

Csavarozott T-elem Nemlineáris Optimalizálása Genetikus Algoritmus

Segítségével

GRUBITS PÉTER¹

Absztrakt: Ez a tanulmány egy olyan számítási keretrendszert mutat be, amely a csavarozott T-elem szerkezeti teljesítményének automatikus optimalizálását végzi vége-selemes módszer (VEM) és genetikus algoritmus (GA) kombinált alkalmazásával. Az eljárás figyelembe veszi a kulcsfontosságú nemlinearitásokat, ezáltal valóság-hűen modellezi a tartószerkezeti viselkedést, és megbízható eredményeket biztosít. A fejlesztett módszertan egy benchmark feladaton keresztül került tesztelésre, ahol az eredmények igazolták annak hatékonyságát, ugyanis a csavarok optimális kialakításának köszönhetően jelentős teljesítmény növekedést sikerült elérni. Összességében a bemutatott eljárás lehetőséget kínál a tervezés biztonságosságának és gazdaságosságának egyidejű növelésére, mivel a szerkezeti képlékeny deformációinak csökkentése többlet anyagfelhasználás nélkül valósítható meg.

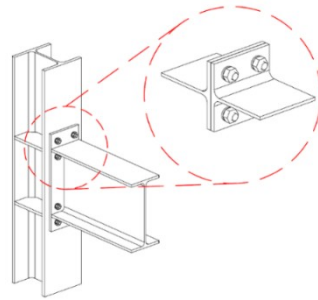
Kulcsszavak: acélkapcsolat, optimalizáció, genetikus algoritmus, rugalmas-képlékeny anyag

1. Bevezetés

A csavarozott kapcsolatok gyakori megoldásnak számítanak az acélszerkezetek kivitelezésében, ugyanis lehetővé teszik a moduláris szerelést, valamint nagy teherbírást képesek biztosítani. Ennek köszönhetően ezek a kialakítások széles körben alkalmazottak különböző építőmérnöki területeken, beleértve a magasépítést és a hídépítést is.

¹ Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola, Témavezető: Dr. Movahedi Rad Majid, egyetemi tanár, Vállalati szakértő: Dr. Balogh Tamás, Munkáltató: Inter-CAD Mérnöki Szoftverfejlesztő Kft.

A gyakorlatban a méretezésükre az Eurocode szabványban is megtalálható, úgynevezett helyettesítő T-elem alapú módszer terjedt el, amelynek alapelve, hogy a teljes kapcsolatot – az 1. ábrán látható módon – diszkrét komponensekre bontja.



1. ábra: Oszlop-gerenda csomópont felbontása a helyettesítő T-elem módszer alapján.

Ez a módszer a gyakorlatban valóban hatékonynak bizonyult, azonban egyszerűsítései miatt túlméretezéshez vezethet, mivel nem veszi figyelembe az Eurocode által megengedett 5%-os képlékeny deformációt. Továbbá, rendkívüli terhelési esetek – például földrengések – során a tervezés különös odafigyelést, valamint olyan nemlineáris hatások figyelembevételét igényli, mint a nagy deformációk hatása, a progresszív összeomlás elkerülése érdekében. Ennek kezelésére nyújthat hatékony megoldást a végeleemes módszer (VEM), amely lehetővé teszi a rendkívül pontos számítások elvégzését, ezáltal növelve a tervezés pontosságát és a kialakítás gazdaságosságát.

Az elmúlt néhány évtizedben a VEM számos mérnöki alkalmazásban bizonyította hatékonyságát és sokoldalúságát, beleértve a T-elem szimulációját különböző körülmények mellett. A kezdeti alkalmazások közül kiemelkedik Bursi és Jaspert úttörő munkája, amely irányadóvá vált a T-elem modellezésének VEM-alapú validálásában. Később Al-Khatib és Bouchair a merevítőlemezek hatását vizsgálták meg, figyelembe véve a

képlékeny anyagviselkedést, a kontaktkölcsönhatásokat és a nagy deformációkat. Emellett az utóbbi évek kutatásai egyre nagyobb figyelmet fordítanak a különböző terhelési esetek vizsgálatára is .

