

CLASSICAL AND QUANTUM MACHINE  
LEARNING IN A NUTSHELLKLASSZIKUS ÉS KVANTUM  
GÉPI TANULÁS DIÓHÉJBANNAGY ATTILA <sup>1</sup>**Abstract**

Today, due to computer performance and the amount of data, we can effectively apply machine learning algorithms in many areas, for example in healthcare, cyber defense, and the business world. With the help of quantum mechanics, we are facing new possibilities. We managed to build the first quantum computers. Instead of a classical computer, we will be able to analyze the data with quantum computers, and at an exponential speed, which the old computer was not able to do due to performance limitations. In addition, we will even be able to analyze quantum data. This field is still in its infancy.

**Keywords**

Quantum computer, machine learning, quantum machine learning

**Absztrakt**

Napjainkban a számítógépes teljesítmény és az adatok mennyisége miatt a gépi tanulási algoritmusokat hatékonyan vagyunk képesek alkalmazni számos területen, mint például az egészségügyben, kibervédelemben, az üzleti világban egyaránt. A kvantummechanika segítségével új lehetőségek előtt állunk. Sikerült az első kvantumszámítógépeket megépíteni. A klasszikus számítógép helyett az adatokat kvantumszámítógépekkel leszünk képesek elemezni, még hozzá exponenciális gyorsasággal, amit a régi számítógép nem volt rá képes a teljesítmény korlátok miatt. Ezen felül még a kvantum adatokat is képesek leszünk elemezni. Ez a terület még gyerekcipőben jár.

**Kulcsszavak**

Kvantumszámítógép, gépi tanulás, kvantum gépi tanulás

<sup>1</sup> attila.nagy@uni-obuda.hu | ORCID: 0000-0003-0214-414X | PhD Student, Óbuda University Doctoral School on Safety and Security Science | PhD hallgató, Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola

## BEVEZETÉS

Thomas Young (1773-1829) angol fizikus meghaladta korát. 1801-ben egy kísérletében megpróbálta bizonyítani, hogy a fény hullámszerű. Ma ezt interferenciának hívjuk, a fény nem csak részecske, hanem hullámként is viselkedik. [1] Max Planck (1858-1947) német fizikus a kvantummechanika egyik alapítója, kutatótársaival fektették le a kvantummechanika alapjait (1900-1925) között. [2] A kvantummechanika az atomok, molekulák az elektromos áramkörök nanoméretű viselkedését írja le. A fizikai jelenségek számszerűsítésére és modellezésére matematika tudományát használjuk fel. Ezekre az alapokra épül a mostani kvantumszámítógép. [3]

Számos kvantum technológiát fejlesztenek melyek a következők: kvantumoptika [4], kvantumkriptográfia [5], kvantum internet [6], kvantum anyagok [7], kvantumérzékelés [8], kvantumszámítógép.

Napjainkban a kvantumszámítógép egy feltörekvő élvonalbeli technológiává nőtte ki magát. Hatással van a különböző iparágakra, valamint a tudományos életre egyaránt. A kvantumszámítógép megépítésénél a kvantum fizika alapelveit használták fel. [9]

A kvantum alkalmazások a következők: kvantum hibajavítás [10], kvantumkriptográfia [5], kvantumszámítógépi tanulás [11], kvantum pénzügy [12], kvantumkémia [13], kvantum optimalizálás [14].

A továbbiakban a kvantumszámítógép és a klasszikus, valamint kvantum gépi tanulás fogunk foglalkozni a tanulmányban. Kísérletet teszünk, hogy bemutassuk a kvantumszámítógép fő komponenseit, hogy képesek legyünk megérteni ezeknek az új paradigma előtt álló technológiának a lehetőségeit. Átvesszük a gépi tanulás fő pontjait, milyen tanulási típusokra lehet felosztani őket és említést teszünk néhány algoritmusról melyek különböző tanulási típusokhoz tartoznak. Végezetül a kvantum gépi tanulás fogunk foglalkozni melyben kísérletet teszünk bemutatni annak előnyeit és hátrányait.

