

TDK DOLGOZAT

A napfoltszámgörbe vizsgálata a napciklus-előrejelzések optimalizálása érdekében

Baumann Kristóf

Fizika BSc., csillagász szakirány, III. évfolyam



Témavezető:

DR. PETROVAY KRISTÓF

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM

TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR

FIZIKAI ÉS CSILLAGÁSZATI INTÉZET

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar

Budapest

2024

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
1.1. Napfolt-relatívszámgörbe	3
1.2. Napciklusok megnyilvánulása a napfolt-relatívszámgörbében	3
2. Felhasznált adatok	4
3. Módszerek, eredmények	4
3.1. Simítási módszerek	5
3.1.1. Futóátlag	5
3.1.2. Gauss-szűrő	5
3.2. Minimumok pontatlanságának kiküszöbölése	6
3.3. Relatív előrehaladottság	10
3.3.1. Felszállóág	10
3.3.2. Leszállóág	10
3.4. A görbemeredekség ellenőrzése	11
3.5. Más simítási módszerekkel kapott adatsorok vizsgálata	12
3.5.1. Fix napfoltszámkeresés	12
3.5.2. Relatív értékek keresése	14
3.6. Szuperponált epochák módszere	16
4. Konklúzió, diszkusszió	19
Hivatkozások	20

1. Bevezetés

A minket körülvevő fizikai környezet megismerésének fontos motivációja a megértés vágya és a kíváncsiság mellett az előrejelzés praktikus haszna. Ennek a fizikai környezetnek szerkesztése a Nap, így annak működésének megértése és előrejelzése éppúgy érdekünkben áll és fontos, mint például az időjárás előrejelzése. Bár a földi élet szempontjából a Nap (majdnem) állandónak tekinthető, a Föld mágneses burkán kívül mind egyre bővülő űrtechnológiai állomá-nyunk (űrszondák, műholdak, stb), mind az asztronauták és egyéb élőlények erősen ki vannak téve a Nap hatásának, amely az űridőjárás szempontjából már egyáltalán nem tekinthető állandónak. Ahhoz, hogy felkészülhessünk az ezeket az eszközöket és élőlényeket érő hatásokra, és hogy megvédhessük őket, fontos megpróbálni előrejelezni a Nap működését. Jelen dolgozatban predikciót nem adok, azonban az előrejelzés módszerét hatékonyabbá igyekszem tenni, empirikus megfontolások nyomán, amihez a napfolt-relatívszámgörbét fogom használni.

1.1. Napfolt-relatívszámgörbe

Európában a korai 17. század óta, azaz a teleszkóp elterjedése óta tudunk a napfoltokról. A napfoltcsoportok számának periodikus változását először 1844-ben Schwabe írta le. Ezt követően 1849-ben Rudolf Wolf bevezette a napfolt-relatívszámot (ezután általában csak napfoltszám), az alábbi módon:

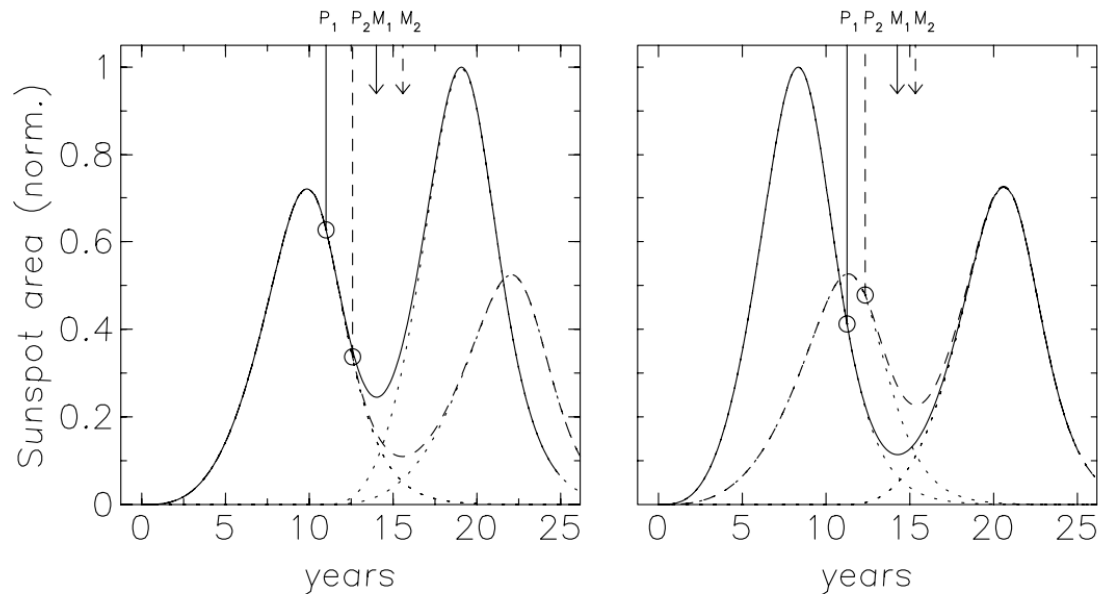
$$S_N = k[(10 \times G) + S] \quad (1)$$

ahol k a megfigyelőre jellemző korrekciós faktor, G a napfoltcsoportok, míg S a csoportokon belüli egyes napfoltok száma. Régebbi feljegyzések alapján Wolf visszamenőleg 1749-ig kiszámolta a napfolt-relatívszámot, így 1749 januárja óta (majdnem) folyamatos havi felbontású napfoltszámadatsorral rendelkezünk, hála a Wolfot követő csillagászoknak is. Ma ezt a feladatot a brüsszeli Belga Királyi Obszervatórium látja el. Ez az adatsor az elsőszámú és legfontosabb adatforrásunk a Nap aktivitásáról, mert bár nem ez a legpontosabb mutató, de ez áll rendelkezésre a leghosszabb ideje. [3][2]

1.2. Napciklusok megnyilvánulása a napfolt-relatívszámgörbében

A napfoltszámgörbét havi átlagértékek formájában szokás megadni, mivel a Napnak egyszerre csak egyik oldalát látjuk és a Carrington-periódus körülbelül 27 napos periódusával összemérhető ez az időtartam. A görbében egyértelműen látható egy periodicitás, amelyet megfeleltethetünk a napciklusok váltakozásának. Az egyeztetés azonban nem pontos, ugyanis az egyes napciklusok átfednek, és így a minimum idején mért napfoltszámérték az előző ciklus végét és a következő elejét egyaránt tartalmazni fogja, így a napfoltszámgörbe minimuma és egy adott ciklus kezdete nem fog egybeesni. [4] Ráadásul a vizsgált 11 éves ciklus nagyjából állandó hosszából következik, hogy minél erősebb egy adott ciklus, annál meredekebb kell, hogy legyen a görbéjének fel- és leszállóága. Ezt csak megerősíti a Waldmeier-szabály, amely alapján egy adott napciklus napfoltszámgörbéjének minimuma és maximuma között eltelt idő fordítottan arányos a maximumban felvett napfoltszámértékkel, viszont így minimum idején

nem lehet megmondani, hogy pontosan mikor kezdődött az új napciklus és ami elsősorban érdekes, hogy mekkora lesz a maximumbeli értéke és azt mikor éri el. Ezt a bizonytalanságot egy másik szemszögből, de jól szemlélteti az 1. ábra is[5]:



1. ábra. A cikluskezdetek bizonytalanságának megmutatkozása a minimumbeli napfoltterületben. (R. Cameron, M. Schüssler, 2007)

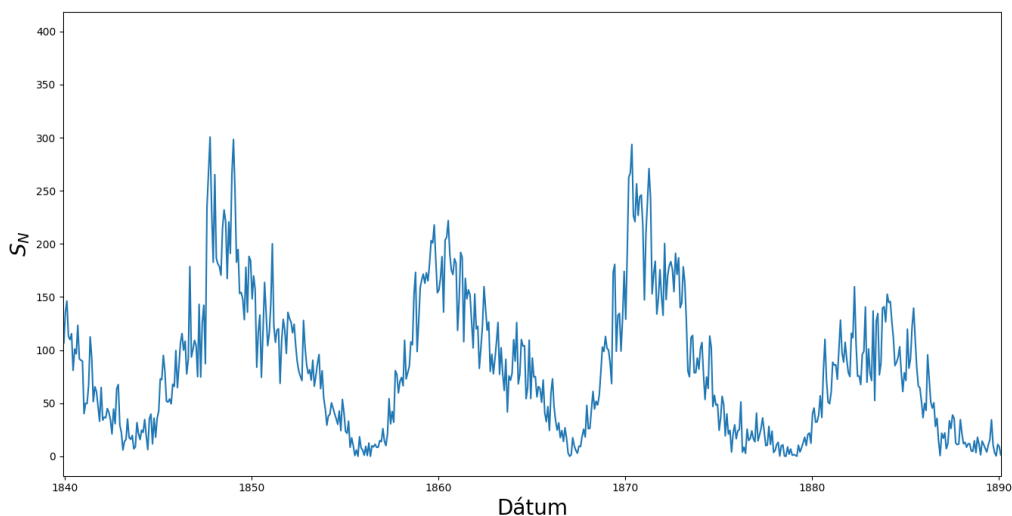
Ezért ebben a dolgozatban inkább a görbének a fel- és leszállóágát vizsgálom különböző módszerekkel, amelyeket a 3. részben részletezek. Ez azért lehet célravezető, mert egy ilyen módon megadott, noha még mindig empirikus alapokon nyugvó görbeparaméterezés ugyanúgy alkalmazható minimum idején (vagy nem sokkal azután) is, azonban a minimumok bizonytalansága már sokkal kevésbé lesz zavaró tényező.