Ahogy a felsorolt tanulmányok is bizonyítják, a VEM hatékony eszköznek bizonyul a csavarozott csomópontok pontos tervezéséhez. Ugyanakkor a T-elem nemlineáris viselkedésének modellezésén túl továbbra is összetett kérdés a kapcsolat megfelelő teherbírásának és gazdaságos kialakításának együttes biztosítása. Ez a probléma diszkrét szerkezeti optimalizálási feladatként is megközelíthető, amely hatékonyan kezelhető matematikai programozási módszerekkel .

Ennek megoldására a tanulmány egy olyan számítási keretrendszert mutat be a csavarozott T-elem tervezésére, amely genetikus algoritmus (GA) alkalmazásával automatikusan képes meghatározni a csavarok optimális elhelyezkedését. A hagyományos szabványalapú méretezéssel szemben a javasolt módszer a VEM segítségével figyelembe veszi az anyagi, geometriai és kontakt nemlinearitásokat, ezáltal lehetővé téve a vizsgált összeállítás viselkedésének pontosabb modellezését, és növelve a tervezés megbízhatóságát. Az eljárás során a csavarok pozíciójának optimalizálásával, további anyag felhasználása nélkül, minimalizálhatók a képlékeny deformációk, ami összességében jelentősen javítja a szerkezeti biztonságot, valamint elősegíti a gazdaságos kialakítást. A létrehozott keretrendszer működése egy benchmark feladaton keresztül kerül bemutatásra, ahol az elért eredmények igazolták annak hatékonyságát és alkalmazási potenciálját az acélszerkezetek tervezésében.

2. Optimalizálási probléma

A következő fejezet a T-elem csavarpozíciójának optimalizálási problémáját tárgyalja. Az alkalmazott matematikai formulák az Eurocode szabvány előírásaival összhangban kerültek megfogalmazásra, magukban foglalva a szerkesztési szabályokat, valamint a képlékeny alakváltozásra vonatkozó kritériumot is.

Az olyan rugalmas-képlékeny anyagból készült elemek esetén, mint az acél, az alakváltozás — illetve az ennek megfelelő megnyúlás ε — két komponensre bontható:

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl} \quad (1)$$

ahol ε^{el} a rugalmas, míg ε^{pl} a képlékeny megnyúlást jelöli. Az ε^{el} az elem σ^{el} feszültségre adott válaszát fejezi ki, feltételezve, hogy az anyag tisztán rugalmasan viselkedik, amely a következő összefüggéssel írható le:

$$\varepsilon^{el} = C^{el} \sigma^{el} \quad (2)$$

ahol C^{el} anyag rugalmassági mátrixát jelöli. Ebben az esetben a keletkező ε^{el} megnyúlások a tehermentesítés hatására megszűnnek. Nagy intenzitású igénybevétel esetén azonban az elem maradó alakváltozást szenved, amihez tartozó képlékeny megnyúlás mértékét a kapcsolódó folyási szabály adja meg:

$$\dot{\varepsilon}^{pl} = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma}, \quad \lambda \geq 0 \text{ ha } f=0 \text{ és } \dot{f}=0, \text{ különben } \lambda = 0 \quad (3)$$

ahol $f(\sigma)$ a folyási függvény, amely $f(\sigma)=0$ esetén egy konvex felületet határoz meg a feszültségi térben. A biztonságos tervezés elengedhetetlen része a képlékeny viselkedés korlátozása, ezért a gyakorlatban kiemelt jelentőséggel bír ezen jelenség skaláris jellemzése és szabályozása.

Ebben a tanulmányban a VEM-alapú szimulációk során számított egyenértékű képlékeny megnyúlás került felhasználásra a vizsgált

összeállítás tartószerkezeti teljesítményének megfelelő jellemzése érdekében. Ez a paraméter egy olyan skalármennyiség, amely az anyagban felhalmozódott képlékeny deformációt írja le, és a következő összefüggéssel adható meg:

$$\overline{\varepsilon}^{pl} = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^{pl} \dot{\varepsilon}_{ij}^{pl}} dt \quad (4)$$

ahol a $\dot{\varepsilon}_{ij}^{pl}$ a képlékeny megnyúlás időfüggő változását leíró tenzor, t pedig az idő. Ezzel a mennyiséggel összefüggésben a T-elem csavarpozíciójának optimalizálási problémája az alábbi matematikai összefüggésekkel írható le, az Eurocode előírásaihoz igazodva:

$$Min: \overline{\varepsilon}^{pl} = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^{pl} \dot{\varepsilon}_{ij}^{pl}} dt \quad (5a)$$

