for ventilation or cooling increases slightly in the summer and the first months of autumn.

According to Chart 3, which shows the effect of window-wall ratios, the 90% and 10% rates are compared. The window-to-wall ratio varies depending on floor height. For this reason, it is compared based on the floor heights of 23 meters, 15 meters, and 10 meters in Chart 1.

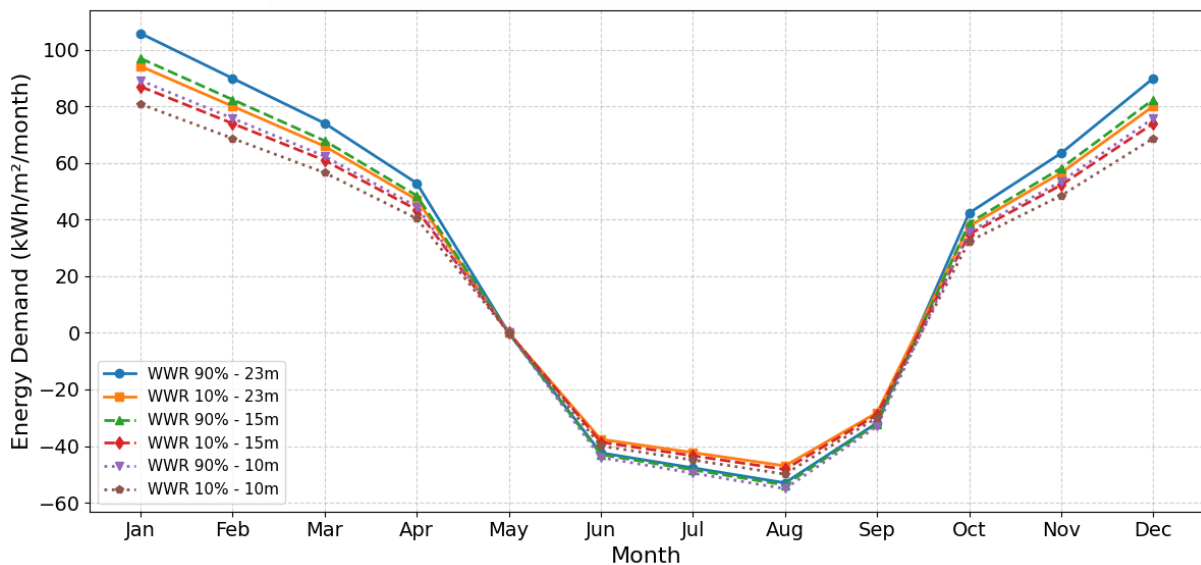


Chart 3. Monthly effect of the relationship between window-to-wall ratio and floor height on energy consumption.

When window-wall ratios are compared according to floor heights, it is shown that buildings with 90% or 10% values can provide similar energy consumption when floor heights are equal in all months. According to these results, when the floor height is 23 meters in a building with a 90% window-wall ratio in all months, and when the floor height is 23 meters in a building with a 10% window-wall ratio, the effect on energy efficiency is approximately 5.8%. The exact rate is 5.4% with a floor height of 15 meters and 4.9% with a floor height of 10 meters. As the floor height decreases, their efficiency difference almost approaches each other. In this case, the difference in the change of window-to-wall ratio is a factor that slightly affects the energy efficiency rate.

When we look at the relationship between the window-wall ratio and the floor height, as the floor height decreases, the difference between the window-wall ratio being a large or small ratio decreases. The higher the floor height, the greater the heat loss difference between 10% and 90% in the window-to-wall ratio. When we look at the months, it was determined that the highest heat loss was in January and the least in May. If the window-to-wall ratio is 10% during winter, the energy needed in a building with a floor height of 23 meters can be reduced by approximately 5.88%. When the floor height is 10 meters, the energy required will decrease by approximately 5.1%. When the window-to-wall ratio is used as 10% in spring, the energy need decreases by approximately 10.37% at a height of 23 meters, while the energy need decreases by approximately 5.88% at 10 meters.

The last comparison is the comparison of window wall ratios with the changes in thermal permeability values that provide window insulation. In Chart 4, for buildings with 90% and 10% windows, using single glass in the windows (U value, which is the thermal transmittance value, should be $5.2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$), using double glass (U value, which is the thermal transmittance value, should be $3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$), and It is compared to using triple glass (the thermal transmittance value of U is $2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$).

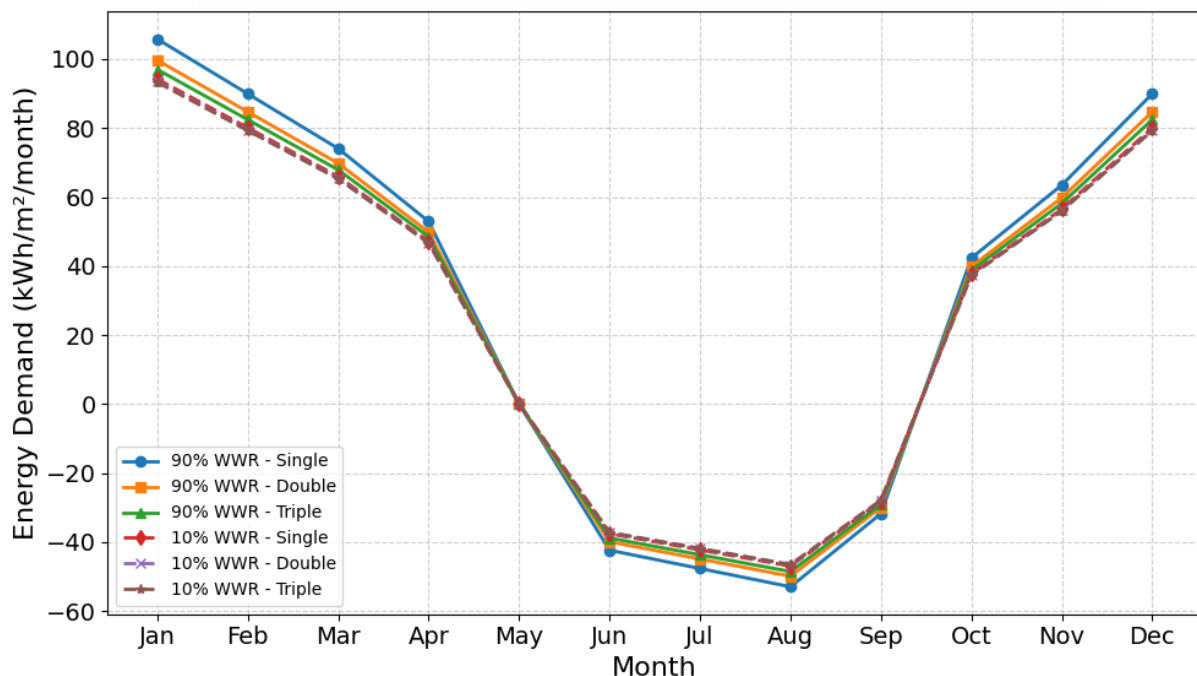


Chart 4. Monthly effect of the relationship between window-to-wall ratio and glass types in terms of insulation on energy consumption.

When the glass feature used in a building with a window-to-wall ratio of 10% is compared between double and single glass, it affects the energy need by 0.7%. When double glazing and triple glazing are compared on the same window wall, this rate is 0.3%. The difference between triple glazing and double glazing, which are almost close to each other, decreases as the glass ratio decreases. When the window ratio increases to 90%, the difference between single-glazing and double-glazing rises to 5.8%. When double glazing and triple glazing are compared, the difference in energy need decreases to 2.7%. In this case, as the window size decreases from the graph, it is concluded that the difference between using single glass and triple glass makes less difference compared to large proportion windows, as the heat transfer from outside and inside will decrease. When a large proportion of windows is used, it may be recommended to use double glass instead of

single glass to provide insulation in the window glass due to the increased heat transfer through the window. While the similar results between double glazing and triple glazing create significant differences in cold climates, this difference decreases in hot countries such as the Mediterranean climate. In this case, using double glazing in buildings may be preferable in terms of cost and efficiency.

In January, the heat losses are highest in all glass properties; in May, there is almost zero heat loss. In June, July, August, and September, the excess heat gain accumulated in the interior instead of heat loss, indicates that the cooling need will be high due to the characteristics of the climate. The difference between window and wall ratios in Chart 4 shows that using single glass in the window and applying 90% of the window on the facade causes the most heat loss and will, therefore, affect the energy needed. In winter months, the energy need can be reduced by approximately 11% by using a 10% window wall in single-glazed windows, and this rate increases to 12% in the spring months. Using triple glazing will reduce the energy needed by approximately 4.9% in the winter months and by approximately 5% in the spring months. Although there is a difference between using single glass and triple glazing in window glass, when we look at it in general, it has been determined that the most critical factor in heat loss is the size of the window. As the size of the window increases, the difference in heat loss between single and triple glass changes significantly.

The research results about window characteristics show complete agreement with dedicated studies that investigate this particular field. The optimization research study conducted by Güven and Akgüç (2025) examined residential buildings throughout Turkey and discovered that choosing suitable window thermo-physical attributes functions as an effective method for decreasing energy consumption and greenhouse gas emissions and expenses. The study examined residential building types but the principle applies to large buildings because the research findings from Antalya indicate that double glazing provides lower advantages than decreasing the window-to-wall ratio in that specific climate.

If evaluated in general terms,

- By looking at the graphs, it has been determined that if insulation is used, the energy requirement will be less when the floor height or space size increases compared to the building without insulation.
- Designing an average floor height of 10-15 meters will yield more efficient results than designing it higher.
- Depending on the window ratio size, double or triple glazing, if there is a large window area, it will increase energy efficiency.
- Using insulated materials for walls, floor slabs, and roof slabs in the designed structure and ensuring material selections with a low total U value will generally ensure that the structure requires less energy.
- It is concluded that as long as the insulation is good, there will be no limit on the size of the building. The size can be increased if desired, but the most efficient one should be chosen from the one with the least square meters.
- The same energy demand is created when the maximum use of floor height in winter is compared to the maximum use of space in summer.
- Reducing the floor height to 10 meters in winter and designing a building with a floor height of 23 meters in summer creates the same amount of energy demand.

The findings of this study align with the broader literature regarding the dominance of insulation in hot climates. Similar to Uçar (2023) and Canbolat et al. (2020), our results confirm that thermal permeability is the primary driver of energy load. However, unlike residential buildings, this study demonstrates that in large-volume structures, the 'shape factor' (specifically floor height)

becomes a competitive variable against insulation parameters. While decreasing WWR provides marginal gains (approx. 5-10%), volume reduction strategies offered up to 3.1 times less energy consumption in winter. This suggests that for large-scale public buildings in Antalya, architectural volume optimization is as crucial as material selection.

Limitations and Future Studies

This study focused primarily on the heating and cooling transmission loads of the building envelope based on TS 825 calculation methods. It should be noted that internal heat gains from occupants, lighting loads, and specifically the latent heat load due to pool water evaporation were not included in this steady-state analysis. Furthermore, a key limitation of this study is its geographical and typological scope. The parametric findings regarding energy savings, particularly the specific percentage variations related to floor height and insulation, are derived solely from the climatic data of Antalya and the unique thermodynamic behavior of a single-volume Olympic swimming pool. Therefore, these quantitative results cannot be directly generalized as a macro-level rule for all large-scale structures across the entire Mediterranean basin. Future studies should incorporate dynamic energy simulation tools to account for humidity control and HVAC system efficiencies in large-scale indoor pools.