2. Felhasznált adatok

A dolgozatban a WDC-SILSO adatsorait használtam, amelyeket a Belga Királyi Obszervatórium tart fenn és frissít [1]. Itt havi felbontásban található meg az eredeti, tehát Wolf k-faktorát 1-nek vevő napfolt-relatívszám 1749 óta, illetve elérhető egy 13 hónapos futóátlaggal simított változata is az adatsornak. Minden adatsor 1749 januárjától napjainkig tartalmazza a napfolt-relatívszámértékeket, amely 24 teljes napciklust és a jelenlegi első felét jelenti. A 2. ábrán ábrázoltam az előbbi, simítatlan adatsornak egy részletét.

3. Módszerek, eredmények

A napfolt-relatívszámgörbét többféleképpen vizsgáltam. A görbének az 1.2.-es részben leírt pár tulajdonságát az imént említett új megközelítésből nyert eredményekre is ellenőriztem.



2. ábra. A havi napfolt-relatívszám (1840-1890)

3.1. Simítási módszerek

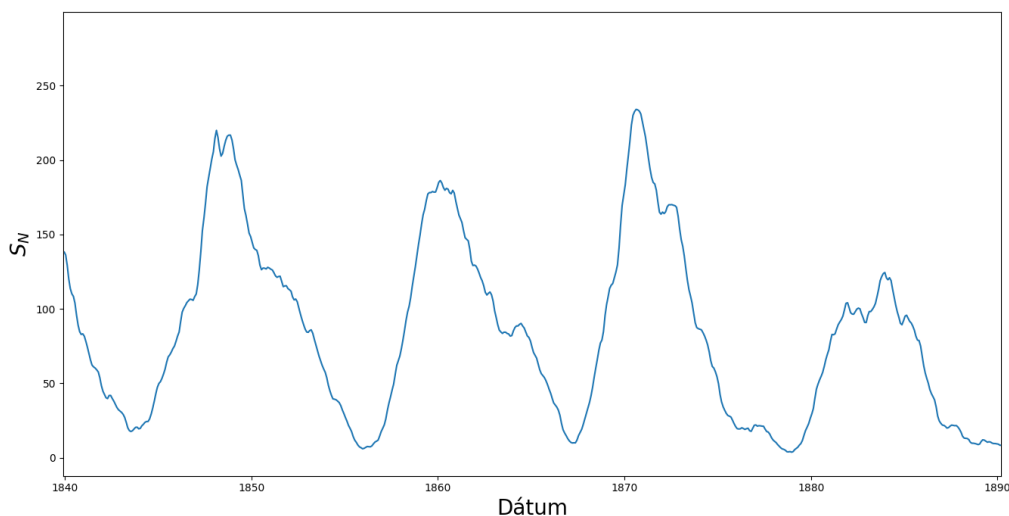
A napi napfoltszámadatokat kiátlagolva kapott havi felbontású napfoltszámadatsor nagyfrekvenciás fluktuációi megnehezítik az empirikus módszerek használatát, ezért segít, ha azt valamilyen módszerrel simítjuk. Erre az általános módszer a 13-havi futóátlag, de léteznek más megközelítések is, amelyeket lejjebb részletezek.

3.1.1. Futóátlag

A 13-havi futóátlag az egyik általánosan használt simítási módszer [4], mert ekkora időablakot használva az eredmény kényelmesen használható a hosszabb periódusú változások vizsgálatára. Számolásakor az adott hónap a 13 hónapos intervallum közepén helyezkedik el, az első és utolsó hónap pedig feleakkora súllyal van beleszámítva. Az így kapott görbe egy metszete a 3. ábrán látható. Ez a görbe alkalmasabb a napciklusok tanulmányozására. Hibája viszont, hogy az adatsor első és utolsó 6 hónapját nem fogjuk tudni használni, illetve bár a görbe nagyobb időskálán megmutatkozó tulajdonságainak vizsgálata könnyebb lett a simítás után, de még mindig megfigyelhetők kettős csúcsú maximumok és másodlagos csúcsok a fel- és leszállóágak oldalában, amik releváns információval szolgálhatnak az egyes napciklusok fizikai hátterének tanulmányozásakor, azonban jelen dolgozatban csak zavaró tényezők. Ettől függetlenül ezt az adatsort is használni fogom a továbbiakban, mert a fel- és leszállóágakban lévő egyenetlenségek kiküszöbölhetőek.

3.1.2. Gauss-szűrő

A 13-havi futóátlag vételekor tehát az 1. és a 13. hónapban feleakkora súllyal vesszük a napfoltszámértékeket, viszont amint az látható, az így kapott adatsor tartalmazni fog kis egye-



3. ábra. A 13-havi futóátlaggal simított napfolt-relatívszám-görbe (1840-1890)

netlenségeket, a magasabb frekvenciájú változásokat nem sikerült tökéletesen kiszűrni. Jobb eredményt érhetünk el egy módosított Gauss-eloszlást követő szűrővel, amelyet úgy módosítunk, hogy az eloszlás és első deriváltja a vizsgált tartomány végpontjaiban 0 legyen (azaz a tartományon kívüli értékek 0 súllyal számítsanak bele az átlagba, de az eloszlás továbbra is gauss-i legyen):

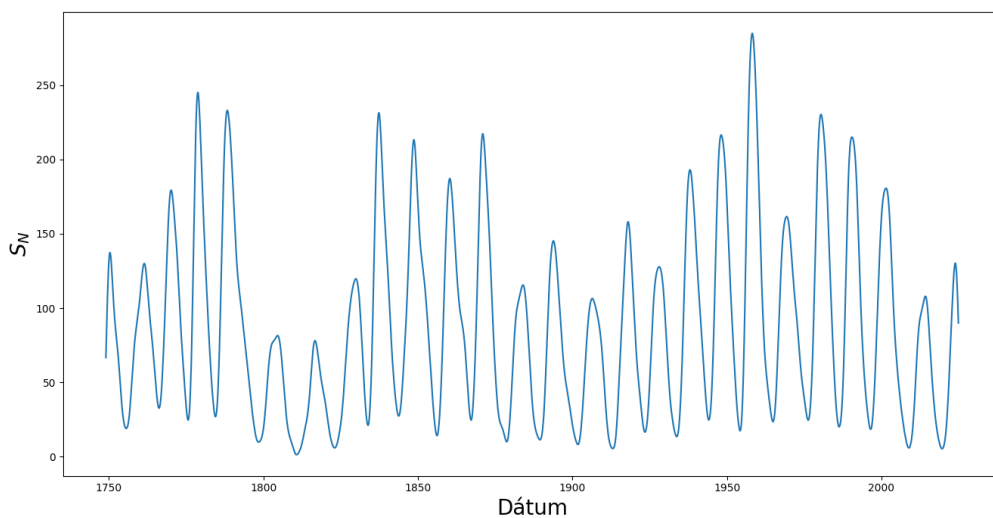
$$W(t) = e^{-t^2/2a^2} - e^{-2}(3 - t^2/2a^2) \quad (2)$$

ahol a a félértékszélesség. [3] Itt $a = 12$ hónap félértékszélességű eloszlást fogok alkalmazni, mert ilyen érték mellett kaptam a célnak legmegfelelőbb ábrát. Konkrétabban még nem túl nagy az információvesztés, de a magasabb frekvenciájú változásokat már sikerült vele kiszűrni. Ezzel a szűrővel az adatsorunk így fog kinézni:

3.2. Minimumok pontatlanságának kiküszöbölése

A minimumok bizonytalan mivolta miatt jogos feltételezni, hogy az egymást követő minimumok között eltelt időtartamok szórása (ezentúl az egyszerűség kedvéért csak "szórása") nagyobb, mint az indokolt lenne a napsiklusok enyhén ingadozó (9-13 év)[4] periodicitása miatt. Ezért először azt vizsgáltam, hogy a minimumok helyett, külön-külön a le- és felszállóágon milyen szórása lesz adott napfolt-relatívszámértékeknek. Mindez azért fontos, mert ha egy jelentősen kisebb szórású értéket találok, akkor az a 3.6. részben tárgyalt módszer hatásfokát nagyban javíthatja.

