

**MAKİNE ÖĞRENMESİNDE  
AÇIKLANABİLİRLİK KAVRAMI: DERİN  
PEKİŞTİRMELİ ÖĞRENME VE SEMBOLİK  
REGRESYON İLE HİBRİT YAKLAŞIM**

Volkan ETEMAN



© Copyright 2024

*Bu kitabın, basım, yayın ve satış hakları Akademisyen Kitabevi AŞ'ne aittir. Anılan kuruluşun izni alınmadan kitabın tümü ya da bölümleri mekanik, elektronik, fotokopi, manyetik kağıt ve/veya başka yöntemlerle çoğaltılamaz, basılamaz, dağıtılamaz. Tablo, şekil ve grafikler izin alınmadan, ticari amaçlı kullanılamaz. Bu kitap T.C. Kültür Bakanlığı bandrolü ile satılmaktadır.*

\*Bu Kitap, Prof. Dr. Erkan İŞİĞİÇOK'un danışmanlığında yürütülen Volkan ETEMAN'a ait "Makine Öğrenmesinde Açıklanabilirlik Kavramına Derin Pekıştirmeli Öğrenme Ve Sembolik Regresyon İle Hibrit Yaklaşım: Algoritmik Ticaret Örneği" adlı Doktora Tezinden üretilmiştir.

<b>ISBN</b> 978-625-375-140-1	<b>Yayın Koordinatörü</b> Yasin DİLMEN
<b>Kitap Adı</b> Makine Öğrenmesinde Açıklanabilirlik Kavramı: Derin Pekıştirmeli Öğrenme ve Sembolik Regresyon ile Hibrit Yaklaşım	<b>Sayfa ve Kapak Tasarımı</b> Akademisyen Dizgi Ünitesi
<b>Editör</b> Erkan İŞİĞİÇOK ORCID iD: 0000-0003-4037-0869	<b>Yayıncı Sertifika No</b> 47518
<b>Yazar</b> Volkan ETEMAN ORCID iD: 0000-0002-3430-7073	<b>Baskı ve Cilt</b> Vadi Matbaacılık
	<b>Bisac Code</b> BUS000000
	<b>DOI</b> 10.37609/akya.3349

#### Kütüphane Kimlik Kartı

Makine Öğrenmesinde Açıklanabilirlik Kavramı: Derin Pekıştirmeli Öğrenme ve Sembolik Regresyon ile Hibrit Yaklaşım / Volkan Eteman, ed. Erkan İşığışok  
Ankara : Akademisyen Yayınevi Kitabevi, 2024.  
194 s. : tablo, şekil ; 160x235 mm.  
Kaynakça ve Ekler var.  
ISBN 9786253751401

#### GENEL DAĞITIM

#### Akademisyen Kitabevi AŞ

Halk Sokak 5 / A  
Yenişehir / Ankara  
Tel: 0312 431 16 33  
siparis@akademisyen.com

[www.akademisyen.com](http://www.akademisyen.com)

## ÖN SÖZ

Verinin enformasyona enformasyonun bilgiye bilginin ise bilgeliğe dönüştürülme süreci günümüzde üretilen veri miktarları göz önüne alındığında baş edilmesi güç bir sürece evrilmiştir. Yüksek boyutlu veri trafiği ile ve bu verilerin işlenerek karar vermede kullanılabilmesi amacıyla geliştirilen yüksek işlem gücüne sahip bilgisayarlar ve gelişen algoritmalar verinin artış hızına yetişmekte zorlanmakla birlikte daha genelleştirilebilir yaklaşımların ve algoritmaların elde edilmesine olan ihtiyacı gün yüzüne çıkarmıştır. Bu çalışmada genelleştirilebilir ve yorumlanabilir denklemlerin elde edilmesi amacıyla pekiştirmeli öğrenme, derin öğrenme ve sembolik regresyon bağlamında hibrit bir yaklaşım ve algoritma önerilmiştir. Algoritma, finansal alanda karar verme kavramı altında yer alan algoritmik ticaret bağlamında ve bitcoin özelinde incelenmiştir. Çalışma, yapay öğrenme ile eğitilen bir modelin genelleştirilebilir ve yorumlanabilir bir formunun elde edilip edilemeyeceği kavramı etrafındaki hipotez ve araştırma sorularını incelemektedir. Çalışmanın metodolojisinde kullanılan yöntemlerden pekiştirmeli öğrenme kapsamlı ve sistematik bir mantıksal süreç ile ele alınmış olup, pekiştirmeli öğrenmenin kronolojik gelişiminde ortaya çıkan yöntemlerin ve algoritmaların hangi eksikliği gidermek için ortaya çıktığı ve hangi soruya cevap verdiği başlıklar altında irdelenmiştir.

