

**HOJJAT ADELI**  
The Ohio State University

**MACHINE LEARNING**  
A Key Technology in the 21<sup>st</sup> Century

REGGIO CALABRIA - 11 GIUGNO 2019  
AULA MAGNA "ITALO FALCOMATÀ" - AREA INGEGNERIA



## Summary

Machine learning (ML) is a key and increasingly pervasive technology in the 21st century. The author will present the view that it is going to impact the way people live and work in a significant way. This lecture starts with an overview of the key ML concepts and different types of ML algorithms. In general, machine learning algorithms simulate the way brain learns and solves an estimation/recognition problem. They usually require a learning phase to discover the patterns among the available data, similar to humans. An expanded definition of ML is advanced as algorithms that can learn from examples and data and solve seemingly intractable learning and unteachable problems, referred to as ingenious artificial intelligence (AI). Next, recent and innovative applications of ML in various fields and projects currently being pursued by leading high-tech companies such as Google, IBM, Uber, Baidu, Facebook, Pinterest, and Tesla are reviewed. Then, machine learning algorithms developed by the author and his associates are briefly described with applications for health monitoring of structures. Finally, ideas are presented for improving ML algorithms and some future directions are delineated.

## Research ideology

My approach for solution of any new research problem is multidisciplinary and multi-paradigm, take a fresh look, start from scratch, and break the boundaries. I have been an advocate of transdisciplinary research for the past three decades. The departmental boundaries (Civil Engineering, Mechanical Engineering, Electrical Engineering, Computer Science, etc.) needed to be broken and silo mentality overcome. In 1993, I founded the international journal **Integrated Computer-Aided Engineering** *“based on the premise that interdisciplinary thinking and synergistic collaboration of disciplines can solve complex problems, open new frontiers, and lead to true innovations and breakthroughs. The focus of ICAE is the integration of leading edge and emerging computer technologies for innovative solution of engineering problems”*, as noted in my Editorial to the inaugural issue of the journal. My research has been highly multidisciplinary, crossing computer science, multiple engineering fields, math, and medicine.

In 1986, I founded the international journal **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering** to advance the application of artificial intelligence (AI) and other emerging computing technologies in civil engineering, the oldest engineering field. In the following sections, some key contributions by the author and his associates in the past four decades are mentioned chronologically.

## **Artificial Intelligence and Other Computing and Information Technologies (1980s)**

In early 1980s, the author introduced AI and Expert System technology into civil engineering [1-3] as well as other emerging computing techniques and paradigms such as interactive computer-aided design and engineering (CAD/CAE) [4-6], computer animation [7], object-oriented technology [8], database management [9], solid modelling [10], parallel processing and supercomputing [11-13] (The author published the first book on Parallel Processing in Structural Engineering in 1993), distributed computing on a cluster of workstations [14-15], neural networks [16-18] (the author wrote the first journal article on civil engineering applications of neural networks in 1989), evolutionary computing and genetic algorithms [19-21], case-based reasoning [22], machine learning (ML) [23], fractality and chaos theory [24], wavelet transform [25-26], and web-based computing [27]. A review of neural networks in civil engineering up to 2000 is presented in [28] and from 2001 to 2016 is presented in [29].

## **Computational Intelligence (1990s)**

The three primary fields of computational intelligence (CI) are neural networks (NN), fuzzy logic (FL), and genetic algorithm (GA). The author has been advocating a multi-paradigm approach for solution of complicated pattern recognition problems through adroit integration of NN, FL, and GA. For example, in early 1990's Adeli and associates developed hybrid machine learning algorithms for face recognition and engineering design problems. The book *Machine Learning - Neural Networks, Genetic Algorithms, and Fuzzy Systems* (Wiley1995) was the first authored book to present the three main areas of CI in a single volume and demonstrate their integration was a more effective way of solving complicated pattern recognition problem than each one individually [30].

## **Large Scale Optimization (1980s & 1990s)**

In 1998, together with his former Ph.D. student, H.S. Park (currently Professor at Yonsei University, Korea), the author was awarded a rare U.S. patent (number 5,815,394) for an algorithm particularly suitable for large-scale optimization, known as Neural Dynamics Model of Adeli and Park (NDAP) [31-32]. It was used for fully automated optimum design of a 144-story superhighrise building structure with over 20,000 members subjected to the constraints of the American Institute for Steel Construction (AISC), the tallest structure ever optimized at the time [33]. Use of a mathematical optimization algorithm for

design of such a large structure was unprecedented then but has been gaining tractions among designers of highrise building structures in recent years [34].