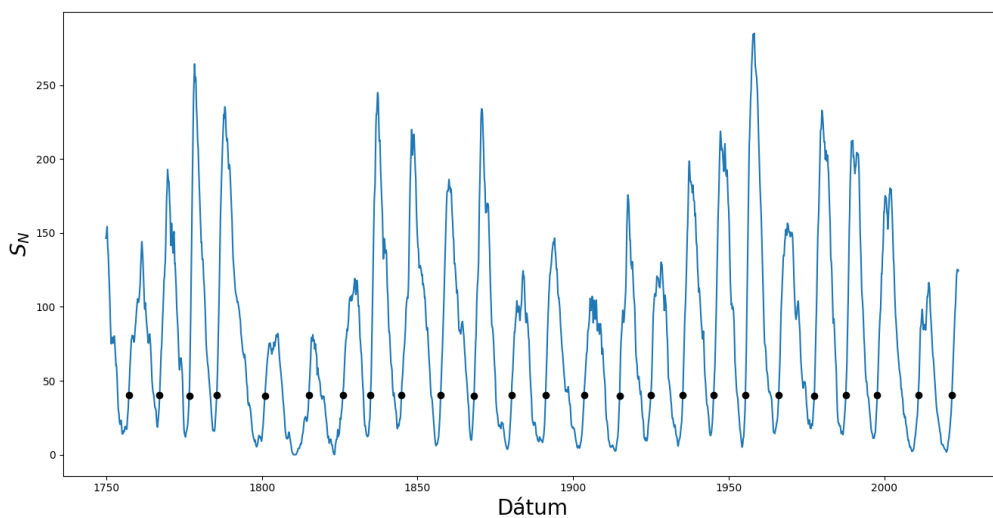
A most figyelembe vett napfolt-relatívszámértékeknek két fontos tulajdonságát kerestem: praktikus okokból legyen egész szám, és minden 1749 óta feljegyzett napsiklus vegye fel. Ez alapján a napfoltszámok alábbi intervallumát vettem: $21 \leq S_N \leq 70$. A napfoltszám azonban szinte sosem egész szám és még a simított görbében is egymást követő 2 hónapban felvett értékek



4. ábra. A Gauss-szűrővel simított napfolt-relatívszámgörbe (1749-2024)

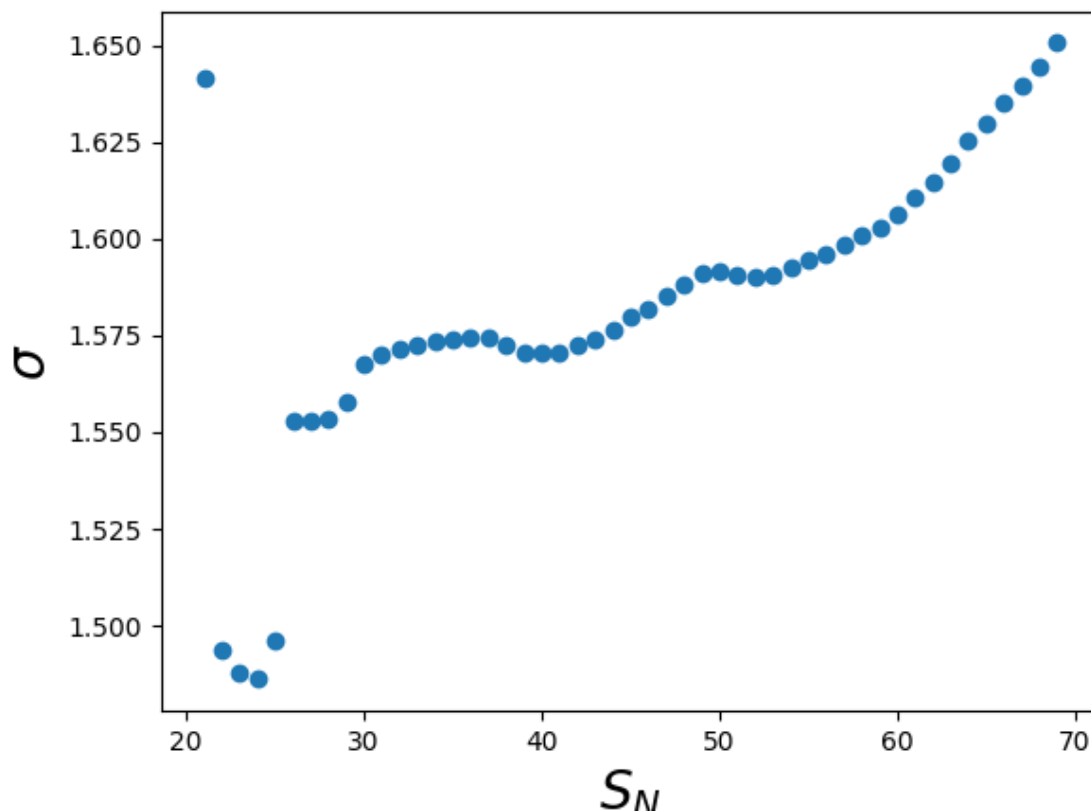
is merőben eltérhetnek, (azaz nagyobb a különbség, mint 1) mert ritka az adatsor, így lineárisan interpoláltam, hogy a fix napfoltszámértékek keresésekor az egyes ciklusokban megtalált napfoltszámértékek nagyon ne különbözzenek. Először a 13-havi futóátlaggal simított adatsort használtam.

Először a felszállóágon kerestem meg a megfelelő napfoltszámértékeket. Például $S_N = 40$ esetében ez így néz ki:



5. ábra. $S_N = 40$ -es értékek a felszállóágon

A fent említett napfoltszám tartományon minden értékre kiszámoltam a szórást (amely tehát az egymást követő azonos napfoltszámértékek felvétele között eltelt időtartamok szórása évben), ennek a napfoltszám függvényében való alakulását tartalmazza a 6. ábra.