Algoritmik ticaretin amaç fonksiyonu, otomatikleştirilmiş alım satım işlemleri sonucu kâr elde edilmesi olsa da çalışmada amaçlanan, ortalama olarak zarar etmeyen bir sistemin finansal piyasa koşullarında aldığı kararların matematiksel fonksiyonun elde edilmesi ve bu fonksiyonun finansal yapıyı temsil kabiliyetinin incelenmesidir. Bu bağlamda elde edilecek iyi bir temsil kabiliyeti veya alanın teorilerine uygun fonksiyonel formların gözlemlenmesi sonucunda ele alınan yöntemin farklı alanlarda uygulanarak, uygulama alanında bilinen fonksiyonel yapıların gözlemlenmesinin yanı sıra bilinmeyen fonksiyonel yapıların keşfine de yol açabilir. Söz konusu bağlamın okuyuculara yapay zekâ ile bilimsel bilginin keşfine ilişkin yeni bakış açılarına yol açmasını temenni ederim.

Bu çalışma, Bursa Uludağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Ekonometri Anabilim Dalı İstatistik Bilim Dalı'nda 2024 yılında kabul edilen "Makine Öğrenmesinde Açıklanabilirlik Kavramına Derin Pekiştirmeli

Öğrenme ve Sembolik Regresyon ile Hibrit Yaklaşım: Algoritmik Ticaret Örneği” ismi ile savunulmuş doktora tezinin kitaplaştırılmış halidir. Kitabın içeriği, doktora tez savunmasında kabul edilen haliyle sunulmakta olup herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Yalnızca metinde geçen ve doktora tezini belirten “tez” ifadesi, “çalışma” ifadesi ile değiştirilmiştir.

Doktora tezimi hazırlarken sürecin her aşamasında bana rehberlik eden, bilgi ve deneyimleriyle karşılaştığım zorlukları aşmamı sağlayan değerli danışman hocam Prof. Dr. Erkan IŞIĞIÇOK’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin sabrı ve yol gösterici tavsiyeleri sayesinde süreci başarılı bir şekilde tamamlayabildim. Kazandırdığı bakış açıları ve sağladığı destek gelecekteki çalışmalarım da yol gösterici olacaktır.

## SİMGELER

$s_t$	: Durum
$s'$	: Sonraki Durum
$R_t$	: Ödül
$A_t$	: Eylem
$S$	: Durum Uzayı
$A$	: Eylem Uzayı
$G_t$	: Toplam Ödül
$\gamma$	: İndirgeme Faktörü
$\pi$	: Politika
$\pi^*$	: Optimal Politika
$\pi(a s)$	: Stokastik Politika
$P$	: Geçiş Olasılığı Fonksiyonu
$V_\pi$	: Durum Değer Fonksiyonu
$Q_\pi$	: Eylem Değer Fonksiyonu
$V^*(s)$	: Optimal Durum Değer Fonksiyonu
$Q^*(s, a)$	: Optimal Eylem Değer Fonksiyonu
$O(f(n))$	: Zaman Polinomu
$\alpha$	: Öğrenme Oranı
$\epsilon$	: Keşif Oranı
$w$	: Model Parametreleri
$x_i$	: Öznitelikler
$\sigma$	: Aktivasyon Fonksiyonu
$b$	: Bias
$J(\vec{w})$	: Türevlenebilir Parametre Vektörü
$\nabla$	: Gradyan
$\theta$	: Sinir Ağı Parametreleri
$L_i(\theta_i)$	: Kayıp Fonksiyonu

<b><math>f(x)</math></b>	: Hedef Fonksiyon
<b><math>g(x)</math></b>	: Amaç Fonksiyonu
<b><math>z(x)</math></b>	: Ceza Fonksiyonu
<b><math>\lambda</math></b>	: Ceza Ağırlığı

## KISALTMALAR

<b><i>A2C</i></b>	: Advantage Actor Critic
<b><i>A3C</i></b>	: Asynchronous Advantage Actor Critic
<b><i>ADX</i></b>	: Average Directional Index
<b><i>ATR</i></b>	: Average True Range
<b><i>CCI</i></b>	: Commodity Channel Index
<b><i>DDPG</i></b>	: Deep Deterministic Policy Gradient
<b><i>DQL</i></b>	: Deep Reinforcement Learning
<b><i>EMA</i></b>	: Exponential Moving Average
<b><i>KNN</i></b>	: K Nearest Neighbors
<b><i>LSTM</i></b>	: Long-Short Term Memory
<b><i>MDP</i></b>	: Markov Decision Process
<b><i>PPO</i></b>	: Proximal Policy Optimization
<b><i>RBF</i></b>	: Radial Basis Function
<b><i>RL</i></b>	: Reinforcement Learning
<b><i>RNN</i></b>	: Recurrent Neural Network
<b><i>RSI</i></b>	: Relative Strength Index
<b><i>SMA</i></b>	: Simple Moving Averages
<b><i>SR</i></b>	: Symbolic Regression
<b><i>SVM</i></b>	: Support Vector Machine
<b><i>TD</i></b>	: Temporal Difference
<b><i>XAI</i></b>	: Explainable Artificial Intelligence
<b><i>YSA</i></b>	: Yapay Sinir Ağları