### **Construction Engineering and Management (1990s)**

Employing neurocomputing and object technologies, Adeli and Karim developed a new formulation and an object-oriented information model for construction scheduling, cost optimization, and change order management and implemented it into a software system called CONSCOM (CONstruction, Scheduling, Cost Optimization, and Change Order Management) [35-37]. Adeli and Wu developed a regularization neural network for construction cost estimation [38]. Senouci and Adeli developed a resource scheduling using NDAP mentioned earlier [39].

### **Intelligent Transportation Systems (1990s)**

In 1990s, Adeli and associates developed novel multiparadigm algorithms for automated freeway incident detection [25, 40-41], workzone traffic management [42], and workzone capacity estimation [43] for an Intelligent Transportation System (ITS). These algorithms are now being implemented to create intelligent freeways.

### **Smart Structure Technology (1990-present)**

In the past thirty years, Adeli and associates have developed a number of algorithms for active, semi-active, and vibration control [44-48] as well as health monitoring of large structures such as bridge and highrise building structures [49-51]. Earlier work on vibration control was published in the book *Control, Optimization, and Smart Structures - High-Performance Bridges and Buildings of the Future* in 1999 [52]. Subsequent research was published in two more recent books *Intelligent Infrastructure – Neural Networks, Wavelets, and Chaos Theory for Intelligent Transportation Systems and Smart Structures* [53] and *Wavelet-Based Vibration Control of Smart Buildings and Bridges* in 2009 [54].

### **Fundamental Machine Learning Research**

The author and his associates had been doing research on machine learning since mid-1980s [16-18, 23, 30]. Adeli and Hung developed an adaptive conjugate gradient learning algorithm for effective training of multilayer neural networks [55]. In 2010, Ahmadlou and Adeli presented the enhanced probabilistic neural networks (EPNN) as a new classification algorithm employing

the concept of *local decision circles* to overcome the shortcomings of the original probabilistic neural network (PNN) and improve its robustness to noise in the data [56]. Local decision circles enable EPNN to incorporate local information and non-homogeneity in the training data thus resulting in a more accurate algorithm. EPNN has been applied to a number of different classification problems such as diagnosis of the Parkinson's disease [57] and shown it is more accurate than other popular classification algorithms such as the PNN, support vector machine, k-nearest neighbors algorithm, and classification tree.

The secrets for creation of a powerful classification algorithm are a) discovering feature spaces with large margins between clusters and close proximity of the classmates and b) discovering the smallest number of the features that can yield accurate classification. Recently, Rafiei and Adeli developed a new classification algorithm dubbed Neural Dynamic Classification (NDC) using the patented neural dynamic optimization model of Adeli and park to find the optimum number of features needed for accurate classification [58]. A beauty of the new algorithm is the smoothness of convergence curves, an outstanding characteristic inherited from the NDAP, a measure of numerical robustness and high performance of the new algorithm.

### **Innovative Applications of Machine Learning in Structural Health Monitoring and Other Areas of Civil Engineering**

Amezquita-Sanchez and Adeli presented a synchrosqueezed wavelet transform(SWT)-fractality model for locating, detecting, and quantifying damage in smart highrise building structures [59], the ultimate objective in health monitoring of structures. SWT is employed for accurate noise removal. Fractality dimension, a nonlinear dynamics measure based on the chaos theory is used to extract discriminating features for the final damage detection phase. The effectiveness of the multi-paradigm methodology is evaluated using the experimental shaking table data obtained for 1:20 scaled model of a 38-storey concrete building structure in Hong Kong. Rafiei and Adeli presented a novel algorithm for global and local health monitoring and damage detection in large structures such as highrise building structures through integration of two signal processing techniques, SWT and fast Fourier transform, an unsupervised machine learning technique, the Restricted Boltzmann Machine, and NDC algorithm described earlier [60].

Rafiei and Adeli presented NEEWS, a novel earthquake early warning system based on seismicity indicators and NDC intended to forecast major earthquakes within a time frame of weeks [61]. Reliable prediction of the price of housing

in any region is of great significance for near-term economic forecasting of that region. Rafiei and Adeli present a methodology for estimating the price of new housing in any given city at the design phase or beginning of the construction through adroit integration of a deep belief restricted Boltzmann machine and a unique non-mating genetic algorithm [62]. Construction firms can utilize the model to measure the sale market before they start a new construction project and decide whether to build or not to build.