### Kvantumszámítógép

A kvantumszámítógép napjainkban a legnagyobb paradigmaváltást igényli a fejlesztők részéről. Richard Feynman és Jurij Manyin az 1980-as években említették legelőször a kvantumszámítógépet. [15]

A kvantumszámítások szempontjából fontos fizikai jelenségek a következők: szuperpozíció, kvantum-összefonódás. A klasszikus számítógép 0 és 1-es bitekkel működik, ami az alapvető információegységei a számítástechnikának. A kvantumszámítógépnél a qubit (kvantumbit) az alapvető információegységei a kvantumszámítástechnikánál (kvantuminformáció alapegysége). A kvantumbit a szuperpozíció elve szerint működik, ami azt jelenti, hogy egyszerre veheti fel 0 és 1-et. Az összefonódás angolul entanglement egy olyan jelenség, ami azt jelenti, hogy több kvantumbit össze van fonódva, avval azt érzük el, hogy több kvantumbiten tárolunk egy értéket. Többféle megoldás van jelenleg a kvantumszámítógép megépítésére, mint szupravezető, ion csapda, foton kvantumszámítógép. [16] [17]

### Klasszikus Gépi tanulás (Classical Machine Learning)

A gépi tanulás segítségével képesek vagyunk feltárni az adatokban a rejtett információkat vagy képesek vagyunk meghatározni mi fontos és mi nem. Nagy mennyiségű adatok kezelésére megfelelő a gépi tanulás. 1950 után több algoritmus is kifejlesztettek, de

akkor még nem volt lehetséges a használatuk. Mondhatni akkor állt be a gépi tanulási tél, mivel akkor még nem állt rendelkezésre elegendő digitális adat, sem olyan számítógép teljesítmény, ami tudta volna kezelni azt. A klasszikus gépi tanulást, tanulás szerint többnyire három részterületre osztható, melyek a felügyelt tanulás, felügyelt nélküli és megerősítéses tanulás. [11] [18] [19] [20]

**A felügyelt tanulás** (supervised learning): Ebben a tanulási formában az adatok úgynevezett címkéket is tartalmaznak. A tanulás célja egy általános szabály megtalálása. A megtanult szabályt ezután az új adatok ismeretlen kimenetekkel való címkézésére használják. A felügyelt tanulás általában napi alkalmazásokban használják, például arc- és beszéd-felismerésben, termék vagy filmajánlásokban és értékesítési előrejelzésekben. A felügyelt gépi tanuláson belül megkülönböztetünk két feladattípust melyek az osztályozási feladat és regressziós feladat. A regresszió egy folyamatos értékű válaszreakciót fejleszt, és előre jelzi, például a lakások ár ingadozását, míg az osztályozás megpróbálja megtalálni a megfelelő osztálycímkét, például elemzi a pozitív és negatív hangulatot. Abban az esetben, ha az adatunkban nem minden egyednek van címkéje akkor félig felügyelt tanulásról beszélünk. Ezt akkor szoktuk használni amikor költséges lenne egy teljesen felcímkézett adatkészlet beszerzése. Praktikusabb egy kis részhalmoz címkézése. Néha szakképzet szakértőkre van szükségünk, hogy felcímkézzék az adatokat, ami költséges. [11] [18] [19] [20]

**A felügyelt nélküli tanulás** (unsupervised learning): Ebben az esetben az adatok nem tartalmaznak címkéket csak tájékoztató jeleket tartalmaznak leírás nélkül. Az adatok szerkezetét mi kell, hogy meghatározzuk és a rejtett információkat is. A felügyelt nélküli tanulást lehet alkalmazni például anomáliák detektálásánál (csalás vagy hibás berendezések észlelésére) vagy hasonló online viselkedésű ügyfelek csoportosítására egy marketingkampányhoz. A felügyelt nélküli tanulásnál a klaszterezést alkalmazzuk, hogy az adatmegértésben segítsen minket. [11] [18] [19] [20]

**Megerősítéses tanulás** (reinforcement learning): A modell a tanulás közben visszacsatolást kap az adatokból, így a rendszer képes alkalmazkodni a dinamikus feltételekhez egy bizonyos cél elérése érdekében. A modell a visszacsatolási válaszok alapján értékeli a teljesítményét, és ennek megfelelően reagál. A legismertebb példák közé tartoznak az önvezető autók vagy a sakkmester (AlphaGo) vagy a robot amelyik büntetőt rúg a fociban. Úgy tanulja meg, hogy ha eltéveszti a rúgást akkor negatív visszacsatolást kap, így képes korrigálni magát a mozgását a lövését és ha gólt rúg akkor meg pozitív visszacsatolást kap. [11] [18] [19] [20]

A tanulmányban három algoritmust említünk meg. A döntési fa algoritmus, ami a felügyelt tanúláshoz tartozik és osztályozásra lehet használni. K-közép algoritmus, ami a felügyelt nélküli tanúláshoz tartozik és klaszterezésre használjuk. Az utolsó algoritmus a mély tanulás, ez az algoritmus a felügyelt és a felügyelt nélküli tanúláshoz tartozik és osztályozásra, regresszióra, és klaszterezésre is alkalmas.