# İÇİNDEKİLER

<b>GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
--------------------	----------

## **BÖLÜM 1**

### **ALGORİTMİK TİCARETİN TEORİK ÇERÇEVESİ**

1.1. Algoritmik Ticaretin Tanımı ve Gelişimi.....	7
1.2. Algoritmik Ticaret Aşamaları ve Sistem Bileşenleri.....	13
1.2.1. Ön Ticaret Analizi Aşaması .....	16
1.2.1.1. Alfa Modeli .....	17
1.2.1.2. Risk Modeli .....	17
1.2.1.3. İşlem Maliyetleri Modeli .....	17
1.2.2. Sinyal Üretme Aşaması.....	18
1.2.3. Uygulama Aşaması.....	18
1.2.4. Ticaret Sonrası Analiz Aşaması .....	19
1.3. Geleneksel Algoritma Türleri .....	19
1.4. Mikro Piyasa Yapısı .....	20
1.4.1. Piyasa Likiditesi.....	21
1.4.2. Emir Defteri .....	22
1.4.3. Piyasa Emri.....	23
1.4.4. Limit Fiyatlı Emirler .....	23
1.4.5. Stop Emirleri.....	23
1.4.6. Flash Crash .....	24
1.5. Teknolojik Altyapı Gereksinimleri ve Kavramları .....	24
1.5.1. Erişim Türleri.....	25
1.5.1.1. Doğrudan Erişim .....	25
1.5.1.2. Sponsorlu Erişim.....	25
1.5.1.3. FIX Protokolü .....	26
1.5.2. Piyasa Yönetim Sistemleri .....	26
1.5.3. Emir Girişi.....	27
1.5.4. Emir Yönlendirme .....	28
1.5.5. Akıllı Emir Yönlendirme .....	28



1.5.6. Hız ve Gecikme.....	30
1.5.7. Kolokasyon .....	31
1.6. Algoritmik Ticaret Alan Yazını.....	31

## **BÖLÜM 2**

### **PEKİŞTİRMELİ ÖĞRENME**

2.1. Pekıştirmeli Öğrenmeye Genel Bakış.....	33
2.2. Pekıştirmeli Öğrenmenin Temel Kavramları.....	38
2.2.1. Ajan.....	38
2.2.2. Çevre .....	39
2.2.3. Durum.....	40
2.2.4. Eylem .....	41
2.2.5. Ödül .....	41
2.2.5.1. Toplam Ödül .....	42
2.2.5.2. İndirgenmiş Ödül ve Fayda Fonksiyonu .....	43
2.2.6. Politika .....	44
2.2.7. Model .....	48
2.3. Pekıştirmeli Öğrenmede Markov Özelliđi ve Markov Karar Süreci.....	51
2.3.1. Markov Karar Süreci.....	52
2.3.2. Değer Fonksiyonu.....	55
2.3.2.1. Durum Değer Fonksiyonu.....	56
2.3.2.2. Eylem Değer Fonksiyonu .....	57
2.3.3. Yedekleme Diyagramları.....	57
2.3.4. Bellman Denklemleri .....	59
2.3.4.1. Bellman Denklemlerinin Türetilmesi .....	60
2.3.4.2. Optimallik.....	66
2.4. Pekıştirmeli Öğrenme Problemlerinin Çözümü.....	67
2.4.1. Ödül Atama Problemi.....	68
2.4.2. Dinamik Programlama .....	69
2.4.2.1. Politika Değerlendirmesi .....	73
2.4.2.2. Politika İyileřtirmesi.....	76
2.4.2.3. Politika İterasyonu.....	78
2.4.2.4. Değer İterasyonu .....	79
2.4.3. Monte Carlo Yöntemi .....	80

2.4.3.1. Monte Carlo Tahmin Algoritması .....	81
2.4.3.2. Monte Carlo Kontrol Algoritması .....	83
2.4.3.3. Artımlı Ortalama ve Öğrenme Oranı ile Monte Carlo Yaklaşımı .....	84
2.4.4. Zamansal Fark Öğrenmesi .....	85
2.4.4.1. Sarsa Algoritması .....	90
2.4.4.2. Q Öğrenme Algoritması .....	92
2.4.5. Fonksiyon Yaklaşıklaştırma Yöntemleri .....	96
2.4.6. Derin Q Öğrenme .....	106
2.5. Pekiştirmeli Öğrenme Alan Yazını .....	109

