



# A SZTOCHASZTIKUS MODELLEZÉS NÉHÁNY TELJESÍTMÉNYVIZSGÁLATI ALKALMAZÁSA

Tézisfüzet

**Horváth Ádám**

*Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola  
Informatika a faiparban program  
Simonyi Károly Műszaki, Faanyagtudományi és Művészeti Kar  
Nyugat-magyarországi Egyetem*

Témavezetők:

**Dr. Farkas Károly**

**Prof. Tien Van Do**

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem*

Sopron

2014.



# 1. Motiváció és célok

A folyamatok megértéséhez és elemzéséhez régóta használunk modelleket, amelyek a problémák lényegét próbálják megfogni, s lehetőség szerint egyszerűen leírni a folyamatok működését.

Jelen értekezésben két fő területet vizsgálunk meg. Első témánk a szolgáltatások (alkalmazások) terjedése, a terjedés modellezése, valamint a modellek kiértékelése. Modelljeink újszerű szemléletet kínálnak az alkalmazások értékesítőinek: az alkalmazások elterjesztéséhez kihasználhatjuk a felhasználók közötti közvetlen kommunikáció nyújtotta előnyöket. Emellett megmutatjuk, hogy modellezési technikáink a faiparban is használhatóak, s a faablakok gyártási folyamatát determinisztikus és sztochasztikus Petri háló (DSPN) modellünk segítségével írjuk le, s a modell segítségével meghatározzuk a gyártási folyamat szűk keresztmetszetét.

Másik témánk az opportunista spektrum hozzáférés modellezése és hatásainak vizsgálata. Modellünkben a mobil szolgáltatók opportunista módon használhatják egymás kihasználatlan frekvenciasávjait. Célunk megmutatni, hogy modellünk használatával javul a szolgáltatások minősége, s emellett a szolgáltatók többlet profitot termelhetnek.

Céljaink a következőképpen foglalhatók össze:

- Alkalmazások terjedésének modellezése mobil ad hoc környezetben.  
[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]
- A tárgyalt modellezési technikák alkalmazása faipari környezetben.
- Az opportunista spektrum hozzáférés modellezése mobil cellás hálózatokban.  
[8, 9, 10]

# 2. Kutatási módszertan

Ebben a fejezetben egy rövid áttekintést adunk a kutatási módszertanunkról, melyet a disszertációban felvetett problémák megoldására alkalmaztunk. Teljesítményelemzést háromféleképpen tudunk végrehajtani: szimulációs szoftver segítségével; matematikai analízissel, melynek során numerikus eljárásokat használunk; vagy a rendszer felépítésével és a teljesítményjellemzők mérésével [16]. Bár szimuláció segítségével finomabb modelleket építhetünk, a matematikai analízis általában kisebb számítási kapacitást igényel [17].

Az alkalmazások terjedésének vizsgálata mobil ad hoc környezetben egy új kutatási terület, ennek ellenére az itt használt módszertan jól ismert eljárásokat is tartalmaz.

A sorbanállási hálózatokat olyan rendszerek modellezésére használjuk, melyek fel-foghatók egymással kapcsolatban lévő szolgáltatások egy halmazaként. Ezen a területen sok eredmény született a múlt század második felében, mint például a Jackson hálózatok [18], melyekre létezik hatékony szorzat alakú megoldás; vagy a „*mean value analysis*” [19], melynek segítségével a zárt sorbanállási hálózatokra [20] kapunk analitikus megoldást. Az alkalmazás terjedési modelljeinkben a felhasználói populáció véges, ezért a nyilvánvalóan felmerül a zárt sorbanállási hálózatok használata a rendszer viselkedésének megfigyelésére. A fenti módszerek megléte ellenére nem használhattuk az említett analitikus módszereket, mivel modellünk sajátos aciklikus működése a módszerekben támasztott alapkövetelményeknek mond ellent (ha egy felhasználó megvásárol egy alkalmazást, soha többé nem fogja elveszíteni azt).