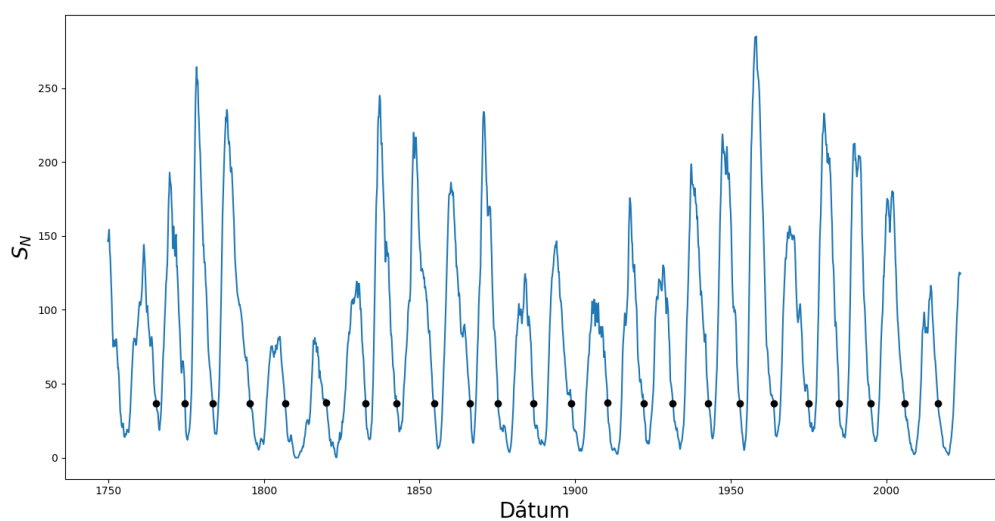


6. ábra. Szórások a napfoltszámérték függvényében a felszállóágon

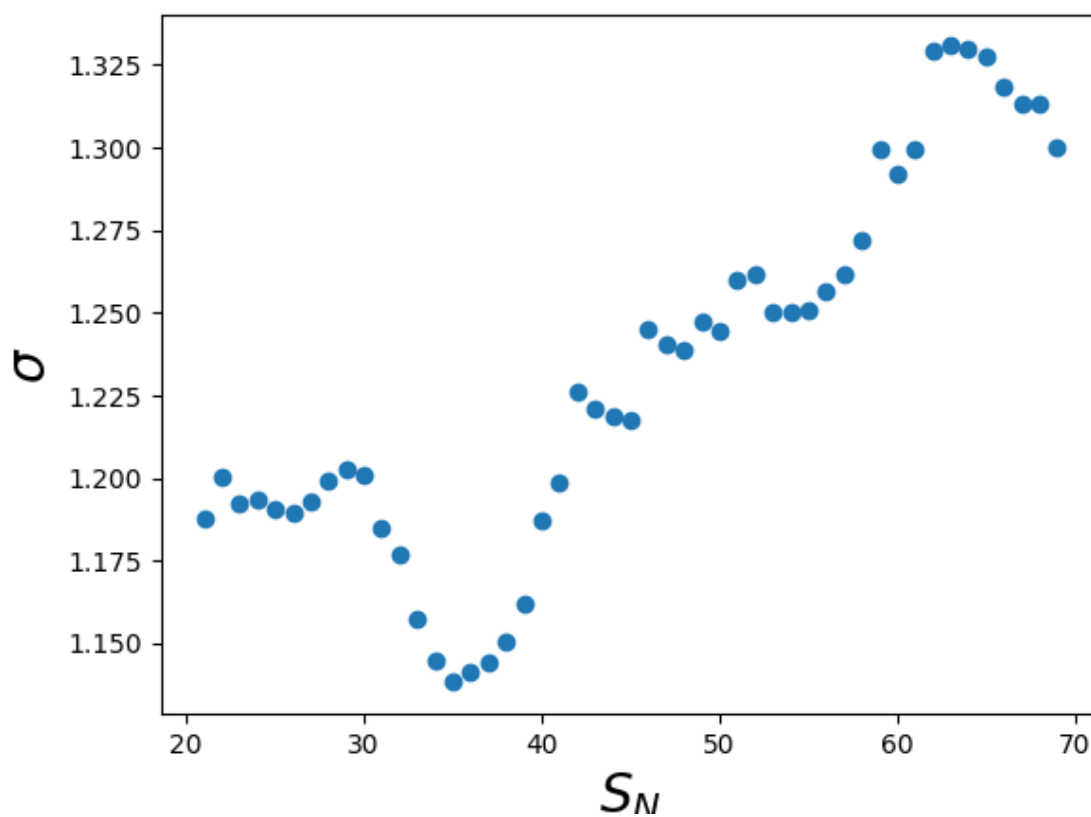
Az első öt kiugró érték egy, a hatodik ciklusban található egyenetlenség miatti kissé hibás illesztés eredménye, azonban esetünkben ez irreleváns, mert a minimumok 1,15 éves szórásánál még így is jelentősen nagyobb értékeket kaptunk, és így nem fogjuk tudni használni ezt a megközelítést egy jobb előrejelzés megadására.

Ezután ugyanezt megnéztem a leszállóágra is, erre egy példa a 7. ábra.

Az előzőhöz hasonlóan itt is ábrázoltam a szórásokat évben a napfoltszámértékek függvényében:



7. ábra. $S_N = 40$ -es értékek a leszállóágon



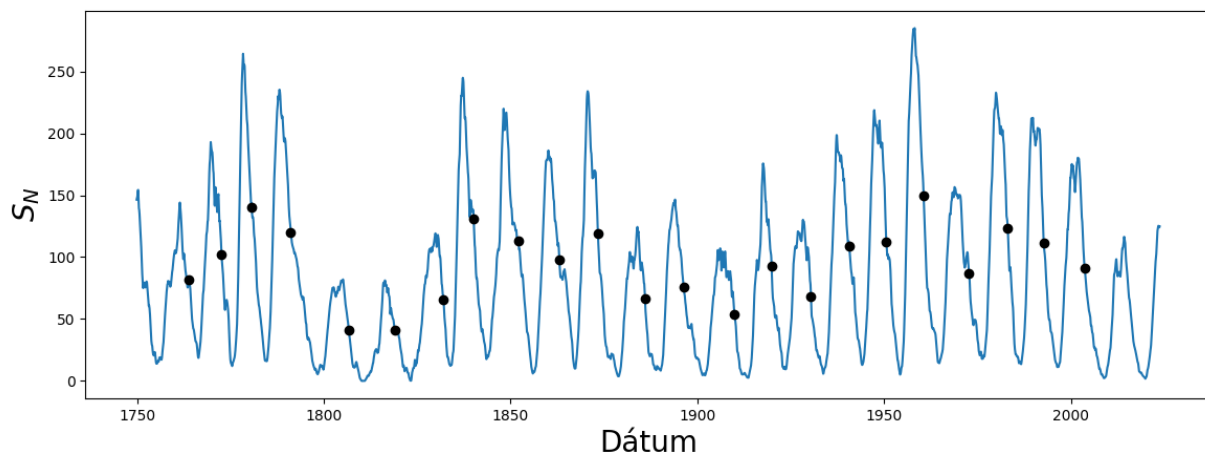
8. ábra. Szórások a napfoltszámérték függvényében a leszállóágon

Megfigyelhető, hogy leszállóágon $S_N = 35$ -nél minimuma van a szórásoknak, értéke 1,14 év. Ez már ígéretesebb, mert bár a minimumok 1,15 éves szórásához képest ez a megközelítés sem ad szignifikánsan jobb eredményt, de egyenértékűt igen.

Most azonban inkább érdemes megvizsgálni más szempontból is a görbét egy jobb paraméter megtalálásának reményében.

3.3. Relatív előrehaladottság

A továbbiakban fix napfoltszámértékek helyett – ismét külön a fel- és leszállóágon vizsgálódva –, a napciklusok azon értékeinek szórását keresem meg, amelyek a napciklusukban annak a ciklusnak egy adott hányadánál vannak. Magyarul egy adott ciklus maximuma és minimuma közötti napfoltszám-tartomány 1- és 95 százalék közötti értékeire nézem meg az fellebbiekhez hasonló módon a szórást minden ciklusra. Az illesztésre egy példát tartalmaz a 9. ábra, 50%-os arány mellett, leszállóágra.



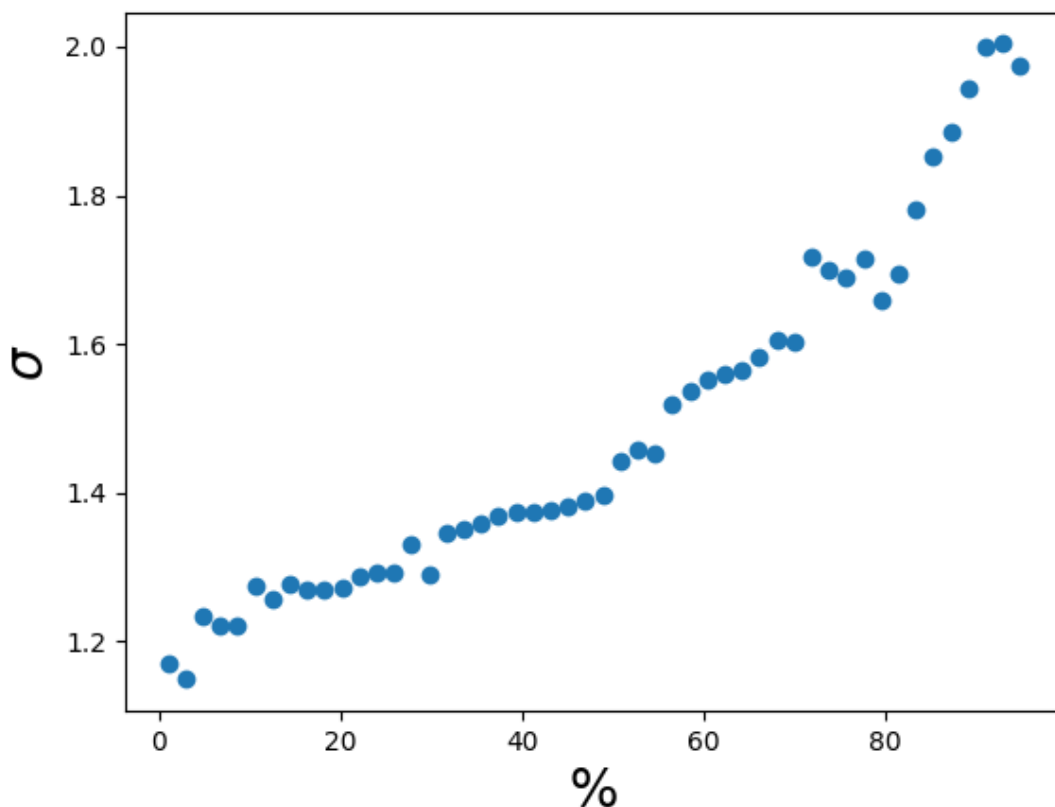
9. ábra. 50%-os leszállóági illesztés

3.3.1. Felszállóág

A kiválasztott pontok időbeli szórása (szokásosan évben) a 10. ábrán foglaltak szerint alakult a felszállóágon a minimum és maximum közötti tartomány nagyságához képesti százalékos arány függvényében.