Conclusion

By comparing the factors that will most affect energy efficiency in single-volume and large-scale indoor pool structures, it has been determined that the most critical factor is insulation. Thermal permeability values of the materials to be used, retaining heat in the interior, and preventing heat escapes are vital factors to consider and affect energy consumption, regardless of the space size. Another feature is floor height and space size. When the two factors are compared, and climate characteristics are considered, the difference between the change in floor heights and the change in space sizes during the winter months varies between at least 5% and 33%. This indicates that lowering the floor height during the winter months will reduce the energy need, and as the space becomes smaller, the energy demand will decrease. The energy demand difference between floor height and space size change in summer is 50-55.3%. According to the results in the summer months, it was concluded that reducing the floor height creates less energy demand while enlarging the space in square meters is the most important feature that increases the energy demand. Although the change in space sizes for the summer and winter months makes a slight difference, the main difference is the change in floor heights. This has been deduced from the results that there is no need for additional cooling in the space since the cooled air in summer cannot rise due to the rise of hot air and the descent of cold air, and in winter, the need for constant heating increases due to the rise of heated air, and the need for heating constantly increases as the floor height increases.

When the study results are compared, it is concluded that the most important thing is to use insulation material, then pay attention to the floor height, follow the window-wall ratio, and calculate the square meter of the space before design. This study has prepared the importance ranking to show which feature can contribute more to energy efficiency according to the constraints in large-scale design structures. In this way, ideal methods were determined to reduce operating expenses and provide user comfort throughout the life of the building.



www.turkishstudies.net/turkishstudies

Turkish Studies

eISSN: 1308-2140



ANKARA SCIENCE
UNIVERSITY

Akdeniz İkliminde Büyük Ölçekli Kapalı Havuzların Enerji Verimliliği Değerlendirmesi: TS 825 Standardı ile Antalya Örneği

Giriş

Enerji tüketimi; artan nüfus ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte artmaya devam eden bir zorunluluk haline gelmiş olup, Sanayi Devrimi'nden bu yana sürekli artan CO2 emisyonları, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi sorunlara yol açmaktadır. Enerji tüketiminin azaltılması veya sürdürülebilir çözümler aranması, aşırı tüketimin önlenmesine yardımcı olabilir. Araştırmalara göre, gelişmekte olan ülkelerde binaların enerji tüketimi %20 ile %40 arasında değişirken, gelişmiş ülkelerde toplam enerjinin %40'ı binalar tarafından tüketilmektedir (Rana vd., 2022; Pérez-Lombard vd., 2008). Stephan vd. (2011), inşaat sektörünün küresel tüketime kıyasla enerji tüketimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Bir diğer çalışmada, ekonomiyi de etkileyen en yüksek enerji tüketimine binaların neden olduğu ifade edilmiştir (Alaidroos ve Krarti 2015). Binalardaki enerji tüketimindeki artış, ekolojiye en çok zarar veren faktör olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle binalarda enerji verimli tasarımların kullanılması, çevreyi korumak adına işlevsel yapılar üreterek tüketimi azaltmaya ve insan sağlığına zarar verebilecek emisyonları düşürecek sürdürülebilir çözümleri kullanmaya odaklanmalıdır.

Sürdürülebilir binalar için enerji tasarrufu sağlamak, inşaat sektöründe yapım süreci tamamlandıktan sonra işletme maliyetlerini düşürmeye yönelik ekolojik bir adımdır. Bu şekilde, binanın kullanım süreci boyunca karbon salınımına neden olmayan ekolojik malzemelerle enerji ihtiyacının azaltılması ve aynı zamanda kullanıcı konforunun sağlanması amaçlanmaktadır. Literatürdeki araştırmalara göre, binaların enerji performansını optimize etmek için birtakım metodolojiler geliştirilmiş olsa da bunların çoğu birbirine benzemektedir. TS 825 standardı güçlü bir temel yöntem olarak işlev görürken, gelişmiş analitik teknikler detaylı incelemeleri aracılığıyla konuya dair daha kapsamlı bir anlayış sunmaktadır. Araştırmacılar Caner vd. (2026), bir hastane tesisi üzerine yaptıkları çalışmayla Yapay Sinir Ağlarının (YSA) binalardaki enerji tasarrufu iyileştirmelerini değerlendirme potansiyelini ortaya koymuşlardır. Mevcut araştırma, TS 825 gerekliliklerini takip eden kararlı durum yaklaşımını kullanmaktadır ancak gelecekteki çalışmalar, gizli enerji etkilerini barındıran geniş iç mekanlardaki karmaşık enerji etkileşimlerini incelemek için dinamik yöntemlerden faydalanacaktır.

Binalarda enerji verimliliğinin sağlanması, kullanım aşamasında işlevselliklerini ve kullanıcıların konforunu artırmayı hedefleyecek şekilde düzenlemeler yapılarak enerji tüketiminin azaltılmasına dayanmaktadır (Tukhtamışeva vd., 2020). Bu bağlamda, enerji tüketimi ihtiyacını azaltacak çözümler bulmak; işletme maliyetlerini düşürerek kullanıcı memnuniyetini artıracak ve çevreye zarar verecek tüketimi önleyecek tedbirler almak elzemdir. Isı yalıtımı, binaların enerji yüklerini azaltmada en etkili yöntem olarak geniş çapta kabul görmektedir. Bina duvarlarındaki ısı yalıtımı, mekanların ısıtılması ve soğutulmasına yönelik enerji tüketimini azaltmada en değerli araçlardan biridir (Canbolat vd., 2020). Bina duvarlarında, tavan ve çatı uygulamalarında, zemin

uygulamalarında ve kapı-pencerelerde ısı kaçışını önlemek için yalıtım malzemeleri farklı yöntemlerle kullanılabilir. Isı kaçışlarını önlemek ve iç mekandaki sıcaklığı sabit tutmak amacıyla belirli kalınlıklara sahip olması gereken yalıtım malzemelerinin boyutu; iklim özelliklerine ve malzeme türünün niteliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Enerji tüketimini ve sera gazı emisyonlarını düşürmek, ayrıca daha etkili bir enerji verimliliği stratejisi geliştirmek için ekonomik, teknolojik ve pratik fırsatlar ile kısıtlamaların araştırılıp değerlendirilmesi gerekmektedir. Binalar, enerji tüketimini artırmak yerine alternatif yalıtım malzemeleri benimseyerek ve bu katmanların kalınlığını artırarak enerji taleplerini asgari düzeye indirebilirler. Duvarlarda, pencerelerde, zeminlerde ve çatıda yeterli ve uygun miktarda ısı yalıtımı yapılması, binanın daha verimli bir şekilde ısıtılıp soğutulmasına olanak tanır, enerji verimliliği standartları ne kadar yüksek olursa enerji tüketim maliyetleri de o kadar düşük olur. Enerji verimliliği gereklilikleri, değişken iklim koşulları nedeniyle ülkeler arasında büyük farklılıklar arz etmektedir. Örneğin, Kuzey bölgelerindeki aşırı düşük sıcaklıklar, o ülkelerde çok yüksek standartların uygulanmasına yol açmıştır (Ding vd., 2022; Csiba vd., 2016). Akdeniz iklim özelliklerine sahip ülkelerde yalıtım malzemeleri yaygın olarak kullanılsa da son yıllarda yapılan bazı çalışmalar, bunların kullanımının kayda değer farklılıklar yaratacağını kanıtlamıştır. Uçar'a (2023) göre, 2012 ile 2022 yılları arasında Akdeniz ülkelerinde yalıtım uygulanan binaların ortalama ısı geçirgenliği incelendiğinde en yüksek ısı geçirgenliğin Portekiz'de olduğu, en düşük ısı geçirgenliğin yani ısı korunumunu en iyi sağlayan yapıların ise İtalya'da uygulandığı sonucuna varılmıştır (Uçar ve Akıner, 2024). Akdeniz ülkelerinde ısıtma yükü düşük, soğutma yükünün etkisi ise yüksek olduğundan; düşük ısı geçirgenlik katsayısı, soğuk havanın yanı sıra ısıyı da hapsederek enerji tüketimine neden olan klimaların daha az çalıştırılmasını sağlamaktadır. Buna ek olarak, sıcak bir iklime sahip olan Katar (Al-Khawaja, 2004) ile muson iklimine sahip olan Çin (Aytaç ve Aksoy, 2006) için gerçekleştirilen çalışmalarda da yalıtım malzemelerinin kullanımına ve uygun yalıtım kalınlığının tespit edilmesine dair araştırmalar mevcuttur. Türkiye'de Elazığ için yapılan bir çalışmada, farklı yalıtım malzemeleri adına optimum yalıtım kalınlıklarının 5,4 ile 19,2 cm, enerji tasarrufunun 86,26 ile 146,05 \$/ m² ve geri ödeme sürelerinin 3,56 ile 8,85 yıl arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Enerji verimliliği önlemlerinin ekonomik açıdan uygulanabilirliği, bu adımların benimsenmesinde kilit bir itici güçtür. Aşıkoğlu Metehan (2025), İzmir'de Neredeyse Sıfır Enerjili Bina çerçevesinde gerçekleştirdiği bina yenileme çalışmasında, bina kabuğu bileşenlerinin optimizasyonunun hem enerji tasarrufu hem de maliyet düşüşü elde etmede temel yöntem olduğunu saptamıştır. Türkiye bağlamında, enerji ve maliyet etkin tasarımların; yeni inşaatlar ve zorunlu bina yenilemeleri de dahil olmak üzere tüm yapı projeleri için ana yasal çerçeve işlevi gören TS 825 gibi standartlara uyması gerekmektedir.

Dylewski ve Adamczyk'e (2021) göre yalıtım için ideal kalınlığın seçimi, malzemenin türü, ısı kalitesi, üretim süreci ve kurulacağı iklim bölgesi gibi bir dizi faktöre bağlıdır. Farklı yalıtım malzemeleri üretmek için çeşitli temel materyaller ve formlar kullanılmaktadır. Örneğin yalıtım malzemesi, püskürtme, rulo, sert plaka formunda olabileceği gibi yapıya köpük olarak da pompalanabilir (Abu-Jdayil vd., 2019). Avrupa'daki yalıtım malzemeleri pazarının %60'ı, taş yünü ve cam yünü gibi inorganik lifli yalıtımlardan oluşmaktadır. Bununla birlikte, %27'lik daha büyük bir pazar payı ile organik köpükler, bilhassa genleştirilmiş (EPS) ve ekstrüde (XPS) polistiren ile poliüretan (PUR) da pazarda temsil edilmektedir (Domínguez-Muñoz vd., 2010).