### **BÖLÜM 3**

#### **SEMBOLİK REGRESYON**

3.1. Meta-Sezgisel Algoritmalar .....	119
3.2. Genetik Algoritma ve Temel Kavramlar .....	120
3.2.1. Genetik Operatörler .....	122
3.2.2. Uygunluk Fonksiyonu ve Nesil Kavramı .....	124
3.3. Sembolik Regresyon .....	126

### **BÖLÜM 4**

#### **UYGULAMA: SEMBOLİK DERİN PEKİŞTİRMELİ HİBRİT YAKLAŞIM**

4.1. Kavramsal Şema .....	133
4.2. Kullanılan Programlar ve Kütüphaneler .....	134
4.3. Veri .....	137
4.4. Derin Q Öğrenme Uygulaması .....	140
4.4.1. Durum Tasarımı .....	140
4.4.2. Eylem ve Ödül Tasarımı .....	143
4.4.3. Çevre Tasarımı .....	144
4.4.4. Ajan Tasarımı .....	145
4.5. Çevre-Ajan iletişimi ve Algoritmanın Çalıştırılması .....	147
4.5.1. DQL Algoritma Sonuçları ve Performans Değerlendirmesi .....	148
4.6. Sembolik Regresyon Bütünleştirilmesi .....	151
<b>SONUÇ VE TARTIŞMA .....</b>	<b>159</b>
<b>KAYNAKÇA .....</b>	<b>165</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>173</b>

## KAYNAKÇA

- Agostinelli, F., Hocquet, G., Singh, S., & Baldi, P. (2018). *From Reinforcement Learning to Deep Reinforcement Learning: An Overview: International Conference Commemorating the 40th Anniversary of Emmanuil Braverman's Decease, Boston, MA, USA, April 28-30, 2017, Invited Talks* (ss. 298-328). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99492-5\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99492-5_13)
- Alagoz, O., Hsu, H., Schaefer, A. J., & Roberts, M. S. (2010). Markov Decision Processes: A Tool for Sequential Decision Making under Uncertainty. *Medical decision making : an international journal of the Society for Medical Decision Making*, 30(4), 474-483. <https://doi.org/10.1177/0272989X09353194>
- Aldeia, G. S. I., & de França, F. O. (2021). Measuring feature importance of symbolic regression models using partial effects. *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 750-758. <https://doi.org/10.1145/3449639.3459302>
- Austel, V., Dash, S., Gunluk, O., Horesh, L., Liberti, L., Nannicini, G., & Schieber, B. (2017). *Globally Optimal Symbolic Regression* (arXiv:1710.10720). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.10720>
- Aytaç, M. (2015). Markov Karar Analizi. İçinde *Karar Verme* (1. bs).
- Barfuss, W., & Meylahn, J. M. (2023). Intrinsic fluctuations of reinforcement learning promote cooperation. *Scientific Reports*, 13(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27672-7>
- Barron, A. B., Hebets, E. A., Cleland, T. A., Fitzpatrick, C. L., Hauber, M. E., & Stevens, J. R. (2015). Embracing multiple definitions of learning. *Trends in Neurosciences*, 38(7), 405-407. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2015.04.008>
- Barto, A. G., Sutton, R. S., & Anderson, C. W. (1983). Neuronlike adaptive elements that can solve difficult learning control problems. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 5, 834-846.
- Basheer, I. A., & Hajmeer, M. (2000). Artificial neural networks: Fundamentals, computing, design, and application. *Journal of Microbiological Methods*, 43(1), 3-31. [https://doi.org/10.1016/S0167-7012\(00\)00201-3](https://doi.org/10.1016/S0167-7012(00)00201-3)
- Bellman, R. (1952). On the Theory of Dynamic Programming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 38(8), 716-719. <https://doi.org/10.1073/pnas.38.8.716>
- Bellman, R. (1954). The theory of dynamic programming. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 60(6), 503-515. <https://doi.org/10.1090/S0002-9904-1954-09848-8>
- Bellman, R. (1957). *Dynamic Programming* (First Edition). Princeton University Press.
- Bellman, R. (1961). *Adaptive Control Processes: A Guided Tour*. Princeton University Press. <https://www.jstor.org/stable/j.ctt183ph6v>
- Bengio, Y. (2007). On the challenge of learning complex functions. İçinde P. Cisek, T. Drew, & J. F. Kalaska (Ed.), *Progress in Brain Research* (C. 165, ss. 521-534). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(06\)65033-4](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(06)65033-4)

