

規劃設計階段考量耐震性及經濟性之中小學校舍規劃效率評估

陳清山*

關鍵字：中小學校舍，模糊理論，無異曲線，效率前緣，資料包絡分析法

摘要

建築師於規劃設計階段規劃建築物時，常會將建築物之耐震性及經濟性列為兩項重要規劃目標。但此兩項目標常常是互相衝突的，故造成建築師規劃設計建築物時極大的困擾，權衡此兩項衝突目標即為多目標最佳化問題。此外，目前的效率評估方法，大部份僅客觀地評估建築物的某項效率，較少融合規劃設計者的主觀規劃偏好。但建築物規劃設計具有某些主客觀因素，因此目前評估方法較不適用於建築物規劃效率評估，故如何發展一融合多目標及規劃偏好的規劃效率評估方法，成為一個值得研究的課題。本研究所使用的研究方法包含：模糊理論、無異曲線、效率前緣以及資料包絡分析法。模糊理論可詮釋建築師偏好具體程度；藉由無異曲線的觀念，可定義建築師各種規劃偏好類型及權重；資料包絡分析法則可計算出校舍之效率前緣曲線，建築師可藉此曲線評估校舍之規劃效率。本研究即以上述四項理論，發展中小學校舍的規劃效率評估模式。文末以臺中市 326 棟中小學校舍為範例，闡釋上述之方法論，從研究結果中可知，若僅用客觀的分析方法或僅於主觀上做認定，均不足於詮釋建築物規劃設計的意涵，而應兩者兼容並蓄。此研究成果可提供建築師於規劃設計階段規劃校舍之應用，亦可提供學術界後續研究之參考。

Planning Efficiency Evaluation for School Buildings Considering the Tradeoff of Seismic Resistance and Cost Effectiveness at the Planning and Design Stage

Ching-Shan Chen*

KEYWORDS: School Buildings, Fuzzy Theory, Indifference Curve, Efficient Frontier, Data Envelopment Analysis

ABSTRACT

At the building planning and design stage, the most important criteria in building planning are safety and cost. However, these two objectives are often in conflict. Thus, architects, who must also strike an optimal balance between two conflicting objectives, may be indecisive when planning buildings. It's a Multi-Objective Optimization Problem (MOOP). Except for the MOOP, there exists the subjective characteristics when architects planning the buildings. It is also deserved further investigation to explain these subjective characteristics adequately to match the architect's planning preference. This research integrates fuzzy theory, indifference curve, efficient frontier and data envelopment analysis (DEA), and defines every type of architect planning preferences. Fuzzy number in fuzzy theory was adopted to identify the degree of architect preference. The slope of the indifference curve was used to determine the architect planning preference. The planning weight could then be deduced. This research applied the efficient frontier via DEA to identify a group of plans with the highest seismic performance index under different unit construction cost conditions for school buildings. This group of plans may create an efficient frontier curve for school buildings, with points serving as benchmarks. A total of 326 school buildings in Taichung City in an empirical study designed to illustrate proposed approach effectiveness. The results show that using only objective evaluation or subjective recognition is insufficient to explain the true nature of building planning. Findings can serve as benchmarks for inefficient school buildings at the planning and design stage.

收件日期：2014.02.13；接受日期：2014.08.27

* 朝陽科技大學建築系副教授（通訊作者 Email: cschen@cyut.edu.tw）

Associate Professor, Department of Architecture, Chaoyang University of Technology, Taiwan

DOI: 10.3966/101632122015030091001



一、緣起與目的

建築師於規劃設計階段進行建築物規劃時，有兩項課題是此階段較被關注的：1. 如何權衡(trade-off)衝突之規劃目標；2. 如何決定建築師本身的規劃偏好。一般而言，建築物之耐震性及經濟性經常於規劃設計階段被列為兩項重要規劃目標(Zekeriya & Yusuf, 2010; Cheng & Chen, 2011)，許多文獻亦針對此兩項規劃目標進行研究 (Tang, et al., 1997 ; Sumrall & Mott, 2010; Ramli, et al., 2013)，但此兩項目標常常是互相衝突的：以耐震性為考量重點的建築物，常會增加建築物成本，造成建築物不夠經濟；相反地，以經濟性為主的建築物，則易使建築物的耐震性不足。如何權衡此兩項衝突目標即為多目標最佳化問題(Multi-Objective Optimization Problem ; MOOP)，此問題經常困擾著建築師，造成建築師規劃設計建築物時的無所適從。除此之外，本研究從文獻回顧中發現，目前的建築物效率評估方法，通常僅客觀地評估建築物單一目標之效率，較少考慮多目標最佳化問題，且甚少能兼顧規劃設計者的主觀因素。但建築物之規劃設計兼具某些主觀(例如：建築師的規劃偏好)及客觀(例如：建築物的耐震性及經濟性)的因素，因此目前效率評估方法較不適用於規劃設計階段之建築物規劃效率評估。故如何於規劃設計階段發展一套融合多目標及規劃偏好的規劃效率評估方法，以反應建築規劃設計具主客觀因素之本質，成為一個值得研究的課題。

本研究所使用的研究方法主要有人工智慧領域之模糊理論、個體經濟學範疇的無異曲線、投資學之效率前緣以及資料包絡分析法等觀念。模糊理論中之模糊數可詮釋建築師對某項規劃目標的偏好程度；利用無異曲線的觀念，可推論建築師同時考量耐震性及經濟性時之規劃偏好及偏好權重，此兩項理論可適切地反應規劃設計者的偏好，呼應建築物之規劃設計具主觀因素的內涵；效率前緣理論則可以從同類型建築物案例中，以資料包絡分析法計算出較有效率的一群案例，此群案例可建構出此類建築物之效率前緣曲線，做為建築師規劃設計此類建築物時的依據，非位

於效率前緣曲線上的建築物，亦可藉此曲線客觀評估建築物的各項效率，如此即可對應建築物之規劃設計具客觀因素的本質。本研究即以上述四項理論，發展校舍的規劃效率評估方法，並以位於臺中市的 326 棟校舍為研究案例，闡釋本研究的方法論，研究結果可供學術界後續研究及建築師規劃設計建築物時的參考。

二、偏好及多目標最佳化文獻探討

目前多目標最佳化的求解方法甚多，一般而言，可依決策者(decision-maker)偏好資訊加入求解過程的時間點而區分為四種類別：1. 決策者完全不提供偏好資訊；2. 決策者於規劃前提供偏好資訊；3. 決策者於規劃中逐漸提供偏好資訊；4. 決策者於規劃後提供偏好資訊(Hwang & Yoon, 1981)，說明如下。

1. 決策者完全不提供偏好資訊

於第一種偏好類別中，決策者不需要提供任何主觀之偏好資訊給規劃者，但需接受規劃者所提供的最後結果。此類別之優點為其結果不受決策者的影響，缺點則是必須對決策者的偏好作許多假設。此類別有很多求解方法，其中最常使用的方法為最小-最大公式法(Min-Max formulation)。Buhl et al. (2004)運用最小-最大公式法於伸縮式摺版屋頂形狀最佳化之問題上。 ϵ -限制法(ϵ -constraint method) 是另一個常用的方法，該法主要是將求解重點放在多個目標中最重要(或最偏好)的一個，而將其他目標各設定一個可接受的水準 ϵ_i ，再轉為限制條件，成為單目標數學規劃問題。Zou et al. (2007)曾以 ϵ -限制法求解 10 層樓 RC 建築物之材料成本及預期破壞損失兩個衝突目標最佳化之課題。Tavana et al. (2014)則以一多目標最佳化模式與 ϵ -限制法，解決一專案之時間、成本及品質之權衡問題。

2. 決策者於規劃前提供偏好資訊

第二種偏好類別是求解 MOOP 最常使用的類別，在規劃者解決實際問題之前，決策者即事先提供本身的偏好資訊，因此所求得之解為決策者的偏好解。此類別的優點為求解容易，成本較低，且所得之



結果易為決策者接受，此種由上而下(top-down)的分析方式，頗能符合實際的決策模式。缺點則為很難求得決策者真正的價值函數(value function)及提供所必須的偏好資訊(Evans, 1984)。效用函數法(utility function method)是此類別的一個常用方法，該法係利用決策者所提供的偏好資訊，將多目標以一決策者效用函數表示之，藉以轉換為單目標規劃問題。Georgy et al. (2005)曾利用效用函數模型評估營建工程專案之績效; Pandey & Mourelatos (2014)則以效用函數觀念最佳化一焊接樑的設計問題。非線性最佳化法(Non-linear optimization method)是此類別的另一個方法，Zeng et al. (2011)以非線性最佳化法發展具最佳能源效率之建築物。

3. 決策者於規劃中逐漸提供偏好資訊

第三種偏好類別即互動法(inter-reactive method)或交談式法，此乃基於決策者對問題的認知或理解程度，常受決策情況與所處環境之影響。因此決策者僅能提供局部性的偏好資訊，必須進行多次的反覆過程後，才能逐漸求得滿意解。此類別的優點為決策者毋需提供事先的偏好資訊，而缺點則是決策者無法保證能在每個過程中，提供正確的局部偏好資訊，且亦無法保證在一定次數的反覆過程後，能夠求出一個最滿意的答案。逐步法(step method)通常被稱為互動法，屬於此類別的方法，此法可幫助建築規劃設計過程變得有效率，並發揮其效能。Boyer & Song (1994)曾以逐步法觀念設計一熱帶地區附有中庭之建築物採光需求。互動式基因演算法(Interactive Genetic Algorithm, IGA)是另一種互動法。Serag et al. (2008)採用 IGA 觀念進行有機建築物之創意設計; Marsault (2013)則以 IGA 及多目標觀念最佳化建築物之造型。