### **Conclusion and Perspective**

It is argued that the introduction of novel computing ideas into the oldest engineering field has made the field more exciting. It has helped create new technologies such as semi-active vibration control and automated health monitoring of structures and intelligent freeways, and automate processes that were unthinkable otherwise. As an example, to solve the concrete mix design problem, engineers traditionally employ the guidelines of the American Concrete Institute (ACI), and a costly labor intensive and time-consuming trial-and-error approach. Recently, Rafiei et al. [63], presented a novel approach for concrete mix design through the integration of the neural dynamics optimization model of Adeli and Park [31-32] and the enhanced probabilistic neural network classification model of Ahmadlou and Adeli [56] used as a virtual lab. The authors note *“The outcome of this research is an entirely new paradigm and methodology for concrete mixed design for the 21st century”* and *“The cost savings for large-scale concrete projects can be in the millions of dollars.”*

# MACHINE LEARNING

## *Una tecnologia chiave nel 21 ° secolo*

### Sommario

L'apprendimento automatico (noto come *Machine Learning ML*) è una tecnologia chiave sempre più diffusa nel 21° secolo. L'autore presenterà tale tecnologia che avrà un impatto significativo sul modo in cui le persone vivono e lavorano. Questa *lectio* inizia con una panoramica sui concetti chiave e sui diversi tipi di algoritmi del ML. In generale, gli algoritmi di apprendimento automatico simulano il modo in cui il cervello apprende e risolve un problema di stima o riconoscimento. Tipicamente richiedono una fase di apprendimento per scoprire la relazione tra i dati disponibili, in modo analogo agli umani. In una definizione più ampia, il ML rientra tra le tecniche dell'intelligenza artificiale (*artificial intelligence, AI*), ovvero tecniche di apprendimento avanzato in grado di imparare dagli esempi e dai dati a disposizione per risolvere problemi non controllabili e apparentemente simili da gestire. Successivamente, verranno esaminati applicazioni recenti e innovative del ML in vari ambiti e progetti in cui sono coinvolti aziende high-tech come Google, IBM, Uber, Baidu, Facebook, Pinterest e Tesla. In seguito, algoritmi di apprendimento automatico sviluppati dall'autore e dai suoi collaboratori verranno descritti brevemente attraverso applicazioni per il monitoraggio delle strutture. Infine, verranno presentate alcune idee per migliorare gli algoritmi di ML e alcune direzioni future.

### Ideologia della Ricerca

Il mio approccio per la soluzione di qualsiasi nuovo problema di ricerca è multidisciplinare e multi-paradigma e consiste nel cercare di dare una nuova interpretazione, partire da zero e superare i limiti. Sono stato un sostenitore della ricerca multidisciplinare negli ultimi tre decenni. I confini dipartimentali (Ingegneria Civile, Ingegneria Meccanica, Ingegneria Elettrica, Informatica, ecc.) e il vecchio modo di pensare dovevano essere superati. Nel 1993, ho fondato la rivista internazionale **Integrated Computer-Aided Engineering** "*sulla base del presupposto che il pensiero interdisciplinare e la collaborazione sinergica delle discipline possono risolvere problemi complessi, aprire nuove frontiere e portare a vere innovazioni e sviluppi. Lo scopo principale di ICAE è l'integrazione di tecnologie informatiche emergenti per soluzioni innovative di problemi ingegneristici*", come indicato nel mio Editoriale del numero inaugurale della rivista.

La mia ricerca è stata altamente multidisciplinare, attraversando l'informatica, diversi campi ingegneristici, matematica e medicina. Nel 1986, ho fondato la ri-



vista internazionale **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering** in modo da far aumentare l'applicazione dell'intelligenza artificiale e di altre tecnologie informatiche emergenti nell'ingegneria civile, il più antico campo ingegneristico. Nelle sezioni seguenti vengono menzionati cronologicamente alcuni contributi chiave dell'autore e dei suoi collaboratori ottenuti negli ultimi quattro decenni.