Akövetkezőfeltételek mellett:

$$\overline{\varepsilon}^{pl} \leq \overline{\varepsilon}_{max}^{pl} \quad (5b)$$

$$e \geq 1.2 a \quad (5c)$$

$$p \geq 2.4 d \quad (5d)$$

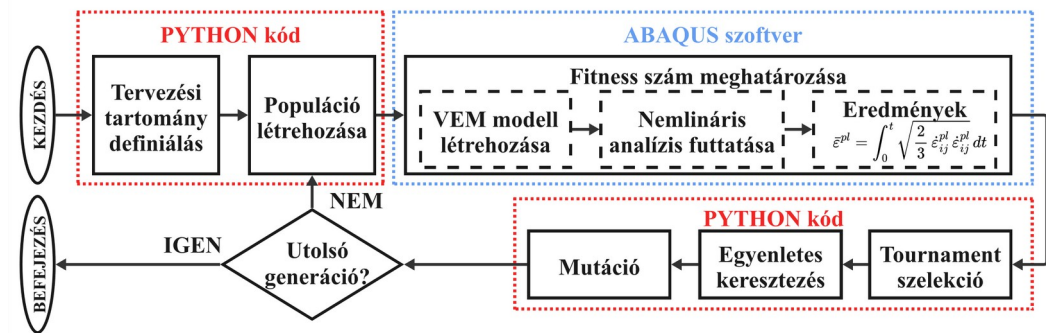
A bemutatott formulák között az (5a) egyenlet a célfüggvényt jelöli, amely az egyenértékű képlékeny megnyúlás minimalizálását hivatott biztosítani adott terhelés mellett. Ezt kiegészítve az (5b) egyenlet a képlékeny alakváltozások korlátozására szolgál, ahol $\overline{\varepsilon}_{max}^{pl}$ a megengedett képlékeny megnyúlást jelöli, aminek értéke ebben a tanulmányban az EN1993-1-5 ajánlása szerint 5%. Továbbá az (5c) és (5d) egyenletek az EN 1993-1-8 szabványon alapuló tervezési kritériumokat határozzák meg, ahol e a csavarfurat középpontjától mért szegélytávolságot, míg p a csavarok közötti tengelytávolságot jelöli.

3. Megvalósítás

A következő fejezet a létrehozott keretrendszer technikai részleteit ismerteti, beleértve az előző fejezetben bemutatott optimalizálási megfogalmazást az (5a)–(5b) egyenletek integrálásával. Ennek megfelelően egy saját fejlesztésű PYTHON-kód készült, amely tartalmazza az automatikus tervezéshez alkalmazott genetikus algoritmust (GA), továbbá összekapcsolásra került az ABAQUS végeselemes szoftverrel a mechanikai számítások elvégzése érdekében.

A megvalósítás egyik alappillére a felhasznált GA, egy széles körben alkalmazott metaheurisztikus optimalizálási módszer, amelyet számos mérnöki probléma megoldására használnak . A természetes evolúció elveiből inspirálódva ez a módszer potenciális megoldások egy populációját értékeli, ahol az úgynevezett fitness érték határozza meg az egyes egyedek minőségét és megfelelőségét. Az optimalizálási folyamat során a genetikus operátorok – szelekció, keresztezés és mutáció – irányítják a keresést, miközben iteratív módon biztosítják a konvergenciát generációról generációra.