4. 決策者於規劃後提供偏好資訊

第四種偏好類別即非劣解法，其解不依賴決策者的偏好，亦即不需要決策者的效用函數或提供任何決策者的偏好資訊，完全由規劃者求出問題中所有的非劣解，再由決策者選擇一最滿意的解。此類別的優點為決策者有更多的選擇機會，而且不需要決策者事前或事中的偏好資訊。缺點則為：計算較為複雜、決策者

很難理解、許多大規模實際問題難以使用此類方法以及產生的非劣解數目過多，使決策者難以選擇一最滿意的解。多目標基因演算法(Multiple Objective Genetic Algorithms; MOGA)由於其簡易且具有不錯的效率，是此類別中被廣為採用的方法。Suga et al. (2010) 採用 MOGA 進行建築物外牆窗戶之最佳化設計。模擬最佳化法(simulation-optimization method)是另一種常用的方法，Daniel & Moncef (2010) 結合模擬最佳化法和基因演算法發展一最佳化模型，利用此模型進行一棟住宅的外觀設計最佳化; Park et al. (2013) 則運用模擬最佳化法於高層建築的垂直運輸上。

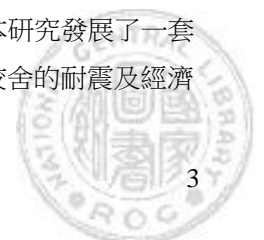
雖然已有很多方法可以求解多目標最佳化問題，但由於每個方法都各自有其優缺點，因此並沒有一個方法是最佳的，應視問題的類型而採用適合的方法(Johan, 2000)。事實上，甚至於單目標最佳化(single-objective optimization)問題裏，也沒有一個可以被普遍接受之最佳化解答，因為所謂最好的解答，必須視決策者的偏好而定(Coello, 1996)。

本研究綜合上述第二及第四種偏好類別的優點，於校舍規劃設計階段時，針對建築師規劃偏好及多目標最佳化課題，發展一考量耐震性及經濟性兩種規劃目標下之校舍規劃效率評估模式，此模式除可解決多目標之衝突外，亦滿足建築師規劃偏好之需求。

三、研究方法與理論發展

目前很多建築規劃最佳化的努力僅只於經濟性的考量，並未顧及其它規劃目標。但是僅考慮經濟性是無法充分表示規劃最佳化的問題，因為建築規劃最佳化牽涉到很多範疇(da Graça, et al., 2007)。McGeorge (1988) 曾述及：「一個好的規劃設計必須在安全性和經濟性方面是有效率的。」本研究考量的重點乃依據建築師的規劃偏好，權衡中小學校舍的耐震性及經濟性，故就性質而言，本研究屬於多目標最佳化問題(Multi-Objective Optimization Problem; MOOP)，而不是單純地只有成本問題。

為解決上述之 MOOP 問題，本研究發展了一套方法論。此方法論除了考慮中小學校舍的耐震及經濟



目標外，並且融合了建築師規劃校舍時的規劃偏好。方法論所引用的理論有模糊理論、無異曲線、效率前緣以及資料包絡分析法等觀念。模糊理論中之模糊數可具體詮釋建築師對耐震或經濟目標的偏好程度；利用無異曲線的觀念，可推論建築師同時考慮耐震性及經濟性之規劃偏好及偏好權重；效率前緣理論則可以從中小學校舍案例中，以資料包絡分析法求出不同單位造價下，耐震指標較高的一群案例，或者同樣的耐震指標下，單位造價較低的案例，此群案例可建構出中小學校舍之效率前緣曲線，做為建築師評估中小學校舍規劃效率的依據。本研究結合上述理論，建構出校舍規劃效率評估之方法論，茲將此方法論之原理敘述如後。

3.1 建築師規劃偏好

3.1.1 偏好函數

建築師於規劃設計建築物時，常常會面臨許多規劃目標或設計參數數值的決定，此規劃目標或參數數值通常具有很多不確定性(uncertainty)，這些不明確之目標或參數經常於規劃設計階段困擾著建築師，造成建築師的無所適從。為解決此不確定性問題，本研究引用模糊理論中之模糊數(fuzzy number)(Dubois & Prade, 1978)來詮釋建築師對某項規劃目標偏好的具體程度，此模糊數概念經常被應用於多目標最佳化及偏好之課題(Gong, 2012; Wei & Wang, 2008)，原理如下所述。

假設模糊集合 A 具備下列三項特性：

- (1) A 的 α -cut 為一閉區間(closed interval)
- (2) 至少存有一個以上的 x 使得隸屬函數值 $\mu_A(x)=1$
- (3) 具凸性(concavity)

則集合 A 可做為偏好函數 $\mu_A(x)$ 使用。如圖 1 所示，圖 1 原為三角型模糊數，此三角型模糊數為一模糊集合且滿足上述三項特性，故常做為一典型且常用之偏好函數。圖 1 中之 C 為中心值，S 則為展度

(Spread)。若將此三角型偏好函數量化為一組方程式，則如式 1 所示。

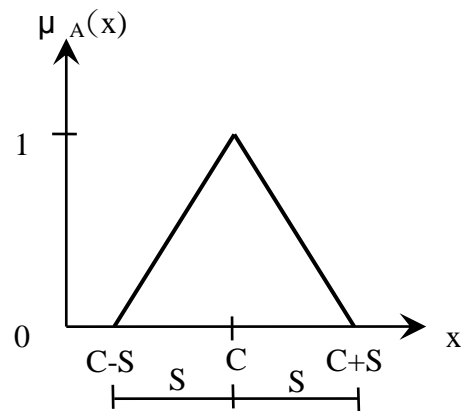


圖 1 三角型偏好函數

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 - \frac{C-x}{S}, & C-S \leq x \leq C \\ 1 - \frac{x-C}{S}, & C \leq x \leq C+S \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

圖 1 之三角型偏好函數中， x 代表某規劃目標或設計參數數值， $\mu_A(x)$ 則代表對該數值偏好之隸屬度。以本研究而言， x 即代表耐震指標或單位造價之數值，若偏好函數值 $\mu_A(x)$ 為 0，則代表建築師對耐震性或經濟性偏好隸屬度非常低；若偏好函數值 $\mu_A(x)$ 為 1，則代表建築師對耐震性或經濟性偏好隸屬度非常高。當展度 S 愈大顯示此偏好函數的模糊度(fuzziness)愈高，代表建築師對此偏好愈不具體；展度 S 愈小，代表建築師對此偏好愈具體；若展度 S 為 0，則偏好函數將成為一個明確數值 C ，可完全顯示出建築師的偏好。

3.1.2 建築師規劃偏好類型

人的偏好很容易受到他人的影響，但主要是受到典型的心理效應-認知平衡(cognitive balance)所左右(Izuma & Adolphs, 2013)，它是潛藏在人們心中的一種情感和傾向；偏好亦容易受外在環境之影響(歐聖榮等, 2012)，是一種主觀認知的過程，且每個人形成偏好的過程都不盡相同。在經濟學領域中，偏好是指消

費者按照自己的意願購買某項商品之欲望，反應消費者的主觀意識及相對概念，這種主觀意識及相對概念有時很難將其量化。為解決此項難題，諾貝爾經濟學獎得主薩繆爾遜於1938年提出顯示性偏好理論(revealed preference theory)(Samuelson,1938)，認為只要從消費者的日常購物習慣去觀察、記錄，就可以經由一套邏輯分析的方法去確認是否有無異曲線的存在。也就是說薩繆爾遜乃利用無異曲線的觀念，來解決消費者的偏好問題。通常中小學校舍規劃是一個群體決策(Group Decision Making)的過程，此群體可能包含：教育主管機關(或董事會)、建築主管機關、學校校長、各處室主任、專家學者以及建築師，但最終仍由建築師統整此群體之意見，進行中小學校舍之規劃設計，故建築師實為此決策過程的關鍵人物，本研究所指的建築師規劃偏好乃建築師統整此群體決策過程後所產生之偏好，各業主主觀想法已融入此偏好中。本研究引用上述薩繆爾遜的理論來詮釋建築師的規劃偏好，說明如下。

本研究乃以國家地震工程研究中心(NCREE)所發展的耐震指標 I_s (黃世建等, 2005)，做為建築師規劃中小學校舍時考慮耐震性之依據，以經主管機關核定後之校舍單位造價，做為考量經濟性之依據。由於耐震指標及單位造價均為正值，若以一平面座標的四個象限來觀察耐震指標和單位造價之分佈，則耐震指標和單位造價僅會出現在第一象限，故以第一象限來說明無異曲線，如圖2所示。圖2之雙軸平面中，本研究以單位造價為x軸，耐震指標為y軸，並假設校舍A所需的單位造價為 U_A ，可獲得的耐震指標為 I_A ；校舍B的單位造價為 U_B ，可獲得的耐震指標為 I_B 。若建築師對於此結果的滿足程度一樣，亦即建築師對此結果偏好無異(無差別)，則A、B兩點所構成之線即為無異曲線，此無異曲線可能為任何曲率(curvature)之曲線，若曲率為零時則為一直線。為簡化分析，本研究採用曲率為零之無異曲線代表建築師規劃偏好。在單位造價及耐震指標所構成的平面中，由於不同的斜率可代表不同的單位造價及耐震指標的分量，顯現出建築師對單位造價及耐震指標不同的偏