### **Intelligenza Artificiale e altre Tecnologie Informatiche e dell'Informazione (anni '80)**

All'inizio degli anni '80, l'autore ha introdotto la tecnologia *AI and Expert System* nell'ingegneria civile [1-3] e altre tecniche e paradigmi di elaborazione emergenti come la progettazione e l'ingegneria interattiva assistita dal computer (Computer-Aided Design and Engineering, CAD / CAE) [4-6], l'animazione computerizzata [7], la tecnologia object-oriented [8], la gestione database [9], la modellazione solida [10], l'elaborazione parallela e supercalcolo [11-13] (L'autore ha pubblicato il primo libro sull'elaborazione parallela in ingegneria strutturale nel 1993), il calcolo distribuito su un cluster di workstation [14-15], reti neurali [16-18] (L'autore ha scritto il primo articolo di giornale sulle applicazioni di ingegneria civile delle reti neurali nel 1989), il calcolo evolutivo e algoritmi genetici [19-21], il ragionamento basato sui casi [22], il machine learning (ML) [23], la teoria del caos e della frattalità [24], la trasformata wavelet [25-26] e il calcolo basato sul web [27]. Una rassegna delle reti neurali in ingegneria civile fino al 2000 è presentata in [28] e dal 2001 al 2016 è presentata in [29].

### **L'Intelligenza Computazionale (anni '90)**

I tre campi principali dell'intelligenza computazionale (IC) sono le reti neurali (neural networks, NN), la logica fuzzy (LF) e l'algoritmo genetico (AG). L'autore ha sostenuto un approccio multi-paradigma per la soluzione di complicati problemi di riconoscimento di pattern attraverso l'integrazione avanzata di NN, LF e AG. Ad esempio, all'inizio del 1990 Adeli e i suoi collaboratori hanno sviluppato algoritmi ibridi di apprendimento automatico per il riconoscimento facciale e problemi di progettazione ingegneristica. Il libro *Machine Learning - Neural Networks, Genetic Algorithms e Fuzzy Systems* (Wiley1995) è stato il primo libro scritto a presentare le tre aree principali dell'intelligenza computazionale in un singolo volume e dimostrare che la loro integrazione era un modo più efficace di risolvere complicati problemi di riconoscimento rispetto ad un approccio individuale [30].

### **Ottimizzazione su larga scala (anni '80 e '90)**

Nel 1998, insieme al suo ex studente di dottorato, H.S. Park (attualmente professore alla Yonsei University, Corea), l'autore ha ottenuto un raro brevetto statunitense (numero 5,815,394) per un algoritmo particolarmente adatto per l'ottimizzazione su larga scala, noto come Modello di Dinamica Neurale di Adeli e Park (Neural Dynamics Model of Adeli and Park, NDAP) [31-32].

NDAP è stato utilizzato per la progettazione ottimizzata completamente automatizzata di una struttura di grattacieli di 144 piani con oltre 20.000 membri sottoposti ai vincoli dell'American Institute for Steel Construction (AISC), la struttura più alta mai ottimizzata in quel momento [33]. L'uso di un algoritmo di ottimizzazione matematica per la progettazione di una così grande struttura non aveva precedenti, ma negli ultimi anni ha guadagnato popolarità tra i progettisti di grattacieli [34].

### **Ingegneria e Gestione delle Costruzioni (anni '90)**

Attraverso l'utilizzo di tecnologia di *neurocomputing*, Adeli e Karim hanno sviluppato una nuova formulazione e un modello informativo orientato agli oggetti per la pianificazione della costruzione, l'ottimizzazione dei costi e la gestione degli ordini di modifica e l'hanno implementato in un sistema software denominato CONSCOM (CONstruction, Scheduling, Cost Optimization e Change Gestione degli ordini) [35-37]. Adeli e Wu hanno sviluppato una rete neurale di regolarizzazione per la stima dei costi di costruzione [38]. Senouci e Adeli hanno sviluppato una pianificazione delle risorse usando NDAP menzionato in precedenza [39].

### **Sistemi di Trasporto Intelligente (anni '90)**

Negli anni '90 Adeli e i suoi collaboratori hanno sviluppato nuovi algoritmi multi-paradigma per il rilevamento automatizzato di incidenti su autostrada [25, 40-41], per la gestione del traffico nella zona di lavoro [42] e per la stima della capacità della zona di lavoro [43] per un Sistema di Trasporto Intelligente (STI). Questi algoritmi vengono oggi implementati per creare autostrade intelligenti.

### **Tecnologia delle Strutture "Smart" (1990 ad oggi)**

Negli ultimi trenta anni, Adeli e i suoi collaboratori hanno sviluppato una serie di algoritmi per il controllo attivo, semi-attivo e delle vibrazioni [44-48] e il monitoraggio dello stato di strutture di grandi dimensioni come ponti e strutture per edifici a più piani [49-51]. Il lavoro precedente sul controllo delle vibrazioni è stato pubblicato nel libro *Control, Optimization, and Smart Structures - High-Per-*

*formance Bridges and Buildings of the Future* nel 1999 [52]. Successive ricerche sono state pubblicate in due libri più recenti *Intelligent Infrastructure - Neural Networks, Wavelets and Chaos Theory per Intelligent Transportation Systems e Smart Structures* [53] e *Wavelet-Based Vibration Control di Smart Buildings and Bridges* nel 2009 [54].