Duvar sistemi malzemelerinin seçimi, çeşitli performans standartlarını belirleyen kritik bir tercihtir. Çavdar ve Lakot Alemdağ (2025), Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde çapraz lamine ahşap (CLT) duvar sistemlerinin çok kriterli optimizasyonunu gerçekleştirerek tüm yalıtım seçeneklerini inceledikleri bir araştırma yürütmüşlerdir. Araştırmacılar, alternatif yapıım yöntemlerinin enerji verimliliğini nasıl artırabileceğini göstermek amacıyla enerji, karbon ve maliyet performansı boyutlarını ele almışlardır. Mevcut çalışma TS 825 standart duvar bileşeni hesaplamalarını

kullanılmaktadır, ancak CLT gibi yenilikçi sistemler üzerine yapılan araştırmalar büyük ölçekli ve düşük karbonlu bina tasarımlarını incelemek için ileriye dönük değerli bir perspektif sunmaktadır.

Yalıtımsız bir duvara optimum yalıtım kalınlığının uygulanması, yalıtım malzemesine bağlı olarak yıllık yakıt tüketimini ve emisyonları %68-89,5 oranında düşürmektedir (Özel, 2012). Soğuk iklimlerde, pasif ev sertifikalı binalarda gözlemlendiği üzere, yalıtım malzemesi kullanımı ve kalınlığın artırılması binalarda 10 kata varan enerji tasarrufu sağladığını kanıtlamıştır (Passipedia, 2021). Ne var ki, ısı yalıtım katmanının kalınlığının artırılması, bina enerji verimliliği açısından her zaman olumlu sonuçlar doğurmamaktadır (Tukhtamışeva vd., 2020). Bunun temel nedeni, bilhassa sıcak iklimlerdeki binalarda mekan içinde aşırı ısı birikimine yol açacak olmasıdır, bu sebeple bazı yalıtım kalınlıklarının soğuk iklimlere kıyasla farklılık göstermesi ve binanın mekansal hacmine bağlı olarak değişmesi muhtemeldir. Her bina için tek bir doğru çözüm olamayacağından bina tasarımları mekansal hacim, iklim değerleri ve mekanın işlevsel özellikleri dikkate alınarak gerçekleştirilmelidir. Mekanın hacmi büyüdükçe, iç mekandaki sıcaklığı sabit tutmaya yönelik mekanik havalandırma veya elektrikli ısıtma/soğutma ihtiyacı da artacaktır.

Bir diğer yöntem ise pencere-cam oranları ile kullanılan camın özellikleridir. Pencere boyutu, iç mekanın aydınlanması ve güneşe maruz kalma süresine göre iç mekana ısı sağlanmasında esaslı bir yapısal elemandır. Pencereelerde ısı kaçışı olmadığı müddetçe, pencerenin boyutuna bağlı olarak iç mekana sağlanacak enerjinin mekanik sistemler tarafından karşılanma ihtiyacını ortadan kaldıracak bir fırsat doğacaktır. Bu doğrultuda, boyutun iç mekanın işlevine göre ayarlanması ve enerji verimliliğine uygun boyutun tasarlanması, binanın kullanım halindeyken ortaya çıkacak maliyetlerini azaltabilir. Susorova vd. tarafından 2013 yılında yürütülen bir çalışmaya göre, pencere-duvar oranının (PDO) binada tüketilen enerjiyi etkileyen bir faktör olduğu kanıtlanmıştır. Lee vd.'ne (2013) göre pencere tasarımı, enerji verimliliğini etkileyen son derece kritik bir bileşendir. Nitekim araştırmalara göre, bir kuzey ülkesi olan Norveç'te pencereden gelen ışık miktarının değiştirilmesiyle yıllık en az %1 elektrik tasarrufu sağlanabileceği ifade edilmiştir (Wang, 2020; Mirza ve Bergland, 2011). Böylece pencere boyutunun değiştirilmesi soğuk iklimlerde dahi iç mekanın enerji ihtiyacını değiştirirken, bu oran sıcak iklimlerde çok daha yüksektir. Alsehail ve Almhafdy 2020 yılındaki çalışmalarında, pencere çerçevesi tipinin ve malzemenin enerji verimliliğini kayda değer ölçüde etkileyebileceğini ve %39'dan %59'a varan oranda enerji tasarrufu sağlayabileceğini belirtmişlerdir. Bina kabuğunda yer alan pencere sistemleri ve ısı yalıtımı, binanın enerji verimliliğine ulaşmasını sağlayan başlıca bileşenler olduğundan, bina kabuğu yapısı binanın girdi enerjilerinin ve işletme enerjilerinin toplam değerini tayin etmektedir (Pacheco ve Martínez, 2012). Binanın yapısı, ısıнын, ışığın ve havanın binada nasıl dolaştığını etkileyerek iç ve dış ortamlar arasında bir bariyer görevi görür. Tüm bunların bir sonucu olarak, tesisin iyi bir performans göstermesini temin etmek adına titiz bir mimari tasarım gereklidir (Rouchier, 2018).

Hem enerji verimliliğini hem de kullanıcı refahını dikkate alan bütüncül tasarımın önemi, afet sonrası bağlamlarda çok daha net bir biçimde vurgulanmaktadır. Varolgüneş vd. (2026) tarafından Türkiye'nin Bingöl ilindeki kalıcı konutlar üzerine gerçekleştirilen çalışma, daha iyi termal konfor ve iç ortam hava kalitesi elde etmenin çok yönlü çözümler gerektirdiğini göstermiştir. Söz konusu araştırma, binaların ne kadar iyi işlev gördüğünü ve çevresel sürdürülebilirliklerini ne ölçüde koruduklarını belirledikleri için, kullanıcı memnuniyetini artıran tasarım yöntemlerinin uygulanması gerektiğini ortaya koymaktadır ki bu durum, kullanıcı konforuna öncelik verilmesi gereken kapalı havuzlar da dahil olmak üzere tüm bina tipleri için geçerlidir.

Enerji tüketimini ve sera gazı emisyonlarını minimize edebileceğinden ötürü, neredeyse sıfır enerjili binaların tasarımında yalıtım malzemesi kullanılarak yalıtım yapılması bir zorunluluktur. Bir binaya yalıtım yapılırken, kalınlığın artırılmasının enerji, çevre ve ekonomik faktörler üzerindeki etkisini dengelemek adına yalıtım malzemesinin ideal kalınlığını belirlemek hayati bir önem taşır (Huang vd., 2020). Bina enerji verimliliğini maksimize etmek için bina yapısal elemanlarının ısı

iletkenliği minimum düzeyde tutulmalıdır. Bu gereklilik, birincil bina sınır elemanlarının $W/m^2 K$ cinsinden belirtilen U-değerini temel almaktadır (Avrupa Binalar Performans Enstitüsü, 2011). Yalıtım malzemesi binanın dış duvarına veya çatısına tatbik edilebileceği gibi, yapının sadece belirli bir kısmına da uygulanabilir. Yalıtım malzemeleri, bina yapısı üzerinden gerçekleşen ısı aktarımını dengeleyerek ve asgariye indirerek yazın ısı kazancının, kışın ise tam tersi yönde ısı kaybının azaltılmasına katkı sağlar (Kumar vd., 2020). Binanın zemin, duvar ve çatı gibi sınır bileşenleri, binanın ne kadar enerji sarf ettiğini dramatik ölçüde etkilemektedir. Binanın ısıtma gereksinimlerini düşürmek için duvar ve zemin yerine bilhassa çatıya daha kalın yalıtım malzemesi yerleştirilmesi gereklidir (Piselli vd., 2019; Braulio-Gonzalo ve Bovea, 2017; Sadineni vd., 2011). Isı kayıplarının %60'a varan kısmı çatıdan kaynaklandığı için çatı yalıtımı daha da kritik bir mesele haline gelmiştir (Sadineni vd., 2011). Duvar yapısı bağlamında optimum yalıtım malzemesinin belirlenmesi, yapı boyunca gerçekleşen ısı transferini azaltmaya yardımcı olacaktır. Dış duvarın ısı yalıtım sistemini oluşturan birden çok katmanın temel unsuru, bizzat ısı yalıtım malzemesinin kendisidir (Özturan ve Seyhan, 2024).

Bu çalışmada, literatürde belirtilen ve enerji tasarrufunu etkileyebilecek özellikler kendi içlerinde kıyaslanacak; binalarda TS 825 ısı yalıtım standardı kapsamında Antalya ili için hesaplamalar yapılarak en fazla enerji tasarrufunu sağlayacak özellik irdelenecektir. Bu çalışma, Akdeniz iklimine sahip tüm şehir ve ülkeler için büyük ölçekli yapılara ev sahipliği yapan alanlarda enerji verimliliğini sağlamayı ve en düşük enerji ihtiyacına yol açacak tasarım ilkelerini ön plana çıkarmayı hedeflemektedir. Bu çalışma vasıtasıyla literatürde enerji tasarrufunda elzem görülen özellikler, bir kapalı havuz tasarlanmak istendiğinde yapı tasarımında meydana gelecek değişimle birlikte karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Akdeniz iklimlerinde konutların enerji verimliliği üzerine pek çok çalışma bulunmasına karşın, bilhassa yüksek tavanlar ve kabuk yalıtımı arasındaki etkileşim gibi büyük hacimli kapalı havuzların termodinamik zorluklarına odaklanan araştırmalar son derece sınırlı kalmaktadır. Bu çalışma, büyük ölçekli spor tesisleri için spesifik olarak kat yüksekliği, pencere-duvar oranı ve yalıtımın birleşik etkilerini TS 825 standartları doğrultusunda nicel olarak değerlendirerek literatürdeki bu boşluğu doldurmaktadır.

Yöntem

Bu çalışma, binalarımızın iyileştirici özelliklerine odaklanarak bilinçli tasarımlar yapmayı ve çevre dostu binalar üretmeyi amaçlamaktadır. Bu sonuçlar doğrultusunda, büyük ölçekli ve tek hacimli binalara sahip kapalı havuzlar gibi işletme giderleri yüksek yapılarda enerji ihtiyacını azaltarak işletme maliyetlerini düşürmek ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla dikkate alınması gereken bazı tasarım faktörleri ile bu faktörlerin yaratacağı farklılıklar incelenmiştir. Tasarım, Türkiye'nin Akdeniz Bölgesi'nin ortalama dış ortam sıcaklığı göz önünde bulundurularak ve Antalya'da uygulanabilecek bir kapalı havuz yapısı referans alınarak, TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları standardına uygun, büyük ve tek hacimli bir bina olarak belirlenmiştir. Tasarımın diğer kapalı havuz yapılarına örnek teşkil etmesi adına kat yüksekliği, pencere boyutu, yalıtım özellikleri ve mekan büyüklüğü gibi faktörlerin tasarımda yapılacak değişikliklerle enerji verimliliği üzerindeki etkilerinin tartışılması hedeflenmektedir. Bu bağlamda; TS 825 standardının yalıtım değerleri, kullanılacak malzemeler ve dış hava sıcaklığı sabit tutulup belirli parametreler değiştirilerek büyük ölçekli binalarda enerji tasarrufuna katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, Antalya'daki Muratpaşa Belediyesi Süleyman Erol Olimpik Yüzme Havuzu özelinde enerji tasarrufu sağlayacak parametreler ile malzeme özellikleri belirlenmiş ve olası değişiklikleri gözlemlemek üzere gerekli hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 1. Muratpaşa Belediyesi Süleyman Erol Olimpik Yüzme Havuzu, Antalya

Seçilen referans bina olan Süleyman Erol Olimpik Kapalı Yüzme Havuzu, yaklaşık 9.000 m² toplam kapalı inşaat alanına sahiptir. Net kat yüksekliği, çatı makası yapısına bağlı olarak 7 ile 15 metre arasında değişmektedir. Ana gün ışığı kaynağı olan güney cephesi yaklaşık %85'lik bir pencere-duvar oranına sahipken, doğu ve batı cepheleri yaklaşık %15'lik bir orana sahiptir. Mevcut durumda, bina kabuğunda herhangi bir ısı yalıtımı bulunmamaktadır. Farklı bina ölçeklerinin termodinamik davranışını değerlendirmek ve sağlam bir parametrik model oluşturmak amacıyla, bu referans yapının geometrisi temel alınarak birbirinden farklı varsayımsal senaryolar türetilmiştir. Tek bir sabit geometriyi analiz etmek yerine, parametrik çalışmada büyük, orta ve küçük ölçekli olimpik havuz tipolojilerini temsil etmek üzere üç farklı taban alanı (8.000 m², 4.800 m² ve 2.800 m²) test edilmiştir. Ayrıca, dikey hacmin ısı birikimi ve katmanlaşması üzerindeki kritik etkisini analiz etmek için, her bir alan senaryosu için üç standart net yükseklik (23 m, 15 m ve 10 m) test edilmiştir. Bu matris yaklaşımı, Akdeniz ikliminde hacimsel değişimlerin yalıtım seviyeleriyle nasıl etkileşime girdiğinin kapsamlı bir biçimde anlaşılmasına olanak tanımaktadır.