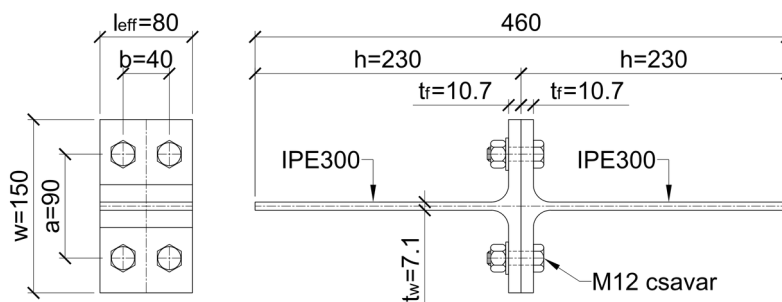
A létrehozott PYTHON programban a fitnessérték megegyezik az egyenértékű képlékeny megnyúlás értékével, amely a beépített genetikus operátorok révén kerül minimalizálásra a tervezési folyamat során. A fitness kiszámítása az ABAQUS szoftver szimulációinak eredményein alapul, amelyhez a kód közvetlen kapcsolaton keresztül csatlakozik. Az így kialakított keretrendszer felépítése a 2. ábrán látható.



2. ábra: A létrehozott keretrendszer működése.

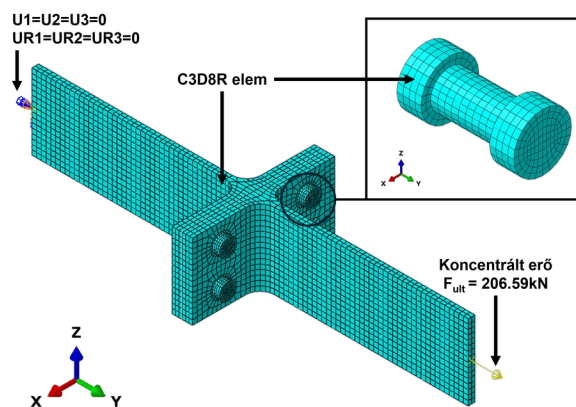
4. Benchmark kapcsolat optimalizálása

A korábban bemutatott keretrendszer működése Bursi és Jaspart által ismertetett benchmark feladaton keresztül került tesztelésre. Ennek megfelelően ez a fejezet a 3. ábrán látható összeállítás numerikus modelljének validálását és optimalizálásának eredményit mutatja be.



3. ábra: A vizsgált benchmark összeállítás.

Az ABAQUS szoftverben létrehozott numerikus modell 8-csomópontos szilárdtest végelemekből (C3D8R) épül fel. Az IPE300-as szelvények esetében az alkalmazott hálóméret általánosan 5 mm , míg a csavaroknál 2 mm , amint az a 4. ábrán is látható, a peremfeltételekkel és terhelési viszonyokkal együtt.



4. ábra: A létrehozott numerikus modell.

A szimuláció során az acél rugalmas-képlékeny anyagmodellje került alkalmazásra izotropikus felkeményedéssel. A legfontosabb anyagjellemzők az 1. táblázatban találhatóak, Bursi és Jaspárt tanulmánya alapján, külön feltüntetve a gerinclemezekre, az övlemezekre, valamint a csavarokra vonatkozó adatokat.

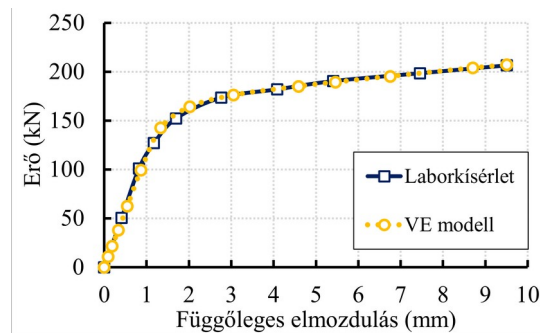
1. táblázat: Az alkalmazott anyagjellemzők.

Alkotóelem	Rugalmassági modulus (N/m^2)	Folyási feszültség (N/m^2)	Szakító feszültség (N/m^2)
Övlemez	240,782	431	787
Gerinclemez	217,130	469	787
Csavar	160,612	893	1025

A csavarozott kapcsolatok valós szerkezeti viselkedésének pontos leírása érdekében elengedhetetlen a különböző alkatrészek közötti súrlódási kölcsönhatások szimulációja. Ennek megfelelően a végeleemes modell „surface-to-surface” érintkezési módszerrel került felépítésre, külön definiálva a tangenciális és normál irányú viselkedést.