### **La Fondamentale Ricerca del Machine Learning**

L'autore e i suoi colleghi avevano fatto ricerche sull'apprendimento automatico dalla metà degli anni '80 [16-18, 23, 30]. Adeli e Hung hanno sviluppato un algoritmo adattivo per l'apprendimento del gradiente coniugato per l'addestramento efficace di reti neurali multistrato [55]. Nel 2010, Ahmadlou e Adeli hanno presentato le reti neurali probabilistiche potenziate (*enhanced probabilistic neural networks*, EPNN) come un nuovo algoritmo di classificazione che utilizza il concetto di *intorni decisionali locali* per superare le carenze della rete neurale probabilistica originale (PNN) e migliorare la sua robustezza al rumore nei dati [56]. Gli intorni decisionali locali consentono all'EPNN di incorporare informazioni locali e non omogeneità nei dati di addestramento, ottenendo in tal modo un algoritmo più accurato. L'EPNN è stato applicato a diversi problemi di classificazione come la diagnosi del morbo di Parkinson [57] e ha dimostrato che è più accurato di altri algoritmi di classificazione popolari come PNN, support vector machine, algoritmo k-nearest neighbours e gli alberi di decisione.

I segreti per la creazione di un potente algoritmo di classificazione sono: a) scoprire spazi di funzionalità con ampi margini tra i cluster e la stretta vicinanza dei campioni della classe e b) scoprire il più piccolo numero di funzioni che possono produrre una classificazione accurata. Recentemente, Rafiei e Adeli hanno sviluppato un nuovo algoritmo di classificazione denominato Neural Dynamic Classification (NDC) utilizzando il modello di ottimizzazione dinamica neurale brevettato di Adeli e Park per trovare il numero ottimale di funzionalità necessarie per una classificazione accurata [58]. Il vantaggio del nuovo algoritmo è la fluidità delle curve di convergenza, una caratteristica eccezionale ereditata dal NDAP, una misura della robustezza numerica e alte prestazioni del nuovo algoritmo.

### **Applicazioni Innovative del Machine Learning nel Monitoraggio delle Strutture e Altri Campi dell'Ingegneria Civile**

Amezquita-Sanchez e Adeli hanno presentato un modello basato sulla teoria dei frattali denominato *Wavelet Synchronously Squeezed Transform* (SWT) per localizzare, rilevare e quantificare il danno in strutture intelligenti [59], con l'obiettivo ultimo di monitorare la salute delle strutture. SWT è utilizzato per la rimozione accurata del rumore. La dimensione frattale, una misura dinamica non lineare basata sulla

teoria del caos viene utilizzata per estrarre caratteristiche discriminanti per la fase finale di rilevamento del danno. L'efficacia della metodologia multi-paradigma è valutata utilizzando i dati sperimentali della tabella di agitazione ottenuti per il modello in scala 1:20 di una struttura di cemento di 38 piani in Hong Kong. Rafiei e Adeli hanno presentato un nuovo algoritmo per il monitoraggio della salute globale e locale e il rilevamento dei danni in strutture di grandi dimensioni come i grattacieli grazie all'integrazione di due tecniche di elaborazione del segnale, SWT e la *Fast Fourier Transform*, una tecnica di apprendimento automatico non supervisionato, la macchina di Boltzmann con restrizioni e l'algoritmo NDC descritti in precedenza [60]. Rafiei e Adeli hanno presentato NEEWS, un nuovo sistema di preallarme per terremoti basato su indicatori di sismicità e NDC inteso a prevedere grandi terremoti entro un lasso di tempo di settimane [61]. La previsione affidabile del prezzo degli alloggi in qualsiasi regione è di grande importanza per le previsioni economiche a breve termine di quella regione. Rafiei e Adeli hanno presentato una metodologia per stimare il prezzo di nuove abitazioni in una data città nella fase di progettazione o all'inizio della costruzione attraverso l'integrazione di una *deep belief restricted Boltzmann machine* e un algoritmo genetico unico non-accoppiato [62]. Le imprese di costruzione possono utilizzare il modello per misurare il mercato di vendita prima di iniziare un nuovo progetto di costruzione e decidere se conviene costruire.