TS 825 standardına uygun kararlı durum ısı hesaplamalarının tekrarlanabilirliğini ve doğrulanabilirliğini sağlamak amacıyla, karşılaştırılan senaryolara ait bina kabuğu bileşenlerinin teknik özellikleri Tablo 1'de açıkça tanımlanmıştır. İyi Yalıtım terimi, Akdeniz iklimi için Pasif Ev standartlarıyla uyumlu, yüksek düzeyde optimize edilmiş bir bina kabuğunu temsil etmektedir. Bu senaryo, ısı geçirgenliği (U-değeri) yaklaşık 0,11 - 0,14 W/m²K seviyelerine düşürmek için yeterli kalınlıklarda Genleşmiş Polistiren (EPS), Ekstrüde Polistiren (XPS) ve Poliüretan (PUR) gibi yüksek performanslı yalıtım malzemeleri kullanılmaktadır. Buna karşılık Zayıf Yalıtım senaryosu ise, bölgedeki eski büyük ölçekli kamu binaları için tipik olan yalıtımsız geleneksel yapıyı temel almakta ve önemli ölçüde daha yüksek U-değerleri sergilemektedir.

Tablo 1. Bina Kabuğu Senaryolarının Teknik Özellikleri ve U-değerleri

Bina Kabuğu Bileşeni	Senaryo	Malzeme Katmanları (Dıştan İçe)	Yalıtım Kalınlığı (cm)	Hesaplanan U-Değeri (W/m ² K)
Dış Duvar	İyi Yalıtım	Boya + Sıva + PUR/EPS + Gazbeton + Sıva	20 cm	0.11 - 0.13
	Zayıf Yalıtım	Boya + Sıva + Standart Betonarme + Sıva	Yok	~ 1.80 - 2.00
Çatı / Tavan	İyi Yalıtım	Çatı Örtüsü + PUR/EPS + Buhar Kesici + Betonarme Döşeme + Sıva	20 cm	0.11
	Zayıf Yalıtım	Standart Çatı Örtüsü + Yalıtımsız Betonarme Döşeme + Sıva	Yok	~ 1.50 - 1.80
Zemin Döşemesi	İyi Yalıtım	Granit/Mermer + Şap + XPS/Vakum Paneli + Beton + Toprak	12 cm	0.10 - 0.22
	Zayıf Yalıtım	Granit/Mermer + Şap + Yalıtımsız Beton + Toprak	Yok	> 1.10
Pencereler	İyi Yalıtım	Üçlü Cam (Argon gazı)	-	1.18 - 2.00
	Zayıf Yalıtım	Tek Cam	-	5.20

Kararlı durum enerji verimliliği hesaplamaları, Microsoft Excel ve MATLAB'de geliştirilen özel bir parametrik hesaplamalı model kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ticari bir dinamik termal simülasyon yazılımı kullanmak yerine enerji talepleri, kesinlikle TS 825 standardının (2013 revizyonu) dikte ettiği matematiksel formülasyonlara (Denklem 1-8) ve ısı direnç prensiplerine dayalı olarak hesaplanmıştır. Antalya ili için iklim ve aylık ortalama dış ortam sıcaklık verileri, doğrudan 1. Derece Gün Bölgesi için TS 825 Eklerinde sağlanan jenerik meteorolojik tablolardan elde edilmiştir.

Parametrik senaryo kurgusu bağlamında; dış iklim verileri, bina yönelimi ve kapalı havuz standartlarına uygun olarak 26°C'de tutulan iç mekan ayar sıcaklığı çalışma boyunca kontrol değişkenleri olarak sabit tutulmuştur. Hesaplamalı modelde sistematik olarak test edilen bağımsız değişkenler; net kat yüksekliği, toplam taban alanı, yalıtım kalitesi (bina kabuğu U-değerleri) ve pencere-duvar oranıdır. Bu tek değişkeni izole etme yaklaşımı, her bir parametrenin toplam ısı yük üzerindeki kendine özgü etkisinin net bir şekilde anlaşılmasına olanak tanımaktadır.

İlk olarak, binada kullanılan malzemelerin belirlenmesi ve kalınlıkları hakkında bilgi toplanmıştır. Bu verilerle ısı geçirgenlik direnci (R) bulunmuştur. Isıl iletkenlik direnci denklem 1'de belirtildiği üzere, yapı bileşeninin kalınlık (d) değeri, bölme işlemiyle hesaplanan ısı iletkenlik hesap değerine (λ_h) göre hesaplanmaktadır.

$$R = \frac{d}{\lambda_h} \quad (1)$$

Burada,

R: Isıl geçirgenlik direnci (m².K/W),

d: Yapı bileşeninin kalınlığı (m),

λ_h : Isıl iletkenlik hesap değeri (W/mK).

Isıtma enerjisi hesabında kullanılacak yapı elemanının ortalama ısı geçirgenlik direnci,

$$R = R_1 \cdot \frac{2.L_1 + 5.L_3}{L} + R_2 \cdot \frac{6.L_2}{L} + R_3 \cdot \frac{L_4}{L} \quad (2)$$

L: Değerlendirilen yapı bileşeninin toplam genişliği veya uzunluğu (m) eşitliği ile hesaplanır. Birbirine bitişik birkaç katmandan oluşan bir yapı bileşeninin ortalama ısıl geçirgenlik direnci (R), denklem 3'e göre toplam ısıl geçirgenlik katsayısı (U) ile hesaplanır.

$$R = \frac{1}{U} - (R_i + R_e) \quad (3)$$

Kararlı durum ısı akısı yoğunluğu (q), denklem 4'e göre hesaplanır.

$$q = U \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (4)$$

Burada,

Q: Isı akısı yoğunluğu (W/ m²),

θ_i : İç ortam sıcaklığı (°C),

θ_e : Dış ortam sıcaklığı (°C),

U: Yapı bileşeninin toplam ısıl geçirgenlik katsayısı (W/m².K).

Tek bir yapı bölümü için ihtiyaç duyulan yıllık ısıtma enerjisi aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır.

$$Q_{yıl} = \sum Q_{ay} \quad (5)$$

$$Q_{ay} = [H(\theta_i - \theta_e) - \eta_{ay}(\phi_{i,ay} + \phi_{s,ay})] \cdot t \quad (6)$$

Burada,

$Q_{yıl}$: Yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı (Joules),

Q_{ay} : Aylık ısıtma enerjisi ihtiyacı (Joules),

H: Binanın özgül ısı kaybı (W/K),

θ_i : Aylık ortalama iç ortam sıcaklığı (°C),

θ_e : Aylık ortalama dış ortam (°C),

η_{ay} : Isı kazançları için aylık ortalama kullanım faktörü,

$\phi_{i,ay}$: Aylık ortalama iç ısı kazançları (W),

$\phi_{s,ay}$: Aylık ortalama güneş enerjisi kazancı (W),

t : Zaman (s) (1 ay = 86.400 x 30 saniye olarak kabul edilmiştir).

İletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı, denklem (7) ile hesaplanır. Bu denklemde, varsa ısı köprüleri aracılığıyla iletilen ısı kaybı, yapı elemanları üzerinden iletilen ısı kaybına eklenir. Isı köprüsü; bileşimi bitişik yüzeye kıyasla farklı olan, ısı kaybının binanın ortalama ısı kaybından daha yüksek olduğu ve kış aylarında kararlı durum için iç yüzey sıcaklığının daha düşük olduğu kısımdır.

$$H_T = \sum AU + l U_l \quad (7)$$

$$\sum AU = U_D A_D + U_P A_P + U_K A_K + 0.8 U_T A_T + 0.5 U_t A_t + U_d A_d + 0.5 U_{ds} A_{ds} \quad (8)$$

Burada,

U_D : Dış duvarın ısı geçirgenlik katsayısı (W/m² K),

U_P : Pencerenin ısı geçirgenlik katsayısı (W/m² K),

U_K : Dış kapının ısı geçirgenlik katsayısı (W/m² K),

U_T : Tavanın ısı geçirgenlik katsayısı ($W/m^2 K$),
 U_t : Toprağa oturan tabanın/döşemenin ısı geçirgenlik katsayısı ($W/m^2 K$),
 U_d : Dış havayla temas eden tabanın ısı geçirgenlik katsayısı ($W/m^2 K$),
 U_{ds} : Düşük sıcaklıktaki iç ortamlarla temas eden yapı elemanlarının ısı geçirgenlik katsayısı ($W/m^2 K$),
 A_D : Dış duvar alanı (m^2),
 A_P : Pencere alanı (m^2),
 A_K : Dış kapı alanı (m^2),
 A_T : Tavan alanı (m^2),
 A_t : Toprağa oturan taban/döşeme alanı (m^2),
 A_d : Dış havayla temas eden taban/döşeme alanı (m^2),
 A_{ds} : Düşük sıcaklıktaki iç ortamlarla temas eden yapı elemanlarının alanı (m^2).

Akdeniz iklimine sahip olan Antalya ili, TS 825 kapsamında 1. Bölge olarak kabul edilmektedir. Bölgenin farklı derece gün bölgelerine yönelik ısı kaybı ve yoğunlaşma hesaplamalarında kullanılacak aylık ortalama dış ortam sıcaklık değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir;

Tablo 2. TS 825'e göre 1. Bölge sıcaklık değerleri

	Oca	Şub	Mar	Nis	May	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Kas	Ara
1. Bölge (Antalya)	8.4	9.0	11.6	15.8	21.2	26.3	28.7	27.6	23.5	18.5	13.0	9.3

Yıllık ortalama $17,7^{\circ}C$ sıcaklıkla karakterize edilen Antalya, kapalı havuz sıcaklıklarının $24-28^{\circ}C$ arasında tutulmasını gerektirmektedir.