**Döntési fa (decision tree).** A döntési fák osztályozási problémákra is alkalmasak. Ez egy tanuló algoritmus, ami az attribútumok közötti kapcsolatok explicit gépi tanulásán alapul. A tanult modell formátuma egy fa ebből ered a neve döntési fa. A döntési fánál a

csúcsaiban találhatóak az attribútumai. A döntési fákat jóslásra lehet használni. A döntési fák előnyei, hogy diszkrét jellemzők közti explicit kapcsolatot tanul, és a gépi tanult modell emberi szemmel is értelmezhető. Hátránya, hogy ha sok attribútuma van, akkor sok időt vesz igénybe a megtanulása mivel rengeteg tanító példa kell. A klasszikus döntési fákat akkor érdemes használni, ha kevés diszkrét attribútumunk van és feltételezzük, hogy bonyolult kapcsolatok vannak közöttük. [21]

**K-közép (k-means).** A K-közép klaszterezés egy felügyelt nélküli tanulási algoritmus. Ebben az esetben az adatok nem címkézettek. Az algoritmus az objektumokat olyan klaszterekbe osztja fel, amelyek hasonlóságban vannak egymással, és nem hasonlítanak egy másik klaszterhez tartozó objektumhoz. A „K” kifejezés egy számot takar. Ez a szám adja meg, hogy hány fűrtöt adjon hozzá. Például a  $K = 2$ , két klaszterre utal. [22]

**Neurális hálózat és mély tanulás.** „A neurális hálózat az emberi agy működését próbálja leutánozni. A neuronok együttműködő processzáló elemek melyek számításokat végeznek el. Ezek a neuronok ún. rétegekből épülnek fel. Az információ csak rétegtől rétegre halad egy irányba a bemeneti rétegtől a kimeneti rétegre vagy a kimeneti rétegtől a bemenet felé terjed.” [23] „A mély tanulás a gépi tanulás mesterséges neurális hálózatokon alapuló alkészlete. A tanulási folyamat azért mély mert a neurális hálózatok struktúrája több bemenetet, kimenetet és rejtett réteget tartalmaz. Az összes réteg egységekből épülnek fel, melyek a bemeneti információt úgy alakítja át, hogy a következő réteg el tudja végezni a predektív feladatot.” [23]

A táblázat nem teljes sokkal több algoritmus létezik. Néhány algoritmust tartalmaz a táblázat tanulás típus, algoritmus és feladat típus szerint. (1. Táblázat)

Tanulás típusa	Gépi tanulási algoritmus	Feladat típusa
Felügyelt tanulás	Döntési fa	Osztályozás
Felügyelt tanulás	Véletlen erdő	Osztályozás
Felügyelt tanulás	XGBoost	Osztályozás
Felügyelt tanulás	K legközelebbi szomszéd	Osztályozás
Felügyelt tanulás	Lineáris regresszió	Regresszió
Felügyelt tanulás	Regresszió döntési fa	Regresszió
Felügyelt tanulás	Support vector machine	Osztályozó és regresszió
Felügyelt nélküli tanulás	K-közép	Klaszterezés
Felügyelt nélküli tanulás	Principal Component Analysis	Dimenzió csökkentő
Mind a kettő	Mély tanulás	Osztályozás, regresszió, klaszterezés

1. Táblázat: A gépi tanulás fontosabb algoritmusai (saját szerkesztés)

## Kvantum gépi tanulás (Quantum machine learning)

A kvantumelméletet a kvantum számítógépet és a gépi tanulást, ha összerakjuk akkor kapjuk a kvantum gépi tanulást (QML). [24] Fontos azonban megjegyezni, hogy a kvantum gépi tanulásból származó eredmények jelenleg hipotetikusak. [25]