## Conclusioni e Prospettive Future

Si sostiene che l'introduzione di nuove tecniche informatiche nell'ambito delle tecniche ingegneristiche standard lo abbia reso ancora più entusiasmante. Ha contribuito a creare nuove tecnologie come il controllo delle vibrazioni semi-attive e il monitoraggio automatico della salute delle strutture e delle autostrade intelligenti, automatizzando processi altrimenti impensabili. Ad esempio, per risolvere il problema della progettazione della miscela di calcestruzzo, gli ingegneri utilizzano tradizionalmente le linee guida dell'American Concrete Institute (ACI) e un costoso approccio di prova ed errori che richiede molto tempo e fatica. Recentemente, Rafiei et al. [63], hanno presentato un nuovo approccio per la progettazione della miscela di calcestruzzo attraverso l'integrazione del modello di ottimizzazione della dinamica neurale di Adeli e Park [31-32] e il modello di classificazione delle reti neurali probabilistiche migliorate di Ahmadlou e Adeli [56] utilizzato come laboratorio virtuale. In questi lavori, gli autori sottolineano che *“Il risultato di questa ricerca è un paradigma e una metodologia completamente nuova per una concreta progettazione multidisciplinare per il 21 ° secolo”* e *“Il risparmio sui costi per progetti concreti su larga scala può essere di milioni di dollari”*.

1. Adeli, H. and Alrijleh, M.M., "A Knowledge-Based Expert System for Design of Roof Trusses", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 2, No. 3, 1987, pp. 179-195.
2. Adeli, H. and Balasubramanyam, K.V., *Expert Systems for Structural Design - A New Generation*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
3. Adeli, H., Ed., *Expert Systems in Construction and Structural Engineering*, Chapman and Hall, New York, 1988
4. Adeli, H. and Fiedorek, J., "A MICROCAD System For Design of Steel Connections - Program Structure and Graphic Algorithms", *Computers and Structures*, Vol. 24, No. 2, 1986, pp. 281-294.
5. Adeli, H., *Interactive Microcomputer-Aided Structural Steel Design*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
6. Adeli, H. and Balasubramanyam, K.V., "A Synergic Man-Machine Approach to Shape Optimization of Structures", *Computers and Structures*, Vol. 30, No. 3, 1988, pp. 553-561.
7. Konicki, M.G. and H. Adeli, "A Three-Dimensional Animation System for Seismic Response of Multistory Structures", *International Journal of Imaging Systems and Technology*, Vol. 8, No. 3, 1997, pp. 313-321.
8. Yu, G. and Adeli, H., "Object-Oriented Finite Element Analysis Using EER Model", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 9, 1993, pp. 2763-2781.
9. Adeli, H. and Hung, S.L., "A Production System and Relational Database Model for Processing Knowledge of Earthquake-Resistant Design", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 3, No. 4, 1990, pp. 313-323.
10. Saleh, A. and Adeli, H., "Solid Modeling of Space Stations in a Concurrent Processing Environment", *International Journal of Imaging Systems and Technology*, Vol. 3, No. 1, 1991, pp. 58-63.
11. Adeli, H. and Kamal, O., "Parallel Structural Analysis Using Threads," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 4, No. 2, 1989, pp. 133-147.
12. Adeli, H. and Park, H.S., "Fully Automated Design of Superhighrise Building Structure by a Hybrid AI Model on a Massively Parallel Machine", *AI Magazine*, Vol. 17, No. 3, 1996, pp. 87-93.
13. Adeli, H. and Kamal, O., *Parallel Processing in Structural Engineering*, Elsevier Applied Science, London, 1993.
14. Adeli, H. and Kumar, S., "Distributed Finite Element Analysis on a Network of Workstations - Algorithms", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 10, 1995, pp. 1448-1455.
15. Adeli, H. and Kumar, S., *Distributed Computer-Aided Engineering for Analysis, Design, and Visualization*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1999.
16. Adeli, H. and Yeh, C., "Perceptron Learning in Engineering Design," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 4, No. 4, 1989, pp. 247-256.
17. Hung, S.L. and Adeli, H., "A Model of Perceptron Learning with a Hidden Layer for Engineering Design", *Neurocomputing*, Vol. 3, No. 1, 1991, pp. 3-14.
18. Adeli, H. and Zhang, J., "An Improved Perceptron Learning Algorithm", *Neural, Parallel, and Scientific Computations*, Vol. 1, No. 2, 1993, pp. 141-152.