- Bengio, Y. (2012). Practical recommendations for gradient-based training of deep architectures. *Arxiv*.
- Boguslavskiy, J. (2016). *Polynomial Approximation Technique Applied to Inverse Vector-Function* (ss. 45-70). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-04036-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04036-3_4)
- Borsa İstanbul A.Ş. (2014). <https://www.borsaistanbul.com/tr/duyuru/683/viop-ta-fix-protokolu-ile-emir-iletim-altyapisi-devreye-alindi>
- Brown, R. (2007). The Life And Work Of Donald Olding Hebb, Canada's Greatest Psychologist. *Proceedings of the Nova Scotian Institute of Science (NSIS)*, 44. <https://doi.org/10.15273/pnsis.v44i1.3880>
- Brownlees, C. T., Cipollini, F., & Gallo, G. M. (2010). *Intra-Daily Volume Modeling and Prediction for Algorithmic Trading* (SSRN Scholarly Paper 1393993). <https://doi.org/10.2139/ssrn.1393993>
- Brunton, S. L., & Kutz, J. N. (2019). *Data-Driven Science and Engineering: Machine Learning, Dynamical Systems, and Control* (1st edition). Cambridge University Press.
- Carabantes, M. (2020). Black-box artificial intelligence: An epistemological and critical analysis. *AI & SOCIETY*, 35(2), 309-317. <https://doi.org/10.1007/s00146-019-00888-w>
- Chaboud, A. P., Chiquoine, B., Hjalmarsson, E., & Vega, C. (2014). Rise of the Machines: Algorithmic Trading in the Foreign Exchange Market. *The Journal of Finance*, 69(5), 2045-2084. <https://doi.org/10.1111/jofi.12186>
- Clark, W. A., & Farley, B. G. (1955). Generalization of pattern recognition in a self-organizing system. *Proceedings of the March 1-3, 1955, western joint computer conference*, 86-91. <https://doi.org/10.1145/1455292.1455309>
- De Houwer, J., Barnes-Holmes, D., & Moors, A. (2013). What is learning? On the nature and merits of a functional definition of learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20(4), 631-642. <https://doi.org/10.3758/s13423-013-0386-3>
- Domowitz, I., & Yegerman, H. (2006). The Cost of Algorithmic Trading: A First Look at Comparative Performance. *The Journal of Trading*, 1, 33-42. <https://doi.org/10.3905/jot.2006.609174>
- Ende, B., Gomber, P., & Lutat, M. (2009). *Smart Order Routing Technology in the New European Equity Trading Landscape* (SSRN Scholarly Paper 1476272). <https://papers.ssrn.com/abstract=1476272>
- European Commission. (2010). *Review of the Markets in Financial Instruments Directive(MIFID)*.
- Goertzel, B. (2014). Artificial General Intelligence: Concept, State of the Art, and Future Prospects. *Journal of Artificial General Intelligence*, 5(1), 1-48. <https://doi.org/10.2478/jagi-2014-0001>
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning* (1st bs). Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- Gomber, P., Arndt, B., Lutat, M., & Uhle, T. (2011). *High-Frequency Trading* (SSRN Scholarly Paper 1858626). <https://doi.org/10.2139/ssrn.1858626>
- Gomber, P., & Gsell, M. (2006). Catching Up with Technology—The Impact of Regulatory Changes on ECNs/MTFs and the Trading Venue Landscape in Europe. *Competition and Regulation in Network Industries*, 7, 535-558. <https://doi.org/10.1177/178359170600100401>