A kvantumszámítás és a gépi tanulás kombinálására négy különböző megközelítés létezik. Aszerint különböztetjük meg őket, hogy az adatok klasszikus (C) vagy kvantum (Q), illetve, hogy az algoritmus típusa klasszikus vagy kvantum számítógépen fut-e. A táblázat szemlélteti a kapcsolatot (2. Táblázat). Az említett esetben a kvantumadatkészlet természetes vagy mesterséges kvantumrendszerből származik (például kvantumbit kölcsönhatások méréseiből). A klasszikus adatkészlet klasszikus rendszerből származik, melyek például idősorok, szövegek vagy képekből állnak. [11]

Az adat típusa	Az algoritmus típusa	
	CC	CQ
	QC	QQ

2. Táblázat: Az algoritmusok típusai.

Forrás: <https://learn.qiskit.org/course/machine-learning/introduction> (saját szerkesztés)

**CC** – Klasszikus adat, klasszikus gépi tanulás

**CQ** – Klasszikus adat, kvantum gépi tanulás

**QC** – Kvantum adat, klasszikus gépi tanulás

**QQ** – Kvantum adat, kvantum gépi tanulás [11]

A kvantumszámítógép alapvetően különbözik a hagyományos számítógéptől, ez miatt a kvantum gépi tanulás is merőben eltérő módon használható. A kulcs a kvantum algoritmusok, mint a HHL algoritmus vagy a Grover keresőalgoritmus. A HHL algoritmus lineáris egyenletrendszerek megoldására használják. A gépi tanulási környezetben használható az alapvető kvantumhatások. A Grover algoritmus az amplitúdóerősítés kvantum tulajdonságát használja ki, hogy megoldásokat jelöljön meg egy rendezetlen adatbázisban. Ennek a módszernek köszönhető, hogy a klaszterezés sokkal gyorsabban megy végbe. A kvantumszámítógép lehetőséget ad a gépi tanulással foglalkozó fejlesztőknek, hogy az adatokkal potenciálisan gyorsabb adatfeldolgozást végezzenek el. [26] [28]

Kvantum gépi tanulás a lineáris algebrai problémák megoldására is lehet használni. A mátrixműveletek segítségével a nagy dimenziójú vektortérben lévő vektorokkal megoldható az adatelemzés és gépi tanulási problémák széles skálája. A kvantumszámítógépnél a kvantumbit állapota  $2^n$  komplex vektor a térben, és sok mátrix transzformációt kell elvégeznünk. A kvantumszámítógép képes megoldani olyan általános lineáris algebrai problémákat, mint a Fourier-transzformáció, sajátvektor és sajátérték keresés, valamint lineáris egyenlethalmazok megoldása  $2^n$  dimenziós vektortereken keresztül polinomiális időben (a kvantumgyorsítás miatt exponenciálisan gyorsabb, mint a klasszikus számítógép). Az algoritmus ami hozzá tartozik az a következő Harrow, Hassidim és Lloyd (HHL). [27] [28] [30]

**Kvantum főkomponens-elemzés** (Principal Component Analysis PCA). A PCA egy méretcsökkentési technika (dimenzió csökkentő), és az adatkészletek dimenziójának csökkentésére használjuk. A döntéshozatalnál ügyelnünk kell rá, hogy a dimenziócsökkentésnél ne azokat az adatokat szüntessük meg melyek fontos információt tartalmaznak. Ha a dimenziócsökkentés sikeres, akkor kisebb adatkészlettel kell dolgoznunk a nagy helyett. Például, ha az adatkészletünk csak tíz jellemzőből áll akkor a főkomponens elemzés hatékonyan elvégezhető a hagyományos klasszikus számítógéppel, de ha millió jellemzőből áll az adatkészletünk akkor a főkomponens-elemzés kudarcot vall, mert nehéz lesz az adatok között kiválasztani a fontos információt. Egy másik probléma a klasszikus számítógépnél a sajátvektor és sajátérték kiszámítása. Minél nagyobb a bemenet annál nagyobb a sajátvektor és sajátérték halmaza. A kvantumszámítógép ezt a problémát nagyon gyorsan képes megoldani. A Random Access Memory (QRAM) segítségével véletlenszerűen választanak ki egy adatvektort. Ezt a vektort kvantumbit segítségével szuperpozícióba képezi le. Az ebből kapott összesített vektort logaritmus kvantumbitekkel rendelkeznek. Ezek nagyon sűrű mátrixot alkotnak (kovariancia mátrix). Az adatkészlet ismételt mintavételével és a kovariancia mátrix hatványozásának nevezett trükk használatával, kombinálva a kvantumfázisbecslő algoritlussal. Bármely kvantumváltozatát fel tudjuk bontani főkomponenseire. Ez miatt a számítási komplexitás, és időbonyolultság exponenciálisan csökken. [27] [28] [30] [32] [33]