A sztochasztikus modellezés területén viszont léteznek magasabb szintű, népszerű modellezési technikák, mint a sztochasztikus Petri hálók [21]. A hagyományos eljárás a sztochasztikus Petri hálók elemzésére a hálónak megfelelő folytonos idejű Markov-lánc konstruálása [22], majd a Markov-lánc egyensúlyi vagy tranziens eloszlásának meghatározása analitikus [23] vagy szimulációs módszerekkel. Ennek a módszernek a hátránya viszont az, hogy sok komponensből álló hálózatok esetén kivitelezhetetlen lesz a megoldás az ilyenkor bekövetkező állapotter-robbanás miatt. Disszertációmban leírjuk a „*mean field*” módszert, mely egy folytonos közelítésen alapuló eljárás modellek kiértékelésére. Az eljárást alkalmazva a modell kiértékelése pár másodpercen belül véget ér még akkor is, ha állapotter-robbanás következik be a hálóban lévő nagy tokenszám miatt. Az eljárás Kurtz módszerén [24] alapul, míg mi egy olyan formában publikáltuk egy korábbi munkánkban [5], amely közvetlenül köthető a sztochasztikus Petri hálók definíciójához. Emelett a disszertációban formális kapcsolatot definiálunk a folytonos idejű Markov-lánc és annak folytonos közelítése között.

Sajnos a tiltó élet tartalmazó sztochasztikus Petri hálók megsértik a sűrűségfüggő tulajdonságot a Petri hálónak megfelelő folytonos idejű Markov-láncban, ezért nem oldhatók meg az említett folytonos közelítő módszerrel. Jelen munkánkban így szimulációt használunk ezen modellek kiértékelésére, melyet sok ismert alkalmazás támogat [25, 26, 27].

Egy gyártási folyamatban a munkafázisok késleltetési ideje determinisztikus eloszlással modellezhető. Egy olyan folyamat, melyben az állapotváltások között eltelt idő

eloszlása exponenciális és determinisztikus is lehet, jól leírható egy determinisztikus és sztochasztikus Petri hálóval [28]. A determinisztikus és sztochasztikus Petri hálók csak annyiban különböznek a sztochasztikus Petri hálóktól, hogy determinisztikus késleltetésű átmeneteket is definiálhatunk bennük. Bár modellezési erejük így nagyobb, mint a hagyományos sztochasztikus Petri hálóknak, néhány korlátba ütközünk kiértékelésük esetén. Bár több kutatás megmutatta [29, 30, 31], hogy néhány speciális esetben a determinisztikus és sztochasztikus Petri hálók analitikusan kezelhetők még konkurens determinisztikus átmenetek engedélyezése esetén is, általában ez nem mondható el. Általános esetben a háló analitikus megoldása csak abban az esetben állítható elő, amennyiben a háló minden állapotára igaz, hogy egyidőben legfeljebb egy determinisztikus átmenet engedélyezett [28]. Mivel ez a feltétel sérül a modellünkben, így szimulációt használunk a determinisztikus és sztochasztikus Petri háló megoldásának előállítására.

Másik témánkban az opportunisták spektrum hozzáférést vizsgáljuk mobil cellás hálózatokban egy sorbanállási modell segítségével. Hangsúlyozzuk, hogy néhány sorbanállási modell már született a témában [32, 33, 34], bár ezek jelen javaslatunkhoz közvetlenül nem alkalmazhatóak. A témában végzett munkánk során ismertetjük modellünk analitikus megoldását, míg további származtatott eredményekhez szimuláció segítségével jutunk.

### 3. Új eredmények

Az elért eredményeink a következő téziscsoportokba sorolhatók.

#### 1. téziscsoport: Két determinisztikus és sztochasztikus Petri hálós modellen alapuló teljesítményvizsgálati alkalmazás [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]:

Kidolgoztunk egy zárt sorbanállási hálózati és két sztochasztikus Petri háló modellt az alkalmazások terjedésének vizsgálatára mobil ad hoc környezetben. A modellek kiértékelése során az adott modell komplexitásának függvényében különböző technikákat alkalmaztunk. Ezenkívül a faablakok gyártási folyamatát is modelleztük egy determinisztikus és sztochasztikus Petri hálóval, s így megmutattuk, hogy a sztochasztikus modellek alkalmazhatók a faiparban is (2. fejezet a disszertációban).