3.3.2. Leszállóág

A fentivel megegyező módszerrel kapott eredmény a leszállóágra található a 11. ábrán. Mindkét esetben az figyelhető meg, hogy minél közelebb vagyunk a minimumhoz, annál kisebb a szórás értéke, amely részben várható volt, hiszen a minimumok között eltelt idő szórása volt az eddigi legjobb paraméter. Mivel a minimumoknál kicsit nagyobb értékektől kezdve vizsgáltam az adatsort, így a kapott szórások mind a minimumok szórásánál nagyobb értékek lettek, tehát



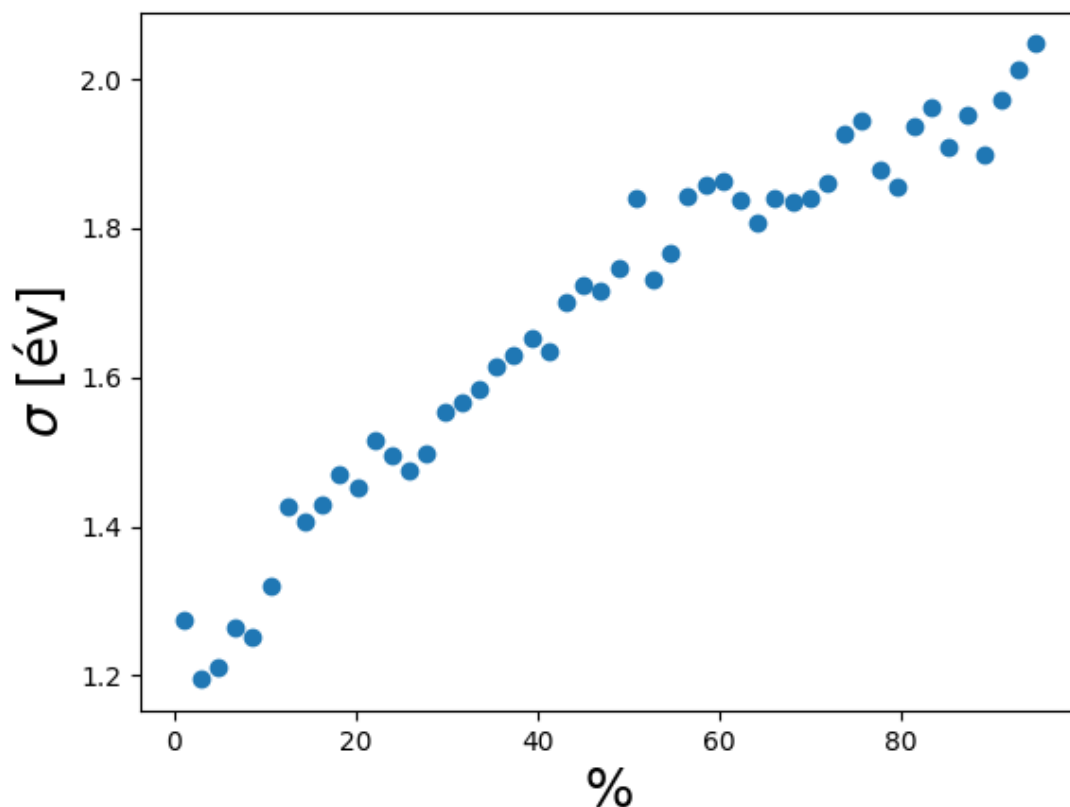
10. ábra. Felszállóági relatív értékek szórása

ez a módszer sem célravezető, így a továbbiakban a fix $S_N = 35$ -ös napfoltszámhoz tartozó eredményt fogom használni.

3.4. A görbemeredekség ellenőrzése

Érdekes megvizsgálni, hogy az erősebb ciklusokhoz tartozó görbék gyorsabb emelkedése (és közvetve a Waldmeier-szabály) miatti, a minimumok és a cikluskezdetek időpontja közötti bizonytalanság megjelenik-e az új megközelítésből nyert eredményekben is. Ehhez a leszállóágakon $S_N = 35$ -ös érték felvétele és a következő ciklus minimuma között eltelt idő, illetve azon ciklus maximumbeli értéke közötti viszonyt vizsgáljuk. A 12. ábrán ezen két mennyiség közötti összefüggés látható.

A negatív meredekségű illesztett egyenes szemlélteti az ábrán kirajzolódó tendenciát, amely megnyugtatóan igazolja az elvárt viselkedést. Számszerűsítve, a két adatsor közötti korrelációs együttható értéke $R = -0,77, 1,6 \cdot 10^{-5}$ -es p-értékkel, amely magas szignifikanciaszintre utal, röviden szignifikáns. Ez tehát azt jelenti, hogy erősebb következő ciklus esetén a minimum is hamarabb követi az előző ciklus végét (függetlenül attól, hogy az milyen erősségű volt), mint egy gyengébb következő ciklus esetében. Ez egy egyértelmű bizonyítéka a Waldmeier-szabály



11. ábra. Felszállóági relatív értékek szórása

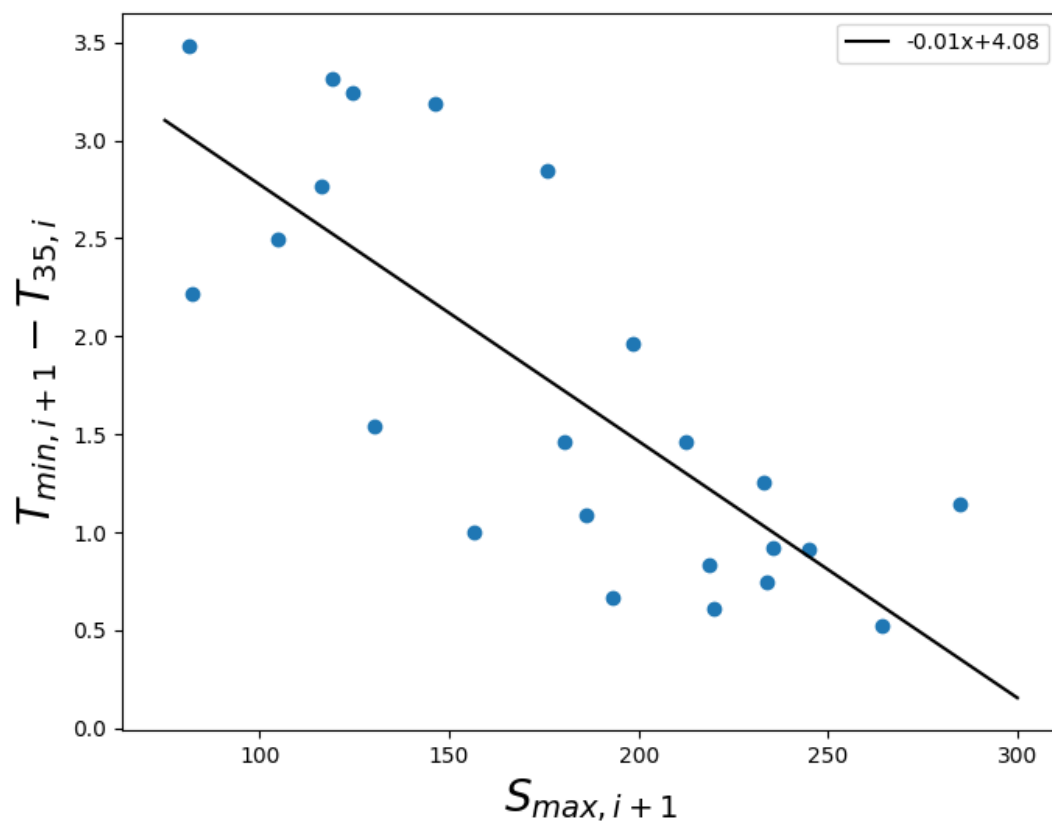
teljesülésének.