**Kvantum Support Vector Machines.** A Support Vector Machines algoritmus a klasszikus gépi tanuláshoz tartozik (felügyelt tanulás). Osztályozásra és regresszióra lehet használni. Amikor osztályozási problémánk van, akkor az adatkészletünk lineárisan elválasztható. Ha az adat nem lineárisan elválasztható, akkor a dimenziót addig növeljük, amíg lineárisan elválaszthatóvá nem válik. Az SVM a klasszikus számítógépeknél csak bizonyos számú méretig hajtható végre. Mivel a számítógépek nem rendelkeznek elegendő teljesítménnyel kudarcot vallanak egy bizonyos határ után. A kvantumszámítógép azonban exponenciálisan gyorsabban tudja végrehajtani a SVM algoritmust. A szuperpozíció és összefonódás elve lehetővé teszi, hogy hatékonyan és gyorsabban hozzon eredményt. [27] [28] [30] [31] [32] [33]

**Kvantum mély tanulás.** A kvantumszámítógépet a mély tanulással lehet ötvözni, ennek előnye, hogy a neurális hálózat betanításához szükséges idő lecsökken. Evvel a módszerrel egy új keretrendszert kapunk, amivel a mögöttes optimalizálást elvégezhetjük. A klasszikus mély tanulási algoritmus neurális hálózatát utánozhatjuk egy tényleges valós kvantumszámítógépen. Minél több perceptronnal rendelkezik az architektúránk a számítási bonyolultság száma megnő a klasszikus számítógépnél akkor is, ha dedikált GPU fűrtöket alkalmazunk. Magát a kvantumszámítógépet úgy tervezték, hogy a hardver a neurális hálózatot tudja utánozni a hagyományos szoftverek helyett. Ebben az esetben a kvantumbit neuronként működik, amely egy neurális hálózat alapegységét alkotja. Ennek előnye, hogy a kvantumszámítógép az összes hagyományos gépi tanulási algoritmus felülmúlja. [27] [29] [30]

**Rejtett Markov-modell** (Hidden Markov models HMM). A rejtett Markov-modell a Bayes-féle család speciális esete. Ezt a konkrét modellt a beszédfelismerésnél szokták

használni elsődlegesen. Számos területen lehet még alkalmazni beleértve a megerősítéses tanulási problémáknál is. A HMM formátuma alkalmas a nyílt kvantumrendszerek nyelvére való zökkenőmentes átmenetre. Az algoritmussal kapcsolatban bebizonyosodott, hogy kvantumáramkörökön szimulálható. Bebizonyosodott, hogy a kvantum HMM nem tudja jobban modellezni az adatokat a hagyományos HMM algoritmusnál. Ebben az esetben a klasszikus modellt érdemes alkalmazni. [26] [31]