19. Adeli, H. and Cheng, N.-T., "Integrated Genetic Algorithm for Optimization of Space Structures", *Journal of Aerospace Engineering*, ASCE, Vol. 6, No. 4, 1993, pp. 315-328.
20. Adeli, H. and Cheng, N.-T., "Augmented Lagrangian Genetic Algorithm for Structural Optimization", *Journal of Aerospace Engineering*, ASCE, Vol. 7, No. 1, 1994, pp. 104-118.
21. Kociecki, M. and Adeli, H., "Shape Optimization of Free-Form Steel Space-Frame Roof Structures with Complex Geometries Using Evolutionary Computing," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 38, 2015, pp. 168-182.
22. Sirca, G.F., Jr. and Adeli, H., "Case-Based Reasoning for Converting Working Stress Design-Based Bridge Ratings to Load Factor Design-Based Ratings", *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 10, No. 4, 2005, pp. 450-459.
23. Adeli, H. and Yeh, C., "Explanation-Based Machine Learning in Engineering Design", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 3, No. 2, 1990, pp. 127-137.
24. Jiang, X. and Adeli, H., "Fuzzy Clustering Approach for Accurate Embedding Dimension Identification in Chaotic Time Series", *Integrated Computer-Aided Engineering*, Vol. 10, No. 3, 2003, pp. 287-302.
25. Samant, A. and Adeli, H., "Feature Extraction for Traffic Incident Detection using Wavelet Transform and Linear Discriminant Analysis", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 15, No. 4, 2000, pp. 241-250.
26. Zhou, Z. and Adeli, H., "Time-Frequency Signal Analysis of Earthquake Records Using Mexican Hat Wavelets", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 18, No. 5, 2003, pp. 379-389.
27. Wang, N. and Adeli, H., "Web-based Tutor for Interactive Design of Single-Span and Continuous Steel Beams" *Computer Applications in Engineering Education*, 20:2, June 2012, pp. 383-389.
28. Adeli, H., "Neural Networks in Civil Engineering: 1989-2000", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 16, No. 2, 2001, pp. 126-142.
29. Amezquita-Sanchez, J.P., Valtierra-Rodriguez, M., Aldwaik, M., and Adeli, H., "Neurocomputing in Civil Infrastructure," *Scientia Iranica A*, 23:6, 2016, 2417-2428.
30. Adeli, H. and Hung, S.L., *Machine Learning - Neural Networks, Genetic Algorithms, and Fuzzy Systems*, John Wiley and Sons, New York, 1995.
31. Adeli, H. and Park, H.S., "A Neural Dynamics Model for Structural Optimization - Theory", *Computers and Structures*, Vol. 57, No. 3, 1995, pp. 383-390.
32. Park, H.S. and Adeli, H., "A Neural Dynamics Model for Structural Optimization - Application to Plastic Design of Structures", *Computers and Structures*, Vol. 57, No. 3, 1995, pp. 391-399.
33. Adeli, H. and Park, H.S., *Neurocomputing for Design Automation*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1998.
34. Aldwaik, M. and Adeli, H., "Advances in Optimization of Highrise Building structures," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 50:6, December 2014, 899-919.
35. Adeli, H. and Karim, A., "Scheduling/Cost Optimization and Neural Dynamics Model for Construction", *Journal of Construction Management and Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 4, 1997, pp. 450-458.