3.5. Más simítási módszerekkel kapott adatsorok vizsgálata

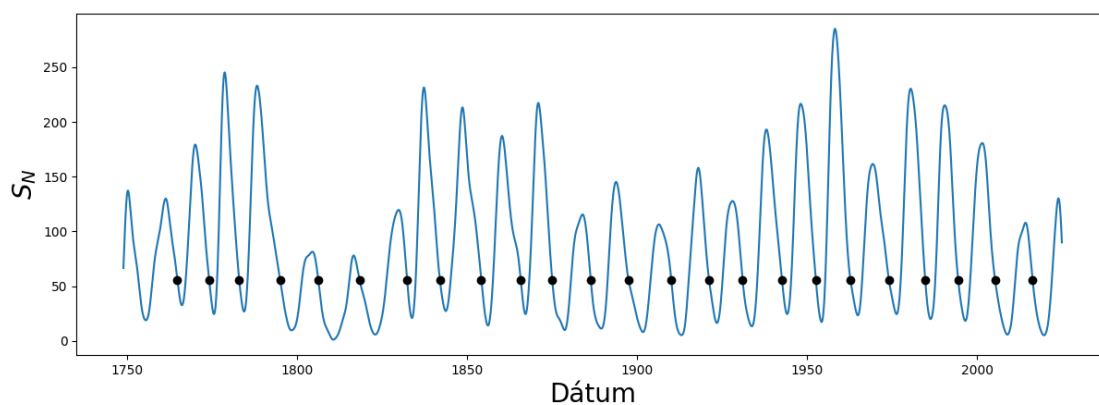
A 2. részben tárgyalt simítási módszerek közül mindeddig a 13-havi futóátlaggal simított adatsort használtam. A következőkben az eddigiekkel megegyező vizsgálati módszereket fogom alkalmazni a 3.1.2. részben kapott adatsorra. A szűrőt 12 hónapos félértékszélességűnek vettem. Sokkal nagyobb érték mellett már a görbe nagyobb léptékű struktúrái is gyöngülnek, míg kisebb érték mellett még találhatóak lesznek benne zavaró egyenetlenségek. További előnye ennek a simításnak, hogy a teljes adatsor használható lesz, nem kell levágni az első és utolsó 6 hónapot.

3.5.1. Fix napfoltszámkeresés

A szűrő miatt mind a minimumok, mind a maximumok lekerekítettebbek lettek, így a minimumok napfoltszámértéke magasabb, míg a maximumoké alacsonyabb lett. Emiatt a vizsgált napfoltszámérték-tartomány: $33 \leq S_N \leq 70$. Az adatsorra és a keresésre egy példát tartalmaz a 13. ábra $S_N = 55$ keresett napfoltszámérték mellett.

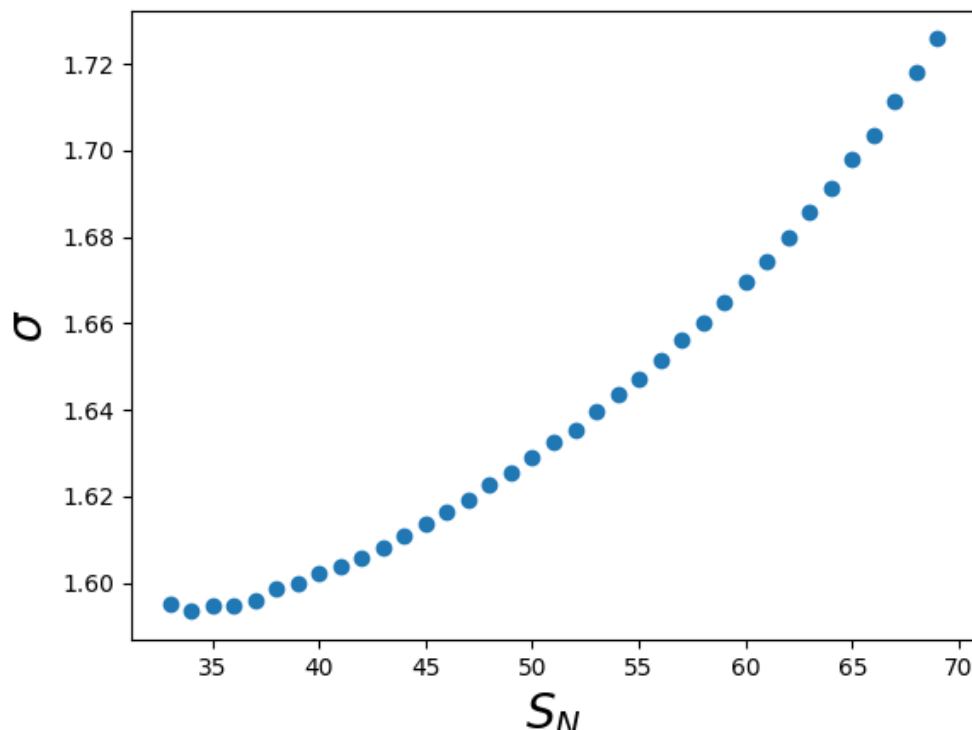


12. ábra. A következő minimumoktól vett időbeli távolság a következő maximumok értékének függvényében



13. ábra. Leszállóági keresés a simított adatsoron

Először ismét a felszállóágot vizsgáltam, a szórások itt így alakultak:



14. ábra. Felszállóági értékek szórása

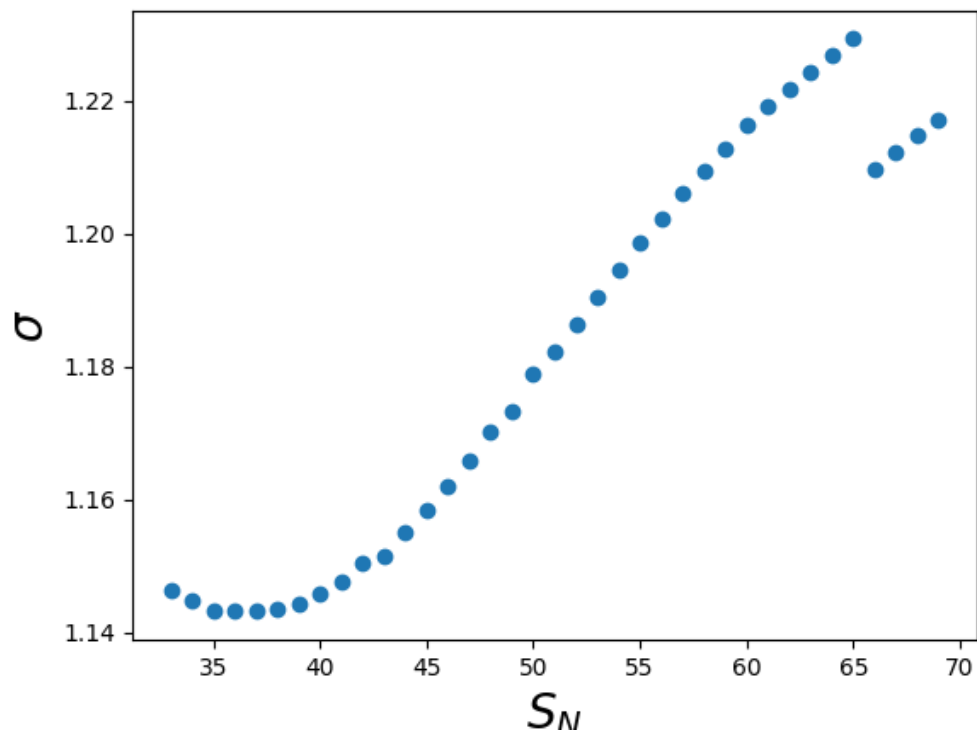
A korábbi eredményekkel megnyugtatóan egyezik, annyi különbséggel, hogy a simább adatsor miatt a különböző napfoltszámértékek szórásai között is így kisebb lesz a különbség, folytonosabbnak látszik az ábra. Ez minden ezt követő ábrára is éppúgy igaz lesz.

A leszállóágon a 15. ábrán foglaltak szerint alakult a napfoltszámértékek szórása.