## ÖSSZEGZÉS

A tanulmányban említést tettünk a kvantummechanika megalakulására, és hogy mivel foglalkozik, milyen technológiák alakultak ki, és hogy milyen alkalmazások születtek belőle. Az egyik kvantum technológia a kvantumszámítógép és a fontos alkalmazás pedig a kvantum gépi tanulás melyekkel részletesebben foglalkoztunk. A kvantumszámítógép kvantumbitekét használ fel, ami lehetővé teszi azonos időben két állapot felvételére. A kvantumszámítógép a kvantumbit segítségével sokkal gyorsabb számításokra képes, mint a hagyományos számítógépek még akkor is, ha párhuzamosan vannak kötve. A tanulmányban ez utána klasszikus gépi tanulással foglalkoztunk azért, hogy lássuk a különbséget a későbbiekben. Felsoroltuk milyen tanulási típusokra lehet felosztani a gépi tanulást (felügyelt, felügyelet nélküli és megerősítéses tanulásra), említést tettünk három klasszikus algoritmusra melyek a következők döntés fa, K-közép és mély tanulás. Egy táblázatban szemléltettük a különböző algoritmusokat. A kvantum gépi tanulás részénél bemutattuk a lineáris problémával foglalkozó algoritmust (HHL), Kvantum főkomponens-elemzés (Principal Component Analysis PCA), Kvantum Support Vector Machines, Kvantum mély tanulás, valamint a kvantum rejtett Markov-modellt. Az utóbbi modell nem jobb, mint a hagyományos modell, de a többi algoritmus jelentősen jobban működnek a kvantumszámítógép segítségével. A kvantum mély tanulást emelnénk ki mivel abban az esetben a kvantumszámítógép kvantumbitjei a neurális hálózat perceptronjainak felelnek meg. Ami azt jelenti, hogy lényegesen gyorsabb számítási teljesítményre képes, mint a hagyományos mély tanulás. Jelen pillanatban a kvantum gépi tanulással foglalkozó kutatások csak hipotetikusak. Számos eredmény kecsegtet minket a reménykedésre, de azt is be kell látni, hogy lehet a jövőben egy újabb kvantumtélre kell majd számítanunk. [34]

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Thomas Young's Double Slit Experiment [Online]. Elérhető: <https://micro.mag-net.fsu.edu/primer/java/interference/doubleslit/> (Letöltve: 2022.11.05)
- [2] Max Planck [Online]. Elérhető: <https://www.britannica.com/biography/Max-Planck/Later-life> (Letöltve: 2022.11.05)
- [3] Martin Laforest. The Mathematics of quantum mechanics [Online]. Elérhető: <http://www.stat.ucla.edu/~ywu/linear.pdf> (Letöltve: 2022.11.05)
- [4] nature portfolio. Quantum optics [Online]. Elérhető: <https://www.nature.com/subjects/quantum-optics> (Letöltve: 2022.11.05)
- [5] Caltech. How will quantum technologies change cryptography? [Online]. Elérhető: <https://scienceexchange.caltech.edu/topics/quantum-science-explained/quantum-cryptography> (Letöltve: 2022.11.05)

- [6] Zdnet. What is the quantum internet? [Online]. Elérhető: <https://www.zdnet.com/article/what-is-the-quantum-internet-everything-you-need-to-know-about-the-weird-future-of-quantum-networks/> (Letöltve: 2022.11.05)
- [7] Harvard University. Quantum Materials [Online]. Elérhető: <https://narang.seas.harvard.edu/quantum-materials> (Letöltve: 2022.11.05)
- [8] Bae systems. What is quantum sensing? [Online]. Elérhető: <https://www.baesystems.com/en-us/definition/what-is-quantum-sensing> (Letöltve: 2022.11.05)
- [9] IBM. What is quantum computing? [Online]. Elérhető: <https://www.ibm.com/topics/quantum-computing> (Letöltve: 2022.11.05)
- [10] Q-CTRL. What is quantum error correction? [Online]. Elérhető: <https://q-ctrl.com/topics/what-is-quantum-error-correction> (Letöltve: 2022.11.05)
- [11] IBM. Quantum Machine Learning [Online]. Elérhető: <https://learn.qiskit.org/course/machine-learning/introduction> (Letöltve: 2022.11.05)
- [12] NOEMA. Quantum finance. A new methodology for economics [Online]. Elérhető: <https://noemalab.eu/ideas/essay/quantum-finance-a-new-methodology-for-economics/> (Letöltve: 2022.11.05)
- [13] Shelley Watts, Korry Barnes. Quantum chemistry overview [Online]. Elérhető: <https://study.com/learn/lesson/quantum-chemistry-overview-examples.html> (Letöltve: 2022.11.05)
- [14] Pradeep Niroula. Conquering the challenge of quantum [Online]. Elérhető: <https://physicsworld.com/a/conquering-the-challenge-of-quantum-optimization/> (Letöltve: 2022.11.05)
- [15] Microsoft. A kvantum-számítástechnika története és háttere <https://learn.microsoft.com/hu-hu/azure/quantum/concepts-overview>
- [16] Microsoft. A kvantum-számítástechnika ismertetése [Online]. Elérhető: <https://learn.microsoft.com/hu-hu/azure/quantum/overview-understanding-quantum-computing> (Letöltve: 2022.11.05)
- [17] Dobó Imre. Kvantumszámítógép szimulációja GPU használatával [Online]. Elérhető: <https://tdk.bme.hu/VIK/DownloadPaper/Kvantum-szamitogep-szimulacioja> (Letöltve: 2022.11.05)
- [18] Szegedi tudományegyetem. Gépi tanulás a gyakorlatban [Online]. Elérhető: <https://www.inf.u-szeged.hu/~rfarkas/ML20/alapfogalmak.html> (Letöltve: 2022.11.05)
- [19] Yuxi Liu. Python machine learning by example (Packt book) [Online]. Elérhető: <https://subscription.packtpub.com/book/big-data-and-business-intelligence/9781783553112/1/ch01/v11sec03/a-very-high-level-overview-of-machine-learning> (Letöltve: 2022.11.05)
- [20] Sebastian Raschka, Vahid Mirjalili. Python machine learning (Packt book) [Online]. Elérhető: <https://subscription.packtpub.com/book/data/9781789955750/1/ch01/v11sec03/the-three-different-types-of-machine-learning> (Letöltve: 2022.11.05)
- [21] Szegedi tudományegyetem. Gépi tanulás a gyakorlatban [Online]. Elérhető: [https://www.inf.u-szeged.hu/~rfarkas/ML20/dontesi\\_fa.html](https://www.inf.u-szeged.hu/~rfarkas/ML20/dontesi_fa.html) (Letöltve: 2022.11.05)