Bulgular

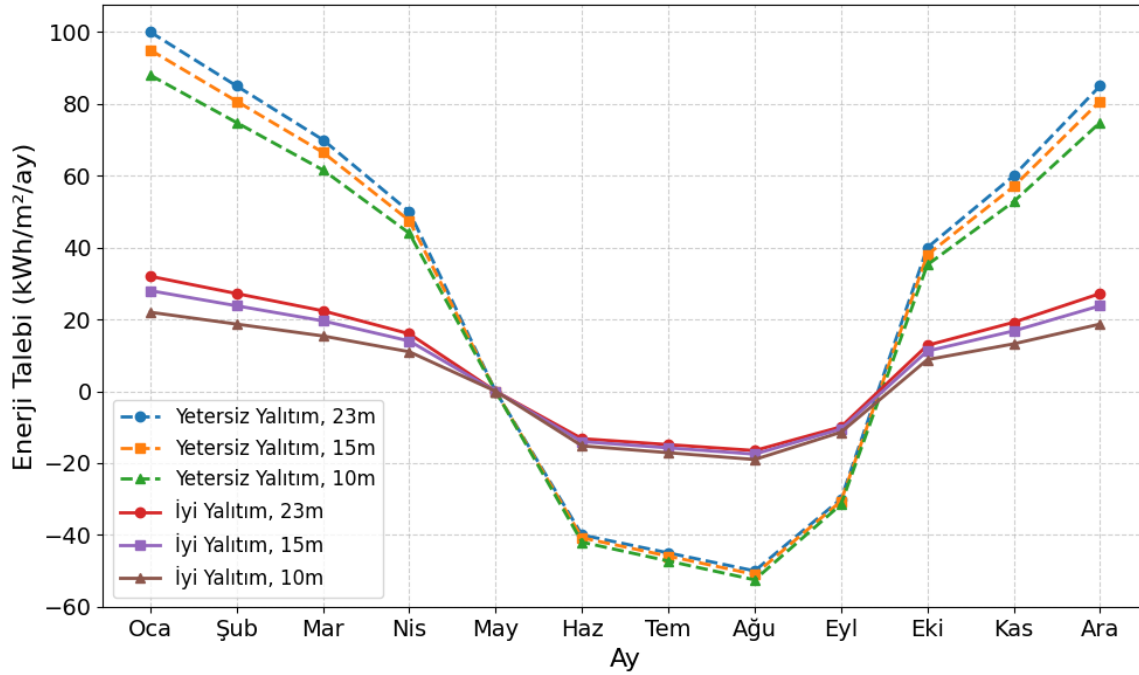
Bir mekandaki enerji tüketimini pek çok faktör etkileyebilir. Bu makale, söz konusu faktörlerden hangilerinin mekanın enerji tüketimini en olumsuz yönde etkileyeceğini karşılaştırmalı olarak analiz etmektedir. Karşılaştırılacak özellikler aşağıdaki gibi dört başlık altında toplanmıştır:

1. Yalıtım kullanımı ile kat yükseklikleri arasındaki ilişki
2. Yalıtım kullanımı ile mekan büyüklüğü arasındaki ilişki
3. Pencere-duvar oranı ile kat yüksekliği arasındaki ilişki
4. Yalıtım açısından pencere-duvar oranı ile cam türleri arasındaki ilişki

Bu şekilde elde edilen veriler yıl boyunca aylık olarak incelendiğinde, hangi aylarda ve hangi yöntemle enerji tasarrufu sağlanabileceğinin araştırılması amaçlanmaktadır. Bu çalışma, uygulama öncesi tasarıma ve bina inşası sırasında sürdürülebilir ekolojik binaların sürekliliğine katkıda bulunacaktır. Türkiye'de uygulanan ve 1998 yılında AB standartlarına uyarlanan binalarda TS 825 Isı Yalıtım Kuralları ile yapılan bu karşılaştırmaların uygulanması, Akdeniz iklimine sahip ülkelerde inşa edilen geniş hacimli yapılara fayda sağlayacaktır. Tüm operasyonel enerji azaltım çabaları, binaları Net Sıfır Enerjili Binalara dönüştürme genel hedefini destekleyen bina enerji azaltımına öncülük eder. Ekşi ve ark. (2025), tekno-ekonomik ve çevresel değerlendirmeleri aracılığıyla Akdeniz Bölgesi Net Sıfır Enerjili Bina hedefleri için optimize edilmiş bina kabuklarının temel işlevini ortaya koymuştur. Çalışma, Antalya'da hacim yönetimi ile %68-89,5 enerji tasarrufu sağlayan optimize edilmiş yalıtımdan elde edilen enerji tasarrufu potansiyeli sonuçlarını sunmaktadır. Araştırma, bölgedeki büyük kamu binası projelerinin dönüşüm hedeflerine ulaşmasını sağlayan tasarım ilkeleri oluşturmaktadır.

İlk karşılaştırma, farklı kat yüksekliklerine bağlı olarak enerji tüketimindeki farklılıklar nedeniyle iyi yalıtıma sahip bir bina ile zayıf yalıtıma sahip bir bina arasında yapılmıştır. Toplam kat

yükseklikleri 23 metre, 15 metre ve 10 metre arasında değişecek olan bu mekanlarda enerji tüketiminin en yüksek ve en düşük olduğu aylar Grafik 1'de gösterilmektedir.



Grafik 1. Yalıtım kullanımı ile kat yükseklikleri arasındaki ilişkinin enerji tüketimi üzerindeki aylık etkisi

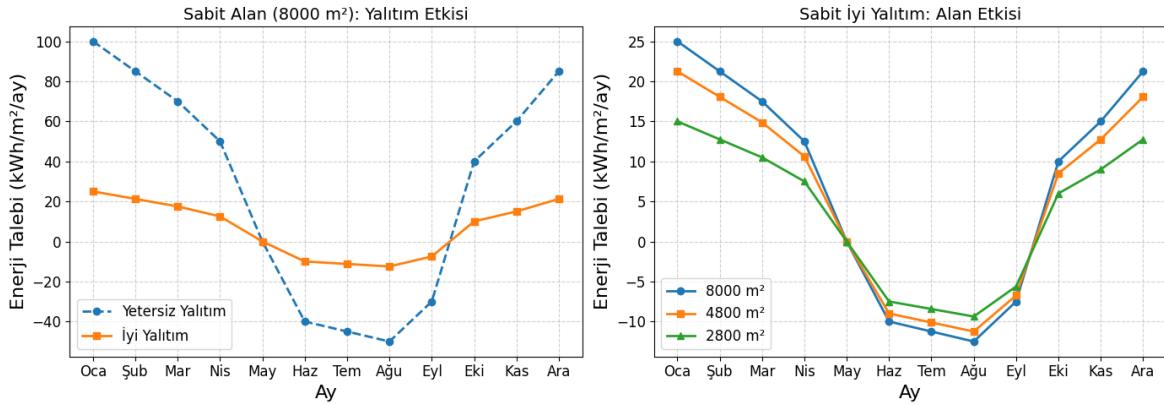
Enerji tüketimi, ılıman sıcaklıkların iç ve dış mekan koşullarını dengelemesi nedeniyle Mayıs ayında en düşük seviyededir. Ancak iyi yalıtıma sahip bir binada kat yüksekliği azaldıkça, ısı birikimine neden olduğu için iç mekandaki enerji tüketiminin arttığı görülmektedir. En yüksek tüketim, daha az yalıtımlı ve 23 metre kat yüksekliğine sahip bir binadadır. Minimum tüketimin gerçekleştiği kat yüksekliği iyi yalıtımlı bir binada 10 metredir, ikinci sırada 15 metre, üçüncü sırada 23 metre yer alırken; bunu zayıf yalıtımlı bir binada sırasıyla 10 metre ve 23 metre takip etmektedir. Zayıf yalıtımlı tüm binalara bakıldığında, kat yüksekliklerindeki değişime bağlı olarak aralarındaki farkın, iyi yalıtımlı binalara kıyasla nispeten daha küçük olduğu görülmektedir. Bu durum kış aylarında yalıtımsız binalarda 15 metrelik kat yüksekliği ile 23 metrelik kat yüksekliği arasındaki enerji tüketiminde %15'lik bir fark yaratırken, yalıtımlı binada %29,7'lik bir farka neden olmaktadır. Yaz aylarında ise bu fark yalıtımlı bir binada %36'ya çıkmaktadır. Yalıtımsız bir binanın kullanılması durumunda, kat yüksekliğinden bağımsız olarak enerji tüketimi her zaman yüksek olacaktır. Ancak yalıtımlı bir binada kat yüksekliklerindeki değişiklikler enerji tüketimini önemli ölçüde etkileyecektir; bu nedenle en ideal olanı bulmak ve uygulamak gereklidir. İç mekanda ısı birikimini ve ısı kaçışını önlemeye yönelik çözümlerde de kat yükseklikleri ideal seviyelerde tercih edilmelidir. Tüm mekanlar ve kat yükseklikleri için en yüksek enerji gereksinimi Ocak ayında, en düşük enerji gereksinimi ise Mayıs ayındadır. Tüm yıl boyunca incelendiğinde, kat yüksekliği değişiklikleri arasındaki fark;

- Yalıtımlı bir binada 10 metrelik kat yüksekliği, yalıtımsız bir binadaki 10 metrelik kat yüksekliğine kıyasla 4,5 kat daha az enerji tüketmektedir.
- Yalıtımlı bir binada 15 metrelik kat yüksekliği, yalıtımsız bir binadaki 15 metrelik kat yüksekliğine kıyasla 3,7 kat daha az enerji tüketmektedir.

- Yalıtımlı bir binada 23 metrelik kat yüksekliğinin, yalıtımsız bir binadaki 23 metrelik kat yüksekliğine kıyasla 3,1 kat daha az enerji tükettiği sonucuna varılmıştır.

Bu durumda, söz konusu veriler binadaki kat yüksekliği kullanımında yalıtımın temel bir faktör olduğunu göstermiştir. Yalıtımın çok iyi olması ve 23 metrelik kat yüksekliği kullanılması durumunda bunun kış aylarında enerji verimliliğini yaklaşık %68 oranında etkileyeceği, 10 metre kullanılması durumunda ise verimliliği yaklaşık %78 oranında etkileyeceği tespit edilmiştir. Yaz aylarında ısıнын içeride birikmesini önlemek amacıyla iyi yalıtım kullanılmasıyla, 23 metre kat yüksekliğine sahip bir mekanda enerji verimliliğinin yaklaşık %67 oranında artacağı, 10 metre kullanılması durumunda ise bu verimliliğin yaklaşık %76 oranında artacağı sonucuna varılmıştır. Isı kayıplarının en çok Ocak ayında, en az ise Mayıs ayında meydana geleceği görülmektedir.

İyi yalıtımlı mekan ile zayıf yalıtımlı mekan arasındaki metrekare farkı incelendiğinde, mekan büyüdükçe enerji tüketiminin de arttığı görülmektedir. Aylık değişimleri gösteren Grafik 2'de de belirtildiği üzere, yalıtım seviyesindeki değişiklikler önemli farklılıklar yaratmaktadır.