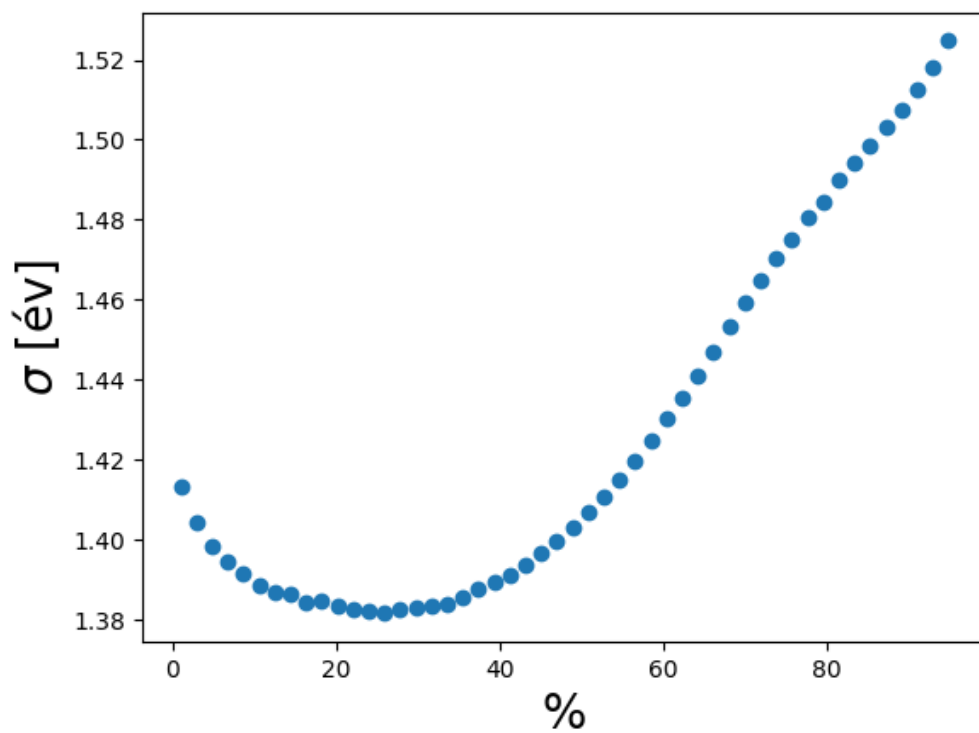
A minimális szórás itt is $S_N = 35$ -ös érték mellett található, bár $S_N = 37$ -nél is hasonlóan alacsony, értéke majdnem megegyezik a futóátlaggal simított adatsorból nyert szórással, így új eredménnyel nem szolgál, viszont megerősítést ad.

3.5.2. Relatív értékek keresése

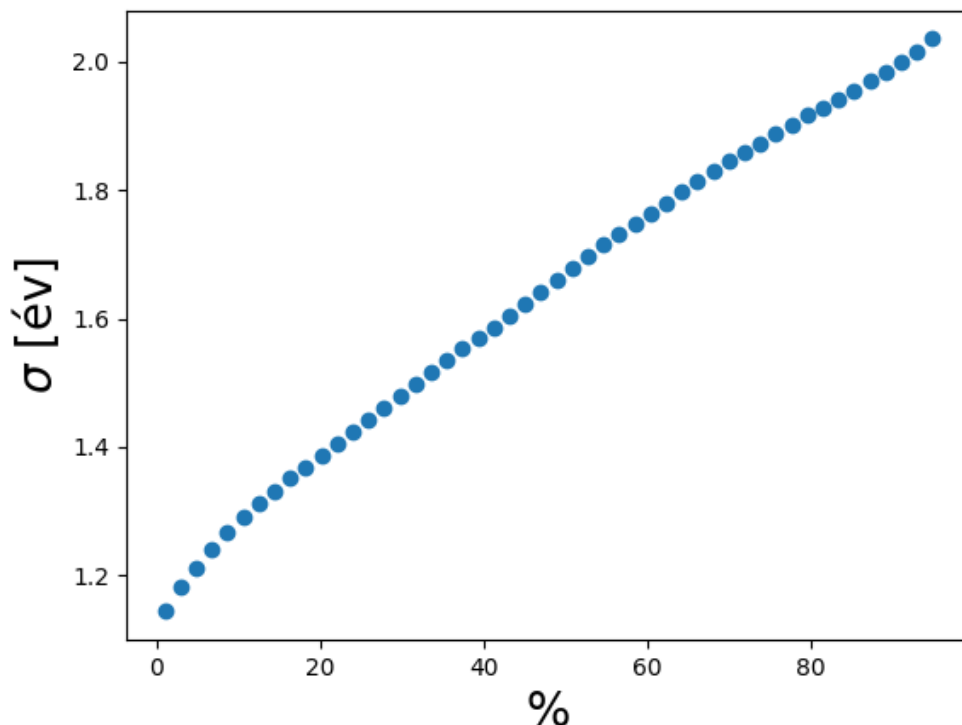
A 3.3. részben leírt módon ellenőriztem erre az adatsorra is, hogy a ciklusoknak maximális napfoltszámának adott hányada milyen szórással található meg. Először a felszállóágra végeztem el, a kapott eredmény a 16. ábrán, míg a leszállóágra a 17. ábrán látható.



15. ábra. Leszállóági értékek szórása évben



15
16. ábra. Felszállóági keresés



17. ábra. Leszállóági keresés

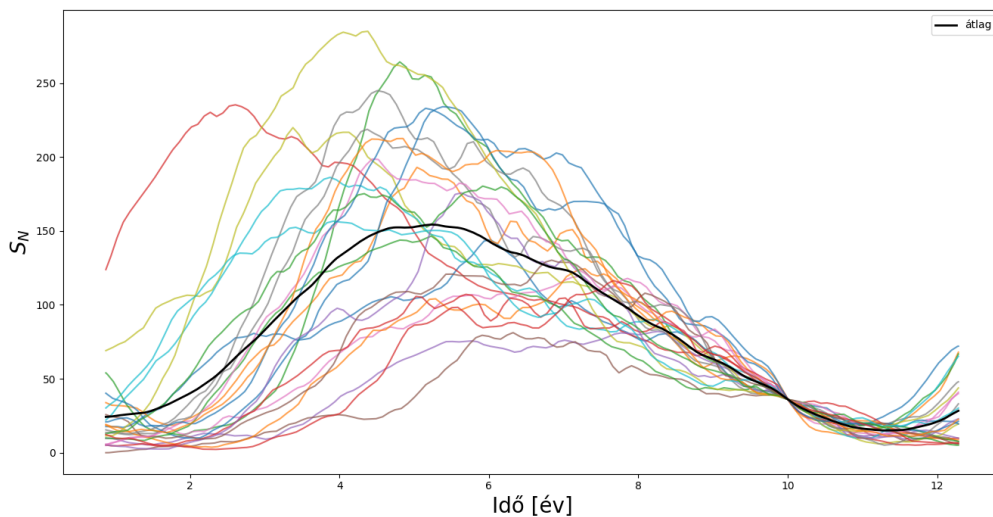
A korábbi részben kapott eredményekhez nagyon hasonlóak, szintén alkalmasak megerősítésnek, azonban új eredménnyel nem szolgál egyik sem.

3.6. Szuperponált epochák módszere

Az előző fejezetekben kapott eredmények önmagukban nem elegendőek, illetve nem praktikusak előrejelzés megadásához, hiszen általában a vizsgált paraméterek értékét már csak a ciklus egy előrehaladottabb állapotában tudjuk megismerni. Ahhoz, hogy ebből egy általánosan használható előrejelzési módszert kapjunk, a szuperponált epochák módszere alkalmazható. A szuperponált epochák módszere lehetőséget ad a napfoltszámgörbék általános jellemzésére, és amelynek eredménye már közvetlen előrejelzést tesz lehetővé. Hátránya, hogy nem pontos, és mivel az újonnan kapott eredmények alapján nem találtuk a minimumnál jelentősen kisebb szórást a napfoltszámgörbének, ezért hatékonyságában növelni nem lehet a módszert egyelőre, viszont vizsgálatra érdemes.

A módszer lényege, hogy egy kiválasztott pontnál a ciklusokat egymásra hajtogatva egy görbesereget kapunk, amelyet felosztva időbeli és/vagy napfoltszámértékbeli tartományokra, majd az abban lévő görbéket kiátlagolva "tipikus" görbefajtákat tudunk meghatározni, amelyek közül kiválaszthatjuk az aktuális ciklus minimumára és az előző ciklus végére legjobban illeszkedőt, és így előrejelzést adhatunk a kibontakozóban lévő ciklusra. Ezt a hajtogatást szokásosan a minimumoknál fogva teszik meg, (hiszen azoknak a szórása volt az eddig ismert legkisebb), én

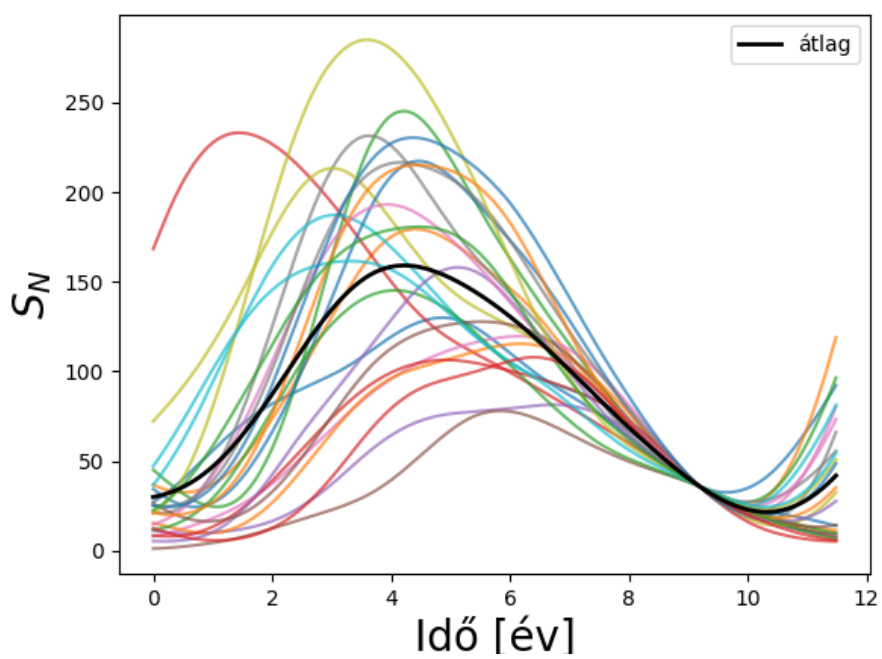
itt azonban az előző eredmény alapján a leszállóágak $S_N = 35$ -ös értékének helyeit választom. Az 13-havi futóátlaggal simított adatsor esetében az eredményt a 18. ábra tartalmazza, míg a Gauss-szűrővel simított adatsorok esetén a 19. és 20.