好，故本研究即以無異曲線之斜率來詮釋建築師的規劃偏好類型(陳清山, 2011)。

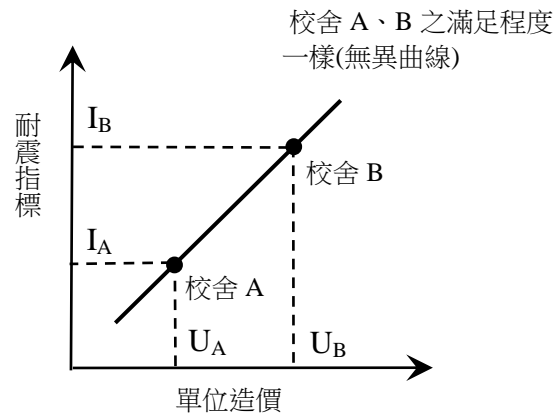
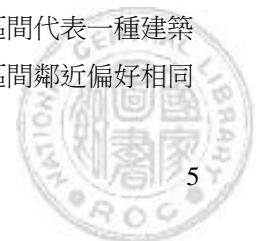


圖2 校舍規劃之無異曲線

圖2中，若無異曲線與水平方向之夾角為 45° (斜率 m 為 1)，由於耐震指標及單位造價所佔分量相同，可說明建築師對耐震性及經濟性的偏好無異，故將此現象的偏好定義為偏好相同。由於本研究乃採用模糊理論的模糊數，來詮釋建築師對某項規劃目標或參數數值偏好之具體程度，故若所佔的分量愈小，代表展度 S 愈小，表示建築師對該規劃目標偏好愈具體。例如圖2中，若單位造價所佔的分量 (U_B-U_A) 比耐震指標分量 (I_B-I_A) 小，則該無異曲線斜率將大於 1，代表建築師對單位造價的偏好大於耐震指標，斜率愈大，愈偏好經濟性，若無異曲線斜率 m 為無限大，則說明建築師極端偏好經濟性；相反地，若單位造價所佔的分量比耐震指標大，則該無異曲線斜率將小於 1，表示建築師對單位造價的偏好小於耐震指標，斜率愈小，愈偏好耐震性，若無異曲線斜率 m 為 0，可說明建築師極端偏好耐震性。為清楚定義各種建築師規劃偏好且符合實際應用情況，本研究將第一象限之無異曲線斜率區分為五等分，每等分之夾角為 18° ，亦即： 0° 至 18° 區間、 18° 至 36° 區間、 36° 至 54° 區間、 54° 至 72° 區間以及 72° 至 90° 區間等共五個區間，每一個區間代表一種建築師的規劃偏好，由於 36° 至 54° 之區間鄰近偏好相同



(斜率為 45°)，故將 36°至 54°之區間定義為偏好相近，如圖 3 所示。本研究並將各種建築師的規劃偏好，綜合說明如表 1 所示。

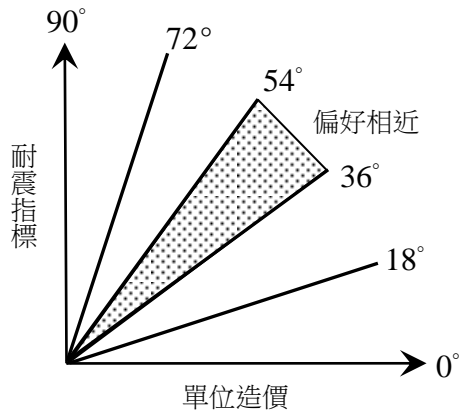


圖 3 規劃偏好相近之定義

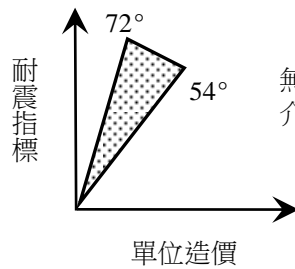
表 1 中，本研究以無異曲線之斜率大小定義了八種建築師的規劃偏好類型，分別為：(1)偏好相同、(2)偏好相近、(3)較偏好耐震性、(4)較偏好經濟性、(5)非常偏好耐震性、(6)非常偏好經濟性、(7)極端偏好耐震性以及(8)極端偏好經濟性。於考量耐震性及經濟性兩種規劃目標下之中小學校舍規劃中，此八種規劃偏好已包含所有可能的建築師規劃偏好類型。建築師可根據自身的知識、經驗及規劃偏好，決定無異曲線的斜率。

表 1 建築師規劃偏好類型

偏好類型	圖形	文字說明
(1) 偏好相同		此類型之無異曲線斜率 m 為 1(與水平方向之夾角為 45°)，由於耐震指標及單位造價所佔分量相同，可說明建築師對耐震性及經濟性的偏好相同。
(2) 偏好相近		此類型之無異曲線斜率介於 36°至 54°之間，由於耐震指標及單位造價所佔分量大致相同，故本研究定義此種偏好類型為偏好相近。
(3) 較偏好耐震性		若無異曲線斜率介於 18°與 36°之間，由於耐震指標的分量小於單位造價，代表建築師規劃偏好較傾向於耐震性，斜率愈小，愈偏好耐震性。



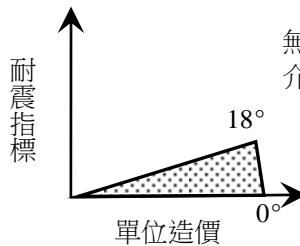
(4)
較偏好經濟性



無異曲線斜率
介於 54°至 72°

若無異曲線斜率介於 54°與 72°之間，由於單位造價的分量小於耐震指標，代表建築師規劃偏好傾向於經濟性，斜率愈大，愈偏好經濟性。

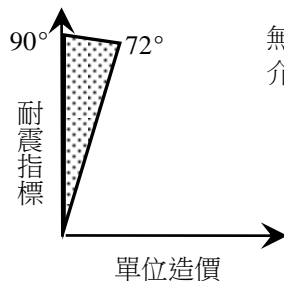
(5)
非常偏好耐震性



無異曲線斜率
介於 0°至 18°

此類型之無異曲線斜率介於 0°與 18°之間，由於耐震指標的分量非常小，故說明建築師非常偏好耐震性，斜率愈小，愈偏好耐震性。若斜率為 0°，則定義為極端偏好耐震性。

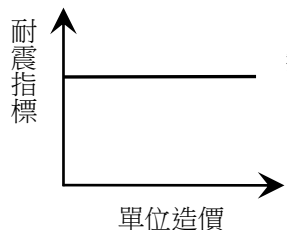
(6)
非常偏好經濟性



無異曲線斜率
介於 72°至 90°

此類型之無異曲線斜率介於 72°與 90°之間，由於單位造價的分量極小，故說明建築師非常偏好經濟性，斜率愈大，愈偏好經濟性。若斜率為 90°，則定義為極端偏好經濟性。

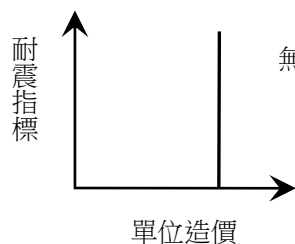
(7)
極端偏好耐震性



無異曲線斜率
 $m=0$

若無異曲線斜率 m 為 0(與水平方向之夾角為 0°)，則耐震指標之分量為 0，可說明建築師極端偏好耐震性，單位造價可高可低，但耐震指標只能高於某一個最低值。

(8)
極端偏好經濟性



無異曲線斜率
 $m=\infty$

若無異曲線斜率 m 為無限大(與水平方向之夾角為 90°)，則單位造價之分量為 0，故說明建築師極端偏好經濟性，耐震指標可高可低，但單位造價只能低於某一個最高值。

3.2 規劃偏好權重

在個體經濟學領域中，無異曲線定義為：把滿足程度一樣、沒什麼差別的所有消費組合連接起來的一條線，就是一條無異曲線(Mankiw, 2011)。3.1 節中，

本研究已介紹無異曲線觀念如何引用於建築師的規劃偏好，並已敘述無異曲線斜率所代表的意義以及各種建築師規劃偏好類型，本節則進一步說明如何應用無異曲線的觀念定義偏好程度以及偏好權重。

圖 4 中，假設 A (U_A, I_A) 以及 B (U_B, I_B) 為無異曲線上的兩點，則透過此兩點，可以求得其水平分量 $a = U_B - U_A$ 、垂直分量 $b = I_B - I_A$ 以及斜邊長度 $c = \sqrt{a^2 + b^2}$ 。從圖 4 中亦可得知此無異曲線之斜率 $m = \tan\theta = b/a$ 。本研究為更清楚闡釋建築師的規劃偏好，定義偏好程度 P_α, P_β 以及偏好權重 α, β (Cheng & Chen, 2011)，如式 2 及式 3 所示。

$$\begin{cases} P_\alpha = \frac{(1/b)}{\sqrt{(1/a)^2 + (1/b)^2}} = \frac{(1/b)}{\sqrt{(a^2 + b^2)/(ab)^2}} = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \\ P_\beta = \frac{(1/a)}{\sqrt{(1/a)^2 + (1/b)^2}} = \frac{(1/a)}{\sqrt{(a^2 + b^2)/(ab)^2}} = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \end{cases} \quad (2)$$

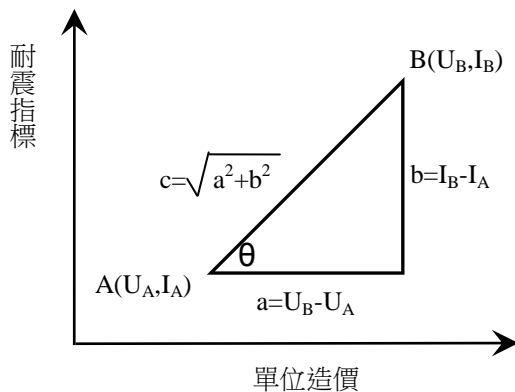


圖 4 無異曲線的訂定

$$\begin{cases} \alpha = \frac{P_\alpha}{P_\alpha + P_\beta} = \frac{a}{a + b} \\ \beta = \frac{P_\beta}{P_\alpha + P_\beta} = \frac{b}{a + b} \end{cases} \quad (3)$$