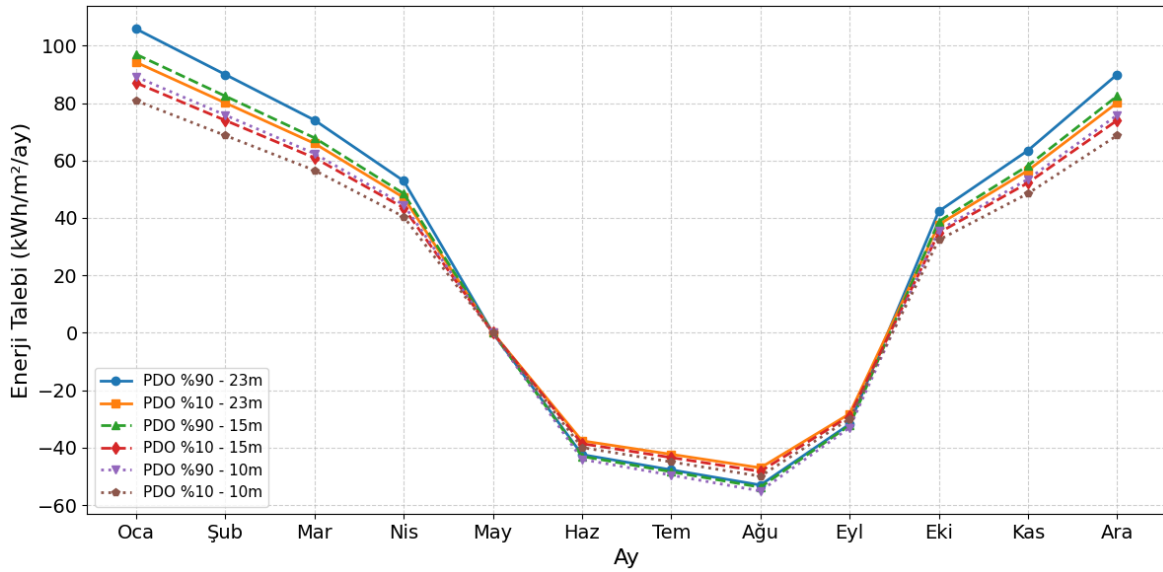
Grafik 2. Yalıtım kullanımı ile mekan büyüklüğü arasındaki ilişkinin enerji tüketimi üzerindeki aylık etkisi.

Yalıtım kalitesinin etkisini hacimsel etkilerden ayırmak için sonuçlar, yalıtım seviyeleri değiştirilirken taban alanı sabit tutularak analiz edilmiştir. Grafik 2'de gösterildiği gibi, taban alanı 8.000 m²'de sabit tutulduğunda, zayıf yalıtımdan iyi yalıtıma geçiş, yıllık enerji talebinde tutarlı bir şekilde yaklaşık %75'lik bir azalma sağlamaktadır. Benzer şekilde, hacimsel değişimin etkisi bağımsız olarak (yalıtım iyi seviyede sabit tutularak) gözlemlendiğinde, taban alanının 8.000 m²'den 2.800 m²'ye düşürülmesi ısıtma yükünde %40'lık bir azalmayla sonuçlanmaktadır. Bu ayrıştırma, hacim küçültmenin doğrusal verimlilik kazanımları sağlarken, performans verilerindeki en belirgin varyasyondan sorumlu olan yalıtım optimizasyonunun toplam enerji tasarrufunun birincil itici gücü olmaya devam ettiğini doğrulamaktadır.

Kışın ısıtma yükü artar ve soğutma yükü azalır. İyi ve zayıf yalıtımlı mekanlar arasındaki enerji ihtiyacı farkı artar. Yazın ise ısıtma yükü azalır ve soğutma yükü artar. Enerji ihtiyacının en düşük olduğu aylar Mayıs ve Ekim iken, iyi yalıtımlı mekanlar ile zayıf yalıtımlı mekanlar arasındaki metrekare değişimlerine bağlı olarak Nisan ve Kasım ayları arasındaki farkın arttığı görülmektedir. Grafik 2'ye göre yalıtımın etkisi, mekanın büyüklüğüne göre enerji ihtiyacını etkileyen önemli bir faktör olduğunu göstermiştir. İyi yalıtılmış 8.000 m²'lik bir alan ile zayıf yalıtılmış 2.800 m²'lik bir alan arasındaki ısı kaybı oranları birbirine çok yakındır. Bu durumda, grafikten anlaşıldığı üzere mekan büyüklüğüne karar verirken dikkate alınması gereken en kritik faktör yalıtımdır. En yüksek ısı kaybı oranının Ocak ayında, en düşük oranının ise Ekim ayında olduğu belirlenmiştir. Grafikten elde edilen sonuçlar, iyi yalıtımlı 2.800 m² alana sahip mekanların tüm aylara kıyasla en düşük ısı kaybı oranına sahip olduğunu göstermektedir. Kış aylarında, 8.000 m² kullanım alanına sahip

mekanın enerji ihtiyacı, yapı elemanlarının iyi ve zayıf yalıtımı arasında yaklaşık %62 oranında azalmaktadır. Mekan 2.800 m² olduğunda bu oran yaklaşık %63,2'dir. İlkbahar aylarında 8.000 m² kullanım alanına sahip mekanın enerji ihtiyacı, yapı elemanlarının iyi ve zayıf yalıtım arasında yaklaşık %71,46 oranında azalmaktadır. Mekan 2.800 m² olarak kullanıldığında enerji gereksinimi en az %70,5, en fazla %100 oranında azalmaktadır. Yalıtım, Nisan ayından sonra iç mekanda ısı birikimine neden olduğundan, yaz aylarında ve sonbaharın ilk aylarında havalandırma veya soğutma ihtiyacı bir miktar artmaktadır.

Pencere-duvar oranlarının etkisini gösteren Grafik 3'e göre %90 ve %10 oranları karşılaştırılmıştır. Pencere-duvar oranı kat yüksekliğine göre değişmektedir. Bu nedenle Grafik 1'deki 23 metre, 15 metre ve 10 metrelik kat yükseklikleri baz alınarak karşılaştırma yapılmıştır.



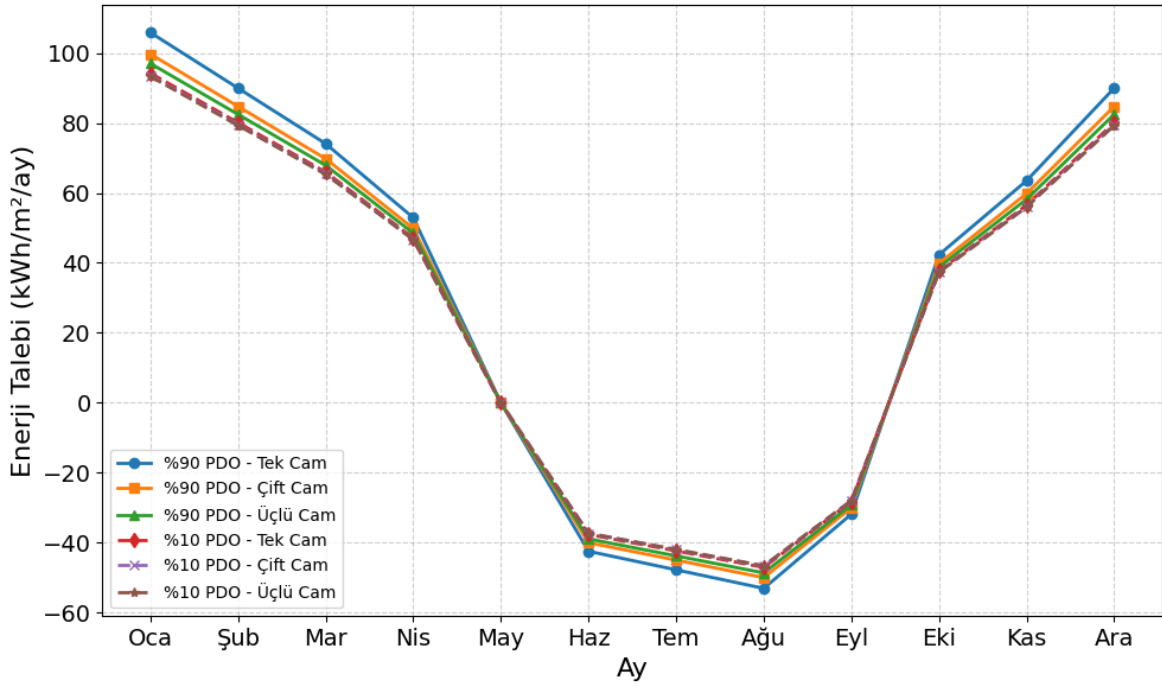
Grafik 3. Pencere-duvar oranı (PDO) ile kat yüksekliği arasındaki ilişkinin enerji tüketimi üzerindeki aylık etkisi.

Pencere-duvar oranları kat yüksekliklerine göre karşılaştırıldığında, tüm aylarda kat yükseklikleri eşit olduğunda %90 veya %10 değerlerine sahip binaların benzer enerji tüketimi sağlayabildiği görülmektedir. Bu sonuçlara göre, tüm aylarda %90 pencere-duvar oranına sahip bir binada kat yüksekliği 23 metre olduğunda ve %10 pencere-duvar oranına sahip bir binada kat yüksekliği 23 metre olduğunda, enerji verimliliği üzerindeki etki yaklaşık %5,8'dir. Kesin oran 15 metrelik kat yüksekliğinde %5,4 ve 10 metrelik kat yüksekliğinde ise %4,9'dur. Kat yüksekliği azaldıkça, verimlilik farkları neredeyse birbirine yaklaşmaktadır. Bu durumda, pencere-duvar oranındaki değişimin farkı, enerji verimliliği oranını hafifçe etkileyen bir faktördür.

Pencere-duvar oranı ile kat yüksekliği arasındaki ilişkiye baktığımızda, kat yüksekliği azaldıkça pencere-duvar oranının büyük veya küçük olması arasındaki farkın da azaldığı görülür. Kat yüksekliği ne kadar fazla olursa, pencere-duvar oranındaki %10 ile %90 arasındaki ısı kaybı farkı da o kadar büyük olmaktadır. Aylara bakıldığında, en yüksek ısı kaybının Ocak ayında, en az ısı kaybının ise Mayıs ayında olduğu belirlenmiştir. Kış aylarında pencere-duvar oranı %10 ise, kat yüksekliği 23 metre olan bir binada ihtiyaç duyulan enerji yaklaşık %5,88 oranında azaltılabilir. Kat yüksekliği 10 metre olduğunda ise gerekli enerji yaklaşık %5,1 oranında azalacaktır. İlkbaharda pencere-duvar oranı %10 olarak kullanıldığında, 23 metre yükseklikte enerji ihtiyacı yaklaşık

%10,37 oranında azalırken, 10 metre yükseklikte enerji ihtiyacı yaklaşık %5,88 oranında düşmektedir.

Son karşılaştırma, pencere-duvar oranlarının pencere yalıtımını sağlayan ısıl geçirgenlik değerlerindeki değişimlerle karşılaştırılmasıdır. Grafik 4'te, %90 ve %10 pencere binalar için pencerelerde tek cam kullanımı (ısıl geçirgenlik değeri olan U değeri 5,2 W/m²K olmalıdır), çift cam kullanımı (ısıl geçirgenlik değeri olan U değeri 3 W/m²K olmalıdır) ve üçlü cam kullanımı (U ısıl geçirgenlik değeri 2 W/m²K'dir) birbiriyle karşılaştırılmaktadır.