- Gomber, P., & Zimmermann, K. (2018). Algorithmic trading in practice. İçinde *The Oxford Handbook of Computational Economics and Finance* (ss. 311-332). <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199844371.013.12>
- Groth, S. S. (2011). *Does Algorithmic Trading Increase Volatility? Empirical Evidence from the Fully-Electronic Trading Platform Xetra*. *Wirtschaftsinformatik*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Does-Algorithmic-Trading-Increase-Volatility-from-Groth/4991b9818bed702f65ca22352fd344d718a2f053>
- Grundner, A., Beucler, T., Gentine, P., & Eyring, V. (2023). *Data-Driven Equation Discovery of a Cloud Cover Parameterization* (arXiv:2304.08063). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.08063>
- Gsell, M. (2008). Assessing the impact of algorithmic trading on markets: A simulation approach. *16th European Conference on Information Systems, ECIS 2008*.
- Gsell, M., & Gomber, P. (2009). *Algorithmic Trading Engines Versus Human Traders – Do They Behave Different in Securities Markets?* (SSRN Scholarly Paper 1476271). <https://papers.ssrn.com/abstract=1476271>
- Gustafson, S., Burke, E. K., & Krasnogor, N. (2005). *On improving genetic programming for symbolic regression*. 1, 912-919 Vol.1. <https://doi.org/10.1109/CEC.2005.1554780>
- Harel, G., & Koichu, B. (2010). An operational definition of learning. *The Journal of Mathematical Behavior*, 29(3), 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.jmathb.2010.06.002>
- Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior; a neuropsychological theory* (ss. xix, 335). Wiley.
- Hendershott, T., Jones, C. M., & Menkveld, A. J. (2011). Does Algorithmic Trading Improve Liquidity? *The Journal of Finance*, 66(1), 1-33. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.2010.01624.x>
- Hendershott, T., & Riordan, R. (2012). *Algorithmic Trading and the Market for Liquidity* (SSRN Scholarly Paper 2001912). <https://doi.org/10.2139/ssrn.2001912>
- Ho, Y.-W., Rawat, T., Yang, Z.-K., Pratik, S., Lai, G.-W., Tu, Y.-L., & Lin, A. (2021). Neuroevolution-Based Efficient Field Effect Transistor Compact Device Models. *IEEE Access*, PP, 1-1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3130254>
- Holland, J. H. (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. The MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/1090.001.0001>
- Holt, S., Qian, Z., & van der Schaar, M. (2023). *Deep Generative Symbolic Regression* (arXiv:2401.00282). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.00282>
- Howard, R. A. (1960). *Dynamic programming and Markov processes* (ss. viii, 136). John Wiley.
- International Securities Commissions. (2011). *Regulatory Issues Raised by the Impact of Technological Changes on Market Integrity and Efficiency*.
- İşığçok, E. (2015). Karar Vermeye Giriş. İçinde *Karar Verme* (1. bs).
- Jelvis, A. R., Tikhon. (2022). *Foundations of Reinforcement Learning with Applications in Finance*. Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781003229193>
- Johnson, B. (2010). *Algorithmic trading & DMA: An introduction to direct access trading strategies*. 4Myeloma Press.

- Josiński, H., Kostrzewa, D., Michalczuk, A., & Świtoński, A. (2014). The Expanded Invasive Weed Optimization Metaheuristic for Solving Continuous and Discrete Optimization Problems. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2014/831691>
- Kaelbling, L. P., Littman, M. L., & Moore, A. W. (1996). *Reinforcement Learning: A Survey* (arXiv:cs/9605103). arXiv. <http://arxiv.org/abs/cs/9605103>
- Khamsi, M. A., & Kirk, W. A. (2001, Mart 6). *An Introduction to Metric Spaces and Fixed Point Theory*. <https://doi.org/10.1002/9781118033074>
- Kissell, R. (2013). *The Science of Algorithmic Trading and Portfolio Management: Applications Using Advanced Statistics, Optimization, and Machine Learning Techniques* (1st edition). Academic Press.
- Klopf, A. H. (1972). *Brain Function and Adaptive Systems: A Heterostatic Theory*. Air Force Cambridge Research Laboratories, Air Force Systems Command, United States Air Force.
- Koza, J. R. (1994). Genetic programming as a means for programming computers by natural selection. *Statistics and Computing*, 4(2), 87-112. <https://doi.org/10.1007/BF00175355>
- Kumar, A., Nadeem, M., & Banka, H. (2023). Nature inspired optimization algorithms: A comprehensive overview. *Evolving Systems*, 14(1), 141-156. <https://doi.org/10.1007/s12530-022-09432-6>
- Lachman, S. J. (1997). Learning is a Process: Toward an Improved Definition of Learning. *The Journal of Psychology*, 131(5), 477-480. <https://doi.org/10.1080/00223989709603535>
- Lanz, P. (2000). The Concept of Intelligence in Psychology and Philosophy. İçinde H. Cruse, J. Dean, & H. Ritter (Ed.), *Prerational Intelligence: Adaptive Behavior and Intelligent Systems Without Symbols and Logic, Volume 1, Volume 2 Prerational Intelligence: Interdisciplinary Perspectives on the Behavior of Natural and Artificial Systems, Volume 3* (ss. 19-30). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-010-0870-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0870-9_3)
- Li, C.-C., Liu, J.-C., Lin, C.-H., & Lo, W. (2015). On the Accelerated Convergence of Genetic Algorithm Using GPU Parallel Operations. *International Journal of Software Innovation*, 3, 1-17. <https://doi.org/10.4018/IJSI.2015100101>
- Lin, L.-J. (1992). Self-improving reactive agents based on reinforcement learning, planning and teaching. *Machine Learning*, 8(3), 293-321. <https://doi.org/10.1007/BF00992699>
- Matsubara, Y., Chiba, N., Igarashi, R., & Ushiku, Y. (2023). *Rethinking Symbolic Regression Datasets and Benchmarks for Scientific Discovery* (arXiv:2206.10540). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.10540>
- Méndez-Molina, A., F.Morales, E., & Sucar, L. E. (2022). Causal Discovery and Reinforcement Learning: A Synergistic Integration. *Proceedings of The 11th International Conference on Probabilistic Graphical Models*, 421-432. <https://proceedings.mlr.press/v186/mendez-molina22a.html>
- Minsky, M. (1954). *Theory of neural-analog reinforcement systems and its application to the brain-model problem*.
- Minsky, M. (1961). Steps toward Artificial Intelligence. *Proceedings of the IRE*, 49(1), 8-30. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1961.287775>