式中

- a: 單位造價之模糊度分量
- b: 耐震指標之模糊度分量
- P_α : 耐震性偏好程度
- P_β : 經濟性偏好程度
- α : 耐震性偏好權重
- β : 經濟性偏好權重

式 2 中， a, b 為此無異曲線投影於單位造價及耐震指標之長度，分別代表建築師對經濟性和耐震性偏好之模糊度分量，其值愈小，表示建築師對該規劃目

標偏好愈具體，故式 2 中各值取倒數以反應此項事實。例如：若 $a=0$ ，則 $P_\alpha=0, P_\beta=1$ 。從圖 4 中可看出此時斜邊 c 將成為一條垂直線，代表建築師極端偏好經濟性，與表 1 中第(8)項之定義相符合；若 $b=0$ ，則 $P_\alpha=1, P_\beta=0$ ，從圖 4 中可看出此時斜邊 c 將成為一條水平線，代表建築師極端偏好耐震性，符合表 1 中第(7)項之定義。

式 2 及式 3 中，僅為考量兩個規劃目標（耐震性及經濟性）下之偏好程度和偏好權重之計算，事實上，此觀念亦可擴充為當考慮三個以上的規劃目標時，如何決定其偏好程度和偏好權重。本研究將其擴展為如式 4 及式 5 所示。

$$P_j = \frac{(1/x_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (1/x_i)^2}}; j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

$$\omega_j = \frac{P_j}{\sum_{i=1}^n P_i}; j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

式中

- P_j : 第 j 個規劃目標的偏好程度
- x_j : 第 j 個規劃目標的偏好模糊度分量
- ω_j : 第 j 個規劃目標的偏好權重

3.3 效率前緣

效率前緣(efficient frontier)觀念乃由 1990 年諾貝爾經濟學得獎者馬可維茲 (Markowitz) 於 1952 年所提出 (Markowitz, 1952)，在投資學領域中，效率前緣被定義為所有效率投資組合所組成之曲線。所謂『效率投資組合』是指在任何風險程度下獲得最高可能報酬，或在任何預期報酬下遭遇最低可能風險之一種投資組合 (Bodie, et al., 2009)。目前效率前緣理論大部份應用於工商業及投資領域，例如：公司組織設計 (Csaszar, 2013)、國際性保險產業的組織和效率分析 (Biener & Eling, 2012)、投資組合的最佳化 (Serban, et al., 2011)、油氣產業的應用 (Mansoor, 2007)。亦有應用於營建領域的例子，例如：考量



耐震性及經濟性之中小學校舍最適規劃模式(Cheng & Chen, 2011)、營建工程專案現金流動之規劃與管理(Jiang, et al., 2011)、建築物能源效率之標竿學習(Kavousian & Rajagopal, 2014)。3.1 及 3.2 節所發展的理論，主要用於探討建築師之規劃偏好，以及耐震性和經濟性偏好權重，但並不代表此時建築師的規劃即為最佳規劃。為使建築師的規劃能達到最有效率的規劃，本研究引用效率前緣的觀念，說明如下。

如圖 5 所示，圖上各點為考量耐震性及經濟性兩種規劃目標下之中小學校舍規劃，每一點代表一棟校舍規劃。以圖中校舍 D 與校舍 G 而言，校舍 D 與校舍 G 投入相同之單位造價，但校舍 D 可以獲得較高的耐震指標，故校舍 D 之規劃優於校舍 G。再以圖中之校舍 B 與校舍 G 為例，在同樣的耐震指標下，校舍 B 所需投入的單位造價較少，故校舍 B 之規劃優於校舍 G。依此類推，可得到一條相對有效率的曲線 ABCDEF，此曲線上之各點皆比集合內其他點較有效率，此曲線即為效率前緣曲線。效率前緣曲線上的各點即是其他校舍規劃設計時可以學習的對象，非位於效率前緣曲線上的校舍，亦可以藉此曲線做規劃效率之評估。

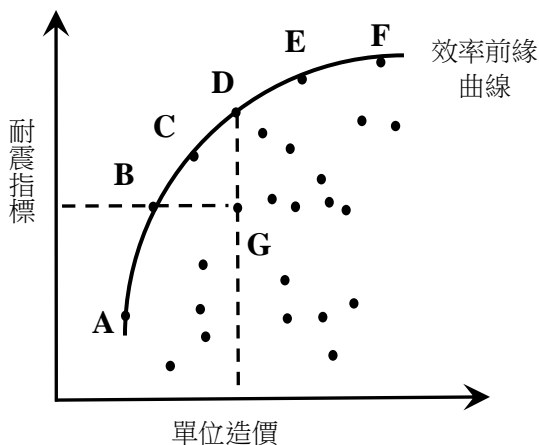


圖 5 中小學校舍規劃之效率前緣曲線

3.4 資料包絡分析法(DEA)

圖 5 中效率前緣曲線上之各點可透過資料包絡分析法(Data Envelopment Analysis; DEA)原理以求

出，該法乃以相對效率之觀念來評估出較佳方案，目前應用範圍極廣，例如：大學高等教育之創新績效及整體品質績效的評估(Chen & Chen, 2011)、加拿大大型銀行分支機構經營績效之分析(Wu, et al., 2006)、政府機關不動產投資績效之評估(Wang, 2005)...等；亦有應用於營建領域的例子，例如：上市上櫃之營建公司經營效率分析(陳博亮等, 2010)、專案工程地點之選擇(Cheng & Li, 2004)、建築物冷卻系統之能源管理(Yu & Chan, 2013)以及建築物能源管理效率評估(Lee & Lee, 2009)...等，本研究將 DEA 之原理說明如下。

以最簡單的例子為例，若一個決策單元(Decision Making Unit; DMU)僅有一個輸入值(x)以及一個輸出值(y)，則此決策單元的效率可定義為：y/x。若一個決策單元 k 有多個輸入值(x_{jk}, j=1,2,...,m)以及輸出值(y_{rk}, r=1,2,...,s)，則可以用權重的方式，分別將輸出值及輸入值加權後再相除，其投入效率 h_k 可定義為： $h_k = \sum u_r y_{rk} / \sum v_j x_{jk}$ 。因此決策單元的相對效率可用數學規劃(Mathematical Programming; MP)的方法予以求出，如式 6 及式 7 所示。此數學規劃方程式乃於 1978 年時由 Charnes, Cooper 和 Rhodes (CCR) 所發展，因此亦稱為 CCR 模式(Charnes, et al., 1978)。此模式求解相對效率時有一個優點，即可以不用預先設定各項輸入及輸出之權重，而可以由資料包絡分析法直接予以求出。

$$[MP] \quad \underset{u,v}{\text{Max}} \quad h_k = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rk}}{\sum_{j=1}^m v_j x_{jk}} \quad (6)$$

$$s.t. \quad \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{ri}}{\sum_{j=1}^m v_j x_{ji}} \leq 1, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

$$u_r \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s$$

$$v_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m$$

式中



h_k : 決策單元 k 的投入效率值

u_r : 第 r 個產出項目的虛擬乘數(virtual multiplier)

v_j : 第 j 個投入項目的虛擬乘數

式 6 之目的為求解使決策單元 k 之投入效率為最大的虛擬乘數值，且因為投入效率值必須介於 0 與 1 之間，故式 7 的目的則是限制求解所得的虛擬乘數不能使任一個決策單元的投入效率超過 1。因此，所有決策單元的投入效率值均以相同的限制條件下，分別求解使其效率值極大之虛擬乘數組合。

本研究即透過資料包絡分析法的原理求出校舍之效率前緣曲線，亦即將每棟校舍視為一個決策單元(DMU)，將單位造價視為輸入值(x_{jk})，耐震指標則視為輸出值(y_{rk})。利用資料包絡分析法中數學規劃的技術，所有樣本空間中的校舍相對效率即可求出，並決定出此樣本空間的效率前緣曲線。

3.5 耐震效率、經濟效率以及規劃效率之定義

如上所述，本研究以資料包絡分析法求出校舍之效率前緣曲線，此曲線上各點皆為柏拉圖的效率單位(Pareto efficiency)，其輸入及輸出效率值均為 1，且皆比集合內其他點較有效率，故可藉此曲線評估其他校舍之各項效率，說明如下。

如圖 6 所示，曲線 ABCDEF 為校舍之效率前緣曲線。以圖中校舍 B 與校舍 G 而言，校舍 B 位於效率前緣曲線上，故為柏拉圖的效率單位，校舍 G 因未位於效率前緣曲線上，故相對於校舍 B 而言，校舍 G 顯得比較無效率，因為在同樣的耐震指標下，校舍 G 所需投入的單位造價比校舍 B 多了 \overline{BG} (或 \overline{IH}) 的投入量。因校舍 B 之投入效率為 1，故校舍 G 之投入效率可定義為 $\overline{JB} / \overline{JG}$ (或 $\overline{OI} / \overline{OH}$)。再以圖中位於效率前緣曲線上之校舍 D 與未位於此曲線上之校舍 G 為例，校舍 D 與校舍 G 投入相同之單位造價，但校舍 D 可以獲得的耐震指標比校舍 G 多了 \overline{GD} (或 \overline{JK}) 的產出量，由於校舍 D 的產出效率為 1，所以校舍 G 的產出效率可定義為 $\overline{HG} / \overline{HD}$ (或 $\overline{OJ} / \overline{OK}$)。