A nagy alakváltozások hatásainak figyelembevételéhez geometriailag nemlineáris analízis került alkalmazásra. Az elkészített modellen végrehajtott monoton terhelésű szimuláció eredményei szoros egyezést mutatnak a Bursi és Jaspárt tanulmányában bemutatott kísérleti vizsgálatokkal, amint az

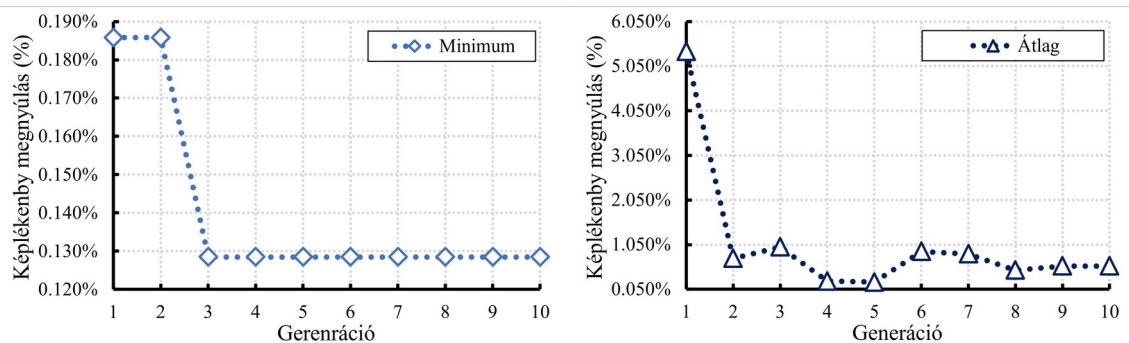
az 5. ábrán is látható. A részletes összehasonlítás alapján a kezdeti merevség eltérése 1.23%-nak, míg a maximális erő eltérése mindössze 0.23%-nak adódott. Továbbá a keletkező egyenértékű képlékeny megnyúlás maximuma 6.31% volt.



5. ábra: A numerikus modell és a kísérleti vizsgálat eredményeinek összehasonlítása.

A validálást követően a csavarpozíciók optimalizálása a korábban ismertetett egyenletek alapján került végrehajtásra. A definiált feltételek figyelembevételével a csavarok helyzetének keresési tartománya a következő korlátoknak megfelelően változhatott: a keresztirányú távolság 57 mm és 120 mm között, 1.00 mm -es lépésekben, míg a hosszirányú távolság 26 mm és 50 mm között, 0.75 mm -es lépésekben lett megadva.

Az optimalizálási folyamat alakulását a 6. ábra szemlélteti, amelyen jól megfigyelhető, hogy a képlékeny deformációk mértéke jelentősen csökkent, jóval az 5%-os határérték alá. Ezt támasztja alá továbbá a 2. táblázat, ahol látható, hogy a kiindulási konfigurációhoz képest az optimális kialakításban a képlékeny megnyúlás értéke elhanyagolható.



6. ábra: Az adott populáció egyedeiben kialakuló maximális képlékeny megnyúlási értékek minimumának és átlagának generációnkénti alakulása.

2. táblázat: A kiindulási és az optimális konfiguráció összehasonlítása

Konfiguráció	Csavarok közötti távolság		Maximális képlékeny megnyúlás
	Keresztirány <i>a</i>	Hosszirány <i>b</i>	
Kiindulási	90.0 mm	40.0 mm	6.31 %
Optimális	58.0 mm	40.3 mm	0.13 %

5. Konklúzió

Ebben a tanulmányban egy olyan optimalizálási keretrendszer kerül bemutatásra, amely a csavarozott T-elem képlékeny alakváltozásainak minimalizálását célozza az Eurocode előírásaival összhangban, a csavarpozíciók optimális meghatározásán keresztül, a biztonságos és gazdaságos tervezés elősegítése érdekében. A cél megvalósításához egy nemlineáris végelem-alapú kód lett kifejlesztve, amely figyelembe veszi a rugalmas-képlékeny anyagviselkedést, a nagy alakváltozásokat, valamint a kontakt kölcsönhatásokat. A program PYTHON nyelven készült, az ABAQUS végelelemes szoftver felhasználásával. Továbbá, a csavarok optimális elhelyezésének meghatározása érdekében egy genetikusan alapuló algoritmus került beépítésre a kódba, lehetővé téve az automatikus tervezést.