- Mitchell, M. (1998). *An Introduction to Genetic Algorithms*. MIT Press.
- Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Graves, A., Antonoglou, I., Wierstra, D., & Riedmiller, M. (2013). *Playing Atari with Deep Reinforcement Learning* (arXiv:1312.5602). arXiv. <http://arxiv.org/abs/1312.5602>
- Murphy, J. J. (1999). *Technical Analysis of the Financial Markets: A Comprehensive Guide to Trading Methods and Applications*. Penguin Publishing Group.
- Naeem, M., Rizvi, S. T. H., & Coronato, A. (2020). A Gentle Introduction to Reinforcement Learning and its Application in Different Fields. *IEEE Access*, 8, 209320-209344. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3038605>
- Nasar, A. A. (2016). The history of Algorithmic complexity. *The Mathematics Enthusiast*, 13(3), 217-242. <https://doi.org/10.54870/1551-3440.1375>
- Naser, M. Z. (2021). An engineer's guide to eXplainable Artificial Intelligence and Interpretable Machine Learning: Navigating causality, forced goodness, and the false perception of inference. *Automation in Construction*, 129, 103821. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103821>
- Nisbett, R. E., Aronson, J., Blair, C., Dickens, W., Flynn, J., Halpern, D. F., & Turkheimer, E. (2012). Intelligence: New findings and theoretical developments. *The American Psychologist*, 67(2), 130-159. <https://doi.org/10.1037/a0026699>
- Nuti, G., Mirghaemi, M., Treleaven, P., & Yingsaeree, C. (2011). Algorithmic Trading. *Computer*, 44, 61-69. <https://doi.org/10.1109/MC.2011.31>
- Petersen, B. K., Landajuela, M., Mundhenk, T. N., Santiago, C. P., Kim, S. K., & Kim, J. T. (2021). *Deep symbolic regression: Recovering mathematical expressions from data via risk-seeking policy gradients* (arXiv:1912.04871). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.04871>
- Peterson, J. K. (2016). Function Approximation. İçinde J. K. Peterson (Ed.), *Calculus for Cognitive Scientists: Derivatives, Integrals and Models* (ss. 279-299). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-287-874-8\\_14](https://doi.org/10.1007/978-981-287-874-8_14)
- Prix, J., Loistl, O., & Huetl, M. (2007). Algorithmic Trading Patterns in Xetra Orders. *European Journal of Finance*, 13, 717-739. <https://doi.org/10.1080/13518470701705538>
- Pujol, G., & Brueckner, A. (2009). Smart Order Routing and Best Execution. *AMCIS 2009 Proceedings*. <https://aisel.aisnet.org/amcis2009/155>
- Raheema, M., & Abdullah, A. (2017). *Function Approximation using Neural and Fuzzy Methods*.
- Raymer, M., Punch, W., Goodman, E., Kuhn, L., & Jain, A. (2000). Dimensionality Reduction Using Genetic Algorithms. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 4, 164-171. <https://doi.org/10.1109/4235.850656>
- Reiher, W. (1966). Hammersley, J. M., D. C. Handscomb: Monte Carlo Methods. Methuen & Co., London, and John Wiley & Sons, New York, 1964. VII + 178 S., Preis: 25 s. *Biometrische Zeitschrift*, 8(3), 209-209. <https://doi.org/10.1002/bimj.19660080314>
- Riordan, R. (2009). *The Economics of Algorithmic Trading* [PhD Thesis, Karlsruhe, Univ., Diss., 2009]. <https://scholar.archive.org/work/jczccv3hjnbdziadbfiiebktay/access/wayback/https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000014028/1080547>