由於建築師的規劃偏好是一種主觀認知的過程，每位建築師形成規劃偏好的過程未盡相同，亦有可能受他人或外在環境的影響(例如:業主、基地條件、金融因素...等)。當建築師進行規劃設計時，規劃偏好扮演一個極為重要的角色。通常某些建築物規劃目標或設計參數數值大小的決定，常常必須視建築師對這些目標或參數之使用欲望而定(Kristin & Erik, 1989)。本研究為解決上述規劃偏好問題，以無異曲線定義了耐震性偏好權重 α 以及經濟性偏好權重 β ，如 3.2 節之式 3 所示。為了方便評估建築物之各項效率，本研究以圖 6 之校舍 G 為例，定義考量耐震性及經濟性下之耐震效率(Seismic Efficiency; SE)、經濟效率(Economic Efficiency; EE)以及規劃效率(Planning Efficiency; PE)，如式 8 至式 10 所示。

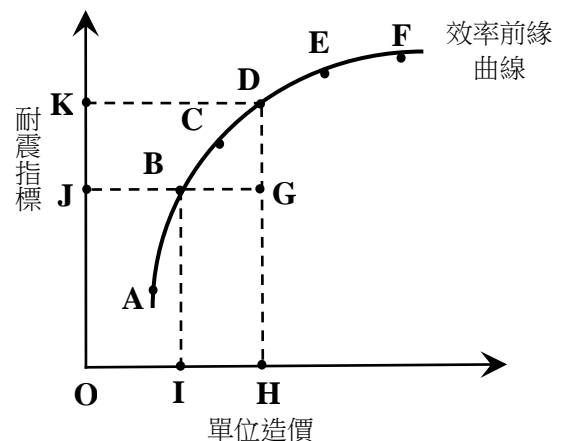


圖 6 校舍規劃效率評估

$$\text{耐震效率 } SE = \frac{\overline{OJ}}{\overline{OK}} \quad (8)$$

$$\text{經濟效率 } EE = \frac{\overline{OI}}{\overline{OH}} \quad (9)$$

$$\text{規劃效率 } PE = \alpha \times SE + \beta \times EE \quad (10)$$

非位於效率前緣曲線上的其他校舍，可引用式 8 求出校舍之耐震效率；透過式 9 計算校舍之經濟效率；或利用式 10 評估同時考量耐震性及經濟性之規劃效率。式 8 及式 9 乃客觀評估建築物耐震效率及經濟效率之方法，式 10 則為融合主觀及客觀因素的規劃效



率評估方法，如此即可呼應建築物規劃設計具有主客觀因素的本質，並可改善目前效率評估方法僅客觀反應建築物單項效率，未能融入規劃設計者主觀因素之缺點。

式 10 中，規劃效率 PE 之計算僅考慮兩個規劃目標(耐震性及經濟性)，事實上，亦可將此觀念擴充為當考慮三個以上的規劃目標時，如何決定其規劃效率 PE 。本研究將其擴展為如式 11 及式 12 所示。

$$PE = \sum \omega_j \times y_j; j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (11)$$

$$\sum \omega_j = 1; j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (12)$$

式中

ω_j : 第 j 個規劃目標的偏好權重

y_j : 考慮第 j 個規劃目標時的效率

四、實證研究-以臺中市市中心區典型中小學校舍為例

一般而言，建築物的規劃設計最重要的原則為滿足該建築物的耐震性及經濟性。規劃設計者應以最經濟的材料去規劃設計一結構物，而且能保證此結構物的安全(Zekeriya & Yusuf, 2010)。學者亦曾述及：「任何土木工程結構系統的耐震設計，必須滿足兩項衝突的目標，亦即此結構系統的耐震性及經濟性(Liu, 2003)。」中小學校舍的規劃亦然。為闡釋所發展之方法論，本研究於考量耐震性及經濟性兩項規劃目標且融合建築師規劃偏好之前提下，以臺中市市中心區 326 棟典型中小學校舍做為實證研究案例，此 326 棟典型校舍均已興建完成，符合法規各項規定，並滿足實務上之需求。且其耐震指標及單位造價之計算均已包含極多的因素，例如：校舍幾何尺寸、柱梁版牆數目、柱梁版牆斷面尺寸、樓層數、建材...等，本研究探討的是規劃目標問題，而重要之規劃因素大部份已被含括在規劃目標中，故本研究僅以大範圍的耐震目標(耐震指標)及經濟目標(單位造價)做說明，如下所述。

4.1 以無異曲線定義規劃偏好及權重

如圖 7 所示，圖 7 中之兩個座標值 $L(120,60)$ (單位造價為 120(hundred NTD/m²)，耐震指標 I_s 則為 60) 以及 $G(140,80)$ 乃代表建築師權衡耐震性及經濟性兩種規劃目標下，兩棟不同的校舍規劃。若建築師對此兩棟校舍規劃的滿足程度一樣，則 $L(120,60)$ 和 $G(140,80)$ 即為此建築師無異曲線上的兩個點，此兩點經由幾何數學方法可求出其無異曲線方程式為 $y=x-60$ 。由於此無異曲線之斜率 m 為 1 (與水平方向之夾角為 45°)，從表 1 各種建築師規劃偏好類型之定義中可知，此建築師之規劃偏好類型為「偏好相同」，並根據式 3 可以求出此建築師之耐震性偏好權重 α 以及經濟性偏好權重 β ，計算式如式 13 所示。

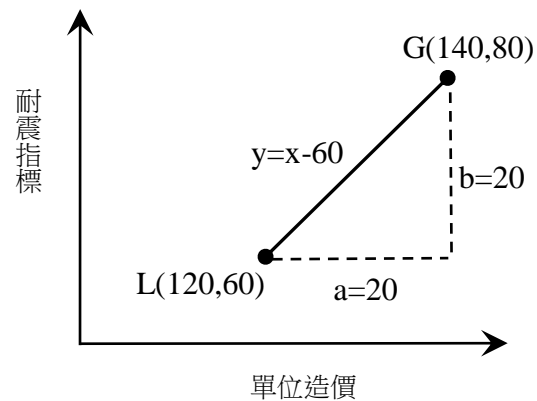
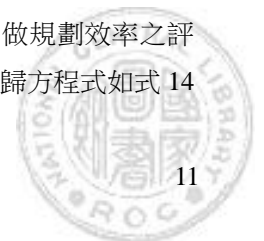


圖 7 無異曲線方程式之計算

$$\begin{cases} \alpha = \frac{a}{a+b} = \frac{20}{20+20} = 0.5 \\ \beta = \frac{b}{a+b} = \frac{20}{20+20} = 0.5 \end{cases} \quad (13)$$

4.2 以資料包絡分析法計算校舍效率前緣曲線

本研究以 3.4 節資料包絡分析法所述原理，計算臺中市中小學校舍耐震指標及單位造價之效率前緣曲線，此曲線上的每一點均代表臺中市中小學校舍之樣本空間中，相對有效率的校舍規劃，非位於效率前緣曲線上的其它校舍，可藉此曲線做規劃效率之評估。經計算後，此效率前緣曲線之迴歸方程式如式 14



所示，其形狀如圖 8 之 y_E 曲線，判定係數則為 $R^2 = 0.992$ ，由於判定係數數值極大，表示自變數 x 與此迴歸方程式之應變數 y_E 具高度相關。

$$y_E = -0.000000790x^4 + 0.000454x^3 - 0.0998x^2 + 9.99x - 258 \quad (14)$$

4.3 校舍規劃效率評估

由於校舍效率前緣曲線上的各點代表樣本空間中較有效率的校舍規劃，其輸入及輸出效率值均為 1，故為校舍規劃設計時可以學習的對象，非位於此曲線上的其他校舍，亦可以藉此曲線做規劃效率之評估。為便於比較分析，本研究將評估時分為兩種情況：

- (1) 相同校舍不同規劃偏好之規劃效率評估以及
- (2) 不同校舍相同規劃偏好之規劃效率評估。

(1) 相同校舍不同規劃偏好之規劃效率評估

如圖 8 所示， y_E 曲線即為臺中市中小學校舍效率前緣曲線。本研究取臺中市一棟非位於效率前緣曲線上的校舍 G(140,80)，先以偏好類型為「偏好相同」為例，說明其計算過程。由於偏好相同，故其耐震性偏好權重 $\alpha=0.5$ ，經濟性偏好權重 $\beta=0.5$ 。經由計算，可以得知若單位造價為 140 時，D 點及 H 點座標分別為 D(140,127) 以及 H(140,0)；若耐震指標 $I_s=80$ 時，J 點及 B 點座標分別為 J(0,80) 以及 B(65,80)；亦可以由圖中得知 I 點之座標為 I(65,0)，K 點之座標為 K(0,127)。此棟校舍之耐震效率 SE、經濟效率 EE 以及規劃效率 PE 之計算，則分別如式 15 至式 17 所示。

$$\text{耐震效率 } SE = \frac{\overline{OJ}}{\overline{OK}} = \frac{80}{127} = 0.630 \quad (15)$$

$$\text{經濟效率 } EE = \frac{\overline{OI}}{\overline{OH}} = \frac{65}{140} = 0.464 \quad (16)$$

規劃效率

$$PE = \alpha \times SE + \beta \times EE = 0.5 \times 0.630 + 0.5 \times 0.464 = 0.547 \quad (17)$$