Grafik 4. Pencere-duvar oranı ile cam türleri arasındaki ilişkinin, yalıtım açısından enerji tüketimi üzerindeki aylık etkisi.

%10 pencere-duvar oranına sahip bir binada kullanılan cam özelliği çift ve tek cam arasında karşılaştırıldığında, enerji ihtiyacını %0,7 oranında etkilemektedir. Aynı pencere duvarında çift cam ile üçlü cam karşılaştırıldığında ise bu oran %0,3'tür. Birbirine neredeyse yakın olan üçlü cam ile çift cam arasındaki fark, cam oranı azaldıkça düşmektedir. Pencere oranı %90'a çıktığında, tek cam ile çift cam arasındaki fark %5,8'e yükselmektedir. Çift cam ile üçlü cam karşılaştırıldığında ise enerji ihtiyacındaki fark %2,7'ye inmektedir. Bu durumda, grafikten de anlaşıldığı üzere pencere boyutu küçüldükçe, dışarıdan ve içeriden ısı transferi azalacağından tek cam ile üçlü cam kullanımı arasındaki farkın, büyük oranlı pencerelere kıyasla daha az fark yarattığı sonucuna varılmaktadır. Büyük oranda pencere kullanıldığında, pencere üzerinden artan ısı transferi nedeniyle pencere camında yalıtım sağlamak için tek cam yerine çift cam kullanılması önerilebilir. Çift cam ile üçlü cam arasındaki benzer sonuçlar soğuk iklimlerde belirgin farklar yaratırken, Akdeniz iklimi gibi sıcak bölgelerde bu fark azalmaktadır. Bu durumda binalarda çift cam kullanılması maliyet ve verimlilik açısından daha çok tercih edilebilir.

Ocak ayında, tüm cam özelliklerinde ısı kayıpları en yüksek seviyededir, Mayıs ayında ise ısı kaybı neredeyse sıfırdır. Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında ise ısı kaybı yerine iç mekanda biriken aşırı ısı kazancı, iklimin özellikleri nedeniyle soğutma ihtiyacının yüksek olacağını göstermektedir. Grafik 4'teki pencere ve duvar oranları arasındaki fark, pencerede tek cam

kullanmanın ve cephenin %90'ında pencere uygulamanın en fazla ısı kaybına neden olduğunu ve bu nedenle ihtiyaç duyulan enerjiyi etkileyeceğini göstermektedir. Kış aylarında, tek camlı pencerelerde %10 pencere-duvar oranı kullanılarak enerji ihtiyacı yaklaşık %11 oranında azaltılabilir ve bu oran ilkbahar aylarında %12'ye çıkmaktadır. Üçlü cam kullanımı, ihtiyaç duyulan enerjiyi kış aylarında yaklaşık %4,9, ilkbahar aylarında ise yaklaşık %5 oranında azaltacaktır. Pencere camlarında tek cam ile üçlü cam kullanımı arasında fark olmasına rağmen, genel olarak bakıldığında ısı kaybındaki en kritik faktörün pencerenin boyutu olduğu belirlenmiştir. Pencerenin boyutu arttıkça, tek ve üçlü cam arasındaki ısı kaybı farkı da önemli ölçüde değişmektedir. Pencere özelliklerine ilişkin araştırma sonuçları, bu özel alanı inceleyen konuya yönelik çalışmalarla tam bir uyum göstermektedir. Güven ve Akgüç (2025) tarafından yürütülen optimizasyon araştırma çalışması, Türkiye genelindeki konut binalarını incelemiş ve uygun pencere termo-fiziksel özelliklerini seçmenin; enerji tüketimini, sera gazı emisyonlarını ve masrafları azaltmak için etkili bir yöntem olarak işlev gördüğünü keşfetmiştir. Çalışma konut tipi binaları incelemiş olsa da, Antalya'dan elde edilen araştırma bulguları, o spesifik iklimde çift cam kullanımının, pencere-duvar oranını azaltmaktan daha az avantaj sağladığını gösterdiği için bu prensip büyük binalar için de geçerlidir.

Genel olarak değerlendirildiğinde;

- Grafiklere bakıldığında, yalıtım kullanılması durumunda, kat yüksekliği veya mekan boyutu arttığında enerji gereksiniminin yalıtımsız binaya göre daha az olacağı belirlenmiştir.
- Ortalama 10-15 metrelik bir kat yüksekliği tasarlamak, daha yüksek tasarlama göre daha verimli sonuçlar verecektir.
- Pencere oranı boyutuna bağlı olarak, büyük bir pencere alanı varsa çift veya üçlü cam kullanmak enerji verimliliğini artıracaktır.
- Tasarlanan yapıda duvarlar, kat döşemeleri ve çatı döşemeleri için yalıtımlı malzemeler kullanmak ve düşük toplam U değerine sahip malzeme seçimleri yapmak, genel olarak yapının daha az enerjiye ihtiyaç duymasını sağlayacaktır.
- Yalıtım iyi olduğu sürece binanın boyutunda bir sınır olmayacağı sonucuna varılmıştır. İstenirse boyut artırılabilir, ancak en verimli olan seçenek en az metrekareye sahip olandan yana kullanılmalıdır.
- Kışın kat yüksekliğinin maksimum kullanımı ile yazın mekanın maksimum kullanımı karşılaştırıldığında aynı enerji talebi ortaya çıkmaktadır.
- Kışın kat yüksekliğini 10 metreye düşürmek ile yazın 23 metre kat yüksekliğine sahip bir bina tasarlamak aynı miktarda enerji talebi yaratmaktadır.

Bu çalışmanın bulguları, sıcak iklimlerde yalıtımın baskınlığına ilişkin geniş kapsamlı literatürle uyumludur. Uçar (2023) ve Canbolat vd. (2020) çalışmalarına benzer şekilde, sonuçlarımız ısı geçirgenliğinin enerji yükünün temel belirleyicisi olduğunu doğrulamaktadır. Ancak konut binalarından farklı olarak bu çalışma, büyük hacimli yapılarda 'şekil faktörünün' (özellikle kat yüksekliğinin) yalıtım parametrelerine karşı rekabetçi bir değişken haline geldiğini göstermektedir. Pencere-duvar oranını azaltmak sınırlı kazanımlar (yaklaşık %5-10) sağlarken, hacim azaltma stratejileri kış aylarında 3,1 kata kadar daha az enerji tüketimi sağlamıştır. Bu durum, Antalya'daki büyük ölçekli kamu binaları için mimari hacim optimizasyonunun malzeme seçimi kadar kritik bir öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Sınırlılıklar ve Gelecek Araştırmalar

Bu çalışma, temel olarak TS 825 hesaplama yöntemlerine dayalı olarak bina kabuğunun ısıtma ve soğutma iletim yüklerine odaklanmıştır. Kullanıcılardan kaynaklanan iç ısı kazançlarının, aydınlatma yüklerinin ve özellikle havuz suyunun buharlaşmasından kaynaklanan gizli ısı yükünün

bu kararlı durum analizine dahil edilmediği belirtilmelidir. Ayrıca, bu çalışmanın temel kısıtlamalarından biri coğrafi ve tipolojik kapsamıdır. Enerji tasarrufuna ilişkin parametrik bulgular, özellikle kat yüksekliği ve yalıtımla ilgili spesifik yüzdesel değişimler, yalnızca Antalya'nın iklim verilerinden ve tek hacimli olimpik bir yüzme havuzunun benzersiz termodinamik davranışından elde edilmiştir. Bu nedenle, bu nicel sonuçlar tüm Akdeniz havzasındaki büyük ölçekli yapıların tamamı için makro düzeyde bir kural olarak doğrudan genellenemez. Gelecekteki çalışmalar, büyük ölçekli kapalı havuzlarda nem kontrolünü ve HVAC sistemi verimliliklerini hesaba katmak için dinamik enerji simülasyon araçlarını içermelidir.

Sonuçlar

Tek hacimli ve büyük ölçekli kapalı havuz yapılarında enerji verimliliğini en çok etkileyecek faktörler karşılaştırılarak, en kritik faktörün yalıtım olduğu belirlenmiştir. Kullanılacak malzemelerin ısı geçirgenlik değerleri, ısıнын içeride tutulması ve ısı kaçışlarının önlenmesi, mekan boyutundan bağımsız olarak dikkate alınması gereken ve enerji tüketimini etkileyen hayati faktörlerdir. Bir diğer özellik ise kat yüksekliği ve mekan boyutudur. İki faktör karşılaştırıldığında ve iklim özellikleri göz önüne alındığında, kış aylarında kat yüksekliklerindeki değişim ile mekan boyutlarındaki değişim arasındaki fark en az %5 ile %33 arasında değişmektedir. Bu durum, kış aylarında kat yüksekliğini düşürmenin enerji ihtiyacını azaltacağını ve mekan küçüldükçe enerji talebinin düşeceğini göstermektedir. Yaz aylarında kat yüksekliği ile mekan boyutu değişimi arasındaki enerji talebi farkı ise %50-55,3'tür. Yaz aylarındaki sonuçlara göre, kat yüksekliğini azaltmanın daha az enerji talebi yarattığı, mekanı metrekare olarak büyütmenin ise enerji talebini artıran en önemli özellik olduğu sonucuna varılmıştır. Yaz ve kış ayları için mekan boyutlarındaki değişim küçük bir fark yaratsa da, temel fark kat yüksekliklerindeki değişimdir. Sıcak havanın yükselip soğuk havanın alçalması nedeniyle, yazın soğutulan havanın yükselemeyeceği için mekanda ek bir soğutmaya ihtiyaç duyulmadığı; kışın ise ısınan havanın yükselmesi sebebiyle sürekli ısıtma ihtiyacının arttığı ve kat yüksekliği arttıkça bu ısıtma ihtiyacının da sürekli olarak arttığı, elde edilen sonuçlardan çıkarılmıştır.

Çalışma sonuçları karşılaştırıldığında, en önemli unsurun yalıtım malzemesi kullanmak olduğu; ardından kat yüksekliğine dikkat etmenin, pencere-duvar oranını dikkate almanın ve tasarımdan önce mekanın metrekaresini hesaplamının geldiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışma, büyük ölçekli tasarım yapılarındaki kısıtlamalara göre hangi özelliğin enerji verimliliğine daha fazla katkıda bulunabileceğini göstermek amacıyla bir önem sıralaması sunmuştur. Bu sayede, binanın ömrü boyunca işletme giderlerini azaltmak ve kullanıcı konforunu sağlamak için ideal yöntemler belirlenmiştir.