- Rosen, K. (2011). *Discrete Mathematics and Its Applications Seventh Edition* (7th edition). McGraw Hill.
- Rosenblatt, F. (1957). *The Perceptron: A Perceiving and Recognizing Automaton* (85-460-1). <https://blogs.umass.edu/brain-wars/files/2016/03/rosenblatt-1957.pdf>
- Rudin, C., & Radin, J. (2019). Why Are We Using Black Box Models in AI When We Don't Need To? A Lesson From an Explainable AI Competition. *Harvard Data Science Review*, 1(2). <https://doi.org/10.1162/99608f92.5a8a3a3d>
- Russell, S., & Norvig, P. (2009). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (3rd edition). Pearson.
- Silver, D. (2015). *Lectures on Reinforcement Learning*. David Silver. <https://www.davidsilver.uk/teaching/>
- Sun, F., Liu, Y., Wang, J.-X., & Sun, H. (2022). *Symbolic Physics Learner: Discovering governing equations via Monte Carlo tree search* (arXiv:2205.13134; Versiyon 1). arXiv. <http://arxiv.org/abs/2205.13134>
- Sutton, R. (t.y.). *Learning theory support for a single channel theory of the brain*.
- Sutton, R. (1988). Learning to Predict by the Method of Temporal Differences. *Machine Learning*, 3, 9-44. <https://doi.org/10.1007/BF00115009>
- Sutton, R., & Barto, A. G. (1981). *An Adaptive Network That Constructs and Uses an Internal Model of its World*. 4(3), 217-246.
- Sutton, R. S., & Barto, A. G. (1981). Toward a modern theory of adaptive networks: Expectation and prediction. *Psychological Review*, 88(2), 135-170.
- Sutton, R. S., & Barto, A. G. (1987). A temporal-difference model of classical conditioning. *Proceedings of the ninth annual conference of the cognitive science society*, 355-378.
- Sutton, R. S., & Barto, A. G. (1998). *Reinforcement Learning: An Introduction*. MIT Press.
- Tenachi, W., Ibata, R., & Diakogiannis, F. I. (2023). Deep Symbolic Regression for Physics Guided by Units Constraints: Toward the Automated Discovery of Physical Laws. *The Astrophysical Journal*, 959(2), 99. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad014c>
- Tesauro, G. (1995). *Temporal Difference Learning and TD-Gammon*.
- Thrun, S., & Schwartz, A. (1999). *Issues in Using Function Approximation for Reinforcement Learning*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Issues-in-Using-Function-Approximation-for-Learning-Thrun-Schwartz/26b8747eb4d7fb-4d4fc45707606d5e969b9afb0c>
- Tiganj, Z., Gershman, S. J., Sederberg, P. B., & Howard, M. W. (2019). Estimating Scale-Invariant Future in Continuous Time. *Neural Computation*, 31(4), 681-709. [https://doi.org/10.1162/neco\\_a\\_01171](https://doi.org/10.1162/neco_a_01171)
- Treleaven, P., Galas, M., & Lalchand, V. (2013). Algorithmic Trading Review. *Communications of the ACM*, 56, 76-85. <https://doi.org/10.1145/2500117>
- Udrescu, S.-M., & Tegmark, M. (2021). Symbolic pregression: Discovering physical laws from distorted video. *Physical Review E*, 103(4), 043307. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.103.043307>
- US: Securities and Exchange Commission. (2010). Concept Release on Equity Market Structure. Part III: Proposed Rules. *Federal Register*. Vol. 75, No. 13, 3331-3614.



- Wang, Y., Wagner, N., & Rondinelli, J. M. (2019). Symbolic regression in materials science. *MRS Communications*, 9(3), 793-805. <https://doi.org/10.1557/mrc.2019.85>
- Watkins, C. (1989). *Learning From Delayed Rewards*.
- Watkins, C., & Dayan, P. (1992). Technical Note: Q-Learning. *Machine Learning*, 8, 279-292. <https://doi.org/10.1007/BF00992698>
- Whiteson, S. (2010). *Adaptive Representations for Reinforcement Learning* (C. 291). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-13932-1>
- Wiering, M. (1999). *Explorations in efficient reinforcement learning*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Explorations-in-efficient-reinforcement-learning-Wiering/d5a978148cb0ea702ec0671260786e6b03fd2a39>
- Wiering, M., & van Otterlo, M. (2014). *Reinforcement Learning: State-of-the-Art*. Springer Publishing Company, Incorporated.
- Wu, Y. M. (2012). The Comparison of Different Chromosome Coding Method Based on Genetic Algorithm. *Advanced Materials Research*, 546-547, 666-669. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.546-547.666>
- Zhang, M., Kim, S., Lu, P. Y., & Soljačić, M. (2023). *Deep Learning and Symbolic Regression for Discovering Parametric Equations* (arXiv:2207.00529). arXiv. <http://arxiv.org/abs/2207.00529>