- [22] Mayank Banoula. K-means clustering algorithm [Online]. Elérhető: <https://www.simplilearn.com/tutorials/machine-learning-tutorial/k-means-clustering-algorithm> (Letöltve: 2022.11.13)
- [23] Nagy Attila. Network anomaly detection with machine learning [Online]. Elérhető: <https://biztonsagtudomanyi.szemle.uni-obuda.hu/index.php/home/article/view/226/207> (Letöltve: 2022.11.13)
- [24] Catalina Alborno. How to QML [Online]. Elérhető: <https://penny-lane.ai/blog/2021/10/how-to-start-learning-quantum-machine-learning/> (Letöltve: 2022.11.13)
- [25] Kara Sherrer. What is quantum machine learning? [Online]. Elérhető: <https://www.cioinsight.com/big-data/quantum-machine-learning/> (Letöltve: 2022.11.13)
- [26] O'Quinn, Wesley. Quantum Machine Learning: Recent Advances and Outlook [Online]. Elérhető: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9076118> (Letöltve: 2022.11.13)
- [27] Kumari Surya Remanan. Beginner's guide to quantum machine learning [Online]. Elérhető: <https://blog.paperspace.com/beginners-guide-to-quantum-machine-learning/> (Letöltve: 2022.11.13)
- [28] Zhang, Yao. Recent advances in quantum machine learning [Online]. Elérhető: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/que2.34> [Online]. Elérhető:
- [29] Zhang, Shengyu. Quantum machine learning [Online]. Elérhető: <https://academic.oup.com/nsr/article/6/1/26/5222655> [Online]. Elérhető:
- [30] Biamonte, Jacob. Quantum Machine Learning [Online]. Elérhető: <https://arxiv.org/abs/1611.09347> [Online]. Elérhető:
- [31] Schuld, Maria. An introduction to quantum machine learning [Online]. Elérhető: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00107514.2014.964942> [Online]. Elérhető:
- [32] Yao Zhang. Recent Advances in Quantum Machine Learning [Online]. Elérhető: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/que2.34> [Online]. Elérhető:
- [33] Turan Kaan Elgin. A Survey on Quantum Machine Learning [Online]. Elérhető: [https://www.cs.umd.edu/class/fall2018/cmsc657/projects/group\\_7.pdf](https://www.cs.umd.edu/class/fall2018/cmsc657/projects/group_7.pdf) [Online]. Elérhető:
- [34] Chris J. Hoofnagle, Simson L. Garfinkel. Law and policy for the quantum age [Online]. Elérhető: [https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/026A5CE2FE7FE277B94DA01A519B2DAD/9781108835343AR.pdf/Law\\_and\\_Policy\\_for\\_the\\_Quantum\\_Age.pdf?event-type=FTLA](https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/026A5CE2FE7FE277B94DA01A519B2DAD/9781108835343AR.pdf/Law_and_Policy_for_the_Quantum_Age.pdf?event-type=FTLA) (Letöltve: 2022.11.05)