A javasolt módszertan tesztelése egy benchmark összeállításon történt meg. Az alkalmazott keretrendszer eredményei azt mutatják, hogy pusztán a csavarok elrendezésének optimalizálásával jelentős mértékű képlékeny

alakváltozás-csökkentés érhető el. Ez az eredmény alátámasztja a módszer hatékonyságát és gyakorlati alkalmazhatóságát, amely a szerkezeti biztonság növelésén keresztül hozzájárul a fenntarthatósághoz, anélkül, hogy többlet anyagfelhasználásra lenne szükség.

Irodalomjegyzék

- [1] Lacey AW, Chen W, Hao H, Bi K. Review of bolted inter-module connections in modular steel buildings. *Journal of Building Engineering* 2019;23:207–19. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.01.035>.
- [2] Tang Z, Li Z, Wang T, Lu D, Tan Y. PDEM-based multi-component and global reliability evaluation framework for steel tubular transmission towers with semi-rigid connections. *Eng Struct* 2023;295. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116838>.
- [3] Zhang Y, Zhan J, Liao Y, Ding W, Tan S, Liu Y. Experimental and numerical studies on hybrid bolted connection of steel box girders: Bending mechanism. *Eng Struct* 2024;321. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118986>.
- [4] European Committee for Standardisation. EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints. 2005.
- [5] European Committee for Standardisation. EN 1993-1-5: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-5: General rules - Plated structural elements. 2006.
- [6] Byfield M, Mudalige W, Morison C, Stoddart E. A review of progressive collapse research and regulations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings* 2014;167:447–56. <https://doi.org/10.1680/stbu.12.00023>.

- [7] Wang X, Wang P, Chen W. Test on progressive collapse of steel moment-resisting frame with upper-and-lower flange angle steel connection. *Structures* 2024;68. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107171>.
- [8] Grubits P, Cucuzza R, Gosztola D, Domaneschi M, Szép J, Movahedi Rad M. Numerical Modeling of Multi-Pass Arc Welding Processes: Integration with Experimental Validation for Distortion analysis and Characterization. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, vol. 59, IOS Press BV; 2024, p. 248–54. <https://doi.org/10.3233/ATDE240552>.
- [9] Grubits P, Cucuzza R, Habashneh M, Domaneschi M, Aela P, Movahedi Rad M. Structural topology optimization for plastic-limit behavior of I-beams, considering various beam-column connections. *Mechanics Based Design of Structures and Machines* 2024. <https://doi.org/10.1080/15397734.2024.2412757>.
- [10] Bursi OS, Jaspart JP. Benchmarks for Finite Element Modelling of Bolted Steel Connections. *J Construct Steel Res* 1997;43:17–42.
- [11] Al-Khatib Z, Bouchair A. Analysis of a bolted T-stub strengthened by backing-plates with regard to Eurocode 3. *J Constr Steel Res* 2007;63:1603–15. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.01.012>.
- [12] Wang W, Fang H, Wang Z. Comprehensive studies on the behaviors of high strength steel T-stubs with thin-walled flange at elevated temperatures. *Thin-Walled Structures* 2023;190. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110998>.
- [13] Huang X, Li R, Zhang X, Ge J, Zhao J. Ultra low cycle fatigue behavior of Q690 high-strength steel welded T-stub joints: Experiments and fracture prediction analysis. *Thin-Walled Structures* 2023;191. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111054>.

- [14] Kameshki ES. Discrete Optimum Design of Steel Frames by Genetic Algorithm. Journal of King Saud University - Engineering Sciences 2003;15:217–33. [https://doi.org/10.1016/S1018-3639\(18\)30772-4](https://doi.org/10.1016/S1018-3639(18)30772-4).
- [15] Kramer O. Genetic Algorithm Essentials. Springer International Publishing; 2017. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-52156-5>.