A saját eredmények a következőképpen összegezhetők:

- *1.1-es altézis: Egy zárt sorbanállási modellt javasoltunk, melynek segítségével numerikusan tudunk alsó és felső korlátot adni az alkalmazások eladásának számára (3.1.4-es alfejezet).*
- *1.2-es altézis: Megmutattuk, hogy a „mean field” módszer alkalmazható azon sztochasztikus Petri hálókra, melyeknek megfelelő folytonos idejű Markov-lánc sűrűségfüggő (3.1.5-ös alfejezet).*
- *1.3-as altézis: Az alap Petri hálós modellünk tranziens megoldására a „mean field” módszert alkalmaztuk, mellyel analitikus közelítést adtunk az alkalmazások eladásának számára (3.1.5-ös alfejezet).*
- *1.4-es altézis: Petri hálós alapmodellünk kibővített változatával az alkalmazások terjedésének főbb tulajdonságait tranziens szimuláció segítségével határoztuk meg (3.1.5-ös alfejezet).*
- *1.5-ös altézis: Egy DSPN modell segítségével azonosítottuk a faablakok gyártási folyamatának szűk keresztmetszetét, és meghatároztuk a szűk keresztmetszet megszüntetéséhez szükséges bővítés mértékét (3.2-es fejezet).*

## **2. téziscsoport: Opportunista spektrum hozzáférés modellezése mobil cellás hálózatokban [8, 9, 10]:**

Egy spektrum megosztási modellt javasoltunk, melyben a szolgáltatók opportunista módon használhatják egymás kihasználatlan frekvenciasávjait. Megmutattuk, hogy az opportunista spektrum hozzáférési modellünk használatával a szolgáltatás minősége javul, a szolgáltatók pedig többlet profithoz juthatnak (3. fejezet a disszertációban).

Az elért eredmények a következőképpen összegezhetők:

- *2.1-es altézis: Kidolgoztunk egy spektrum megosztó elvet, melynek alapja az opportunista spektrum hozzáférés. Modellünkben nagyfokú az együttműködés a mobil szolgáltatók között. Emellett a modell figyelembe veszi a jelenlegi technikai korlátokat is, melyet a legtöbb hasonló témájú munkában figyelmen kívül hagynak (3.2.2-es alfejezet).*

- *2.2-es altézis: Szimulációk segítségével megmutattuk, hogy a szolgáltatás minősége javítható a kidolgozott spektrum megosztási elv alkalmazásával. Megmutattuk azt is, hogy az együttműködő felek több profitra tehetnek szert, mint a jelenlegi, együttműködés nélküli esetben (3.3-as fejezet).*
- *2.3-as altézis: Kidolgoztuk a spektrum megosztási elvünk matematikai modelljét, melyben a numerikus eredmények meghatározásához egy kétdimenziós Markov-láncot használtunk. Mivel az eredmények megfelelnek a szimulációs eredményeknek, a markovi matematikai modellünk az eredeti modell jó közelítésének tekinthető, ahol a csatorna foglaltsági idejének és az érkezési időközöknek az eloszlása lognormális (3.2.3-as és 3.3.1-es alfejezet).*
- *2.4-es altézis: Azonosítottuk modellünk legfőbb hátrányát, az erőszakos erőforrás-elvételt. Egy magas kihasználtságú rendszerben az erőszakos erőforrás-elvétel előfordulása egy az előfizetők számára zavaró szintre emelkedhet. A probléma kezelésére kidolgoztunk egy eljárást a folyamatban lévő hívások védelmére, mely az „adaptív véletlen korai felismerés” szabályon alapul (3.3.3-as alfejezet).*

## 4. Az eredmények alkalmazása

Az első téziscsoportban főként alkalmazások mobil ad hoc környezetben való terjedésével foglalkoztunk. Eredményeink alternatívát jelentenek az alkalmazások értékesítőinek, és kijelölhetnek egy új irányt a területen, amelyben nagyobb szerepet kapnak az ad hoc hálózatok alkalmazások terjesztésével kapcsolatos aspektusai.

Alkalmaztuk továbbá a „mean field” módszert sztochasztikus Petri hálókra, mely egy folytonos közelítő eljárás. Módszerünk segítségével a Petri hálók közelítő analitikus megoldása pár másodpercen belül előáll, mivel a megoldás komplexitása lineárisan arányos a Petri hálóban lévő helyek számával.