References

- Abu-Jdayil, B., Mourad, A. H., Hittini, W., Hassan, M., & Hameedi, S. (2019). Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview. *Construction and Building Materials*, 214, 709-735. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.102>
- Alaidroos, A., & Krarti, M. (2015). Optimal design of residential building envelope systems in the Kingdom of Saudi Arabia. *Energy and Buildings*, 86, 104-117. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.083>
- Al-Khawaja, M. J. (2004). Determination and selecting the optimum thickness of insulation for buildings in hot countries by accounting for solar radiation. *Applied Thermal Engineering*, 24(17-18), 2601-2610. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.03.019>
- Alsehail, A., & Almhafdy, A. (2020). The effect of Window-To-Wall ratio (WWR) and window orientation (WO) on the thermal performance: A preliminary overview. *Environment-Behavior Proceedings Journal*, 5(15), 165-173. <https://doi.org/10.21834/ebpj.v5i15.2500>
- Aşıkoglu Metehan, A. (2025). The techno-economic feasibility of retrofitting buildings in Turkey within the NZEB framework: A case study in Izmir. *Sustainability*, 17(18), 8399. <https://doi.org/10.3390/su17188399>
- Aytac, A., & Aksoy, U. T. (2006). The relationship between optimum insulation thickness and heating cost on external walls for energy saving. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 21(4), 753-758.
- Braulio-Gonzalo, M., & Bovea, M. D. (2017). Environmental and cost performance of building's envelope insulation materials to reduce energy demand: Thickness optimisation. *Energy and Buildings*, 150, 527-545. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.005>
- Buildings Performance Institute Europe. (2011). *Europe's buildings under the microscope*. http://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR_EU_B_under_microscope_study.pdf
- Canbolat, A. S., Bademlioğlu, A. H., Saka, K., & Kaynakli, O. (2020). Investigation of parameters affecting the optimum thermal insulation thickness for buildings in hot and cold climates. *Thermal Science*, 24(5A), 2891-2903. <https://doi.org/10.2298/TSCI181105068C>
- Caner, I., Ilten, N., Ergün, K., & Attia, S. (2026). Effect of passive energy retrofitting strategies by using ANN: A case of a hospital building. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*, 179(1), 57-80. <https://doi.org/10.1680/jener.23.00042>
- Csiba, K., Bajomi, A., & Gosztonyi, Á. (Eds.). (2016). *Energy poverty handbook*. <https://doi.org/10.2861/094050>
- Çavdar, A. A., & Lakot Alemdağ, E. (2025). Multi-criteria optimization of cross-laminated timber (CLT) wall systems for energy, carbon, and cost performance: A case study for Türkiye's climate zones. *Wood Material Science & Engineering*, 1-24. <https://doi.org/10.1080/17480272.2025.2598032>
- Ding, Y., Timoudas, T. O., Wang, Q., Chen, S., Brattebø, H., & Nord, N. (2022). A study on data-driven hybrid heating load prediction methods in low-temperature district heating: An example for nursing homes in Nordic countries. *Energy Conversion and Management*, 269, 116163. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116163>
- Domínguez-Muñoz, F., Anderson, B., Cejudo-López, J. M., & Carrillo-Andrés, A. (2010). Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials. *Energy and Buildings*, 42(11), 2159-2168. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.006>

- Dylewski, R., & Adamczyk, J. (2021). Optimum thickness of thermal insulation with both economic and ecological costs of heating and cooling. *Energies*, 14(13), 3835. <https://doi.org/10.3390/en14133835>
- Eksi, M., Akarsu, R. T., & Ozcan, M. (2025). Net-zero energy building transformation: Techno-economic and environmental evaluation in the Mediterranean Region. *Environment, Development and Sustainability*, 1-41. <https://doi.org/10.1007/s10668-025-06389-9>
- Güven, M., & Akgüç, A. (2025). Optimizing window thermo-physical properties for reducing energy demands, greenhouse gas emissions and energy costs in residential buildings of Turkey. *İsı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 45(2), 207-229. <https://doi.org/10.47480/isibted.1634030>
- Huang, H., Zhou, Y., Huang, R., Wu, H., Sun, Y., Huang, G., & Xu, T. (2020). Optimum insulation thicknesses and energy conservation of building thermal insulation materials in Chinese zone of humid subtropical climate. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101840. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101840>
- Kumar, D., Alam, M., Zou, P. X., Sanjayan, J. G., & Memon, R. A. (2020). Comparative analysis of building insulation material properties and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110038. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110038>
- Lee, J. W., Jung, H. J., Park, J. Y., Lee, J. B., & Yoon, Y. (2013). Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements. *Renewable Energy*, 50, 522-531. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.07.029>
- Mirza, F. M., & Bergland, O. (2011). The impact of daylight saving time on electricity consumption: Evidence from southern Norway and Sweden. *Energy Policy*, 39(6), 3558-3571. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.057>
- Ozel, M. (2012). Cost analysis for optimum thicknesses and environmental impacts of different insulation materials. *Energy and Buildings*, 49, 552-559. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.002>
- Özturan, M. K., & Seyhan, A. K. (2024). Determination of optimum insulation thickness of building walls according to four main directions by accounting for solar radiation: A case study of Erzincan, Türkiye. *Energy and Buildings*, 304, 113871. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113871>
- Pacheco, R., Ordóñez, J., & Martínez, G. (2012). Energy efficient design of building: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3559-3573. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045>
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394-398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- Piselli, C., Pisello, A. L., Saffari, M., de Gracia, A., Cotana, F., & Cabeza, L. F. (2019). Cool roof impact on building energy need: The role of thermal insulation with varying climate conditions. *Energies*, 12(17), 3354. <https://doi.org/10.3390/en12173354>
- Rana, J., Hasan, R., Sobuz, H. R., & Tam, V. W. (2022). Impact assessment of window to wall ratio on energy consumption of an office building of subtropical monsoon climatic country Bangladesh. *International Journal of Construction Management*, 22(13), 2528-2553. <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1808561>
- Rouchier, S. (2018). Solving inverse problems in building physics: An overview of guidelines for a careful and optimal use of data. *Energy and Buildings*, 166, 178-195.

- <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.009>
- Sadineni, S. B., Madala, S., & Boehm, R. F. (2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3617-3631. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.014>
- Stephan, A., Crawford, R. H., & De Myttenaere, K. (2011). Towards a more holistic approach to reducing the energy demand of dwellings. *Procedia Engineering*, 21, 1033-1041. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2109>
- Susorova, I., Tabibzadeh, M., Rahman, A., Clack, H. L., & Elnimeiri, M. (2013). The effect of geometry factors on fenestration energy performance and energy savings in office buildings. *Energy and Buildings*, 57, 6-13. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.035>
- Thermal insulation*. (2021). Passipedia. https://passipedia.org/planning/thermal_protection/integrated_thermal_protection
- Tukhtamisheva, A., Adilova, D., Banionis, K., Levinskytė, A., & Bliūdžius, R. (2020). Optimization of the thermal insulation level of residential buildings in the Almaty region of Kazakhstan. *Energies*, 13(18), 4692. <https://doi.org/10.3390/en13184692>
- Uçar, S. (2023). *Akdeniz iklim koşullarında pasif ev standartlarının uygulanabilirliğinin sinirsel bulanık mantık ile tahmini ve tasarım sürecine dahil edilmesi: Yarı olimpik kapalı havuz örneği* [Doktora tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- Uçar, S., & Akıner, İ. (2024). Enerji verimli binaların tasarımı için yapay zeka ve sinirsel bulanık mantık yönteminin uygulanmasına ilişkin bir inceleme. 18. *Mimarlıkta Sayısal Tasarım Ulusal Sempozyumu (MSTAS 2024)*, 524-537.
- Varolgüneş, F. K., Mutlu, Y., Özer, G., & Şeker, İ. H. (2026). Evaluation and improvement of thermal comfort and indoor air quality in post-disaster permanent housing: A case study of Bingöl, Türkiye. *International Journal of Built Environment and Sustainability*, 13(1), 47-69. <https://doi.org/10.11113/ijbes.v13.n1.1466>
- Wang, J. (2020). Integrated building and systems: Modeling and simulation. *2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, 1, 1799-1802. <https://doi.org/10.1109/ITNEC48623.2020.9085149>

ETHICAL DECLARATIONS

Research and Publication Ethics

We declare that this article is an original work and was prepared in accordance with the principles of scientific research and publication ethics. The article has not been published elsewhere and is not currently under review by another journal.

All sources used in the study have been cited in accordance with academic standards. We declare that the study does not contain plagiarism, fabrication, falsification, or manipulation of data, and that the research findings have been presented in accordance with the principles of scientific integrity.

Author Contributions

We designed, conducted, and analyzed the study and prepared the report for this article. We have reviewed and approved the final version of the article and agreed to its publication.

Conflict of Interest

We declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this manuscript.

Funding

This research did not receive any specific grant, financial support, or funding from any public, commercial, or non-profit funding agencies.

Artificial Intelligence (AI) Usage Disclosure

During the preparation of this manuscript, artificial intelligence tools may have been used solely for limited purposes such as language editing, translation assistance, and stylistic improvement. Any AI-assisted translations or language corrections were carefully reviewed and verified by us. Artificial intelligence tools were not used to generate the core scientific content, research design, analysis, or scholarly conclusions. All academic responsibility for the content of the manuscript rests entirely with us.

Copyright and Permissions

We confirm that all necessary permissions for copyrighted materials have been obtained where required and that the manuscript does not violate any intellectual property rights.

Author Approval

We confirm that they have read and approved the final version of the manuscript and consent to its submission and publication.

ETİK BEYANLAR**Araştırma ve Yayın Etiği**

Bu makalenin özgün bir çalışma olduğunu ve bilimsel araştırma ve yayın etiği ilkelerine uygun olarak hazırlandığını beyan ederiz. Makale daha önce herhangi bir yerde yayımlanmamış olup başka bir dergide değerlendirme sürecinde değildir.

Çalışmada kullanılan tüm kaynaklar akademik kurallara uygun biçimde atıflanmıştır. Çalışmanın intihal, veri uydurma, veri tahrifi veya manipülasyon içermediğini; araştırma bulgularının bilimsel dürüstlük ilkelerine uygun şekilde sunulduğunu beyan ederiz.

Yazar Katkısı

Çalışmanın tasarlanması, yürütülmesi, analizi ve makalenin raporlama aşamasını birlikte yürüttük. Makalenin son hâlini okuyup onayladık ve yayımlanmasını kabul ettik.

Çıkar Çatışması

Bu makalenin yayımlanmasına ilişkin herhangi bir çıkar çatışması bulunmadığını beyan ederiz.

Finansal Destek

Bu araştırma herhangi bir kamu kurumu, ticari kuruluş veya kâr amacı gütmeyen kuruluş tarafından finansal olarak desteklenmemiştir.

Yapay Zekâ Kullanım Beyanı

Makalenin hazırlanması sürecinde yapay zekâ araçlarından yalnızca dil düzenleme, çeviri desteği ve anlatım iyileştirmesi amacıyla sınırlı ölçüde yararlanılmıştır. Yapay zekâ araçları tarafından yapılan çeviri ve dil düzenlemeleri tarafımızdan dikkatle kontrol edilmiştir. Yapay zekâ araçları çalışmanın bilimsel içeriğinin, araştırma tasarımının, analizlerinin veya akademik sonuçlarının oluşturulmasında kullanılmamıştır. Makalenin içeriğine ilişkin tüm akademik sorumluluk bize aittir.

Telif Hakları ve İzinler

Telif hakkı gerektiren materyaller kullanılmışsa gerekli izinlerin alındığını ve çalışmanın herhangi bir fikrî mülkiyet hakkını ihlal etmediğini beyan ederiz.

Yazar Onayı

Makalenin son hâlini okuduk, onayladık ve yayımlanmasını kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Authors' Contribution Statement / Yazarların Katkı Oranı Beyanı

The researchers' contribution statement is as follows / Araştırmacıların katkı oranı beyanı şu şekildedir:

First author / 1. Yazar %34,

Second author / 2. Yazar %33,

Third author / 3. Yazar %33.