36. Karim, A. and Adeli, H., "CONSCOM: An OO Construction Scheduling and Change Management System", *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 125, No. 5, 1999, pp. 368-376.
37. Adeli, H. and Karim, A., *Construction Scheduling, Cost Optimization, and Management – A New Model Based on Neurocomputing and Object Technologies*, Spon Press, London, 2001.
38. Adeli, H. and Wu, M., "Regularization Neural Network for Construction Cost Estimation", *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 124, No. 1, 1998, pp. 18-24.
39. Senouci, A.B. and Adeli, H., "Resource Scheduling using Neural Dynamics Model of Adeli and Park", *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 127, No. 1, 2001, pp. 28-34.
40. Adeli, H. and Samant, A., "An Adaptive Conjugate Gradient Neural Network - Wavelet Model for Traffic Incident Detection", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 15, No. 4, 2000, pp. 251-260.
41. Adeli, H. and Karim, A., "Fuzzy-Wavelet RBFNN Model for Freeway Incident Detection", *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 126, No.6, 2000, pp. 464-471.
42. Jiang, X. and Adeli, H., "Freeway Work Zone Traffic Delay and Cost Optimization Model", *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 3, 2003, pp. 230-241.
43. Jiang, X. and Adeli, H., "Clustering-Neural Network Models for Freeway Work Zone Capacity Estimation", *International Journal of Neural Systems*, Vol. 14, No. 3, 2004, pp. 147-163.
44. Adeli, H. and Saleh, A., "Optimal Control of Adaptive/Smart Bridge Structures", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 2, 1997, pp. 218-226.
45. Adeli, H. and Kim, H., "Wavelet-Hybrid Feedback-Least Mean Square Algorithm for Robust Control of Structures", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 1, 2004, pp. 128-137.
46. Jiang, X. and Adeli, H., "Dynamic Fuzzy Wavelet Neuroemulator for Nonlinear Control of Irregular Highrise Building Structures", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 74, No. 7, 2008, pp. 1045-1066.
47. Wang, N. and Adeli, H., "Self-Constructing Wavelet Neural Network Algorithm for Nonlinear Control of Smart Structures," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 41, May 2015, 249-258.
48. Gutierrez Soto, M. and Adeli, H., "Many-Objective Control Optimization of Highrise Building Structures using Replicator Dynamics and Neural Dynamics Model," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 56:6, 2017, 1521-1537.
49. Park, H.S. Lee, H.M., Adeli, H. and Lee, I., "A New Approach for Health Monitoring of Structures: Terrestrial Laser Scanning," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 22, No. 1, 2007, pp. 19-30.
50. Jiang, X. and Adeli, H., "Pseudospectra, MUSIC, and Dynamic Wavelet Neural Network for Damage Detection of Highrise Buildings", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 71, No. 5, July 2007, 606-629.

51. Rafiei, M.H., and Adeli, H., "A Novel Unsupervised Deep Learning Model for Global and Local Health Condition Assessment of Structures," *Engineering Structures*, 156:1, February 2018, 598-607.
52. Adeli, H. and Saleh, A., *Control, Optimization, and Smart Structures - High-Performance Bridges and Buildings of the Future*, John Wiley and Sons, New York, 1999.
53. Adeli, H. and Jiang, X., *Intelligent Infrastructure – Neural Networks, Wavelets, and Chaos Theory for Intelligent Transportation Systems and Smart Structures*, CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, Florida, 2009.
54. Adeli, H. and Kim, H., *Wavelet-Based Vibration Control of Smart Buildings and Bridges*, CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, Florida, 2009.
55. Adeli, H. and Hung, S.L., "An Adaptive Conjugate Gradient Learning Algorithm for Effective Training of Multilayer Neural Networks", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 62, No. 1, 1994, pp. 81-102.
56. Ahmadlou, M. and Adeli, H., "Enhanced Probabilistic Neural Network with Local Decision Circles: A Robust Classifier," *Integrated Computer-Aided Engineering*, 17:3, 2010, pp. 197-210.
57. Hirschauer, T., Adeli, H., and Buford, T., "Computer-Aided Diagnosis of Parkinson's Disease using an Enhanced Probabilistic Neural Network," *Journal of Medical Systems*, 39:179, November 2015 (12 pages).
58. Rafiei, M.H. and Adeli, H. "A New Neural Dynamic Classification Algorithm," *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 28:12, 2017, 3074-3083 (10.1109/TNNLS.2017.2682102).
59. Amezcua-Sanchez, J.P. and H. Adeli, H., "Synchrosqueezed Wavelet Transform-Fractality Model for Locating, Detecting, and Quantifying Damage in Smart Highrise Building Structures," *Smart Materials and Structures*, 24, 2015, 065034 (14pp).
60. Rafiei, M.H. and Adeli, H., "NEEWS: A Novel Earthquake Early Warning System Using Neural Dynamic Classification and Neural Dynamic Optimization Model," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 100, 2017, pp. 417-427.
61. Rafiei, M.H. and Adeli, H., "NEEWS: A Novel Earthquake Early Warning System Using Neural Dynamic Classification and Neural Dynamic Optimization Model," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 100, 2017, pp. 417-427.
62. Rafiei, M.H. and Adeli, H., "A Novel Machine Learning Model for Estimation of Sale Prices of Real Estate Units," *Construction Engineering and Management*, 142:2, 2016, 04015066 (10 pages), DOI: 10.1061/(ASCE)Co.1943-7862.000104.
63. Rafiei, M.H., Khushefati, W.H., Demirboga, R., and Adeli, H., "Novel Approach for Concrete Mixture Design Using Neural Dynamics Model and the Virtual Lab Concept," *ACI Materials Journal*, 114:1, January-February 2017, 117-127 (MS No. M-2016-104.R1, doi: 10.14359/51689485).