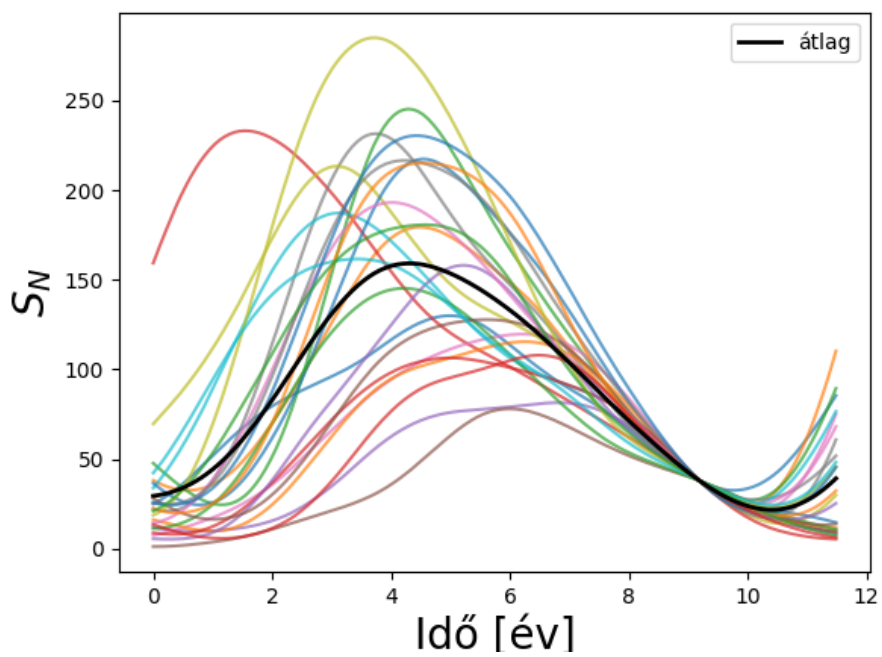
18. ábra. $S_N=35$ -nél összehajtogatott ciklusok

Az ábra "kuszasága" nem meglepő és nem biztató, azonban a tipikus görbék legyártása egy későbbi dolgozat témája lesz, és elkészültük előtt nem lehet egyértelműen megállapítani, hogy mennyire lesz pontos.

A Gauss-szűrővel elvégeztem $S_N = 35$ és 37 érték mellett is a szuperponálást, mert a 15. ábra ennél a két értéknél minimális, az így kapott görbeseregeket a 19. és 20. ábra tartalmazza.



19. ábra. $S_N = 35$ -es érték menti szuperponálás



20. ábra. $S_N = 37$ -es érték menti szuperponálás

4. Konklúzió, diszkusszió

A napsiklus-előrejelzés optimalizálása céljából alkalmazott megközelítések nem adtak szignifikánsan jobb eredményt, így az előrejelzést optimalizálni nem sikerült, viszont kaptunk egy új eredményt, miszerint az $S_N = 35$ -ös napfoltszámértéket hasonlóan kis szórással veszi fel az adatsor, mint a minimumokat, és így egy kaptunk egy új eszközt is, amelynek segítségével az eddigi módszerekhez hasonló minőségű előrejelzést leszünk képesek adni, és így a jövőben érdemes lehet összehasonlítani az így kapott előrejelzéseket más módszerekből kapott előrejelzésekkel. Fontos további eredmény, hogy sikerült a Waldmeier-szabálynak egyértelmű bizonyítékát találni.

A jövőben szeretnék predikciót adni az itt kapott eredmények felhasználásával, illetve fizikai alapokon nyugvó paraméterek vizsgálatát is bevonni a napsiklus-előrejelzésbe.

Hivatkozások

- [1] SILSO World Data Center. „The International Sunspot Number”. *International Sunspot Number Monthly Bulletin and online catalogue* (2024). URL: <http://www.sidc.be/silso/datafiles>.
- [2] F. Clette, L. Lefèvre, T. Chatzistergos és tsai. „Recalibration of the Sunspot-Number: Status Report”. *Sol Phys* 298.44 (2023). DOI: 10.1007/s11207-023-02136-3.
- [3] D.H. Hathaway. „The Solar Cycle”. *Living Rev. Sol. Phys.* 12.4 (2015). DOI: 10.1007/lrsp-2015-4.
- [4] K. Petrovay. „Solar cycle prediction”. *Living Rev Sol Phys* 17.2 (2020). DOI: 10.1007/s41116-020-0022-z.
- [5] M. Schüssler R. Cameron. „Solar Cycle Prediction Using Precursors and Flux Transport Models”. *The Astrophysical Journal* 659.1 (2007). DOI: 10.1086/512049.

"A" Függelék

Az alábbiakban felsorolva találhatóak a saját eredményeim, amelyeket a dolgozatban bemutatok:

- Implementáltam Pythonban egy Gauss-szűrőt és ezzel simítottam az adatsort
- Interpoláltam az adatsort a könnyebb kezelhetőség érdekében
- Implementáltam Pythonban egy keresőalgoritmust, amely segítségével a futóátlaggal és a Gauss-szűrővel simított napfolt-relatívszámgörbében is fix napfoltszámértékeket tudok keresni és azok helyét ábrázolni.
- Implementáltam Pythonban egy algoritmust, amely segítségével napfoltszámok egy tetszőleges intervallumát az imént leírt szempontból megvizsgáltam, és az egyes napfoltszámértékek mellett az egyes ciklusokban megtalált pontok közötti időbeli távolságok szórását ábrázoltam a napfoltszám függvényében. Mindezt megtettem mindkét simítási módszerrel nyert görbére.
- Implementáltam Pythonban egy további algoritmust, hogy az egyes ciklusokon belül, a ciklus méretéhez arányosított skálán megkeressem azokat a pontokat, amelyek a maguk ciklusain belül egy adott százalékos értékhez tartoznak. Ezt a módszert is alkalmaztam a futóátlaggal és a Gauss-szűrővel simított napfolt-relatívszámgörbére is.
- Mindkét imént leírt algoritmust egyaránt alkalmaztam külön-külön a le- és felszállóágakon belüli keresésre is.
- Létrehoztam a szuperponált epochák módszerének alapját képező szuperponált ábrát a fix napfoltszámkeresésből kapott optimális 35-ös napfoltszámértékű pontok mentén történő felszabdalással és egymásrillesztéssel. Ezt az algoritmust is Pythonban implementáltam, és alkalmaztam a futóátlaggal és a Gauss-szűrővel simított napfolt-relatívszámgörbére is.
- Megvizsgáltam az optimális 35-ös napfoltszámértékű pontok és az őket követő ciklusok minimumának időbeli távolságának és az őket követő maximum napfoltszámértékének kapcsolatát szintén egy Pythonban implementált algoritmussal, és a Waldmeier-szabálynak megfelelő csökkenő tendenciát mutató adathalmazt kaptam.

A dolgozatban a bevezetésben található ábra kivételével az összes ábra saját készítésű.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm szépen témavezetőmnek, Dr. Petrovay Kristófnak, hogy bevezetett a tudományág alapjaiba, iránymutatást adott a dolgozat írása előtt és közben, és számos észrevétellel javította annak minőségét! Köszönöm továbbá Asztalos Balázsnak és Soós Szabolcsnak a motiváló környezet megteremtését, a csapatukba való befogadásomat és a dolgozat írásában nyújtott segítséget, tanácsaikat!