Az első téziscsoportban azt is megmutattuk, hogy a sztochasztikus modellezés alkalmazható a faiparban is. Az eredmények közvetlenül is hasznosíthatók azon vállalatok számára, amelyek növelni szeretnék a termelést: a termelési folyamat szűk keresztmetszetét határozhatjuk meg a modell segítségével. Ezenkívül a modell abban is segít, hogy az adott munkafolyamatot milyen mértékben szükséges bővíteni.

A második téziscsoportban felállítottuk az opportunisták spektrum hozzáférés analitikus modelljét, amely a spektrum bérlés teljesítményanalízisére használható. Megmutattuk, hogy a frekvenciasávok opportunisták módon történő bérlése javította a fontosabb teljesítménymutatókat. Eljárásunk legfőbb hátrányának enyhítésére egy engedélyezés vezérlési eljárást javasoltunk a bejövő hívásokra. Megmutattuk, hogy a blokkolási valószínűség és az erőszakos erőforrás-elvétel valószínűsége hangolható paraméterek. Végül megmutattuk azt is, hogy modellünk használatával az együttműködő szolgáltatók többlet profitot juthatnak még akkor is, ha a bérlő nem kap engedélyeket.



## A disszertációhoz kötődő saját publikációk

- [1] Á. Horváth, „Modeling opportunistic application spreading,” in *Proceedings of the Second International Workshop on Mobile Opportunistic Networking*, pp. 207–208, ACM, 2010.
- [2] Á. Horváth and K. Farkas, „Alkalmazások terjedésének vizsgálata mobil ad hoc hálózatokban,” in *Proceedings of IKT2010, Dunaújváros, Hungary*, pp. 1–6, 2010.
- [3] Á. Horváth and K. Farkas, „Modeling self-organized application spreading,” in *Access Networks*, pp. 71–80, Springer, 2011.
- [4] Á. Horváth and K. Farkas, „Modeling application spreading using mobile ad hoc networks,” in *Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), 2010 Third Joint IFIP*, pp. 1–6, IEEE, 2010.
- [5] M. Beccuti, M. De Pierro, A. Horváth, Á. Horváth, and K. Farkas, „A mean field based methodology for modeling mobility in ad hoc networks,” in *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd*, pp. 1–5, IEEE, 2011.  
**Független hivatkozások száma: 2.**
- [6] Á. Horváth and K. Farkas, „Techniques for modeling mobile application spreading,” *Infocommunications Journal*, vol. IV, no. 1, pp. 13–20, 2012.
- [7] Á. Horváth, „Usability of deterministic and stochastic Petri nets in the wood industry: a case study,” in *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Computer Science, Applied Mathematics and Applications (ICCSAMA 2014)*, pp. 119–127, 2014.
- [8] J. Boros and Á. Horváth, „GSM szolgáltatók közötti együttműködés vizsgálata,” in *Proceedings of OGIK 2012.*, 2012.
- [9] Á. Horváth, „Applying opportunistic spectrum access in mobile cellular networks,” *Infocommunications Journal*, vol. V, no. 2, pp. 36–40, 2013.
- [10] T. V. Do, N. H. Do, Á. Horváth, and J. Wang, „Modelling opportunistic spectrum renting in mobile cellular networks,” *"Beküldve, Elsevier Journal of Network and Computer Applications"*, 2013.

## Egyéb saját publikációk

- [11] T. Bérczes and Á. Horváth, „A finite-source queuing model for spectrum renting in mobile cellular networks,” in *Accepted in Proceedings of the 10th International Conference Elektro 2014, Rajecské Teplice, Slovakia*, 2014.
- [12] P. Schaffer, K. Farkas, Á. Horváth, T. Holczer, and L. Buttyán, „Secure and reliable clustering in wireless sensor networks: A critical survey,” *Computer Networks*, vol. 56, no. 11, pp. 2726–2741, 2012. **Független hivatkozások száma: 10.**
- [13] J. Boros, Á. Horváth, and L. Jereb, „Szűk keresztmetszetek feltárása többretegű architektúrákban,” in *Proceedings of IF2011, Debrecen, Hungary*, pp. 758–765, 2011.
- [14] L. Bacsárdi and Á. Horváth, „Mobile ad hoc networks in the applied informatics,” *GÉP (Journal of Scientific Society of Mechanical Engineering, Hungary)*, vol. 61, no. 1-2, pp. 25–27, 2010.
- [15] Á. Horváth and T. Kárász, „A konszolidáció hatása az igények rendelkezésre állására,” in *Student Conference organized by BME and HTE, Budapest, Hungary*, pp. 1–4, 2007.