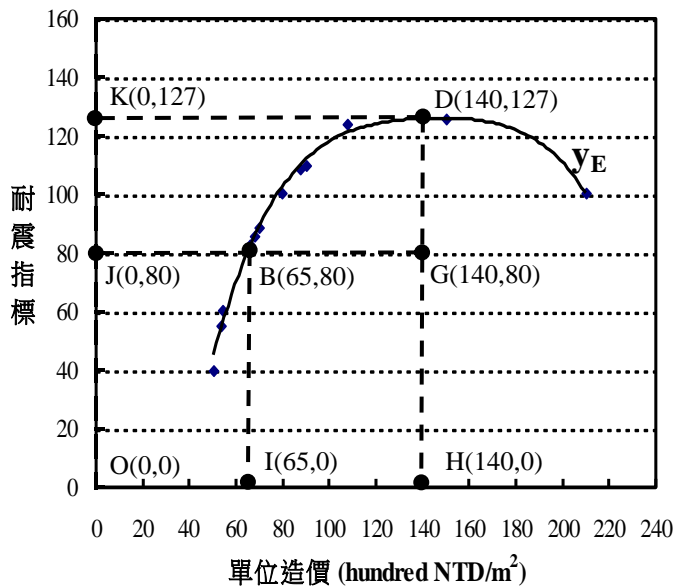


圖 8 校舍耐震效率、經濟效率及規劃效率之計算

上述僅說明了規劃偏好相同(無異曲線與水平方向夾角為 45°)之校舍規劃效率計算，本研究為比較表 1 八種規劃偏好類型之差異，另取無異曲線與水平方向夾角為 0° (極端偏好耐震性)、 15° (非常偏好耐震性)、 30° (較偏好耐震性)、 50° (偏好相近)、 60° (較偏好經濟性)、 75° (非常偏好經濟性)以及 90° (極端偏好經濟性)分別計算其規劃效率，並將上述共八種偏好類型之耐震效率 SE、經濟效率 EE 以及規劃效率 PE 計算過程，整理如表 2 所示。

由表 2 結果可以得知，此棟校舍 G 在不同偏好類型下之耐震效率 SE 均為 0.630，經濟效率 EE 則均為 0.464，並不受規劃偏好之影響，可客觀反應建築物各項效率；但若將規劃偏好這項主觀因素納入，可發現其規劃效率 PE 有明顯的不同，從最大之 0.630 至最小之 0.464，呈現約 26.3% $((0.630-0.464)/0.630=0.263)$ 之差距。故可得知，規劃偏好會影響規劃效率評估。

(2) 不同校舍相同規劃偏好之規劃效率評估

為了比較不同校舍相同規劃偏好之規劃效率，本研究仍以規劃偏好相同(無異曲線斜率 $m=1$)，並以位於此無異曲線上的三棟校舍 L(120,60)、G(140,80) 以及 M(160,100) 為例做說明，三棟校舍之無異曲線 y 與效率前緣曲線 y_E 之關係，如圖 9 所示。本研究分別

表 2 相同校舍不同規劃偏好之規劃效率計算表

偏好類型	無異曲線與水平方向夾角	耐震性偏好 權重 α	經濟性偏好 權重 β	耐震效率 SE	經濟效率 EE	規劃效率 PE
極端偏好耐震性	0°	1	0	0.630	0.464	0.630
非常偏好耐震性	15°	0.789	0.211	0.630	0.464	0.595
較偏好耐震性	30°	0.634	0.366	0.630	0.464	0.569
偏好相同	45°	0.5	0.5	0.630	0.464	0.547
偏好相近	50°	0.456	0.544	0.630	0.464	0.540
較偏好經濟性	60°	0.366	0.634	0.630	0.464	0.525
非常偏好經濟性	75°	0.211	0.789	0.630	0.464	0.499
極端偏好經濟性	90°	0	1	0.630	0.464	0.464

計算此三棟校舍之 \overline{OJ} 、 \overline{OK} 、 \overline{OI} 、 \overline{OH} (配合圖 6 之說明)，以及其耐震效率 SE、經濟效率 EE 和規劃效率 PE，並將計算過程整理如表 3。

從表 3 結果可以獲知，雖然此三棟校舍均位於同一條無異曲線 $y=x-60$ 上，但三棟校舍之耐震效率 SE、經濟效率 EE 以及規劃效率 PE，其值之大小均不同。一般而言，同一條無異曲線上的校舍，對於建築師而言，由於滿足程度一樣，故其規劃效率 PE 於主觀上之認定應該相同才合理，但本研究經客觀的計算分析之後，發現其值之大小不同，呈現約 25.4% $((0.637-0.475)/0.637=0.254)$ 之差距。

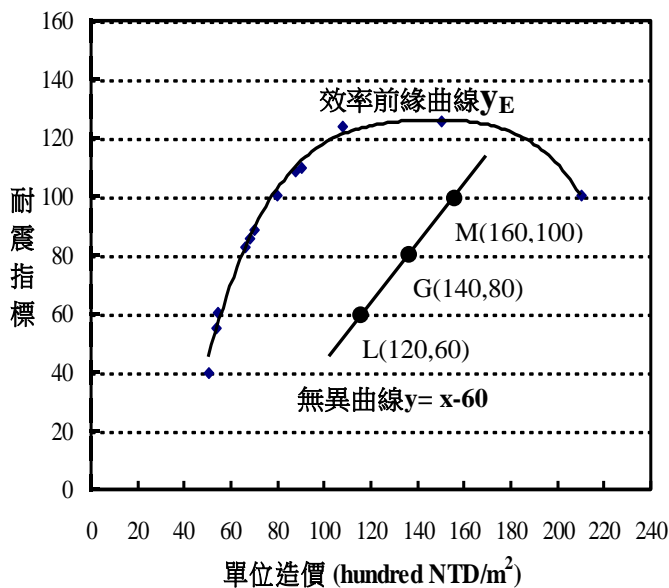


圖 9 不同校舍相同規劃偏好之規劃效率計算圖

表 3 不同校舍相同規劃偏好之規劃效率計算表

校舍	座標	\overline{OJ}	\overline{OK}	\overline{OI}	\overline{OH}	SE	EE	PE
L	(120,60)	60	124	56	120	0.484	0.467	0.475
G	(140,80)	80	127	65	140	0.630	0.464	0.547
M	(160,100)	100	127	78	160	0.787	0.488	0.637

五、結論與建議

5.1 結論

建築物之耐震性及經濟性經常於規劃設計階段被列為兩項重要規劃目標。但此兩項目標常常是互相衝突的，故常造成建築師規劃設計建築物時極大的困擾，此為多目標最佳化問題。除此之外，建築物之規劃設計常常蘊含某些主觀及客觀因素，目前的效率評估方法大部份都能客觀地評估出建築物的某項效率，但對於多目標最佳化及主觀因素則較少著墨，無法反應建築師的主觀規劃偏好。為解決上述問題，本研究發展一融合多目標及規劃偏好之規劃效率評估方法。此方法論所引用的原理，包括模糊理論、無異曲線、效率前緣以及資料包絡分析法。利用模糊理論中之模糊數可具體詮釋建築師對某項規劃目標的偏好程度；透過無異曲線可定義建築師同時考量耐震性及經濟性時之規劃偏好，此規劃偏好可適切地反應規劃設計者的主觀因素；資料包絡分析法則可計算出校



舍之效率前緣曲線，除可做為建築師規劃設計校舍時的依據外，並可客觀評估校舍的各項效率。此外，本研究並且定義了校舍的耐震效率 SE 、經濟效率 EE 以及規劃效率 PE 。

本研究以臺中市市中心區 326 棟校舍為樣本，此 326 棟校舍均已興建完成，符合法規各項基本要求，並滿足實務上之需求。本研究先計算此 326 棟校舍的效率前緣曲線，其方程式為 $y_E = -0.000000790x^4 + 0.000454x^3 - 0.0998x^2 + 9.99x - 258$ ，由於此曲線為此樣本空間中相對有效率的曲線，其他非位於效率前緣曲線上之各校舍，可藉此曲線做規劃效率評估。評估時分為兩種情況：(1)相同校舍不同規劃偏好之規劃效率評估以及 (2)不同校舍相同規劃偏好之規劃效率評估。在相同校舍不同規劃偏好之規劃效率評估方面，本研究以八種規劃偏好分析比較同一棟校舍之規劃效率，從最大之 0.630 至最小之 0.464，呈現約 26.3% 之差距，從結果中可以得知，不同的規劃偏好其規劃效率評估結果亦不相同；在不同校舍相同規劃偏好之規劃效率評估方面，本研究以位於同一條無異曲線上的三棟校舍做比較分析，經客觀的計算之後，發現規劃效率值之大小亦不相同，呈現約 25.4% 之差距，由於此三棟校舍均位於同一條無異曲線上，對於建築師而言，因其滿足程度一樣，規劃效率於主觀上之認知應會相同才合理，但本研究經客觀分析之後，三棟校舍之耐震效率、經濟效率以及規劃效率，其值之大小均不同。從以上之探討可知，建築師於規劃設計階段規劃或設計建築物時，若僅用客觀的分析方法或僅於主觀上做認定，均不足於詮釋建築物規劃設計的意涵，而應兩者兼容並蓄。除了客觀地分析建築物的各項效率外，亦應兼顧建築師的主觀規劃偏好，如此才能符合建築物規劃設計真正的本質，達到一個考量各種規劃目標下的建築物最佳規劃。

5.2 建議

本研究建議後續可行的研究方向如下：

- (1) 規劃目標方面：建築物於規劃設計階段時，安全性與經濟性是兩個比較重要的規劃目標，本研究

因受限於時間及校舍資料取得不易，且為清楚詮釋本研究發展的方法論，僅以中小學校舍之耐震性及經濟性為例做說明，並未涉及到其他規劃目標(例如：機能、美觀、...等)。建議後續研究者可以應用本研究發展的方法論，朝三個以上規劃目標的方向繼續研究。