## Irodalomjegyzék

- [16] L. Kleinrock, „On the modeling and analysis of computer networks,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 81, no. 8, pp. 1179–1191, 1993.
- [17] T. V. Do and R. Chakka, „Simulation and analytical approaches for estimating the performability of a multicast address dynamic allocation mechanism,” *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 18, no. 7, pp. 971–983, 2010.
- [18] J. R. Jackson, „Networks of waiting lines,” *Operations Research*, vol. 5, no. 4, pp. 518–521, 1957.
- [19] M. Reiser and S. S. Lavenberg, „Mean-value analysis of closed multichain queuing networks,” *Journal of the ACM (JACM)*, vol. 27, no. 2, pp. 313–322, 1980.
- [20] T. G. Robertazzi, *Computer Networks and System: Queueing Theory and Performance Evaluation*. Springer, 2000.

- [21] M. A. Marsan, G. Balbo, G. Conte, S. Donatelli, and G. Franceschinis, *Modelling with Generalized Stochastic Petri Nets*. John Wiley and Sons, 1995.
- [22] G. Yin and Q. Zhang, *Continuous-time Markov chains and applications*. Springer New York, 1998.
- [23] W. J. Stewart, *Introduction to the numerical solution of Markov chains*, vol. 41. Princeton University Press Princeton, 1994.
- [24] T. G. Kurtz, „Solutions of ordinary differential equations as limits of pure jump markov processes,” *Journal of Applied Probability*, vol. 7, no. 1, pp. 49–58, 1970.
- [25] A. Zimmermann and M. Knoke, *TimeNET 4.0: A software tool for the performance evaluation with stochastic and colored Petri nets; user manual*. TU, Professoren der Fak. IV, 2007.
- [26] S. Baarir, M. Beccuti, D. Cerotti, M. De Pierro, S. Donatelli, and G. Franceschinis, „The greatspn tool: recent enhancements,” *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, vol. 36, no. 4, pp. 4–9, 2009.
- [27] P. Bonet, C. M. Lladó, R. Puijaner, and W. J. Knottenbelt, „Pipe v2. 5: A petri net tool for performance modelling,” in *Proc. 23rd Latin American Conference on Informatics (CLEI 2007)*, 2007.
- [28] M. A. Marsan and G. Chiola, „On petri nets with deterministic and exponentially distributed firing times,” in *Advances in Petri Nets 1987*, pp. 132–145, Springer Berlin Heidelberg, 1987.
- [29] C. Lindemann and G. S. Shedler, „Numerical analysis of deterministic and stochastic petri nets with concurrent deterministic transitions,” *Perform. Eval.*, vol. 27-28, pp. 565–582, Oct. 1996.
- [30] C. Lindemann and A. Thümmler, „Transient analysis of deterministic and stochastic petri nets with concurrent deterministic transitions,” *Performance Evaluation*, vol. 36, pp. 35–54, 1999.
- [31] G. Ciardo, R. German, and C. Lindemann, „A characterization of the stochastic process underlying a stochastic petri net,” *Software Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 7, pp. 506–515, 1994.

- [32] S.-S. Tzeng, „Call admission control policies in cellular wireless networks with spectrum renting,” *Computer Communications*, vol. 32, no. 18, pp. 1905–1913, 2009.
- [33] S.-S. Tzeng and C.-W. Huang, „Threshold based call admission control for qos provisioning in cellular wireless networks with spectrum renting,” in *Novel Algorithms and Techniques in Telecommunications and Networking*, pp. 17–22, Springer, 2010.
- [34] T. V. Do, N. H. Do, and R. Chakka, „A new queueing model for spectrum renting in Mobile Cellular Networks,” *Computer Communications*, vol. 35, pp. 1165–1171, June 2012.