- (2) 方法論方面：本研究僅融合人工智慧領域裡的模糊理論於方法論中，後續研究者可更進一步結合本研究方法論及其他人工智慧方法(如：基因演算法、類神經網路、支持向量機...等)，發展一考量多目標最佳化及規劃偏好之建築物規劃效率評估方法。
- (3) 建築類型方面：本研究之研究範圍限定為典型中小學校舍之規劃效率評估，後續研究者亦可將此方法論應用於其它種類的建築物，建立各類型建築物之規劃效率評估模式，例如：街屋、公寓大廈、辦公大樓以及警察消防機關.....等建築物，這也是後續研究可以進行的方向。

誌謝

本研究能夠順利完成，承蒙行政院科技部之經費支持(NSC 101-2221-E-324-045)，以及國家地震工程研究中心黃世建教授、鍾立來教授、邱聰智先生提供中小學校舍耐震資料，臺中市教育處及中小學相關人員提供校舍經費資料，謹此致謝。

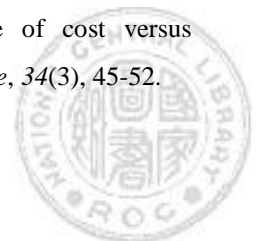
參考文獻

- 黃世建，鍾立來，簡文郁，葉勇凱，王翊光，余建維，張撼軍，陳永蒼，周德光，許丁友，邱建國，邱聰智 (2005)。全國中小學校耐震評估與補強施行計畫。國家地震工程研究中心研究報告 (編號：NCREE-05-008)。台北市：國家地震工程研究中心。
- 陳清山 (2011)。考量多目標及規劃偏好之中小學校舍最適規劃模式。未出版之博士論文。國立臺灣科技大學營建工程系，台北市。
- 陳博亮，周劍虹，鄭一俊，林志蒼，戴玉珍 (2010)。臺灣地區上市上櫃營建公司經營效率分析。建築學



- 報, (73), 25-50。
- 歐聖榮, 柯嘉鈞, 許哲瑜 (2012)。景觀設計中眺望藏匿理論模式之應用。 *建築學報*, (80), 111-129。
- Biener, C., & Eling, M. (2012). Organization and efficiency in the international insurance industry: A cross-frontier analysis. *European Journal of Operational Research*, 221(2), 454-468.
- Bodie, Z., Kane, A., & Marcus, A. J. (2009). *Essentials of Investments*. MA, USA: McGraw-Hill.
- Boyer, L. L., & Song, K. D. (1994). Daylighting prediction and sunlight strategies for atrium design in hot climates. *ASHRAE Transactions: Symposia*, 100(2), 676-681.
- Buhl, T., Jensen, V. F., & Pellegrino, S. (2004). Shape optimization of cover plates for retractable roof structures. *Computers and Structures*, 82, 1227-1236.
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 12(6), 429-444.
- Chen, J. K., & Chen, I. S. (2011). Inno-Qual efficiency of higher education: Empirical testing using data envelopment analysis. *Expert Systems with Applications*, 38, 1823-1834.
- Cheng, M. Y., & Chen, C. S. (2011). Optimal planning model for school buildings considering the tradeoff of seismic resistance and cost effectiveness: A Taiwan case study. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 43(6), 863-879.
- Cheng, E. W. L., & Li, H. (2004). Exploring quantitative methods for project location selection. *Building and Environment*, 39, 1467-1476.
- Coello, C. A. C. (1996). *An Empirical Study of Evolutionary Techniques for Multi-Objective Optimization in Engineering Design*. Unpublished doctoral dissertation. Department of Computer Science, Tulane University, LA, USA.
- Csaszar, F. A. (2013). An efficient frontier in organization design: Organizational structure as a determinant of exploration and exploitation. *Organization Science*, 24(4), 1083-1101.
- Da Graça, V. A. C., Kowaltowski, D., & Petreche, J. R. D. (2007). An evaluation method for school building design at the preliminary phase with optimization of aspects of environmental comfort for the school system of the State São Paulo in Brazil. *Building and Environment*, 42(2), 984-999.
- Daniel, T. D., & Moncef, K. (2010). Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Building and Environment*, 45(7), 1574-1581.
- Dubois, D., & Prade, H. (1978). The mean value of a fuzzy number. *Fuzzy Sets and Systems*, 24, 279-300.
- Evans, G. W. (1984). An overview of techniques for solving mathematical programs. *Management Science*, 30(11), 1268-1282.
- Georgy, M. E., Chang, L. M., & Zhang, L. (2005). Utility-function model for engineering performance assessment. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(5), 558-568.
- Gong, Y. B. (2012). Methods for triangular fuzzy number multi-attribute decision making with given preference information on alternative. *Control and Decision*, 27(2), 281-285.
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Berlin, DE: Springer-Verlag.
- Izuma, K., & Adolphs, R. (2013). Social manipulation of preference in the human brain. *Neuron*, 78(3), 563-573.
- Jiang, A., Issa, R. R. A., & Malek, M. (2011). Construction project cash flow planning using the pareto optimality efficiency network model. *Journal of Civil Engineering and Management*, 17(4),

- 510-519.
- Johan, A. (2000). *A Survey of Multi-objective Optimization in Engineering Design*. Technical Report of Department of Mechanical Engineering, Linköping University (Rep. No. LiTH-IKP-R-1097). Linköping, Sweden: Linköping University.
- Kavousian, A., & Rajagopal, R. (2014). Data-driven benchmarking of building energy efficiency utilizing statistical frontier models. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 28(1), 79-88.
- Kristin, L. W., & Erik, K. A. (1989). Computations with imprecise parameters in engineering designs: Background and theory. *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in design*, 111, 616-625.
- Lee, W. S., & Lee, K. P. (2009). Benchmarking the performance of building energy management using data envelopment analysis. *Applied Thermal Engineering*, 29, 3269-3273.
- Liu, M. (2003). *Development of Multiobjective Optimization Procedures for Seismic Design of Steel Moment Frame Structures*. Unpublished doctoral dissertation. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL, USA.
- Mankiw, N. G. (2011). *Principles of Economics*. OH, USA: South-Western College Pub.
- Mansoor, H. A. (2007). Utility efficient frontier: An application in the oil and gas industry. *Natural Resources Research*, 16(4), 305-312.
- Markowitz, H. M. (1952). Portfolio selection. *The Journal of Finance*, 7(1), 77-91.
- Marsault, X. (2013). A multiobjective and interactive genetic algorithm to optimize the building form at an early design stages. *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association* (pp.809-816). Chambéry, France: INES (CEA, university of Savoie, CNRS and CSTB) and INSA Lyon.
- McGeorge, J. F. (1988). Design productivity: A quality problem. *Journal of Management in Engineering*, 4(4), 350-362.
- Pandey, V., & Mourelatos, Z. P. (2014). Rules for trajectory updating in decision based design. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 49(1), 49-57.
- Park, M., Ha, S., Lee, H. S., Choi, Y. K., Kim, H., & Han, S. (2013). Lifting demand-based zoning for minimizing worker vertical transportation time in high-rise building construction. *Automation in Construction*, 32, 88-95.
- Ramli, A., Akasah, Z. A., & Masirin, M. I. M. (2013). Factors contributing building safety and health performance of low cost housing in Malaysia. *Journal of Safety Engineering*, 2(1), 1-9.
- Samuelson, P. A. (1938). A note on the pure theory of consumer's behaviour. *Economica*, 5, 61-71.
- Serag, A., Ono, S., & Nakayama, S. (2008). Using interactive evolutionary computation to generate creative building designs. *Artificial life and Robotics*, 13(1), 246-250.
- Serban, F., Stefanescu, V., & Ferrara, M. (2011). Portfolio optimization and building its efficient frontier. *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, 45, 125-136.
- Suga, K., Kato, S., & Hiyama, K. (2010). Structural analysis of Pareto-optimal solution sets for multi-objective optimization: An application to outer window design problems using multiple objective genetic algorithms. *Building and Environment*, 45(5), 1144-1152.
- Sumrall, W., & Mott, M. (2010). Building models to better understand the importance of cost versus safety in engineering. *Science Scope*, 34(3), 45-52.



Tang, S. L., Lee, H. K., & Wong, K. (1997). Safety cost optimization of building projects in Hong Kong. *Construction Management and Economics*, 15(2), 177-186.

Tavana, M., Abtahi, A. R., & Khalili-Damghani, K. (2014). A new multi-objective multi-mode model for solving preemptive time–cost–quality trade-off project scheduling problems. *Expert Systems with Applications*, 41(4), 1830-1846.

Wang, W. K. (2005). A knowledge-based decision support system for measuring the performance of government real estate investment. *Expert Systems with Applications*, 29, 901-912.

Wei, G. W., & Wang, X. R. (2008). Grey relational analysis method for triangular fuzzy number-based multiple attribute decision making with preference information on alternatives. *Systems Engineering and Electronics*, 30(8), 1489-1492.

Wu, D., Yang, Z., & Liang, L. (2006). Using DEA-neural network approach to evaluate branch efficiency of a large Canadian bank. *Expert Systems with Applications*, 31, 108-115.

Yu, F. W., & Chan, K. T. (2013). Improved energy management of chiller systems with data envelopment analysis. *Applied Thermal Engineering*, 50, 309-317.

Zekeriya, A., & Yusuf, A. (2010). Optimum topology and shape design of pre-stressed concrete bridge girders using a genetic algorithm. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41, 151-162.

Zeng, R., Wang, X., Di, H., Jiang, F., & Zhang, Y. (2011). New concepts and approach for developing energy efficient buildings: Ideal specific heat for building internal thermal mass. *Energy and Buildings*, 43, 1081-1090.

Zou, X. K., Chan, C. M., Li, G., & Wang, Q. (2007). Multiobjective optimization for performance-based design of reinforced concrete frames. *Journal of*

Structural Engineering, 133(10), 1462-1474.

REFERENCES in English

Biener, C., & Eling, M. (2012). Organization and efficiency in the international insurance industry: A cross-frontier analysis. *European Journal of Operational Research*, 221(2), 454-468.

Bodie, Z., Kane, A., & Marcus, A. J. (2009). *Essentials of Investments*. MA, USA: McGraw-Hill.

Boyer, L. L., & Song, K. D. (1994). Daylighting prediction and sunlight strategies for atrium design in hot climates. *ASHRAE Transactions: Symposia*, 100(2), 676-681.

Buhl, T., Jensen, V. F., & Pellegrino, S. (2004). Shape optimization of cover plates for retractable roof structures. *Computers and Structures*, 82, 1227-1236.

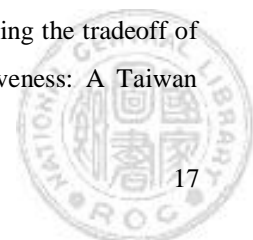
Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 12(6), 429-444.

Chen, B. L., Chow, C. H., Cheng, I. C., Lin, C. C., & Di, Y. C. (2010). The efficiency analysis of construction industry at Taiwan. *Journal of Architecture*, (73), 25-50.

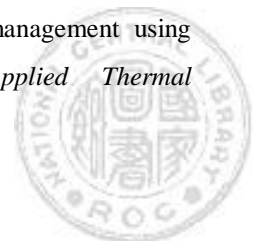
Chen, C. S. (2011). *Optimal Planning Model for School Buildings Considering the Trade-off of MOOP and Planning Preference*. Unpublished doctoral dissertation. Department of Civil and Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, Taipei.

Chen, J. K., & Chen, I. S. (2011). Inno-Qual efficiency of higher education: Empirical testing using data envelopment analysis. *Expert Systems with Applications*, 38, 1823-1834.

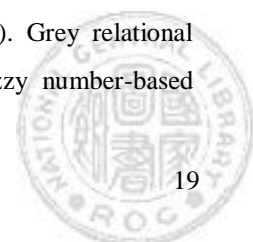
Cheng, M. Y., & Chen, C. S. (2011). Optimal planning model for school buildings considering the tradeoff of seismic resistance and cost effectiveness: A Taiwan



- case study. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 43(6), 863-879.
- Cheng, E. W. L., & Li, H. (2004). Exploring quantitative methods for project location selection. *Building and Environment*, 39, 1467-1476.
- Coello, C. A. C. (1996). *An Empirical Study of Evolutionary Techniques for Multi-Objective Optimization in Engineering Design*. Unpublished doctoral dissertation. Department of Computer Science, Tulane University, LA, USA.
- Csaszar, F. A. (2013). An efficient frontier in organization design: Organizational structure as a determinant of exploration and exploitation. *Organization Science*, 24(4), 1083-1101.
- Da Graça, V. A. C., Kowaltowski, D., & Petreche, J. R. D. (2007). An evaluation method for school building design at the preliminary phase with optimization of aspects of environmental comfort for the school system of the State São Paulo in Brazil. *Building and Environment*, 42(2), 984-999.
- Daniel, T. D., & Moncef, K. (2010). Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Building and Environment*, 45(7), 1574-1581.
- Dubois, D., & Prade, H. (1978). The mean value of a fuzzy number. *Fuzzy Sets and Systems*, 24, 279-300.
- Evans, G. W. (1984). An overview of techniques for solving mathematical programs. *Management Science*, 30(11), 1268-1282.
- Georgy, M. E., Chang, L. M., & Zhang, L. (2005). Utility-function model for engineering performance assessment. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(5), 558-568.
- Gong, Y. B. (2012). Methods for triangular fuzzy number multi-attribute decision making with given preference information on alternative. *Control and Decision*, 27(2), 281-285.
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Berlin, DE: Springer-Verlag.
- Hwang, S. J., Chung, L. L., Chien, W. Y., Yeh, Y. K., Wang, Y. K., Sher, C. W., Chang, H. C., Chen, Y. C., Chow, T. K., Hsu, T. Y., Chiou, C. K., & Chiou, T. C. (2005). *Implementation Planning for Seismic Evaluation and Retrofit of Elementary School Buildings*. Report of National Center for Research on Earthquake Engineering (Rep. No. NCREE-05-008). Taipei: National Center for Research on Earthquake Engineering.
- Izuma, K., & Adolphs, R. (2013). Social manipulation of preference in the human brain. *Neuron*, 78(3), 563-573.
- Jiang, A., Issa, R. R. A., & Malek, M. (2011). Construction project cash flow planning using the pareto optimality efficiency network model. *Journal of Civil Engineering and Management*, 17(4), 510-519.
- Johan, A. (2000). *A Survey of Multi-objective Optimization in Engineering Design*. Technical Report of Department of Mechanical Engineering, Linköping University (Rep. No. LiTH-IKP-R-1097). Linköping, Sweden: Linköping University.
- Kavousian, A., & Rajagopal, R. (2014). Data-driven benchmarking of building energy efficiency utilizing statistical frontier models. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 28(1), 79-88.
- Kristin, L. W., & Erik, K. A. (1989). Computations with imprecise parameters in engineering designs: Background and theory. *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, 111, 616-625.
- Lee, W. S., & Lee, K. P. (2009). Benchmarking the performance of building energy management using data envelopment analysis. *Applied Thermal*



- Engineering*, 29, 3269-3273.
- Liu, M. (2003). *Development of Multiobjective Optimization Procedures for Seismic Design of Steel Moment Frame Structures*. Unpublished doctoral dissertation. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL, USA.
- Mankiw, N. G. (2011). *Principles of Economics*. OH, USA: South-Western College Pub.
- Mansoor, H. A. (2007). Utility efficient frontier: An application in the oil and gas industry. *Natural Resources Research*, 16(4), 305-312.
- Markowitz, H. M. (1952). Portfolio selection. *The Journal of Finance*, 7(1), 77-91.
- Marsault, X. (2013). A multiobjective and interactive genetic algorithm to optimize the building form at an early design stages. *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association* (pp.809-816). Chambéry, France: INES (CEA, university of Savoie, CNRS and CSTB) and INSA Lyon.
- McGeorge, J. F. (1988). Design productivity: A quality problem. *Journal of Management in Engineering*, 4(4), 350-362.
- Ou, S. J., Ko, C. C., & Hsu, C. Y. (2012). The application of prospect-refuge theory in landscape design. *Journal of Architecture*, (80), 111-129.
- Pandey, V., & Mourelatos, Z. P. (2014). Rules for trajectory updating in decision based design. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 49(1), 49-57.
- Park, M., Ha, S., Lee, H. S., Choi, Y. K., Kim, H., & Han, S. (2013). Lifting demand-based zoning for minimizing worker vertical transportation time in high-rise building construction. *Automation in Construction*, 32, 88-95.
- Ramli, A., Akasah, Z. A., & Masirin, M. I. M. (2013). Factors contributing building safety and health performance of low cost housing in Malaysia. *Journal of Safety Engineering*, 2(1), 1-9.
- Samuelson, P. A. (1938). A note on the pure theory of consumer's behaviour. *Economica*, 5, 61-71.
- Serag, A., Ono, S., & Nakayama, S. (2008). Using interactive evolutionary computation to generate creative building designs. *Artificial life and Robotics*, 13(1), 246-250.
- Serban, F., Stefanescu, V., & Ferrara, M. (2011). Portfolio optimization and building its efficient frontier. *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, 45, 125-136.
- Suga, K., Kato, S., & Hiyama, K. (2010). Structural analysis of Pareto-optimal solution sets for multi-objective optimization: An application to outer window design problems using multiple objective genetic algorithms. *Building and Environment*, 45(5), 1144-1152.
- Sumrall, W., & Mott, M. (2010). Building models to better understand the importance of cost versus safety in engineering. *Science Scope*, 34(3), 45-52.
- Tang, S. L., Lee, H. K., & Wong, K. (1997). Safety cost optimization of building projects in Hong Kong. *Construction Management and Economics*, 15(2), 177-186.
- Tavana, M., Abtahi, A. R., & Khalili-Damghani, K. (2014). A new multi-objective multi-mode model for solving preemptive time–cost–quality trade-off project scheduling problems. *Expert Systems with Applications*, 41(4), 1830-1846.
- Wang, W. K. (2005). A knowledge-based decision support system for measuring the performance of government real estate investment. *Expert Systems with Applications*, 29, 901-912.
- Wei, G. W., & Wang, X. R. (2008). Grey relational analysis method for triangular fuzzy number-based



- multiple attribute decision making with preference information on alternatives. *Systems Engineering and Electronics*, 30(8), 1489-1492.
- Wu, D., Yang, Z., & Liang, L. (2006). Using DEA-neural network approach to evaluate branch efficiency of a large Canadian bank. *Expert Systems with Applications*, 31, 108-115.
- Yu, F. W., & Chan, K. T. (2013). Improved energy management of chiller systems with data envelopment analysis. *Applied Thermal Engineering*, 50, 309-317.
- Zekeriya, A., & Yusuf, A. (2010). Optimum topology and shape design of pre-stressed concrete bridge girders using a genetic algorithm. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41, 151-162.
- Zeng, R., Wang, X., Di, H., Jiang, F., & Zhang, Y. (2011). New concepts and approach for developing energy efficient buildings: Ideal specific heat for building internal thermal mass. *Energy and Buildings*, 43, 1081-1090.
- Zou, X. K., Chan, C. M., Li, G., & Wang, Q. (2007). Multiobjective optimization for performance-based design of reinforced concrete frames. *Journal of Structural Engineering*, 133(10), 1462-1474.

